FORSCHUNGSINITIATIVE Zukunft BAU

F 2935

Markus Plank, Björn Frettlöhr,
Jan Quappen, Werner Sobek

Strukturoptimierte Türme für Offshore – Windenergieanlagen aus UHFFB in Segmentbauweise

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

F 2935

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9431-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Universität Stuttgart

ILEK

SWE Stiftungslehrstuhl Windenergie am Institut für Flugzeugbau

Abschlussbericht

Strukturoptimierte Türme für Offshore – Windenergieanlagen aus UHFFB in Segmentbauweise

Markus Plank[1], Björn Frettlöhr[1], Jan Quappen[2],

Werner Sobek[1]

[1] Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart

[2] Stiftungslehrstuhl Windenergie (SWE), Universität Stuttgart

September 2014

Universität Stuttgart

ILEK

SWE Stiftungslehrstuhl Windenergie am Institut für Flugzeugbau

Abschlussbericht

Strukturoptimierte Türme für Offshore – Windenergieanlagen aus UHFFB in Segmentbauweise

Kurztitel: UHFFB - Windenergietürme

Antragsteller: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK)
Universität Stuttgart

Projektleiter: Dipl.-Ing. Markus Plank (ILEK) – ab 01.06.2011
Dr.-Ing. Björn Frettlöhr (ILEK) – bis 31.05.2011

Projektbearbeitung: Dipl.-Ing. Markus Plank (ILEK)
Dr.-Ing. Björn Frettlöhr (ILEK)
Dipl.-Ing. Jan Quappen (SWE)

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert.

Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7- 09.25 / II 2 – F20-09-43

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Verdankungen

Die Autoren danken dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) für die Bewilligung und Förderung des Forschungsprojekts im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“.

Unser weiterer Dank gilt den Kooperationspartnern:

- Ed. Züblin AG, Stuttgart, für die finanzielle sowie wissenschaftliche und technische Unterstützung durch Ingenieure des Technischen Büro für Baukonstruktion (TBK);
- Lafarge, Paris, für die Lieferung des UHFFB Ductal® sowie die technische Unterstützung durch einen Ingenieur und die wissenschaftliche Begleitung.

Wir danken den folgenden Damen und Herren für die Mitarbeit im Beratergremium und die gute Zusammenarbeit:

- Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt, Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe in Bauwesen;
- Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Bischoff, Universität Stuttgart, Institut für Baustatik und Baudynamik;
- Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen, TU München, cbm – Centrum Baustoffe und Materialprüfung;
- Dr.-Ing. Tanja Brockmann, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR);
- Dr. Michael Simon, Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau i.A. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR);
- Dr. Michael Brüggemann, Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau i.A. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).

Die Versuche wurden an der MPA Stuttgart - Otto-Graf-Institut (FMPA) durchgeführt. Wir danken den folgenden Herren für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung:

- Dr.-Ing. Karim Hariri, Abteilung 11 Mineralische Baustoffe;
- Dr.-Ing. Dieter Lotze, Abteilung 21 Baukonstruktionen und Bauteilprüfung.

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen **11**

1 Motivation und Zielsetzung **17**

1.1 Motivation 17

1.2 Zielsetzung 19

1.3 Inhalt – Überblick und Abgrenzung 20

2 Standortbedingungen und *Design Basis* **23**

2.1 Allgemeines 23

2.2 Standort und Kenndaten der OWEA 23

2.3 Baugrundeigenschaften 26

2.4 Maritime Bedingungen 26

2.5 Windverhältnisse 28

3 Logistikkonzept **29**

3.1 Komponenten einer OWEA 29

3.2 Gründungsstrukturen für OWEA 30

3.3 Bauablauf und Rückbau von OWEA 32

3.4 STRABAG Serial System 33

3.4.1 Systemlösung 33

3.4.2 Terminal 33

3.4.3 Installationsschiff 35

3.4.4 Schwerkraftfundament 35

4 Entwurf eines Turmtragwerks aus UHFFB in Segmentbauweise **37**

4.1 Vorbemerkung 37

4.2 Anforderungskatalog 37

4.3 Beschreibung des Turmkonzepts 38

4.3.1 Material und Geometrie 38

4.3.2 Vorspannung 41

4.3.3 Fuge 45

5 Versuche zum Materialverhalten von UHFFB **47**

5.1 Versuchsprogramm und Bezeichnung der Versuchs- und Probekörper 47

5.2 Versuchs- und Probekörper 48

5.2.1 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften 48

5.2.2 Geometrie der Versuchs- und Probekörper 50
5.2.2.1 Druckversuche und E-Modul-Prüfung 50
5.2.2.2 Biegezugversuche 50
5.2.2.3 Zentrische Zugversuche 50
5.2.3 Herstellung und Lagerung der Versuchs- und Probekörper 51
5.3 Druckversuche und E-Modul-Prüfung 55
5.3.1 Versuchsstand und -durchführung 55
5.3.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper 56
5.3.3 Versuchsergebnisse 56
5.3.3.1 Druckversuche 56
5.3.3.2 E-Modul-Prüfung 61
5.3.3.3 Spannungs-Dehnungs-Beziehung 63
5.4 Biegezugversuche 65
5.4.1 Versuchsstand und -durchführung 65
5.4.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper 66
5.4.2.1 Probekörper ohne Kerbe 66
5.4.2.2 Probekörper mit Kerbe 66
5.4.3 Versuchsergebnisse der Biegezugversuche an Probekörpern ohne Kerbe 67
5.4.4 Versuchsergebnisse der Biegezugversuch an Probekörpern mit Kerbe 73
5.5 Zentrische Zugversuche 76
5.5.1 Versuchsstand und -durchführung 76
5.5.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Versuchskörper 78
5.5.2.1 Versuchskörper ohne Kerbe 78
5.5.2.2 Versuchskörper mit Kerbe 80
5.5.3 Versuchsergebnisse der zentrischen Zugversuche an Versuchskörpern ohne Kerbe 82
5.5.3.1 Spannungs-Dehnungs-Beziehung 82
5.5.3.2 Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung 95
5.5.4 Versuchsergebnisse der zentrischen Zugversuche an Versuchskörpern mit Kerbe 100
5.5.4.1 Spannungs-Dehnungs-Beziehung 100
5.5.4.2 Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung 107
5.5.4.3 Faserorientierungsmessung und Ermittlung der 1D Zugfestigkeit 112
5.6 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse 118

6 Bemessungswerte von UHFFB 121

6.1 Teilsicherheitsbeiwerte 121

6.2 Definition der Bemessungswerte von UHFFB 122

6.2.1 Definition der Bemessungswerte für einaxiale Druckbeanspruchung 122

6.2.2 Definition der Bemessungswerte für einaxiale Zugbeanspruchung 125

6.3 Ermüdungsverhalten von UHFFB unter Druckschwellbeanspruchung 128

6.3.1 Allgemeines 128

6.3.2 Wöhlerlinien in Anlehnung an CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010) 128

6.3.3 Wöhlerlinie für UHFFB nach Wefer (2010) 130

6.3.4 Materialparameter für Ermüdungsnachweis von UHFFB 133

6.4 Zeitabhängige Verformungen von UHFFB 134

6.4.1 Schwinden 134

6.4.2 Kriechen 134

7 Maritime Bedingungen und Windverhältnisse 135

7.1 Ergänzende Annahmen zur Design Basis 135

7.2 Standorte und Ausstattung der Messstationen 135

7.3 Auswertung der Messdaten 138

7.3.1 Scatter-Diagramm 138

7.3.2 NSB II 138

7.3.3 Forschungsplattform FINO1 149

7.4 Beurteilung der Scatter-Diagramme 154

8 Auslegung des Turmtragwerks aus UHFFB in Segmentbauweise 155

8.1 Eigenfrequenzanalyse 155

8.1.1 Berechnung der Gründungsfedersteifigkeit 155

8.1.2 Mehrmassenschwingermodell für die Eigenfrequenzanalyse 156

8.1.3 Parameterstudie zur Eigenfrequenz 160

8.1.4 Campbell-Diagramm der Variante A und B 164

8.2 Gesamtdynamische Berechnung 167

8.2.1 Allgemeines 167

8.2.2 Simulationsprogramm Flex 5 168

8.2.3 Modellierung der OWEA mit Flex 5 170

8.2.4 Definition der Lastfälle 177

8.3 Ermittlung der Schnittgrößen 180

8.3.1 Allgemeines 180
8.3.2 Schnittgrößen als Ergebnis der Simulation mit Flex 5 180
8.3.3 Schnittgrößen aus Vorspannung 182
8.3.4 Schnittgrößen aus Temperatur 183
8.3.5 Schnittgrößen aus Imperfektion 184
8.3.6 Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung 185
8.4 Ermüdung 186
8.5 Nachweis der Tragstruktur 188
8.5.1 Allgemeines 188
8.5.2 Turmvariante 1 189
8.5.2.1 Dimensionierung der Vorspannkraft 189
8.5.2.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) 196
8.5.2.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) 205
8.5.3 Turmvariante 3 207
8.5.4 Turmvariante 5 211
8.5.5 Vergleich der untersuchten Turmvarianten 214

9 Versuche an Fugen 215
9.1 Allgemeines 215
9.1.1 Lage der Fuge im Bauteil 215
9.1.2 Fugenarten 216
9.2 Übersicht über das Versuchsprogramm zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen 216
9.2.1 Zweck der Versuche 216
9.2.2 Geometrie der Versuchskörper und Auswertung der Versuche 217
9.2.3 Versuchsprogramm 220
9.2.4 Fugengeometrie 222
9.2.5 Herstellung und Passgenauigkeit der Fugen 225

10 Versuche zur Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung 227
10.1 Versuchsprogramm und Bezeichnung der Versuchs- und Probekörper 227
10.2 Versuchs- und Probekörper 230
10.2.1 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften 230
10.2.2 Geometrie der Versuchs- und Probekörper 231
10.2.2.1 Druckversuche und E-Modul-Prüfung 231
10.2.2.2 Biegezugversuche 231

10.2.2.3 Schub-Druck-Versuche 231
10.2.3 Herstellen und Lagerung der Versuchs- und Probekörper 234
10.3 Druckversuche und E-Modul-Prüfung 239
10.3.1 Versuchsstand und –durchführung 239
10.3.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper 239
10.3.3 Versuchsergebnisse 239
10.3.3.1 Druckversuche 239
10.3.3.2 E-Modul-Prüfung 243
10.4 Biegezugversuche 244
10.4.1 Versuchsstand und –durchführung 244
10.4.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper 244
10.4.3 Versuchsergebnisse 244
10.5 Schub-Druck-Versuche 252
10.5.1 Versuchsstand und –durchführung 252
10.5.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Versuchskörper 253
10.5.3 Versuchsergebnisse 255
10.5.3.1 Auswertung der Versuche 255
10.5.3.2 Versuchskörper ohne Fuge (Referenzprismen) 255
10.5.3.3 Versuchskörper mit sehr glatter Fuge 259
10.5.3.4 Versuchskörper mit gestrahlter Fuge 261
10.5.3.5 Versuchskörper mit rauer Fuge 263
10.5.3.6 Versuchskörper mit verzahnter Fuge 266
10.6 Zusammenfassung der Ergebnisse 269

11 Versuche zur Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung 271

11.1 Versuchsprogramm und Bezeichnung der Versuchs- und Probekörper 271
11.2 Versuchs- und Probekörper 275
11.2.1 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften 275
11.2.2 Geometrie der Versuchs- und Probekörper 275
11.2.2.1 Druckversuche 275
11.2.2.2 Biegezugversuche 275
11.2.2.3 Abscherversuche 276
11.2.3 Herstellen und Lagerung der Versuchs- Probekörper 277
11.3 Druckversuche 282
11.3.1 Versuchsstand und –durchführung 282

11.3.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper 282
11.3.3 Versuchsergebnisse 282
11.4 Biegezugversuche 285
11.4.1 Versuchsstand und –durchführung 285
11.4.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper 285
11.4.3 Versuchsergebnisse 285
11.5 Abscherversuche 293
11.5.1 Versuchsstand und –durchführung 293
11.5.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Versuchskörper 296
11.5.3 Versuchsergebnisse unter statischer Belastung 297
11.5.3.1 Auswertung der Versuche 297
11.5.3.2 Ergebnisse für die Versuchskörper mit sehr glatter Fuge 299
11.5.3.3 Ergebnisse für die Versuchskörper mit verzahnter Fuge 305
11.5.4 Versuchsergebnisse unter zyklischer Belastung 313
11.5.4.1 Auswertung der Versuche 313
11.5.4.2 Ergebnisse für die Versuchskörper mit sehr glatter Fuge 314
11.5.4.3 Ergebnisse für die Versuchskörper mit verzahnter Fuge 324
11.6 Zusammenfassung der Ergebnisse 338

12 Zusammenfassung und Ausblick 345
12.1 Zusammenfassung 345
12.2 Schlussfolgerung und Ausblick 350

Schrifttum 351

Verzeichnis der Bilder 357

Verzeichnis der Tabellen 371

Anhang A Materialverhalten von UHFFB 377
A.1 Druckversuche und E-Modul-Prüfung 380
A.1.1 Charge C1 380
A.1.2 Charge C2 384
A.1.3 Charge C3 388
A.2 Biegezugversuche – Probekörper ohne Kerbe 392
A.2.1 Charge C1 392
A.2.2 Charge C2 396
A.2.3 Charge C3 400

A.3 Biegezugversuche – Probekörper mit Kerbe 404

A.4 Zentrische Zugversuche – Versuchskörper ohne Kerbe 408

A.4.1 Charge C2 408

A.4.2 Charge C3 412

A.5 Zentrische Zugversuche – Versuchskörper mit Kerbe 419

A.5.1 Charge C1 419

A.5.2 Charge C2 423

Anhang B Schnittgrößen und Ergebnisse der UHFFB Turmvarianten 427

B.1 Turmvariante 1 428

B.1.1 Schnittgrößen 428

B.1.1.1 Schnittgrößen aus der Simulation mit Flex 5 (charakteristische Schnittgrößen) 428

B.1.1.2 Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen) 436

B.1.1.3 Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Power Production Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen) 437

B.1.1.4 Sonstige Schnittgrößen: $M_{LDD99\%}$, M_{temp}, M_{imp} (charakteristische Schnittgrößen) 438

B.1.2 Dimensionierung der Vorspannkraft 439

B.1.2.1 Nachweis der Dekompression 439

B.1.2.2 Begrenzung der Klaffung der Fuge 440

B.1.2.3 Anzahl der Spannglieder 441

B.1.3 Nachweise 442

B.1.3.1 Normalspannungsnachweis (ULS) 442

B.1.3.2 Schubspannungsnachweis (ULS) 444

B.1.3.3 Kraftübertragung in der Fuge (ULS) 449

B.1.3.4 Spannungsbegrenzung (SLS) 453

B.2 Schnittgrößen und Ergebnisse der Turmvariante 3 455

B.2.1 Schnittgrößen 455

B.2.1.1 Schnittgrößen aus der Simulation mit Flex 5 (charakteristische Schnittgrößen) 455

B.2.1.2 Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen) 463

B.2.1.3 Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Power Production Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen) 464

B.2.1.4 Sonstige Schnittgrößen: $M_{LDD99\%}$, M_{temp}, M_{imp} (charakteristische Schnittgrößen) 465

B.2.2 Nachweise 466

B.2.2.1 Normalspannungsnachweis (ULS) 466

B.2.2.2 Schubspannungsnachweis (ULS) 468

B.2.2.3 Kraftübertrag in der Fuge (ULS) 473

B.2.2.4 Spannungsbegrenzung (SLS) 477

B.3 Schnittgrößen und Ergebnisse der Turmvariante 5 479

B.3.1 Schnittgrößen 479

B.3.1.1 Schnittgrößen aus der Simulation mit Flex 5 (charakteristische Schnittgrößen) 479

B.3.1.2 Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen) 487

B.3.1.3 Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Power Production Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen) 488

B.3.1.4 Sonstige Schnittgrößen: $M_{LDD99\%}$, M_{temp}, M_{imp} (charakteristische Schnittgrößen) 489

B.3.2 Nachweise 490

B.3.2.1 Normalspannungsnachweis (ULS) 490

B.3.2.2 Schubspannungsnachweis (ULS) 492

B.3.2.3 Kraftübertragung in der Fuge (ULS) 497

B.3.2.4 Spannungsbegrenzung (SLS) 501

Anhang C Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung 503

C.1 Druckversuche und E-Modul-Prüfung 506

C.1.1 Charge C4 506

C.1.2 Charge C5 510

C.1.3 Charge C6 514

C.1.4 Charge C7 514

C.1.5 Charge C8 515

C.1.6 Charge C9 515

C.1.7 Charge C10 516

C.1.8 Charge C11 516

C.2 Biegezugversuche 517

C.2.1 Charge C4 517

C.2.2 Charge C5 521

C.2.3 Charge C6 525

C.2.4 Charge C7 529

C.2.5 Charge C8 533
C.2.6 Charge C9 537
C.2.7 Charge C10 541
C.2.8 Charge C11 545
C.3 Schub-Druck-Versuche 549
C.3.1 Versuchskörper ohne Fuge (Referenzprismen) 549
C.3.2 Versuchskörper mit sehr glatter Fuge 557
C.3.3 Versuchskörper mit gestrahlter Fuge 563
C.3.4 Versuchskörper mit rauer Fuge 569
C.3.5 Versuchskörper mit verzahnter Fuge 579

Anhang D Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung 589

D.1 Druckversuche 593
D.1.1 Charge C12 593
D.1.2 Charge C13 593
D.1.3 Charge C14 594
D.1.4 Charge C15 594
D.1.5 Charge C16 595
D.1.6 Charge C17 595
D.1.7 Charge C18 596
D.1.8 Charge C19 596
D.2 Biegezugversuche 597
D.2.1 Charge C12 597
D.2.2 Charge C13 601
D.2.3 Charge C14 605
D.2.4 Charge C15 609
D.2.5 Charge C16 613
D.2.6 Charge C17 617
D.2.7 Charge C18 621
D.2.8 Charge C19 625
D.3 Abscherversuche unter statischer Belastung 629
D.3.1 Versuchskörper mit sehr glatter Fuge 629
D.3.1.1 SG_S1 (C12 und C13) 629
D.3.1.2 SG_S2 (C14 und C15) 635
D.3.1.3 SG_S3 (C16 und C17) 641

D.3.2 Versuchskörper mit verzahnter Fuge 647

D.3.2.1 V_S1 (C12 und C13) 647

D.3.2.2 V_S2 (C14 und C15) 653

D.3.2.3 V_S3 (C16 und C17) 659

D.3.2.4 V_S4 (C18 und C19) 665

D.4 Abscherversuche unter zyklischer Belastung 673

D.4.1 Versuchskörper mit sehr glatter Fuge 673

D.4.1.1 SG_S1 (C12 und C13) 673

D.4.1.2 SG_S2 (C14 und C15) 683

D.4.1.3 SG_S3 (C16 und C17) 691

D.4.2 Versuchskörper mit verzahnter Fuge 700

D.4.2.1 V_S1 (C12 und C13) 700

D.4.2.2 V_S2 (C14 und C15) 706

D.4.2.3 V_S3 (C16 und C17) 715

D.4.2.4 V_S4 (C18 und C19) 724

Bezeichnungen

Große lateinische Buchstaben

A	Skalierungsparameter
A_c	Querschnittsfläche des Betons
A_j	Fläche der Fuge
ΔS_{cd}	Schwingweite
E_c	E-Modul von Beton unter Druckbeanspruchung (Sekantenwert)
E_{cm}	Mittelwert des E-Moduls von Beton unter Druckbeanspruchung (Sekantenwert)
E_{ct}	E-Modul von Beton unter Zugbeanspruchung (Sekantenwert)
E_{ctm}	Mittelwert des E-Moduls von Beton unter Zugbeanspruchung (Sekantenwert)
E_{max}	Energiemaximum einer Einzelwelle
F	Prüfkraft
$F_{ct,el}$	Prüfkraft bei Erreichen der Zugspannung $f_{ct,el}$ an der Elastizitätsgrenze
$F_{ctfl,el}$	Prüfkraft bei Erreichen der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ an der Elastizitätsgrenze
F_{max}	maximale Prüfkraft
F_o	Oberlast
F_u	Unterlast
G_{cr1}	„multi-cracking“ Energie
G_{cr2}	Bruchenergie
$G_{cr2,optische\ Messung}$	Bruchenergie aus optischer Messung
G_{el}	elastische Energie
H_{max}	maximale Höhe einer Einzelwelle
H_{red}	reduzierte maximale Höhe einer Einzelwelle
H_s	signifikante Wellenhöhe
I	Flächenträgheitsmoment
$\underline{K}$	Gesamtsteifigkeitsmatrix
K_e	linear-elastische Elementsteifigkeitsmatrix
K_g	geometrische Elementsteifigkeitsmatrix
L	Wellenhöhe bzw. Elementlänge
M	Moment

M_T	Torsionsmoment
$\underline{M}$	Gesamtmassenmatrix
M_{Ed}	Bemessungswert des einwirkenden Moments
$M_{T,Ed}$	Bemessungswert des einwirkenden Torsionsmoments
$M_{T,Rd(ct)}$	Bemessungswert des aufnehmbaren Torsionsmoments
N	Normalkraft bzw. Lastspielzahl oder Bruchlastspielzahl
N_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft
N_j	normal zur Fuge wirkende Kraft
P	Vorspannkraft
P_d	Bemessungswert der Vorspannkraft
P_k	charakteristischer Wert der Vorspannkraft
R	Radius
$S_{cd,max}$	maximale bezogene Druckspannung des Betons unter den zu untersuchenden Einwirkungskombinationen
$S_{cd,min}$	minimale bezogene Druckspannung des Betons unter den zu untersuchenden Einwirkungskombinationen
T_m	mittlere Periode
T_o	bezogene Oberlast bzw. Oberspannung
T_p	Peak-Periode
T_u	bezogene Unterlast bzw. Unterspannung
V	Windgeschwindigkeit bzw. Querkraft
V_{ave}	mittlere Windgeschwindigkeit
V_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Querkraft
V_{hub}	Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe
V_j	parallel zur Fuge wirkende Kraft
$V_{Rd,ct}$	Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft
W	Widerstandsmoment

Kleine lateinische Buchstaben

b	Querschnittsbreite
c	Beiwert, der von der Rauigkeit der Fuge abhängt
d	Durchmesser
d_f	Faserdurchmesser

Δl	Längenänderung
Δn	Verformungen normal zur Fuge
Δn	Verformungen parallel zur Fuge
f	Frequenz
f_1	1. Eigenfrequenz
f_B	Blattdurchgangsfrequenz (3P Erregung)
f_{cR}	rechnerischer Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons bei nichtlinearen Verfahren der Schnittgrößenermittlung
f_R	Rotorfrequenz (1P Erregung)
f_c	Zylinderdruckfestigkeit des Betons
f_{cd}	Bemessungswert der einaxialen Druckfestigkeit des Betons
$f_{cd,fat}$	Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit
f_{ck}	charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons (5 % Fraktilwert)
f_{cm}	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons
f_{ct}	zentrische Zugfestigkeit des Betons
$f_{ct,1}$ bis $f_{ct,5}$	charakteristische Punkte der Zugspannung σ_{ct}
$f_{ct,1D}$	zentrische Zugfestigkeit des Betons bei eindimensionaler Faserausrichtung
$f_{ct,el}$	Zugspannung an der Elastizitätsgrenze
f_{ctd}	Bemessungswert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons
$f_{ctd,el}$	Bemessungswert der Zugspannung bei Erreichen der Elastizitätsgrenze
f_{ctfl}	Biegezugfestigkeit des Betons
$f_{ctfl,el}$	Biegezugrandspannung an der Elastizitätsgrenze
f_{ctk}	charakteristische Zugfestigkeit des Betons (5 % Fraktilwert)
$f_{ctk,1D}$	charakteristische Zugfestigkeit des Betons bei eindimensionaler Faserausrichtung (5 % Fraktilwert)
$f_{ctk,el}$	charakteristische Zugspannung bei Erreichen der Elastizitätsgrenze (5 % Fraktilwert)
$f_{ctm,1D}$	Mittelwert der zentrische Zugfestigkeit des Betons bei eindimensionaler Faserausrichtung
$f_{ctm,el}$	Mittelwert der Zugspannung an der Elastizitätsgrenze
f_p	Peak-Frequenz
h	Querschnittshöhe
h_k	Kerbtiefe
k	Formfaktor
k_h	horizontale Federsteifigkeit
k_φ	Drehfedersteifigkeit
k_v	vertikale Federsteifigkeit

l	Länge bzw. Messlänge
l_f	Faserlänge
m	Mittelwert bzw. Masse
n	Stichprobenumfang
n_f	Faseranzahl
r_{inf}	unterer Beiwert zur Berücksichtigung der Streuung der Vorspannkraft
r_{sup}	oberer Beiwert zur Berücksichtigung der Streuung der Vorspannkraft
s	Standardabweichung
t	Zahnhöhe
v	Variationskoeffizient
w_m	gemittelte Mittendurchbiegung
$w_m(f_{ctfl,el})$	gemittelte Mittendurchbiegung bei Erreichen der Biegezugrandspannung an der Elastizitätsgrenze
$w_m(f_{ctfl})$	gemittelte Mittendurchbiegung bei Erreichen der Biegezugfestigkeit
w_r	Rissbreite
$w_r(f_{ct})$	Rissbreite bei Erreichen der Zugfestigkeit
$w_r(f_{ctfl})$	Rissbreite bei Erreichen der Biegezugfestigkeit
z_{hub}	Nabenhöhe
z_k	Länge der Zahnkrone

Griechische Buchstaben

α	Irrtumswahrscheinlichkeit bzw. Höhenexponent bzw. Transformationswinkel bzw. Fugenneigungswinkel
α_{cc}	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Langzeitwirkungen auf die Druckfestigkeit des Betons
α_{ct}	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Langzeitwirkungen auf die Zugfestigkeit des Betons
$\beta_{cc}(t_0)$	Koeffizient zur Berücksichtigung des Festigkeitsanstiegs infolge fortschreitender Hydratation
γ	statistische Sicherheit bzw. Neigung der Zahnflanke
γ_c	Teilsicherheitsbeiwert für Beton bzw. UHFFB
γ'_c	zusätzlicher Abminderungsfaktor für UHFFB
γ_{cf}	Teilsicherheitsbeiwert für gefaserten UHPC (= UHFFB)
γ_P	Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung infolge Vorspannung

γ_R	Teilsicherheitsbeiwert für den Systemwiderstand bei nichtlinearen Verfahren der Schnittgrößenermittlung
γ_s	Teilsicherheitsbeiwert für Betonstahl bzw. Spannstahl
γ_{sd}	Teilsicherheitsbeiwert für Ermüdungslasten in Abhängigkeit von der Genauigkeit der Lastermittlung
δ_s	Strukturdämpfung
ε	Dehnung
ε_c	Betondruckdehnung
ε_{c1}	Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit des Betons
ε_{ct}	Betonzugdehnung bzw. Dehnung bei Erreichen der Zugfestigkeit des Betons
ε_{ct1} bis ε_{ct5}	korrespondierende Dehnungen zu den charakteristischen Punkten der Zugspannung σ_{ct}
$\varepsilon_{ct,el}$	Dehnung bei Erreichen der Zugspannung an der Elastizitätsgrenze
ε_o	Dehnung korrespondierend zur Oberspannung
ε_u	Dehnung korrespondierend zur Unterspannung
η	Faserorientierungsfaktor
η_c	Faktor zur Berücksichtigung ungleichmäßiger Verteilung der Druckspannung des Betons
μ	Beiwert, der von der Rauigkeit der Fuge abhängt
ρ	Rohdichte bzw. Fasergehalt
σ_c	Druckspannung des Betons
$\sigma_{c,max}$	maximaler Betrag der Druckspannung des Betons
$\sigma_{c,min}$	minimaler Betrag der Druckspannung des Betons
σ_{ct}	Zugspannung des Betons
σ_{ctfl}	Biegezugrandspannung
σ_j	Normalspannung in der Fuge
σ_o	obere Prüfspannung
σ_u	untere Prüfspannung
τ_j	Schubspannung in der Fuge
φ_i	Winkel zwischen Beanspruchungsrichtung und Faserlängsachse
$\varphi(\infty,t_0)$	Endkriechzahl
χ	Korrelationsfunktion zwischen Faserorientierung und Zugfestigkeit
ω	Eigenkreisfrequenz

Abkürzungen

AWZ	ausschließliche Wirtschaftszone
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
DEWI	Deutsches Windenergie Institut
DIR	Richtung
DLC	Lastfall (engl. *design load case*)
DOF	Freiheitsgrad (engl. *degree of freedom*)
DUEN	Dünung
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
HAT	höchste astronomische Tide (engl. *highest astronomical tide*)
HSWL	höchster Ruhewasserstand (engl. *highest still water level*)
ILEK	Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren an der Universität Stuttgart
LAT	niedrigste astronomische Tide (engl. *lowest astronomical tide*)
LSWL	niedrigster Ruhewasserstand (engl. *lowest still water level*)
MSL	mittlere Meereshöhe (engl. *mean sea level*)
NSB II	Nordseeboje II
OWEA	Offshore-Windenergieanlage(n)
SLS	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (engl. *serviceability limit state*)
SWE	Stiftungslehrstuhl Windenergie an der Universität Stuttgart
UHFFB	ultrahochfester Faserfeinkornbeton
ULS	Grenzzustand der Tragfähigkeit (engl. *ultimate limit state*)

1 Motivation und Zielsetzung

1.1 Motivation

Im Jahr 1992 fand in Rio de Janeiro die Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung statt. Eines der wichtigsten Dokumente, das von der internationalen Staatengemeinschaft auf dem Weltgipfel verabschiedet wurde, war die Agenda 21. Die Agenda 21 ist ein globales Aktionsprogramm, welches detaillierte Handlungsaufträge für eine nachhaltige Entwicklung enthält. Die Umsetzung der Agenda 21wurde zur Aufgabe der Unterzeichnerstaaten erklärt, indem sie auf nationaler Ebene die dafür notwendigen Voraussetzungen schaffen.

Die deutsche Bundesregierung hat als Antwort darauf im Jahr 2002 die nationale Nachhaltigkeitsstrategie „Perspektiven für Deutschland“ beschlossen und darin das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung in Deutschland beschrieben. Einen der Schwerpunkte bildet eine nachhaltige Energiepolitik, als deren Eckpfeiler die Steigerung der Energieeffizienz und der Ausbau erneuerbarer Energien genannt werden. Die Energieversorgung soll künftig überwiegend durch erneuerbare Energieträger, wie Windenergie, Solarenergie, Wasserkraft, Geothermie und Biomasse, sichergestellt werden. Das größte Potential wird dabei der Nutzung der Windenergie beigemessen. Insbesondere der Ausbau der Offshore-Windenergie im Bereich deutscher Seegebiete auf bis zu 25000 Megawatt installierte Leistung wird bis zum Jahr 2030 für möglich gehalten. Als Voraussetzung dafür wird das Erreichen der Wirtschaftlichkeit durch Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen genannt [Bundesregierung (2002)].

Nach einer aktuellen Herstellerbefragung des Deutschen Windenergie Instituts (DEWI) waren bis Ende des Jahres 2013 gerade einmal 219 Windenergieanlagen mit einer Leistung von 915 Megawatt im Bereich deutscher Seegebiete installiert (vgl. Bild 1.1-1), wovon 116 Windenergieanlagen mit einer Leistung von 520 Megawatt am Netz waren.

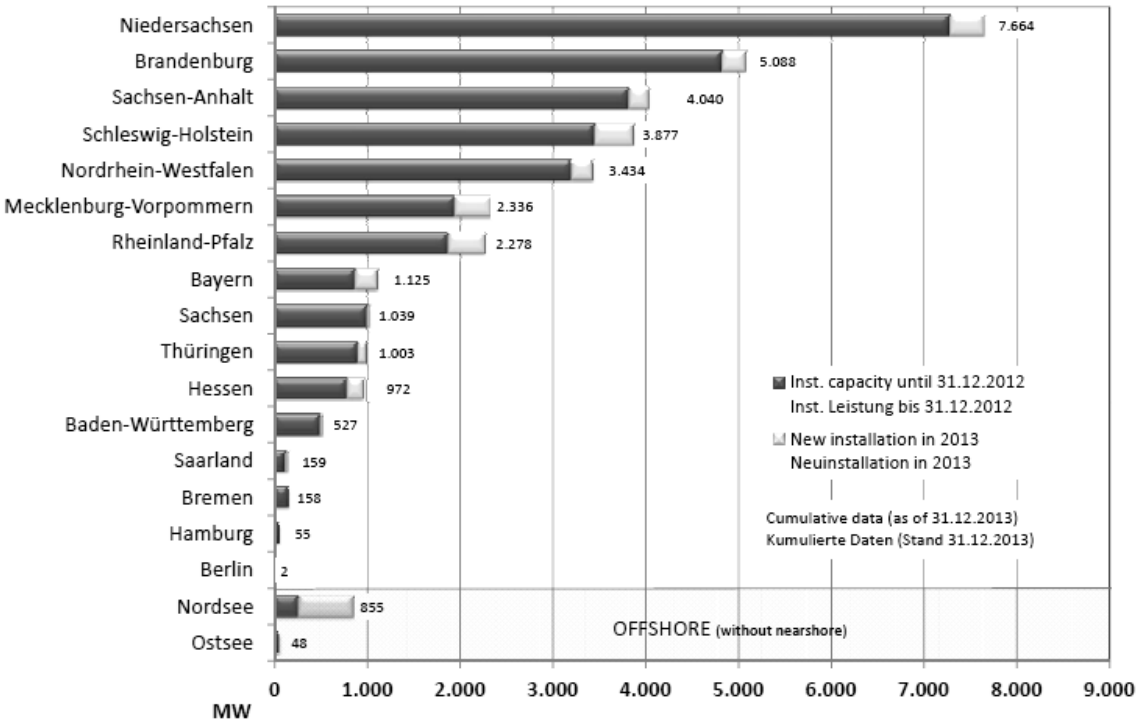


Bild 1.1-1: Installierte Leistung der an Land und auf See errichteten Windenergieanlagen [Ender (2014)]

Trotz der bescheidenen Fortschritte will die Bundesregierung jedoch im Zuge der kürzlich beschlossenen Energiewende an dem ehrgeizigen Ausbauziel von 25000 Megawatt installierter Leistung bis zum Jahr 2030 festhalten. Um den Ausbau der Offshore-Windenergie voranzubringen, hat die Bundesregierung Förderprogramme eingerichtet, die einerseits die Finanzierung und die Realisierung der ersten Offshore-Windparks absichern und andererseits Innovationsprozesse durch Forschung und Entwicklung beschleunigen sollen.

Basierend auf den ersten Erfahrungen mit im Betrieb befindlichen Offshore-Windparks sind nach einer aktuellen Studie des Marktforschungsinstituts wind:**research** noch zum Teil enorme Kostensenkungspotentiale entlang der Wertschöpfungskette der Offshore-Windenergie vorhanden (vgl. Bild 1.1-2). Nach Briese und Westhäuser (2013) müssen vor allem die hohen Fertigungs- und Betriebskosten gesenkt sowie kosteneffektive und auf die speziellen Anforderungen der Offshore-Windenergie abgestimmte Logistikkonzepte ausgearbeitet werden, damit ein wirtschaftlicher Betrieb von Offshore-Windparks sichergestellt werden kann und sich die Offshore-Windenergie mittel- und langfristig als ein marktfähiger Energieträger etablieren kann.

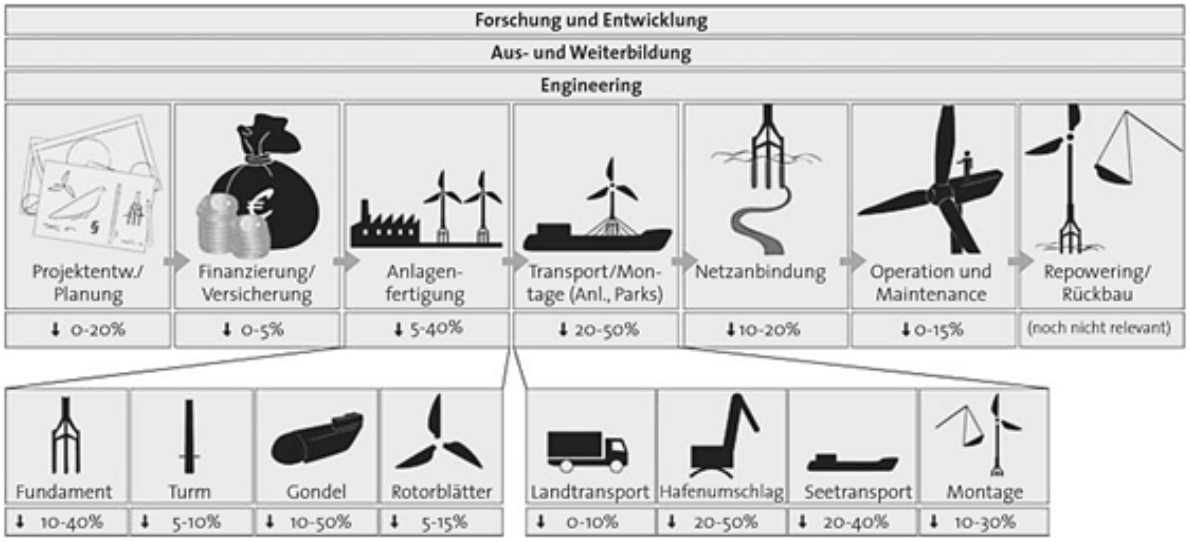


Bild 1.1-2: Kostensenkungspotentiale entlang der Wertschöpfungskette der Offshore-Windenergie [www.windresearch.de]

Bei den Gründungs- und Turmstrukturen bisher installierter Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) handelt es sich überwiegend um Konstruktionen aus Stahl. Der Vorteil von Stahlkonstruktionen ist das relativ geringe Eigengewicht bei gleichzeitig hoher Steifigkeit. Nachteilig sind allerdings die sehr hohen Herstellungskosten der Stahlsegmente und der aufwendige und kostspielige Korrosionsschutz aufgrund der aggressiven chemischen und klimatischen Einwirkungen. In Bezug auf den Korrosionsschutz gestalten sich insbesondere die Fügestellen der Stahlsegmente als problematisch. Sollte zudem der Stahlpreis weiter ansteigen, würde dies die Kosten für die Tragstruktur zusätzlich nach oben treiben. Kostengünstige Alternativen wären somit mehr denn je dringend erforderlich.

1.2 Zielsetzung

Eine wirtschaftlich vielversprechende Alternative zu Turmstrukturen aus Stahl stellt die Verwendung des Hochleistungswerkstoffs ultrahochfester Faserfeinkornbeton (UHFFB) in Kombination mit der Segmentbauweise dar.

Es sind insbesondere die herausragenden Materialeigenschaften des UHFFB, die für seine Verwendung bei Turmstrukturen von OWEA sprechen. Im Vergleich zu normalfestem Beton besitzt der UHFFB eine sehr viel höhere Druckfestigkeit, die sich in Abhängigkeit der Zusammensetzung und des Herstellungsverfahrens zwischen 150 MPa und 250 MPa bewegt. Die höhere Druckfestigkeit von UHFFB im Vergleich zu normalfestem Beton ermöglicht die Herstellung schlankerer und leichterer Turmstrukturen. Die daraus resultierende Reduktion des Eigengewichts ist unmittelbar mit der Einsparung von Rohstoffen und Energie verbunden, was in Zeiten knapper werdender Ressourcen immer mehr an Bedeutung gewinnt. UHFFB ist zudem ein sehr dauerhafter Werkstoff. Aufgrund des sehr dichten Gefüges ist der Widerstand gegen chemische und klimatische Einwirkungen hoch. Dies lässt auf geringere Lebenszykluskosten durch geringeren Wartungs- und Instandhaltungsaufwand der Tragstruktur schließen und damit auf eine höhere Wirtschaftlichkeit der OWEA. Für die Segmentbauweise, und damit die serielle Vorfertigung von Turmsegmenten im Werk, spricht zum einen die Sicherstellung einer gleich bleibend hohen materialtechnologischen Qualität und Maßhaltigkeit der Segmente und zum anderen die Reduzierung der Herstellungskosten durch effizienten Materialeinsatz und Verringerung des Arbeitsaufwands.

Das Forschungsprojekt leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Erforschung und Entwicklung innovativer Turmstrukturen für OWEA unter Verwendung von UHFFB, mit dem Ziel, die Verfügbarkeit von Alternativen für die Tragstruktur von OWEA zu erhöhen und die Kosten für die Tragstruktur von OWEA zu senken. Durch die Verwendung von UHFFB kann nicht nur ein ökonomischer, sondern auch ein Ressourcen schonender Weg beim seriellen Bau von OWEA eingeschlagen werden. Im Zentrum dieses Forschungsprojekts steht somit der Entwurf und die Auslegung einer Turmstruktur aus UHFFB in Segmentbauweise, die den Anforderungen an OWEA gerecht wird und den Belastungen aus den Umgebungsbedingungen und der aktiven Betriebsführung standhält. Einen weiteren Schwerpunkt des Forschungsprojekts stellt die experimentelle Untersuchung des Materialverhaltens von UHFFB dar, um die herausragenden mechanischen Eigenschaften von UHFFB für die Bemessung von Bauteilen bzw. Bauwerken aus UHFFB auszunutzen. Ein weiteres Augenmerk liegt auf der Ausbildung der Fuge zwischen Bauteilen aus UHFFB. Mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen soll die Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer und zyklischer Belastung bestimmt werden. Dabei wird sowohl die Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche als auch das Belastungsniveau variiert.

Durchgeführt wird das Forschungsprojekt federführend vom Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit dem Stiftungslehrstuhl Windenergie (SWE) der Universität Stuttgart sowie den Kooperationspartnern Ed. Züblin AG und Lafarge.

1.3 Inhalt – Überblick und Abgrenzung

Anders als im Bauwesen allgemein üblich können die Belastungen moderner Windenergieanlagen nicht anhand statischer Ersatzmodelle und statischer Ersatzlasten ermittelt werden. Stattdessen ist eine gesamtdynamische Berechnung notwendig, die die am Standort der Windenergieanlage vorherrschenden Umgebungsbedingungen sowie die Kenndaten der Windenergieanlage berücksichtigt. Diese in **Kapitel 2** zusammengefassten Randbedingungen bilden die Grundlage für den Entwurf und die Auslegung der OWEA.

In **Kapitel 3** werden zunächst allgemein Gründungsstrukturen für OWEA vorgestellt und auf die Bedeutung des Bauablaufs bzw. des gesamten Logistikkonzepts für die Wirtschaftlichkeit einer OWEA eingegangen. Im Anschluss daran wird das von der Zentralen Technik der Ed. Züblin AG entwickelt STRABAG Serial System vorgestellt. Die der Systemlösung zugrunde liegende Tragstruktur stellt die Ausgangsbasis für die in den folgenden Kapiteln dokumentierte Machbarkeitsstudie dar, ob der auf das Schwerkraftfundament aufgesetzte Stahlrohrturm prinzipiell durch eine zentrisch vorgespannte Turmstruktur aus UHFFB in Segmentbauweise ersetzt werden kann.

In **Kapitel 4** wird unter Berücksichtigung der in Kapitel 2 zusammengefassten Randbedingungen und dem in Kapitel 3 vorgestellten Logistikkonzept der Anforderungskatalog an Turmstrukturen für OWEA formuliert sowie das Konzept für eine zentrisch vorgespannte Turmstruktur aus UHFFB in Segmentbauweise ausführlich erläutert.

Kapitel 5 beschreibt die experimentellen Untersuchungen zum Materialverhalten von UHFFB. In diesem Forschungsprojekt wurde der von der Firma Lafarge mit der Bezeichnung Ductal® entwickelte UHFFB verwendet. Es wurden Druck-, Biegezug- und zentrische Zugversuche sowie E-Modul-Prüfungen durchgeführt. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen bilden die Grundlage für die Ableitung der Bemessungswerte des in diesem Forschungsprojekt verwendeten UHFFB.

In **Kapitel 6** werden die für die Auslegung der Turmstruktur notwendigen Bemessungswerte zusammengestellt. Neben der Definition der Bemessungswerte für die Druckfestigkeit und die Zugfestigkeit wird auch das Ermüdungsverhalten von UHFFB unter Druckschwellbelastung diskutiert. Für die Vordimensionierung der Turmstruktur sollen die sehr hohen Materialfestigkeiten ausgenutzt werden, die eine materialsparende Bauweise ermöglichen.

Für die Ermittlung repräsentativer Werte, die die am Standort der OWEA vorherrschenden maritimen Bedingungen und Windverhältnisse beschreiben, werden die am Standort der NSB II und der Forschungsplattform FINO1 aufgezeichneten Messdaten ausgewertet. Die Auswertung der Messdaten sowie die daraus abgeleiteten Scatter-Diagramme und deren Beurteilung hinsichtlich deren Brauchbarkeit für den gewählten Standort der OWEA sind in **Kapitel 7** dargestellt.

Die Auslegung des zentrisch vorgespannten Turmtragwerks aus UHFFB in Segmentbauweise bzw. dessen Vordimensionierung ist in **Kapitel 8** dokumentiert. Ein besonderes Augenmerk liegt auf den hohen dynamischen Anforderungen, die das komplexe System OWEA befriedigen muss. Hierzu wurde zunächst eine Eigenfrequenzanalyse durchgeführt, um beurteilen zu können, ob die Tragstruktur der OWEA durch Rotorfrequenzen angeregt wird. Danach wurde zur Ermittlung der Belastungen auf die Tragstruktur der OWEA eine gesamtdynamische Berechnung durchgeführt, die die Wechselwirkung zwischen den stochastischen Einflüssen aus Wind und Wellen, Strukturdynamik und der aktiven Betriebsführung der Windenergieanlage berücksichtigt. Im Rahmen der Vordimensionierung der Turmstruktur wurde in einem ersten Schritt die erforderliche Vorspannkraft ermittelt, ehe dann die Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZT) und der Gebrauchstauglichkeit (GZG) betrachtet wurden.

In **Kapitel 9** wird zunächst allgemein eine Charakterisierung von Fugen hinsichtlich deren Lage im Bauteil und deren Ausbildung vorgenommen sowie die Notwendigkeit experimenteller Untersuchun-

gen zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Fugen dargelegt. Des Weiteren wird auf die im Rahmen dieses Forschungsprojekts verwendeten Versuchskörpergeometrien, die untersuchten Fugengeometrien und das verwendete Herstellungsverfahren eingegangen.

Kapitel 10 beschreibt die experimentellen Untersuchengen von Trockenfugen unter statischer Belastung. Es wurden Druckversuche an Versuchskörpern ohne Fuge (Referenzprismen) sowie Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit sehr glatter, gestrahlter, rauer und verzahnter Fuge durchgeführt. Die dabei ermittelte Tragfähigkeit der Trockenfugen wurde in einem Schub-Druck-Diagramm dargestellt. Daneben wurden auch Druckversuche an Zylindern und Biegezugversuche an Prismen durchgeführt, die zur Bestätigung der in Kapitel 5 ermittelten Materialkennwerte sowie zur Kontrolle der Chargen untereinander dienten.

Aufbauend auf den Ergebnissen der in Kapitel 10 beschriebenen experimentellen Untersuchungen von Trockenfugen unter statischer Belastung wurden experimentelle Untersuchungen von Trockenfugen unter zyklischer Belastung durchgeführt. Diese sind in **Kapitel 11** beschrieben. Zur experimentellen Untersuchung von Trockenfugen unter zyklischer Belastung wurden Abscherversuche bei unterschiedlicher Fugennormalspannung an Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge und verzahnter Fuge vorgenommen. Dabei wurden die Abscherversuche zunächst unter statischer Belastung durchgeführt, um daraus die Absolutwerte der Ober- und Unterlasten für die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung abzuleiten. Daneben wurden auch Druckversuche an Zylindern und Biegezugversuche an Prismen durchgeführt, die zur Bestätigung der in Kapitel 5 ermittelten Materialkennwerte sowie zur Kontrolle der Chargen untereinander dienten.

In **Kapitel 12** werden die Ergebnisse des Forschungsprojekts zusammengefasst und ein Ausblick für notwendige weitere Untersuchungen sowie Forschungsprojekte gegeben, um die in diesem Forschungsprojekt angestoßenen konzeptionellen Überlegungen zu Türmen für Windenergieanlagen aus UHFFB in Segmentbauweise weiterzuführen und bis zur Marktreife zu entwickeln.

Abschließend sei hier ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Verwendung von UHFFB nicht nur in der Turm- sondern auch in der Gründungsstruktur äußerst sinnvoll wäre (Tragstruktur „aus einem Guss“). Die Optimierung der Gründungsstruktur sowie Untersuchungen zur Realisierung dieser mit dem Werkstoff UHFFB sind jedoch nicht Bestandteil dieses Forschungsprojekts.

2 Standortbedingungen und *Design Basis*

2.1 Allgemeines

Belastungen von Windenergieanlagen, insbesondere von Windenergieanlagen auf See, sind sehr stark von den jeweiligen Bedingungen am Standort abhängig. Zur Ermittlung der vorherrschenden Standortbedingungen werden üblicherweise Baugrunderkundungen und -untersuchung durchgeführt und die für den Standort charakteristischen Wind- und Wellendaten ausgewertet. Die Ergebnisse werden in einem zentralen Dokument, der sogenannten *Design Basis*, festgehalten und bilden die Grundlage für den Entwurf. Die *Design Basis* ist in etwa vergleichbar mit einer funktionalen Ausschreibung im Bauwesen.

Laut dem Standard „Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen“ des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (2007) soll die *Design Basis* unter anderem die folgenden Angaben enthalten:

- Standort und Kenndaten der OWEA;
- Baugrundeigenschaften;
- maritime Bedingungen;
- Windverhältnisse.

Die Entwurfsgrundlagen (*Design Basis*) für dieses Forschungsprojekt wurden von der Zentralen Technik der Ed. Züblin AG festgelegt bzw. ermittelt.

2.2 Standort und Kenndaten der OWEA

Nach Zeiler et al. (2005) liegen die Offshore-Windparks im deutschen Seegebiet aus Gründen des Naturschutzes und Tourismus weit vor der Küste (vgl. Bild 2.2-1). Bei den Offshore-Windparks in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Nordsee herrschen dabei Wassertiefen zwischen 20,00 m und 40,00 m vor (vgl. Bild 2.2-2).

Dem Forschungsprojekt wurde daher ein repräsentativer Standort mit einer Wassertiefe von 39,50 m LAT (niedrigste astronomische Tide, engl. *lowest astronomical tide*) in der AWZ der Nordsee zugrunde gelegt.

Die größten derzeit in Serie verfügbaren OWEA warten mit einer Nennleistung von 5 bis zu 6 Megawatt auf. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit werden die meisten deutschen Offshore-Windparks mit Anlagen dieser Art realisiert. Je nach Hersteller gibt es Unterschiede in den technischen Komponenten der OWEA. Detaillierte Angaben zu der Gestaltung und den Massen dieser Komponenten werden in der Regel von den Anlagenherstellern nicht herausgegeben. Daher werden die Kenndaten der OWEA auf Grundlage von öffentlich zugänglichen Angaben nach Tabelle 2.2-1 festgelegt.

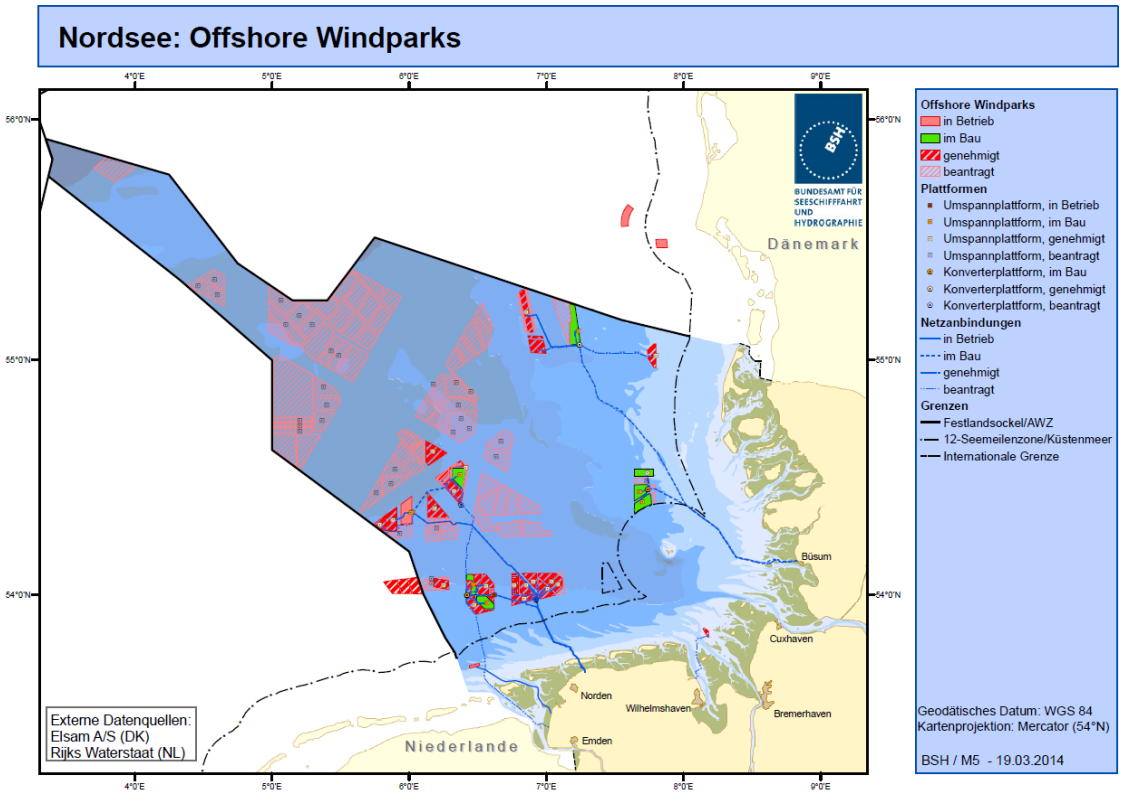


Bild 2.2-1: Offshore-Windparks in der AWZ der Nordsee [www.bsh.de]

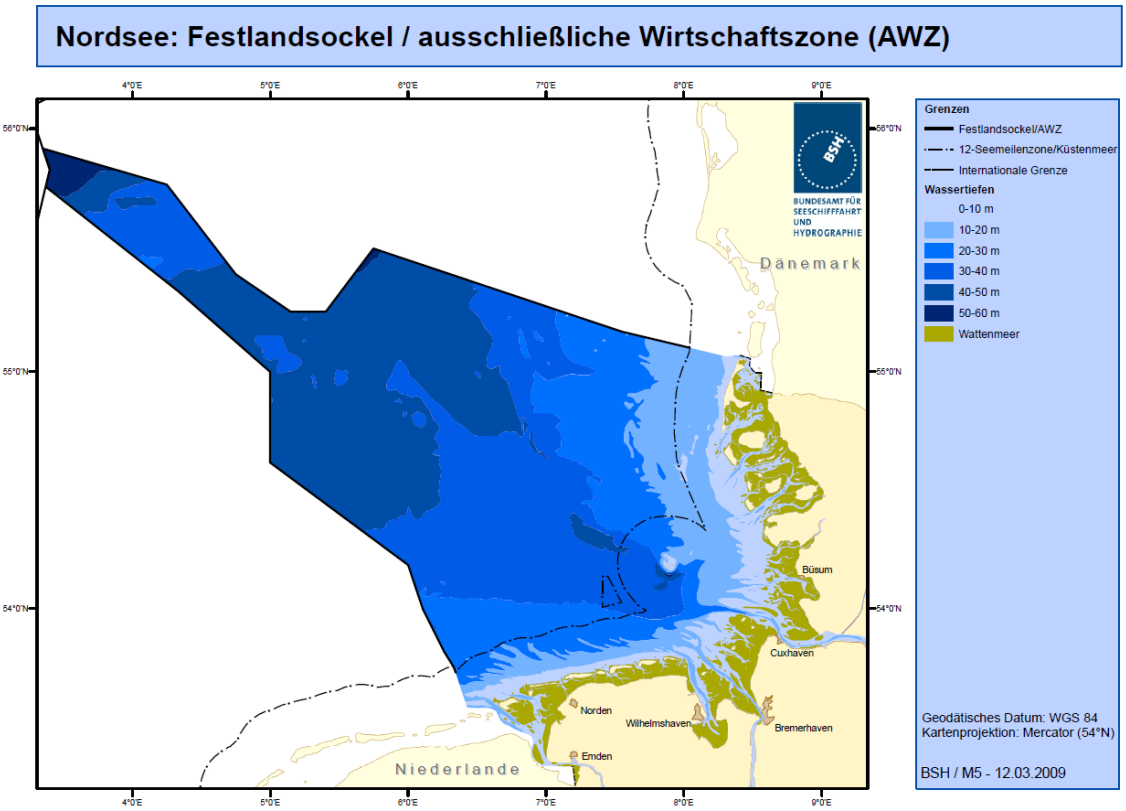


Bild 2.2-2: Wassertiefen in der AWZ der Nordsee [www.bsh.de]

Tabelle 2.2-1: Kenndaten der OWEA

Anlage	
Typ / Nennleistung	5 MW
Nabenhöhe (Mittelpunkt Rotor, Rotorachse geneigt)	+ 94 m LAT
Rotorachsneigung	5°
Rotordurchmesser	116 m
Anzahl der Rotorblätter	3
Betriebsbereich	4 – 25 m/s
Nennwindgeschwindigkeit	12,5 m/s
Drehzahlbereich	4,5 – 14,8 min^{-1}
Nenndrehzahl	14,8 min^{-1}
Rotormasse (je Rotorblatt)	16,2 to
Nabenmasse	62 to
Gondelmasse	239,4 to
vertikaler Versatz des Anlagenmassenschwerpunkts zu OK Turm	4,13 m
horizontaler Versatz des Anlagenmassenschwerpunkts zu OK Turm	2,17 m
Turm	
Turmlänge	69,074 m
Außendurchmesser OK Turm	4,006 m
Außendurchmesser UK Turm	6,000 m
Turmausbaumasse	95 to

2.3 Baugrundeigenschaften

Die aus der Baugrunderkundung und -untersuchung abgeleiteten Bodenkennwerte sind in Tabelle 2.3-1 dargestellt. Es ist zu beachten, dass aufgrund der vergleichsweise kurzen Lastwechsel die dynamischen Bodenkennwerte für die Berechnung der Gründungssteifigkeit maßgebend sind.

Tabelle 2.3-1: Dynamischer Bettungsmodul und Federsteifigkeiten je Fundamentplatte

Bodenkennwerte	Richtung	Bettungsmodul [MN/m³]	Federsteifigkeit [MN/m]
Dynamische Bodenkennwerte, Ansatz drainierter Verhältnisse	vertikal	10,5	1029
	horizontal	6,0	588

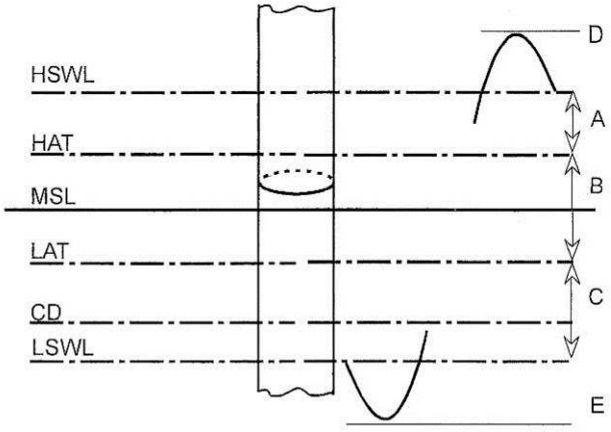
2.4 Maritime Bedingungen

Des Weiteren umfasst die *Design Basis* Angaben zu den am Standort vorherrschenden maritimen Bedingungen. Dazu zählen:

- Wasserstände und Tidenhub (vgl. Tabelle 2.4-1 und Bild 2.4-1);
- Wellendaten (vgl. Tabelle 2.4-2);
- Strömungsgeschwindigkeiten auf Höhe der Wasserlinie (vgl. Tabelle 2.4-3).

Tabelle 2.4-1: Wasserstände und Tidenhub

Abkürzung	Beschreibung	Wasserstands-änderungen bezogen auf LAT [m]	Resultierende Wassertiefe bzgl. Seeboden [m]	Gründungstiefe [m]
$HSWL_{50}$	höchster Ruhewasserstand	+ 3,30	+ 42,80	+47,80
HAT	höchste astronomische Tide	+ 1,70	+ 41,20	+ 46,20
MSL	mittlere Meereshöhe	+ 0,86	+ 40,36	+ 45,36
LAT	niedrigste astronomische Tide	± 0,00	+ 39,50	+ 44,50
$LSWL_{50}$	niedrigster Ruhewasserstand	– 1,00	+ 38,50	+ 43,50



Legende

HSWL	höchster Ruhewasserstand	A	positive Sturmflut
HAT	höchste astronomische Tide	B	Gezeitenhub
MSL	mittlere Meereshöhe	C	negative Sturmflut
LAT	niedrigste astronomische Tide	D	höchste Erhebung des Wellenberges
CD	Seekartennull (oft gleich LAT)	E	geringste Erhebung des Wellentals
LSWL	niedrigster Ruhewasserstand		

Bild 2.4-1: Definition der Wasserstände [DIN EN 61400-3 (2010)]

Tabelle 2.4-2: Wellen am Standort

Wiederkehrintervall	Seegang		Einzelwelle		
	H_s	T_p	H_{max}	H_{red}	T_d
[a]	[m]	[s]	[m]	[m]	[s]
1	7,90	11,8	14,70	10,43	9,9
50	10,80	13,8	20,10	14,26	11,6

Tabelle 2.4-3: Strömungsgeschwindigkeiten auf Höhe der Wasserlinie

Wiederkehrintervall	Strömung
[a]	[m/s]
1	1,09
10	1,25
50	1,38
100	1,40

2.5 Windverhältnisse

In der *Design Basis* werden ebenso Angaben zu den am Standort vorherrschenden Windverhältnissen aufgeführt.

Die Verteilung der Windgeschwindigkeiten folgt im Allgemeinen einer Weibullverteilung. Die erforderlichen Weibull-Parameter sind in Tabelle 2.5-1 angegeben.

Tabelle 2.5-1: Parameter für Weibull-Verteilung der Windgeschwindigkeiten

Höhe	V_{ave}	Weibull-Parameter	
		A	k
[m]	[m/s]	[m/s]	[-]
90	10,10	11,40	2,29

3 Logistikkonzept

3.1 Komponenten einer OWEA

Nach DIN EN 61400-3 (2010) besteht eine OWEA im Allgemeinen aus vier Komponenten:

- Rotor-Gondel-Baugruppe bzw. Rotor-Gondel-System;
- Turm;
- Unterbau;
- Fundament.

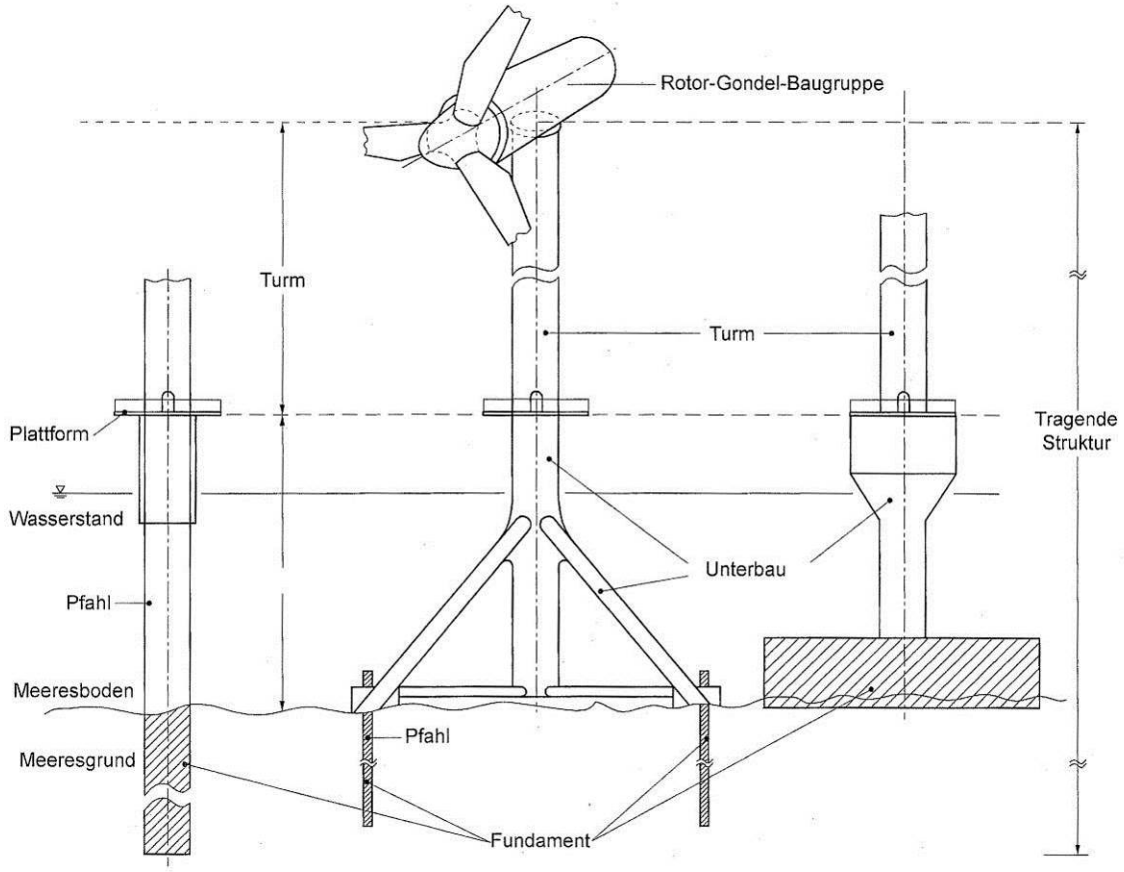


Bild 3.1-1: Komponenten einer OWEA [DIN EN 61400-3 (2010)]

3.2 Gründungsstrukturen für OWEA

Der Unterbau und das Fundament werden auch als Gründungsstruktur bezeichnet. In Bild 3.1-1 sind von links nach rechts folgende Gründungsstrukturen dargestellt:

- Monopile-Gründung;
- Tripod- oder Quadrupodgründung;
- Schwerkraftgründung.

Monopile-Gründungen kommen aktuell bis zu einer Wassertiefe von ca. 40,00 m zum Einsatz. Sie bestehen aus einem Stahlrohr mit einer Länge von bis zu ca. 80,00 m, einem Durchmesser von bis zu ca. 7,50 m und einer Blechdicke bis zu ca. 90 mm. Die Pfähle werden mit schwerem Gerät durch Rammen oder durch eine Kombination von Einvibrieren mit anschließendem Rammen installiert. Der Übergang vom Pfahl zur Turmstruktur liegt Überwasser. Pfahl und Turmstruktur werden durch ein Übergangsstück unter der Ausbildung einer „Grouted Joint"-Verbindung miteinander verbunden. Nach Dannenberg (2013) sprechen für Monopile-Gründungen die folgenden Vorteile:

- einfache und kostengünstige Herstellung des Stahlrohrs;
- Vorbereitung des Baugrunds ist nicht erforderlich;
- einfache und schnelle Installation durch Rammen;
- einfacher Rückbau.

Als Nachteile haben sich nach Dannenberg (2013) die folgenden Punkte erwiesen:

- große Abmessungen, hoher Materialverbrauch, hohes Gewicht;
- Rammen nur mit schwerem Gerät möglich;
- hohe Belastung des Pfahlkopfs und hohe Schallemission beim Rammen;
- hohe Bodenbelastung und -verformungen;
- relativ geringe Steifigkeit, dadurch nur für geringere Wassertiefen einsetzbar;

Bei Wassertiefen von bis zu 40,00 m werden Tripod- oder Quadrupodgründungen verwendet. Der Unterbau aus Stahl wird dabei komplett an Land hergestellt und zum Aufstellort transportiert. Dort wird der drei- oder vierbeinige Unterbau mit einem kleineren Pfahl je Bein bzw. Auflagerpunkt im Meeresboden verankert. Der Übergang vom Unterbau zur Turmstruktur liegt Überwasser. Unterbau und Turmstruktur werden wie bei der Monopile-Gründung durch ein Übergangsstück unter der Ausbildung einer „Grouted Joint"-Verbindung miteinander verbunden. Nach Dannenberg (2013) besitzt die Tripod- oder Quadrupodgründung im Vergleich zur Monopile-Gründung die folgenden Vorteile:

- kleinere Rammpfähle, dadurch kleinere Rammhämmer und geringere Schallemission beim Rammen;
- geringeres Gewicht;
- geringere Bodenbelastung;
- höhere Steifigkeit.

Als Nachteile haben sich nach Dannenberg (2013) bei Tripod- oder Quadrupodgründung im Vergleich zur Monopile-Gründung die folgenden Punkte erwiesen:

- höhere Fertigungskosten durch das Schweißen dickwandiger Knoten;
- Vorbereitung des Baugrunds in begrenztem Umfang erforderlich;

- höherer Transport- und Installationsaufwand;
- höheres Rammrisiko bei im Meeresboden vorhandenen Steinen;
- höherer Kolkschutzaufwand.

Ein weiterer Nachteil aller Gründungsstrukturen aus dem Werkstoff Stahl sind die erheblichen Aufwendungen für den Korrosionsschutz der Strukturen, um eine Nutzungsdauer von bis zu 25 Jahren zu gewährleisten.

Bei Schwerkraftgründungen handelt es sich um schwere Gründungskörper mit relativ großer Aufstandsfläche, die auf dem Meeresgrund abgesetzt werden. Diese haben sich für flaches Wasser bewährt, allerdings gibt es umfangreiche Bestrebungen, den Einsatz von Schwerkraftgründungen auf Wassertiefen bis zu 50,00 m auszuweiten (vgl. Abschnitt 3.4.4). Schwerkraftgründungen werden an Land hergestellt, zum Aufstellort geschleppt und dort auf ein vorab hergestelltes Planum auf dem Meeresboden abgesetzt. Um Material zu sparen, wird die Gründungsstruktur als Hohlkörper gefertigt und nach dem absetzen mit Ballast gefüllt, um die Standsicherheit zu erhöhen. Nach Dannenberg (2013) sprechen für Schwerkraftgründungen die folgenden Vorteile:

- kostengünstige Herstellung durch Verwendung von Beton, insbesondere bei Serienfertigung;
- kostengünstiges Korrosionsverhalten;
- sehr geringe Schallemissionen, da auf Rammarbeiten verzichtet werden kann.

Als Nachteile haben sich nach Dannenberg (2013) die folgenden Punkte erwiesen:

- hohe Startkosten für die Herstellung;
- umfangreiche Vorbereitung des Baugrundes und große Aufstandsflächen;
- hohes Gewicht;
- umfangreicher Kolkschutz erforderlich;
- hohe Bodenbelastung;
- Gefahr des „Reitens“, dadurch geringe Standsicherheit.

Bei größeren Wassertiefen bis zu 60,00 m kommen Jacket-Gründungen zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein räumliches Fachwerk aus Stahl, das wie eine Tripod- oder Quadrupodgründung mit einem kleineren Pfahl je Auflagerpunkt im Meeresboden verankert wird. Die Vor- und Nachteile der Jacket-Gründung entsprechen nach Dannenberg (2013) denen einer Tripod- oder Quadrupodgründung.

Bei darüber hinausgehenden Wassertiefen von bis zu mehreren hundert Metern ist der Einsatz von schwimmenden Gründungsstrukturen denkbar, an denen aktuell intensiv geforscht wird [u.a. Musial et al. (2003), Jonkman (2007), Cordle und Jonkman (2011), Sandner und Cheng (2013), Sandner et al. (2014)]. Die norwegische Firma Statoil hat bereits einen ersten Prototyp der als „Hywind“ bezeichneten schwimmenden Gründungsstruktur installiert.

3.3 Bauablauf und Rückbau von OWEA

Der Bau einer OWEA unterliegt in der Regel dem folgenden Ablauf:

- Vorbereitung des Baugrunds und Errichtung bzw. Installation der Gründungsstruktur;
- Montage der Turmstruktur und der Rotor-Gondel-Baugruppe bzw. des Rotor-Gondel-Systems;
- Netzanschluss und Inbetriebnahme.

Der Umfang der Arbeiten auf See und die dazu erforderlichen Gerätschaften werden wesentlich von der Art der Gründungsstruktur bestimmt [Hau (2008)]. Bei einer Monopile-Gründung ergibt sich der in Bild 3.3-1 dargestellte Bauablauf. Dabei wird ersichtlich, dass der Aufstellort der OWEA mehrmals mit schwerem Gerät angefahren werden muss.

Bild 3.3-1: Bauablauf bei einer OWEA mit Monopile-Gründung [www.enbw.com]

Nach Kühn (2011) ist insbesondere im Bereich der Logistik ein großes Potential für Kostensenkungen vorhanden. Herstellung, Montage, Transport und Errichtung bzw. Installation von OWEA können optimiert werden, wenn die Anlagen bereits an Land so weit wie möglich vormontiert und getestet sowie die notwendigen Arbeiten auf See so weit wie möglich reduziert werden.

Gemäß dem Standard „Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen“ des BSH (2007) sind die OWEA nach Ablauf ihrer Nutzungsdauer zurückzubauen. Nach Wiemann et al. (2005) stellt der Rückbau von Pfählen mit den heute zur Verfügung stehenden Techniken kein Problem dar. Hierzu bedarf es zunächst des Lösens der während der Nutzungsdauer der OWEA gewachsenen Bindungen zwischen Pfahl und Boden durch Rammen, ehe dann der Pfahl durch Rütteln gezogen werden kann. Alternativ werden die Pfähle unterhalb des Meeresbodens abgetrennt, so dass der untere Teil im Meeresboden verbleibt. Auch bei Schwerkraftgründungen müssen zunächst die während der Nutzungsdauer der OWEA gewachsenen Bindungen zwischen Fundament und Boden gelöst werden, wodurch sich das Anheben oder Aufschwimmen unter Berücksichtigung des hohen Gewichts einer Schwerkraftgründung aufwendiger und schwieriger gestaltet [Wiemann et al. (2005)].

3.4 STRABAG Serial System

3.4.1 Systemlösung

Das STRABAG Serial System ist eine von der Zentralen Technik der Ed. Züblin AG entwickelte Systemlösung, die die Herstellung, die Montage, den Transport und die Errichtung bzw. Installation einer OWEA umfasst.

Das Besondere der Systemlösung ist, dass die komplette Windenergieanlage an Land hergestellt und montiert wird und mit einem Spezialschiff als Ganzes zum Aufstellort transportiert und installiert wird.

Mit dem der Systemlösung zugrundeliegenden Logistikkonzept wird primär das Ziel verfolgt, die kostenintensiven Arbeiten und die damit einhergehenden Risiken auf See zu minimieren. Damit wird das enge Zeitfester, in dem die notwendigen Wetter-und Seebedingungen für die Durchführung von Arbeiten auf See gegeben sind, optimal ausgenutzt.

Das Logistikkonzept ist abgestimmt auf die von der Zentralen Technik der Ed. Züblin AG entwickelte Tragwerkslösung für die OWEA. Diese besteht aus einem Schwerkraftfundament (vgl. Abschnitt 3.4.4) und einem darauf aufgesetzten Stahlrohrturm.

3.4.2 Terminal

Das direkt an der Küste angesiedelte Terminal ist eine Industrieanlage für die Serienfertigung der OWEA (vgl. Bild 3.4-1).

Der Produktionsstandort ist mit einem komplexen Schienen- und Hebesystem ausgestattet, wodurch industrielle Bauabläufe ermöglicht werden. Dies gewährt eine wirtschaftliche Herstellung und Montage sowie eine hochwertige Ausführung der OWEA und erlaubt bereits an Land die Überprüfung der Betriebsfähigkeit.

Bild 3.4-1: Terminal für die Serienfertigung von OWEA [www.strabag-offshore.com]

Bild 3.4-2: Installationsschiff [Hartwig und Mayer (2012)]

Bild 3.4-3: OWEA mit Tragstruktur bestehend aus Schwerkraftfundament und Stahlrohrturm [Hartwig und Mayer (2012)]

3.4.3 Installationsschiff

Der Transport und die Installation der kompletten Windenergieanlage werden mit einem multifunktionalen Transport- und Installationsgerät, dem sogenannten Installationsschiff, bewerkstelligt.

Vom Pier des Terminals wird die Windenergieanlage stehend auf das Installationsschiff verladen und zum Aufstellort transportiert (vgl. Bild 3.4-2). Mit dem auf der Halbtauchertechnik basierenden Installationsschiff sind Einsätze bis zu Seegängen mit einer signifikanten Wellenhöhe von 2,50 m möglich. Die Installation der Windenergieanlage kann daher weitestgehend unabhängig von den Wetter- und Seebedingungen erfolgen (vgl. Bild 3.4-3).

3.4.4 Schwerkraftfundament

Das von der Zentralen Technik der Ed. Züblin AG entwickelte Schwerkraftfundament für OWEA kann bis zu einer Wassertiefe von 50,00 m eingesetzt werden.

Das Schwerkraftfundament besteht aus einem vorgespannten Stahlbetonschaft, der auf dem Kreuzungspunkt der beiden orthogonal angeordneten, vorgespannten Stahlbetonhohlkästen sitzt (vgl. Bild 3.4-3). Am Ende der vorgespannten Stahlbetonhohlkästen sind Fundamentplatten angebracht, über die die Lasten konzentriert in den Baugrund abgetragen werden. Der Lastabtrag erfolgt ausschließlich über die vier Fundamentplatten, wodurch einerseits der innere Hebelarm des Fundaments maximiert wird und andererseits durch den Abstand des Zentralbereichs zum Baugrund ein „Reiten“ des Fundaments verhindert wird. Gleichzeitig reduziert sich der Aufwand für die Vorbereitung des Baugrunds.

Da der Meeresgrund in der Regel nicht ausreichend tragfähig ist, sind im Vorfeld der Installationsarbeiten ein Baugrubenaushub von in der Regel wenigen Metern sowie die Herstellung eines Planums in der Baugrube notwendig. Auf Rammarbeiten, die bei der Installation von Monopile-Gründungen, Tripod- oder Quadrupodgründungen sowie Jacket-Gründungen notwendig sind, kann gänzlich verzichtet werden. Nach dem Absetzen der OWEA am Aufstellort wird das Schwerkraftfundament ballastiert. Dazu werden die vorgespannten Hohlkästen und der vorgespannte Stahlbetonschaft mit Sand gefüllt. Zudem wird ein Kolkschutz um die vorgespannten Stahlbetonhohlkästen herum angebracht, damit ein Unterspülen des Schwerkraftfundaments verhindert wird.

Die von der Zentralen Technik der Ed. Züblin AG an einem Testfundament (vgl. Bild 3.4-4) durchgeführten Untersuchungen haben das gutmütige Tragverhalten des Schwerkraftfundaments unter zyklischer Belastung bestätigt. Zum ersten Mal konnte an einem Bauwerk in Originalgröße messtechnisch belegt werden, dass sich das Schwerkraftfundament bei größeren Belastungen nachfolgenden kleineren Lastwechsel partiell rückdreht [Hartwig und Mayer (2012)]. Auch das Ermüdungsverhalten unter zyklischer Belastung hinsichtlich des realen Schädigungsgrades zur Quantifizierung der Lebensdauer des Schwerkraftfundaments wurde numerisch und experimentell intensiv untersucht [Urban et al. (2012a), Urban et al. (2012b)].

Bild 3.4-4: Testfundament im Maßstab 1:1 [Hartwig und Mayer (2012)]

4 Entwurf eines Turmtragwerks aus UHFFB in Segmentbauweise

4.1 Vorbemerkung

Der Entwurf von Tragstrukturen für OWEA wird neben den Standortbedingungen maßgeblich vom Logistikkonzept für Herstellung, Montage, Transport und Errichtung bzw. Installation geprägt.

Ausgehend von dem in Abschnitt 3.4 vorgestellten Logistikkonzept und der Tragstruktur für OWEA wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts eine Alternative zu einem Turmtragwerk aus Stahl entwickelt. Dabei handelt es sich um ein Turmtragwerk aus UHFFB in Segmentbauweise.

In Abschnitt 4.2 werden zunächst die Anforderungen an den UHFFB Turm formuliert. Im Anschluss daran wird in Abschnitt 4.3 das Konzept für den UHFFB Turm hinsichtlich Geometrie, Vorspannung und Fugen beschrieben.

4.2 Anforderungskatalog

Im Folgenden werden die Anforderungen an die Gesamtstruktur bestehend aus Schwerkraftfundament, UHFFB Turm und Rotor-Gondel-System aufgeführt:

- Die Höhe der Gesamtstruktur hängt von der Wahl des Standorts ab. Der Standort wurde mit einer Wassertiefe von 39,50 m in der Design Basis festgelegt.
- Der über die Höhe des Turms abnehmende maximal zulässige Außendurchmesser hängt wesentlich von der Länge und Durchbiegung der Rotorblätter infolge der Windbeanspruchung ab. Bei Blattdurchgang muss zwischen Turm und Rotorblatt ein lichter Abstand von 1 bis 2 m eingehalten werden. Der genaue Abstand ist den Angaben des Anlagenherstellers zu entnehmen.
- Die Rückbaubarkeit der Gesamtstruktur mit Beendigung der Nutzungsdauer muss gewährleistet sein und sollte möglichst einfach erfolgen können.
- Bedingt durch den Standort der Windenergieanlage auf See ist eine sehr hohe Dauerhaftigkeit der Gesamtstruktur gegen extreme chemische und klimatische Einwirkungen zu gewährleisten.
- Bisher werden OWEA für eine Nutzungsdauer von 20 Jahren ausgelegt. Um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen, soll nach Möglichkeit eine höhere Nutzungsdauer von etwa 30 bis 50 Jahren erreicht werden. Die mögliche Nutzungsdauer der Tragstruktur hängt im Wesentlichen von den Belastungen aus den Umgebungsbedingungen wie Wind und Welle und der Betriebsführung sowie der Ermüdungsfestigkeit der verwendeten Werkstoffe ab.
- Die Eigenfrequenz der Gesamtstruktur der OWEA muss auf die Erregerfrequenzen abgestimmt werden, um einen reibungslosen Betrieb der Anlage sicherzustellen. Folgende Erregerfrequenzen müssen berücksichtigt werden:
  - Rotorfrequenz (1P-Frequenz);
  - Blattdurchgangsfrequenz (3P-Frequenz bei einer Anzahl von drei Rotorblättern);
  - Bandbreite der Wellenperiode.
- Bei der Berechnung der Eigenfrequenzen müssen zudem auch Schwankungen des E-Moduls der verwendeten Werkstoffe sowie der Bodenkennwerte betrachtet werden.

Tragwerke aus UHFFB werden, bedingt durch die hohen Ansprüche an das Misch- und Einbauverfahren, bevorzugt aus Fertigteilen hergestellt. Aus diesem Grund wird der UHFFB Turm in Fertigteilbauweise bzw. Segmentbauweise entwickelt. Für die Segmentbauweise, und damit die serielle Vorfertigung von Segmenten im Werk, sprechen folgende Punkte:

- die einzelnen Segmente weisen eine hohe Fertigungsqualität auf, da diese im Werk in einer gleich bleibend hohen materialtechnologischen Qualität und Maßhaltigkeit hergestellt werden können;
- die einzelnen Segmente können im Werk unabhängig von Witterungseinflüssen über das ganze Jahr hinweg hergestellt werden;
- durch die Serienfertigung und einem damit einhergehenden effizienten Materialeinsatz sowie einen auf den Herstellungsablauf abgestimmten und optimierten Arbeitsaufwand können die Herstellungskosten reduziert werden;
- der hohe Vorfertigungsgrad und die Montage an Land garantieren einen schnellen Baufortschritt, so dass das enge Zeitfensters für Arbeiten auf See optimal ausgenutzt werden kann.

Die hohe Druckfestigkeit des UHFFB erlaubt die Ausbildung von besonders dünnwandigen Segmenten. Um eine auf das Minimum reduzierte Wandungsstärke zu ermöglichen, wird eine externe Vorspannung auf der Innenseite des Turms vorgesehen. Hierdurch besteht zudem die Möglichkeit die Spannglieder während der Nutzungsdauer zu kontrollieren sowie diese nachzuspannen und auszutauschen. Zudem gestaltet sich das Betonieren der Segmente einfacher, da keine Hüllrohre innerhalb der Wandung positioniert werden müssen.

4.3 Beschreibung des Turmkonzepts

4.3.1 Material und Geometrie

UHFFB ist aufgrund seiner herausragenden Materialeigenschaften ein idealer Werkstoff für den Einsatz bei Tragstrukturen von OWEA.

Bezüglich seiner mechanischen Eigenschaften besitzt UHFFB eine höhere Druckfestigkeit und eine höhere Ermüdungsfestigkeit [Wefer (2010)] als normal- oder hochfester Beton, was die Ausführung von schlankeren und leichteren Tragstrukturen ermöglicht. Die daraus resultierende Reduktion des Eigengewichts ist unmittelbar mit der Einsparung von Rohstoffen und Energie verbunden, was in Zeiten knapper werdender Ressourcen immer mehr an Bedeutung gewinnt. Der Elastizitätsmodul von UHFFB ist ebenso höher als der von normal- oder hochfestem Beton, was bei gleichem Trägheitsmoment zu einer steiferen Tragstruktur führt. Die mechanischen Eigenschaften des UHFFB mit der Bezeichnung Ductal® der Firma Lafarge wurden im Rahmen dieses Forschungsprojekts experimentell ermittelt (vgl. Abschnitt 5). An dieser Stelle wird jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die das Turmkonzept betreffenden Überlegungen unabhängig von der Wahl einer speziellen UHFFB-Mischung sind.

Darüber hinaus ist UHFFB ein Werkstoff mit hoher Dauerhaftigkeit. Aufgrund des sehr dichten Gefüges ist der Widerstand gegen chemische und klimatische Einwirkungen hoch [Schmidt et al. (2008)]. Dadurch kann bei UHFFB im Vergleich zu normal- oder hochfestem Beton die Betondeckung geringer ausfallen. Durch die hohe Dichtigkeit wird auch das Eindringen von Feuchtigkeit in den Innenraum erschwert. Dies bietet einen wirkungsvollen Schutz der technischen Ausstattung vor dem aggressiven maritimen Milieu. Bei Tragstrukturen aus UHFFB sind im Vergleich zu Tragstrukturen aus Stahl keine aufwendigen Maßnahmen notwendig, um einen ausreichenden Korrosionsschutz zu gewährleisten. Zudem entfällt eine hohe Kosten verursachende Erneuerung der Korrosionsschutzbeschichtung,

welche bei Tragstrukturen aus Stahl innerhalb der Nutzungsdauer einer OWEA, die üblicherweise bei 20 Jahren liegt, mindestens einmal von Nöten ist. Der Instandhaltungsaufwand bei Tragstrukturen aus UHFFB ist somit im Vergleich zu Tragstrukturen aus Stahl deutlich niedriger, was zur Folge hat, dass auch die Lebenszykluskosten deutlich niedriger ausfallen.

Im Hinblick auf die weltweit geplanten Offshore-Windparks ist abzusehen, dass man an Grenzen stoßen wird, was die Verfügbarkeit von Stahl sowie die Kapazität zur Herstellung der Tragstrukturen aus Stahl betrifft. Als Ergebnis dessen ist damit zu rechnen, dass sowohl die Stahlpreise als auch die Lieferzeiten für Stahl steigen werden, was die wirtschaftliche Attraktivität von Tragstrukturen aus UHFFB weiter erhöhen wird.

Im Bild 4.3-1 ist Längsschnitt der Tragstruktur bestehend aus Schwerkraftfundament, UHFFB Turm und Rotor-Gondel-System abgebildet.

Laut den Angaben aus der *Design Basis* beträgt die Wassertiefe 39,50 m. Damit liegt der Meeresboden auf - 39,50 m LAT. Die Aushubtiefe für das Schwerkraftfundament beträgt 5,00 m. Die Sohle der Baugrube liegt somit bei - 44,50 m LAT.

Das Schwerkraftfundament der Ed. Züblin AG besteht aus hochfestem Beton der Festigkeitsklasse C80/95. Sowohl der Stahlbetonschaft als auch die orthogonal angeordneten Stahlbetonhohlkästen sind im nachträglichen Verbund vorgespannt. Die sechseckigen Fundamentplatten an den Enden der vorgespannten Stahlbetonhohlkästen haben eine Breite von 8,00 m und eine Länge von 16,00 m und eine Dicke von 0,50 m. Der Abstand von der Außenkante einer Fundamentplatte zur Außenkante der gegenüberliegenden Fundamentplatte beträgt 40,00 m. Die vorgespannten Stahlbetonhohlkästen haben eine Breite von 8,50 m und eine Höhe von 8,00 m. Der vorgespannte Stahlbetonschaft weist bis 33,00 m oberhalb der vorgespannten Stahlbetonhohlkästen einen konischen Verlauf auf, darüber einen zylindrischen Verlauf. Der Außendurchmesser des vorgespannten Stahlbetonschafts beträgt am Fuß des Schafts 8,50 m und am Übergang von konischen zum zylindrischen Verlauf 5,80 m. Die Wandungsstärke der vorgespannten Stahlbetonhohlkästen und des vorgespannten Stahlbetonschafts beträgt 0,60 m. Das Schwerkraftfundament reicht von - 44,50 m LAT bis + 20,00 m LAT und hat eine Höhe von 64,50 m.

Die Turmstruktur beginnt bei +20,00 m LAT und endet bei + 89,074 m LAT und hat damit eine Höhe von 69,074 m. Der Turm weist über seine Höhe einen konischen Verlauf auf, wobei der Außendurchmesser am Turmfuß 6,00 m und am Turmkopf 4,006 m beträgt. Der Turm ist in 14 Segmente unterteilt, davon haben die unteren 13 Segmente eine Höhe von 5,00 m und das oberste Segment hat eine Höhe von 4,074 m. Das oberste Segment ist mit einem Stahladapter ausgestattet, der für den Übergang vom UHFFB Turm zum Azimutlager der Gondel erforderlich ist. Die Wandungsstärken der einzelnen Segmente sollen entsprechend den auftretenden Beanspruchungen festgelegt und dem Beanspruchungsverlauf folgend mit zunehmender Turmhöhe angepasst werden.

Die Gesamthöhe der Tragstruktur beträgt von der Sohle der Baugrube bis zur Oberkante des Stahladapters damit 133,574 m.

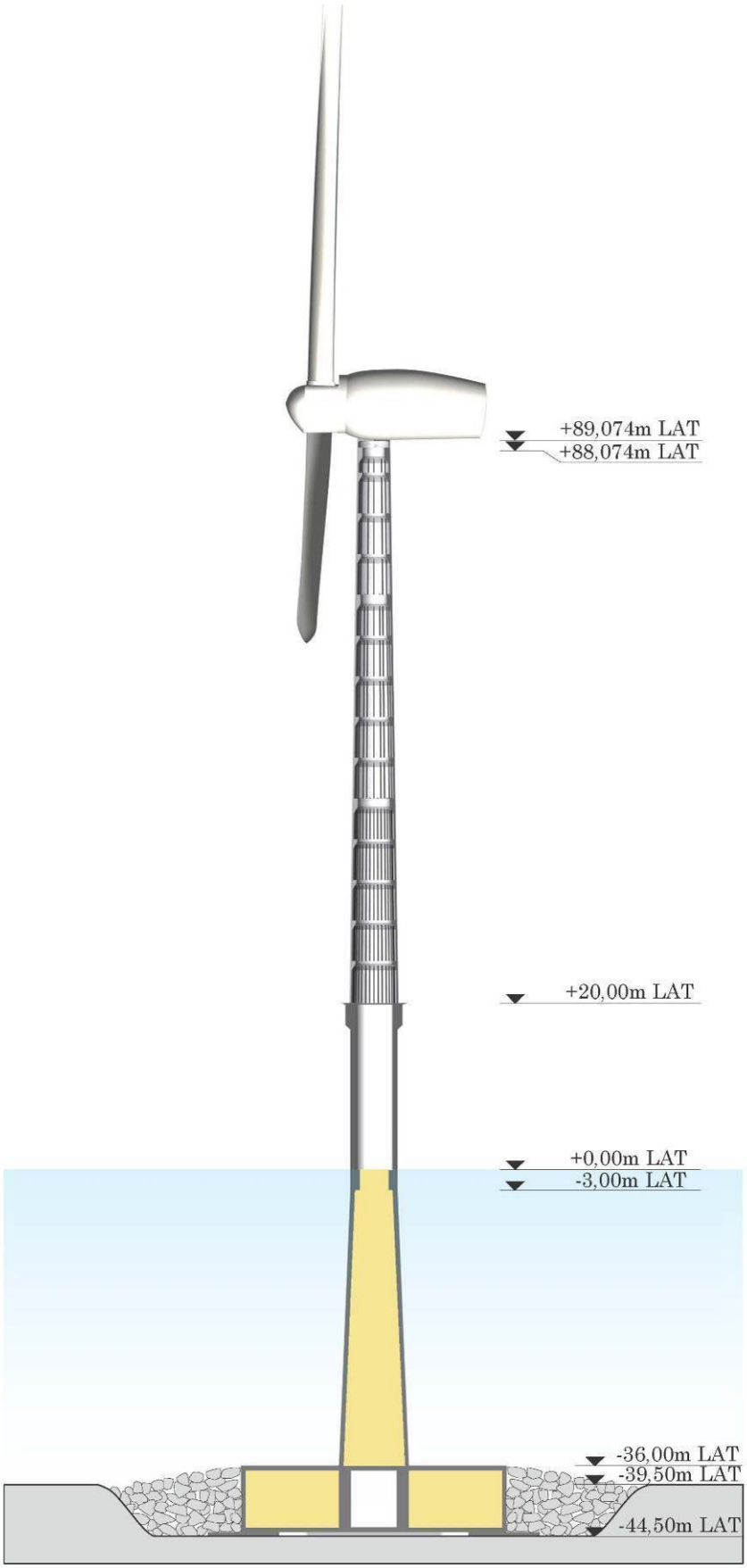


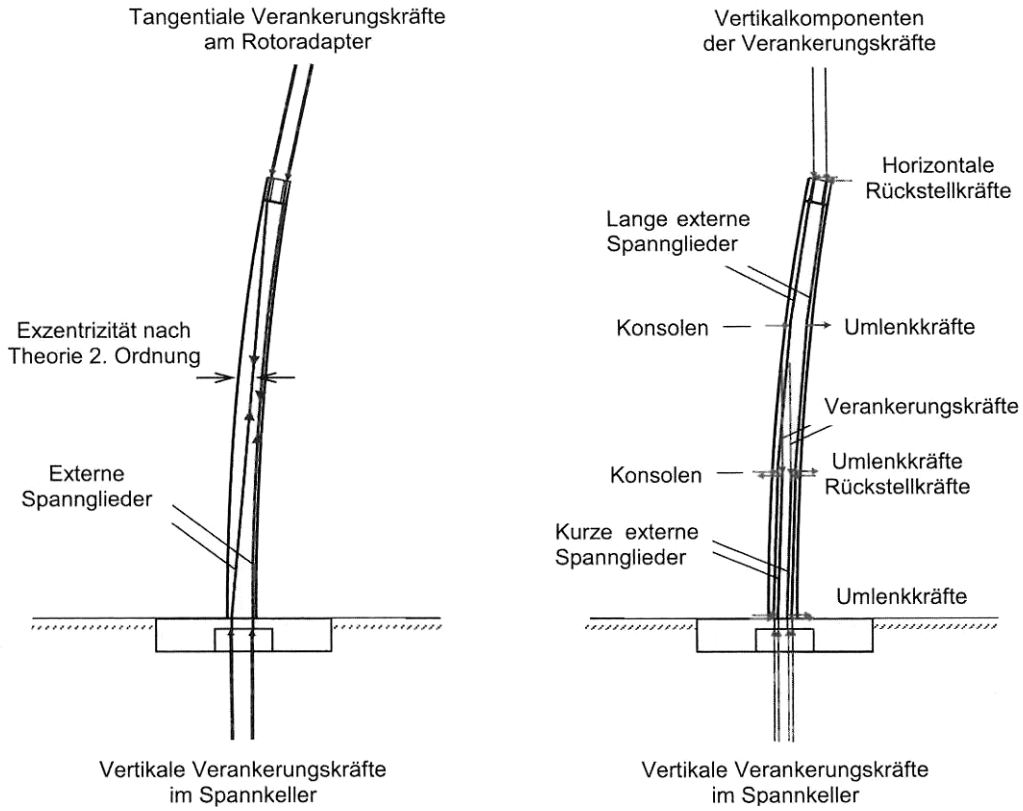
Bild 4.3-1: Längsschnitt der Tragstruktur bestehend aus Schwerkraftfundament und UHFFB Turm

4.3.2 Vorspannung

Der UHFFB Turm soll mit Hilfe einer zentrischen externen Vorspannung, die auf der Innenseite des Turms verläuft, vorgespannt werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Wandungsstärke der einzelnen Segmente auf das Minimum zu reduzieren, unabhängig von einer erforderlichen Mindestwandungsstärke, die bei einer internen Vorspannung vorzusehen wäre. Als weiter Vorteile der externen Vorspannung sind zu nennen [Rombach (2003)]:

- Kontrollierbarkeit der externen Spannglieder;
- Spannglieder können nachgespannt und ausgetauscht werden;
- geringe Reibungsverluste;
- Vereinfachung des Betonierens.

Eine externe Vorspannung hat gegenüber einer internen Vorspannung mit Verbund im Allgemeinen den Nachteil, dass sich nach Erreichen der Risslast nur ein Riss ausbildet (falls keine passive Bewehrung vorgesehen wird) und sich die Spannglieder dann auf ihrer ganzen Länge dehnen, was wiederum zu einer raschen Zunahme der Rissbreite führt. Bedingt durch die Dehnung auf der ganzen Länge des Spanngliedes sind sehr große Verformungen nötig, um die Fließgrenze des Spannstahls zur erreichen. In der Regel können solch große Verformungen nicht erreicht werden, da es vorher zu einem Versagen der Betondruckzone kommt. Daher fällt der Tragwiderstand eines Bauteils mit einer externen Vorspannung bei gleichem Spannstahlquerschnitt geringer aus als bei einer Vorspannung mit Verbund, d.h. es sind mehr externe Spannglieder erforderlich, um eine identische Traglast zu erreichen.



a) ungeführte Spannglieder b) über Konsolen geführte, gestaffelte Spannglieder

Bild 4.3-2: Zentrische externe Vorspannung [Grünberg und Göhlmann (2011)]

Bei einer externen Vorspannung ist zu unterscheiden, ob die Spannglieder zwischen den Verankerungspunkten geführt sind oder nicht. Für den Fall einer ungeführten externen Vorspannung sind am verformten System auch die Einflüsse aus der Exzentrizität der Spannglieder in Bezug auf die Systemachse zu berücksichtigen (vgl. Bild 4.3-2). Durch die Anordnung von Konsolen in definierten Abständen auf der Innenseite des Turms können diese Exzentrizitäten vermieden werden. Am verformten System bildet sich dann ein polygonaler Spanngliedverlauf aus. Aus diesem resultieren horizontale Umlenk- und Rückstellkräfte sowie Reibungskräfte für die die Konsolen bemessen werden müssen. An den Verankerungsstellen hingegen wirken bei einer geführten externen Vorspannung die Verankerungskräfte der Spannglieder jeweils mit einer rückstellenden horizontalen Komponente. Bei Wahl einer ungeführten externen Vorspannung müsste die Vorspannkraft infolge der auftretenden Exzentrizitäten am verformten System als externe Beanspruchung bei der Berechnung der Eigenfrequenzen angesetzt werden, was eine Reduzierung u.a. der ersten Eigenfrequenz zur Folge hätte. Für den UHFFB Turm im Rahmen dieses Forschungsprojekts wird eine geführte externe Vorspannung gewählt, wodurch die Vorspannung keinen Einfluss auf die Eigenfrequenzen hat (vgl. Abschnitt 8.1).

Bei externer Spanngliedführung wird der Korrosionsschutz der Spannglieder durch die aus HDPE bestehenden Hüllrohre sowie durch das Verpressen dieser mit Fett oder Wachs sichergestellt (vgl. Bild 4.3-3).

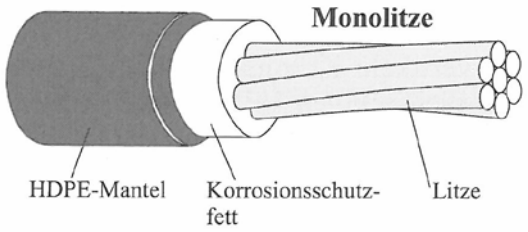


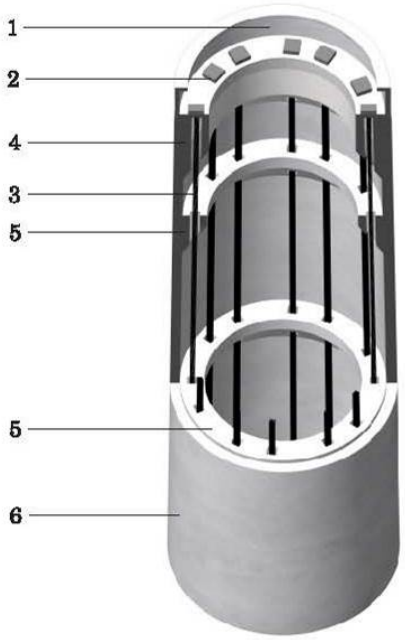
Bild 4.3-3: Korrosionsschutz externer Spannglieder [Rombach (2003)]

Rombach (2003) weist darauf hin, dass die HDPE-Hüllrohre nicht vollständig gasdicht sind und dies sich negativ auf die Dauerhaftigkeit des Korrosionsschutzes auswirken kann.

Auch der Übergang zwischen HDPE-Hüllrohr und Ankerkörper muss gasdicht ausgeführt werden. Hierzu kommen spezielle Konstruktionen für die Verankerung der Spannglieder zum Einsatz. Dennoch haben Untersuchungen von Sodeikat et al. (2004) gezeigt, dass insbesondere die Verankerungsbereiche häufig Korrosionsangriffen ausgesetzt sind und zur Vermeidung von Korrosionsschäden ein hohes Maß an Sorgfalt für die konstruktive Durchbildung dieser von Nöten ist.

Die Verankerung der externen Vorspannung am Turmkopf erfolgt mit Hilfe von Ankerkörpern (vgl. Bild 4.3-4). Durch die Auflagerung der Ankerkörper auf dem Stahladapter wird im Bereich der Konsole die Gefahr von Rissen infolge Spaltzugkräften im Beton verringert. Allerdings treten im Bereich der Konsole Krempelmomente auf, die an den Schalenrändern Störungen hervorrufen. Die Konsolbereiche werden im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht weiter untersucht.

Im Bild 4.3-5 ist die vorgesehene Spanngliedführung durch Konsolen mit Öffnungen für die Durchführung der Spannglieder mit vertikal verschieblicher Lagerung exemplarisch abgebildet. Die Konsolen sollen als Druckring ausgeführt werden um die Umlenk- und Rückstellkräfte abzutragen. Die Konsolen sind an der Oberseite jedes Turmsegments angeordnet und sind somit Bestandteil jedes Segmentes. Um eine Abstufung der Spannglieder über die Turmhöhe zu ermöglichen, können die Konsolen in ihren Abmessungen entsprechend den Anforderungen für eine Verankerung der Spannglieder angepasst werden.



1 Stahladapter für den Übergang vom UHFFB Turm zum Azimutlager der Gondel

2 Ankerkörper für die Verankerung der Spannglieder gegen den Stahladapter

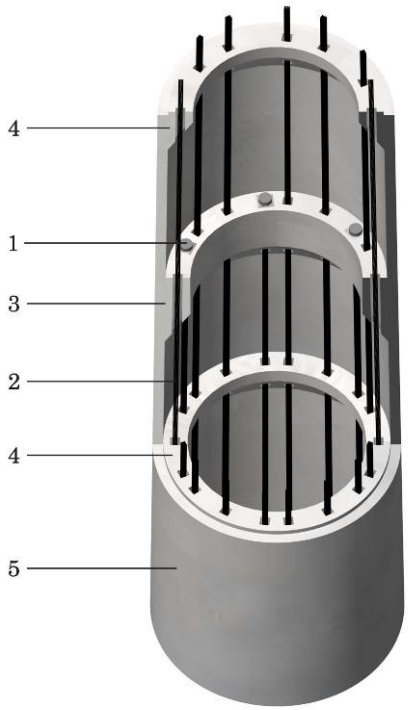
3 Spannglieder

4 Konsole für den Aufsatz des Stahladapters und Verankerung der Spannglieder

5 Konsole zur Führung der Spannglieder

6 Segment aus UHFFB

Bild 4.3-4: Verankerung der externen Vorspannung am Turmkopf



1 Ankerkörper für die Verankerung der Spannglieder in der Konsole

2 Spannglieder

3 Konsole für die Führung und Verankerung der Spannglieder

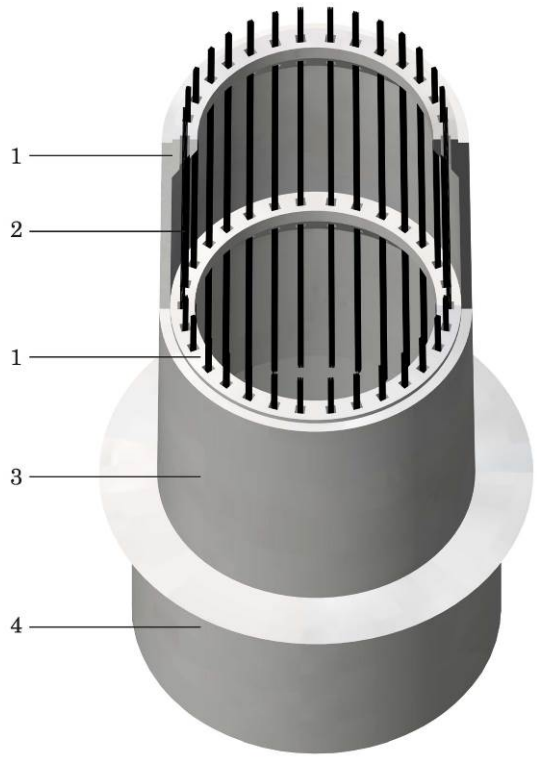
4 Konsole für die Führung der Spannglieder

5 Segment aus UHFFB

Bild 4.3-5: Spanngliedführung und -verankerung der externen Vorspannung mit Hilfe von Konsolen

In Bild 4.3-6 ist der Übergang vom UHFFB Turm zum Schwerkraftfundament dargestellt. Bei in Umfangsrichtung enger Anordnung der Spannglieder ist im Bereich einer Öffnung im untersten Segment des Turms eine Umlenkung dieser erforderlich, damit das Betreten der Anlage zu Wartungsarbeiten

und zum Austausch des Generators möglich ist. Die Ausbildung des Detailpunktes „Turmöffnung“ wird im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht weiter untersucht. Ebenso wird im Rahmen dieses Forschungsprojekts die Verankerung der Spannglieder des Turms im Schwerkraftfundament nicht näher betrachtet.



1 Konsole für die Führung der Spannglieder
2 Spannglieder
3 Segment aus UHFFB
4 Schwerkraftfundament aus C80/95

Bild 4.3-6: Übergang vom UHFFB Turm zum Schwerkraftfundament

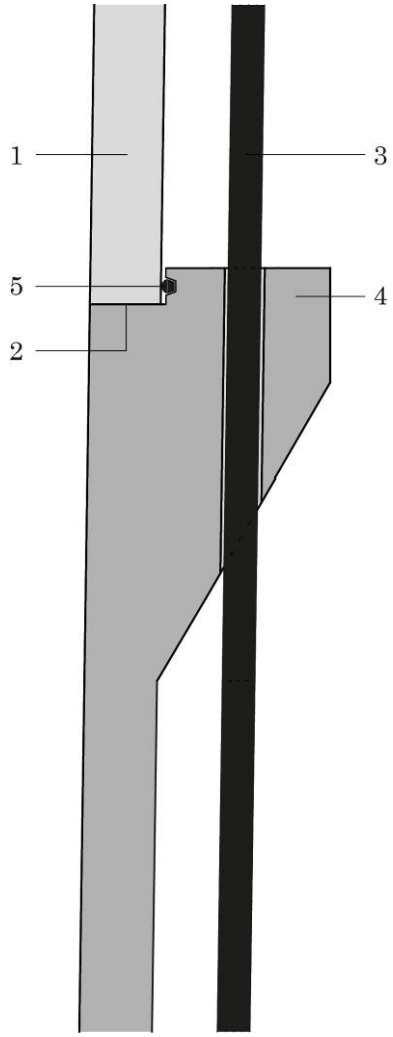
In Bild 4.3-7 ist eine Innenansicht des UHFFB Turms dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass noch der Innenausbau bestehend aus Plattformen, Begehvorrichtungen, Leitern, Elektroinstallationen, etc. hinzukommt und die hierfür notwendigen Anschlüsse an die Turmstruktur vorgesehen werden müssen.

Bild 4.3-7: Innenansicht des UHFFB Turms

4.3.3 Fuge

Die Fügetechnik soll nicht nur den Kraftübertrag zwischen den Segmenten sicherstellen, sondern auch eine einfache Montage und Demontage der Turmstruktur ermöglichen. Beide Anforderungen können durch Zusammenspannen der Segmente mittels Trockenfuge erreicht werden.

Neben der Kraftübertragung zwischen den Segmenten muss auch die Dichtigkeit der Fuge zum Schutz der Elektroinstallationen gewährleistet sein. Bild 4.3-8 zeigt eine mögliche Ausbildung der Dichtung.



1 Segment aus UHFFB
2 Trockenfuge zwischen den Segmenten
3 Spannglied
4 Konsole für die Führung der Spannglieder
5 Dichtung

Bild 4.3-8: Fuge mit Dichtung zwischen den zentrisch vorgespannten Turmsegmenten aus UHFFB

5 Versuche zum Materialverhalten von UHFFB

5.1 Versuchsprogramm und Bezeichnung der Versuchs- und Probekörper

Grundlage einer jeden Bemessung sind genaue Kenntnisse über das Materialverhalten. In diesem Forschungsprojekt wurde der von der Firma Lafarge mit der Bezeichnung Ductal® entwickelte UHFFB insbesondere auf seine mechanischen Eigenschaften hin untersucht.

Zur Charakterisierung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung wurde mit Hilfe von Druckversuchen die Spannungs-Dehnungs-Beziehung ermittelt. Gleichzeitig wurde auch der E-Modul unter Druckbeanspruchung bestimmt. Hinsichtlich des Verhaltens bei Zugbeanspruchung wurden sowohl Biegezugversuche zur Ermittlung der Spannungs-Mittendurchbiegungs-Beziehung als auch zentrische Zugversuche zur Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung durchgeführt. Zudem wurde sowohl bei Biegezugversuchen an Probekörpern mit Kerbe als auch bei zentrischen Zugversuchen an Versuchskörpern mit Kerbe die Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung bestimmt.

Die Versuchs- und Probekörper wurden in insgesamt drei Chargen hergestellt (Chargen C1 bis C3). Jede Charge enthielt sechs Zylinder für die Durchführung von Druckversuchen, wobei drei Zylinder je Charge einer E-Modul-Prüfung unterzogen wurden. Des Weiteren enthielt jede Charge drei Prismen zur Durchführung von Biegezugversuchen an Probekörpern ohne Kerbe. Die Zylinder und die Prismen dienten neben der Bestimmung des Materialverhaltens auch zur Kontrolle der Chargen untereinander. Je Charge wurden sechs Versuchskörper für die Durchführung der zentrischen Zugversuche betoniert, von denen alle sechs der ersten Charge und drei der zweiten Charge mit einer Kerbe versehen wurden. Die dritte Charge enthielt zusätzlich sechs weitere Prismen für die Durchführung von Biegezugversuchen an Probekörpern mit Kerbe.

Eine Übersicht über das Versuchsprogramm zum Materialverhalten von UHFFB zusammen mit der Anzahl der Versuchs- und Probekörper ist in Tabelle 5.1-1 dargestellt.

Tabelle 5.1-1: Versuchsprogramm zur Untersuchung des Materialverhaltens von UHFFB

Prüfverfahren		Charge		
		C1	C2	C3
Druckversuche	Zylinder	3	3	3
E-Modul-Prüfung und Druckversuche	Zylinder	3	3	3
Biegezugversuche	Prismen ohne Kerbe	3	3	3
	Prismen mit Kerbe			6
Zentrische Zugversuche	Versuchskörper ohne Kerbe		3	6
	Versuchskörper mit Kerbe	6	3	

Die Versuchs- und Probekörper wurden nach folgender Systematik gekennzeichnet:

Prüfverfahren – Nummer des Versuchs- bzw. Probekörpers – Material – Charge – Herstelldatum

Prüfverfahren:	KZ	Zylinder für die Druckversuche und die E-Modul-Prüfung
	M1	Prismen für die Biegezugversuche mit einem b/h-Verhältnis von 1
	N1	Versuchskörper für die zentrischen Zugversuche mit einem b/h-Verhältnis von 1
Nummer des Versuchs- bzw.: Probekörpers:	<Nummer>	fortlaufend je Charge
Material:	DFM2	Ductal ®, *fibres métalliques* (Stahlfasern), Premix G2
Charge:	C<Nummer>	
Herstelldatum:	<Tag>_<Monat>_<Jahr>	

z.B.	Kennzeichnung eines Zylinders	KZ – 1 – DFM2 – C1 – 06_09_2010
	Kennzeichnung eines Prismas	M1 – 2 – DFM2 – C2 – 13_09_2010
	Kennzeichnung eines Versuchskörpers für zentrische Zugversuche	N1 – 3 – DFM2 – C3 – 20_09_2010

Sowohl bei den Versuchskörpern für die zentrischen Zugversuche als auch bei den Probekörpern für die Biegezugversuche wurde das b/h-Verhältnis der Versuchs- bzw. Probekörper in Anlehnung an Untersuchungen von Frettlöhr und Reineck (2009) gewählt.

5.2 Versuchs- und Probekörper

5.2.1 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften

Alle Versuchs- und Probekörper wurden aus UHFFB mit der Bezeichnung Ductal® der Firma Lafarge hergestellt. Die Zusammensetzung von Ductal® kann der Tabelle 5.2-1 entnommen werden.

Die verwendeten Stahlfasern waren von der Firma Redaelli mit einer Länge von 14 mm und einem Durchmesser von 0,185 mm. Das Verhältnis von Länge zu Durchmesser der verwendeten Stahlfaser ergibt sich somit zu etwa 75.

Für das Mischen wurde ein Intensivmischer R 09 T der Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG mit Standardmischwerkzeug und einer Nutzfüllung von 150 l verwendet. Für den Teller wurde die niedrigste Umdrehungsgeschwindigkeit von 20 U/min und für den Wirbler die niedrigste Umdrehungsgeschwindigkeit von 133 U/min gewählt. In Tabelle 5.2-2 ist der Mischablauf dargestellt.

Tabelle 5.2-1: Zusammensetzung von Ductal®

Ausgangsstoffe	Bezeichnung	Masse [g]	Volumen [l]
Zement	Premix Ductal® G2	25000,0	11,4
Zuschlag			
Zusatzstoff			
Wasser	Wasser	1493,8	
Zusatzmittel	Verflüssiger Ductal® F2	342,5	
	Beschleuniger Ductal® A2	149,8	
Stahlfasern (2,0 Vol.-%)	Redaelli (l_f/d_f = 14/0,185)	1798,0	

Tabelle 5.2-2: Mischablauf für Ductal®

Vorgang	Mischdauer [min:s]	Gesamtzeit [min:s] bis [min:s]
Befüllen des Mischers mit Premix Ductal® G2		
Zugabe Wasser mit halber Menge Verflüssiger Ductal® F2	1:00	0:00 bis 1:00
Mischen	7:00	1:00 bis 8:00
Zugabe der restlichen Menge Verflüssiger Ductal® F2	1:00	8:00 bis 9:00
Mischen	3:00	9:00 bis 12:00
Zugabe der Stahlfasern in bis zu vier Portionen und kurzzeitiges Mischen nach jeder Zugabe	6:00	12:00 bis 18:00
Zugabe Beschleuniger Ductal® F2	1:00	18:00 bis 19:00
Mischen	4:00	19:00 bis 23:00

Der Tabelle 5.2-3 können für die Chargen C1 bis C3 das Herstelldatum, das Chargenvolumen sowie die Frischbetoneigenschaften entnommen werden. Die Temperatur des Frischbetons wurde direkt nach dem Ende des Mischens gemessen. Das Ausbreitmaß wurde auf einem angefeuchteten Standardstahltisch ermittelt. Mit Hilfe eines Mörtel-LP-Topfes wurden die Rohdichte und der Luftporengehalt bestimmt.

Tabelle 5.2-3: Frischbetoneigenschaften der Chargen C1 bis C3

Charge	Herstelldatum	Volumen	Frischbetoneigenschaften			
			Temperatur	Ausbreitmaß	Rohdichte	Luftporen-gehalt
		[l]	[°C]	[mm]	[kg/dm³]	[%]
C1	06.09.2010	133,4	30,3	310,0	2,45	3,0
C2	13.09.2010	93,5	28,8	282,5	2,51	2,6
C3	20.09.2010	131,1	27,2	300,0	2,51	3,0
Mittelwert		m	28,77	297,50	2,49	2,87
Standardabweichung		s	1,55	13,92	0,03	0,23
Variationskoeffizient		v	5,39 %	4,68 %	1,39 %	8,06 %

5.2.2 Geometrie der Versuchs- und Probekörper

5.2.2.1 Druckversuche und E-Modul-Prüfung

Die Zylinder für die Druckversuche und die E-Modul-Prüfung haben einen Durchmesser d von 100 mm und eine Höhe h von 200 mm.

5.2.2.2 Biegezugversuche

Die Prismen für die Durchführung der Biegezugversuche haben einen Querschnitt mit einer Breite b von 75 mm und einer Höhe h von 75 mm sowie eine Länge von 550mm.

5.2.2.3 Zentrische Zugversuche

Der von Frettlöhr und Plank im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelte Versuchskörper wurde von Frettlöhr (2011) als Standardversuchskörper zur Ermittlung der Materialparameter bei Zugbeanspruchung vorgeschlagen und diskutiert.

Die Geometrie und Abmessungen des Versuchskörpers für die Durchführung der zentrischen Zugversuche ist in Bild 5.2-1 dargestellt.

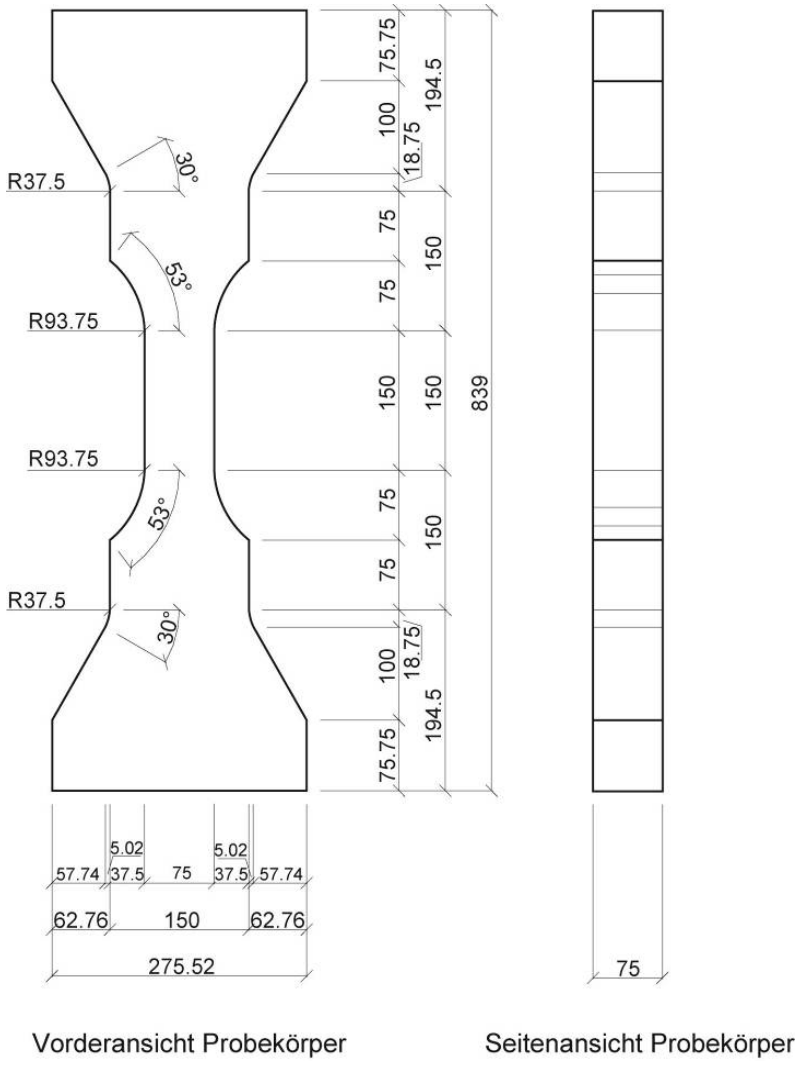


Bild 5.2-1: Geometrie des Versuchskörpers für zentrische Zugversuche (Abmessungen in mm)

5.2.3 Herstellung und Lagerung der Versuchs- und Probekörper

Die Schalungen zur Herstellung der Zylinder für die Druckversuche und zur Herstellung der Prismen für die Biegezugversuche sind in Bild 5.2-2 abgebildet, die Schalungen zur Herstellung der Versuchskörper für die zentrischen Zugversuche in Bild 5.2-3.

Vor dem Einbringen des Betons wurden die Innenflächen aller Schalungen mit Schalöl behandelt.

Die Schalungen zur Herstellung der Prismen für die Biegezugversuche und der Versuchskörper für die zentrischen Zugversuche wurden alle auf die gleiche Weise befüllt, um den Einfluss des Betonierens auf die Versuchsergebnisse so gering wie möglich zu halten. Das Befüllen erfolgte jeweils von der schmalen Schalungsseite bei einer Fließlänge von mindestens 450 mm.

Nach dem Befüllen der Schalungen zur Herstellung der Prismen wurde die Betonoberfläche umgehend mit Wasser eingesprüht, um ein Glätten der Oberfläche zu erleichtern und um eine „Elefantenhautbildung“ auf der Oberfläche soweit wie möglich zu verhindern. Trotz dieser Maßnahme lassen sich die „Elefantenhautbildung“ und damit einhergehende Unebenheiten auf der nicht geschalten Oberfläche nicht vollständig vermeiden, wie man in Bild 5.2-4 erkennen kann.

Bild 5.2-2: Schalungen zur Herstellung der Zylinder und Prismen

Bild 5.2-3: Schalungen zur Herstellung der Versuchskörper für die zentrischen Zugversuche

Bild 5.2-4: „Elefantenhautbildung“ auf der nicht geschalten Oberfläche

Bild 5.2-5: Betonageablauf zur Herstellung der Versuchskörper für die zentrischen Zugversuche

Um das Problem unebener Oberflächen zu umgehen wurden die Schalungen zur Herstellung der Versuchskörper für die zentrischen Zugversuche liegend mit geringer Neigung in Einfüllrichtung befüllt, dann verschlossen und anschließend senkrecht aufgestellt (vgl. Bild 5.2-5). Dadurch konnte im Bereich der Messlänge der Versuchskörper eine allseitig glatte Oberfläche ohne Unebenheiten erreicht werden.

Aufgrund der selbstverdichtenden Eigenschaften von Ductal® war ein Verdichten mittels rütteln nicht erforderlich.

Die Versuchs- und Probekörper wurden nach etwa 20 Stunden ausgeschalt und für die Wärmebehandlung in ein Wasserbecken gelegt (vgl. Bild 5.2-6). Im Wasserbecken lagerten die Versuchs- und Probekörper auf einem Lattenrost und waren vollständig mit Wasser überdeckt. Die Wassertemperatur wurde von etwa 15°C auf ungefähr 90°C langsam aufgeheizt und schließlich für mindestens 48 Stunden konstant gehalten. Nach dem Ausschalten der Heizung und dem Absinken der Wassertemperatur auf unter 35°C konnten die Versuchs- und Probekörper aus dem Wasserbecken entnommen werden. Durch die Wärmebehandlung ergeben sich die folgenden verbesserten Materialeigenschaften:

- Endfestigkeit wird früher erreicht (nach etwa 5 Tagen und nicht erst nach 28 Tagen);
- Endfestigkeit ist um etwa 15 bis 20 % höher als ohne Wärmebehandlung;
- autogenes Schwinden wird vorweggenommen;
- Kriechen wird reduziert (Endkriechzahl von ca. 0,8 auf ca. 0,2);
- Dauerhaftigkeit wird verbessert.

Nach der Entnahme aus dem Wasserbecken wurden die Versuchs- und Probekörper bis zur Prüfung trocken und vor Zugluft geschützt bei 19 bis 21°C auf einem Lattenrost gelagert.

Bild 5.2-6: Beladenes Wasserbecken vor dem Wassereinfüllen für die Wärmebehandlung

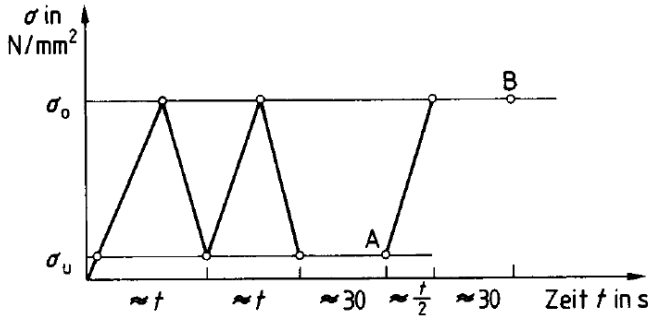
5.3 Druckversuche und E-Modul-Prüfung

5.3.1 Versuchsstand und -durchführung

Die Druckversuche und E-Modul-Prüfungen wurden an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMPA)) mit einer 3000 kN Drückprüfmaschine der Firma MFL Prüf- und Meßsysteme GmbH durchgeführt.

An drei Zylindern je Charge wurden kraftgeregelten Druckversuche in Anlehnung an DIN 1048-Teil 5 (1991) durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 0,5 MPa/s und wurde kontinuierlich bis zum Bruch des Probekörpers gesteigert. Es wurde die beim Bruch erreichte maximale Prüfkraft F_{max} aufgezeichnet.

Die Prüfung des E-Moduls erfolgte an den verbleibenden drei Zylindern je Charge und wurde in Anlehnung an DIN 1048-Teil 5 (1991) durchgeführt. Das Belastungsschema für die Durchführung der E-Modul-Prüfung ist in Bild 5.3-1 dargestellt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug durchweg 0,5 MPa/s.



A Ablesung bzw. Registrierung der unteren Spannung σ_u sowie der zugehörigen Dehnung ε_u bzw. der Meßlänge l_u.

B Ablesung bzw. Registrierung der oberen Spannung σ_o sowie der zugehörigen Dehnung ε_o bzw. der Meßlänge l_o.

t Be- und Entlastungszeit, die sich aus der Be- und Entlastungsgeschwindigkeit ergibt.

Bild 5.3-1: Belastungsschema für die E-Modul-Prüfung [DIN 1048-Teil 5 (1991)]

Im Anschluss an die Prüfung des E-Moduls wurde an den Zylindern ein verformungsgeregelter Druckversuch durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde mit 0,015 mm/min bis 0,030 mm/min sehr langsam gewählt, um der Prüfmaschinensteuerung ausreichend "Zeit" für die Nachregelung des Prüfkolbens bei Erreichen der Druckfestigkeit einzuräumen. Trotz der niedrigen Belastungsgeschwindigkeit kam es auf Grund der enorm hohen Energie, die bei Erreichen bzw. Überschreitung der Druckfestigkeit freigesetzt wird, bei manchen Probekörpern zu regelungs- und messtechnischen Problemen, so dass der abfallende Ast der Versuchskurve nicht bei allen Probekörpern ermittelt werden konnte.

5.3.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper

Die Zylinder für die Druckversuche und die E-Modul-Prüfung wurden zunächst auf eine Länge von etwas mehr als 200 mm durch beidseitiges Sägen gekürzt. Im Anschluss erfolgte ein Abschleifen der Schnittflächen mit einer Nassschleifmaschine. Hierzu wurde zunächst jede der Schnittflächen mit einer groben Diamanttopfscheibe (rechteckig verzahnte Ausführung) vorgeschliffen und im Anschluss mit einer mittleren Diamanttopfscheibe (ohne Verzahnung) fein geschliffen.

Vor der Prüfung wurden die tatsächlichen Abmessungen (Durchmesser d, Höhe h) sowie die Masse der Zylinder protokolliert (vgl. Anhang A.1).

Bei der E-Modul-Prüfung bestand die Instrumentierung aus drei induktiven Wegaufnehmern vom Typ W5TK der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH mit einem Nennmessbereich von 10 mm, die ringförmig um den Zylinder angeordnet waren und eine Messlänge von 100 mm aufwiesen. Mit ihnen wurde die Längenänderung Δl in Belastungsrichtung gemessen. Zusätzlich dazu wurde die Prüfkraft F und der Maschinenweg aufgezeichnet.

Bei den weggeregelten Druckversuchen wurden die Verformungen mit induktiven Wegaufnehmern vom Typ W5TK der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH mit einem Nennmessbereich von 10 mm zwischen der unteren Lastplatte und der Oberkante des Zylinders gemessen. Mit ihnen wurde die Längenänderung Δl in Belastungsrichtung gemessen. Zusätzlich dazu wurde die Prüfkraft F und der Maschinenweg aufgezeichnet.

5.3.3 Versuchsergebnisse

5.3.3.1 Druckversuche

Detaillierte Angaben zu den Abmessungen der einzelnen Zylinder und die gemessenen maximalen Prüfkräfte F_{max} sowie die gemessenen Kraft-Verformungs-Kurven finden sich im Anhang A.1.

Die gemessene Prüfkraft F wurde wie folgt in die äquivalente Druckspannung σ_c umgerechnet:

$$\sigma_c = -\frac{|F|}{A_c} \qquad (5\text{-}1)$$

mit σ_c [MPa] Druckspannung des Betons
F [N] Prüfkraft
A_c [mm²] Querschnittfläche des Betons

Demzufolge wurde die maximale Prüfkraft F_{max} wie folgt in die äquivalente Druckfestigkeit f_c umgerechnet:

$$f_c = -\frac{|F_{max}|}{A_c} \qquad (5\text{-}2)$$

mit f_c [MPa] Zylinderdruckfestigkeit des Betons
F_{max} [N] maximale Prüfkraft
A_c [mm²] Querschnittfläche des Betons

Grübl et al. (2001) wiesen darauf hin, dass die Kraft-Verformungs-Kurve in der Nähe des Ursprungs einen „Anlauf“ (Gegenkrümmung) besitzen kann. Bei der Umrechnung der Längenänderung Δl in äquivalente Betondruckdehnungen ε_c ist dies durch eine Korrektur der Längenänderung Δl_{corr} zu berücksichtigen (vgl. Bild 5.3-2).

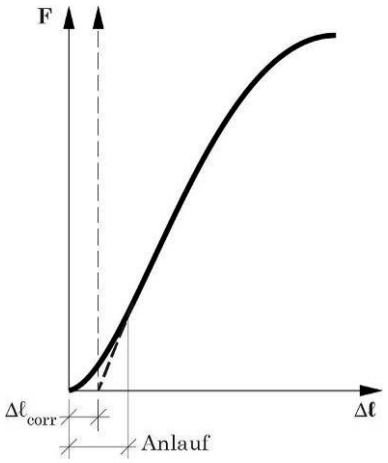


Bild 5.3-2: „Anlauf“ (Gegenkrümmung) der Kraft-Verformungs-Kurve in der Nähe des Ursprungs nach Grübl et al. (2001)

Die Längenänderung Δl wurde demnach wie folgt in die äquivalente Betondruckdehnung ε_c umgerechnet:

$$\varepsilon_c = -\frac{\left|\Delta l - \Delta l_{corr}\right|}{l} \qquad (5\text{-}3)$$

mit	ε_c [‰]	Betondruckdehnung
	Δl [mm]	Längenänderung in Belastungsrichtung
	Δl_{corr} [mm]	Korrektur der Längenänderung in Belastungsrichtung bei „Anlauf“ (Gegenkrümmung) der Kraft-Verformungs-Kurve in der Nähe des Ursprungs
	l [mm]	Messlänge

Die Längenänderungen Δl berechnet sich dabei als Mittelwert der Messwerte der ringförmig um den Zylinder angebrachten Wegaufnehmer.

In Bild 5.3-3 bis Bild 5.3-5 sind die σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Chargen C1 bis C3 als Ergebnis der verformungsgeregelten Druckversuche dargestellt. Die Kurven weisen alle bis zum Erreichen der Druckfestigkeit f_c einen ähnlichen Verlauf auf. Die Druckspannung σ_c steigt nahezu linear bis zur Druckfestigkeit f_c an. Das Erreichen der Druckfestigkeit f_c kündigt sich durch ein wahrzunehmendes „Knistern“ an und mündet in einen lauten „Knall“ beim Versagen. Das Versagen ist schlagartig und wird von einem plötzlichen Abfall der Druckspannungen begleitet. Danach nehmen die Druckspannungen σ_c mit Zunahme der Betondruckdehnungen ε_c weiter ab.

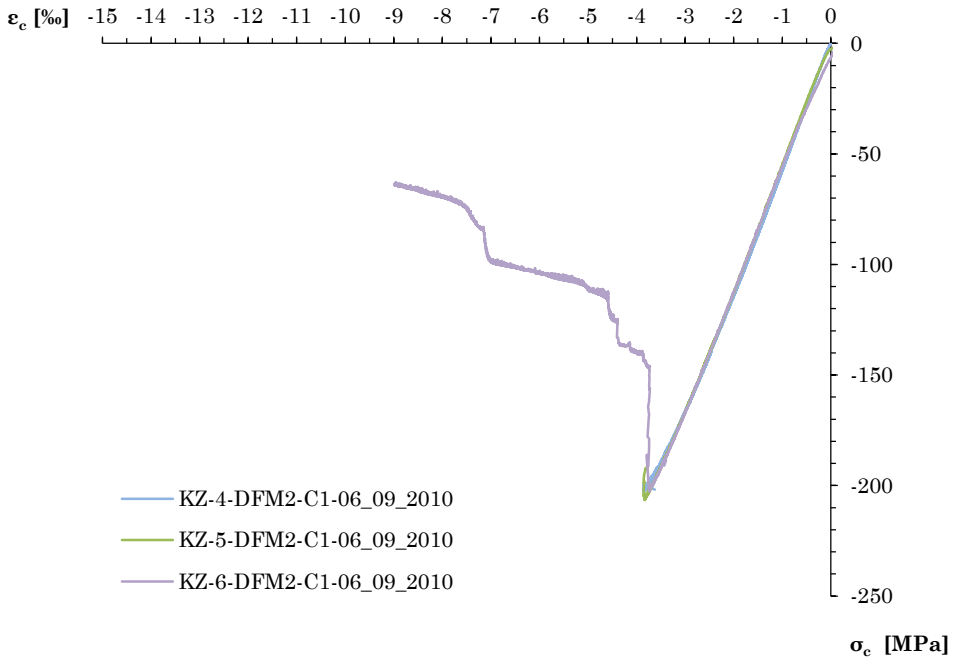


Bild 5.3-3: σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Charge C1 als Ergebnis der verformungsgeregelten Druckversuche (bei den Zylindern KZ-4-DFM2-C1-06_09_2010 und KZ-5-DFM2-C1-06_09_2010 konnte der abfallende Ast der Versuchskurve nicht ermittelt werden)

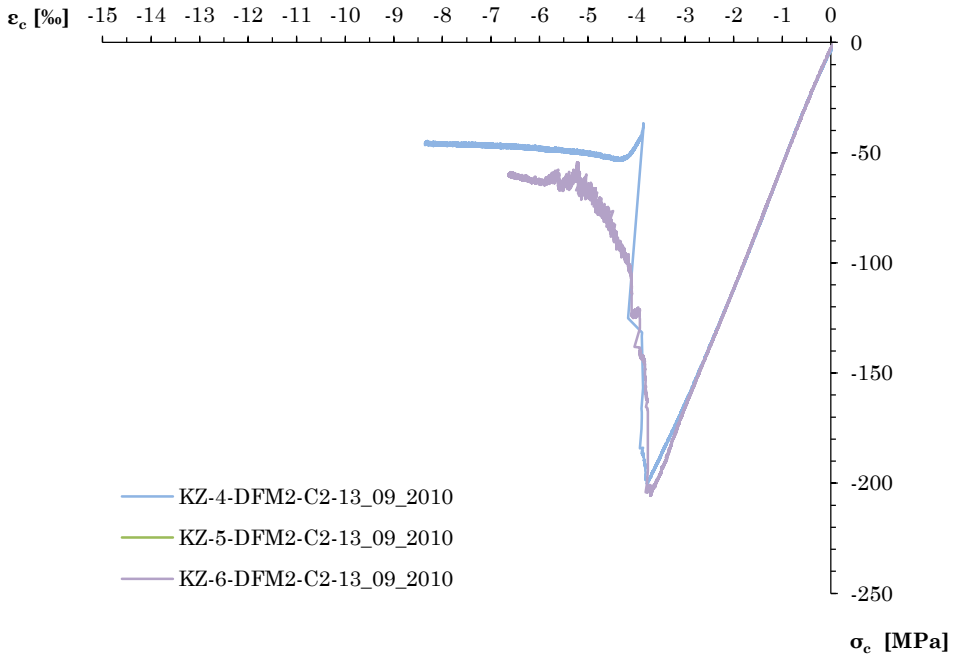


Bild 5.3-4: σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Charge C2 als Ergebnis der verformungsgeregelten Druckversuche (beim Zylinder KZ-5-DFM2-C2-13_09_2010 kam es zu einem vollständigen Datenverlust)

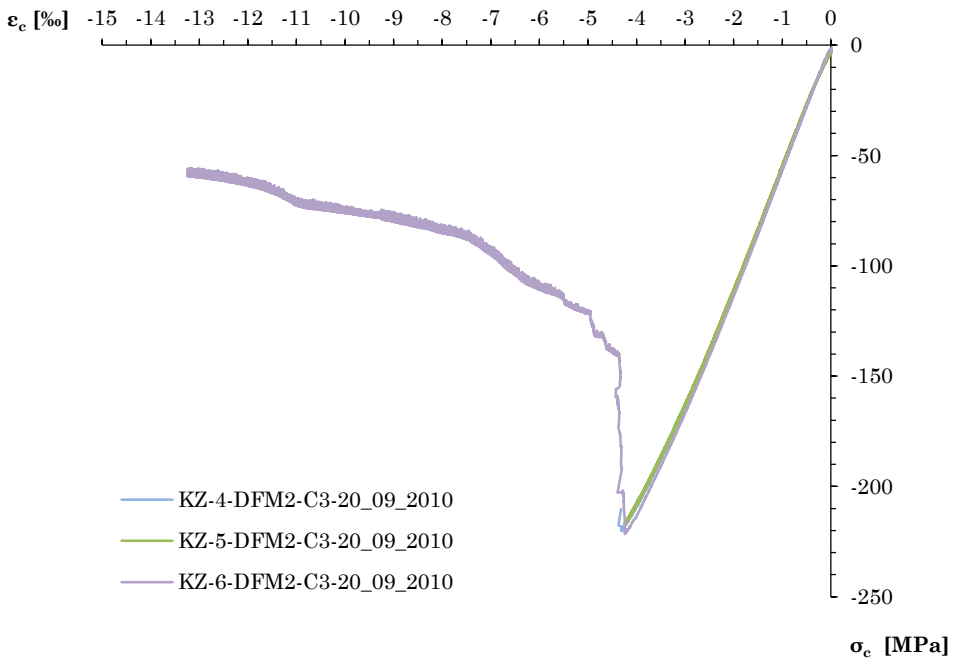


Bild 5.3-5: σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Charge C3 als Ergebnis der verformungsgeregelten Druckversuche (bei den Zylindern KZ-4-DFM2-C3-20_09_2010 und KZ-5-DFM2-C3-20_09_2010 konnte der abfallende Ast der Versuchskurve nicht ermittelt werden)

In Tabelle 5.3-1 sind für die Chargen C1 bis C3 die bei allen Druckversuchen ermittelten Druckfestigkeiten f_c sowie die bei den verformungsgeregelten Druckversuchen ermittelten Betondruckdehnungen ε_{c1} aufgeführt. Der Mittelwert der Druckfestigkeit f_c ergab sich zu -211,3 MPa. Der Variationskoeffizient fiel mit 5,7 % sehr gering aus. Für die zur Druckfestigkeit f_c korrespondierende Betondruckdehnung ε_{c1} ergab sich ein Mittelwert von -3,96 ‰ bei einem ebenfalls sehr geringen Variationskoeffizienten von 6,36 %.

In Bild 5.3-6 ist die Zylinderdruckfestigkeit f_c in Abhängigkeit vom Alter der Zylinder der Chargen C1 bis C3 zum Zeitpunkt der Prüfung aufgetragen. Ein Einfluss des Alters der Zylinder auf die Zylinderdruckfestigkeit f_c ist nicht zu erkennen.

Tabelle 5.3-1: Ergebnisse der kraft- und verformungsgeregelten Druckversuche der Chargen C1 bis C3

Kennzeichnung		f_c	m	s	v	ε_{c1}	m	s	v
		[MPa]				[‰]			
KZ-1-DFM2-C1-06_09_2010		-211,7							
KZ-2-DFM2-C1-06_09_2010		-225,1							
KZ-3-DFM2-C1-06_09_2010		-206,0	(-214,3) [2)]						
KZ-4-DFM2-C1-06_09_2010		-202,7				-3,85			
KZ-5-DFM2-C1-06_09_2010		-206,6				-3,83			
KZ-6-DFM2-C1-06_09_2010		-202,7	-209,1	8,50	4,07 %	-3,74	-3,81	0,06	1,56 %
KZ-1-DFM2-C2-13_09_2010		-185,5							
KZ-2-DFM2-C2-13_09_2010		-198,3							
KZ-3-DFM2-C2-13_09_2010		-209,6	(-197,8) [2)]						
KZ-4-DFM2-C2-13_09_2010		-200,3				-3,79			
KZ-5-DFM2-C2-13_09_2010 [1)]									
KZ-6-DFM2-C2-13_09_2010		-205,7	-199,9	9,21	4,61 %	-3,72	-3,75	0,05	1,33 %
KZ-1-DFM2-C3-20_09_2010		-223,6							
KZ-2-DFM2-C3-20_09_2010		-221,4							
KZ-3-DFM2-C3-20_09_2010		-232,8	(-225,9) [2)]						
KZ-4-DFM2-C3-20_09_2010		-220,2				-4,30			
KZ-5-DFM2-C3-20_09_2010		-217,9				-4,25			
KZ-6-DFM2-C3-20_09_2010		-221,6	-222,9	5,20	2,33 %	-4,24	-4,26	0,04	0,85 %
Mittelwert	m	-211,3				-3,96			
Standardabweichung	s	12,05				0,25			
Variationskoeffizient	v	5,70 %				6,36 %			

[1)] Beim Zylinder KZ-5-DFM2-C2-13_09_2010 kam es bei der Durchführung des verformungsgeregelten Druckversuchs zu einem vollständigen Datenverlust.

[2)] Der Mittelwert aus den Druckfestigkeiten f_c der ersten drei Zylinder je Charge diente zur Festlegung der oberen Prüfspannung σ_o bei der E-Modul-Prüfung.

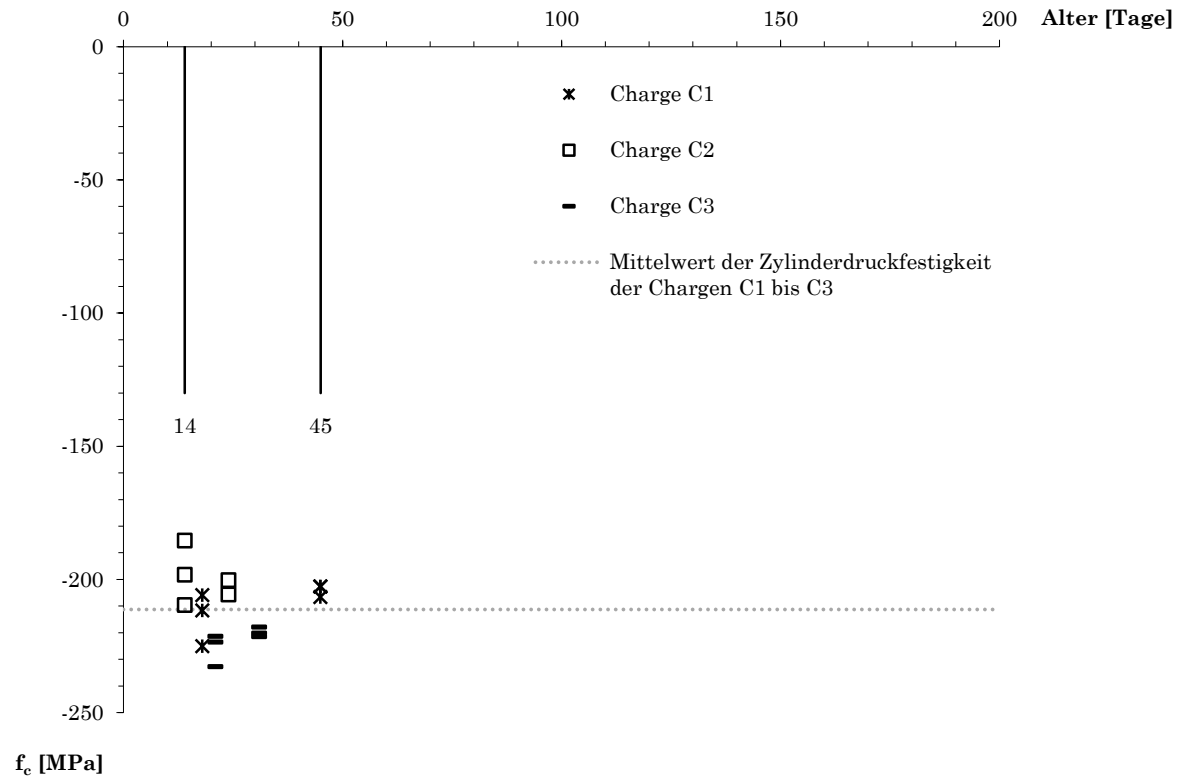


Bild 5.3-6: Zylinderdruckfestigkeit f_c in Abhängigkeit vom Alter der Zylinder der Chargen C1 bis C3 zum Zeitpunkt der Prüfung

5.3.3.2 E-Modul-Prüfung

Der E-Modul berechnet sich aus der oberen und unteren Prüfspannung und den dazu korrespondierenden Dehnungen bei der dritten Belastung des in Bild 5.3-1 dargestellten Belastungsschemas wie folgt:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\varepsilon_c} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u} \qquad (5\text{-}4)$$

mit E_c [MPa] E-Modul von UHFFB unter Druckbeanspruchung (Sekantenmodul)
σ_o [MPa] obere Prüfspannung = $1/3 \cdot f_{cm}$
σ_u [MPa] untere Prüfspannung = 0,5 MPa
$\varepsilon_o(\sigma_o)$ [-] Dehnung bei Erreichen der oberen Prüfspannung
$\varepsilon_u(\sigma_u)$ [-] Dehnung bei Erreichen der unteren Prüfspannung

Detaillierte Angaben zu der oberen und unteren Prüfspannung und der dazu korrespondierenden Dehnung der einzelnen Zylinder finden sich im Anhang A.1. Die berechneten E-Module für die einzelnen Zylinder der Chargen C1 bis C3 können der Tabelle 5.3-2 entnommen werden. Der Mittelwert des E-Moduls E_c beträgt 59364 MPa. Der Variationskoeffizient fällt mit 1,14 % sehr gering aus.

In Bild 5.3-7 ist der E-Modul E_c in Abhängigkeit vom Alter der Zylinder zum Zeitpunkt der Prüfung aufgetragen. Ein Einfluss des Alters der Zylinder auf den E-Modul E_c ist nicht zu erkennen.

Tabelle 5.3-2: Bei E-Modul-Prüfungen an Zylindern der Chargen C1 bis C3 ermittelte Sekantenmodul

Kennzeichnung		E_c [MPa]	m	s	v
KZ-4-DFM2-C1-06_09_2010		59023			
KZ-5-DFM2-C1-06_09_2010		59677			
KZ-6-DFM2-C1-06_09_2010		59249	59316	332	0,56 %
KZ-4-DFM2-C2-13_09_2010		59814			
KZ-5-DFM2-C2-13_09_2010		60015			
KZ-6-DFM2-C2-13_09_2010		60390	60073	292	0,49 %
KZ-4-DFM2-C3-20_09_2010		58989			
KZ-5-DFM2-C3-20_09_2010		58143			
KZ-6-DFM2-C3-20_09_2010		58980	58704	486	0,83 %
Mittelwert	m	59364			
Standardabweichung	s	679			
Variationskoeffizient	v	1,14%			

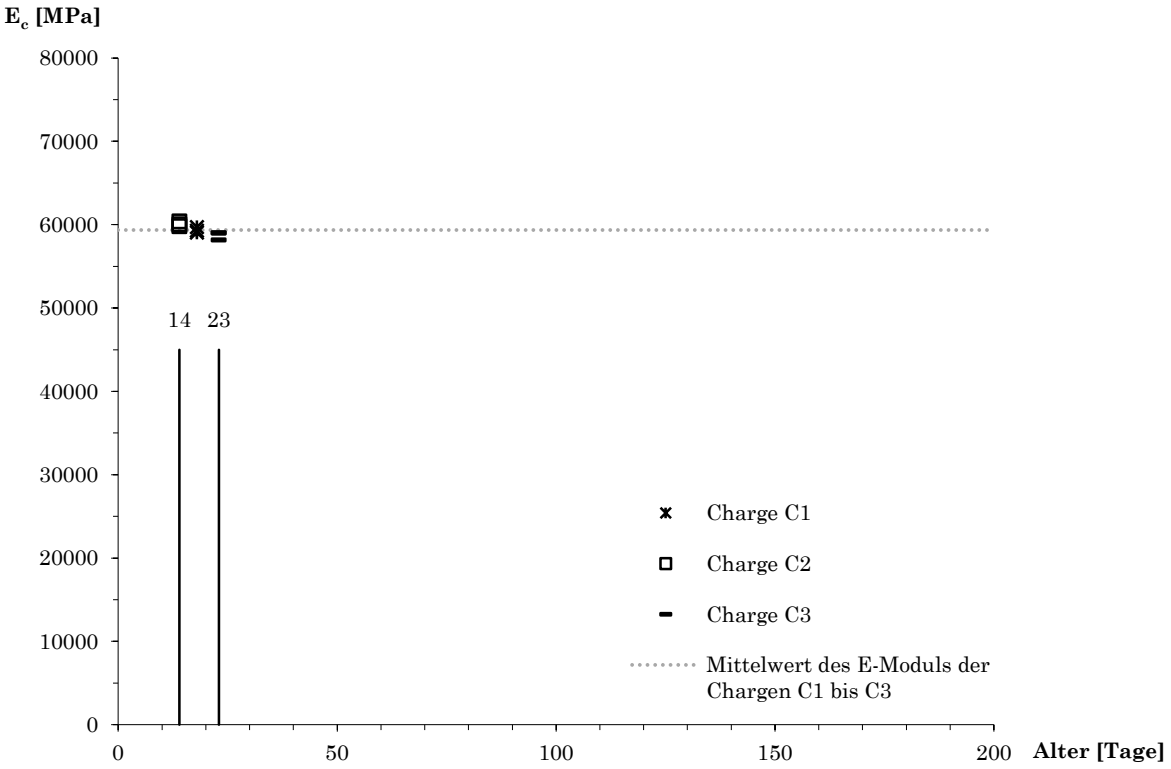


Bild 5.3-7: E-Modul E_c in Abhängigkeit vom Alter der Zylinder der Chargen C1 bis C3 zum Zeitpunkt der Prüfung

5.3.3.3 Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Basierend auf den Untersuchungen von Frettlöhr und Reineck (2009) hat Frettlöhr (2011) für Ductal® mit Wärmebehandlung die in Bild 5.3-8 dargestellte Approximation der σ_c -ε_c-Kurven vorgeschlagen.

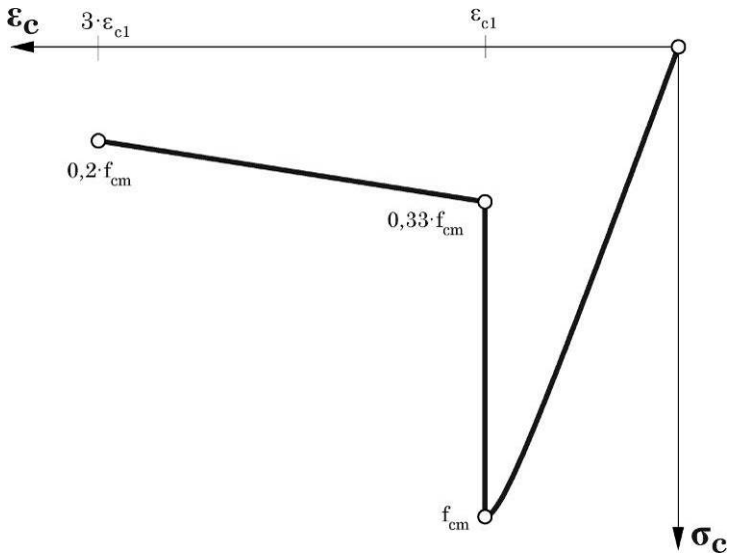


Bild 5.3-8: Approximation der σ_c -ε_c-Kurve für Ductal® nach Frettlöhr (2011)

Dabei lässt sich der aufsteigende Ast der σ_c -ε_c-Kurve mit der Druckspannungskurve der DIN 1045-1 (2008) wie folgt beschreiben:

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = f_{cm} \cdot \frac{\frac{E_{c0m}}{E_{c1}} \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + \left(\frac{E_{c0m}}{E_{c1}} - 2\right) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \qquad (5\text{-}5)$$

mit	f_{cm} [MPa]	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons
	ε_{c1} [-]	Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit des Betons
	E_{c0m} [MPa]	Mittelwert des Tangentenmodul im Ursprung = Mittelwert des Elastizitätsmoduls E_{cm} (Sekantenwert) bei UHFFB
	$E_{c1} = f_{cm}/\varepsilon_{c1}$	Sekantenmodul durch den Ursprung und den Punkt, an dem f_{cm} erreicht wird

Nach Erreichen der Druckfestigkeit f_c haben Frettlöhr und Reineck (2009) einen nahezu senkrechten Abfall der Druckspannungen auf etwa $1/3 \cdot f_c$ festgestellt, ehe die σ_c -ε_c-Kurve in einen flach abfallenden Verlauf übergeht, bis eine Bruchdehnung von etwa $3 \cdot \varepsilon_{c1}$ bei einer Druckspannung von etwa $1/5 \cdot f_c$ erreicht ist.

In Bild 5.3-9 ist die Approximation der σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Chargen C1 bis C3 dargestellt. Mit der von Frettlöhr (2011) vorgeschlagenen Approximation lassen sich auch die im Rahmen dieses Forschungsprojekts gewonnenen σ_c -ε_c-Kurven gut beschreiben.

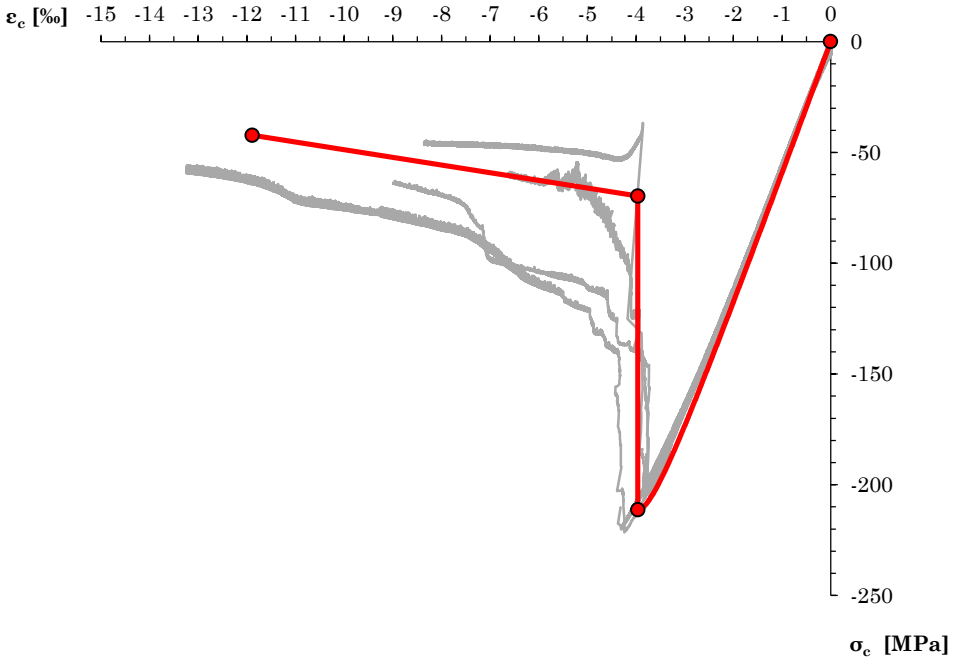


Bild 5.3-9: Approximation der σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Chargen C1 bis C3

5.4 Biegezugversuche

5.4.1 Versuchsstand und -durchführung

Die Biegezugversuche wurden an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMPA)) mit einer 200 kN Biegeprüfmaschine der Firma Toni Technik Baustoffprüfsystem GmbH durchgeführt. In Bild 5.4-1 ist die Prüfmaschine mit eingebautem Prisma mit Kerbe gezeigt.

Außerdem sei angemerkt, dass bei allen Prismen die Orientierung der Längsachse in Bezug auf die Prüfrichtung so war, dass beim Prüfen die nicht geschalte Betonoberfläche auf der druckbeanspruchten Seite lag. Die Unebenheiten auf der nicht geschalten Betonoberfläche im Bereich der Lasteinleitung wurden durch das Aufkleben von Lastverteilungsstreifen (5 mm dick, 20 mm breit) ausgeglichen.

Die Durchführung der Biegezugversuche erfolgte weggeregelt über den Maschinenweg der Prüfmaschine. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug bei der Durchführung der Biegezugversuche an Prismen ohne Kerbe durchweg 0,2 mm/min, an Prismen mit Kerbe durchweg 0,1 mm/min.

Bild 5.4-1: Versuchsstand für die Durchführung der Biegezugversuche mit eingebautem Prisma mit Kerbe

5.4.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper

5.4.2.1 Probekörper ohne Kerbe

Vor der Prüfung wurden bei den Prismen ohne Kerbe die tatsächlichen Querschnittsabmessungen (Breite b, Höhe h) an den Lasteinleitungsachsen und der Mitte der Prismen protokolliert. Der Mittelwert für die Querschnittsbreite b und die Querschnittshöhe h ist in Anhang A.2 aufgeführt.

Die Instrumentierung bestand aus zwei induktiven Wegaufnehmern vom Typ WA/20 mm der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH mit einem Nennmessbereich von 20 mm zur Aufzeichnung der vertikalen Mittendurchbiegung w_m. Die Anordnung und Bezeichnung der Wegaufnehmer kann Bild 5.4-2 entnommen werden. Außerdem wurden die Prüfkraft F und der Maschinenweg aufgezeichnet. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte mit einer Messfrequenz von 5 Hz.

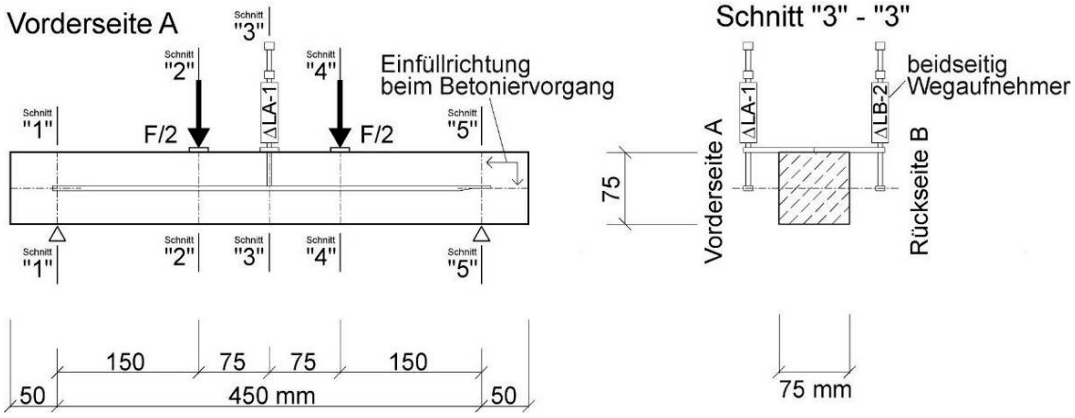


Bild 5.4-2: Instrumentierung der Prismen ohne Kerbe für die Durchführung der Biegezugversuche

5.4.2.2 Probekörper mit Kerbe

Die Prismen zur Ermittlung der Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung wurden zunächst mit einer ca. 25 mm tiefen und 4 mm breiten Kerbe versehen. Die Kerbe wurde mit Hilfe einer Diamanttrennscheibe in die geschalte Unterseite der Prismen eingesägt.

Vor der Prüfung wurden die tatsächlichen Querschnittsabmessungen (Breite b, Höhe h) im Bereich der Kerbe und die Kerbtiefe h_k protokolliert. Der Mittelwert für die Querschnittsbreite b, die Querschnittshöhe h und der Kerbtiefe h_k ist in Anhang A.2 aufgeführt.

Die Instrumentierung bestand aus zwei Rissöffnungsmessern vom Typ UB-A (displacement transducer) der Firma Sokki Kenkyujo mit einem Nennmessbereich von 5 mm. Des Weiteren wurde analog zu den Biegezugversuchen an Prismen ohne Kerbe die vertikale Mittendurchbiegung w_m mit induktiven Wegaufnehmern vom Typ WA/20 mm der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH mit einem Nennmessbereich von 20 mm gemessen. Die Anordnung und Bezeichnung der Rissöffnungsmesser und der Wegaufnehmer kann Bild 5.4-3 entnommen werden. Außerdem wurden die Prüfkraft F und der Maschinenweg aufgezeichnet. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte mit einer Messfrequenz von 5 Hz.

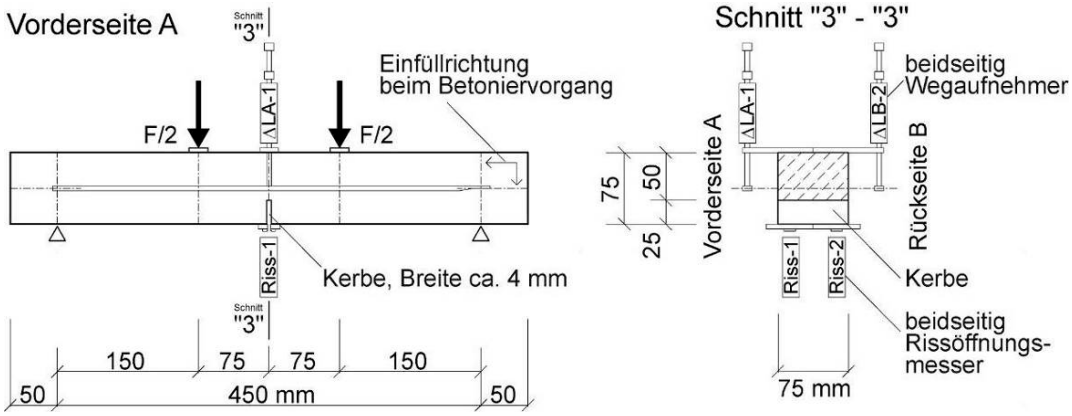


Bild 5.4-3: Instrumentierung der Prismen mit Kerbe für die Durchführung der Biegezugversuche

5.4.3 Versuchsergebnisse der Biegezugversuche an Probekörpern ohne Kerbe

Die Biegezugrandspannung σ_{ctfl} infolge der gemessenen Prüfkraft F wurde für die Prismen ohne Kerbe wie folgt berechnet, wobei die Last F/2 im Abstand von 2·h von der Auflagerachse angreift.

$$\sigma_{ctfl} = \frac{M}{W} = \frac{\frac{F}{2} \cdot 2 \cdot h}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{6 \cdot F}{b \cdot h} \qquad (5\text{-}6)$$

mit σ_{ctfl} [MPa] Biegezugrandspannung
F [N] Prüfkraft
b [mm] Querschnittbreite
h [mm] Querschnitthöhe

Der Verlauf der Biegezugrandspannungen σ_{ctfl} wird über die gemittelte Mittendurchbiegung w_m aufgetragen. In Bild 5.4-4 bis Bild 5.4-6 sind die σ_{ctfl} -w_m-Kurven der Prismen ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche dargestellt.

Die Biegezugrandspannung steigt zunächst in der linear elastischen Phase steil an, bis die Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ erreicht wird. An diesem Punkt tritt der erste Makroriss auf, was auch akustisch während des Versuchs durch ein erstes „Knackgeräusch“ wahrgenommen werden kann. In Tabelle 5.4-1 sind für die Chargen C1 bis C3 die ermittelten Elastizitätsgrenzen der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ sowie die dazu korrespondierenden Mittendurchbiegungen $w_m(f_{ctfl,el})$ aufgeführt. Der Mittelwert der Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ ergab sich zu 17,62 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 22,49 %. Für die zur Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl,el})$ ergab sich ein Mittelwert von 0,18 mm. Der Variationskoeffizient betrug 26,25 %.

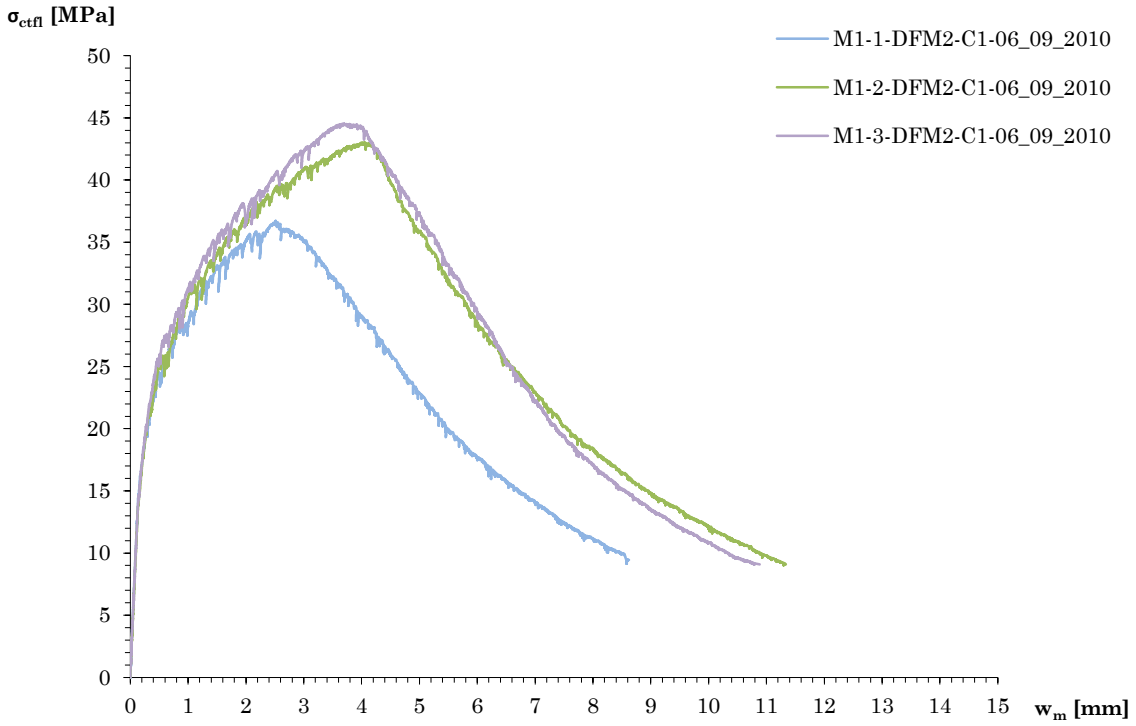


Bild 5.4-4: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen ohne Kerbe der Charge C1 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

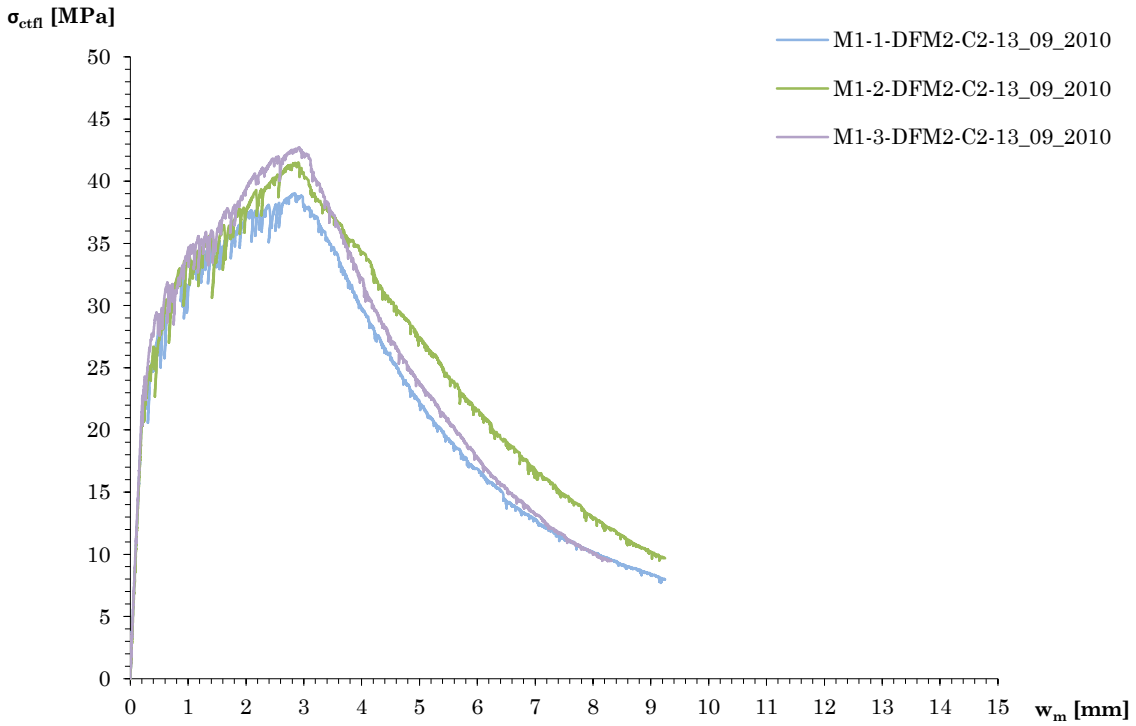


Bild 5.4-5: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen ohne Kerbe der Charge C2 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

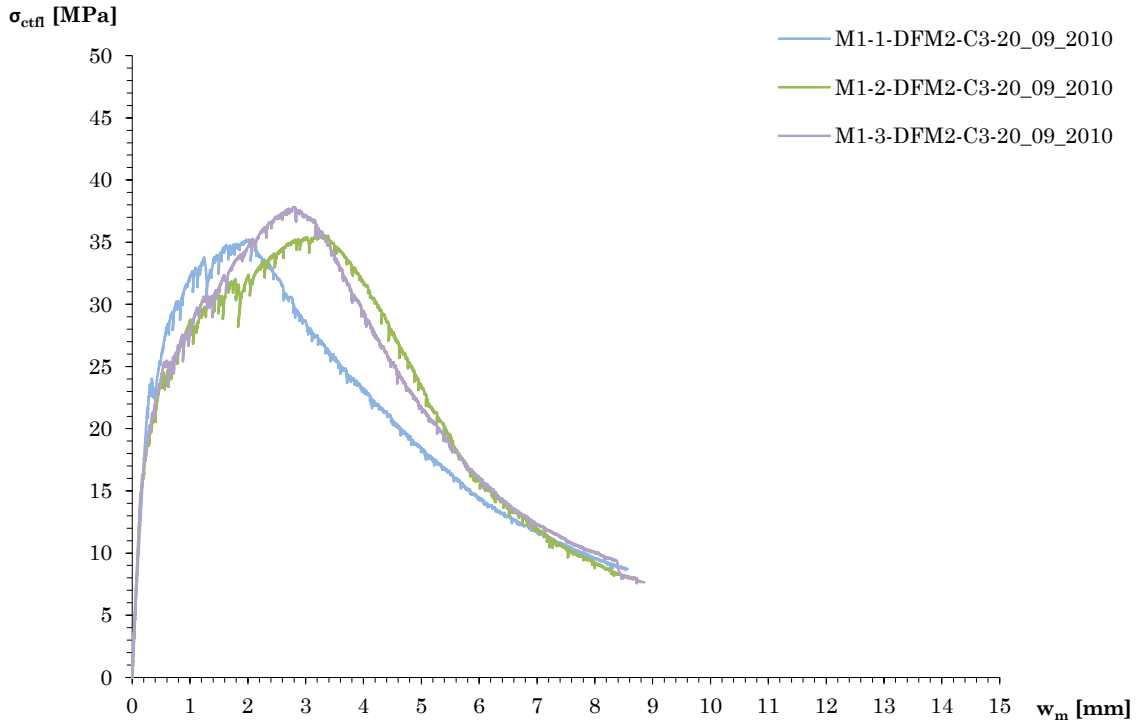


Bild 5.4-6: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen ohne Kerbe der Charge C3 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

Tabelle 5.4-1: Bei weggeregelten Biegezugversuchen an Prismen ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 ermittelte Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ und korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl,el})$

Kennzeichnung		$f_{ctfl,el}$ [MPa]	m	s	v	$w_m(f_{ctfl,el})$ [mm]	m	s	v
M1-1-DFM2-C1-06_09_2010		14,72				0,14			
M1-2-DFM2-C1-06_09_2010		13,84				0,14			
M1-3-DFM2-C1-06_09_2010		14,03	14,20	0,47	3,29 %	0,14	0,14	0,00	1,11 %
M1-1-DFM2-C2-13_09_2010		21,94				0,21			
M1-2-DFM2-C2-13_09_2010		20,65				0,20			
M1-3-DFM2-C2-13_09_2010		22,74	21,78	1,06	4,85 %	0,21	0,21	0,01	2,95 %
M1-1-DFM2-C3-20_09_2010		21,65				0,26			
M1-2-DFM2-C3-20_09_2010		14,80				0,15			
M1-3-DFM2-C3-20_09_2010		14,20	16,89	4,14	24,52 %	0,14	0,18	0,07	38,04 %
Mittelwert	m	17,62				0,18			
Standardabweichung	s	3,96				0,05			
Variationskoeffizient	v	22,49 %				26,25 %			

Nach Überschreitung der Elastizitätsgrenze setzt die Phase der Multirissbildung („multi-cracking-branch“) ein, in der sich viele feine Makrorisse in einem engen Abstand ausbilden. In dieser Phase steigt die Biegezugrandspannung ungefähr parabelförmig weiter bis zum Erreichen der Biegezugfestigkeit f_{ctfl} an, bei der die Lokalisierung einsetzt. Mit dem Einsetzen der Lokalisierung nimmt die Breite einer der Risse deutliche zu, wobei die Breite der übrigen Risse abnimmt. In Tabelle 5.4-2 sind für die Chargen C1 bis C3 die ermittelten Biegezugfestigkeiten f_{ctfl} sowie die dazu korrespondierenden Mittendurchbiegungen w_m (f_{ctfl}) aufgeführt. Der Mittelwert der Biegezugfestigkeit f_{ctfl} ergab sich zu 39,57 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 8,76 %. Für die zur Biegezugfestigkeit f_{ctfl} korrespondierenden Mittendurchbiegungen $w_m(f_{ctfl})$ ergab sich ein Mittelwert von 3,00 mm bei einem Variationskoeffizienten von 19,83 %.

Tabelle 5.4-2: Bei weggeregelten Biegezugversuchen an Prismen ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 ermittelte Biegezugfestigkeit f_{ctfl} und korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl})$

Kennzeichnung		f_{ctfl}	m	s	v	$w_m(f_{ctfl})$	m	s	v
		[MPa]				[mm]			
M1-1-DFM2-C1-06_09_2010		36,72				2,51			
M1-2-DFM2-C1-06_09_2010		43,01				4,00			
M1-3-DFM2-C1-06_09_2010		44,53	41,42	4,14	10,00 %	3,70	3,40	0,79	23,10 %
M1-1-DFM2-C2-13_09_2010		39,02				2,85			
M1-2-DFM2-C2-13_09_2010		41,51				2,91			
M1-3-DFM2-C2-13_09_2010		42,71	41,08	1,88	4,57 %	2,91	2,89	0,04	1,22 %
M1-1-DFM2-C3-20_09_2010		35,21				2,03			
M1-2-DFM2-C3-20_09_2010		35,62				3,30			
M1-3-DFM2-C3-20_09_2010		37,82	36,22	1,40	3,87 %	2,81	2,71	0,64	23,61 %
Mittelwert	m	39,57				3,00			
Standardabweichung	s	3,47				0,60			
Variationskoeffizient	v	8,76 %				19,83 %			

Mit fortschreitender Lokalisierung fällt die Biegezugrandspannung, bedingt durch den Faserauszug, wieder kontinuierlich ab. Der Verlauf und die Steigung des abfallenden Astes variieren bei den einzelnen Prismen teilweise, weil u.a. die Lokalisierung an unterschiedlichen Stellen entlang der Längsachse der Prismen erfolgte. Im Anhang A.2 sind für die Chargen C1 bis C3 die Prismen ohne Kerbe und die Lage der Risslokalisierung abgebildet.

In Bild 5.4-7 ist die Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ und in Bild 5.4-8 die Biegezugfestigkeit f_{ctfl} in Abhängigkeit vom Alter der Prismen zum Zeitpunkt der Prüfung aufgetragen. In beiden Fällen ist ein Einfluss des Alters der Prismen nicht zu erkennen.

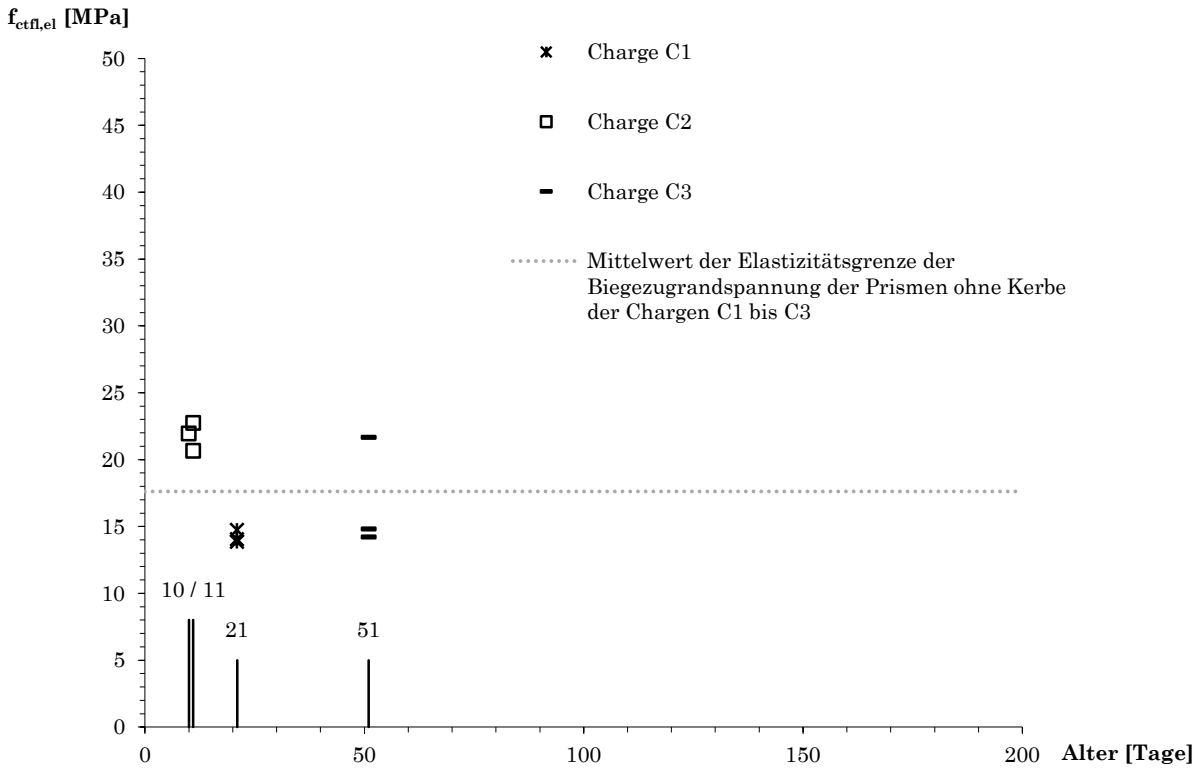


Bild 5.4-7: Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ in Abhängigkeit vom Alter der Prismen ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 zum Zeitpunkt der Prüfung

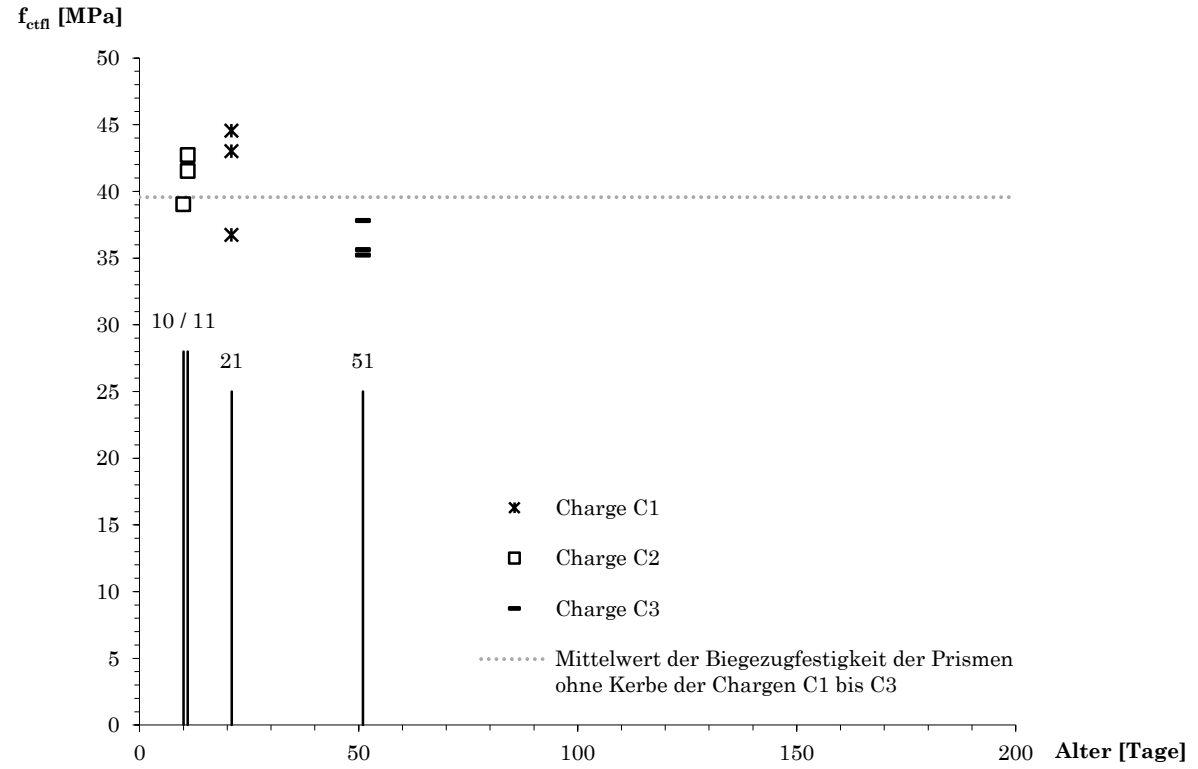


Bild 5.4-8: Biegezugfestigkeit f_{ctfl} in Abhängigkeit vom Alter der Prismen ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 zum Zeitpunkt der Prüfung

Die σ_{ctfl}-w_m-Kurven lassen sich durch den im Bild 5.4-9 definierten multilinearen Linienzug zutreffend beschreiben. Aus den einzelnen σ_{ctfl}-w_m-Kurven wurde durch Berechnung der charakteristischen Punkte des multilinearen Linienzuges eine mittlere charakteristische σ_{ctfl}-w_m-Kurve erzeugt (vgl. Bild 5.4-10). Die Werte für die charakteristischen Punkte sind der Tabelle 5.4-3 und Tabelle 5.4-4 zu entnehmen.

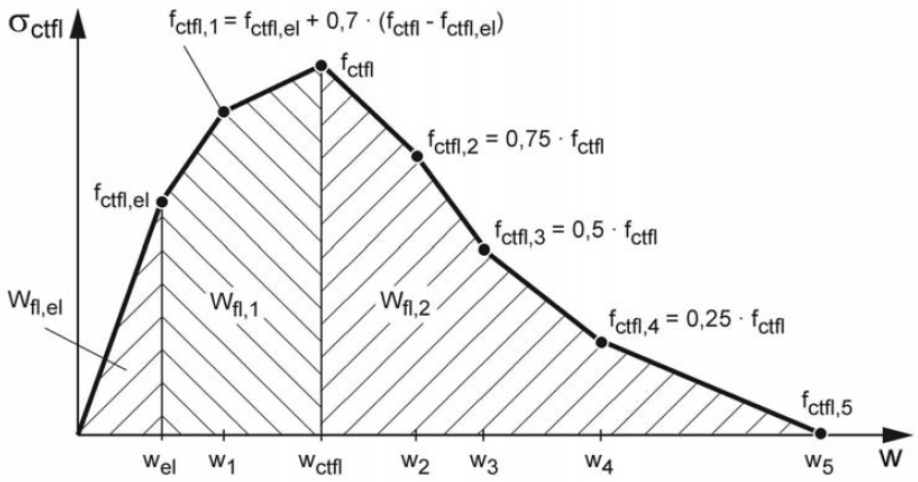


Bild 5.4-9: Definition einer aus einem Biegezugversuch ermittelten charakteristischen σ_{ctfl}-w_m-Kurve [Frettlöhr (2011)]

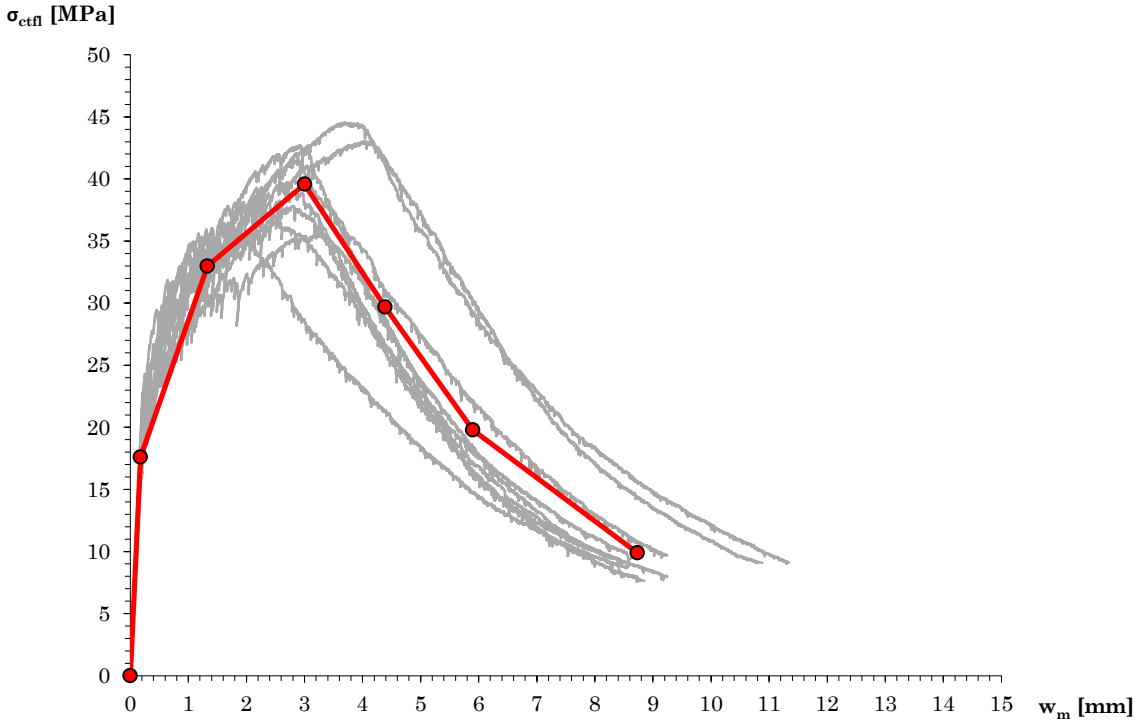


Bild 5.4-10: Mittlere charakteristische σ_{ctfl}-w_m-Kurve der Probekörper ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

Tabelle 5.4-3: Charakteristische Punkte des aufsteigenden Astes der mittleren charakteristischen σ_{ctfl}-w_m-Kurve der Probekörper ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3

		$f_{ctfl,el}$ [MPa]	$w_m(f_{ctfl,el})$ [‰]	$f_{ctfl,1}$ [MPa]	$w_{m,1}$ [‰]	f_{ctfl} [MPa]	$w_m(f_{ctfl})$ [‰]
Mittelwert	m	17,62	0,18	32,99	1,33	39,57	3,00
Standardabweichung	s	3,96	0,05	2,67	0,23	3,47	0,60
Variationskoeffizient	v	22,49 %	26,25 %	8,09 %	17,31 %	8,76 %	19,83 %

Tabelle 5.4-4: Charakteristische Punkte des abfallenden Astes der mittleren charakteristischen σ_{ctfl}-w_m-Kurve der Probekörper ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3

		$f_{ctfl,2}$ [MPa]	$w_{m,2}$ [‰]	$f_{ctfl,3}$ [MPa]	$w_{m,3}$ [‰]	$f_{ctfl,4}$ [MPa]	$w_{m,4}$ [‰]	$f_{ctfl,5}$ [MPa]	$w_{m,5}$ [‰]
Mittelwert	m	29,68	4,39	19,79	5,90	9,89	8,73	0,00	
Standardabweichung	s	2,60	0,68	1,73	0,74	0,87	0,91		
Variationskoeffizient	v	8,76 %	15,50 %	8,76 %	12,52 %	8,76 %	10,45 %		

5.4.4 Versuchsergebnisse der Biegezugversuch an Probekörpern mit Kerbe

Mit Gl. (5-7) wird die Biegezugrandspannung σ_{ctfl} infolge der gemessenen Prüfkraft F aus den Versuchen der Prismen berechnet, wobei die Last F/2 im Abstand von 2·h von der Auflagerachse angreift.

$$\sigma_{ctfl} = \frac{M}{W} = \frac{\frac{F}{2} \cdot 2 \cdot h}{\frac{b \cdot (h - h_k)^2}{6}} = \frac{6 \cdot F \cdot h}{b \cdot (h - h_k)^2} \qquad (5\text{-}7)$$

mit
σ_{ctfl} [MPa]	Biegezugrandspannung
F [N]	Prüfkraft
b [mm]	Querschnittbreite
h [mm]	Querschnitthöhe
h_k [mm]	Kerbtiefe

Der Verlauf der Biegezugrandspannungen σ_{ctfl} wird über die gemittelte Mittendurchbiegung w_m aufgetragen. In Bild 5.4-11 sind die σ_{ctfl} -w_m-Kurven und in Bild 5.4-12 die σ_{ctfl} -w_r-Kurven der Prismen mit Kerbe der Charge C3 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche dargestellt.

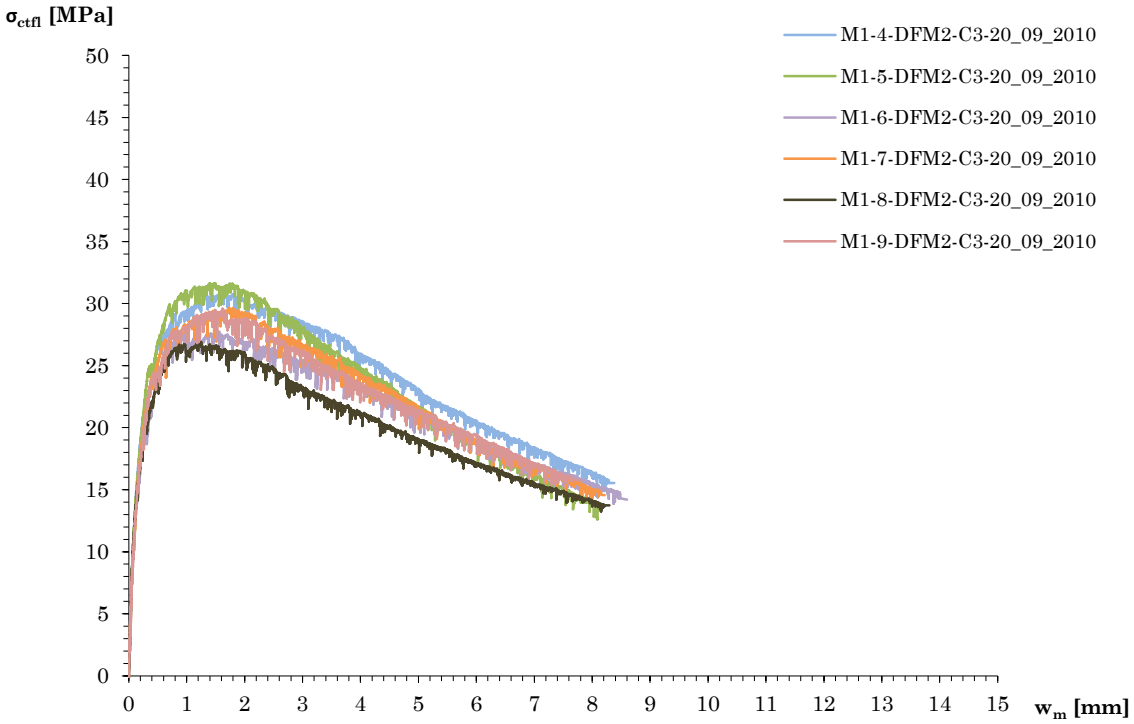


Bild 5.4-11: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen mit Kerbe der Charge C3 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

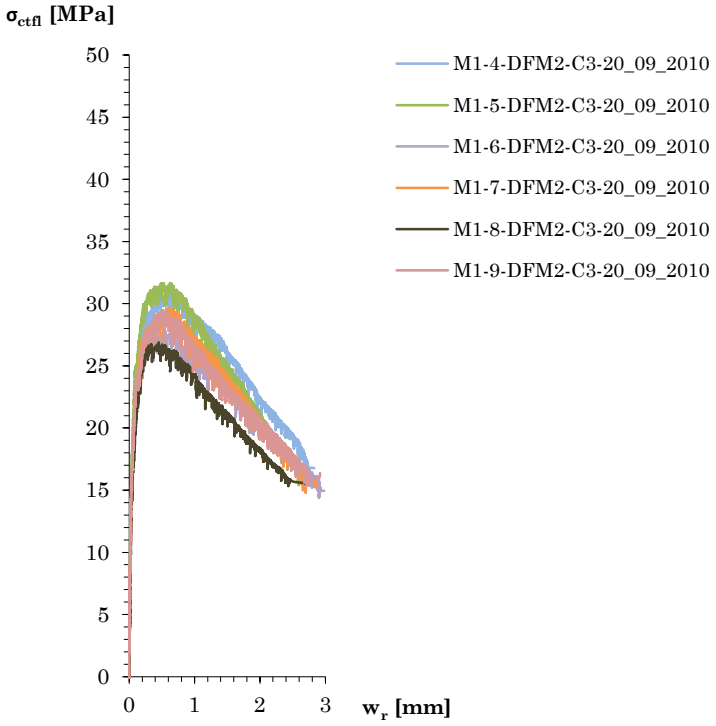


Bild 5.4-12: σ_{ctfl}-w_r-Kurven der Prismen mit Kerbe der Charge C3 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

In Tabelle 5.4-5 sind für die Prismen mit Kerbe der Charge C3 die ermittelten Biegezugfestigkeiten f_{ctfl} sowie die dazu korrespondierenden Mittendurchbiegungen $w_m(f_{ctfl})$ und Rissbreiten $w_r(f_{ctfl})$ aufgeführt. Der Mittelwert der Biegezugfestigkeit f_{ctfl} ergab sich zu 29,38 MPa. Der Variationskoeffizient betrug lediglich 6,08 %. Für die zur Biegezugfestigkeit f_{ctfl} korrespondierenden Mittendurchbiegungen $w_m(f_{ctfl})$ ergab sich ein Mittelwert von 1,56 mm bei einer Standardabweichung von 0,21 mm. Für die zur Biegezugfestigkeit f_{ctfl} korrespondierende Rissbreite $w_r(f_{ctfl})$ ergab sich ein Mittelwert von 0,55 mm bei einem Variationskoeffizienten von 13,59 %.

Tabelle 5.4-5: Bei weggeregelten Biegezugversuchen an Prismen mit Kerbe der Charge C3 ermittelte Biegezugfestigkeit f_{ctfl} und korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl})$ sowie Rissbreite $w_r(f_{ctfl})$

Kennzeichnung		f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$	$w_r(f_{ctfl})$
		[MPa]	[mm]	[mm]
M1-4-DFM2-C3-20_09_2010		30,75	1,79	0,64
M1-5-DFM2-C3-20_09_2010		31,65	1,40	0,49
M1-6-DFM2-C3-20_09_2010		27,74	1,56	0,56
M1-7-DFM2-C3-20_09_2010		29,65	1,73	0,62
M1-8-DFM2-C3-20_09_2010		26,90	1,25	0,45
M1-9-DFM2-C3-20_09_2010		29,59	1,62	0,57
Mittelwert	m	29,38	1,56	0,55
Standardabweichung	s	1,79	0,21	0,08
Variationskoeffizient	v	6,08%	13,24%	13,59%

In Bild 5.4-13 ist die Biegezugfestigkeit f_{ctfl} in Abhängigkeit vom Alter der Prismen zum Zeitpunkt der Prüfung aufgetragen. Ein Einfluss des Alters der Prismen ist nicht zu erkennen.

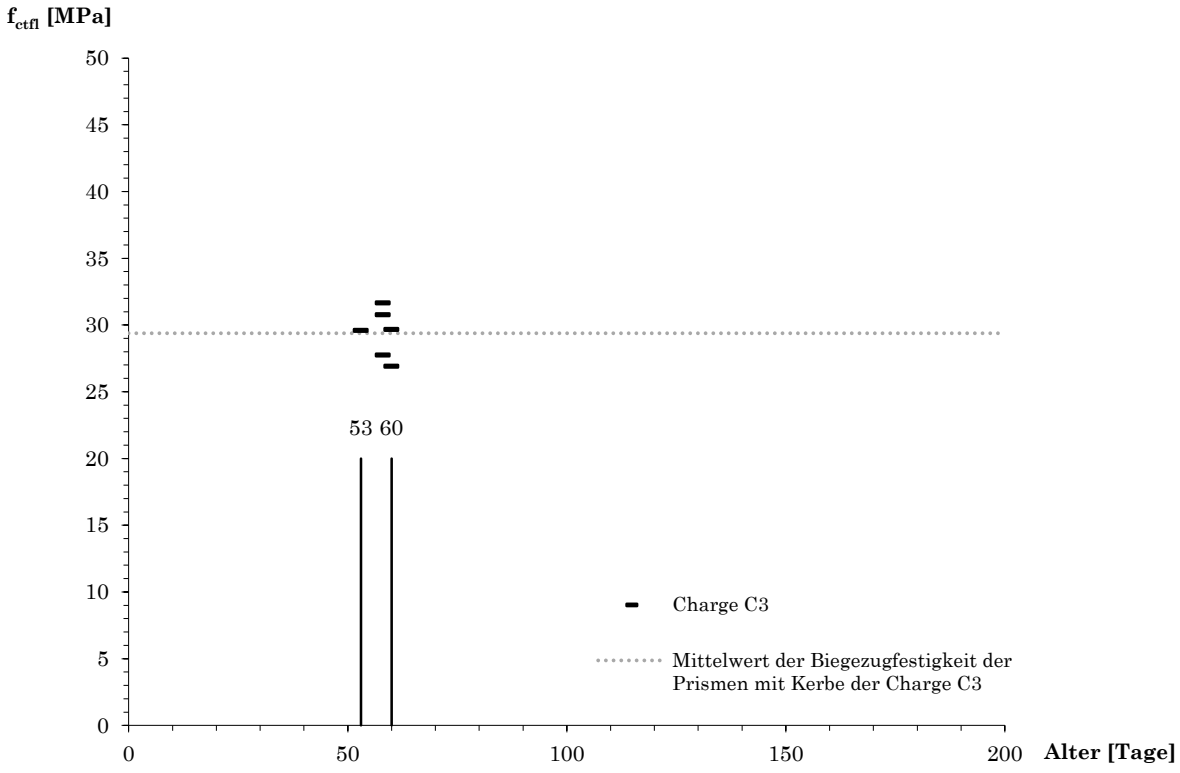


Bild 5.4-13: Biegezugfestigkeit f_{ctfl} in Abhängigkeit vom Alter der Prismen mit Kerbe der Charge C3 zum Zeitpunkt der Prüfung

5.5 Zentrische Zugversuche

5.5.1 Versuchsstand und -durchführung

Die zentrischen Zugversuche wurden an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMPA)) mit einer 1000 kN Universalprüfmaschine der Firma Schenk durchgeführt. In Bild 5.5-1 ist der Versuchsstand für die Durchführung der zentrischen Zugversuche sowie der Ablauf beim Einbau des Versuchskörpers in die Prüfmaschine abgebildet. Die Lasteinleitungskonstruktion war so konzipiert, dass ein schnelles Ein- und Ausbauen der Versuchskörper möglich war.

Außerdem sei angemerkt, dass bei allen Versuchskörpern die Orientierung der Längsachse in Bezug auf die Prüfrichtung der Einfüllrichtung des Betons in die Schalung entsprach und zwar vertikal von oben nach unten.

Die Durchführung der zentrischen Zugversuche erfolgte weggeregelt über den Maschinenweg des Prüfzylinders. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 0,1 mm/min und wurde nach Überschreitung der Zugfestigkeit im abfallenden Ast der Versuchskurve stufenweise auf bis zu 0,5 mm/min erhöht, um die Versuchsdauer zu begrenzen.

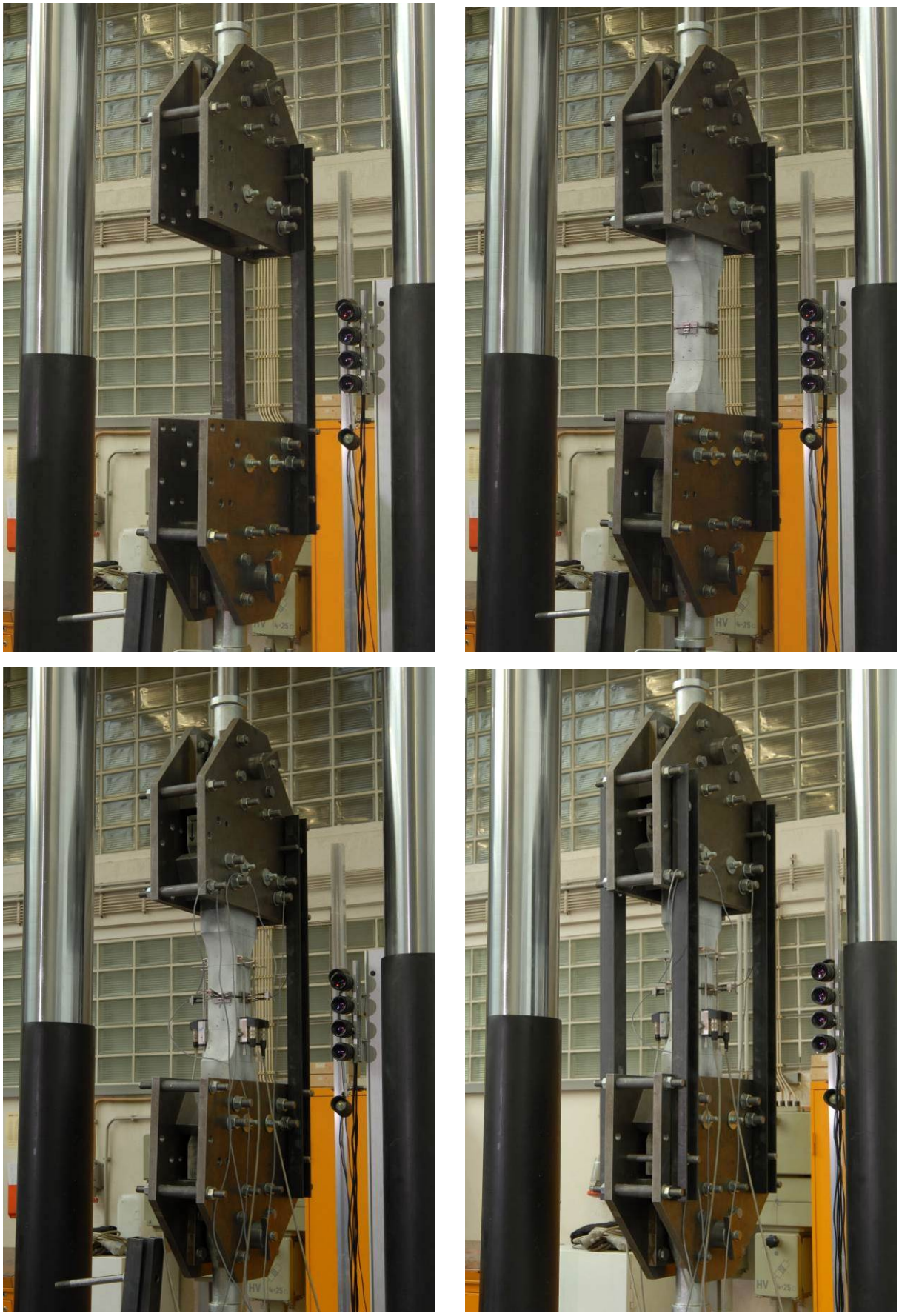


Bild 5.5-1: Versuchsstand für die Durchführung der zentrischen Zugversuche

5.5.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Versuchskörper

5.5.2.1 Versuchskörper ohne Kerbe

Vor der Prüfung wurden bei den Versuchskörpern ohne Kerbe die tatsächlichen Querschnittsabmessungen (Breite b, Höhe h) an den Grenzen des Messbereichs protokolliert. Der Mittelwert für die Querschnittsbreite b und die Querschnittshöhe h ist in Anhang A.4 aufgeführt.

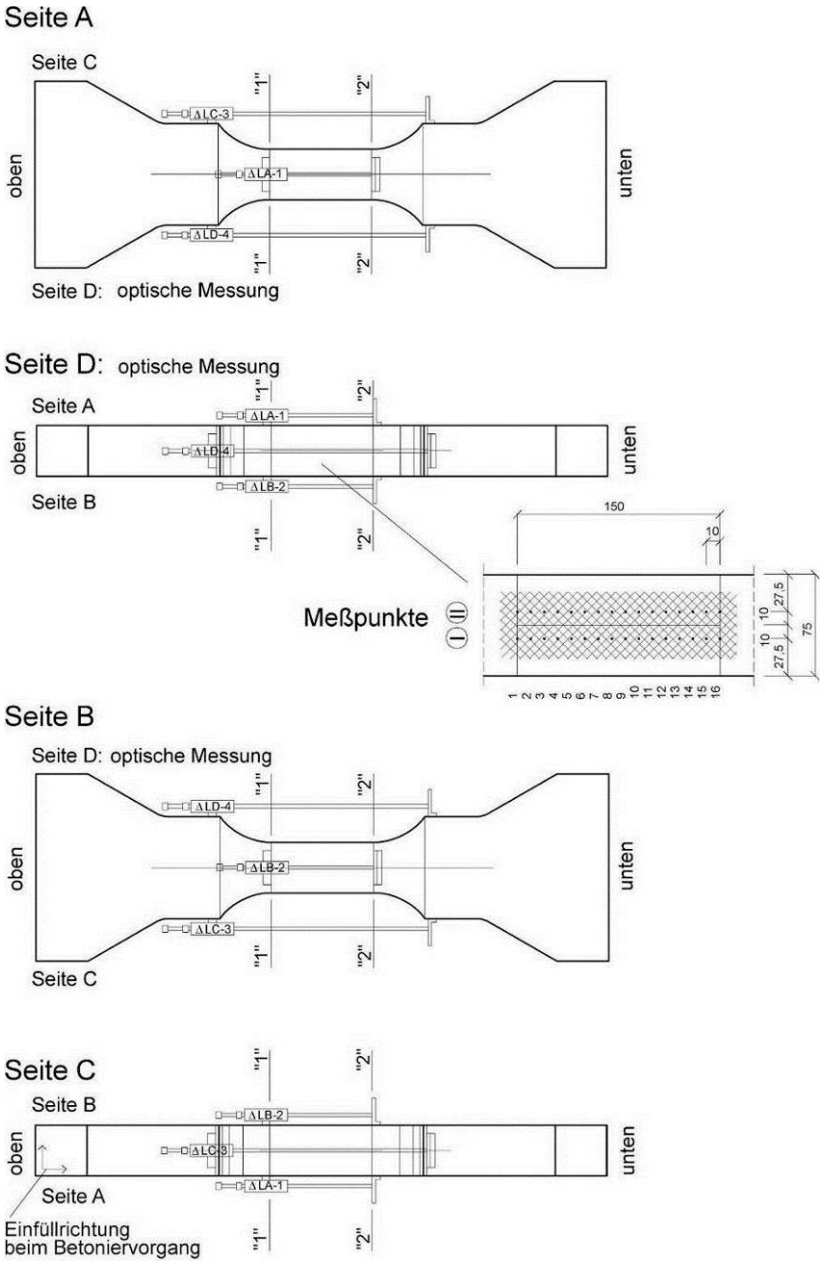


Bild 5.5-2: Instrumentierung der Versuchskörper ohne Kerbe für die Durchführung der zentrischen Zugversuche

Die Instrumentierung bestand aus vier ohmschen Wegaufnehmern vom Typ TRS 25 der Firma Novotechnik mit einem Nennmessbereich von 25 mm zur Aufnahme der Längenänderung in Belastungsrichtung. Die Anordnung und Bezeichnung der Wegaufnehmer kann Bild 5.5-2 entnommen werden. Durch die Wegaufnehmer ΔLA-1 und ΔLB-2 wurde die Längenänderung Δl im Messbereich erfasst.

Die Wegaufnehmer ΔLC-3 und ΔLD-4 dienten der Erfassung einer eventuellen Verkrümmung um die Versuchskörperachsen.

Die Rissöffnung w_r wurde mittels einer optischen Messung aufgezeichnet. Das optische Messsystem bestand aus vier digitalen Kameras, die entlang des Messbereichs der Versuchskörper an einem Aluminiumprofil übereinander montiert waren. Zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Ausleuchtung des optischen Messbereichs wurden spezielle Halogenstrahler an zwei weiteren Aluminiumprofilen befestigt und entsprechend ausgerichtet. Auf einer der Seiten der Versuchskörper wurde im Messbereich ein rautenförmiges Muster aufgezeichnet, auf dem dann die Messpunkte für das optische Messsystem in einem definierten Abstand markiert wurden (vgl. Bild 5.5-2). Die Messpunkte waren entlang zweier zur Längsachse paralleler Linien gleichen Abstands angeordnet. Es befanden sich somit immer zwei Messpunkte auf gleicher Höhe. Das verwendete optische Messsystem kann maximal 32 Messpunkte verarbeiten, d.h. je Messlinie konnten maximal 16 Punkte angeordnet werden. In Bild 5.5-3 sind die erläuterten Elemente des optischen Messbereichs dargestellt.

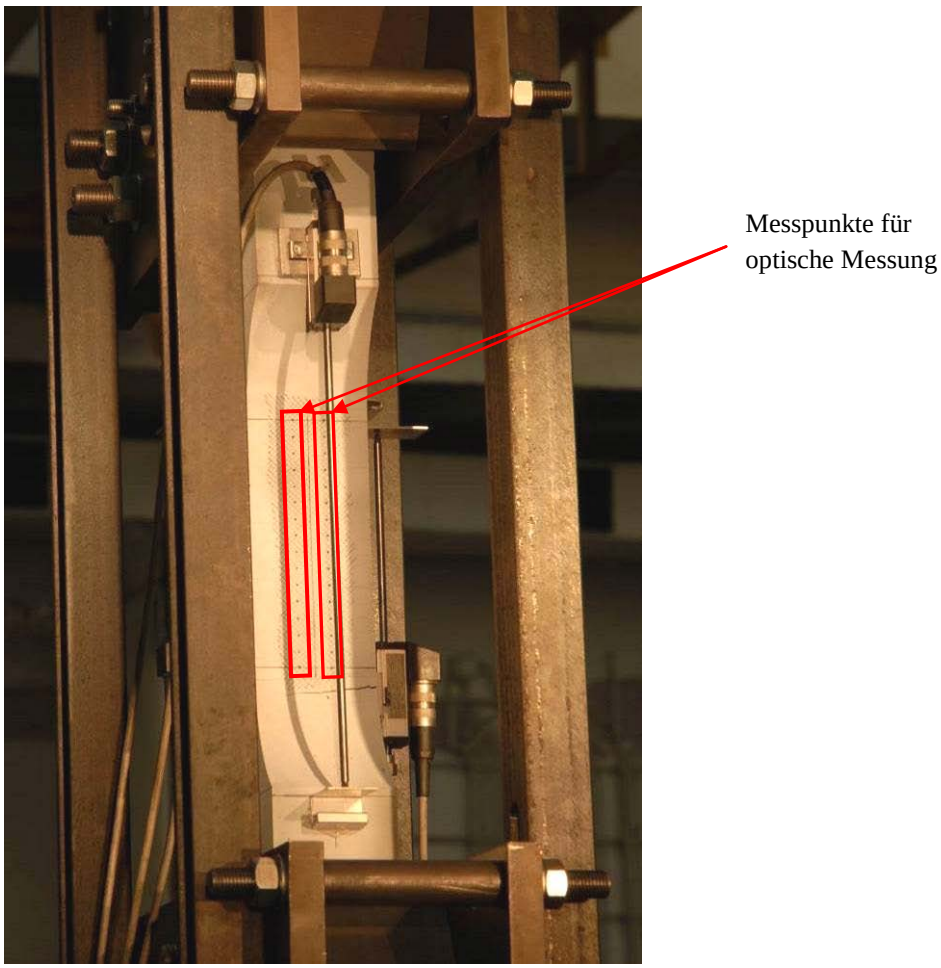


Bild 5.5-3: Elemente des optischen Messbereichs bei Versuchskörpern ohne Kerbe

Zusätzlich wurden die Prüfkraft F und der Maschinenweg aufgezeichnet. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte mit einer Messfrequenz von 2 Hz.

5.5.2.2 Versuchskörper mit Kerbe

Die Versuchskörper wurden zunächst auf allen Seiten mit einer etwa 12,5 mm tiefen und 4 mm breiten Kerbe versehen. Die umlaufende Kerbe wurde mit Hilfe einer mit Diamanttrennscheibe ausgestatteten Tischsäge in die Seiten eingesägt.

Vor der Prüfung wurden die tatsächlichen Querschnittsabmessungen (Breite b, Höhe h) im Bereich der Kerbe protokolliert. Der Mittelwert für die Querschnittsbreite b und die Querschnittshöhe h im Bereich der Kerbe ist in Anhang A.5 aufgeführt.

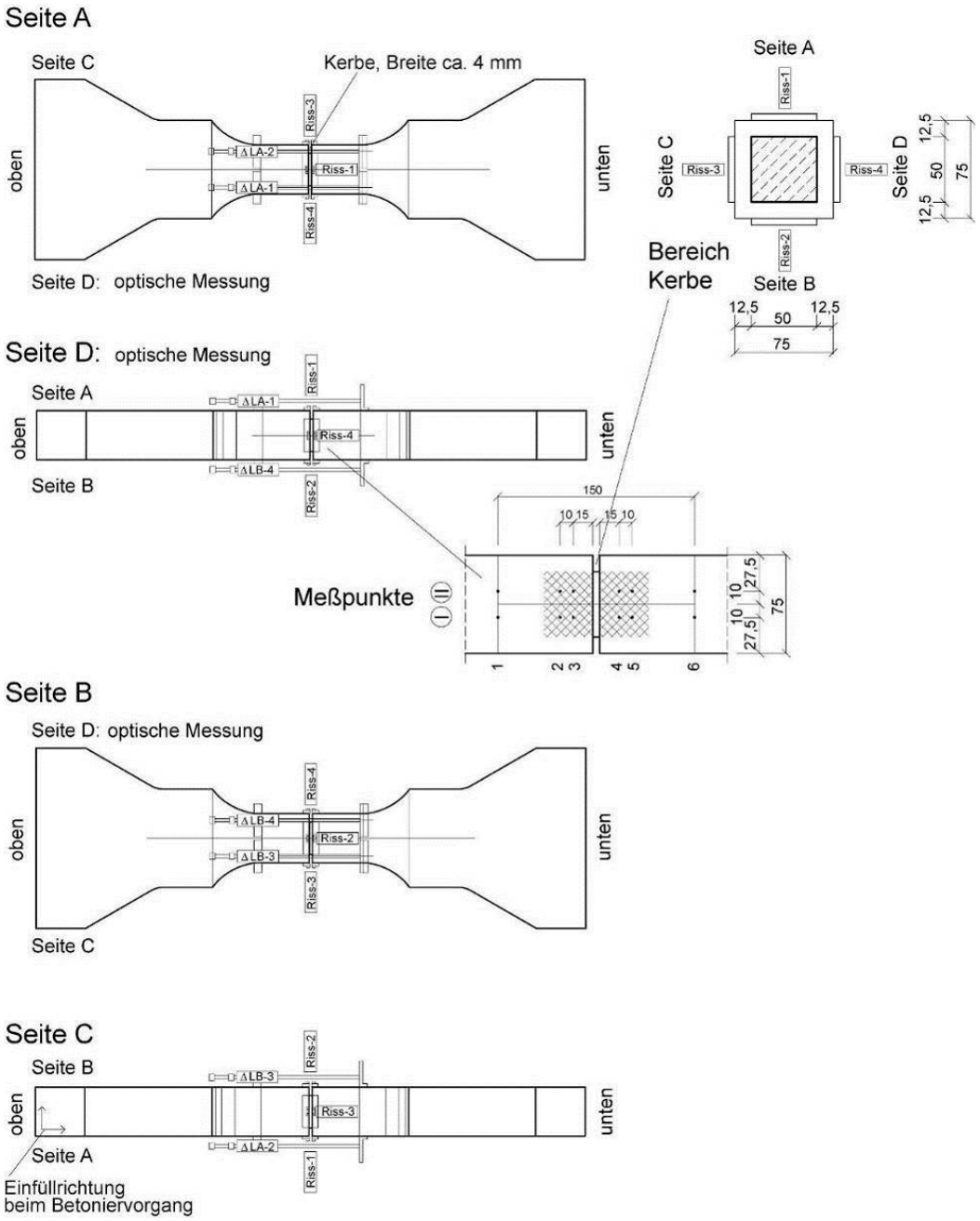


Bild 5.5-4: Instrumentierung der Versuchskörper mit Kerbe für die Durchführung der zentrischen Zugversuche

Die Längenänderung in Belastungsrichtung wurde mit Hilfe von vier ohmschen Wegaufnehmern vom Typ TRS 25 der Firma Novotechnik mit einem Nennmessbereich von 25 mm gemessen. Aufgrund deren Anordnung konnte mit diesen neben der Längenänderung Δl im Messbereich auch eine eventuelle Verkrümmung um die Versuchskörperachse erfasst werden. Die Anordnung und Bezeichnung der Wegaufnehmer und der Rissöffnungsmesser kann Bild 5.5-4 entnommen werden.

Die Instrumentierung zur Messung der Rissöffnung w_r bestand aus vier Rissöffnungsmessern vom Typ UB-A (displacement transducer) der Firma Sokki Kenkyujo mit einem Nennmessbereich von 5 mm. Je ein Rissöffnungsmesser wurde mittig je Seite angebracht.

Gleichzeitig wurde die Rissöffnung w_r auch mittels einer optischen Messung aufgezeichnet. Das optische Messsystem bestand aus den unter Abschnitt 5.5.2.1 erläuterten Komponenten. Allerdings war es auf Grund der definierten Bruchstelle möglich mit einer reduzierten Anzahl von 12 Messpunkten auszukommen, d.h. je Messlinie wurden 6 Punkte angeordnet. In Bild 5.5-5 sind die erläuterten Elemente des optischen Messbereichs dargestellt.

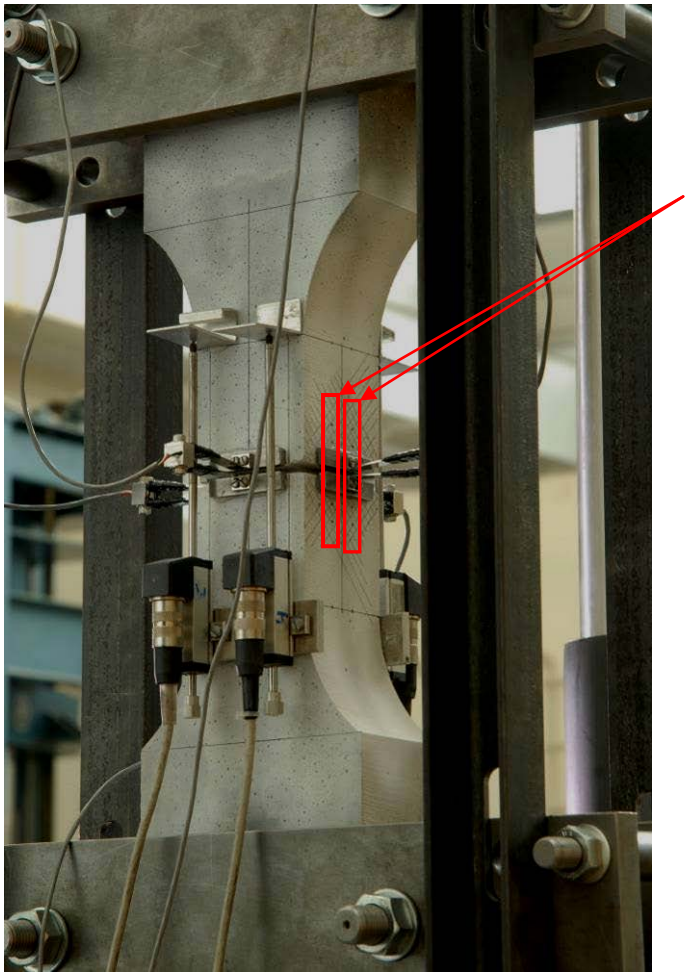


Bild 5.5-5: Elemente des optischen Messbereichs bei Versuchskörpern mit Kerbe

Zusätzlich wurden die Prüfkraft F und der Maschinenweg aufgezeichnet. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte mit einer Messfrequenz von 2 Hz.

5.5.3 Versuchsergebnisse der zentrischen Zugversuche an Versuchskörpern ohne Kerbe

5.5.3.1 Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Die gemessene Prüfkraft F wurde wie folgt in die axiale Zugspannung σ_{ct} umgerechnet:

$$\sigma_{ct} = \frac{|F|}{A_c} \qquad (5\text{-}8)$$

mit σ_{ct} [MPa] Zugspannung des Betons
F [N] Prüfkraft
A_c [mm²] Querschnittsfläche des Betons im Messbereich

Die zur Zugspannung σ_{ct} korrespondierende Betonzugdehnung ε_{ct} wurde wie folgt aus der Längenänderung Δl in Belastungsrichtung berechnet:

$$\varepsilon_{ct} = \frac{|\Delta l|}{l} \qquad (5\text{-}9)$$

mit ε_{ct} [‰] Betonzugdehnung
Δl [mm] Längenänderung in Belastungsrichtung
l [mm] Messlänge

Die Längenänderungen Δl berechnet sich als Mittelwert der Messwerte der gegenüberliegenden Wegaufnehmer ΔLA-1 und ΔLB-2 (vgl. Bild 5.5-2). Bei einigen Versuchskörpern fand jedoch die Risslokalisierung außerhalb des Messbereichs statt. Bei diesen wurde dann die Betonzugdehnung ε_{ct} nur für den aufsteigenden Ast bis zum Erreichen der Zugfestigkeit f_{ct} ermittelt. Die Messlänge der einzelnen Versuchskörper ist in Anhang A.4 vermerkt. In Bild 5.5-6 und Bild 5.5-7 sind die σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 als Ergebnis der weggeregelten zentrischen Zugversuche dargestellt.

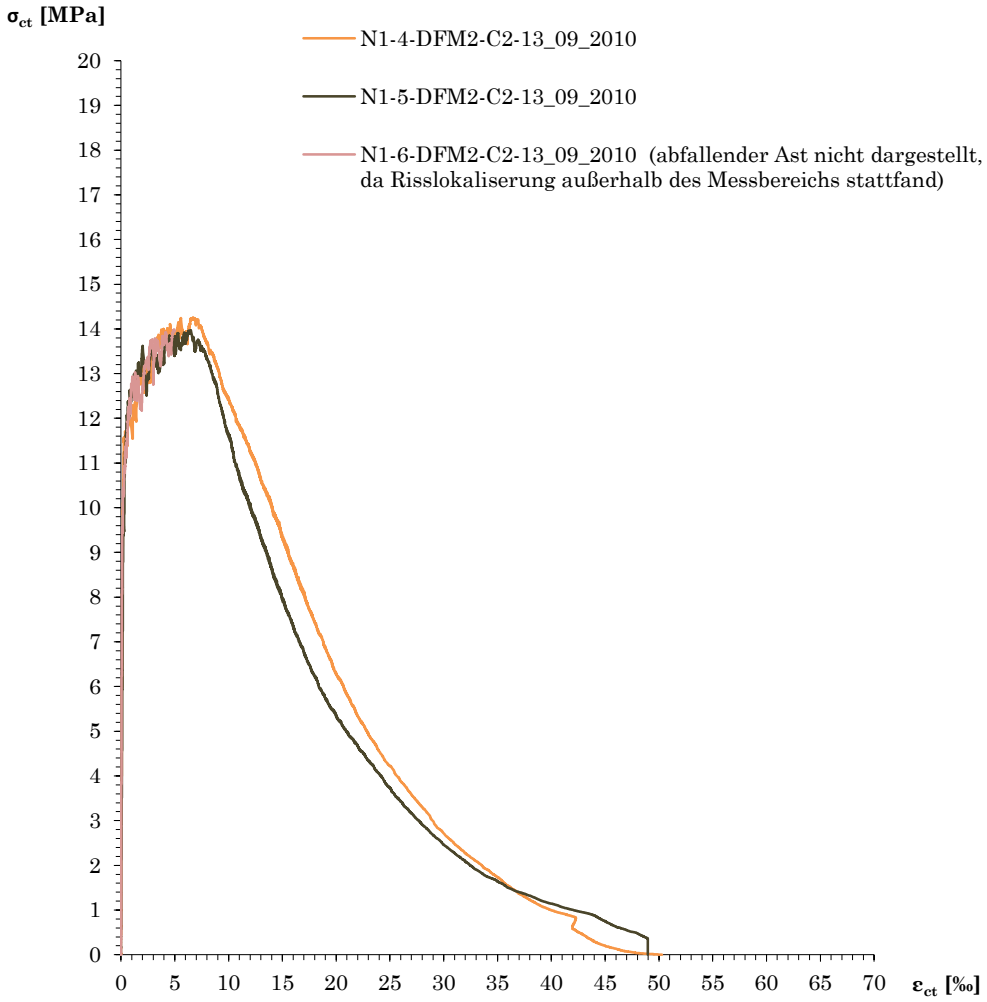


Bild 5.5-6: σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven der Versuchskörper ohne Kerbe der Charge C2 als Ergebnis der weggeregelten zentrischen Zugversuche

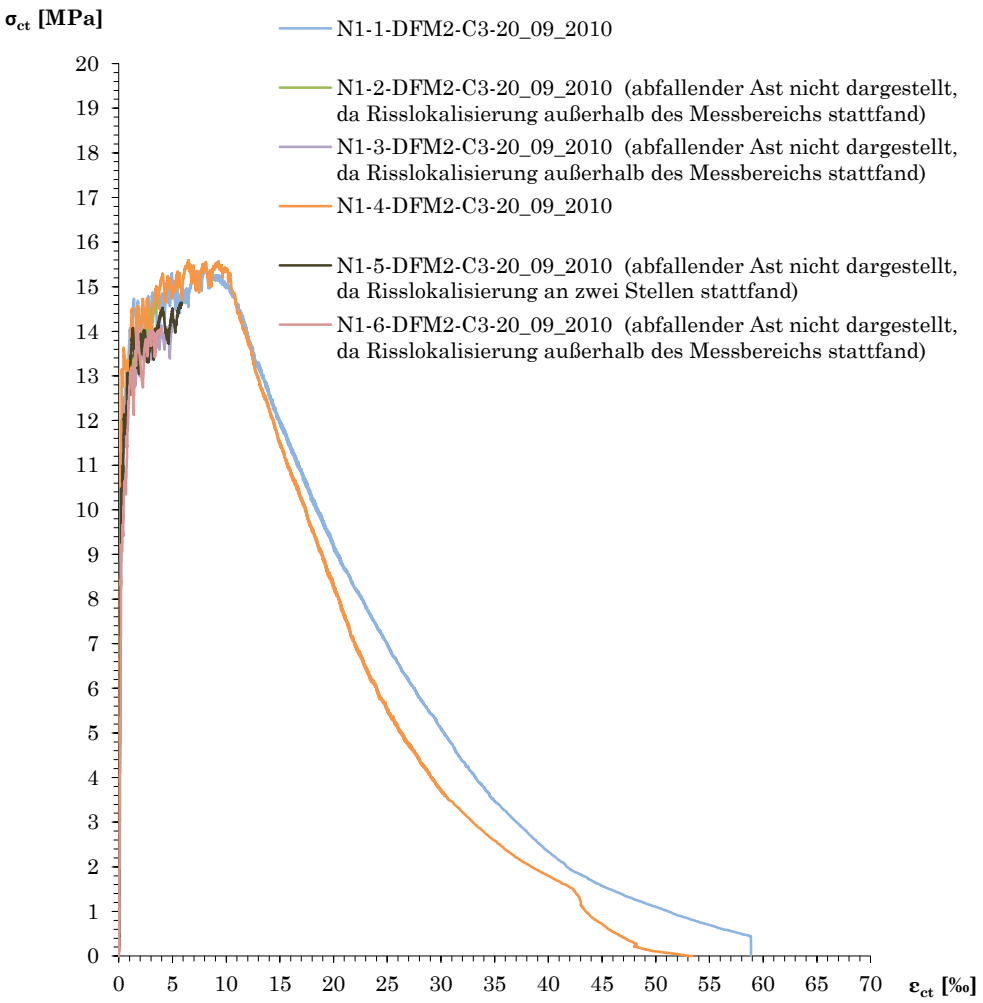


Bild 5.5-7: σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven der Versuchskörper ohne Kerbe der Charge C3 als Ergebnis der weggeregelten zentrischen Zugversuche

Die Kurven weisen alle einen ähnlichen Verlauf auf. Zunächst steigt die Zugspannung σ_{ct} linear bis zur Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ an. Bei dieser Beanspruchung bildet sich der erste Makroriss aus, was auch akustisch während des Versuchs durch ein erstes „Knackgeräusch“ wahrgenommen werden kann. In Tabelle 5.5-1 sind für die Chargen C2 und C3 die ermittelten Elastizitätsgrenzen der Zugspannung $f_{ct,el}$ sowie die dazu korrespondierenden Betonzugdehnungen $\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$ aufgeführt. Der Mittelwert der Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ ergab sich zu 10,06 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 9,23 %. Für die zur Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ korrespondierende Betonzugdehnung $\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$ ergab sich ein Mittelwert von 0,19 ‰ bei einem Variationskoeffizienten von 23,62 %.

Tabelle 5.5-1: Bei weggeregelten zentrischen Zugversuchen an Versuchskörpern ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 ermittelte Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ und korrespondierende Betonzugdehnung ε_{ct} ($f_{ct,el}$)

Kennzeichnung		$f_{ct,el}$	m	s	v	$\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$	m	s	v
		[MPa]				[‰]			
N1-4-DFM2-C2-13_09_2010		9,16				0,14			
N1-5-DFM2-C2-13_09_2010		9,54				0,20			
N1-6-DFM2-C2-13_09_2010		9,56	9,42	0,22	2,39 %	0,12	0,15	0,04	27,24 %
N1-1-DFM2-C3-20_09_2010		10,86				0,24			
N1-2-DFM2-C3-20_09_2010		10,54				0,16			
N1-3-DFM2-C3-20_09_2010		10,72				0,25			
N1-4-DFM2-C3-20_09_2010		11,27				0,17			
N1-5-DFM2-C3-20_09_2010		10,47				0,21			
N1-6-DFM2-C3-20_09_2010		8,44	10,38	1,00	9,59 %	0,20	0,21	0,04	17,19 %
Mittelwert	m	10,06				0,19			
Standardabweichung	s	0,93				0,04			
Variationskoeffizient	v	9,23 %				23,62 %			

Nach Überschreitung von $f_{ct,el}$ setzt die Multirissbildung ("multi-cracking-branch") ein, in der sich viele feine Risse in einem engen Abstand ausbilden. Die Zugspannung σ_{ct} steigt nichtlinear bis zur maximalen Zugfestigkeit f_{ct} weiter an. Dieses Verhalten wird als "tensile strain hardening" bezeichnet. In Tabelle 5.5-2 sind für die Chargen C2 und C3 die ermittelten Zugfestigkeiten f_{ct} sowie die dazu korrespondierenden Betonzugdehnungen $\varepsilon_{ct}(f_{ct})$ aufgeführt. Der Mittelwert der Zugfestigkeit f_{ct} ergab sich zu 14,54 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 4,19 %. Für die zur Zugfestigkeit f_{ct} korrespondierende Betonzugdehnung $\varepsilon_{ct}(f_{ct})$ ergab sich ein Mittelwert von 5,69 ‰. Der Variationskoeffizient betrug 25,83 %.

Tabelle 5.5-2: Bei weggeregelten zentrischen Zugversuchen an Versuchskörpern ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 ermittelte Zugfestigkeit f_{ct} und korrespondierende Betonzugdehnung $\varepsilon_{ct}(f_{ct})$

Kennzeichnung		f_{ct}	m	s	v	$\varepsilon_{ct}(f_{ct})$	m	s	v
		[MPa]				[‰]			
N1-4-DFM2-C2-13_09_2010		14,26				6,71			
N1-5-DFM2-C2-13_09_2010		13,96				6,48			
N1-6-DFM2-C2-13_09_2010		13,98	14,07	0,16	1,17 %	4,94	6,04	0,96	15,89 %
N1-1-DFM2-C3-20_09_2010		15,40				8,19			
N1-2-DFM2-C3-20_09_2010		14,74				3,50			
N1-3-DFM2-C3-20_09_2010		14,22				5,08			
N1-4-DFM2-C3-20_09_2010		15,59				6,50			
N1-5-DFM2-C3-20_09_2010		14,65				5,85			
N1-6-DFM2-C3-20_09_2010		14,06	14,78	0,62	4,18 %	3,96	5,51	1,72	31,28 %
Mittelwert	m	14,54				5,69			
Standardabweichung	s	0,61				1,47			
Variationskoeffizient	v	4,19 %				25,83 %			

Nach Überschreitung von f_{ct} setzt die Entfestigung ein, in der die Lokalisierung stattfindet. Als Lokalisierung bezeichnet man die deutliche Zunahme der Rissöffnung eines feinen Risses, bei dem die rissüberbrückenden Fasern zunehmend aus der Matrix des UHFFB herausgezogen werden. Mit Einsetzen der Lokalisierung nimmt die Rissbreite der übrigen Risse ab. Die Summe der Rissbreiten aller Risse bei einsetzender Lokalisierung konzentriert sich damit primär in der Lokalisierungsstelle. In der Regel lokalisierten die Versuchskörper nur an einer Stelle. Bei einem Versuchskörper erfolgte die Lokalisierung jedoch an zwei Stellen (N1-5-DFM2-C3-20_09_2010). Die Lage der Lokalisierungsstelle der Versuchskörper ohne Kerbe kann dem Anhang A.3 entnommen werden. Mit fortschreitender Lokalisierung fällt die Zugspannung σ_{ct} kontinuierlich ab und geht gegen null. In der Entfestigungsphase weisen die Versuchskörper damit ein "tension softening" Verhalten auf. Der Verlauf und die Steigung des abfallenden Bereichs hängen nach Schmidt et al. (2008) von der Anzahl der Lokalisierungsstellen, dem Fasertyp (Länge, Durchmesser und Oberflächenbeschaffenheit), der Verbundeigenschaften zwischen Betonmatrix und Fasern, der Einbindelänge der einzelnen Fasern, der Faserorientierung und dem Fasergehalt im Bruchquerschnitt ab.

In Bild 5.5-8 ist die Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ und in Bild 5.5-9 die Zugfestigkeit f_{ct} in Abhängigkeit vom Alter der Versuchskörper ohne Kerbe zum Zeitpunkt der Prüfung aufgetragen. In beiden Fällen ist ein Einfluss des Alters der Versuchskörper nicht zu erkennen.

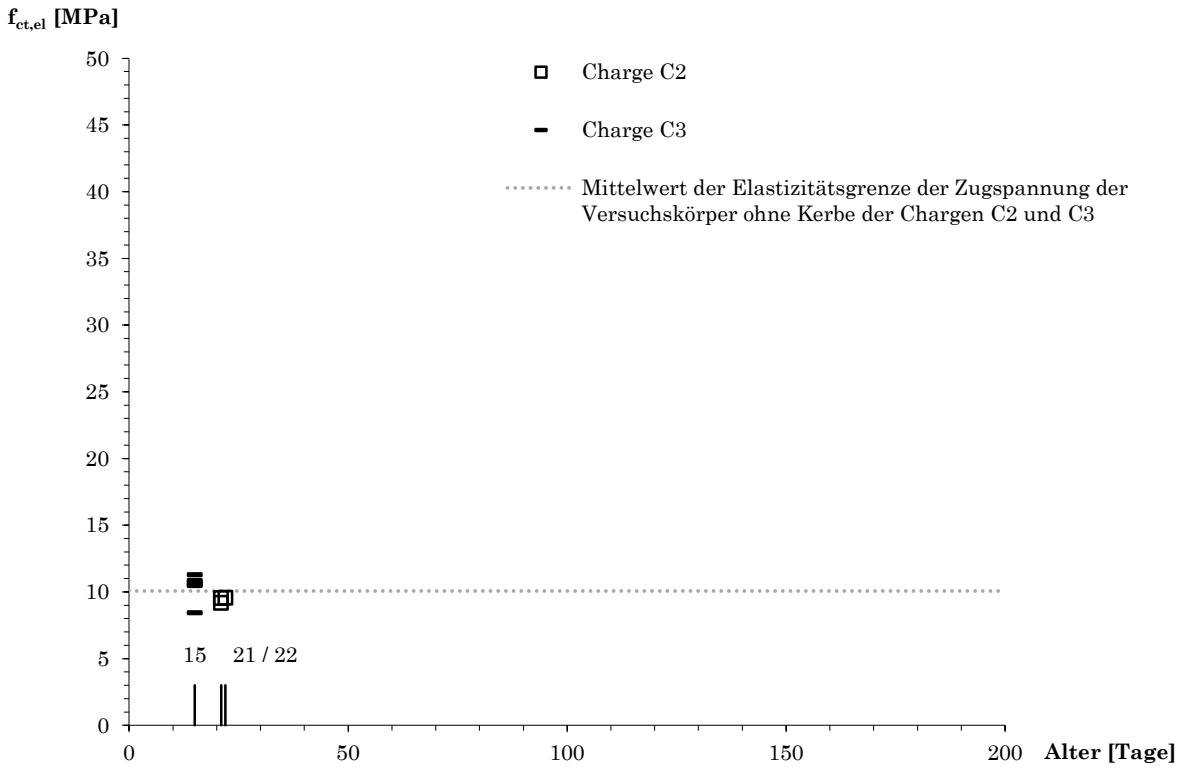


Bild 5.5-8: Verlauf der Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ in Abhängigkeit vom Alter der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 zum Zeitpunkt der Prüfung

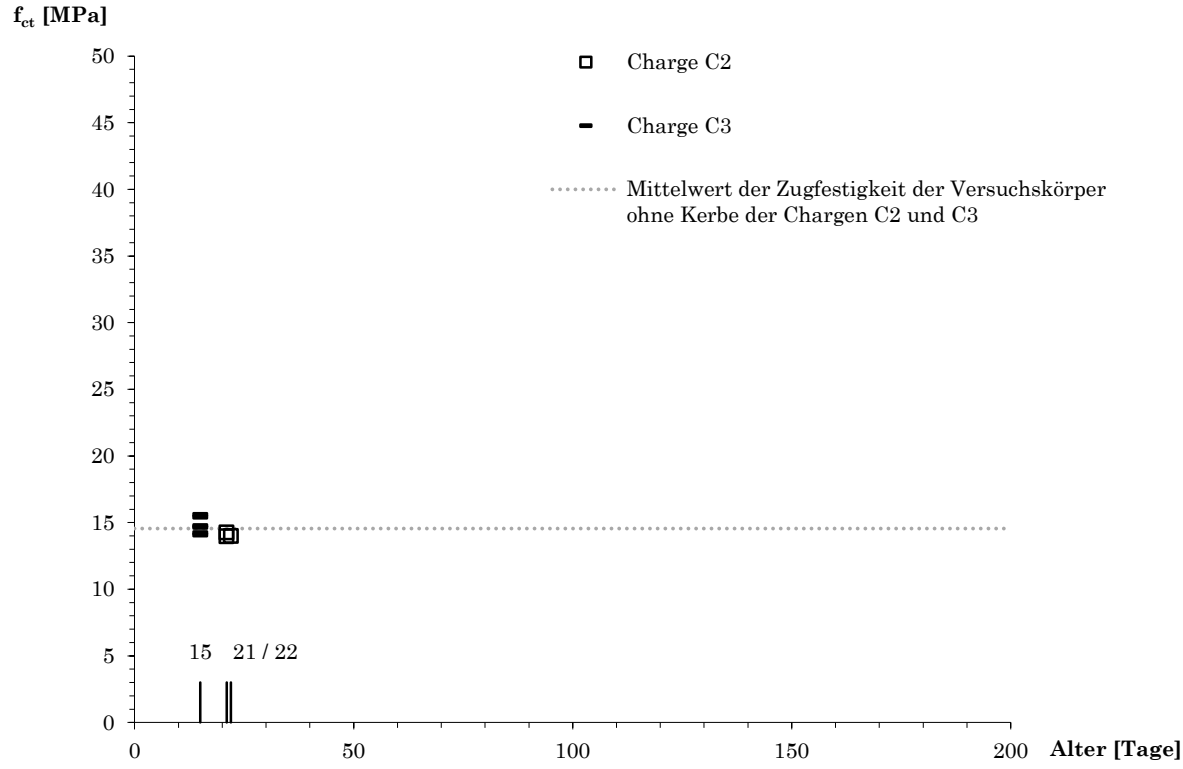


Bild 5.5-9: Verlauf der Zugfestigkeit f_{ct} in Abhängigkeit vom Alter der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 zum Zeitpunkt der Prüfung

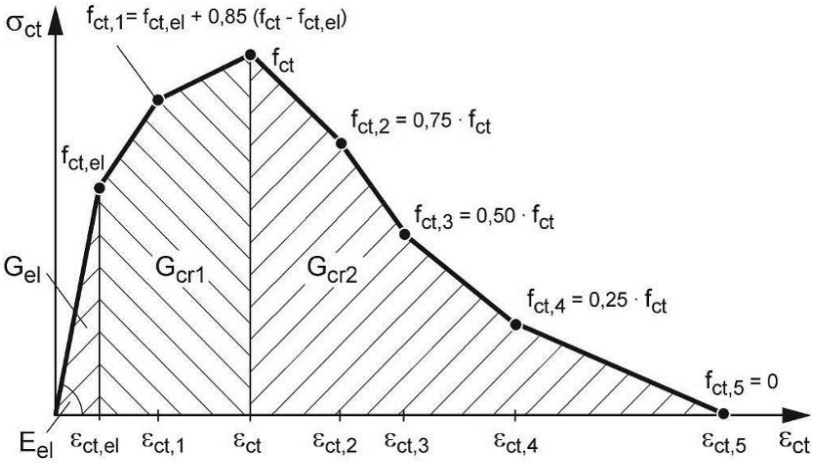


Bild 5.5-10: Definition einer aus einem zentrischen Zugversuch ermittelten charakteristischen σ_{ct}-ε_{ct}-Kurve [Frettlöhr (2011)]

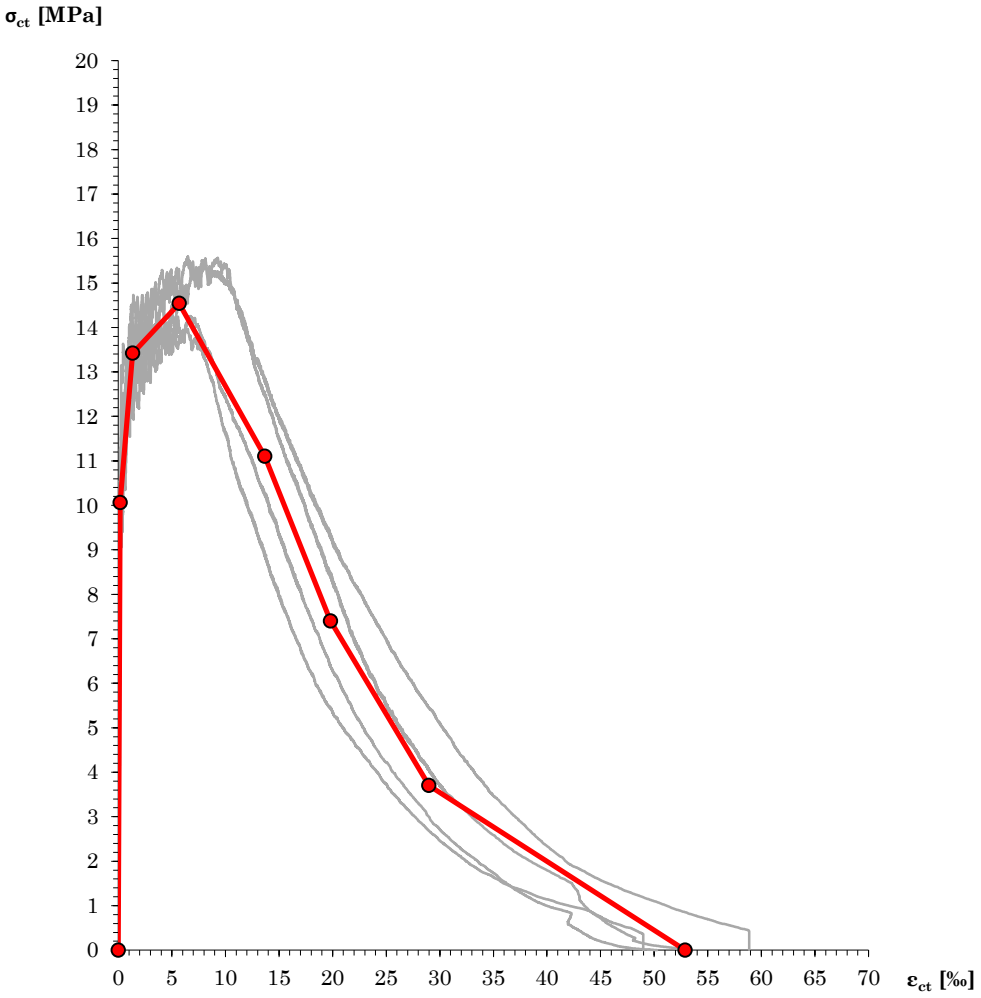


Bild 5.5-11: Mittlere charakteristische σ_{ct}-ε_{ct}-Kurve der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 als Ergebnis der weggeregelten zentrischen Zugversuche

Die σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven lassen sich durch den im Bild 5.5-10 definierten multilinearen Linienzug zutreffend beschreiben. Aus den einzelnen σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven wurde durch Berechnung der charakteristischen Punkte des multilinearen Linienzuges eine mittlere charakteristische σ_{ct}-ε_{ct}-Kurve erzeugt (vgl. Bild 5.5-11). Die charakteristischen Punkte des aufsteigenden Astes wurden dabei aus den σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven aller Versuchskörper berechnet, wohingegen die charakteristischen Punkte des abfallenden Astes aus den σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven derjenigen Versuchskörper berechnet wurde, bei denen die Risslokalisierung innerhalb des Messbereichs stattfand bzw. die nur an einer Stelle innerhalb des Messbereichs lokalisierten (N1-4-DFM2-C2-13_09_2010, N1-5-DFM2-C2-13_09_2010, N1-1-DFM2-C3-20_09_2010 und N1-4-DFM2-C3-20_09_2010). Die Werte für die charakteristischen Punkte sind der Tabelle 5.5-3 und Tabelle 5.5-4 zu entnehmen.

Tabelle 5.5-3: Charakteristische Punkte des aufsteigenden Astes der mittleren charakteristischen σ_{ct}-ε_{ct}-Kurve der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3

		$f_{ct,el}$ [MPa]	$\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$ [‰]	$f_{ct,1}$ [MPa]	$\varepsilon_{ct,1}$ [‰]	f_{ct} [MPa]	$\varepsilon_{ct}(f_{ct})$ [‰]
Mittelwert	m	10,06	0,19	13,42	1,34	14,54	5,69
Standardabweichung	s	0,93	0,04	0,65	0,32	0,61	1,47
Variationskoeffizient	v	9,23 %	23,62 %	4,87 %	23,81 %	4,19 %	25,83 %

Tabelle 5.5-4: Charakteristische Punkte des abfallenden Astes der mittleren charakteristischen σ_{ct}-ε_{ct}-Kurve der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3

		$f_{ct,2}$ [MPa]	$\varepsilon_{ct,2}$ [‰]	$f_{ct,3}$ [MPa]	$\varepsilon_{ct,3}$ [‰]	$f_{ct,4}$ [MPa]	$\varepsilon_{ct,4}$ [‰]	$f_{ct,5}$ [MPa]	$\varepsilon_{ct,5}$ [‰]
Mittelwert	m	11,62	15,22	7,75	22,00	3,87	31,56	0,00	56,14
Standardabweichung	s	0,10	0,71	0,07	1,83	0,03	3,05		3,85
Variationskoeffizient	v	0,85 %	4,66 %	0,85%	8,32 %	0,85 %	9,65 %		6,86 %

Der E-Modul E_{ct} unter Zugbeanspruchung lässt sich als Sekantenmodul wie folgt berechnen:

$$E_{ct} = \frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\varepsilon_c} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u} = \frac{f_{ct,el}}{\varepsilon_{ct}\left(f_{ct,el}\right)} \qquad (5\text{-}10)$$

mit E_{ct}[MPa] E-Modul von UHFFB unter Zugbeanspruchung (Sekantenmodul)
σ_o [MPa] Oberspannung = $f_{ct,el}$
σ_u [MPa] Unterspannung = 0
$\varepsilon_o(\sigma_o)$ [-] Dehnung bei Erreichen der Oberspannung = ε_{ct} ($f_{ct,el}$)
$\varepsilon_u(\sigma_u)$ [-] Dehnung bei Erreichen der Unterspannung = 0

Legt man der Berechnung die Werte aus den einzelnen σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven zugrunde, dann ergibt sich für die Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 der Mittelwert des E-Moduls E_{ct} zu 56258 MPa bei einem relativ hohen Variationskoeffizienten von 24,23 % (vgl. Tabelle 5.5-5).

Tabelle 5.5-5: Bei weggeregelten zentrischen Zugversuchen an Versuchskörpern ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 ermittelte E-Modul E_{ct}

Kennzeichnung		E_{ct} [MPa]	m	s	v
N1-4-DFM2-C2-13_09_2010		67268 [1)]			
N1-5-DFM2-C2-13_09_2010		48328			
N1-6-DFM2-C2-13_09_2010		80237 [1)]	65278	16047	24,58 %
N1-1-DFM2-C3-20_09_2010		44771			
N1-2-DFM2-C3-20_09_2010		64983 [1)]			
N1-3-DFM2-C3-20_09_2010		43539			
N1-4-DFM2-C3-20_09_2010		66291 [1)]			
N1-5-DFM2-C3-20_09_2010		48844			
N1-6-DFM2-C3-20_09_2010		42063	51749	11000	21,26 %
Mittelwert	m	56258			
Standardabweichung	s	13629			
Variationskoeffizient	v	24,23 %			

[1)] E-Modul E_{ct} unter Zugbeanspruchung größer als der mittlere E-Modul E_{cm} unter Druckbeanspruchung.

Kritisch anzumerken ist, dass sich unter Zugbeanspruchung bei einzelnen Versuchskörpern ein E-Modul E_{ct} ergab, der größer ist als der mittlerer E-Modul E_{cm} unter Druckbeanspruchung (vgl. Tabelle 5.5-5 und Bild 5.5-12).

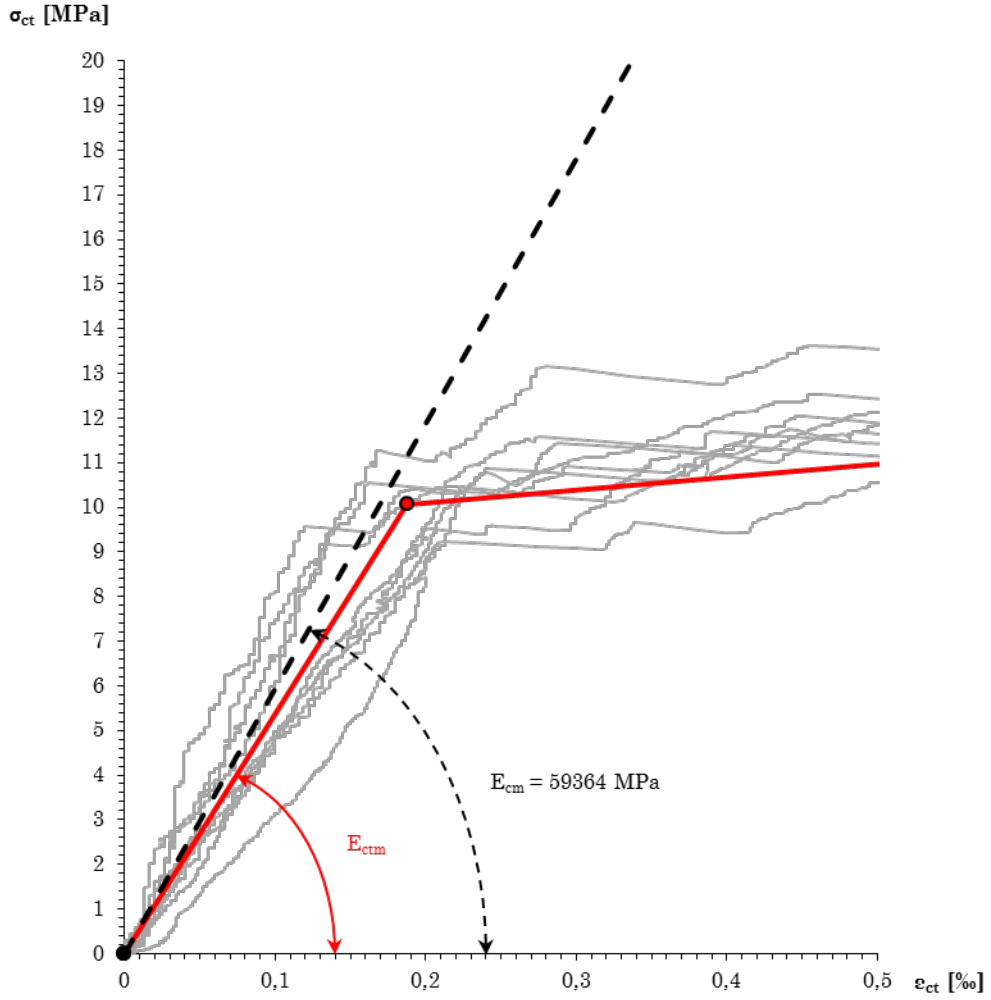


Bild 5.5-12: Mittlerer E-Modul E_{ctm} der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 unter Zugbeanspruchung im Vergleich zum mittleren E-Modul E_{cm} der Zylinder unter Druckbeanspruchung

Auf Grundlage der gemessenen σ_{ct}–ε_{ct}-Kurven können, wie dem Bild 5.5-10 zu entnehmen ist, die den entsprechenden Kurvenabschnitten entsprechenden Energieanteile berechnet werden. Dabei berechnet sich die elastische Energie G_{el} nach Gl. (5-11), die "multi-cracking" Energie G_{cr1} nach Gl. (5-12) und die Bruchenergie G_{cr2} nach Gl. (5-13). Die Gesamtenergie G_{total} berechnet sich als Summe der einzelnen Energieanteile.

$$G_{el} = \int_{0}^{\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})} \sigma_{ct}(\varepsilon) \cdot l \cdot d\varepsilon \qquad (5\text{-}11)$$

$$G_{cr1} = \int_{\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})}^{\varepsilon_{ct}(f_{ct})} \sigma_{ct}(\varepsilon) \cdot l \cdot d\varepsilon \qquad (5\text{-}12)$$

$$G_{cr2} = \int_{\varepsilon_{ct}(f_{ct})}^{\varepsilon_{ct,5}} \sigma_{ct}(\varepsilon) \cdot l \cdot d\varepsilon \qquad (5\text{-}13)$$

mit	G_{el} [J/m²]	elastische Energie
	G_{cr1} [J/m²]	"multi-cracking" Energie
	G_{cr2} [J/m²]	Bruchenergie
	$\sigma_{ct}(\varepsilon)$ [MPa]	Zugspannung des Betons in Abhängigkeit der Betonzugdehnung
	ε [-]	Betonzugdehnung
	l [mm]	Messlänge

Die für die Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 berechnete elastische Energie G_{el} ist der Tabelle 5.5-6, die „multi-cracking“ Energie G_{cr1} der Tabelle 5.5-7 und die Bruchenergie G_{cr2} der Tabelle 5.5-8 zu entnehmen.

Tabelle 5.5-6: Elastische Energie G_{el} der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3

Kennzeichnung		G_{el} [J/m²]	m	s	v
N1-4-DFM2-C2-13_09_2010		91			
N1-5-DFM2-C2-13_09_2010		142			
N1-6-DFM2-C2-13_09_2010		91	108	29	27,21 %
N1-1-DFM2-C3-20_09_2010		197			
N1-2-DFM2-C3-20_09_2010		139			
N1-3-DFM2-C3-20_09_2010		212			
N1-4-DFM2-C3-20_09_2010		143			
N1-5-DFM2-C3-20_09_2010		164			
N1-6-DFM2-C3-20_09_2010		99	159	41	26,01 %
Mittelwert	m	142			
Standardabweichung	s	44			
Variationskoeffizient	v	30,98 %			

Tabelle 5.5-7: „Multi-cracking“ Energie G_{cr1} der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3

Kennzeichnung		G_{cr1} [J/m²]	m	s	v
N1-4-DFM2-C2-13_09_2010		13072			
N1-5-DFM2-C2-13_09_2010		12585			
N1-6-DFM2-C2-13_09_2010		9437	11698	1973	16,87 %
N1-1-DFM2-C3-20_09_2010		17293			
N1-2-DFM2-C3-20_09_2010		6743			
N1-3-DFM2-C3-20_09_2010		9786			
N1-4-DFM2-C3-20_09_2010		13746			
N1-5-DFM2-C3-20_09_2010		11522			
N1-6-DFM2-C3-20_09_2010		2807	10316	5125	49,68 %
Mittelwert	m	10777			
Standardabweichung	s	4227			
Variationskoeffizient	v	39,22 %			

Tabelle 5.5-8: Bruchenergie G_{cr2} der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3

Kennzeichnung	G_{cr2} [J/m²]	m	s	v
N1-4-DFM2-C2-13_09_2010	30378			
N1-5-DFM2-C2-13_09_2010	28690			
N1-6-DFM2-C2-13_09_2010 [1)]		29534	1194	4,04 %
N1-1-DFM2-C3-20_09_2010	41676			
N1-2-DFM2-C3-20_09_2010 [1)]				
N1-3-DFM2-C3-20_09_2010 [1)]				
N1-4-DFM2-C3-20_09_2010	39282			
N1-5-DFM2-C3-20_09_2010 [2)]				
N1-6-DFM2-C3-20_09_2010 [1)]		40479	1692	4,18 %

Mittelwert	m	35006
Standardabweichung	s	6431
Variationskoeffizient	v	18,37 %

[1)] Risslokalisierung fand außerhalb des Messbereichs statt.

[2)] Risslokalisierung fand an zwei Stellen statt.

5.5.3.2 Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

Wie in Abschnitt 5.5.2.1 beschrieben wurde bei den Versuchskörpern ohne Kerbe neben den σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven basierend auf den Messungen der ohmschen Wegaufnehmer zusätzlich σ_{ct}-w_r-Kurven mit Hilfe einer optischen Messung ermittelt.

Da bei einigen Versuchskörpern ohne Kerbe die Risslokalisierung außerhalb des Messbereichs stattfand oder der Versuchskörper an zwei Stellen lokalisierte, konnten lediglich für zwei Versuchskörper der Charge C2 (vgl. Bild 5.5-13) und zwei Versuchskörper der Charge C3 (vgl. Bild 5.5-14) die σ_{ct}-w_r-Kurven ermittelt werden.

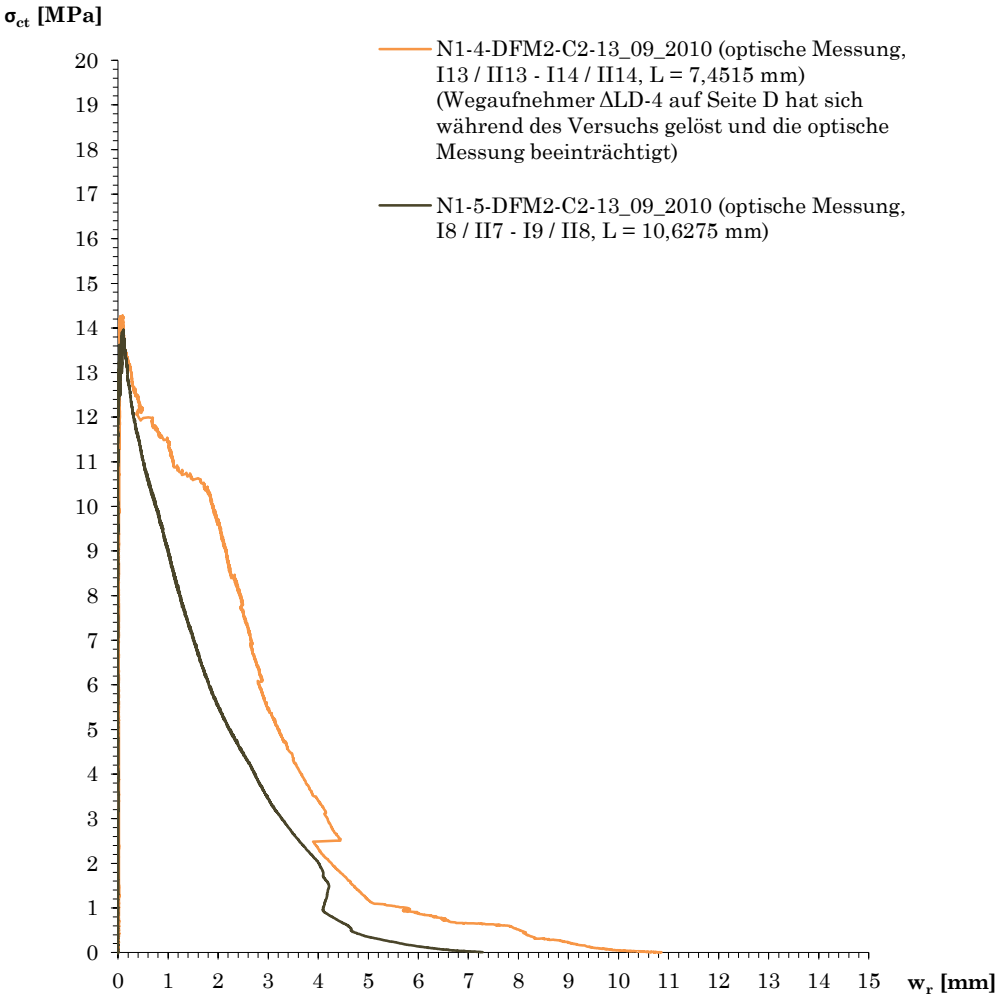


Bild 5.5-13: σ_{ct}-w_r-Kurven der Versuchskörper ohne Kerbe der Charge C2 basierend auf optischer Messung bei der Durchführung weggeregelter zentrischer Zugversuche

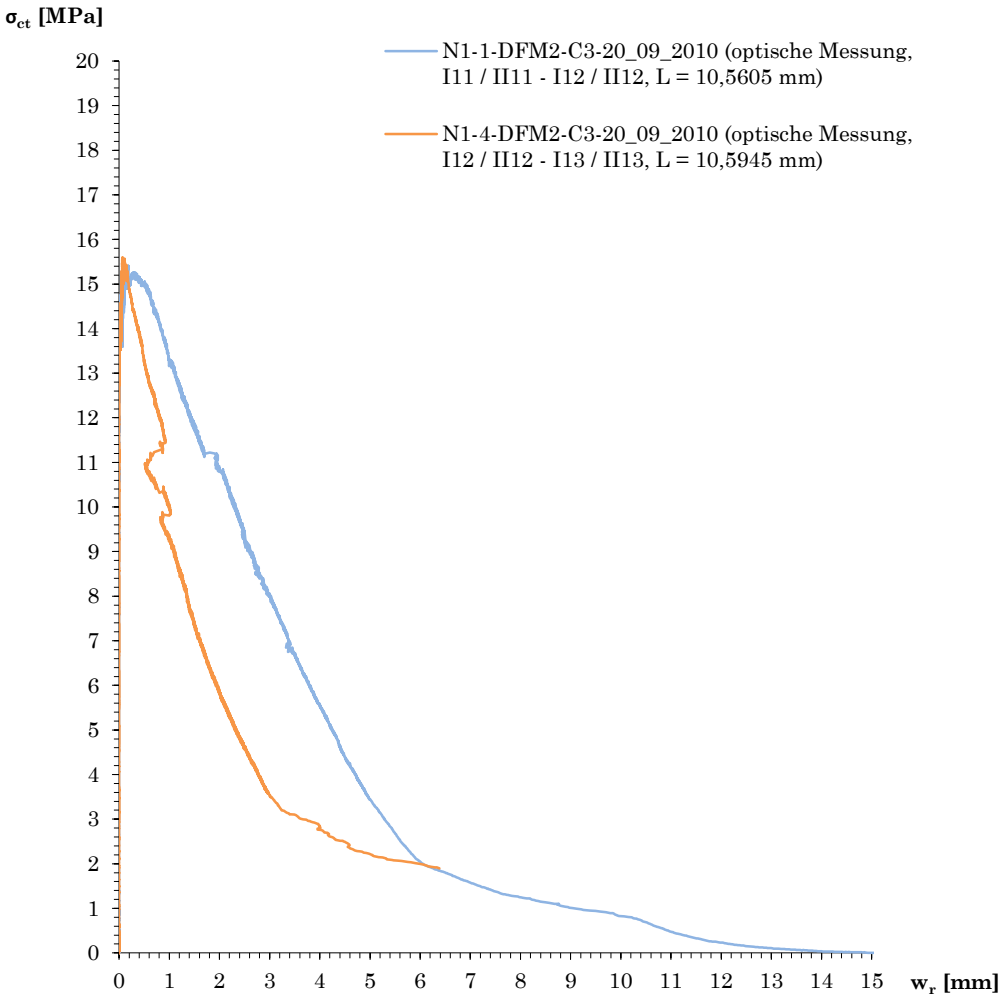


Bild 5.5-14: σ_{ct}-w_r-Kurven der Versuchskörper ohne Kerbe der Charge C3 basierend auf optischer Messung bei der Durchführung weggeregelter zentrischer Zugversuche

Ebenso wie auf Grundlage der σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven lässt sich auch auf Grundlage der σ_{ct}-w_r-Kurven die Bruchenergie berechnen. Die Bruchenergie $G_{cr2,optische\ Messung}$ berechnet sich wie folgt:

$$G_{cr2,optische\ \ Messung} = \int_{w_r(f_{ct})}^{w_{r,max}} \sigma_{ct}(w_r) \cdot dw_r \qquad (5\text{-}14)$$

mit $G_{cr2,optische\ Messung}$ [J/m²] Bruchenergie berechnet aus optischer Messung
$\sigma_{ct}(w_r)$ [MPa] Zugspannung des Betons in Abhängigkeit der Rissbreite
w_r [mm] Rissbreite

Die zur Zugfestigkeit f_{ct} korrespondierenden Rissbreiten $w_r(f_{ct})$ sind in Tabelle 5.5-9 angeben.

Tabelle 5.5-9: Rissbreite $w_r(f_{ct})$ der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 basierend auf der optischen Messung

Kennzeichnung		$w_r(f_{ct})$ [mm]	m	s	v
N1-4-DFM2-C2-13_09_2010		0,097			
N1-5-DFM2-C2-13_09_2010		0,110			
N1-6-DFM2-C2-13_09_2010			0,103	0,009	8,92 %
N1-1-DFM2-C3-20_09_2010		0,184			
N1-2-DFM2-C3-20_09_2010					
N1-3-DFM2-C3-20_09_2010					
N1-4-DFM2-C3-20_09_2010		0,068			
N1-5-DFM2-C3-20_09_2010					
N1-6-DFM2-C3-20_09_2010			0,126	0,082	65,10 %
Mittelwert	m	0,115			
Standardabweichung	s	0,049			
Variationskoeffizient	v	43,20 %			

Die für die Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 berechnete Bruchenergie $G_{cr2,optische\ Messung}$ basierend auf der optischen Messung ist der Tabelle 5.5-10 zu entnehmen.

Tabelle 5.5-10: Bruchenergie $G_{cr2,optische\ Messung}$ der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3

Kennzeichnung		$G_{cr2,optische\ Messung}$ [J/m²]	m	s	v
N1-4-DFM2-C2-13_09_2010		38324			
N1-5-DFM2-C2-13_09_2010		25094			
N1-6-DFM2-C2-13_09_2010 [1)]			31709	9355	29,50 %
N1-1-DFM2-C3-20_09_2010		53528			
N1-2-DFM2-C3-20_09_2010 [1)]					
N1-3-DFM2-C3-20_09_2010 [1)]					
N1-4-DFM2-C3-20_09_2010		32400			
N1-5-DFM2-C3-20_09_2010 [2)]					
N1-6-DFM2-C3-20_09_2010 [1)]			42964	14940	34,77 %
Mittelwert	m	37336			
Standardabweichung	s	12075			
Variationskoeffizient	v	32,34 %			

[1)] Risslokalisierung fand außerhalb des Messbereichs statt.

[2)] Risslokalisierung fand an zwei Stellen statt.

In Bild 5.5-15 ist ein Vergleich der Bruchenergie $G_{cr2,optische\ Messung}$ mit der auf den Messungen der ohmschen Wegaufnehmer basierenden Bruchenergie G_{cr2} dargestellt.

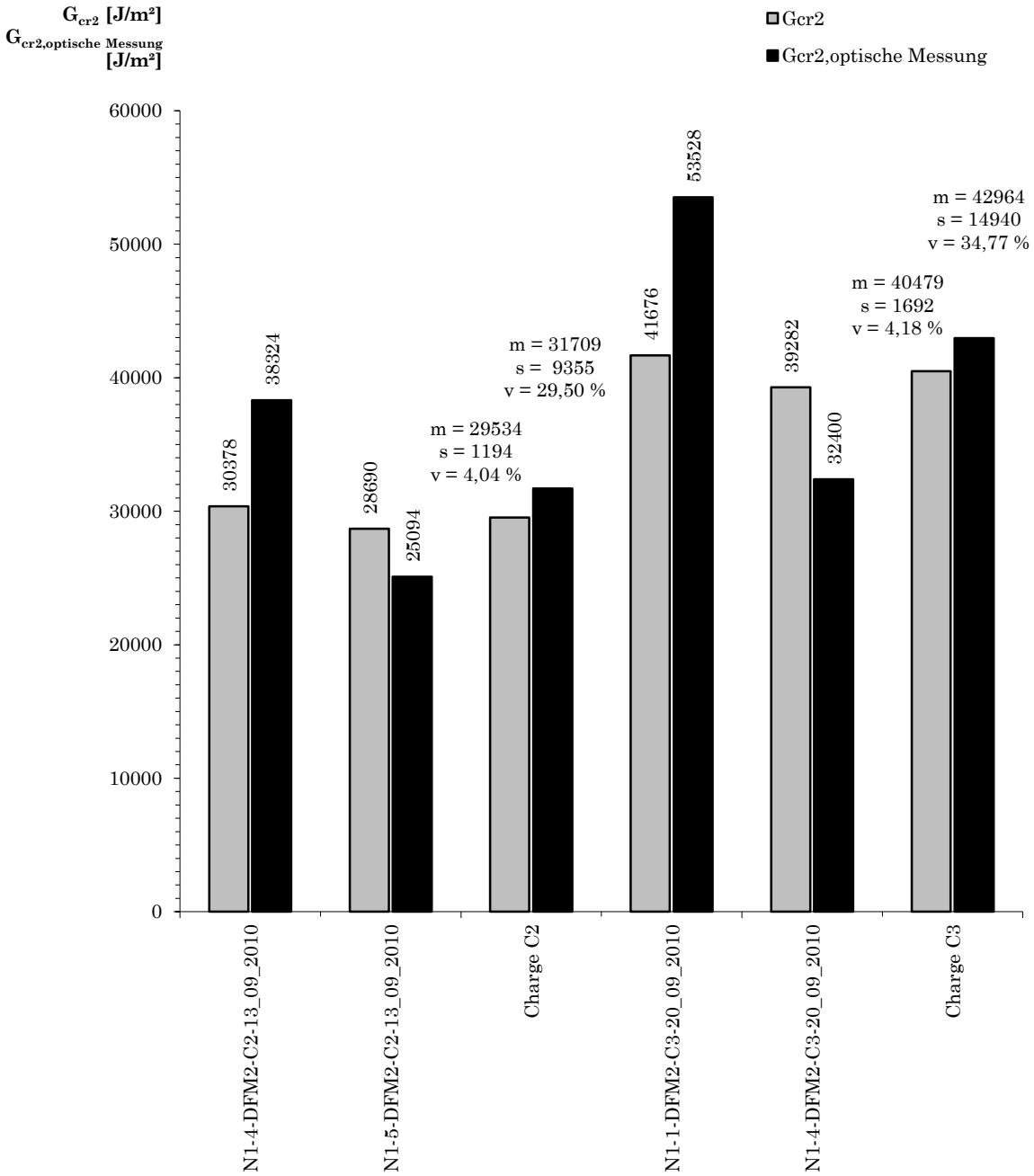


Bild 5.5-15: Vergleich der Bruchenergie G_{cr2} und $G_{cr2,optische\ Messung}$ der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3

5.5.4 Versuchsergebnisse der zentrischen Zugversuche an Versuchskörpern mit Kerbe

5.5.4.1 Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Die gemessenen Prüfkraft F wurde nach Gl. (5-8) in die axiale Zugspannung σ_{ct} umgerechnet. Die zur Zugspannung σ_{ct} korrespondierende Betonzugdehnung ε_{ct} wurde nach Gl. (5-9) aus der Längenänderung Δl in Belastungsrichtung berechnet. Die Längenänderungen Δl berechnet sich dabei als Mittelwert der Messwerte der auf den Querschnittsseiten angebrachten Wegaufnehmer ΔLA-1 und ΔLA-2 sowie ΔLB-3 und ΔLB-4 (vgl. Bild 5.5-4). Die Messlänge der einzelnen Versuchskörper ist in Anhang A.5 vermerkt. In Bild 5.5-16 und Bild 5.5-17 sind die σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 als Ergebnis der weggeregelten zentrischen Zugversuche dargestellt.

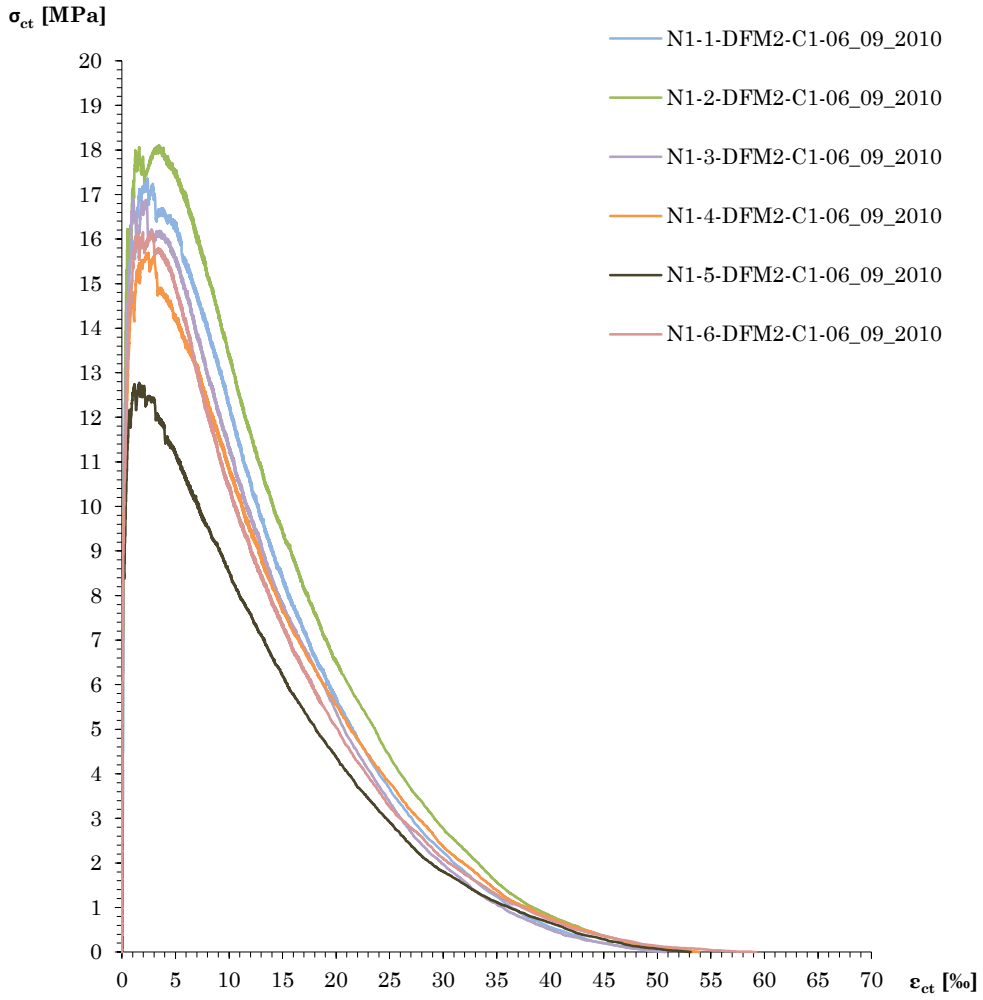


Bild 5.5-16: σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven der Versuchskörper mit Kerbe der Charge C1 als Ergebnis der weggeregelten zentrischen Zugversuche

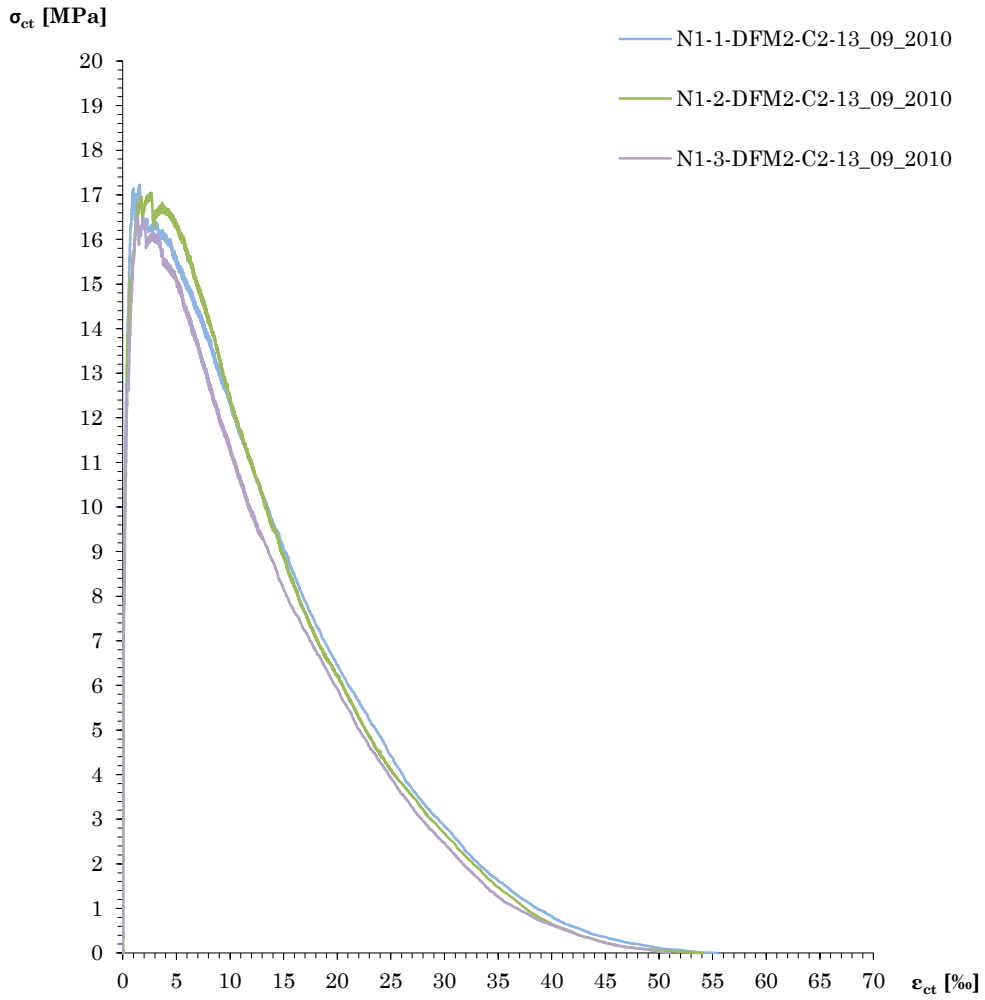


Bild 5.5-17: σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven der Versuchskörper mit Kerbe der Charge C2 als Ergebnis der weggeregelten zentrischen Zugversuche

Die Kurven weisen alle einen ähnlichen Verlauf auf. Zunächst steigt die Zugspannung σ_{ct} linear bis zur Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ an, bis es im Bereich der Kerbe zur Ausbildung eines Risses kommt. In Tabelle 5.5-11 sind für die Chargen C1 und C2 die ermittelten Elastizitätsgrenzen der Zugspannung $f_{ct,el}$ sowie die dazu korrespondierenden Betonzugdehnungen $\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$ aufgeführt. Der Mittelwert der Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ ergab sich zu 8,50 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 10,17 %. Für die zur Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ korrespondierende Betonzugdehnung $\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$ ergab sich ein Mittelwert von 0,14 ‰. Der Variationskoeffizient betrug 14,57 %.

Tabelle 5.5-11: Bei weggeregelten zentrischen Zugversuchen an Versuchskörpern mit Kerbe der Chargen C1 und C2 ermittelte Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ und korrespondierende Betonzugdehnung $\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$

Kennzeichnung		$f_{ct,el}$	m	s	v	$\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$	m	s	v
		[MPa]				[‰]			
N1-1-DFM2-C1-06_09_2010		6,88				0,15			
N1-2-DFM2-C1-06_09_2010		8,69				0,15			
N1-3-DFM2-C1-06_09_2010		9,38				0,18			
N1-4-DFM2-C1-06_09_2010		8,86				0,13			
N1-5-DFM2-C1-06_09_2010		8,60				0,15			
N1-6-DFM2-C1-06_09_2010		8,98	8,57	0,87	10,14 %	0,13	0,15	0,02	11,66 %
N1-1-DFM2-C2-13_09_2010		9,41				0,13			
N1-2-DFM2-C2-13_09_2010		7,36				0,11			
N1-3-DFM2-C2-13_09_2010		8,32	8,36	1,03	12,31 %	0,17	0,13	0,03	21,43 %
Mittelwert	m	8,50				0,14			
Standardabweichung	s	0,86				0,02			
Variationskoeffizient	v	10,17 %				14,57 %			

Nach Überschreitung von $f_{ct,el}$ steigt die Zugspannung σ_{ct} nichtlinear bis zur maximalen Zugfestigkeit f_{ct} weiter an, wobei die rissüberbrückenden Fasern im Bereich der Kerbe aktiviert werden. In Tabelle 5.5-12 sind für die Chargen C1 und C2 die ermittelten Zugfestigkeiten f_{ct} sowie die dazu korrespondierenden Betonzugdehnungen $\varepsilon_{ct}(f_{ct})$ aufgeführt. Der Mittelwert der Zugfestigkeit f_{ct} ergab sich zu 16,42 MPa. Der Variationskoeffizient betrug 9,36 %. Für die zur Zugfestigkeit f_{ct} korrespondierende Betonzugdehnung $\varepsilon_{ct}(f_{ct})$ ergab sich ein Mittelwert von 2,16 ‰ bei einem Variationskoeffizienten von 36,07 %.

Tabelle 5.5-12: Bei weggeregelten zentrischen Zugversuchen an Versuchskörpern mit Kerbe der Chargen C1 und C2 ermittelte Zugfestigkeit f_{ct} und korrespondierende Betonzugdehnung $\varepsilon_{ct}(f_{ct})$

Kennzeichnung		f_{ct}	m	s	v	$\varepsilon_{ct}(f_{ct})$	m	s	v
		[MPa]				[‰]			
N1-1-DFM2-C1-06_09_2010		17,35				2,39			
N1-2-DFM2-C1-06_09_2010		18,10				3,44			
N1-3-DFM2-C1-06_09_2010		16,91				1,08			
N1-4-DFM2-C1-06_09_2010		15,69				2,45			
N1-5-DFM2-C1-06_09_2010		12,77				1,60			
N1-6-DFM2-C1-06_09_2010		16,16	16,16	1,87	11,56 %	2,82	2,30	0,85	36,92 %
N1-1-DFM2-C2-13_09_2010		17,22				1,58			
N1-2-DFM2-C2-13_09_2010		17,04				2,64			
N1-3-DFM2-C2-13_09_2010		16,51	16,93	0,37	2,17 %	1,41	1,87	0,66	35,46 %
Mittelwert	m	16,42				2,16			
Standardabweichung	s	1,54				0,78			
Variationskoeffizient	v	9,36 %				36,07 %			

Nach Überschreitung von f_{ct} weitet sich der Riss im Bereich der Kerbe auf, wobei die rissüberbrückenden Fasern zunehmend aus der Matrix des UHFFB herausgezogen werden. Mit fortschreitender Aufweitung des Risses im Bereich der Kerbe fällt die Zugspannung σ_{ct} kontinuierlich ab und geht gegen null.

In Bild 5.5-18 ist die Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ und in Bild 5.5-19 die Zugfestigkeit f_{ct} in Abhängigkeit vom Alter der Versuchskörper ohne Kerbe zum Zeitpunkt der Prüfung aufgetragen. In beiden Fällen ist ein Einfluss des Alters der Versuchskörper nicht zu erkennen.

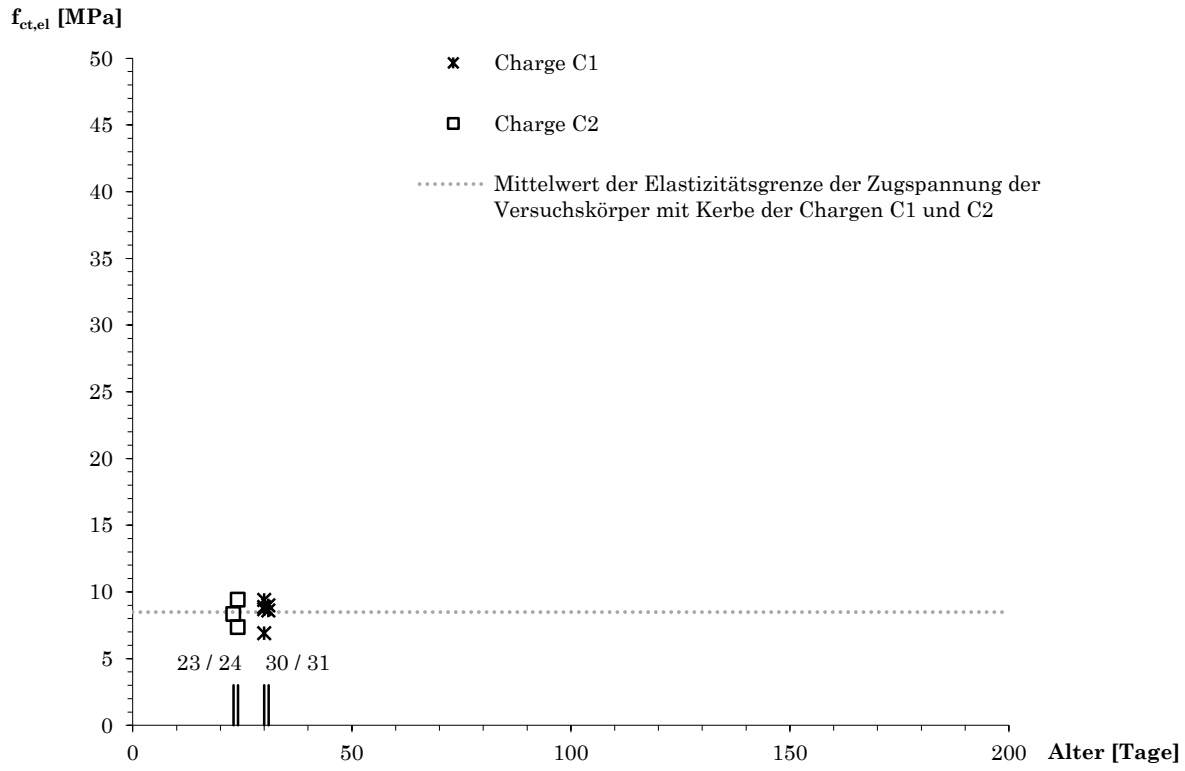


Bild 5.5-18: Verlauf der Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ in Abhängigkeit vom Alter der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 zum Zeitpunkt der Prüfung

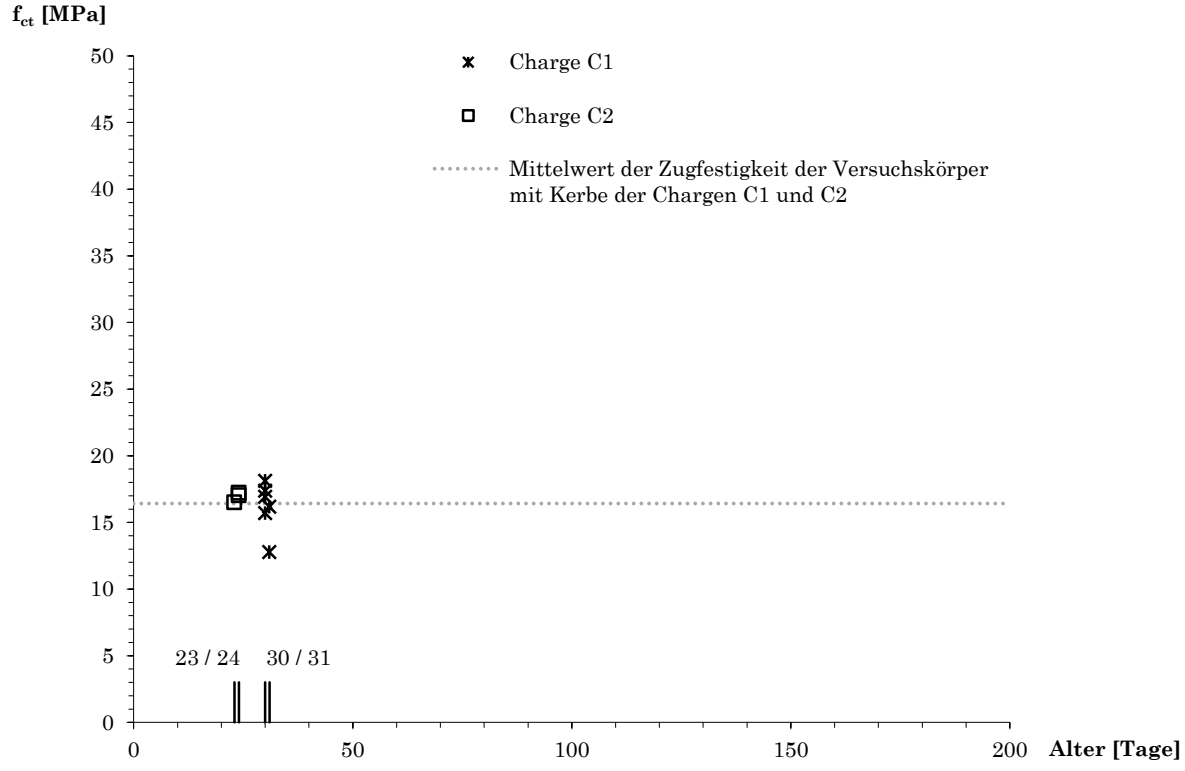


Bild 5.5-19: Verlauf der Zugfestigkeit f_{ct} in Abhängigkeit vom Alter der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 zum Zeitpunkt der Prüfung

Aus den einzelnen σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven lässt sich durch Berechnung der charakteristischen Punkte des multilinearen Linienzuges nach Bild 5.5-10 eine mittlere charakteristische σ_{ct}-ε_{ct}-Kurve erzeugen (vgl. Bild 5.5-20). Sowohl die charakteristischen Punkte des aufsteigenden Astes als auch die charakteristischen Punkte des abfallenden Astes wurden aus den σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven aller Versuchskörper berechnet. Die Werte für die charakteristischen Punkte sind der Tabelle 5.5-13 und Tabelle 5.5-14 zu entnehmen.

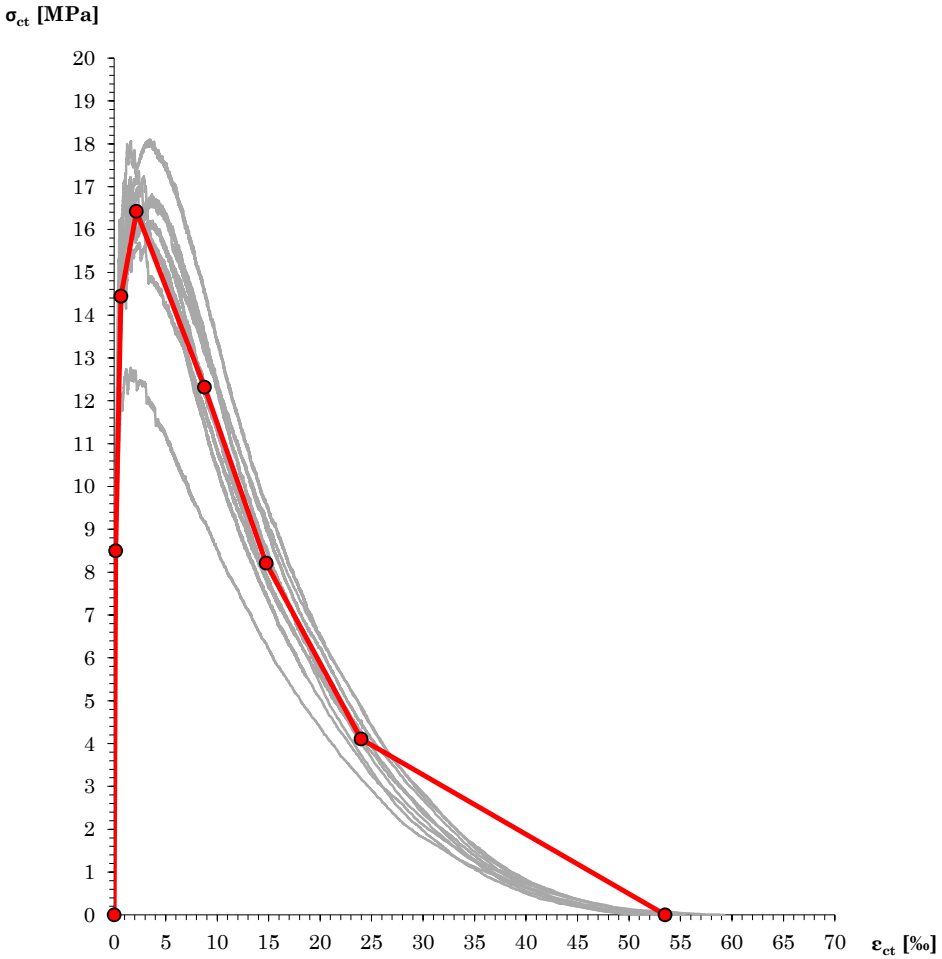


Bild 5.5-20: Mittlere charakteristische σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 als Ergebnis der weggeregelten zentrischen Zugversuche

Tabelle 5.5-13: Charakteristische Punkte des aufsteigenden Astes der mittleren charakteristischen σ_{ct}-ε_{ct}-Kurve der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2

		$f_{ct,el}$ [MPa]	$\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$ [‰]	$f_{ct,1}$ [MPa]	$\varepsilon_{ct,1}$ [‰]	f_{ct} [MPa]	$\varepsilon_{ct}(f_{ct})$ [‰]
Mittelwert	m	8,50	0,14	14,44	0,65	16,42	2,16
Standardabweichung	s	0,86	0,02	1,14	0,08	1,54	0,78
Variationskoeffizient	v	10,17%	14,57%	7,91%	12,88%	9,36%	36,07%

Tabelle 5.5-14: Charakteristische Punkte des abfallenden Astes der mittleren charakteristischen σ_{ct}-ε_{ct}-Kurve der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2

		$f_{ct,2}$ [MPa]	$\varepsilon_{ct,2}$ [‰]	$f_{ct,3}$ [MPa]	$\varepsilon_{ct,3}$ [‰]	$f_{ct,4}$ [MPa]	$\varepsilon_{ct,4}$ [‰]	$f_{ct,5}$ [MPa]	$\varepsilon_{ct,5}$ [‰]
Mittelwert	m	12,31	8,78	8,21	14,76	4,10	23,98	0,00	53,52
Standardabweichung	s	1,15	0,68	0,77	0,75	0,38	0,94		2,70
Variationskoeffizient	v	9,36%	7,77%	9,36%	5,06%	9,36%	3,93%		5,04%

Auf Grundlage der gemessenen σ_{ct}–ε_{ct}-Kurven lässt sich die Bruchenergie G_{cr2} nach Gl. (5-13) berechnen. Die für die Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 berechnete Bruchenergie G_{cr2} ist der Tabelle 5.5-15 zu entnehmen.

Tabelle 5.5-15: Bruchenergie G_{cr2} der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2

Kennzeichnung		G_{cr2} [J/m²]	m	s	v
N1-1-DFM2-C1-06_09_2010		38016			
N1-2-DFM2-C1-06_09_2010		40071			
N1-3-DFM2-C1-06_09_2010		38818			
N1-4-DFM2-C1-06_09_2010		35611			
N1-5-DFM2-C1-06_09_2010		29663			
N1-6-DFM2-C1-06_09_2010		33450	35938	3882	10,80 %
N1-1-DFM2-C2-13_09_2010		42590			
N1-2-DFM2-C2-13_09_2010		39593			
N1-3-DFM2-C2-13_09_2010		39295	40492	1822	4,50 %
Mittelwert	m	37456			
Standardabweichung	s	3929			
Variationskoeffizient	v	10,49 %			

5.5.4.2 Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

Wie in Abschnitt 5.5.2.2 beschrieben wurde bei den Versuchskörpern mit Kerbe neben den σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven basierend auf den Messungen der ohmschen Wegaufnehmer zusätzlich σ_{ct}-w_r-Kurven mit Hilfe von einer optischen Messung sowie mit der Hilfe von Rissöffnungsmessern ermittelt.

Die σ_{ct}-w_r-Kurven basierend auf der optischen Messung sowie den Rissöffnungsmessern sind für die Versuchskörper mit Kerbe der Charge C1 in Bild 5.5-21 und für die Charge C2 in Bild 5.5-22 dargestellt.

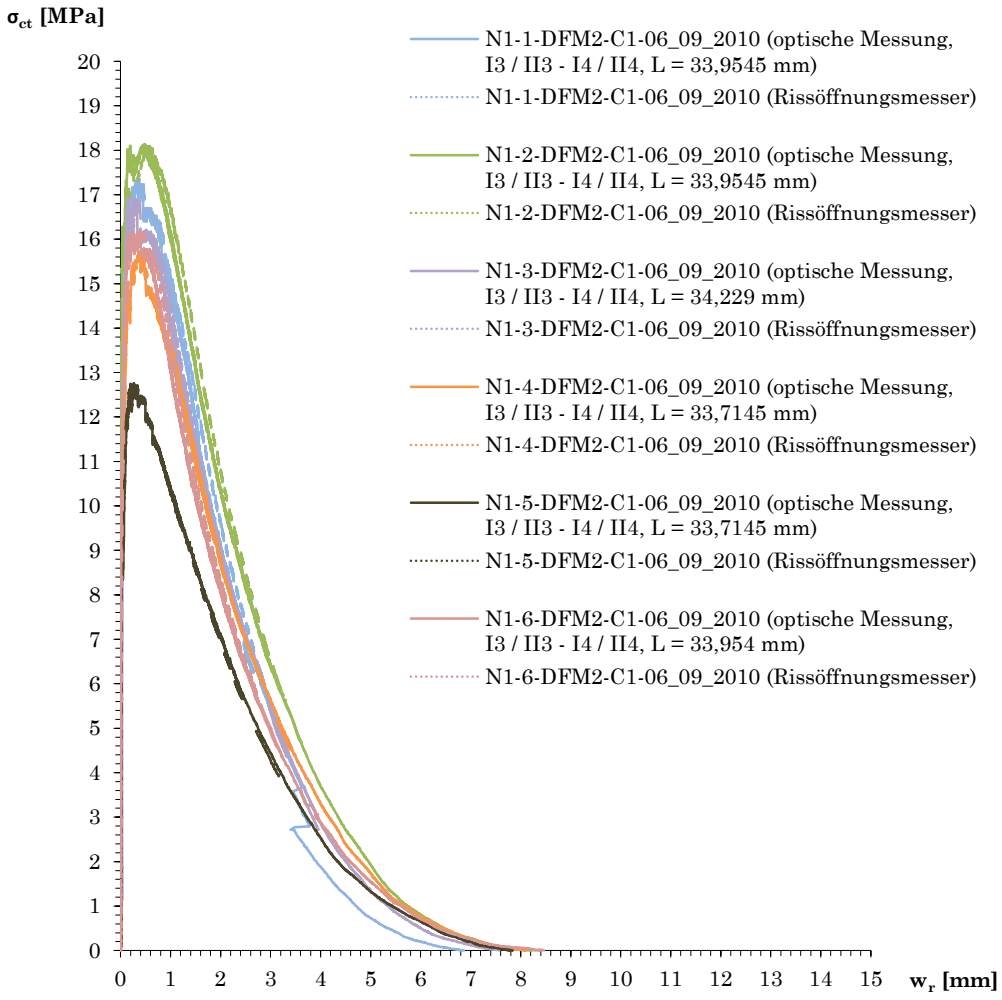


Bild 5.5-21: σ_{ct}-w_r-Kurven der Versuchskörper mit Kerbe der Charge C1 basierend auf der optischen Messung sowie Rissöffnungsmessern bei weggeregelten zentrischen Zugversuchen

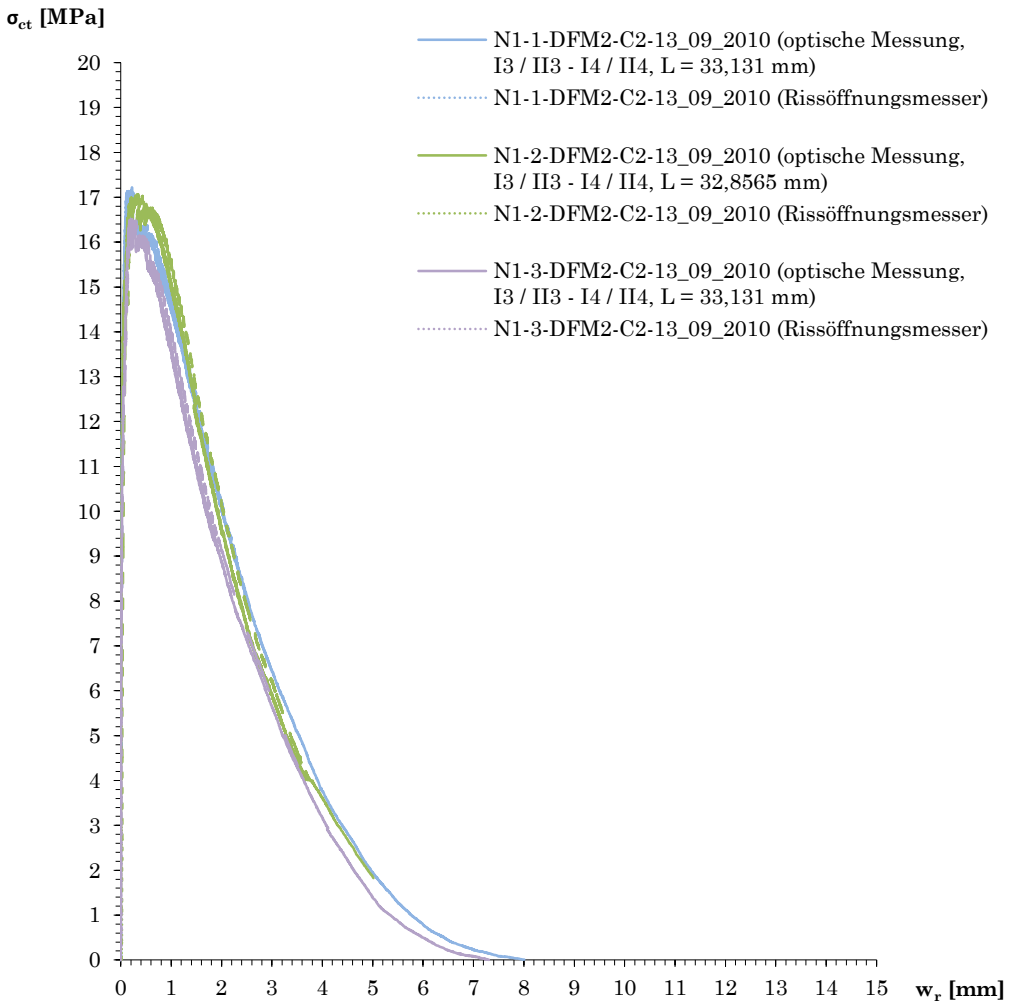


Bild 5.5-22: σ_{ct}-w_r-Kurven der Versuchskörper mit Kerbe der Charge C2 basierend auf der optischen Messung sowie Rissöffnungsmessern bei weggeregelten zentrischen Zugversuchen

Es lässt sich erkennen, dass die σ_{ct}-w_r-Kurven basierend auf den unterschiedlichen Messmethoden sehr gut übereinstimmen. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die Messung der Rissweite mit den Rissöffnungsmessern auf deren Nennmessbereich von 5 mm begrenzt war. Die Berechnung der Bruchenergie $G_{cr2,Rissöffnungsmesser}$ ist somit nur bis zu einer Rissbreite w_r von bis zu 5 mm möglich, weshalb im Folgenden die Bruchenergie $G_{cr2,optische\ Messung}$ auf Grundlage der σ_{ct}-w_r-Kurven basierend auf der optischen Messung berechnet wurden. Die Bruchenergie $G_{cr2,optische\ Messung}$ lässt sich nach Gl. (5-14) berechnen.

Die zur Zugfestigkeit f_{ct} korrespondierenden Rissbreiten $w_r(f_{ct})$ basierend auf der optischen Messung sind in Tabelle 5.5-16 angeben.

Tabelle 5.5-16: Rissbreite $w_r(f_{ct})$ der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 basierend auf der optischen Messung

Kennzeichnung		$w_r(f_{ct})$ [mm]	m	s	v
N1-1-DFM2-C1-06_09_2010		0,344			
N1-2-DFM2-C1-06_09_2010		0,480			
N1-3-DFM2-C1-06_09_2010		0,145			
N1-4-DFM2-C1-06_09_2010		0,383			
N1-5-DFM2-C1-06_09_2010		0,269			
N1-6-DFM2-C1-06_09_2010		0,380	0,333	0,115	34,39 %
N1-1-DFM2-C2-13_09_2010		0,224			
N1-2-DFM2-C2-13_09_2010		0,342			
N1-3-DFM2-C2-13_09_2010		0,194	0,253	0,078	30,94 %
Mittelwert	m	0,306			
Standardabweichung	s	0,107			
Variationskoeffizient	v	34,77 %			

Die für die Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 berechnete Bruchenergie $G_{cr2,optische\ Messung}$ basierend auf der optischen Messung ist der Tabelle 5.5-17 zu entnehmen.

Tabelle 5.5-17: Bruchenergie $G_{cr2,optische\ Messung}$ der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2

Kennzeichnung		$G_{cr2,optische\ Messung}$ [J/m²]	m	s	v
N1-1-DFM2-C1-06_09_2010		34865			
N1-2-DFM2-C1-06_09_2010		39988			
N1-3-DFM2-C1-06_09_2010		39292			
N1-4-DFM2-C1-06_09_2010		35612			
N1-5-DFM2-C1-06_09_2010		29533			
N1-6-DFM2-C1-06_09_2010		33558	35475	3855	10,87 %
N1-1-DFM2-C2-13_09_2010		42426			
N1-2-DFM2-C2-13_09_2010		37756			
N1-3-DFM2-C2-13_09_2010		38169	39451	2585	6,55 %
Mittelwert	m	36800			
Standardabweichung	s	3861			
Variationskoeffizient	v	10,49 %			

In Bild 5.5-23 ist ein Vergleich der Bruchenergie $G_{cr2,optische\ Messung}$ mit der auf den Messungen der ohmschen Wegaufnehmer basierenden Bruchenergie G_{cr2} dargestellt.

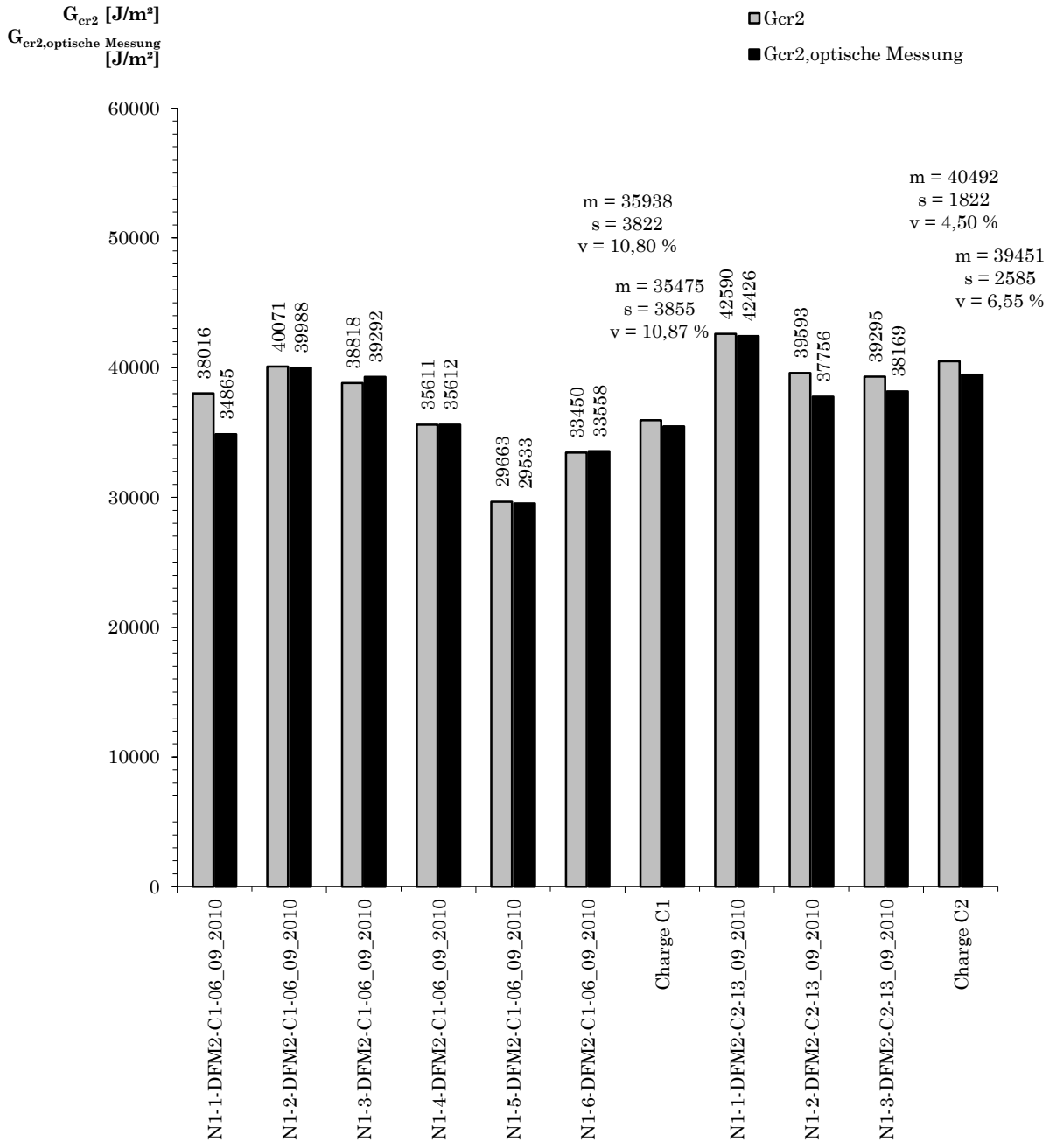


Bild 5.5-23: Vergleich der Bruchenergie G_{cr2} und $G_{cr2,optische\ Messung}$ der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2

5.5.4.3 Faserorientierungsmessung und Ermittlung der 1D Zugfestigkeit

Zur Ermittlung der Faserorientierung wurde im Anschluss an die zentrischen Zugversuche von jeder Versuchskörperhälfte eine Probe abgetrennt. Im Bild 5.5-24 ist die Schnittführung zur Probeentnahme sowie die Lage der Bruchflächen gekennzeichnet.

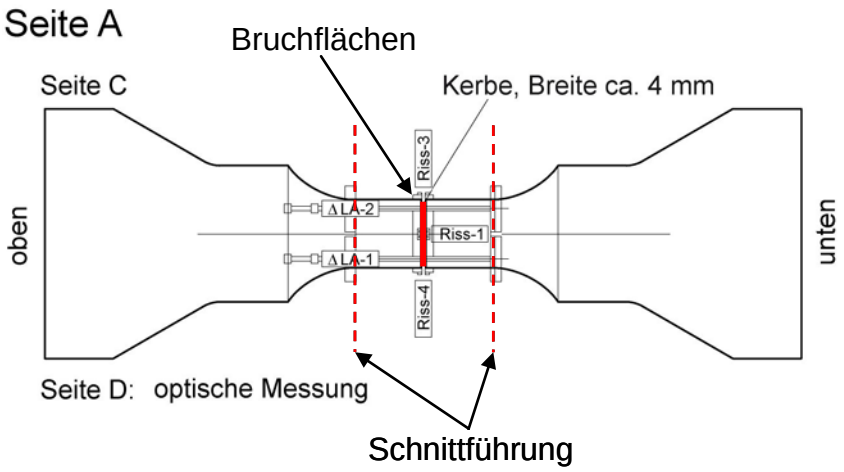
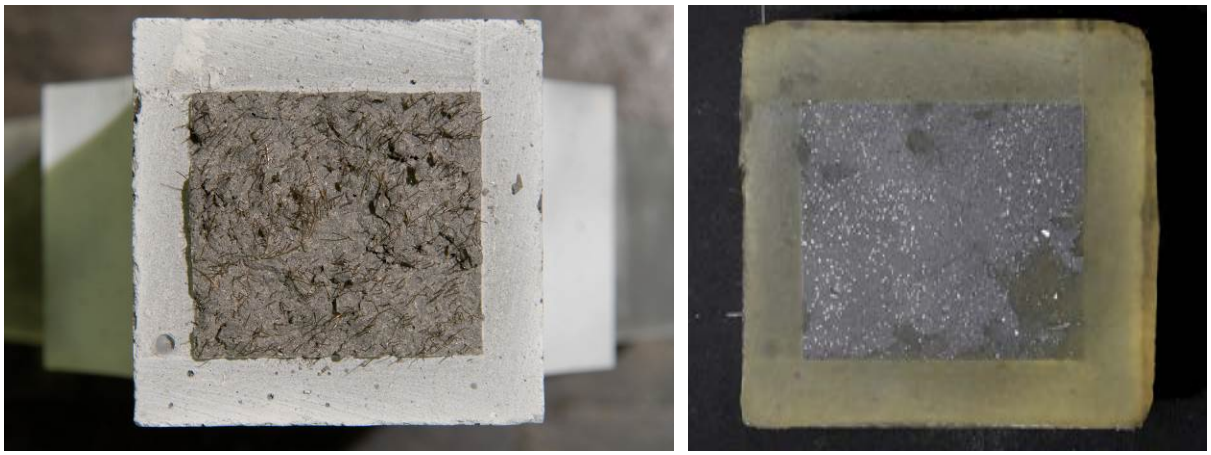


Bild 5.5-24: Schnittführung zur Probenentnahme und Lage der Bruchflächen

Die Bruchflächen im Bereich der Kerbe mit den herausragenden Stahlfasern wurden mit dem Epoxidharz Sikafloor®-156 vergossen (vgl. Bild 5.5-25). Nach dem Aushärten des Epoxidharzes erfolgte ein planparalleles Schleifen der Schnittflächen und Bruchflächen mit einer Nassschleifmaschine. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Bruchflächen nicht über den gekerbten Querschnitt der Zugprismen hinaus geschliffen wurden, damit die Faserorientierung unmittelbar im Bruchquerschnitt bestimmt werden kann.



a) vor dem Vergießen mit Epoxidharz

b) nach dem Vergießen mit Epoxidharz und planparallelem Schleifen

Bild 5.5-25: Bruchfläche im Bereich der Kerbe

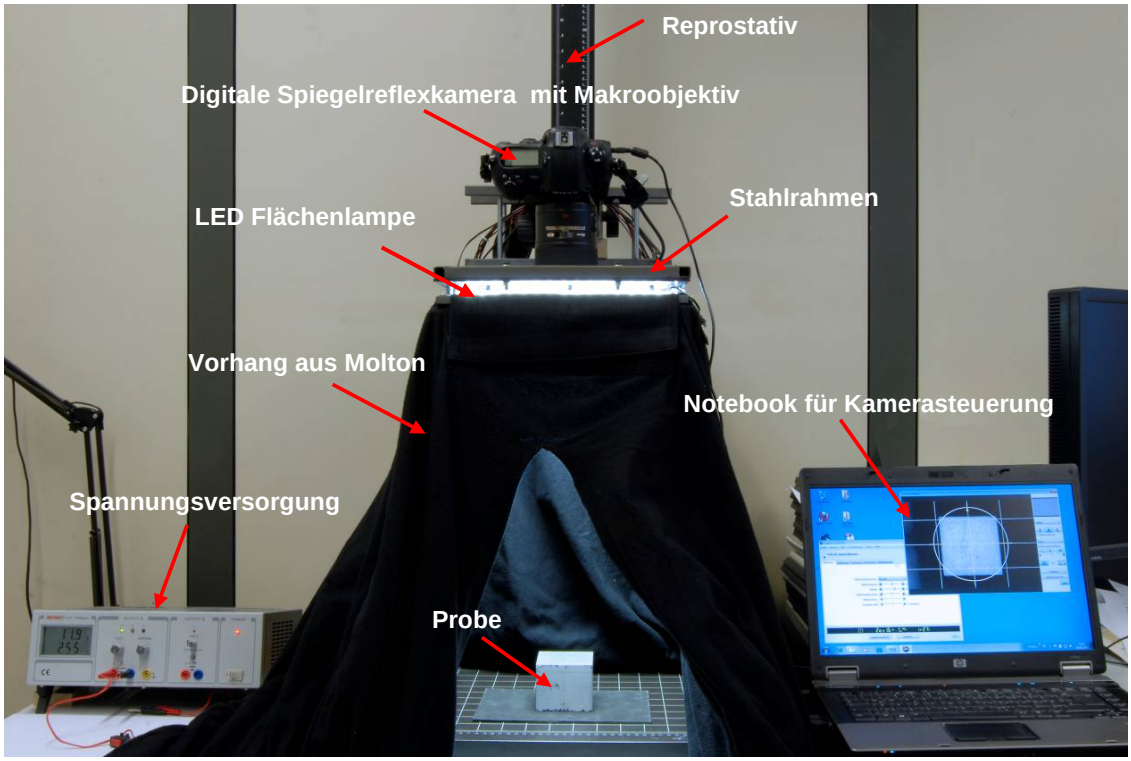


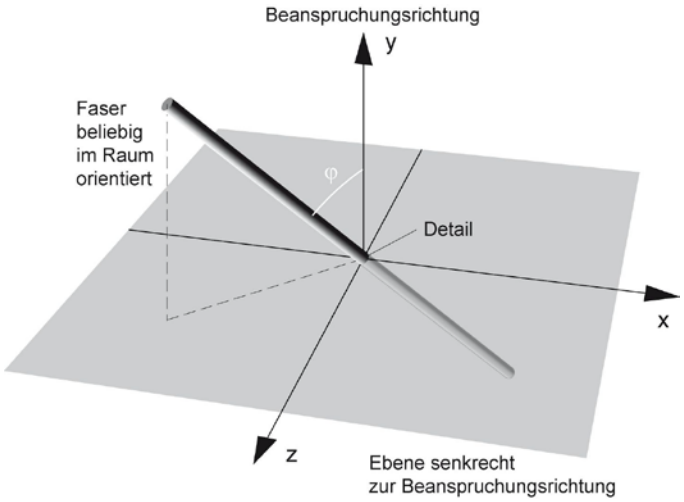
Bild 5.5-26: Messeinrichtung für die Aufnahmen der Schnittflächen der Proben [Frettlöhr (2011)]

Mit der in Bild 5.5-26 abgebildeten Messeinrichtung nach Frettlöhr (2011) wurden Digitalaufnahmen der Schnitt- und Bruchflächen mit einer hochauflösenden professionellen digitalen Spiegelreflexkamera mit Makroobjektiv aufgenommen. Mit Hilfe eines Algorithmus nach dem Verfahren der optischen Messung mittels digitaler Bildverarbeitung kann die Faserorientierung in Beanspruchungsrichtung ermittelt werden. Für eine detaillierte Beschreibung des Algorithmus und der Messeinrichtung wird auf Frettlöhr (2011) verwiesen.

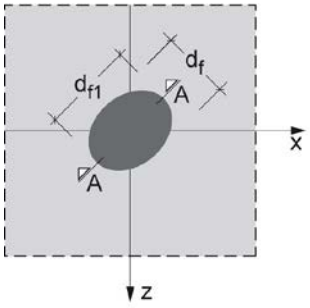
Als Kennzahl für die Faserorientierung wird nach Schönlin (1988) und Markowitsch (2006) der Faserorientierungsfaktor η als Mittelwert des Richtungskosinus in Beanspruchungsrichtung aller Fasern im betrachten Querschnitt wie folgt definiert (vgl. Bild 5.5-27):

$$\eta = \frac{1}{n_f}\sum_{i}^{n_f}\cos\varphi_i = \frac{1}{n_f}\sum_{i}^{n_f}\frac{d_{f,i}}{d_{f1,i}} \qquad (5\text{-}15)$$

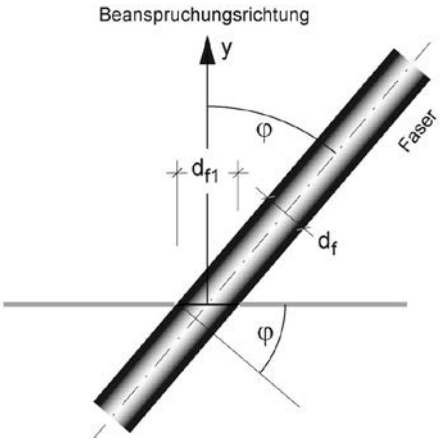
mit
- η [-] Faserorientierungsfaktor
- φ_i [°] Winkel zwischen Beanspruchungsrichtung und Faserlängsachse
- n_f [-] Faseranzahl im betrachteten Querschnitt
- $d_{f,i}$ [mm] Faserdurchmesser i-te Faser = 2. Hauptdurchmesser der Ellipse
- $d_{f1,i}$ [mm] 1. Hauptdurchmesser der Ellipse der i-ten Faser



a) Faser beliebig im Raum orientiert



b) Detail - Schnittbereich Ebene mit Faser



c) Längsschnitt A - A durch Faser

Bild 5.5-27: Geometrische Zusammenhänge zur Ableitung des Faserorientierungsfaktors [Frettlöhr (2011]

Zwischen der Faserorientierung und der einaxialen Zugfestigkeit besteht eine nichtlineare Korrelation. Zur mathematischen Beschreibung der Korrelationskurve schlägt Frettlöhr (2011) für Ductal® die nachfolgende Gleichung vor:

$$\chi(\eta) = \frac{f_{ct}(\eta)}{f_{ct,1D}} = 0{,}0014 \cdot e^{(5{,}97 \cdot \eta + 0{,}22)} + 0{,}32 \cdot \eta \qquad (5\text{-}16)$$

mit η [-] Faserorientierungsfaktor
$\chi(\eta)$ Verhältnis der von der Faserorientierung η abhängigen Zugfestigkeit $f_{ct}(\eta)$ zur 1D Zugfestigkeit $f_{ct,1D}$

Ein Faserorientierungsfaktor von $\eta = 1{,}0$ bedeutet, dass alle Fasern in Beanspruchungsrichtung ausgerichtet sind. Die hierzu korrespondierende Zugfestigkeit $f_{ct,1D}$ stellt den Maximalwert der einaxialen Zugfestigkeit dar. Der Verlauf ist im Bild 5.5-28 dargestellt.

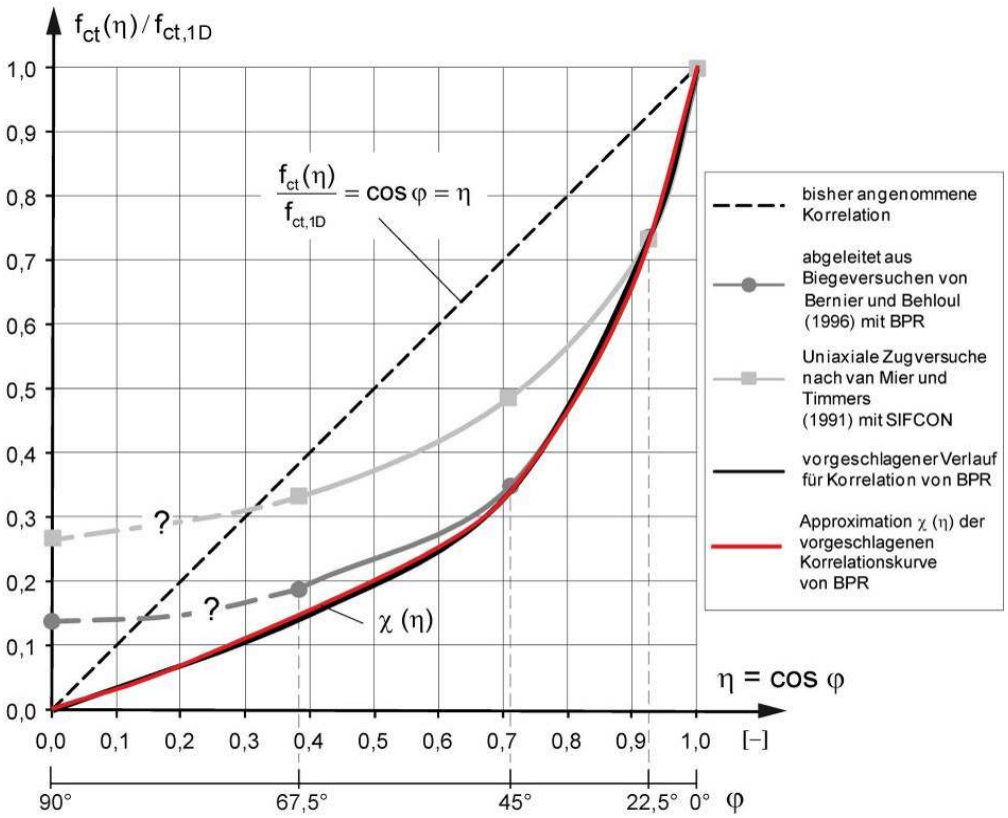


Bild 5.5-28: Verlauf der Approximationskurve nach Gl. (5-16) [Frettlöhr (2011)]

In Tabelle 5.5-18 und Tabelle 5.5-19 sind die Ergebnisse der Faserorientierungsmessung sowie die ermittelte 1D Zugfestigkeit zusammengefasst.

Im Bereich der ungekerbten Querschnitte der Versuchskörper liegt der Faserorientierungsfaktor im Bereich von η = 0,89 bis 0,91 mit einem Variationskoeffizienten von 0,92 %, d.h. die Faserorientierung der einzelnen Versuchskörper variiert nur sehr gering und beträgt im Mittel η = 0,90. Innerhalb der Bruchfläche beträgt die Bandbreite der Faserorientierung η = 0,84 bis 0,91 mit einem Variationskoeffizienten von 2,12 %. Damit variiert die Faserorientierung auch in den Bruchflächen nur sehr gering und liegt im Mittel bei η = 0,89. Lediglich der Versuchskörper N1-5-DFM2-C1-06_09_2010 weist mit η = 0,84 eine geringere Faserorientierung in der Bruchfläche auf, wodurch sich auch die im Vergleich zu den übrigen Versuchskörpern geringere Zugfestigkeit von $f_{ct}(\eta)$ = 12,77 MPa erklärt. Die übrigen Versuchskörper weisen eine Faserorientierung von η = 0,88 bis 0,91 auf mit einer korrespondierenden Zugfestigkeit von $f_{ct}(\eta)$ = 15,7 bis 18,1 MPa.

Mit Hilfe der Gl. (5-16) und der gemessenen Faserorientierung η wird die eindimensionale Zugfestigkeit $f_{ct,1D}$ zurückgerechnet aus der experimentell ermittelten Zugfestigkeit $f_{ct}(\eta)$. Im Bereich der ungekerbten Querschnitte ergibt sich eine Bandbreite von $f_{ct,1D}$ =19,72 bis 27,51 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 8,95 %. Bedingt durch die geringere Faserorientierung im Bruchquerschnitt und die damit einhergehende geringere Zugfestigkeit $f_{ct}(\eta)$ fällt beim Zugprisma N1-5-DFM2-C1-06_09_2010 auch die 1D Zugfestigkeit mit $f_{ct,1D}$ =19,72 MPa gegenüber den übrigen Zugprismen deutlich geringer aus. In den Bruchflächen ergeben sich 1D Zugfestigkeiten von $f_{ct,1D}$ = 23,71 bis 27,85 MPa und im Mittel von $f_{ct,1D}$ = 25,96 MPa mit einem geringen Variationskoeffizienten von 4,81 %. Der 5% - Fraktilwert der 1D Festigkeit beträgt $f_{ct,1D}$ = 22,74 MPa.

Tabelle 5.5-18: Ergebnisse der Faserorientierungsmessung als Mittelwerte der ungekerbten Querschnitte und Ermittlung der 1D Zugfestigkeit $f_{ct,1D}$

Kennzeichnung	f_{ct}	$d_{2,m}$	Faser-anzahl	Faser-dichte	Faser-gehalt	Faser-orien-tierung	$\chi(\eta)$	$f_{ct,1D} = f_{ct}/\chi(\eta)$
			n_{fm}	n_{fm}/A	$\rho_m = n \cdot A_{fi}/A$	η_m		
	[MPa]	[mm]	[-]	[1/mm²]	[Vol.-%]	[-]	[-]	[MPa]
N1-1-DFM2-C1-06_09_2010	17,35	0,191	3652	0,65	1,87%	0,89	0,63	27,51
N1-2-DFM2-C1-06_09_2010	18,10	0,195	3962	0,70	2,09%	0,91	0,68	26,69
N1-3-DFM2-C1-06_09_2010	16,91	0,195	3882	0,69	2,06%	0,90	0,66	25,59
N1-4-DFM2-C1-06_09_2010	15,69	0,190	3384	0,60	1,71%	0,89	0,65	24,17
N1-5-DFM2-C1-06_09_2010	12,77	0,196	3386	0,60	1,82%	0,89	0,65	19,72
N1-6-DFM2-C1-06_09_2010	16,16	0,199	3701	0,66	2,05%	0,89	0,64	25,26
N1-1-DFM2-C2-13_09_2010	17,22	0,190	3870	0,69	1,95%	0,91	0,69	24,81
N1-2-DFM2-C2-13_09_2010	17,04	0,184	3837	0,68	1,82%	0,90	0,66	25,99
N1-3-DFM2-C2-13_09_2010	16,51	0,193	3789	0,67	1,98%	0,89	0,63	26,11
Mittelwert m						0,90		25,09
Standardabweichung s						0,008		2,25
Variationskoeffizient v						0,92 %		8,95 %

Tabelle 5.5-19: Ergebnisse der Faserorientierungsmessung im gekerbten Querschnitt (Bruchfläche)und Ermittlung der 1D Zugfestigkeit $f_{ct,1D}$

Kennzeichnung	f_{ct}	$d_{2,m}$	Faser-anzahl	Faser-dichte	Faser-gehalt	Faser-orien-tierung	$\chi(\eta)$	$f_{ct,1D} = f_{ct}/\chi(\eta)$
			n_{fm}	n_{fm}/A	$\rho_m = n \cdot A_{fi}/A$	η_m		
	[MPa]	[mm]	[-]	[1/mm²]	[Vol.-%]	[-]	[-]	[MPa]
N1-1-DFM2-C1-06_09_2010	17,35	0,200	1.508	0,62	1,94%	0,89	0,64	27,17
N1-2-DFM2-C1-06_09_2010	18,10	0,205	2.038	0,79	2,60%	0,89	0,65	27,85
N1-3-DFM2-C1-06_09_2010	16,91	0,204	1.787	0,71	2,32%	0,90	0,67	25,27
N1-4-DFM2-C1-06_09_2010	15,69	0,201	1.785	0,69	2,21%	0,88	0,62	25,29
N1-5-DFM2-C1-06_09_2010	12,77	0,206	1.519	0,59	1,96%	0,84	0,54	23,71
N1-6-DFM2-C1-06_09_2010	16,16	0,214	1.491	0,59	2,11%	0,88	0,61	26,48
N1-1-DFM2-C2-13_09_2010	17,22	0,197	1.796	0,71	2,18%	0,91	0,68	25,18
N1-2-DFM2-C2-13_09_2010	17,04	0,205	1.534	0,61	2,01%	0,90	0,66	26,00
N1-3-DFM2-C2-13_09_2010	16,51	0,198	2.356	0,93	2,89%	0,88	0,62	26,73
Mittelwert	m					0,89		25,96
Standardabweichung	s					0,019		1,25
Variationskoeffizient	v					2,12 %		4,81 %

5.6 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Das Materialverhalten wurde an Versuchs- und Probekörpern aus UHFFB mit der Bezeichnung Ductal® der Firma Lafarge experimentell untersucht. Der verwendete UHFFB war mit Stahlfasern (2,0 Vol.-%) vom Typ Redaelli (l_f/d_f=14/0,185) versehen und wurde einer Wärmebehandlung unterzogen.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden unter anderem die folgenden Materialkennwerte ermittelt:

- Druckfestigkeit an 18 Zylindern mit einem Durchmesser d von 100 mm und einer Höhe h von 200 mm:
  f_c = -211,3 MPa mit v = 5,70 %;
- E-Modul unter Druckbeanspruchung an 9 Zylindern mit einem Durchmesser d von 100 mm und einer Höhe h von 200 mm:
  E_c = 59364 MPa mit v = 1,14 %;
- Biegezugfestigkeit an 9 Prismen ohne Kerbe mit einer Querschnittsbreite b von 75 mm und einer Querschnittshöhe h von 75 mm:
  f_{ctfl} = 39,57 MPa mit v = 8,76 %;
- Biegezugfestigkeit und Rissbreite an 6 Prismen mit Kerbe mit einer Querschnittsbreite b von 75 mm und einer Querschnittshöhe h von 75 mm abzüglich einer Kerbtiefe von 25 mm:
  f_{ctfl} = 29,38 MPa mit v = 6,08 % und $w_r(f_{ctfl})$ = 0,55 mm mit v = 13,59 %;
- axiale Zugfestigkeit an 9 Versuchskörpern ohne Kerbe mit einer Querschnittsbreite b von 75 mm und einer Querschnittshöhe h von 75 mm:
  f_{ct} = 14,54 MPa mit v = 4,19 %;
- axiale Zugfestigkeit und Rissbreite an 9 Versuchskörpern mit Kerbe mit einer Querschnittsbreite b und einer Querschnittshöhe h von 50 mm:
  f_{ct} = 16,42 MPa mit v = 9,36 % und $w_r(f_{ct})$ = 0,306 mm mit v = 34,77 %.

Der bei den zentrischen Zugversuchen an Versuchskörpern ohne Kerbe ermittelte Mittelwert des E-Moduls E_{ct} betrug 56258 MPa bei einem Variationskoeffizienten v von 24,23 % und fiel somit um 5,2 % niedriger aus als der an Zylindern ermittelte E-Modul E_c unter Druckbeanspruchung.

In Tabelle 5.6-1 sind die Ergebnisse der durchgeführten experimentellen Untersuchungen zum Materialverhalten von UHFFB zusammengefasst.

Tabelle 5.6-1: Zusammenfassung der ermittelten Spannungs-Verformungs-Beziehungen und der Materialkennwerte

Prüfverfahren			m	s	v
Druckversuche	Zylinder	Spanungs-Dehnungs-Beziehung			
		f_c	-211,3 MPa	12,05 MPa	5,70 %
		ε_{c1}	-3,96 ‰	0,25 ‰	6,36 %
E-Modul-Prüfung	Zylinder	E_c	59364 MPa	679 MPa	1,14 %
Biegezugversuche	Prismen ohne Kerbe	Spannungs-Mittendurchbiegungs-Beziehung			
		$f_{ctfl,el}$	17,62 MPa	3,96 MPa	22,49 %
		$w_m(f_{ctfl,el})$	0,18 mm	0,05 mm	26,25 %
		f_{ctfl}	39,57 MPa	3,47 MPa	8,76 %
		$w_m(f_{ctfl})$	3,00 mm	0,60 mm	19,83 %
	Prismen mit Kerbe	Spannungs-Mittendurchbiegungs-Beziehung			
		f_{ctfl}	29,38 MPa	1,79 MPa	6,08 %
		$w_m(f_{ctfl})$	1,56 mm	0,21 mm	13,24 %
		Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung			
		$w_r(f_{ctfl})$	0,55 mm	0,08 mm	13,59 %

Tabelle 5.6-1 (fortgesetzt): Zusammenfassung der ermittelten Spannungs-Verformungs-Beziehungen und der Materialkennwerte

Prüfverfahren			m	s	v
Zentrische Zugversuche	Versuchskörper ohne Kerbe	Spanungs-Dehnungs-Beziehung			
		$f_{ct,el}$	10,06 MPa	0,93 MPa	9,23 %
		$\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$	0,19 ‰	0,04 ‰	23,62 %
		f_{ct}	14,54 MPa	0,61 MPa	4,19 %
		$\varepsilon_{ct}(f_{ct})$	5,69 ‰	1,47 ‰	25,83 %
		E_{ct}	56258 MPa	13629 MPa	24,23 %
		G_{el}	142 J/m²	44 J/m²	30,98 %
		G_{cr1}	10777 J/m²	4227 J/m²	39,22 %
		G_{cr2}	35006 J/m²	6431 J/m²	18,37 %
		Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung			
		$w_r(f_{ct})$ [1)]	0,115 mm	0,049 mm	43,20 %
		$G_{cr2,\ optische\ Messung}$	37336 J/m²	12075 J/m²	32,34 %
	Versuchskörper mit Kerbe	Spanungs-Dehnungs-Beziehung			
		$f_{ct,el}$	8,50 MPa	0,86 MPa	10,17 %
		$\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$	0,14 ‰	0,02 ‰	14,57 %
		f_{ct}	16,42 MPa	1,54 MPa	9,36 %
		$\varepsilon_{ct}(f_{ct})$	2,16 ‰	0,78 ‰	36,07 %
		G_{cr2}	37456 J/m²	3929 J/m²	10,49 %
		Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung			
		$w_r(f_{ct})$ [1)]	0,306 mm	0,107 mm	34,77 %
		$G_{cr2,\ optische\ Messung}$	36800 J/m²	3861 J/m²	10,49 %
		η_m	0,89	0,019	2,12 %
		$f_{ct,1D}$	25,96 MPa	1,25 MPa	4,81 %

[1)] Die hier angegebene Rissbreite $w_r(f_{ct})$ basiert auf der optischen Messung.

6 Bemessungswerte von UHFFB

6.1 Teilsicherheitsbeiwerte

In Tabelle 6.1-1 sind die Teilsicherheitsbeiwerte für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) von faserbewehrten UHPC (= UHFFB), Betonstahl und Spannstahl vom Entwurf der fib (2010) - TG 8.6 zusammengefasst. Für die Definition eines "normal and high quality controlled production process" wird auf den Entwurf der fib(2010) - TG 8.6 verwiesen.

Tabelle 6.1-1: Teilsicherheitsbeiwerte für UHPC (=UHFFB) sowie Betonstahl und Spannstahl nach dem Entwurf der fib-TG 8.6 (2010)

	persistent and transient design situations		accidental loading
Material	normal controlled production process	high quality controlled production process	normal and high quality controlled production process
UHPC in compression	$\gamma_{cf} = 1,5$	$\gamma_{cf} = 1,3$	$\gamma_{cf} = 1,05$
UHPC in tension	The contribution of the fibres to the post-peak tensile capacity of UHPC in tension cannot be taken into account	$\gamma_{cf} = 1,3$	$\gamma_{cf} = 1,05$
reinforcing steel	$\gamma_S = 1,15$		$\gamma_S = 1,0$
prestressing steel	$\gamma_S = 1,15$		$\gamma_S = 1,0$

In Anlehnung an den Entwurf der fib-TG 8.6 (2010) und Frettlöhr (2011) werden im Folgenden die Bemessungswerte für einaxiale Druck- und Zugbeanspruchung definiert.

6.2 Definition der Bemessungswerte von UHFFB

6.2.1 Definition der Bemessungswerte für einaxiale Druckbeanspruchung

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) ist nur der ansteigende Ast der Materialkurve relevant, der als linear-elastisch angesetzt werden kann. Als Druckfestigkeit wird hierbei die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} als 5 % - Fraktilwert definiert. Nach den im Rahmen dieses Forschungsprojekts durchgeführten Druckversuchen (vgl. Abschnitt 5.3.3.1) ergibt sich für Ductal® die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} zu 183,8 MPa (vgl. Tabelle 6.2-1).

Tabelle 6.2-1: Berechnung des 5 % - Fraktilwerts der Druckfestigkeit f_{ck} (t-Verteilung nach Student)

Mittelwert	f_{cm}	-211,3 MPa
Standardabweichung	s	12,05 MPa
Irrtumswahrscheinlichkeit	α	0,1
Statistische Sicherheit	$\gamma = 1 - \alpha$	0,9
Stichprobenumfang	n	17
k‘-Wert [Wesche (1977)]	Tabelle C6, S. 120	2,2783
5 % - Fraktilwert	$f_{ck} = f_{cm} + k' \cdot s$	-183,8 MPa

Für Verformungsberechnungen ist der mittlere E-Modul E_{cm} als Sekantenmodul anzusetzen, wobei sich bei UHFFB Tangenten- und Sekantenmodul kaum unterscheiden. Die im Rahmen dieses Forschungsprojekts durchgeführten Versuche (vgl. Abschnitt 5.3.3.2) ergaben einen mittleren E-Modul E_{cm} von 59364 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 1,14 %. Nach Zilch und Zehetmaier (2010) können Kriecheinflüsse in Abhängigkeit von der zu erwartenden Lastgeschichte durch den Ansatz des effektiven E-Moduls $E_{c,eff}$ wie folgt berücksichtigt werden:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(t, t_0)} \qquad (6\text{-}1)$$

mit E_{cm} [MPa] mittlerer E-Modul (Sekantenmodul)
$\varphi(t,t_0)$ [-] Kriechzahl mit Bezug auf E_{cm} definiert

Der Bemessungswert der einaxialen Druckfestigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) ist wie folgt definiert:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_{cf}} \qquad (6\text{-}2)$$

mit f_{ck} [MPa] charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons (5 % - Fraktilwert)
γ_{cf} [-] Teilsicherheitsbeiwert nach Tabelle 6.1-1
α_{cc} [-] Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Langzeitwirkungen auf die Druckfestigkeit des Betons

Bei normal- und hochfestem Beton ergibt sich der Abminderungsfaktor α_{cc} aus dem Produkt von 0,95 für den Unterschied zwischen der Zylinder- und Prismendruckfestigkeit und 0,90 für die Dauerstandsfestigkeit zu α_{cc} = 0,85. Für die im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms „Nachhaltiges Bauen mit ultra-hochfestem Beton (UHPC)“ (SPP1182) verwendete Feinkorn UHPC Mischung M2Q geben Müller und Burkart (2009) als grobe Näherung eine Dauerstandsfestigkeit von 80 % der Kurzzeitfestigkeit an, die damit deutlich unter dem Wert von hochfestem Beton liegt. Bedingt durch das geringere Kriechmaß bei UHFFB würde man eher eine geringere Abminderung gegenüber der Kurzzeitfestigkeit erwarten. Da für den im Forschungsprojekt verwendeten UHFFB Ductal® zurzeit keine Angaben vorliegen, wird in Analogie zum hochfesten Beton zunächst ein Faktor von 0,90 für die Dauerstandsfestigkeit vorgeschlagen. Für eine Kurzzeitbeanspruchung ist α_{cc} = 0,95 anzusetzen.

Nach DIN 1045-1 (2008) wird bei hochfestem Beton der Teilsicherheitsbeiwert γ_c um den festigkeitsabhängigen Faktor γ’ zur Berücksichtigung der größeren Streuungen der Materialeigenschaften erhöht. Das Sicherheitsniveau für hochfesten Beton wurde von Tue et al. (2005) im Rahmen eine Qualitätskontrolle überprüft. Danach nimmt der Variationskoeffizient der Druckfestigkeit mit zunehmender Druckfestigkeit ab, weshalb von Tue et al. (2005) ein Verzicht des zusätzlichen Sicherheitsbeiwerts γ' für hochfesten Beton vorschlagen wird. Im aktuellen Entwurf der fib-TG 8.6 (2010) wird ebenfalls auf den zusätzlichen Sicherheitsbeiwert γ' verzichtet. Die im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Druckversuche an Ductal® wiesen einen geringen Variationskoeffizienten von v = 5,7 % bei einer mittleren Druckfestigkeit von f_{cm} = 211,3 MPa und einer charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit von f_{ck} = 183,8 MPa auf. Daher wird hier ebenfalls auf den zusätzlichen Sicherheitsbeiwert γ' verzichtet. Auch die AFGC/Setra (2002) Empfehlung für UHPC berücksichtigt diesen Faktor nicht.

Der Bemessungswert des E-Moduls zur Beschreibung des aufsteigenden Astes der Materialkurve unter Druckbeanspruchung im ULS, der vereinfacht als linear-elastisch angesetzt wird, kann wie folgt definiert werden:

$$E_{cd} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi_{ULS}} \qquad (6\text{-}3)$$

mit E_{cm} [MPa] mittlerer E-Modul (Sekantenmodul)
φ_{ULS} [-] Kriechzahl zur Berücksichtigung der Belastungsdauer

Basierend auf Kriechkurven nach Loukili (1996) für Ductal® unter Druckbeanspruchung mit und ohne Wärmebehandlung schlägt Frettlöhr (2011) eine Kriechzahl φ_{ULS} von ca. 0,16 ohne Wärmebehandlung und von ca. 0,08 mit Wärmebehandlung vor.

Für Ductal® mit Wärmebehandlung können die folgenden Punkte zur Definition der Materialkurve im ULS für Druckbeanspruchung angegeben werden:

- Bemessungswert der Druckfestigkeit f_{cd} und $\varepsilon_{c2} = f_{cd} / E_{cd}$;
- senkrechter Abfall von f_{cd} auf $1/3 \cdot f_{cd}$ bei ε_{c2};
- Abfall von $1/3 \cdot f_{cd}$ auf $1/5 \cdot f_{cd}$ bis zur Bruchdehnung von $\varepsilon_{c2u} = 3 \cdot \varepsilon_{c2}$.

In Bild 6.2-1 ist die zuvor definierte Bemessungskurve für den Grenzzustand der Tragfähigkeit für einen Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{cf} = 1,3$ (vgl. Tabelle 6.1-1) und mit einer Kriechzahl von $\varphi_{ULS} = 0,08$ zur Berücksichtigung der Belastungsdauer abgebildet. Der abgebildete abfallende Ast stellt hierbei lediglich eine erste grobe Näherung da.

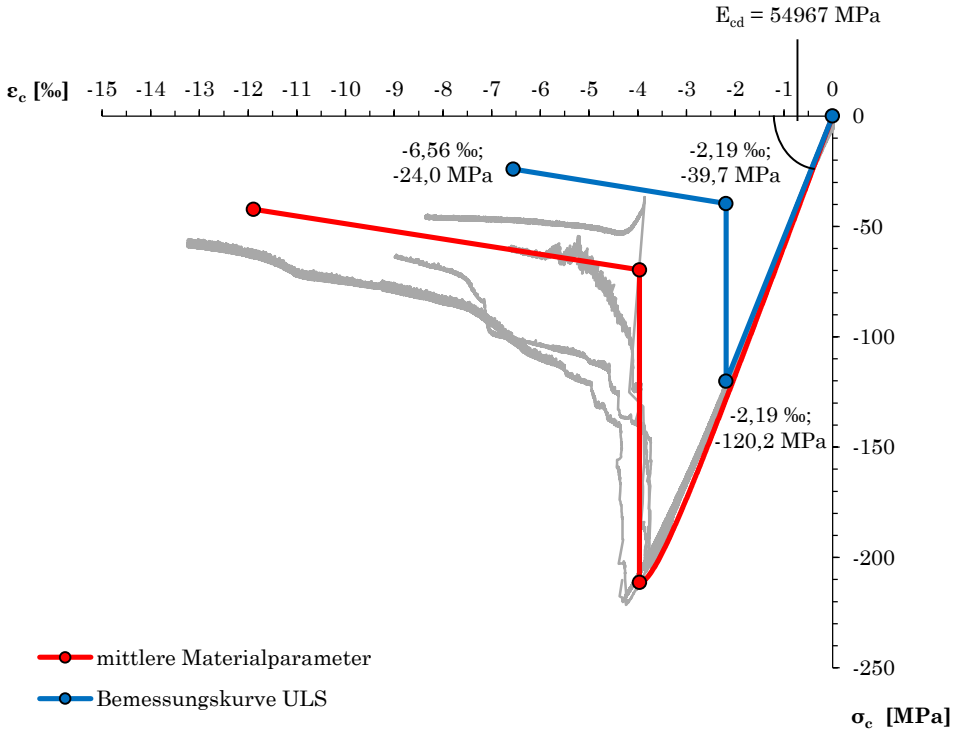


Bild 6.2-1: Bemessungskurve für Druckbeanspruchung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) von Ductal® mit 2,0 Vol.-% Stahlfasern vom Typ Redaelli (l_f / d_f = 14/0,185)

6.2.2 Definition der Bemessungswerte für einaxiale Zugbeanspruchung

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) sind für den Nachweis von Verformungen, Rissbreiten und Mindestbewehrung (falls erforderlich) die Mittelwerte der eindimensionalen zentrischen Zugfestigkeit $f_{ctm,1D}$ und der Elastizitätsgrenze $f_{ctm,el}$ anzusetzen.

Der Bemessungswert der Zugspannung an der Elastizitätsgrenze im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) ist wie folgt definiert:

$$f_{ctd,el} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_{cf}} \qquad (6\text{-}4)$$

mit	$f_{ctk,el}$ [MPa]	charakteristische Zugspannung bei Erreichen der Elastizitätsgrenze (5 % - Fraktilwert)
	γ_{cf} [-]	Teilsicherheitsbeiwert nach Tabelle 6.1-1
	α_{ct} [-]	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Langzeitwirkungen auf die Zugfestigkeit des Betons

Der Bemessungswert der eindimensionalen zentrischen Zugfestigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) ergibt sich zu:

$$f_{ctd,1D} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk,1D}}{\gamma_{cf}} \qquad (6\text{-}5)$$

mit	$f_{ctk,1D}$ [MPa]	eindimensionale zentrischen Zugfestigkeit des Betons (5 % - Fraktilwert)
	γ_{cf} [-]	Teilsicherheitsbeiwert nach Tabelle 6.1-1
	α_{ct} [-]	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Langzeitwirkungen auf die Betonfestigkeit

Den Autoren sind keine Untersuchungen zur Langzeitwirkung unter Zugbeanspruchung von UHFFB bekannt. Rinder (2003) berichtet in seiner Dissertation über das Verhalten von unbewehrtem hochfestem Beton unter Dauerzuglast basierend auf eigenen Versuchen von einer Dauerstandzugfestigkeit von 85 % der Kurzzeitzugfestigkeit. Demgegenüber geben Han und Walraven (1993) 75 % an. Der Entwurf der fib-TG 8.6 (2010) schätzt bedingt durch die Faserbewehrung eine Dauerstandzugfestigkeit von 90 % der Kurzzeitfestigkeit für UHFFB ab. Damit ergibt sich der Abminderungsfaktor zu α_{ct} = 0,9, der durch Versuche in zukünftigen Forschungsvorhaben validiert werden muss.

Als Materialkurve für das einaxiale Zugtragverhalten von UHFFB schlägt Frettlöhr (2011) nach Überschreitung der Elastizitätsgrenze $f_{ct,el}$ eine Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung in Abhängigkeit von der Faserorientierung vor. Für die Definition der Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung wird auf die Gl. (6-6) bis (6-8) sowie auf die Abschnitte 6.3.3 und 6.3.4 in Frettlöhr (2011) verwiesen. Hierbei sind für die Anwendung bei einer Bauteilbemessung die eindimensionale Zugfestigkeit $f_{ct,1D}$ und die Zugspannung an der Elastizitätsgrenze $f_{ct,el}$ durch die zuvor definierten Bemessungswerte für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) bzw. für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) zu ersetzen. Zur

Veranschaulichung ist die Materialkurve zur Beschreibung des Zugtragverhaltens von UHFFB für unterschiedliche Faserorientierungsfaktoren η in Bild 6.2-2 abgebildet.

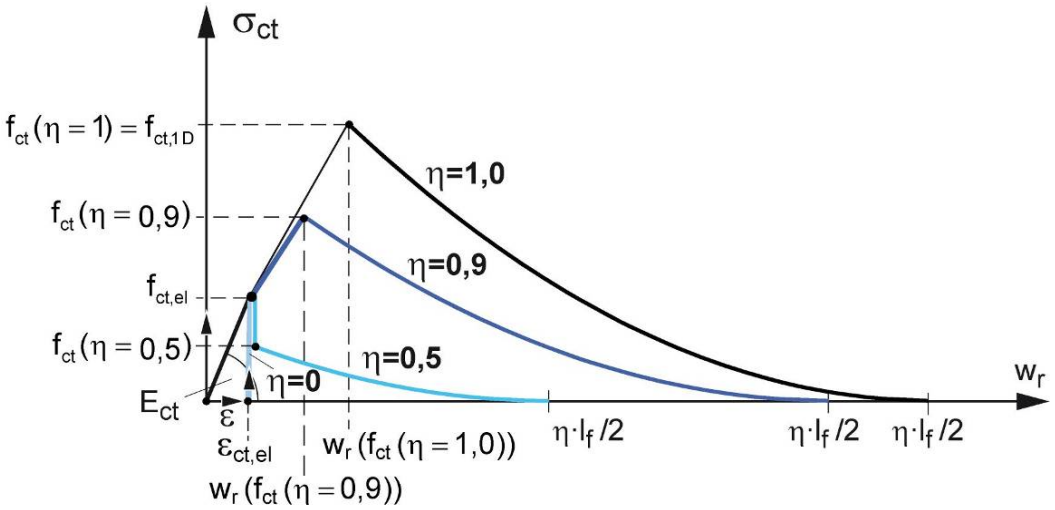


Bild 6.2-2: Verlauf der Materialkurve zur Beschreibung des Zugtragverhaltens von UHFFB für unterschiedliche Faserorientierungsfaktoren η (unmaßstäbliche Darstellung des ansteigenden Astes) [Frettlöhr (2011)]

Aus den im Rahmen dieses Forschungsprojekts durchgeführten zentrischen Zugversuchen an Versuchskörpern mit Kerbe ergeben sich folgende mittlere und charakteristische (5 % - Fraktilwert) 1D Zugfestigkeit für Ductal®:

- $f_{ctm,1D}$ = 25,96 MPa mit v = 4,81 % (vgl. Abschnitt 5.5.4.3);
- $f_{ctk,1D}$ = 22,74 MPa (vgl. Tabelle 6.2-2).

Die mittlere und charakteristische Zugspannung an der Elastizitätsgrenze sowie der Elastizitätsmodul folgt aus den zentrischen Zugversuchen an Versuchskörpern ohne Kerbe für Ductal® zu:

- $f_{ctm,el}$ = 10,06 MPa mit v = 9,23 % (vgl. Abschnitt 5.5.3.1);
- $f_{ctk,el}$ = 7,67 MPa (vgl. Tabelle 6.2-3);
- E_{ct} = 45.509 MPa (vgl. Abschnitt 5.5.3.1).

Tabelle 6.2-2: Berechnung des 5 % - Fraktilwerts der 1D Zugfestigkeit $f_{ctk,1D}$ (t-Verteilung nach Student)

Mittelwert	$f_{ctm,1D}$	25,96 MPa
Standardabweichung	s	1,25 MPa
Irrtumswahrscheinlichkeit	α	0,1
Statistische Sicherheit	$\gamma = 1 - \alpha$	0,9
Stichprobenumfang	n	9
k‘-Wert [Wesche (1977)]	Tabelle C6, S. 120	2,574
5 % - Fraktilwert	$f_{ctk,1D} = f_{ctm,1D} - k' \cdot s$	22,74 MPa

Tabelle 6.2-3: Berechnung des 5 % - Fraktilwerts der Zugspannung an der Elastizitätsgrenze $f_{ctk,el}$ (t-Verteilung nach Student)

Mittelwert	$f_{ctm,el}$	10,06 MPa
Standardabweichung	s	0,93 MPa
Irrtumswahrscheinlichkeit	α	0,1
Statistische Sicherheit	$\gamma = 1 - \alpha$	0,9
Stichprobenumfang	n	9
k‘-Wert [Wesche (1977)]	Tabelle C6, S. 120	2,574
5 % - Fraktilwert	$f_{ctk,el} = f_{ctm,el} - k' \cdot s$	7,67 MPa

6.3 Ermüdungsverhalten von UHFFB unter Druckschwellbeanspruchung

6.3.1 Allgemeines

Bisher sind kaum Arbeiten zum Ermüdungsverhalten von UHFFB unter Druckschwellbeanspruchungen veröffentlicht worden. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Wöhlerlinien für normalfesten und hochfesten Beton nach CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010) sowie ein Vorschlag für die Definition von Wöhlerlinien nach Wefer (2010) für UHFFB vorgestellt. Im Anschluss werden die für den Ermüdungsnachweis im Rahmen des Forschungsprojektes erforderlichen Parameter definiert.

6.3.2 Wöhlerlinien in Anlehnung an CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010)

Der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit unter wiederholter Belastung $f_{cd,fat}$ (Ermüdungsfestigkeit) ist gemäß CEB-FIP MC 90 (1993) wie folgt definiert:

$$f_{cd,\,fat} = \beta_{cc}(t_0) \cdot 0{,}85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \qquad (6\text{-}6)$$

mit $\beta_{cc}(t_0)$ [-] Koeffizient zur Berücksichtigung des Festigkeitsanstiegs infolge fortschreitender Hydratation
f_{ck} [MPa] charakteristische Druckfestigkeit des Betons
γ_c Teilsicherheitsbeiwert für Beton

Im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen weist Beton im Allgemeinen eine deutliche Abhängigkeit der ertragbaren Lastspielzahl N (Bruchlastspielzahl) von der Mittelspannung auf. Die Wöhlerlinie für normalfesten Beton wird daher im CEB-FIP MC 90 (1993) in Abhängigkeit von der bezogenen Unterspannung $S_{cd,min}$ und der bezogenen Oberspannung $S_{cd,max}$ mit Hilfe der Gl. (6-7) bis (6-9) für den Bereich $0 \leq S_{cd,min} \leq 0{,}8$ definiert. Für $S_{cd,min} > 0{,}8$ gelten die Beziehungen für $S_{cd,min} = 0{,}8$. Im aktuellen Entwurf zum CEB-FIP MC 2010 (2010) ist der Geltungsbereich dieser Wöhlerlinien und der zugehörigen Gleichungen auf hochfesten Beton ausgedehnt worden. Der Verlauf der Wöhlerlinie und damit die ertragbare Lastspielzahl N ergibt sich mit dem Scharparameter $S_{cd,min}$ nach Gl. (6-10) und ist in Bild 6.3-1 dargestellt.

$$\log N_1 = (12 + 16 \cdot S_{cd,\min} + 8 \cdot S_{cd,\min}^2) \cdot (1 - S_{cd,\max}) \qquad (6\text{-}7)$$

$$\log N_2 = 0{,}2 \cdot \log N_1 \cdot (\log N_1 - 1) \qquad (6\text{-}8)$$

$$\log N_3 = \frac{\log N_2 \cdot \left(0{,}3 - \frac{3}{8} \cdot S_{cd,\min}\right)}{\Delta S_{cd}} \qquad (6\text{-}9)$$

mit $S_{cd,min} = \gamma_{sd} \cdot \sigma_{c,min} \cdot \eta_c / f_{cd,fat}$ minimale bezogene Druckspannung des Betons unter den zu untersuchenden Einwirkungskombinationen

$S_{cd,max} = \gamma_{sd} \cdot \sigma_{c,max} \cdot \eta_c / f_{cd,fat}$ maximale bezogene Druckspannung des Betons unter den zu untersuchenden Einwirkungskombinationen

$\Delta S_{cd} = S_{cd,max} - S_{cd,min}$ Schwingweite

$\eta_c = 1 / (1{,}5 - 0{,}5 \cdot |\sigma_{c1}| / |\sigma_{c2}|)$ Faktor zur Berücksichtigung ungleichmäßiger Verteilung der Druckspannung des Betons

$\gamma_{sd} = 1{,}0$ oder $1{,}1$ Teilsicherheitsbeiwert für Ermüdungslasten in Abhängigkeit von der Genauigkeit der Lastermittlung

$|\sigma_{c1}|$ minimaler Betrag der Betondruckspannung in der Biegedruckzone in einem Bereich von maximal 300 mm vom äußeren Querschnittsrand

$|\sigma_{c2}|$ maximaler Betrag der Betondruckspannung in der Biegedruckzone in einem Bereich von maximal 300 mm vom äußeren Querschnittsrand

$$\log N = \begin{cases} \log N_1 & \textit{für} \log N_1 \le 6 \\ \log N_2 & \textit{für} \log N_1 > 6 \wedge \Delta S_{cd} \ge 0{,}3 - \frac{3}{8} \cdot S_{cd,\min} \\ \log N_3 & \textit{für} \log N_1 > 6 \wedge \Delta S_{cd} < 0{,}3 - \frac{3}{8} \cdot S_{cd,\min} \end{cases} \qquad (6\text{-}10)$$

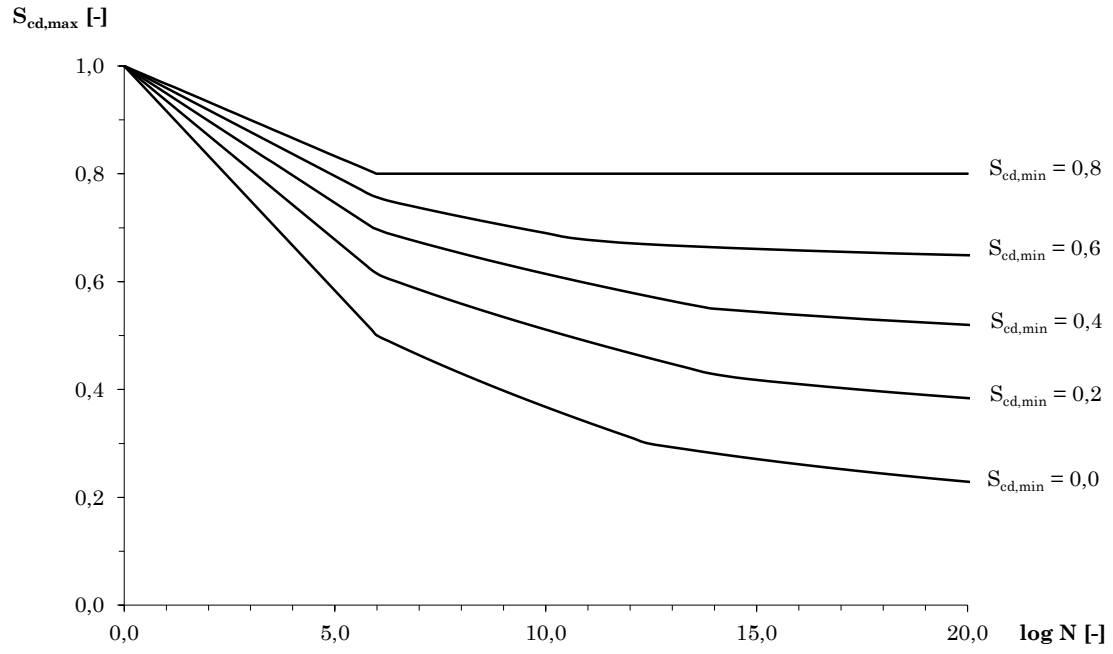


Bild 6.3-1: Wöhlerlinien für normalfesten und hochfesten Beton nach CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010)

6.3.3 Wöhlerlinie für UHFFB nach Wefer (2010)

Basierend auf Einstufen-Wöhlerversuchen für den Bereich bis N = 10^7 Lastwechsel formuliert Wefer (2010) Wöhlerlinien für UHFFB mit einer charakteristischen Druckfestigkeit von $f_{ck} \leq 180$ MPa. Aufgrund der sehr langen Versuchsdauer konnten keine Versuche für den Bereich > 10^7 Lastwechsel durchgeführt werden. Für diesen Bereich wird das Materialverhalten daher auf Grundlage von Verformungsmessungen der durchgeführten Versuche abgeschätzt.

Abweichend vom CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010) wird der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit unter wiederholter Belastung $f_{cd,fat}$ (Ermüdungsfestigkeit) für UHFFB wie folgt definiert:

$$f_{cd,\,fat} = \beta_{cc}(t_0) \cdot 0{,}85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c \cdot \gamma'_c} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{400}\right) \qquad (6\text{-}11)$$

mit $\beta_{cc}(t_0)$ [-] Koeffizient zur Berücksichtigung des Festigkeitsabstiegs infolge fortschreitender Hydratation
f_{ck} [MPa] charakteristische Druckfestigkeit
γ_c [-] Teilsicherheitsbeiwert für UHFFB
γ'_c [-] zusätzlicher Abminderungsfaktor für UHFFB
$1/\gamma'_c = 1{,}05 - f_{ck} / 1000$

Für charakteristische Druckfestigkeiten f_{ck} > 180 MPa schlägt Wefer (2010) folgende Exponentialfunktion zur Abschätzung vor:

$$f_{cd,\,fat} = \beta_{cc}(t_0) \cdot 0{,}85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \kappa \cdot e^{-\left(\frac{f_{ck}}{f_{co}}\right)^{\delta}} \qquad (6\text{-}12)$$

mit $\kappa = 1{,}0$
$\delta = 1{,}1$
$f_{co} = 250$ MPa

Für die Ermittlung der zulässigen Lastspielzahl N werden die folgenden Gleichungen angegeben, die für eine bezogene Unterspannung $S_{cd,min}$ von 0 bis 0,85 gültig sind.

Für log N ≤ 8 gilt (ab log N = 7 Abschätzung):

$$\log N = \frac{8 \cdot \left(S_{cd,\max} - 1\right)}{\left(\frac{0{,}45 + 1{,}8 \cdot S_{cd,\min}}{1 + 1{,}8 \cdot S_{cd,\min} - 0{,}3 \cdot S_{cd,\min}^2} - 1\right)} \qquad (6\text{-}13)$$

Für log N > 8 gilt (Abschätzung):

$$\log N = 8 + \frac{8 \cdot \ln(10)}{\left(\frac{0{,}45 + 1{,}8 \cdot S_{cd,\min}}{1 + 1{,}8 \cdot S_{cd,\min} - 0{,}3 \cdot S_{cd,\min}^2} - 1 \right)} \cdot \left(\frac{0{,}45 + 1{,}8 \cdot S_{cd,\min}}{1 + 1{,}8 \cdot S_{cd,\min} - 0{,}3 \cdot S_{cd,\min}^2} \right) \cdot \log\left(S_{cd,\max} \cdot \frac{1 + 1{,}8 \cdot S_{cd,\min} - 0{,}3 \cdot S_{cd,\min}^2}{0{,}45 + 1{,}8 \cdot S_{cd,\min}} \right) \quad (6\text{-}14)$$

mit $S_{cd,min} = \gamma_{sd} \cdot \sigma_{c,min} \cdot \eta_c / f_{cd,fat}$ minimale bezogene Druckspannung des Betons unter den zu untersuchenden Einwirkungskombinationen

$S_{cd,max} = \gamma_{sd} \cdot \sigma_{c,max} \cdot \eta_c / f_{cd,fat}$ maximale bezogene Druckspannung des Betons unter den zu untersuchenden Einwirkungskombinationen

$\Delta S_{cd} = S_{cd,max} - S_{cd,min}$ Schwingweite

$\eta_c = 1 / (1{,}5 - 0{,}5 \cdot |\sigma_{c1}| / |\sigma_{c2}|)$ Faktor zur Berücksichtigung ungleichmäßiger Verteilung der Druckspannung des Betons

$\gamma_{sd} = 1{,}0$ oder $1{,}1$ Teilsicherheitsbeiwert für Ermüdungslasten in Abhängigkeit von der Genauigkeit der Lastermittlung

$|\sigma_{c1}|$ minimaler Betrag der Betondruckspannung in der Biegedruckzone in einem Bereich von maximal 300 mm vom äußeren Querschnittsrand

$|\sigma_{c2}|$ maximaler Betrag der Betondruckspannung in der Biegedruckzone in einem Bereich von maximal 300 mm vom äußeren Querschnittsrand

Im Bild 6.3-2 sind die Wöhlerlinien nach Gl. (6-13) und (6-14) für unterschiedliche bezogene Unterspannungen $S_{cd,min}$ abgebildet. Zum Vergleich sind auch die Wöhlerlinien für normalfesten und hochfesten Beton nach CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010) dargestellt.

Im durch Versuche abgesicherten Bereich Log N ≤ 7 verlaufen die Wöhlerlinien nach Wefer (2010) bei identischen Unterspannungen $S_{cd,min}$ oberhalb der Wöhlerlinien für normal- und hochfesten Beton nach dem Model Code. Damit können bei gleicher bezogener Oberspannung $S_{cd,max}$ mit UHFFB höhere zulässige Lastspielzahlen N erreicht werden. Für Log N ≥ 7 verhält es sich genau entgegengesetzt. In Abhängigkeit von $S_{cd,min}$ verlaufen die Wöhlerlinien für UHFFB ab einer Lastspielzahl von N = 8,5 bis 12 unterhalb der Wöhlerlinie für normal- und hochfesten Beton, womit die zulässigen Lastspielzahlen N für UHFFB in diesem Bereich bei gleichem $S_{cd,max}$ deutlich geringer ausfallen. Allerdings ist der Verlauf der Wöhlerlinien im Bereich Log N ≥ 7 für UHFFB bisher nicht durch Versuche abgesichert.

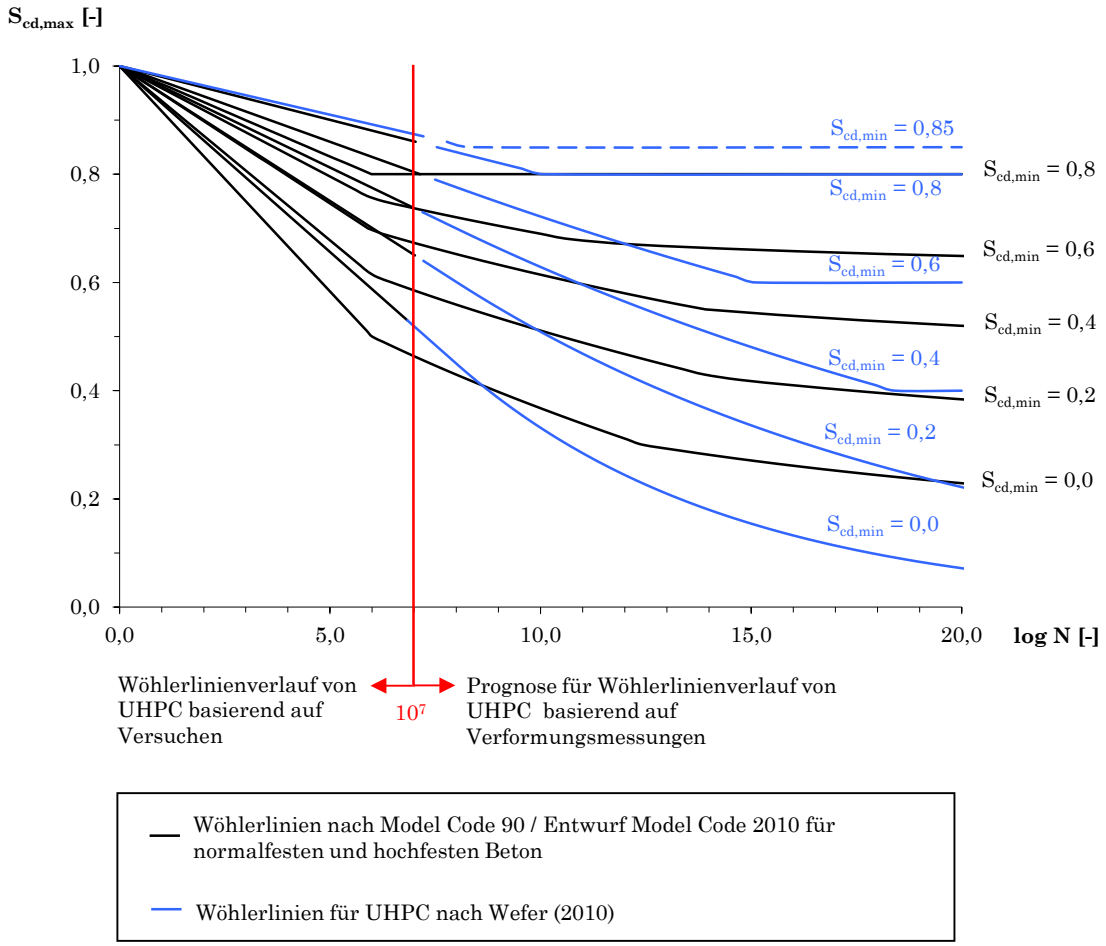


Bild 6.3-2: Wöhlerlinien für UHFFB nach Wefer (2010) und für normalfesten und hochfesten Beton nach CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010)

6.3.4 Materialparameter für Ermüdungsnachweis von UHFFB

Im Folgenden werden basierend auf den beiden vorherigen Abschnitten die Materialparameter für den Ermüdungsnachweis des UHFFB Turms festgelegt.

Die Ermüdungsfestigkeit auf Druck $f_{cd,fat}$ wird nach Wefer (2010) (vgl. Gl. (6-11)) definiert. Für die Herstellung der Turmsegmente ist eine Wärmebehandlung vorgesehen. Ein weiterer Festigkeitsanstieg stellt sich mit Abschluss der Wärmebehandlung der Turmsegmente aus UHFFB nicht ein. Daher wird der Koeffizient β_{cc} konstant zu 1,0 angenommen. Das Sicherheitsniveau für hochfesten Beton wurde von Tue et al. (2005) im Rahmen eine Qualitätskontrolle überprüft. Danach nimmt der Variationskoeffizient der Druckfestigkeit mit zunehmender Druckfestigkeit ab, weshalb Tue et al. (2005) einen Verzicht des zusätzlichen Sicherheitsbeiwerts γ' für hochfesten Beton vorschlagen. Im aktuellen Entwurf der fib-TG 8.6 (2010) wird ebenfalls auf den zusätzlichen Sicherheitsbeiwert γ' verzichtet. Die im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Druckversuche an Ductal® weisen einen geringen Variationskoeffizienten von 5,70 % auf bei einer charakteristischen Druckfestigkeit von f_{ck} = 183,8 MPa (vgl. Abschnitt 5.3.3.1). Daher wird im Folgenden ebenfalls auf den zusätzlichen Sicherheitsbeiwert γ' verzichtet. Die Ermüdungsfestigkeit ergibt sich damit zu:

$$f_{cd,\,fat} = 0{,}85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{400}\right) \quad \textit{für } f_{ck} \leq 180\ \textit{MPa} \qquad (6\text{-}15)$$

mit f_{ck} [MPa] charakteristische Druckfestigkeit
$\gamma_c = 1{,}3$ Teilsicherheitsbeiwert für UHFFB nach dem Entwurf der fib-TG8.6 (2010) für einen „high quality controlled“ Herstellungsprozess

Für den im Forschungsprojekt verwendeten UHFFB Ductal® mit einer geringfügig höheren charakteristischen Druckfestigkeit als der Geltungsbereich folgt aus Gl. (6-15) eine Ermüdungsfestigkeit $f_{cd,fat}$ von 65 MPa.

Die Wöhlerlinien nach Wefer (2010) für UHFFB sind lediglich für eine Lastspielzahl von 10^7 durch Versuche abgesichert. Da OWEA mehr als10^9 bis $2 \cdot 10^9$ Lastspielzahlen unterliegen, werden für die Ermüdungsnachweise sowohl die Wöhlerlinien für UHFFB nach Wefer (2010) als auch nach dem Model Code zunächst vergleichend betrachtet. Bei der Definition der bezogenen Unter- und Oberspannungen $S_{cd,min}$ und $S_{cd,max}$ wird der Abminderungsbeiwert vereinfachend zu η_c = 1,0 angesetzt. Als Teilsicherheitsbeiwert der Ermüdungslasten ist nach dem Germanischer Lloyd (2005) γ_{sd} = 1,0 anzusetzen.

6.4 Zeitabhängige Verformungen von UHFFB

6.4.1 Schwinden

UHFFB verfügt über ein ausgeprägtes autogenes Schwindverhalten, auf dessen Höhe u.a. der verwendete Zementtyp einen erheblichen Einfluss hat. Das Trocknungsschwinden fällt gegenüber normal- und hochfesten Beton deutlich geringer aus [vgl. Schmidt et al. (2008)]. Für den im Rahmen dieses Forschungsprojekts verwendeten UHFFB Ductal® gibt Lafarge ein Endschwindmaß von 500 ηm/m an. Durch eine Wärmebehandlung können nach Angabe von Lafarge die gesamten Schwindverformungen bei Ductal® vorweg genommen werden, so dass nach Abschluss der Wärmebehandlung mit keinem weiteren Schwinden zu rechnen ist.

6.4.2 Kriechen

Lafarge gibt für den verwendeten UHFFB Ductal® die folgenden Endkriechzahlen $\varphi(\infty,t_0)$ an:

- ohne Wärmebehandlung: 0,8
- mit Wärmebehandlung: 0,15 bis 0,3

7 Maritime Bedingungen und Windverhältnisse

7.1 Ergänzende Annahmen zur Design Basis

Die Angaben der Abschnitte 2.4 und 2.5 werden nachfolgend um weitere Annahmen für eine möglichst realitätsnahe gesamtdynamische Berechnung der OWEA ergänzt.

Hierzu wurde eine Auswertung von in der AWZ der Nordsee gemessenen meteorologischen und hydrologischen Daten vorgenommen.

7.2 Standorte und Ausstattung der Messstationen

Messungen der meteorologischen und hydrologischen Daten in der AWZ der Nordsee sind für zwei Standorte öffentlich zugänglich. Dabei handelt es sich zum einen um die Nordseeboje II (NSB II) am Standort 55° 00' N - 06° 20' E, welche vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) betrieben wird, und zum anderen um die Forschungsplattform FINO1 am Standort 54° 01' N - 06° 35' E, welche vom Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) betrieben wird. Die Standorte der beiden Messstationen sind in Bild 7.2-1 dargestellt.

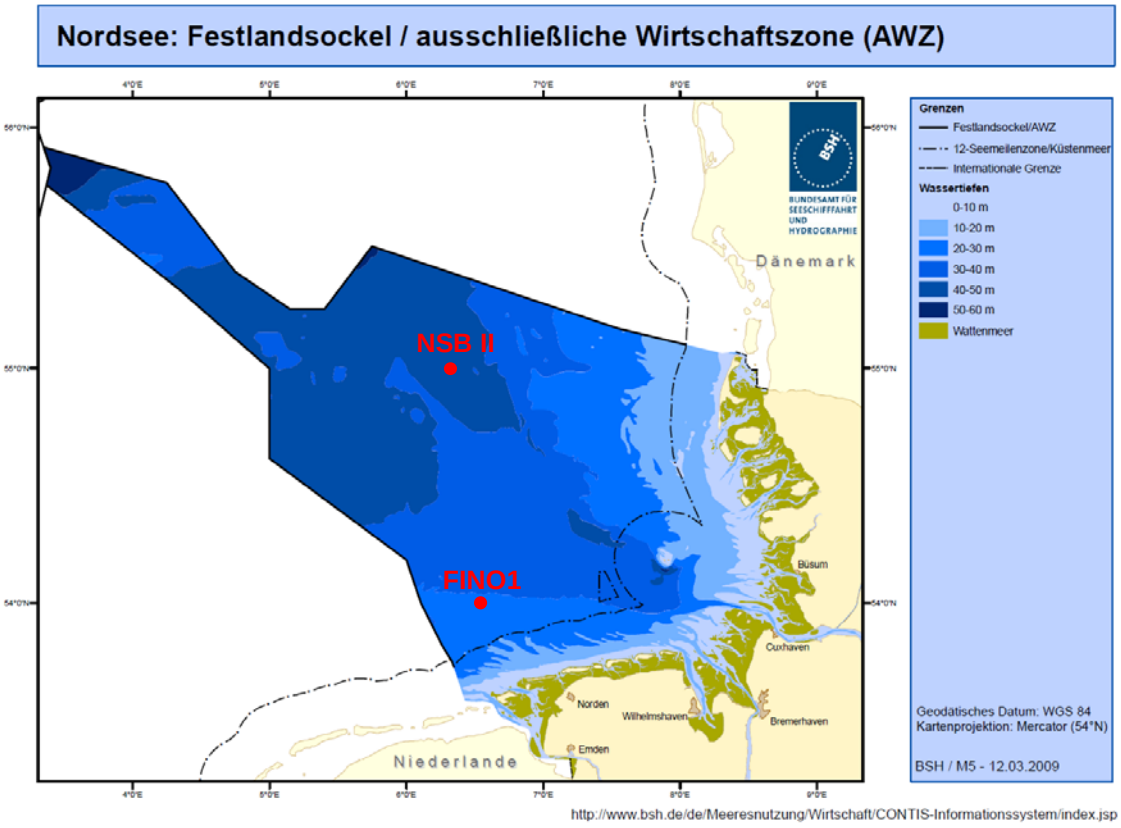


Bild 7.2-1: Standorte der Messstationen NSB II und FINO1 [www.bsh.de, ergänzt]

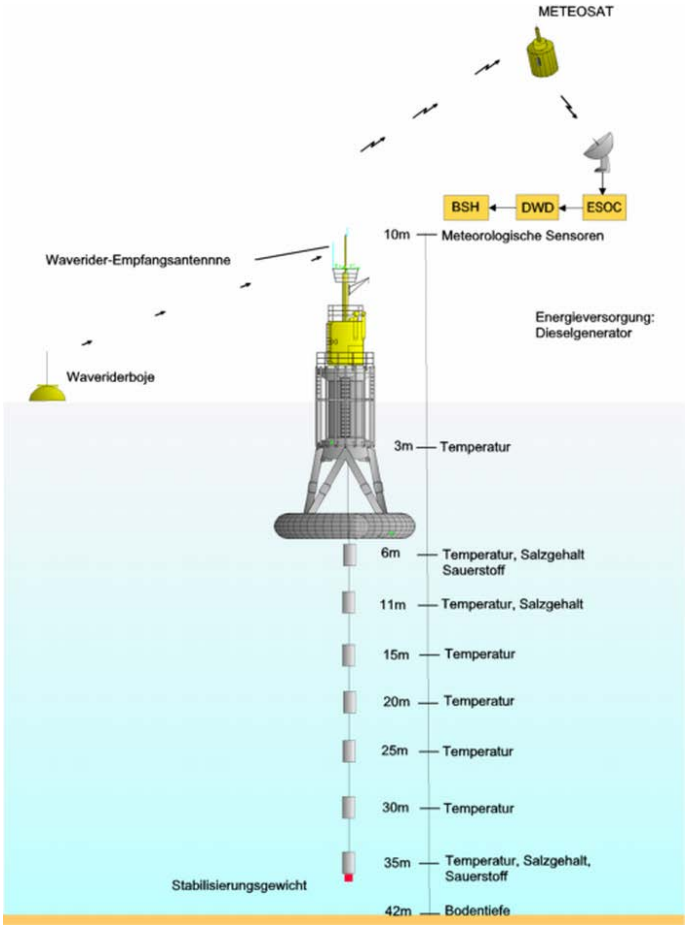


Bild 7.2-2: Detailzeichnung der NSB II [www.bsh.de]

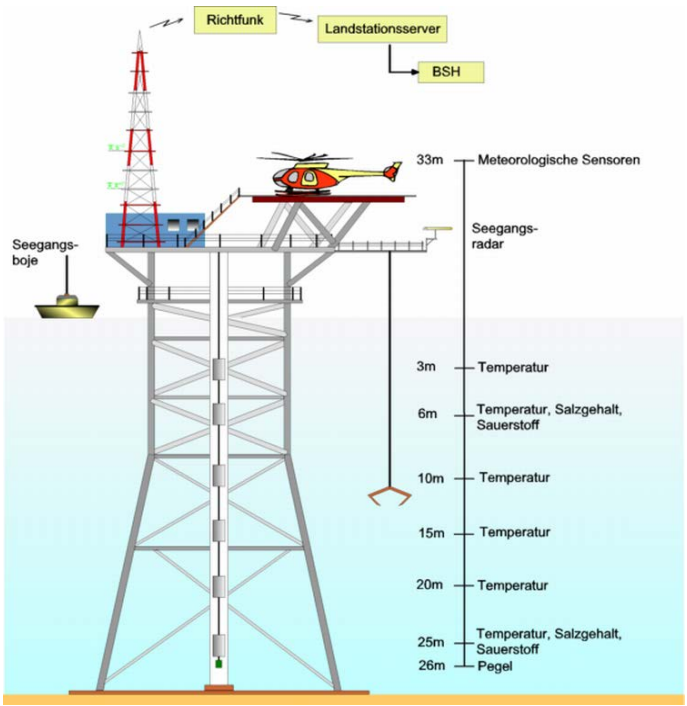


Bild 7.2-3: Detailzeichnung der Forschungsplattform FINO1 [www.bsh.de]

Die Ausstattung der Messstationen mit Sensoren zur Aufzeichnung der Messdaten ist für NSB II in Bild 7.2-2 und für die Forschungsplattform FINO1 in Bild 7.2-3 dargestellt. Die Messdaten für beide Standorte sind beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) erhältlich. In Tabelle 7.2-1 und Tabelle 7.2-2 sind die Messdaten angegeben, die für den jeweiligen Standort für die Auswertung zur Verfügung standen.

Tabelle 7.2-1: Winddaten der NSB II und der Forschungsplattform FINO1

	Datum	V	V-DIR
	[-]	[m/s]	[°]
NSB II	●	●	●
FINO1	●	●	●

Tabelle 7.2-2: Wellendaten der NSB II und der Forschungsplattform FINO1

	Datum	H_s	DUEN	w-DIR	L	T_p	f_p	T_m	T_z	E_{max}
	[-]	[m]	[m]	[°]	[m]	[s]	[Hz]	[s]	[s]	[m^2*s]
NSB II	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
FINO1	●	●	●	●		●	●	●		

7.3 Auswertung der Messdaten

7.3.1 Scatter-Diagramm

Das Ziel der Messdatenauswertungen ist das Langzeitenverhalten des Seegangs mit Wellenverteilungsdiagrammen (Scatter-Diagrammen) zu beschreiben.

In Scatter-Diagrammen sind in vertikaler Richtung die Klassen der signifikante Wellenhöhe H_s und in horizontaler Richtung die Klassen der Peak-Frequenz f_p aufgetragen. Die Werte innerhalb der Diagramms geben die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Wellenereignisses (signifikante Wellenhöhe H_s und Peak-Frequenz f_p) während einer Betriebsdauer von 20 Jahren in Prozent an.

7.3.2 NSB II

Bei der NSB 2 wurden die meteorologischen und hydrologischen Daten getrennt voneinander aufgezeichnet. Dies bedeutet, dass die gemessenen Daten nicht zueinander korrelieren. Um dieses Problem zu beheben, wurde für jede gemessene Windgeschwindigkeit nach einem zeitlich korrelierenden Seegang gesucht.

Bedingt durch die großen Datenmengen, wurde für die Auswertung die Software MATLAB verwendet. In Bild 7.3-1 ist das entsprechende Flussdiagramm für die Auswertung der Messdaten der NSB II dargestellt. Im ersten Arbeitsschritt wurden die Wind- und Wellendaten eingelesen und auf Messfehler hin überprüft. Im zweiten Arbeitsschritt wurden dann die Wind- und Wellendaten miteinander verknüpft und im letzten Arbeitsschritt wurden die verknüpften Daten zu Scatter-Diagrammen aufbereitet.

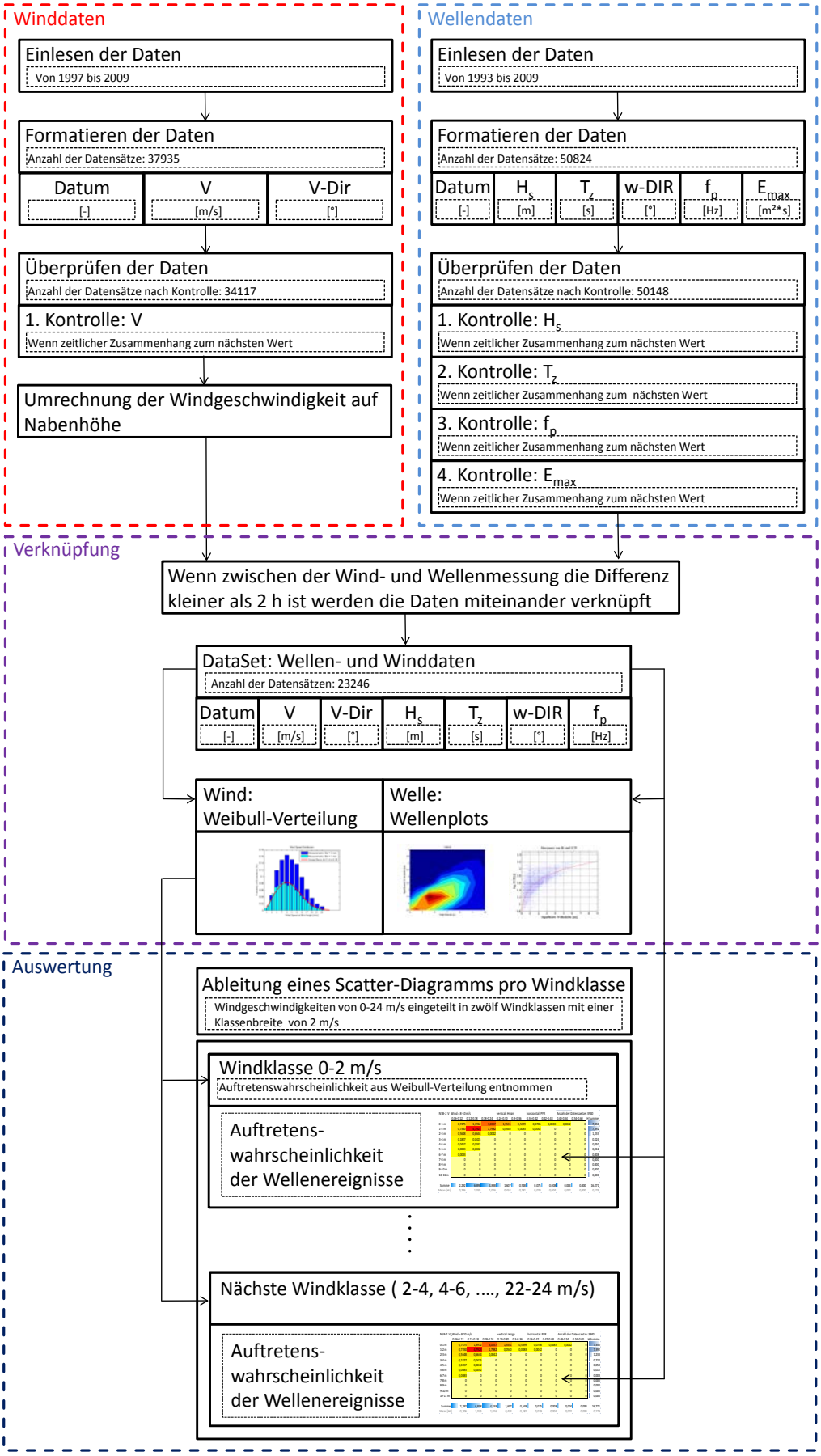


Bild 7.3-1: Flussdiagramm für die Auswertung der Messdaten der NSB II mit der Software MATLAB

Winddaten

Die meteorologischen Daten standen für einen Zeitraum von 1997 bis 2009 zur Verfügung. Es handelt sich dabei um insgesamt 37.935 Einzelmessungen. Dabei wurden die Windgeschwindigkeiten und die Windrichtungen aufgezeichnet.

Um die Winddaten auf Messfehler zu überprüfen, wurde die Windgeschwindigkeit kontrolliert. Dabei wurde als Kriterium für einen Fehler die Zunahme oder Abnahme der Windgeschwindigkeit um die 3-fache Standardabweichung definiert. Die Kontrolle von einer Messung zur nächsten Messung findet statt, wenn die zeitliche Differenz zwischen den Messungen kleiner als zwei Stunden ist. Diese Bedingung wird eingeführt, damit sichergestellt ist, dass es einen Zusammenhang zwischen den beiden Messungen gibt. Dabei wird unterstellt, dass sich die Windgeschwindigkeit innerhalb von zwei Stunden nicht um die 3-fache Standardabweichung ändert.

Üblicherweise wird für die gesamtdynamische Berechnung von Windenergieanlagen aber der 10-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe verwendet. Da es sich bei den an der NSB II gemessenen Windgeschwindigkeiten jedoch um den 1-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit handelt, welcher in einer Höhe von 10 m gemessen wurde (vgl. Bild 7.2-2), müssen diese entsprechend umgerechnet werden. Für die Umrechnung der gemessenen Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 10 m auf die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe wird für das NWP folgende Gleichung verwendet [Germanischer Lloyd (2005)]:

$$V_{hub} = V_{gemessen} \cdot \left(\frac{z_{hub}}{z_{gemessen}} \right)^{\alpha} \qquad (7\text{-}1)$$

mit $V_{gemessen}$ [m/s] gemessene Windgeschwindigkeit
z_{hub} [m] Nabenhöhe
$z_{hub} = 90$ m
$z_{gemessen}$ [m] Höhe der Messung
$z_{gemessen} = 10$ m
α [-] Höhenexponent
$\alpha = 0{,}14$

Mit den in Tabelle 7.3-1 angegeben Faktoren für unterschiedliche Mittelungszeiträume kann der 1-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit auf den 10-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit umgerechnet werden. Es ergibt sich ein Korrekturfaktor von 1/1,1.

Tabelle 7.3-1: Faktoren für unterschiedliche Mittelungszeiträume bezogen auf den 10-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit [Germanischer Lloyd (2005)]

Averaging Time	**1 h**	**10 min**	**1 min**	**5 sec**	**3 sec**
Factor	0.91	1.00	1.10	1.21	1.25

Wellendaten

Die hydrologischen Daten standen für einen Zeitraum von 1993 bis 2009 zur Verfügung. Die 50.824 Einzelmessungen stammen dabei aus einer Kurzzeitstatistik über einen Zeitraum von jeweils 30 Minuten.

Die Wellendaten wurden ebenso wie die Winddaten auf Messfehler überprüft. Dabei wurde das gleiche Prinzip wie bei der Kontrolle der Windgeschwindigkeit angewendet: Es wurden die signifikante Wellenhöhe, die Nulldurchgangsperiode, die Peak-Frequenz und das Energiemaximum kontrolliert.

Als Beispiel für die Kontrolle der Wellendaten ist im Diagramm in Bild 7.3-2 die signifikante Wellenhöhe über die dazugehörige Nulldurchgangsperiode aufgetragen. Die roten Kreise stellen alle Einzelmessungen dar, die zur Verfügung standen. Die roten Kreise mit einem Punkt in der Mitte sind die Einzelmessungen, die die Kontrolle bestanden haben und für die weitere Auswertung verwendet wurden.

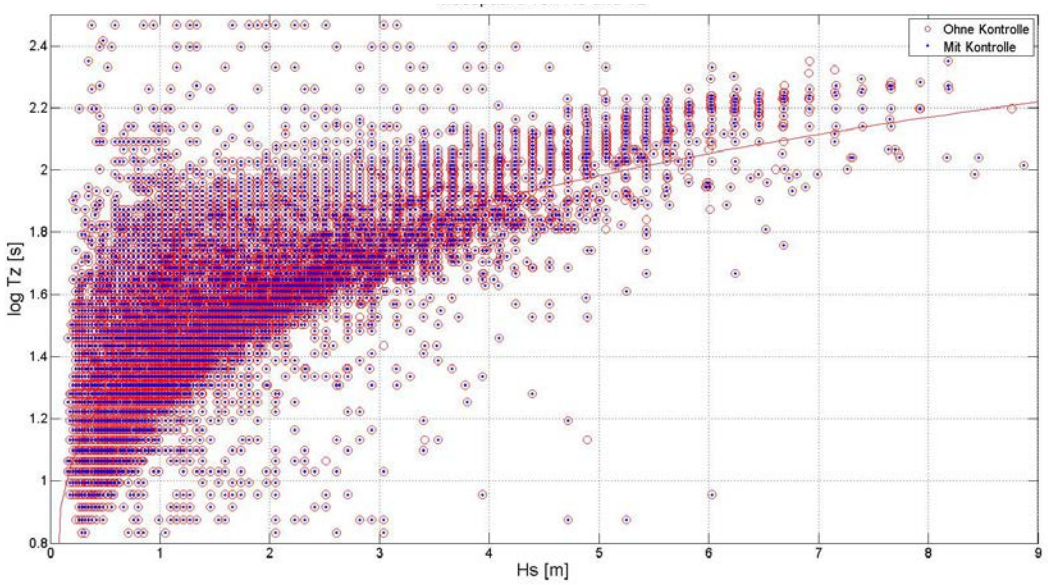


Bild 7.3-2: Kontrolle der Wellendaten am Beispiel der signifikanten Wellenhöhe und der dazugehörigen Nulldurchgangsperiode

Verknüpfung

Um einen Zusammenhang zwischen den Windverhältnissen und den maritimen Bedingungen herzustellen, müssen die gemessenen meteorologischen Daten mit den gemessenen hydrologischen Daten verknüpft werden. Dabei wird unterstellt, dass sich der Seegang in einem Zeitraum von zwei bis drei Stunden stationär verhält [Germanischer Lloyd (2005)]. Dementsprechend wird überprüft, ob es zu einem meteorologischen Datensatz einen hydrologischen Datensatz gibt, bei denen die zeitliche Differenz zwischen den beiden Datensätzen kleiner als zwei Stunden ist. Wenn dies der Fall war, wurden die Winddaten den entsprechenden Wellendaten zugeordnet. Nach der Verknüpfung der Wind- und Wellendaten wurden diese im Rahmen einer Plausibilitätskontrolle mit entsprechenden Angaben aus der *Design Basis* bzw. aufbereiteten Daten anderer Forscher verglichen.

Zur Beschreibung der statistischen Verteilung von Windgeschwindigkeiten wird oftmals die Weibull-Verteilung verwendet. Dabei bestimmen der Skalierungsparameter A und der Formfaktor k den Verlauf der Verteilung. Sind aus Langzeitmessungen der Skalierungsparameter A und der Formfaktor k für einen Standort bekannt, kann für jede Windgeschwindigkeit deren Auftretenswahrscheinlichkeit bestimmt werden. Die Weibull-Verteilung wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$f(v) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{A}\right)^{k}\right] \qquad (7\text{-}2)$$

mit	V [m/s]	Windgeschwindigkeit
	A [m/s]	Skalierungsparameter
	k [-]	Formfaktor

In der *Design Basis* wird für den Skalierungsparameter A ein Wert von 11,4 m/s und für den Formfaktor k ein Wert von 2,29 angeben (vgl. Abschnitt 2.5). Mit der daraus resultierenden Weibull-Verteilung sollen die am Standort der NSB II gemessenen Windgeschwindigkeiten verglichen werden. Dazu müssen die gemessenen Windgeschwindigkeiten zunächst in Windklassen unterteilt werden. Durch Auszählen der Windgeschwindigkeiten je Windklasse kann die Auftretenswahrscheinlichkeit der jeweiligen Windklasse bestimmt werden. In Bild 7.3-3 sind auf der Abszisse die Windgeschwindigkeiten und auf der Ordinate deren Auftretenswahrscheinlichkeit aufgetragen. Die Auftretenswahrscheinlichkeit der Windklassen ist als Balken und die Weibull-Verteilung gemäß den Angaben in der *Design Basis* als rote Linie dargestellt. Mit einer Klassenbreite von 2 m/s wird die Weibull-Verteilung nur schlecht angenähert. Ab einer Klassenbreite von 1 m/s deckt sich die Auftretenswahrscheinlichkeit der Windklassen gut mit der Weibull-Verteilung. Daher kann mit den in der *Design Basis* angegebenen Weibull-Parametern die statistische Verteilung der Windgeschwindigkeiten am Standort der NBS II zutreffend beschrieben werden.

Die eigenen Daten hinsichtlich der signifikanten Wellenhöhen und der zugehörigen Peak-Frequenzen sowie Nulldurchgangsperioden wurden mit den Daten von Mittendorf (2006) verglichen. In Bild 7.3-4 sind die Auftretenswahrscheinlichkeiten der signifikanten Wellenhöhen und die Peak-Perioden als Kontourplot abgebildet. Es ist erkennbar, dass sowohl bei den eigenen Daten als auch bei den Daten von Mittendorf (2006) die höchste Auftretenswahrscheinlichkeit bei einer signifikanten Wellenhöhe H_s von 1,5 m und einer Peak-Periode T_p von 5 bis 7 s liegt.

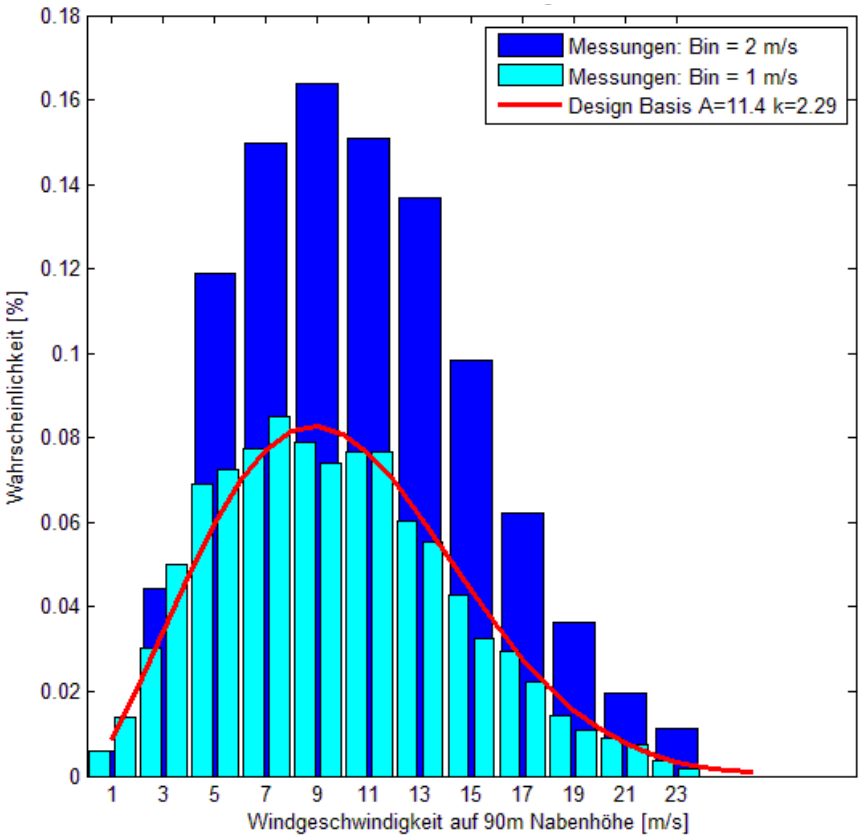
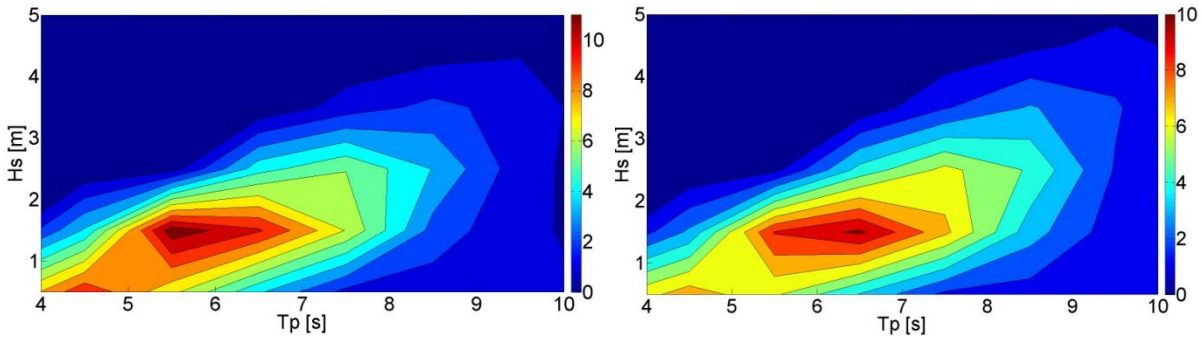


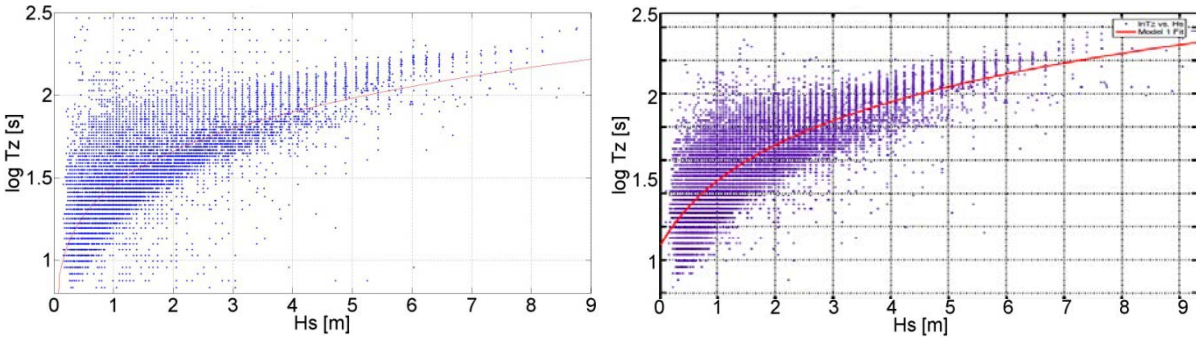
Bild 7.3-3: Statistischen Verteilung der am Standort der NSB II gemessenen Windgeschwindigkeiten und Weibull-Verteilung gemäß den Angaben in der *Design Basis*



a) eigene Daten b) Daten von Mittendorf (2006)

Bild 7.3-4: Auftretenswahrscheinlichkeit signifikanter Wellenhöhen H_s und zugehöriger Peak-Perioden T_p am Standort der NSB II

Wie aus Bild 7.3-5 hervorgeht, ergibt sich auch beim Vergleich der signifikanten Wellenhöhen H_s und der dazu gehörigen Nulldurchgangsperioden T_z eine gute Übereinstimmung zwischen den eigenen Daten und den Daten von Mittendorf (2006).



a) Eigene Daten b) Daten von Mittendorf (2006)

Bild 7.3-5: Wellenhöhen H_s und zugehöriger Nulldurchgangsperiode T_z am Standort der NSB II

Auswertung

Im letzten Arbeitsschritt wurden die verknüpften Wind- und Wellendaten zu Scatter-Diagrammen aufbereitet.

Nach Germanischem Lloyd (2005) sollen für den gesamten Betriebsbereich der Windenergieanlage Scatter-Diagramme erstellt werden, wobei die Klassenbreiten für die Windgeschwindigkeiten nicht größer als 2 m/s sein sollen. Demzufolge wurden die Windgeschwindigkeiten von 0 bis 24 m/s in zwölf Windklassen mit einer Klassenbreite von 2 m/s aufgeteilt.

Da die Daten eine unterschiedliche Anzahl an Messwerten je Monat aufweisen, würden die Umgebungsbedingungen in den Monaten mit hoher Anzahl an Messwerten stärker berücksichtigt als in den Monaten mit geringer Anzahl an Messwerten. Aus diesem Grund wurde die Summe der Auftretenswahrscheinlichkeiten aller Wellenereignisse einer Windklasse mit der Auftretenswahrscheinlichkeit dieser Windklasse gleichgesetzt.

In Bild 7.3-6 ist das Vorgehen zur Berechnung der Auftretenswahrscheinlichkeiten eines Wellenereignisses am Beispiel der Windklasse von 8 bis 10 m/s dargestellt. Für diese Windklasse standen 3.940 Datensätze für die weitere Auswertung zur Verfügung. Diese 3.940 Datensätze bzw. Messwerte wurden in einem weiteren Schritt nach ihrer signifikanten Wellenhöhe H_s und Peak-Frequenz f_p sortiert. So wurden beispielsweise 1.160 Messwerte aufgezeichnet, die eine mittlere signifikante Wellenhöhe H_s von 1,5 m mit einer Peak-Frequenz f_p von 0,15 Hz bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 9 m/s haben. Für diese Windgeschwindigkeit beträgt die Auftretenswahrscheinlichkeit 16,271 %. Wird nun die Anzahl der Messwerte für diese Wellenereignis durch die Anzahl aller Messwerte der Windklasse dividiert und mit der Wahrscheinlichkeit der Windklasse multipliziert, ergibt sich für eben dieses Wellenereignis eine Auftretenswahrscheinlichkeit von $(1.160/3.940) \cdot 16{,}271\ \% = 4{,}792\ \%$. Die Summe der Auftretenswahrscheinlichkeiten aller Wellenereignisse bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 9 m/s beträgt entsprechend der Auftretenswahrscheinlichkeit der mittleren Windgeschwindigkeit von 9 m/s 16,271 %.

Die so abgeleiteten Scatter-Diagramme für den Standort der NSB II sind in Bild 7.3-7 dargestellt.

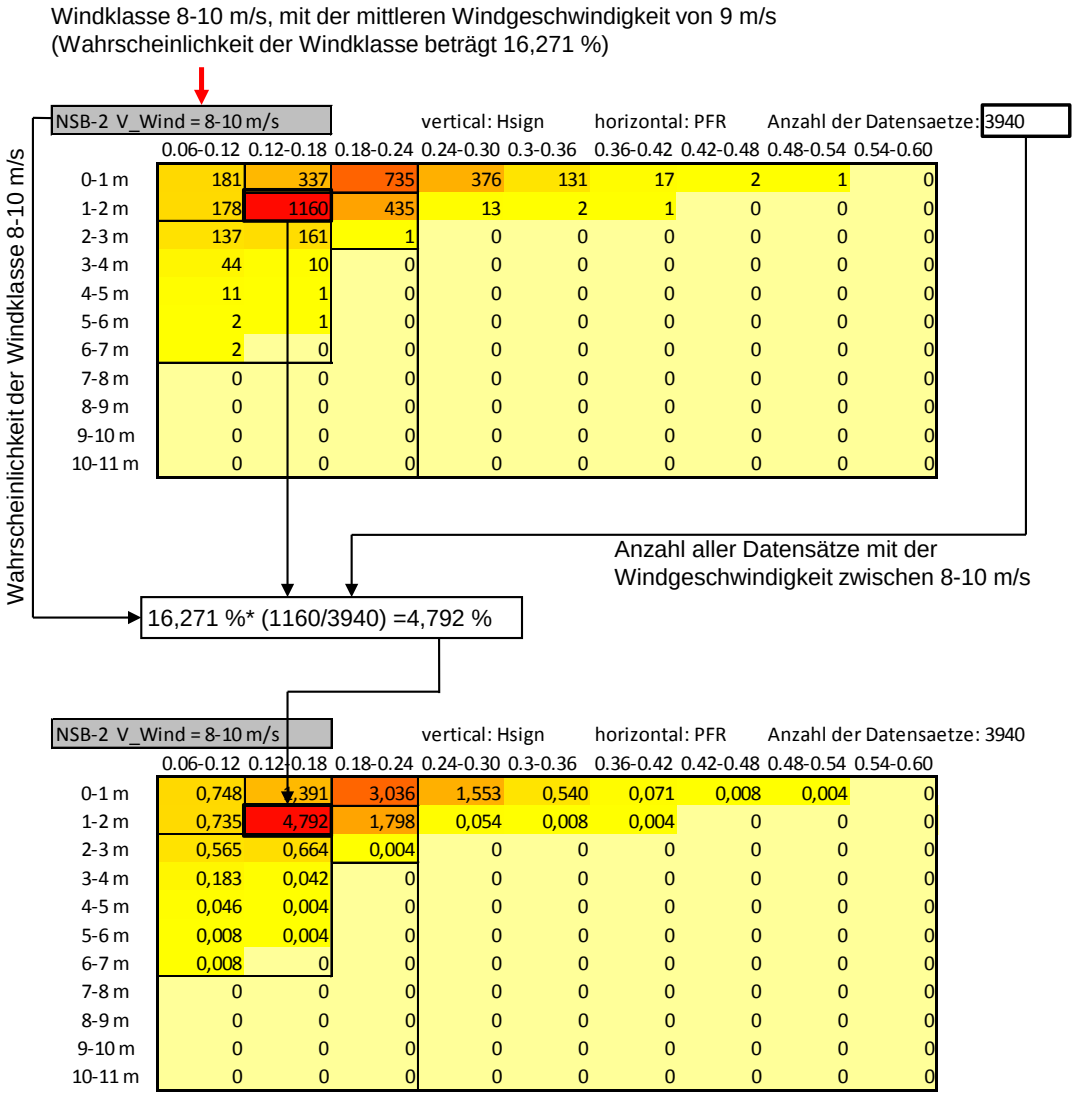


Bild 7.3-6: Berechnung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Wellenereignisses am Beispiel der Windklasse von 8 bis 10 m/s

a)

NSB-2 V_Wind = 0-2 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 143	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	H Summe	[m]
0-1 m	0,537	0,744	0,620	0,207	0,041	0	0	0	0	2,149	1,075
1-2 m	0,165	0,537	0,021	0	0	0	0	0	0	0,723	1,085
2-3 m	0,021	0,062	0	0	0	0	0	0	0	0,083	0,207
3-4 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
4-5 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
5-6 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
6-7 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	0,723	1,343	0,641	0,207	0,041	0,000	0,000	0,000	0,000	2,955	0,801
* Mean [Hz]	0,065	0,201	0,135	0,056	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,1592	

b)

NSB-2 V_Wind = 2-4 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 1128	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	H Summe	[m]
0-1 m	1,065	2,341	1,964	0,645	0,217	0,058	0	0	0	6,348	3,174
1-2 m	0,580	1,022	0,043	0	0	0	0	0	0	1,645	2,468
2-3 m	0,116	0,058	0	0	0	0	0	0	0	0,174	0,435
3-4 m	0,007	0	0	0	0	0	0	0	0	0,007	0,025
4-5 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
5-6 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
6-7 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	1,768	3,421	2,007	0,645	0,217	0,058	0,000	0,000	0,000	8,175	0,746
* Mean [Hz]	0,159	0,513	0,422	0,174	0,072	0,023	0,000	0,000	0,000	0,168	

c)

NSB-2 V_Wind = 4-6 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 3007	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	H Summe	[m]
0-1 m	1,794	2,895	2,994	1,467	0,422	0,060	0,004	0,004	0	9,662	4,831
1-2 m	0,774	1,901	0,206	0,004	0	0	0	0	0	2,895	4,343
2-3 m	0,206	0,146	0	0	0	0	0	0	0	0,353	0,882
3-4 m	0,013	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0,017	0,060
4-5 m	0,009	0	0	0	0	0	0	0	0	0,009	0,039
5-6 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
6-7 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	2,796	4,947	3,201	1,471	0,422	0,060	0,004	0,004	0,000	12,936	0,785
* Mean [Hz]	0,252	0,742	0,672	0,397	0,139	0,023	0,002	0,002	0,000	0,173	

d)

NSB-2 V_Wind = 6-8 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 3640	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	H Summe	[m]
0-1 m	1,409	2,717	3,193	1,614	0,532	0,135	0,009	0	0	9,656	4,828
1-2 m	0,951	3,589	0,776	0,009	0,004	0,004	0,009	0	0	5,343	8,014
2-3 m	0,410	0,393	0	0	0	0	0	0	0	0,802	2,006
3-4 m	0,052	0,013	0	0	0	0	0	0	0	0,065	0,229
4-5 m	0,009	0	0	0	0	0	0	0	0	0,009	0,039
5-6 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
6-7 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	2,831	6,712	3,969	1,622	0,536	0,140	0,017	0,000	0,000	15,875	0,952
* Mean [Hz]	0,255	1,007	0,833	0,438	0,177	0,054	0,008	0,000	0,000	0,175	

Bild 7.3-7: Scatter-Diagramme der unterschiedlichen Windklassen für den Standort der NSB II

e)

NSB-2 V_Wind = 8-10 m/s | vertical: Hsign | horizontal: PFR | Anzahl der Datensaetze: 3940 | * Mean

H	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	[m]
0-1 m	0,748	1,391	3,036	1,553	0,540	0,071	0,008	0,004	0	7,350	3,675
1-2 m	0,735	4,792	1,798	0,054	0,008	0,004	0	0	0	7,392	11,088
2-3 m	0,565	0,664	0,004	0	0	0	0	0	0	1,233	3,083
3-4 m	0,183	0,042	0	0	0	0	0	0	0	0,224	0,785
4-5 m	0,046	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0,050	0,224
5-6 m	0,008	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0,012	0,069
6-7 m	0,008	0	0	0	0	0	0	0	0	0,008	0,054
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	2,292	6,898	4,838	1,607	0,548	0,075	0,008	0,004	0,000	16,271	1,166
* Mean [Hz]	0,206	1,035	1,016	0,434	0,181	0,029	0,004	0,002	0,000	0,179	

f)

NSB-2 V_Wind = 10-12 m/s | vertical: Hsign | horizontal: PFR | Anzahl der Datensaetze: 3539 | * Mean

H	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	[m]
0-1 m	0,124	0,450	1,642	1,102	0,173	0,012	0	0	0	3,503	1,752
1-2 m	0,553	4,824	2,757	0,111	0,012	0	0	0	0	8,261	12,392
2-3 m	0,813	1,469	0,021	0	0	0,008	0	0	0	2,311	5,777
3-4 m	0,305	0,078	0	0	0	0	0	0	0	0,384	1,343
4-5 m	0,099	0,008	0	0	0	0	0	0	0	0,107	0,483
5-6 m	0,025	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0,029	0,159
6-7 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0,008	0	0	0	0	0	0	0	0	0,008	0,078
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	1,927	6,834	4,420	1,213	0,186	0,021	0,000	0,000	0,000	14,604	1,505
* Mean [Hz]	0,173	1,025	0,928	0,328	0,061	0,008	0,000	0,000	0,000	0,173	

g)

NSB-2 V_Wind = 12-14 m/s | vertical: Hsign | horizontal: PFR | Anzahl der Datensaetze: 3027 | * Mean

H	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	[m]
0-1 m	0,019	0,057	0,280	0,276	0,026	0,004	0	0	0	0,662	0,331
1-2 m	0,219	3,717	2,462	0,095	0,004	0,008	0	0	0	6,504	9,756
2-3 m	0,855	2,560	0,030	0,004	0,004	0	0	0	0	3,452	8,631
3-4 m	0,533	0,106	0	0	0	0	0	0	0	0,639	2,237
4-5 m	0,166	0,008	0	0	0	0	0	0	0	0,174	0,783
5-6 m	0,011	0	0	0	0	0	0	0	0	0,011	0,062
6-7 m	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,025
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	1,807	6,447	2,772	0,374	0,034	0,011	0,000	0,000	0,000	11,446	1,907
* Mean [Hz]	0,163	0,967	0,582	0,101	0,011	0,004	0,000	0,000	0,000	0,160	

h)

NSB-2 V_Wind = 14-16 m/s | vertical: Hsign | horizontal: PFR | Anzahl der Datensaetze: 2097 | * Mean

H	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	[m]
0-1 m	0	0,023	0,015	0,038	0,004	0	0	0	0	0,079	0,040
1-2 m	0,110	1,868	1,138	0,042	0	0	0	0	0	3,158	4,737
2-3 m	0,541	2,874	0,03	0,004	0	0	0	0	0	3,449	8,622
3-4 m	0,650	0,314	0,01	0	0	0	0	0	0	0,972	3,402
4-5 m	0,223	0,015	0	0	0	0	0	0	0	0,238	1,072
5-6 m	0,030	0	0	0	0	0	0	0	0	0,030	0,166
6-7 m	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,025
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	1,558	5,094	1,191	0,083	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	7,930	2,278
* Mean [Hz]	0,140	0,764	0,250	0,022	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,149	

Bild 7.3-7 (fortgesetzt): Scatter-Diagramme der unterschiedlichen Windklassen für den Standort der NSB II

i)

NSB-2 V_Wind = 16-18 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 1293	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	H Summe	[m]
0-1 m	0,008	0,011	0	0,004	0	0	0	0	0	0,023	0,011
1-2 m	0,019	0,686	0,294	0,004	0	0	0	0	0	1,002	1,503
2-3 m	0,245	2,038	0,023	0	0	0	0	0	0	2,306	5,765
3-4 m	0,512	0,584	0,015	0	0	0	0	0	0	1,112	3,890
4-5 m	0,268	0,072	0,004	0	0	0	0	0	0	0,343	1,543
5-6 m	0,064	0,008	0	0	0	0	0	0	0	0,072	0,394
6-7 m	0,0075	0	0	0	0	0	0	0	0	0,008	0,049
7-8 m	0,008	0	0	0	0	0	0	0	0	0,008	0,057
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	1,130	3,399	0,335	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,872	2,712
* Mean [Hz]	0,102	0,510	0,070	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,140	

j)

NSB-2 V_Wind = 18-20 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 713	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	H Summe	[m]
0-1 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
1-2 m	0,004	0,104	0,056	0	0	0	0	0	0	0,164	0,246
2-3 m	0,067	0,950	0,030	0	0	0	0	0	0	1,047	2,618
3-4 m	0,499	0,488	0	0	0	0	0	0	0	0,988	3,456
4-5 m	0,283	0,071	0	0	0	0	0	0	0	0,354	1,593
5-6 m	0,067	0,007	0	0	0	0	0	0	0	0,075	0,410
6-7 m	0,015	0	0	0	0	0	0	0	0	0,015	0,097
7-8 m	0,011	0	0	0	0	0	0	0	0	0,011	0,084
8-9 m	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,032
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	0,950	1,621	0,086	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,657	3,212
* Mean [Hz]	0,086	0,243	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,130	

k)

NSB-2 V_Wind = 20-22 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 375	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	H Summe	[m]
0-1 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
1-2 m	0	0,055	0,021	0	0	0	0	0	0	0,075	0,113
2-3 m	0,007	0,250	0	0	0	0	0	0	0	0,257	0,643
3-4 m	0,233	0,374	0	0	0	0	0	0	0	0,607	2,125
4-5 m	0,223	0,027	0	0	0	0	0	0	0	0,250	1,127
5-6 m	0,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0,075	0,415
6-7 m	0,010	0	0	0	0	0	0	0	0	0,010	0,067
7-8 m	0,007	0	0	0	0	0	0	0	0	0,007	0,051
8-9 m	0,003	0	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0,029
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	0,559	0,707	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,287	3,5533
* Mean [Hz]	0,050	0,106	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,125	

l)

NSB-2 V_Wind = 22-24 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 219	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	H Summe	[m]
0-1 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
1-2 m	0	0,023	0,013	0	0	0	0	0	0	0,035	0,053
2-3 m	0,003	0,045	0,005	0	0	0	0	0	0	0,053	0,133
3-4 m	0,083	0,109	0	0	0	0	0	0	0	0,192	0,671
4-5 m	0,154	0,018	0	0	0	0	0	0	0	0,172	0,772
5-6 m	0,073	0,005	0	0	0	0	0	0	0	0,078	0,430
6-7 m	0,010	0	0	0	0	0	0	0	0	0,010	0,066
7-8 m	0,013	0	0	0	0	0	0	0	0	0,013	0,095
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	0,336	0,199	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,553	4,016
* Mean [Hz]	0,030	0,030	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,115	

Bild 7.3-7 (fortgesetzt): Scatter-Diagramme der unterschiedlichen Windklassen für den Standort der NSB II

7.3.3 Forschungsplattform FINO1

Die Auswertung der Messdaten der Forschungsplattform FINO1 erfolgte im Prinzip wie die Auswertung der Messdaten der NSB II (vgl. Abschnitt 7.3.2). Das Flussdiagramm für die Auswertung der Messdaten der Forschungsplattform FINO1 ist in Bild 7.3-8 dargestellt.

Bei der Forschungsplattform FINO1 wurden die hydrologischen und meteorologischen Daten zwar zum gleichen Zeitpunkt gemessen, die einzelnen Messgrößen jedoch in unterschiedlichen Dateien gespeichert. Aus diesem Grund war die Zuordnung der einzelnen Messgrößen zueinander äußerst aufwendig.

Winddaten

Die meteorologischen Daten standen für einen Zeitraum von 2004 bis 2010 zur Verfügung. Es wurden die Windgeschwindigkeiten und die Windrichtungen aufgezeichnet. Im Gegensatz zur NSB II wurde bei der Forschungsplattform FINO1 die Windgeschwindigkeit nicht als 1-Minuten-Mittelwert auf einer Höhe von 10 m, sondern als 10-Minuten-Mittelwert auf einer Höhe von 90 m aufgezeichnet. Daher war keine weitere Umrechnung für die gesamtdynamische Berechnung notwendig.

Wellendaten

Die hydrologischen Daten standen für einen Zeitraum von 2003 bis 2009 zur Verfügung. Die Einzelmessungen stammen bei der Forschungsplattform FINO1 wie bei der NSB II aus einer Kurzzeitstatistik über einen Zeitraum von jeweils 30 Minuten.

Verknüpfung und Auswertung

Die Verknüpfung und Auswertung der Wind- und Wellendaten erfolgte wie in Abschnitt 7.3.2 beschrieben.

Die abgeleiteten Scatter-Diagramme für den Standort der Forschungsplattform FINO1 sind in Bild 7.3-9 dargestellt.

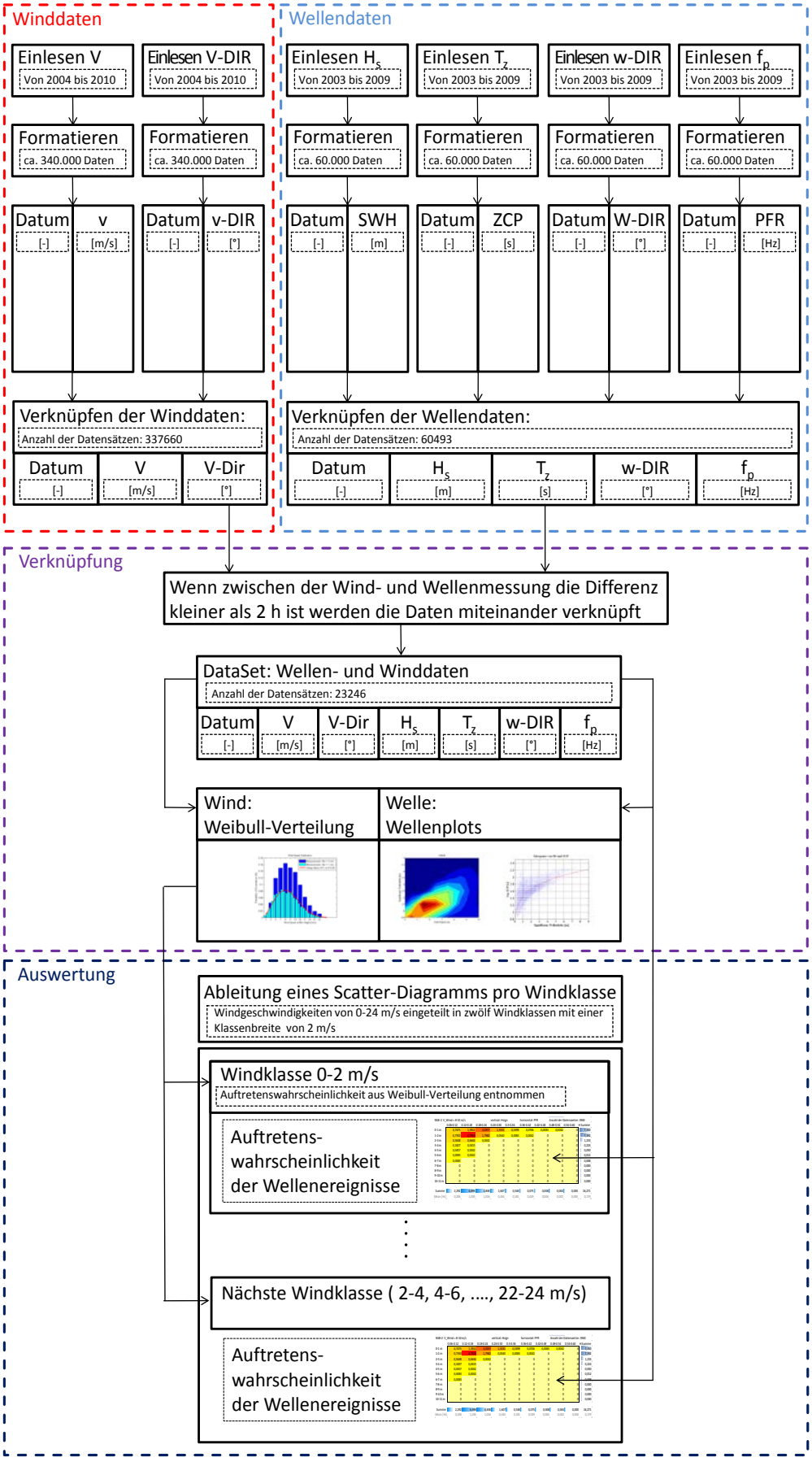


Bild 7.3-8: Flussdiagramm für die Auswertung der Messdaten der Forschungsplattform FINO1 mit der Software MATLAB

a)

FINOI V_Wind = 0-2 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 1219	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	[m]
0-1 m	0,681	1,104	0,690	0,203	0,058	0,014	0	0	0	2,779	1,389
1-2 m	0,150	0,431	0,008	0	0	0	0	0	0	0,590	0,885
2-3 m	0,011	0,011	0	0	0	0	0	0	0	0,022	0,056
3-4 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
4-5 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
5-6 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
6-7 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	0,843	1,546	0,698	0,203	0,058	0,014	0,000	0,000	0,000	3,3906	0,687
* Mean [Hz]	0,076	0,232	0,147	0,055	0,019	0,005	0,000	0,000	0,000	0,1588	

b)

FINOI V_Wind = 2-4 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 4225	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	[m]
0-1 m	1,585	3,016	1,526	0,600	0,163	0,012	0,002	0	0	6,965	3,482
1-2 m	0,408	1,188	0,074	0	0	0	0	0	0	1,672	2,508
2-3 m	0,021	0,04742	0	0	0	0	0	0	0	0,068	0,170
3-4 m	0,006	0	0	0	0	0	0	0	0	0,006	0,022
4-5 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
5-6 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
6-7 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	2,021	4,251	1,600	0,600	0,163	0,012	0,002	0,000	0,000	8,711	0,710
* Mean [Hz]	0,182	0,638	0,336	0,162	0,054	0,005	0,001	0,000	0,000	0,159	

c)

FINOI V_Wind = 4-6 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 6291	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	[m]
0-1 m	2,083	3,433	2,280	1,035	0,404	0,078	0,010	0,008	0,002	9,407	4,704
1-2 m	0,633	2,695	0,176	0,004	0	0	0	0	0	3,510	5,265
2-3 m	0,134	0,122	0	0	0	0	0	0	0	0,256	0,639
3-4 m	0,006	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0,010	0,037
4-5 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
5-6 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
6-7 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	2,856	6,253	2,456	1,039	0,404	0,078	0,010	0,008	0,002	13,183	0,807
* Mean [Hz]	0,257	0,938	0,516	0,281	0,133	0,030	0,005	0,004	0,001	0,165	

d)

FINOI V_Wind = 6-8 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 8259	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	[m]
0-1 m	1,758	2,450	2,503	1,477	0,688	0,139	0,029	0,002	0,002	9,130	4,565
1-2 m	0,920	4,221	0,650	0,021	0	0	0	0	0	5,812	8,717
2-3 m	0,371	0,353	0	0	0	0	0	0	0	0,724	1,810
3-4 m	0,027	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0,030	0,106
4-5 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
5-6 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
6-7 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	3,075	7,028	3,153	1,498	0,688	0,139	0,029	0,002	0,002	15,696	0,968
* Mean [Hz]	0,277	1,054	0,662	0,404	0,227	0,054	0,013	0,001	0,001	0,173	

Bild 7.3-9: Scatter-Diagramme der unterschiedlichen Windklassen für den Standort der Forschungsplattform FINO1

e) FINOI V_Wind = 8-10 m/s — vertical: Hsign — horizontal: PFR — Anzahl der Datensaetze: 9311 — * Mean [m]

	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	
0-1 m	0,931	1,129	1,887	1,558	0,546	0,121	0,024	0,005	0,005	6,206	3,103
1-2 m	0,769	5,229	1,894	0,174	0,003	0	0	0	0	8,069	12,104
2-3 m	0,609	0,861	0,002	0	0	0	0	0	0	1,471	3,678
3-4 m	0,080	0,007	0	0	0	0	0	0	0	0,087	0,304
4-5 m	0,010	0	0	0	0	0	0	0	0	0,010	0,046
5-6 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
6-7 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	2,399	7,225	3,783	1,732	0,549	0,121	0,024	0,005	0,005	15,844	1,214
* Mean [Hz]	0,216	1,084	0,794	0,468	0,181	0,047	0,011	0,003	0,003	0,177	

f) FINOI V_Wind = 10-12 m/s — vertical: Hsign — horizontal: PFR — Anzahl der Datensaetze: 8611 — * Mean [m]

	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	
0-1 m	0,380	0,543	1,258	1,097	0,450	0,082	0,036	0,007	0,005	3,864	1,932
1-2 m	0,385	4,228	2,539	0,292	0,003	0	0	0	0	7,453	11,179
2-3 m	0,760	1,715	0,007	0	0	0	0	0	0	2,482	6,205
3-4 m	0,186	0,034	0	0	0	0	0	0	0	0,220	0,771
4-5 m	0,031	0	0	0	0	0	0	0	0	0,031	0,140
5-6 m	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,009
6-7 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	1,745	6,521	3,804	1,389	0,454	0,082	0,036	0,007	0,005	14,052	1,440
* Mean [Hz]	0,157	0,978	0,799	0,375	0,150	0,032	0,016	0,003	0,003	0,179	

g) FINOI V_Wind = 12-14 m/s — vertical: Hsign — horizontal: PFR — Anzahl der Datensaetze: 6954 — * Mean [m]

	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	
0-1 m	0,170	0,170	0,602	0,575	0,316	0,075	0,013	0,005	0,003	1,930	0,965
1-2 m	0,141	3,025	2,234	0,124	0,002	0	0	0	0	5,527	8,290
2-3 m	0,580	2,380	0,024	0	0	0	0	0	0	2,983	7,458
3-4 m	0,394	0,135	0	0	0	0	0	0	0	0,529	1,852
4-5 m	0,076	0	0	0	0	0	0	0	0	0,076	0,343
5-6 m	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,009
6-7 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	1,363	5,709	2,859	0,699	0,318	0,075	0,013	0,005	0,003	11,047	1,712
* Mean [Hz]	0,123	0,856	0,600	0,189	0,105	0,029	0,006	0,002	0,002	0,173	

h) FINOI V_Wind = 14-16 m/s — vertical: Hsign — horizontal: PFR — Anzahl der Datensaetze: 4654 — * Mean [m]

	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	
0-1 m	0,068	0,033	0,314	0,341	0,119	0,022	0	0	0	0,896	0,448
1-2 m	0,072	1,723	1,259	0,072	0	0	0	0	0	3,127	4,690
2-3 m	0,244	2,392	0,043	0	0	0	0	0	0	2,679	6,699
3-4 m	0,564	0,347	0	0	0	0	0	0	0	0,912	3,190
4-5 m	0,129	0	0	0	0	0	0	0	0	0,129	0,578
5-6 m	0,025	0	0	0	0	0	0	0	0	0,025	0,138
6-7 m	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,011
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	1,103	4,496	1,616	0,412	0,119	0,022	0,000	0,000	0,000	7,769	2,028
* Mean [Hz]	0,099	0,674	0,339	0,111	0,039	0,008	0,000	0,000	0,000	0,164	

Bild 7.3-9 (fortgesetzt): Scatter-Diagramme der unterschiedlichen Windklassen für den Standort der Forschungsplattform FINO1

i)

FINOI_Wind = 16-18 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 2908	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	[m]
0-1 m	0,017	0,003	0,166	0,0980	0,0287	0,002	0	0	0	0,314	0,157
1-2 m	0,012	0,691	0,588	0,029	0,002	0	0	0	0	1,321	1,981
2-3 m	0,071	1,898	0,079	0	0	0	0	0	0	2,049	5,121
3-4 m	0,448	0,453	0	0	0	0	0	0	0	0,900	3,151
4-5 m	0,272	0,012	0	0	0	0	0	0	0	0,284	1,277
5-6 m	0,032	0	0	0	0	0	0	0	0	0,032	0,176
6-7 m	0,012	0	0	0	0	0	0	0	0	0,012	0,077
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	0,863	3,057	0,833	0,127	0,030	0,002	0,000	0,000	0,000	4,911	2,431
* Mean [Hz]	0,078	0,459	0,175	0,034	0,010	0,001	0,000	0,000	0,000	0,154	

j)

FINOI V_Wind = 18-20 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 1609	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	[m]
0-1 m	0,003	0	0,033	0,036	0,007	0	0	0	0	0,080	0,040
1-2 m	0,002	0,158	0,200	0,003	0	0	0	0	0	0,363	0,545
2-3 m	0,030	1,046	0,059	0	0	0	0	0	0	1,135	2,836
3-4 m	0,281	0,469	0	0	0	0	0	0	0	0,751	2,627
4-5 m	0,304	0,019	0	0	0	0	0	0	0	0,323	1,454
5-6 m	0,123	0	0	0	0	0	0	0	0	0,123	0,678
6-7 m	0,021	0	0	0	0	0	0	0	0	0,021	0,136
7-8 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	0,764	1,692	0,292	0,040	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	2,795	2,975
* Mean [Hz]	0,069	0,254	0,061	0,011	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,142	

k)

FINOI V_Wind = 20-22 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 799	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	[m]
0-1 m	0	0	0,002	0,009	0	0	0	0	0	0,011	0,005
1-2 m	0	0,048	0,052	0,002	0,002	0	0	0	0	0,104	0,156
2-3 m	0,004	0,391	0,016	0	0	0	0	0	0	0,411	1,028
3-4 m	0,133	0,370	0,002	0	0	0	0	0	0	0,505	1,766
4-5 m	0,197	0,025	0	0	0	0	0	0	0	0,223	1,002
5-6 m	0,149	0	0	0	0	0	0	0	0	0,149	0,820
6-7 m	0,025	0	0	0	0	0	0	0	0	0,025	0,163
7-8 m	0,007	0	0	0	0	0	0	0	0	0,007	0,054
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	0,515	0,835	0,072	0,011	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	1,435	3,481
* Mean [Hz]	0,046	0,125	0,015	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,133	

l)

FINOI V_Wind = 22-24 m/s	vertical: Hsign					horizontal: PFR				Anzahl der Datensaetze: 366	* Mean
	0.06-0.12	0.12-0.18	0.18-0.24	0.24-0.30	0.3-0.36	0.36-0.42	0.42-0.48	0.48-0.54	0.54-0.60	Summe	[m]
0-1 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
1-2 m	0	0	0,016	0	0	0	0	0	0	0,016	0,024
2-3 m	0,0036	0,1016	0	0	0	0	0	0	0	0,105	0,263
3-4 m	0,060	0,2358	0	0	0	0	0	0	0	0,296	1,035
4-5 m	0,094	0,0435	0	0	0	0	0	0	0	0,138	0,620
5-6 m	0,074	0	0	0	0	0	0	0	0	0,074	0,409
6-7 m	0,027	0	0	0	0	0	0	0	0	0,027	0,177
7-8 m	0,005	0	0	0	0	0	0	0	0	0,005	0,041
8-9 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,015
9-10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
10-11 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000
Summe	0,265	0,381	0,016	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,664	3,893
* Mean [Hz]	0,024	0,057	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,127	

Bild 7.3-9 (fortgesetzt): Scatter-Diagramme der unterschiedlichen Windklassen für den Standort der Forschungsplattform FINO1

7.4 Beurteilung der Scatter-Diagramme

Die meteorologischen und hydrologischen Daten, welche am Standort der NSB II und der Forschungsplattform FINO1 gemessen wurden, werden im Folgenden miteinander verglichen und hinsichtlich der Übernahme in die *Design Basis* für eine möglichst realitätsnahe gesamtdynamische Berechnung überprüft.

Die aus den Winddaten der beiden Standorte abgeleiteten Auftretenswahrscheinlichkeit der Windklassen weichen nur geringfügig voneinander ab. Dies trifft auch auf die Auftretenswahrscheinlichkeiten der Wellenereignisse zu.

Deutliche Unterschiede sind jedoch hinsichtlich der signifikanten Wellenhöhe zu erkennen. Am Standort der NSB II treten im Vergleich zum Standort der Forschungsplattform FINO1 stets größere Wellenhöhen auf, was mit der größeren Entfernung zur Küste und der größeren Wassertiefe am Standort der NSB II zusammenhängt. Die Wassertiefe am Standort der NSB II entspricht mit 42,0 m in etwa der in der *Design Basis* festgelegten Wassertiefe von 39,5 m für das Forschungsprojekt.

Aus diesem Grund wurden die für den Standort der NSB II abgeleiteten Scatter-Diagramme (vgl. Bild 7.3-7) in die *Design Basis* übernommen und für die gesamtdynamische Berechnung verwendet.

8 Auslegung des Turmtragwerks aus UHFFB in Segmentbauweise

8.1 Eigenfrequenzanalyse

8.1.1 Berechnung der Gründungsfedersteifigkeit

Im Bild 8.1-1 ist der Grundriss des Schwerkraftfundaments dargestellt. Des Weiteren sind die für die Berechnung der Gründungsfedersteifigkeiten zu betrachtenden Hauptrichtungen definiert.

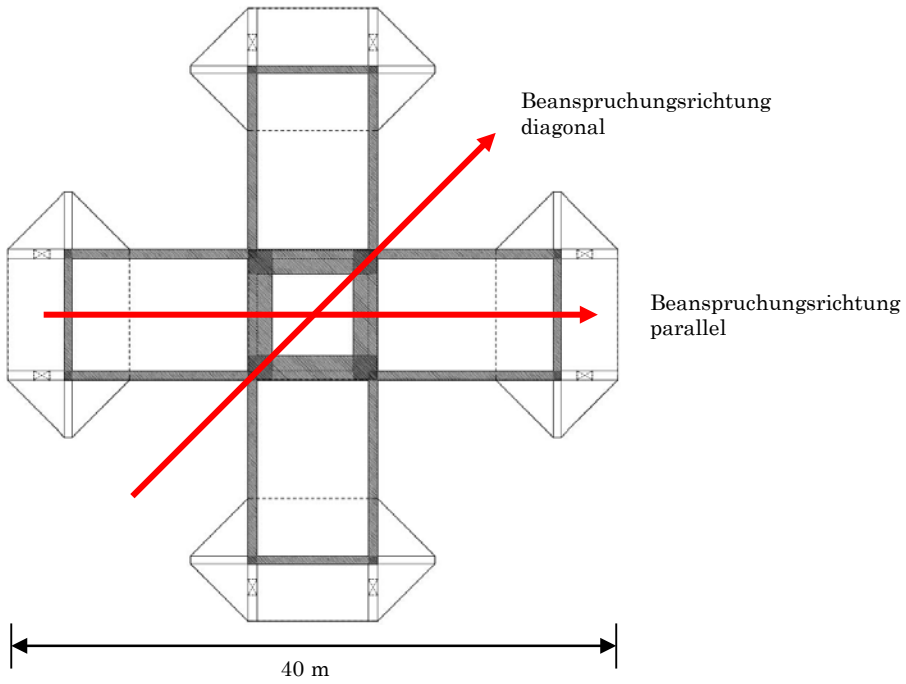


Bild 8.1-1: Zu betrachtende Hauptrichtungen bei der Ermittlung der Gründungsfedersteifigkeiten

Die Lasten werden konzentriert durch die am Ende der orthogonal angeordneten, vorgespannten Stahlbetonhohlkästen angebrachten Fundamentplatten in den Baugrund abgetragen. Durch den Abstand des Zentralbereichs zum Baugrund wird ein "Reiten" des Schwerkraftfundaments verhindert. Die Fundamentplatten haben eine Dicke von 0,50 m und eine sechseckige Form mit den maximalen Außenabmessungen von 8,00 m x 16,00 m, was folgende Grundfläche ergibt:

$$A_i = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 8 \cdot 3{,}75 \right) + 8 \cdot 8{,}5 = 98\ m^2 \qquad (8\text{-}1)$$

Eine OWEA unterliegt erfahrungsgemäß vergleichsweise kurzen Lastwechseln. Daher werden für die nachfolgenden Betrachtungen die dynamischen Bodenkennwerte und die sich hieraus ergebenden Federsteifigkeiten nach Tabelle 2.3-1 verwendet.

Die Gründungsfedersteifigkeiten wurden mit Hilfe eines 3D Stabwerkprogramms unter Berücksichtigung der Steifigkeiten der Fundamenthohlkästen für die beiden Hauptrichtungen der Beanspruchung ermittelt. Da die Hohlkästen des Fundamentkreuzes in Spannbetonbauweise ausgeführt werden, wurde bei der Berechnung der Gründungsfedersteifigkeiten vom ungerissenen Zustand ausgegangen.

Damit folgen die Gründungsfedersteifigkeiten mit den Bettungsmodulen nach Tabelle 2.3-1 für das gesamte Fundamentkreuz zu:

- Beanspruchungsrichtung parallel: k_φ = 463779 MNm/rad (Drehfedersteifigkeit)
  k_v = 4116 MN/m (vertikale Federsteifigkeit)
  k_h = 2352 MN/m (horizontale Federsteifigkeit)
- Beanspruchungsrichtung diagonal: k_φ = 655882 MNm/rad (Drehfedersteifigkeit)
  k_v = 4116 MN/m (vertikale Federsteifigkeit)
  k_h = 2352 MN/m (horizontale Federsteifigkeit)

Für abweichende Bettungsmodule sind diese Werte entsprechend linear zu skalieren.

8.1.2 Mehrmassenschwingermodell für die Eigenfrequenzanalyse

Die Berechnung der Eigenfrequenz der Konstruktion bestehend aus Anlagenmasse (Rotor-, Naben- und Gondelmasse), UHHFB Turm und Schwerkraftfundament erfolgt mit Hilfe eines zweidimensionalen Mehrmassenschwingermodells. Die Steifigkeitseigenschaften der vorgespannten Stahlbetonhohlkästen sowie die Bauwerk-Boden-Interaktion werden mit Hilfe von Federn abgebildet. Die zugehörigen Federsteifigkeiten wurden in Abschnitt 8.1.1 hergeleitet. Die externe Vorspannung wird auf der Innenseite der Turmsegmente in definierten Abständen mit Hilfe von Konsolen horizontal geführt (vgl. Abschnitt 4.3.2) und beeinflusst daher die Eigenfrequenz nicht. Im Bild 8.1-2 ist eine Prinzipskizze des verwendeten Mehrmassenschwingermodells exemplarisch für einen "lumped mass" Massenansatz abgebildet. Der Anlagenmassenschwerpunkt aus Rotor-, Naben- und Gondelmasse weist gegenüber der vertikalen Turmachse eine horizontale Ausmitte von 2,17 m und einen vertikalen Versatz von 4,13 m bezogen auf die Oberkante des Turms auf.

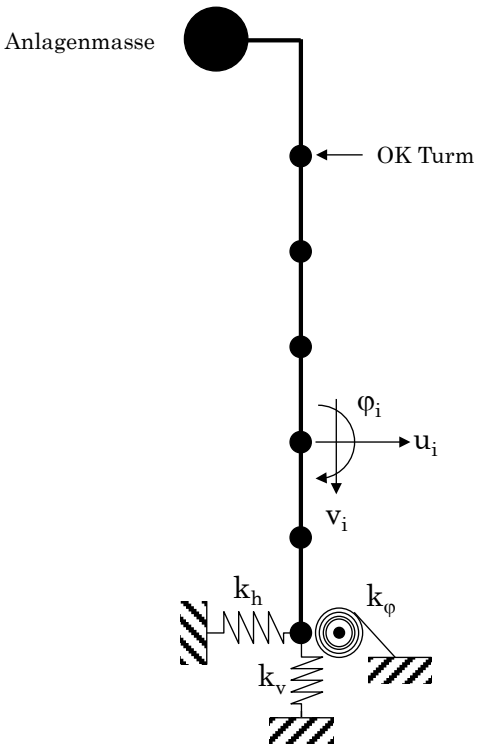


Bild 8.1-2: Prinzipskizze des Mehrmassenschwingermodells

Im sogenannten konservativen Modell wird der Einfluss der Struktur- und aerodynamischen Dämpfung auf die Eigenfrequenz vereinfacht nicht berücksichtigt [Schaumann und Seidel (1999)]. Die Eigenfrequenzen des Mehrmassenschwingermodells folgen dann aus der Lösung des allgemeinen Eigenwertproblems:

$$\det\left(\underline{K} - \omega_i^2 \cdot \underline{M}\right) = 0 \qquad (8\text{-}2)$$

mit	$\underline{K}$	Gesamtsteifigkeitsmatrix des Mehrmassenschwingermodells
	$\underline{M}$	Gesamtmassenmatrix des Mehrmassenschwingermodells
	ω_i [2π/s]	i-te Eigenkreisfrequenz des Mehrmassenschwingermodells

Die Gesamtsteifigkeitsmatrix $\underline{K}$ und die Gesamtmassenmatrix $\underline{M}$ werden aus den Elementmatrizen durch "einmischen" aufgestellt. Für die Elementsteifigkeitsmatrix der Stabelemente wird sowohl ein linear elastischer Ansatz als auch ein nicht linearer Ansatz gewählt. Bei dem nicht linearen Ansatz setzt sich die Elementsteifigkeitsmatrix aus der linear elastischen Elementsteifigkeitsmatrix *KeLokal* und der geometrischen Elementsteifigkeitsmatrix *KgLokal* zusammen. Neben diesen Matrizen für das lokale Koordinatensystem der Stabelemente ist nachfolgend auch die Transformationsmatrix *TransMat* dargestellt. Mit Hilfe der Matrix *TransMat* werden die Elementmatrizen vom lokalen in das globale Koordinatensystem transformiert bevor die Gesamtsteifigkeitsmatrix im globalen Koordinatensystem aufgestellt wird.

Linear elastische Elementsteifigkeitsmatrix *KeLokal* für ein ebenes Stabelement (lokales Koordinatensystem):

$$KeLokal := \frac{E_c I}{l}\begin{pmatrix} \frac{A}{I} & 0 & 0 & -\frac{A}{I} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12}{l^2} & -\frac{6}{l} & 0 & -\frac{12}{l^2} & -\frac{6}{l} \\ 0 & -\frac{6}{l} & 4 & 0 & \frac{6}{l} & 2 \\ -\frac{A}{I} & 0 & 0 & \frac{A}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12}{l^2} & \frac{6}{l} & 0 & \frac{12}{l^2} & \frac{6}{l} \\ 0 & -\frac{6}{l} & 2 & 0 & \frac{6}{l} & 4 \end{pmatrix}$$

Geometrische Elementsteifigkeitsmatrix *KgLokal* für ein ebenes Stabelement (lokales Koordinatensystem):

$$KgLokal := \frac{N}{l}\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6}{5} & -\frac{l}{10} & 0 & -\frac{6}{5} & -\frac{l}{10} \\ 0 & -\frac{l}{10} & \frac{2}{15}l^2 & 0 & \frac{l}{10} & -\frac{l^2}{30} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6}{5} & \frac{l}{10} & 0 & \frac{6}{5} & \frac{l}{10} \\ 0 & -\frac{l}{10} & -\frac{l^2}{30} & 0 & \frac{l}{10} & \frac{2}{15}l^2 \end{pmatrix}$$

Transformationsmatrix *TransMat*:

$$TransMat := \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

mit	E_c [kN/m²]	E-Modul von UHFFB
	l [m]	Elementlänge der Turmsegmente
	I [m^4]	Flächenträgheitsmoment der Turmsegmente
	A [m^2]	Querschnittfläche der Turmsegmente
	N [kN]	Normalkraftbeanspruchung der Turmsegmente
	α [rad]	Transformationswinkel

Für die Elementmassenmatrix wird sowohl der "lumped mass" als auch der konsistente Ansatz für die Formulierung gewählt, die im Folgenden für das lokale Koordinatensystem der Stabelemente wiedergegeben sind und in das globale Koordinatensystem transformiert werden müssen.

Konzentrierte Massenmatrix *MlumpedLokal* ("lumped mass") eines Stabelements (lokales = globales Koordinatensystem wegen Diagonalmatrix):

$$MlumpedLokal := \frac{m}{2}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Konsistente Massenmatrix *MKonsLokal* eines Stabelements (lokales Koordinatensystem):

$$MKonsLokal := \frac{m}{420}\begin{pmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & -22\,l & 0 & 54 & 13\,l \\ 0 & -22\,l & 4\,l^2 & 0 & -13\,l & -3\,l^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & -13\,l & 0 & 156 & 22\,l \\ 0 & 13\,l & -3\,l^2 & 0 & 22\,l & 4\,l^2 \end{pmatrix}$$

mit	l [m]	Elementlänge eines Turmsegments
	m [to]	Masse eines Turmsegments

Die Anlagenmasse bestehend aus Gondel- und Rotormasse greift konzentriert an einem Stabende an, unabhängig davon welcher Massenmatrixansatz für die übrigen Turmsegmente gewählt wird. Daher wird für die Anlagenmasse die folgende modifizierte konzentrierte Massenmatrix *MAnlageGlobal* verwendet:

$$MAnlageGlobal := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Bei einer OWEA ist zusätzlich zur Masse von Fundament, Turm und Anlage die hydrodynamische Masse (= "added mass" bzw. "mitschwingende Wassermasse") des umgebenden Meerwassers zu berücksichtigen. Die im Folgenden aufgestellte hydrodynamische Massenmatrix *MAddedGlobal* berücksichtigt nur die relevanten horizontalen Freiheitsgrade in Anströmrichtung. Die hydrodynamische Masse wird hierbei gleichmäßig auf beide horizontale Freiheitsgrade verteilt.

$$MAddedGlobal := \begin{pmatrix} \frac{AddedMass}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{AddedMass}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Für einen Kreiszylinder berechnet sich *AddedMass* zu $\rho_{Wasser} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot l_{Zylinder}$ und entspricht damit der Masse des verdrängten Wasservolumens. Einzelheiten zur Herleitung der hydrodynamischen Massenmatrix können u.a. Clauss et al. (1988) entnommen werden.

Mit Hilfe eines Computer Algebra Systems (CAS) wurde ein Algorithmus für die Berechnung der Eigenfrequenzen programmiert, der aus definierten Turmdaten die Massen- und Steifigkeitsmatrix aufbaut , das allgemeine Eigenwertproblem nach Gl. (8-2) löst und die Eigenfrequenzen ausgibt. Hierbei besteht die Auswahlmöglichkeit, mit welcher Art von Steifigkeitsmatrix (linear oder nichtlinear) und Massenmatrix ("lumped mass" oder konsistent) die Berechnung erfolgen soll. Beim Ansatz der nichtlinearen Steifigkeitsmatrix bei der Berechnung der Eigenfrequenzen wird auch der Einfluss der Normalkräfte berücksichtigt.

8.1.3 Parameterstudie zur Eigenfrequenz

Zur Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren auf die Eigenfrequenz wurde eine Parameterstudie durchgeführt mit folgenden Parametern:

- Betongüte des Fundamentschafts:
  C80/95 bzw. UHFFB;
- Wandungsstärke des Fundamentschafts bis + 20,0 m LAT aus C80/95:
  konstant mit 600 mm;
- Wandungsstärke des Fundamentschafts bis + 20,0 m LAT aus UHFFB:
  100 / 200 / 300 und 500 mm;
- Wandungsstärke des Turms aus UHFFB ab + 20,0 m LAT:
  100 / 200 / 300 und 500 mm;
- Variation des E-Moduls von UHFFB:
  E_{cm} = 59364 MPa (Mittelwert von eigenen Versuchen mit Ductal®)
  mit ± 10 % Streubreite;
- Variation des E-Moduls von C80/95:
  E_{cm} = 42300 MPa (nach DIN 1045-1 (2008)) mit ± 10 % Streubreite;
- Variation des vertikalen Bettungsmoduls k_{sv}:
  k_{sv} = 5 / 10,5 (aus *Design Basis*) / 21 / 52,5 / und 15750 MN/m³;
- Variation des horizontalen Bettungsmoduls k_{sh}:
  k_{sh} = 3 / 6 (aus *Design Basis*) / 12 / 30 / und 9000 MN/m³;
- Beanspruchungsrichtung diagonal und parallel.

Bei der Parameterstudie wurden die Variante A mit Fundamentschaft aus C80/95 und Turm aus UHFFB und die Variante B mit Fundamentschaft und Turm aus UHFFB betrachtet. Als Referenz diente die Variante der Ed. Züblin AG mit einem Fundamentschaft aus C80/95 und einem Turm aus Stahl mit einem konstanten E - Modul für Stahl von 210000 MPa. Bei allen Varianten wurden sämtliche Kombinationsmöglichkeiten mit folgenden Einschränkungen untersucht:

- Der E-Modul für Beton wurde für den Fundamentschaft und Turm jeweils identisch als Mittelwert, -10 % oder +10 % Streuwert angesetzt, gegenläufige Kombinationen wurden nicht betrachtet;
- Zum vertikalen Bettungsmodul k_{sv} gemäß vorheriger Auflistung wurde jeweils der korrespondierende horizontale Bettungsmodul k_{sh} entsprechend der vorherigen Auflistung angesetzt (z.B. k_{sv} = 10,5 MN/m³ und k_{sh} = 6 MN/m³);
- Wandungsstärke von Turm und Fundamentschaft aus UHFFB wurden jeweils identisch angesetzt.

Zusätzlich wurde der horizontale Bettungsmodul k_{sh} konstant zu 6 MN/m³ (Vorgabe des Bodengutachtens) angenommen und alle anderen Parameter analog zum vorher beschriebenen Vorgehen variiert in Kombination mit jedem vertikalen Bettungsmodul k_{sv} gemäß obiger Auflistung.

Die Berechnungen der Eigenfrequenzen erfolgten für die Parameterstudie unter Ansatz einer konsistenten Massenmatrix und geometrisch nichtlinearen Steifigkeitsmatrix. Im Bild 8.1-3 ist für die Variante A die Ober- und Untergrenze der 1. Eigenfrequenz f_1 von allen untersuchten Varianten in Abhängigkeit von der Wandungsstärke des UHFFB Turms dargestellt. Zusätzlich sind auch die 1. Eigenfrequenzen für die Mittelwerte der E-Module und dem vorgegebenen Bettungsmodul nach Tabelle 2.3-1 für eine diagonale und parallele Beanspruchungsrichtung (vgl. Bild 8.1-1) abgebildet.

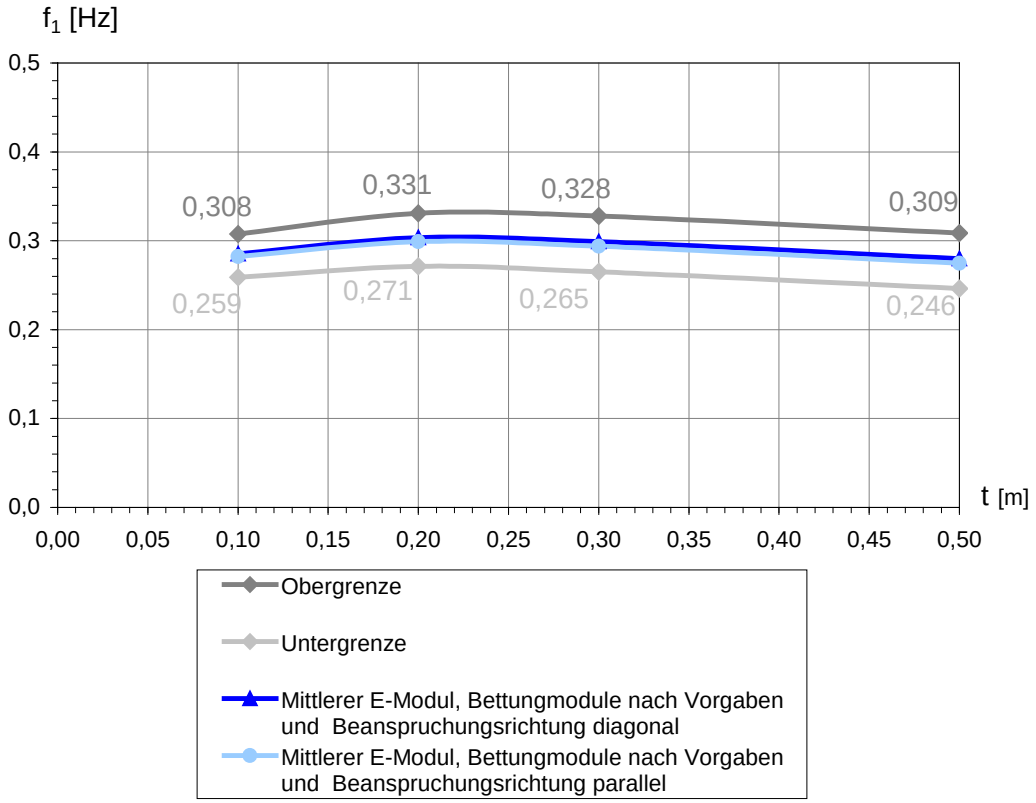


Bild 8.1-3: 1. Eigenfrequenz in Abhängigkeit von der Wandungsstärke t des UHFFB Turms für Variante A

Die Kurven verlaufen für beide Beanspruchungsrichtungen nahezu deckungsgleich, womit diese die 1. Eigenfrequenz nur minimal beeinflusst. Die Bandbreite der 1. Eigenfrequenz reicht von 0,246 bis 0,331 Hz. Im Vergleich hierzu liegt die 1. Eigenfrequenz der Referenzvariante mit Stahlturm im Bereich von 0,297 bis 0,346 Hz und damit um 5 bis 20 % höher. Alle Kurven weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Die 1. Eigenfrequenz steigt mit zunehmender Wandungsstärke von t = 100 mm bis 200 mm zunächst an und fällt im weiteren Verlauf bis t = 500 mm wieder nahezu auf den Wert von t = 100 mm ab.

Im Bild 8.1-4 ist für die Variante A die 1. Eigenfrequenz in Abhängigkeit vom vertikalen Bettungsmodul k_{sv} mit einen konstant angenommenen horizontalen Bettungsmodul k_{sh} = 6 MN/m³ nach Tabelle 2.3-1 für unterschiedliche Wandungsstärken des UHFFB Turms aufgetragen. Es sind jeweils die Verläufe der Ober- und Untergrenzen angegeben.

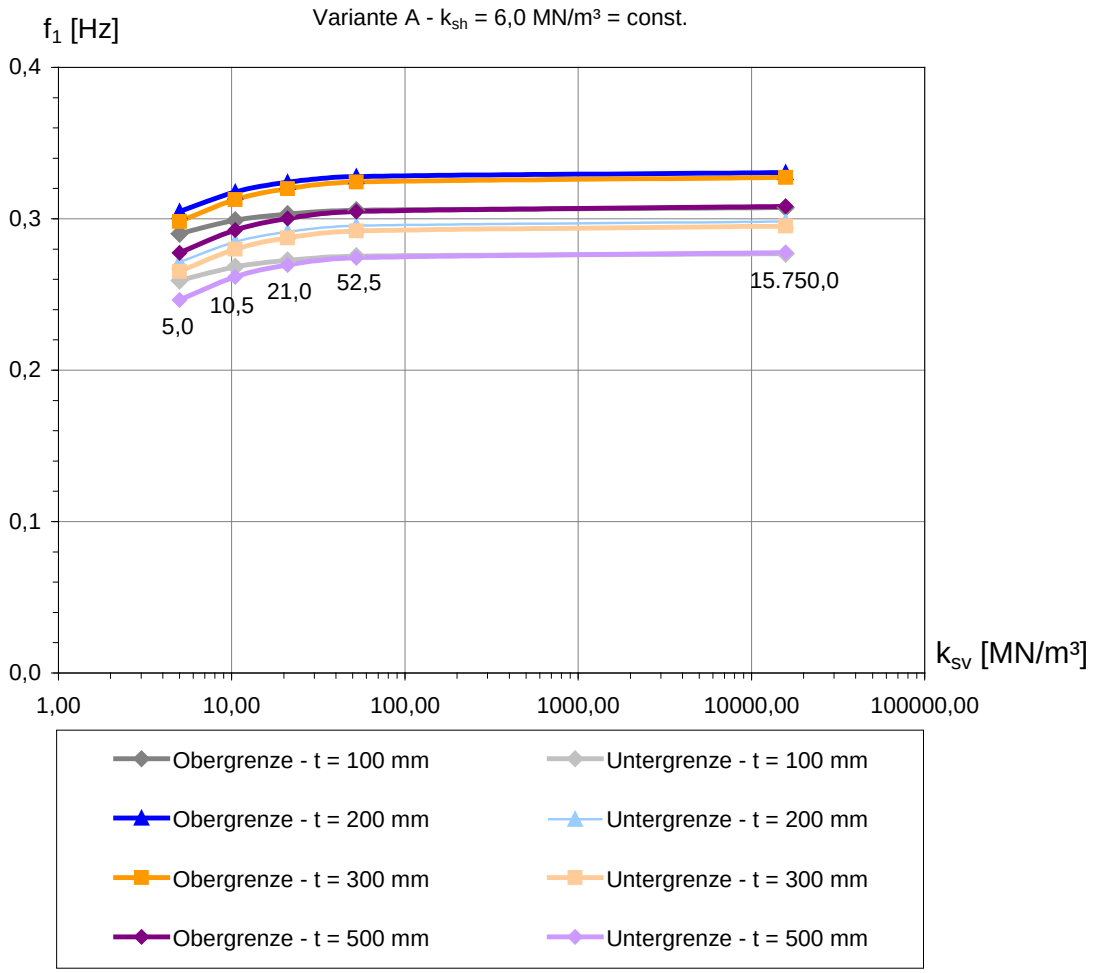


Bild 8.1-4: 1. Eigenfrequenz in Abhängigkeit vom vertikalen Bettungsmodul k_{sv} für unterschiedliche Wandungsstärken t des UHFFB Turms von Variante A

Alle Kurven der unterschiedlichen Wandungsstärken zeigen einen ähnlichen Verlauf. Bis zu einem vertikalen Bettungsmodul k_{sv} von 52,5 MN/m³ steigt die 1. Eigenfrequenz unterlinear an und geht schließlich in einen nahezu horizontalen Ast über, was einer nahezu vollständigen Einspannung im Gründungsbereich entspricht. Ein analoger Verlauf ergibt sich auch für die Variante B, weshalb auf eine gesonderte Darstellung verzichtet wird.

Im Bild 8.1-5 sind die Ober- und Untergrenze der 1. Eigenfrequenz in Abhängigkeit von der Wandungsstärke t vom Fundamentschaft und Turm (beide immer als identisch angenommen) aus UHFFB für die Variante B aufgetragen. Zusätzlich sind die 1. Eigenfrequenzen für einen mittleren E-Modul des UHFFB von E_{cm} = 59364 MPa, dem vorgegebenen Bettungsmodul nach Tabelle 2.3-1 und einer diagonalen als auch parallelen Beanspruchungsrichtung (vgl. Bild 8.1-1) abgebildet.

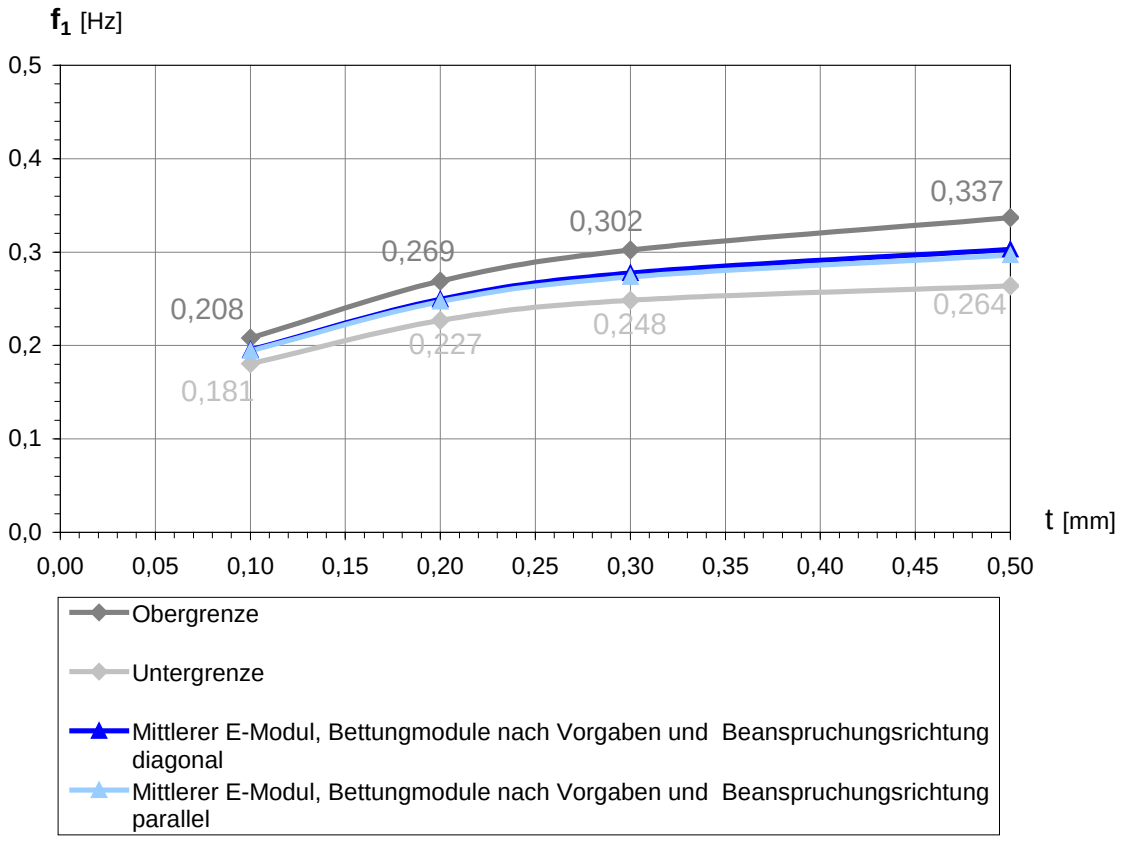


Bild 8.1-5: 1. Eigenfrequenz in Abhängigkeit von der Wandungsstärke t des UHFFB Turms für Variante B

Für beide Beanspruchungsrichtungen verlaufen die Kurven fast deckungsgleich, so dass diese die 1. Eigenfrequenz analog zu Variante A nur minimal beeinflusst. Die Bandbreite der 1. Eigenfrequenz reicht von 0,181 bis 0,337 Hz. Im Gegensatz zu Variante A steigt die 1. Eigenfrequenz mit zunehmender Wandungsstärke von t = 100 bis 500 mm kontinuierlich um ca. 62 % (Obergrenze) bzw. ca. 46 % (Untergrenze) an. Der abweichende Verlauf liegt darin begründet, dass bei der Variante A die Wandungsstärke des Fundamentschafts aus C85/90 konstant mit t = 600 mm analog zum Entwurf der Ed. Züblin AG angesetzt und nur die Wandungsstärke des Turms variiert wurde, wohingegen bei der Variante B sowohl die Wandungsstärke vom Fundamentschaft als auch vom Turm variiert wurde.

Bei identischen Wandungsstärken des UHFFB Turms und Fundamentschafts bis t $\leq$ 375 mm liegen die Obergrenzen der 1. Eigenfrequenz der Variante A um bis zu 50 % oberhalb der Obergrenze von Variante B. Die Untergrenze der Variante A liegt hierbei um bis zu 43 % oberhalb der Variante B. Ab einer Wandungsstärke von t > 375 mm fällt hingegen die 1. Eigenfrequenz der Variante A gegenüber der Variante B geringer aus, da sich dann der höhere E-Modul von UHFFB im Vergleich zu C85/90 durchzeichnet. Bei einer Wandungsstärke von t = 500 mm beträgt der Unterschied 6,8 bis 8,3 %.

8.1.4 Campbell-Diagramm der Variante A und B

Im Bild 8.1-6 und Bild 8.1-7 sind exemplarisch die Resonanzdiagramme (engl. *Campbell-Diagram*) der Variante A und B mit jeweils einer Wandungsstärke von t = 200 mm basierend auf der Parameterstudie von Abschnitt 8.1.3 abgebildet. Auf der Abszisse ist die Drehzahl [min^{-1}] und auf der Ordinate die Frequenz [Hz] aufgetragen. Der Streubereich der 1. Eigenfrequenz f_1 der Gesamtstruktur ist jeweils mit roter Farbe markiert. Zum Vergleich ist auch der Streubereich der 1. Eigenfrequenz der Referenzanlage mit Stahlturm (blau unterlegt) eingetragen. Zusätzlich sind die Verläufe der Rotorfrequenz f_R (1P Erregung) und die Blattdurchgangsfrequenz f_B (3P Erregung) in Abhängigkeit von der Drehzahl aufgetragen mit einem üblichen Streubereich von ±10 %. Der Drehzahlbereich der betrachteten OWEA liegt zwischen 4,5 bis 14,8 min^{-1} bei einem Windgeschwindigkeitsbereich von 4 bis 25 m/s. Ab einer Drehzahl von 4,5 min^{-1} bzw. Windgeschwindigkeit von 4 m/s wird Strom produziert. Die Stromproduktion nimmt mit steigender Drehzahl und Windgeschwindigkeit zu. Bei einer Nenndrehzahl von 14,8 min^{-1} bzw. einer Nennwindgeschwindigkeit von 12,5 m/s wird die Nennleistung der OWEA von 5 MW erreicht. Diese bleibt konstant bei einer Windgeschwindigkeit von 12,5 bis 25 m/s. Die zuvor erläuterten Betriebsbereiche sind in den Diagrammen gekennzeichnet.

In Abhängigkeit vom Verhältnis der 1. Eigenfrequenz zur Rotorfrequenz f_R bzw. zur Blattdurchgangsfrequenz f_B werden drei Bereiche bei der Auslegung der Gesamttragstruktur für Windenergieanlagen unterschieden (vgl. Bild 8.1-6 und Bild 8.1-7):

- „soft-soft“-Auslegung: $f_1 < f_R$
- „soft-stiff“-Auslegung: $f_R < f_1 < f_B$
- „stiff-stiff“-Auslegung: $f_1 > f_B$

Die Referenzanlage mit Stahlturm und einer 1. Eigenfrequenz von 0,297 bis 0,346 Hz liegt im Drehzahlbereich bis 7,6 min^{-1} im „stiff-stiff“ und bis 14,8 min^{-1} im „soft-stiff“ Auslegungsbereich. Die Untergrenze der 1. Eigenfrequenz liegt immer oberhalb des Streubereichs der Rotorfrequenz (1P).

Die Variante A mit einem UHFFB Turm hat einen Streubereich der 1. Eigenfrequenz von 0,271 bis 0,331 Hz. Bei einer Drehzahl bis 7,5 min^{-1} liegt die Variante A im „stiff-stiff“ und für höhere Drehzahlen im „soft-stiff“ Bereich. Bis zu einer Drehzahl von 14,8 min^{-1} verläuft der Streubereich der 1. Eigenfrequenz ebenfalls oberhalb des Streubereichs der Rotorfrequenz (1P).

Der Überschneidungsbereich von Variante B mit der Blattdurchgangsfrequenz (3P) liegt im Drehzahlbereich bis 6 min^{-1}. Im Gegensatz zur Referenz und Variante A überschneidet sich bei Variante B ab einer Drehzahl von 12,2 min^{-1} der Streubereich der 1. Eigenfrequenz mit dem Bereich der Rotorfrequenz. Neben Resonanzeffekten würde bei dieser Variante auch die Stromproduktion erheblich beeinträchtigt, da die Nennleistung der Anlage von 5 MW überhaupt nicht ausgenutzt werden könnte.

Der Kreuzungsbereich der 1. Eigenfrequenz mit dem Streubereich der Blattdurchgangsfrequenz (3P) kann mit Hilfe einer abgestimmten Regelungstechnik bei allen Varianten durchfahren werden ohne wesentliche Einbußen bei der Stromerzeugung, da die zugehörigen Drehzahlbereiche im unteren Abschnitt des Nenndrehzahlbereichs der OWEA liegen. Die Resonanzdiagramme der Varianten A und B zeigen, dass in jedem Fall bei dem Entwurf der Tragstruktur der OWEA deren 1. Eigenfrequenz oberhalb des Rotorfrequenzbereichs (1P) liegen muss, d.h. $f_1 > 0{,}27$ Hz. Hierzu ist durch entsprechende Maßnahmen eine ausreichend hohe Gründungsfedersteifigkeit sicherzustellen und die Steifigkeit der Tragstruktur entsprechend auszulegen. Des Weiteren sind durch die Produktionskontrolle des UHFFB und des hochfesten Betons die Schwankungen der Materialparameter wie z.B. des E-Moduls so gering wie möglich zu halten. Andernfalls kann die Leistung der OWEA nicht optimal ausgeschöpft werden.

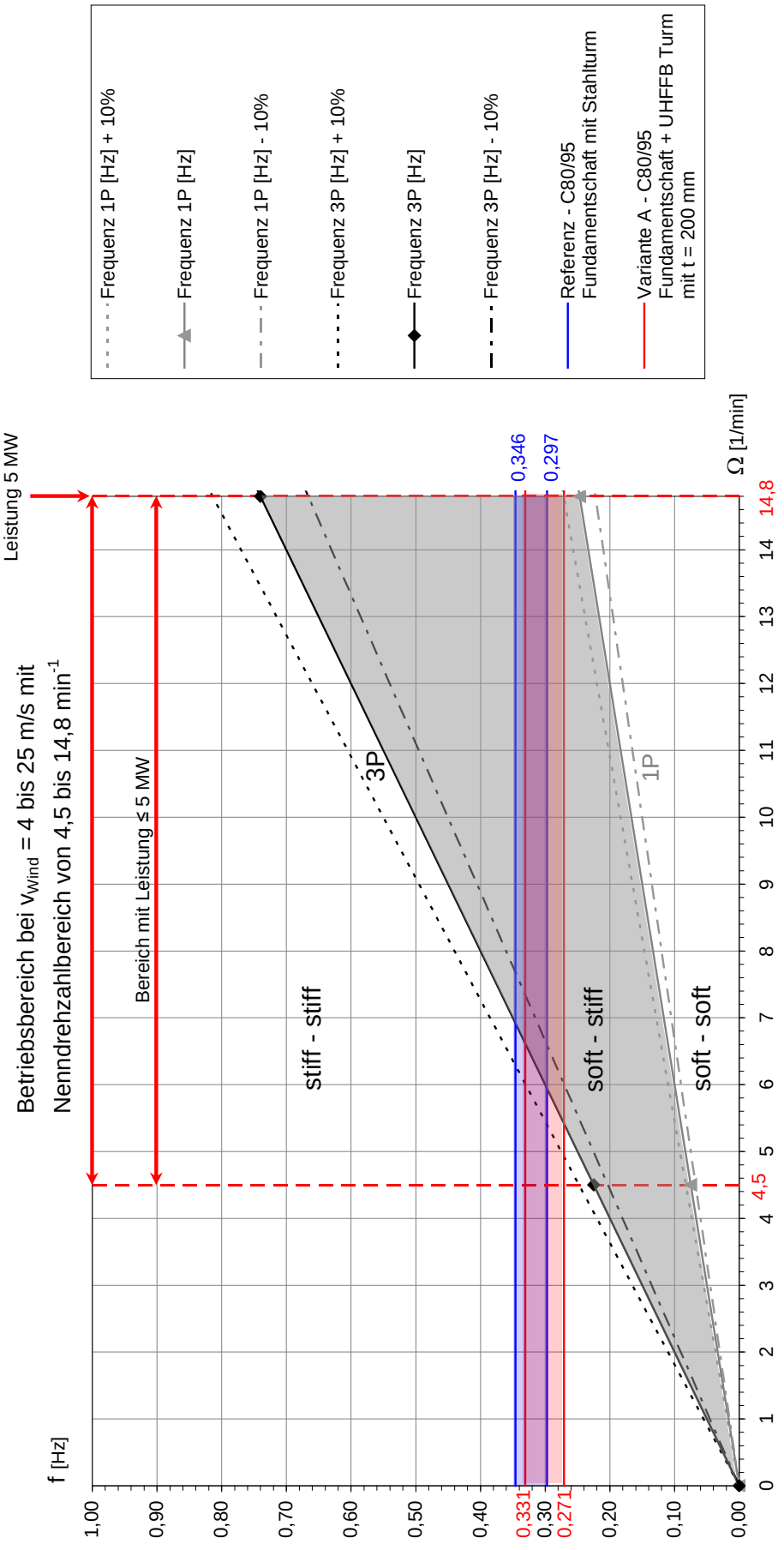


Bild 8.1-6: Resonanzdiagramm (engl. *Campbell-Diagram*) für Variante A mit C80/95 Fundamentschaft und Turm aus UHFFB mit t = 200 mm Wandungsstärke

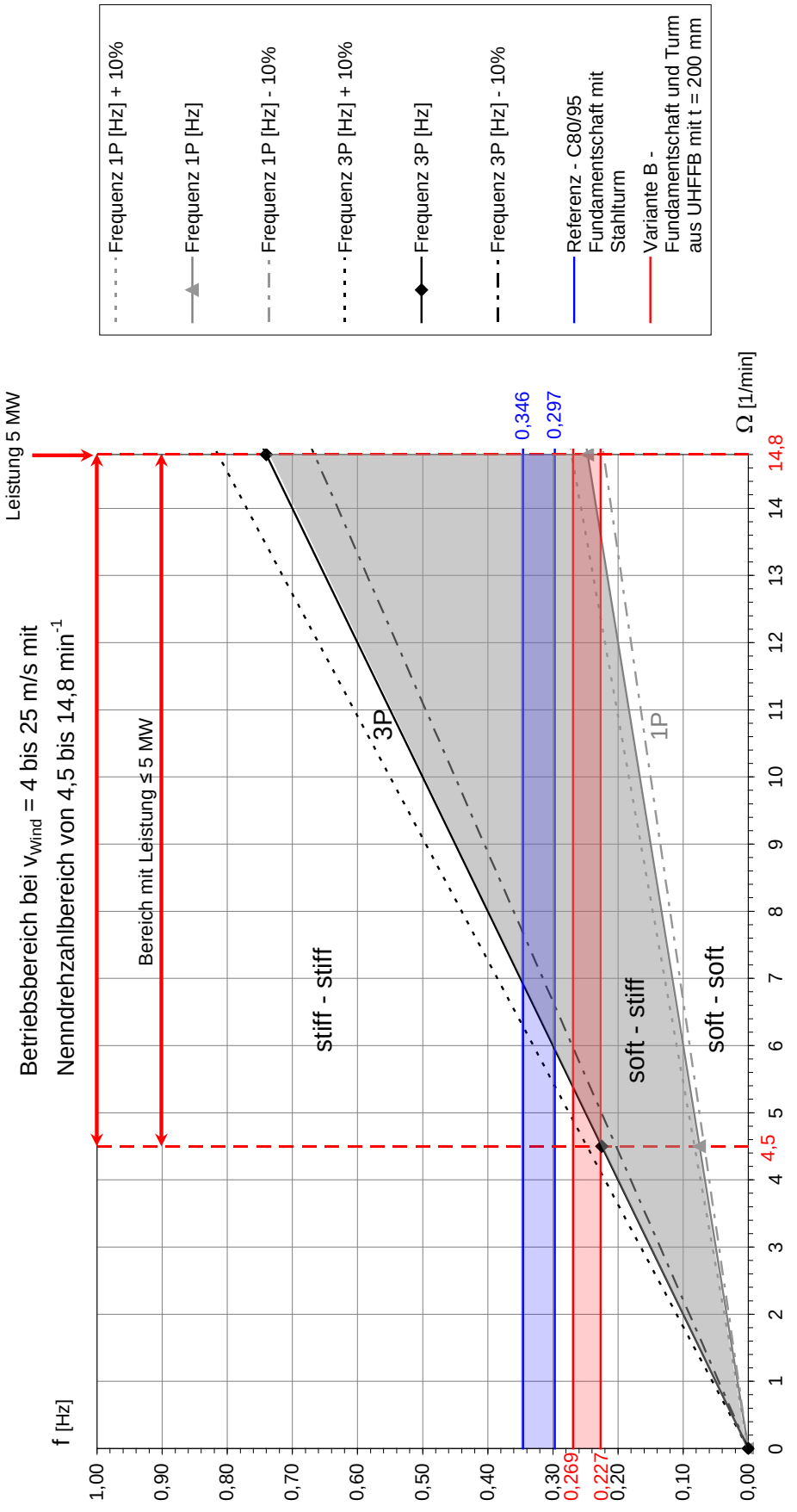


Bild 8.1-7: Resonanzdiagramm (engl. *Campbell-Diagram*) für Variante B mit Fundamentschaft und Turm aus UHFFB mit t = 200 mm Wandungsstärke

8.2 Gesamtdynamische Berechnung

8.2.1 Allgemeines

Anders als im Bauwesen allgemein üblich und in der Mehrzahl der Fälle zulässig, können die Belastungen moderner Windenergieanlagen der Multimegawattklasse nicht anhand statischer Ersatzmodelle ermittelt werden. Stattdessen ist eine gesamtdynamische Berechnung notwendig, die die stochastischen Einflüsse aus den Umgebungsbedingungen, der Strukturdynamik und der aktiven Betriebsführung der Windenergieanlage berücksichtigt.

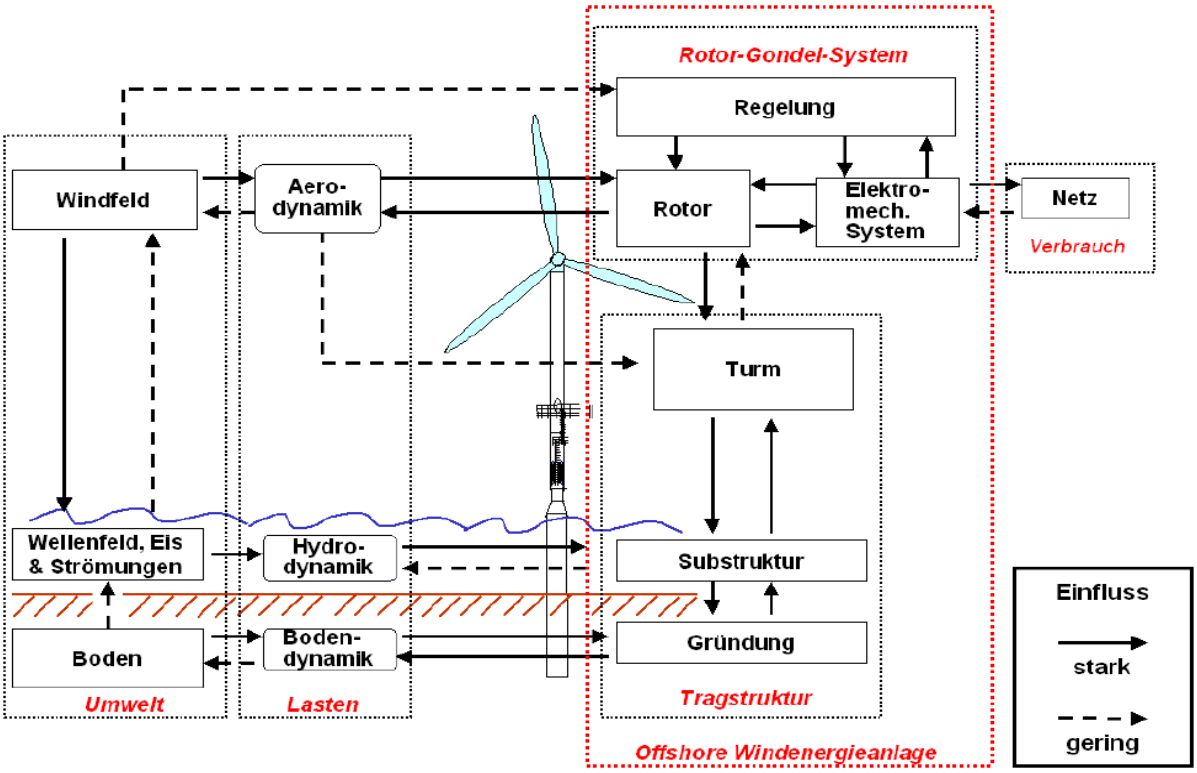


Bild 8.2-1: Einfluss auf die Belastung von OWEA [Stiftungslehrstuhl Windenergie (2010)]

Entsprechende Berechnungen werden daher mit speziellen für die Windenergiebranche entwickelten Simulationsprogrammen durchgeführt. Die Betrachtungen erfolgen hierbei im Zeitbereich, wobei die maßgebenden Belastungen durch eine entsprechende Auswertung im Anschluss an die gesamtdynamische Berechnung ermittelt werden.

8.2.2 Simulationsprogramm Flex 5

Zur Berechnung der auf Turm- und Gründungsstruktur einwirkenden Lasten, die aus Wind, Wellen und Betrieb der OWEA resultieren, wird im Rahmen dieses Forschungsprojekts das Simulationsprogramm Flex 5 genutzt. Der Stiftungslehrstuhl Windenergie (SWE) verfügt über eine kommerziell nutzbare Lizenz dieses Programms, welches ursprünglich an der Technischen Universität Kopenhagen entwickelt wurde. Das Simulationsprogramm Flex5 wird inklusive des zugehörigen Quellcodes verkauft, so dass jeder Nutzer den Funktionsumfang erweitern kann. Die Version des SWE wurde in den letzten Jahren unter anderem im Forschungsprogramm „Offshore Code Comparison Collaboration“ im Rahmen der “IEA Wind Annex XXIII – Subtask 2“ von Jonkman et al. (2007) validiert, so dass die Funktion und Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden können.

Im Simulationsprogramm Flex 5 werden die komplette Rotor-Gondel-Einheit, der Turm und das Fundament mit ausschließlich 28 Freiheitsgraden beschrieben. Dies führt zu vergleichsweise kurzen Simulationszeiten. Die als flexible Körper modellierten Rotorblätter und der Turm werden mit Hilfe einer modalen Reduktion auf ihre ersten vier Eigenmoden reduziert. Dies sind für die Rotorblätter jeweils zwei Eigenmoden in Schlag- und Schwenkrichtung und für den Turm jeweils zwei Biegeeigenmoden in Längs- und Querrichtung. Gondel, Triebstrang und Nabe werden als Starrkörper modelliert, die über flexible Gelenke miteinander verbunden sind. Der Triebstrang wird durch zwei Biegesteifigkeiten und eine Torsionssteifigkeit beschrieben. Ein weiterer Freiheitsgrad beschreibt die Rotordrehung, das heißt die Rotation des Triebstrangs um seine Längsachse. Die Gondel besitzt jeweils einen Freiheitsgrad für die Nick- und die Gierbewegung. Die einzelnen Freiheitsgrade sind im Folgenden im Detail aufgelistet:

- Fundament:
  - DOF 01: Translation of foundation centre in X direction (tower axis)
  - DOF 02: Translation of foundation centre in Z direction (wind direction)
  - DOF 03: Rotation around the Y-axis (nodding of nacelle)
  - DOF 04: Translation of foundation centre in Y direction (lateral to wind direction)
  - DOF 05: Rotation around the DOF-3 deformed Z-axis (rolling of foundation)
  - DOF 06: Rotation around the DOF-5 deformed X-axis (torsion of foundation)
- Turm:
  - DOF 07: Bending, tower top deflection: 1st mode-shape, translation along Z direction, rotation around Y-axis
  - DOF 08: Bending, tower top deflection: 2nd mode-shape, rotation around Y-axis
  - DOF 09: Bending, tower top deflection: 1st mode-shape, translation along Y direction, rotation around Z-axis
  - DOF 10: Bending, top deflection: 1st mode-shape, rotation around Z-axis
- Gondel:
  - DOF 11: Yaw rotation: Rotation around X-axis (tower axis)
  - DOF 12: Tilt rotation: Rotation around Y-axis (nodding of nacelle)
- Hauptwelle / Antriebsachse
  - DOF 13: Main shaft rotation: Rotation of main shaft around its axis (rotor axis)

  - DOF 14: Bending at the front bearing of the main shaft: Rotation around X-axis of the main shaft
  - DOF 15: Bending at the front bearing of the main shaft: Rotation around Y-axis of the main shaft
  - DOF 28: Torsion of the main shaft: Rotation around z-axis)
- Rotorblätter:
  - DOF 16: Blade-1 deflections (V1-System): 1st flap mode, Z
  - DOF 17: Blade-1 deflections (V1-System): 2nd flap mode, Z
  - DOF 18: Blade-1 deflections (V1-System): 1st flap mode, Y
  - DOF 19: Blade-1 deflections (V1-System): 2nd flap mode, Y
  - DOF 20: Blade-2 deflections (V1-System): 1st flap mode, Z
  - DOF 21: Blade-2 deflections (V1-System): 2nd flap mode, Z
  - DOF 22: Blade-2 deflections (V1-System): 1st flap mode, Y
  - DOF 23: Blade-2 deflections (V1-System): 2nd flap mode, Y
  - DOF 24: Blade-3 deflections (V1-System): 1st flap mode, Z
  - DOF 25: Blade-3 deflections (V1-System): 2nd flap mode, Z
  - DOF 26: Blade-3 deflections (V1-System): 1st flap mode, Y
  - DOF 27: Blade-3 deflections (V1-System): 2nd flap mode, Y

Das Fundament wird mit Hilfe von sechs Freiheitsgraden (drei translatorische und drei rotatorische) beschrieben. Für die Rotor-Gondel-Einheit und den Turm ergeben sich somit 22 Freiheitsgrade.

Nach dem Lösen der Bewegungsgleichung erfolgt die Rücktransformation der 28 Freiheitsgrade in Schnittgrößen und Verschiebungen durch das Verfahren der Krafteinflussfaktoren [Petersen (2000)]. Für die Berechnungen im Rahmen dieses Projektes wurden zudem die Freiheitsgerade 14 und 15 deaktiviert, da die Durchbiegung der Hauptwelle durch nahe beieinander liegende Auflagerpunkte bei einer vergleichsweise modernen Anlage eine eher untergeordnete Rolle spielt und daher vernachlässigt werden kann. Zudem werden bei der Berechnung von Gründungsstrukturen als Monopile-Gründung die Freiheitsgerade 1 und 6 deaktiviert, da die vertikale Verschiebung der Fundamentachse sowie die Torsion des Fundamentes entlang der vertikalen Achse vernachlässigt werden.

Die aerodynamischen Kräfte auf die Rotorblätter werden in Flex 5 mit Hilfe der Blattelementmethode berechnet. Bei der Simulation einer OWEA wird für die Berechnung der hydrodynamischen Kräfte die Morison Gleichung verwendet. Bei der Eigenfrequenzberechnung wird angenommen, dass sich der Rotor nicht dreht und es werden weder Strukturdämpfung noch aerodynamische Dämpfung berücksichtigt.

Die Simulation der OWEA erfolgt im Zeitbereich, wobei vorab ein vordefiniertes Windfeld erzeugt wird. In diesem Windfeld sind für jeweils 660 Sekunden in definierten Zeitabständen die jeweiligen dreidimensionalen Windvektoren an vorgegebenen Knotenpunkten gespeichert. Dieses (normierte) Windfeld bildet den Wind als stochastischen Prozess hinreichend genau ab. Da das Windfeld auf die höchste Windgeschwindigkeit normiert wird, und die kurzzeitige Veränderung der Windgeschwindigkeit stochastisch erfolgt, können Windprofil, Windrichtung und mittlere Windgeschwindigkeit während des Berechnungslaufes vorgegeben werden und sind nicht Bestandteil der Informationen im Windfeld.

Vor Beginn der Simulation können in Flex 5 bestimmte Sensoren aktiviert werden, welche während der Simulation in eine Ergebnisdatei geschrieben werden. Üblicherweise sind dieses neben den Umgebungsbedingungen, wie Windgeschwindigkeit und Windrichtung, Wasserstand und Wellenhöhe, Strömungsgeschwindigkeit, die anlagenspezifischen Daten, wie Rotordrehzahl, Generatordrehzahl, Generatordrehmoment, erzeugte Energie, Blattverstellwinkel sowie die jeweils zugehörigen Beschleunigungen bzw. Geschwindigkeiten und die von der Anlagenregelung vorgegebenen Sollwerte (Generatormoment und Blattverstellwinkel). Weiterhin lassen sich an den Rotorblättern, am Turm und der Monopile-Gründung Sensoren zur Ausgabe der Schnittgrößen und Verschiebungen aktivieren. Alle aktivierten Werte stehen nach Beendigung der Simulation zum Postprocessing zur Verfügung, so dass die maßgebenden Maximalbelastungen aber auch die Schwingungskollektive ermittelt werden können.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde die Flex 5 Version des SWE derart geändert, dass neben den Schnittgrößen auch die Verschiebungen des Turmes und der Monopile-Gründung als Ausgabesensoren zur Verfügung standen.

8.2.3 Modellierung der OWEA mit Flex 5

Das Simulationsprogramm Flex 5 besteht aus einer Vielzahl an Dateien, mit Hilfe derer die Eingangsdaten generiert werden (Preprocessing), die Berechnung durchgeführt wird und im Anschluss daran eine Auswertung vorgenommen werden kann (Postprocessing). Der Ablauf sowie die dafür notwendigen Dateien sind in Bild 8.2-2 in Form eines Flussdiagramms dargestellt.

Im Folgenden wird auf die Besonderheiten bei der Eingabe der Lasten aus Wind und Welle, der Struktur bestehend aus Schwerkraftfundament und UHFFB Turm, der Regelung der OWEA sowie des Rotor-Gondel-Systems näher eingegangen.

Lasten aus Wind und Welle

Für die Simulation der Umgebungsbedingungen aus Wind und Welle wird ein Wind- und Wellenfeld benötigt.

Zur Generierung des Wellenfeldes mit Hilfe eines Wellengenerators müssen in einem ersten Schritt grundlegende Angaben zu einer Welle hinterlegt werden, ob es sich um eine reguläre oder irreguläre Welle handelt. Für eine reguläre Welle muss nur die Wellenhöhe und die Periode angeben werden. Für die Erzeugung einer irregulären Welle muss neben der signifikanten Wellenhöhe und der Peak-Periode auch das Spektrum, die Abtastrate des Spektrums und eine Zufallszahl für die Phasenverschiebung angeben werden. Dabei werden die signifikante Wellenhöhe und die Peak-Periode anhand der Scatter-Diagramme (vgl. Abschnitt 7.4) bestimmt. Nach der Generierung des Wellenfelds steht die Wellenkinematik für die weitere Berechnung zur Verfügung.

Die Erzeugung des Windfeldes erfolgt in gleicher Weise. Mit Hilfe eines Windgenerators wird ein 3D turbulentes Windfeld auf der Grundlage des Kaimal-Spektrums [IEC 61400-1 (2005)] erzeugt, wobei für jede Raumrichtung ein eigens Kaimal-Spektrum erzeugt wird. Diese drei Spektren werden für die weitere Berechnung zu einem 3D turbulentem Windfeld zusammengesetzt.

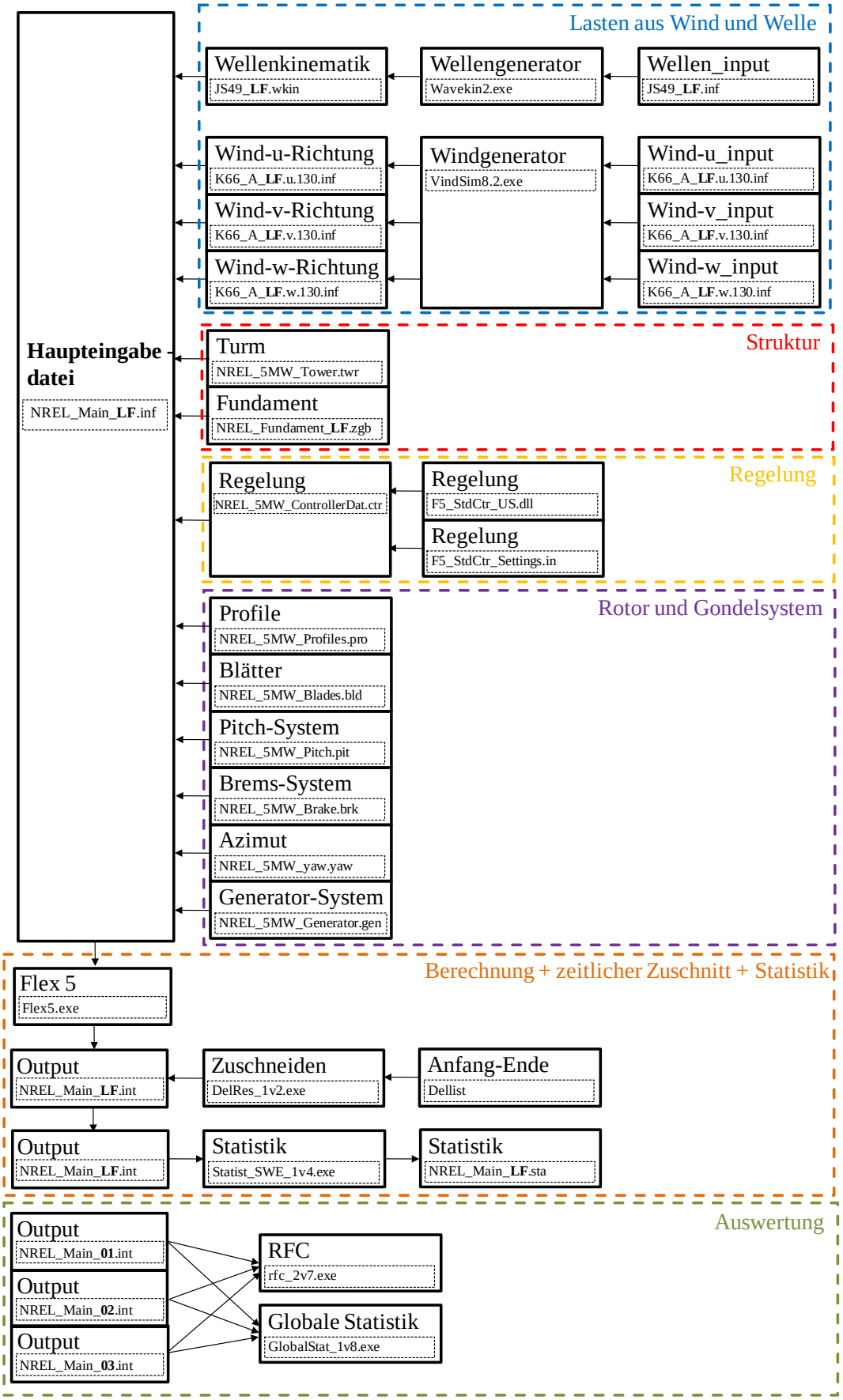
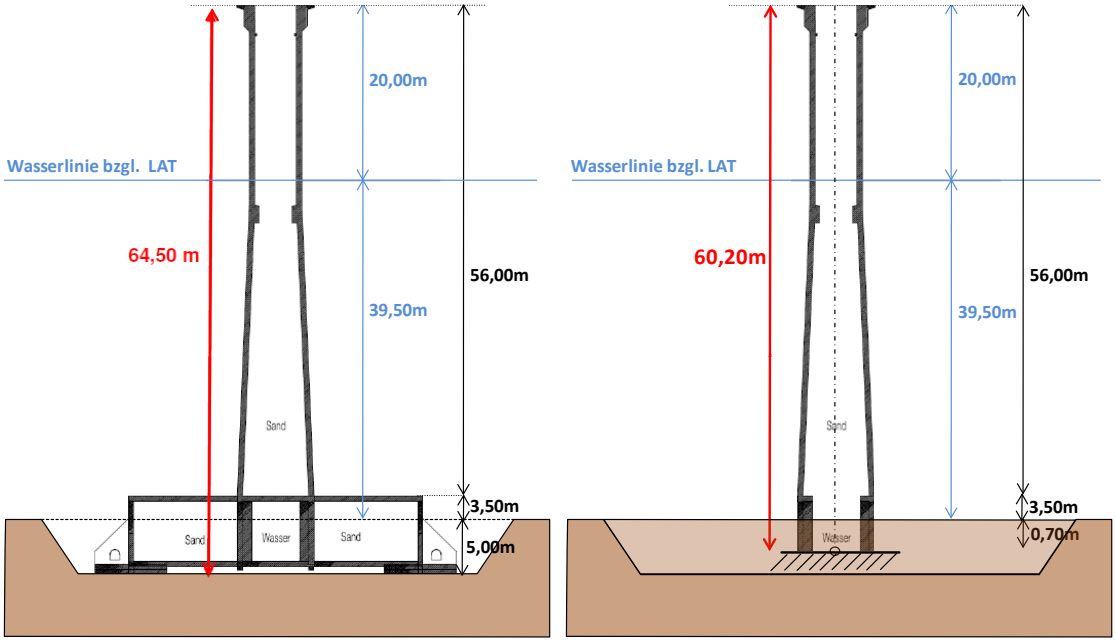


Bild 8.2-2: Flussdiagramm zu Flex 5

Struktur

Mit dem Simulationsprogramm Flex 5 können lediglich OWEA simuliert werden, welche eine Monopile-Gründung aufweisen. Das Schwerkraftfundament der Ed. Züblin AG mit den orthogonal angeordneten, vorgespannten Stahlbetonhohlkästen (vgl. Abschnitt 3.4.4) kann daher nicht modelliert werden. Weiterhin ist es durch die Reduktion des Modells auf 28 Freiheitsgerade nicht möglich, bei der Modellierung eines Monopiles Bodenfedern zu definieren. Es kann nur eine vollständig eingespannte Lagerung des Fundamentes simuliert werden. Um die dynamischen Eigenschaften trotzdem richtig zu erfassen, wird das in der Öl- und Gasindustrie verwendete Konzept der "Effective-Fixity-Length“ angewendet. Bei diesem Konzept wird unterstellt, dass die Berechnungen im Zeitbereich hinreichend genau sind, wenn statt der Modellierung des Monopiles mit Bodenfedern der Monopile mit etwa 4 bis 6-mal der Länge des Pfahldurchmessers unterhalb des Meeresbodens als vollständig eingespannt angenommen wird. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Eigenfrequenz des Ersatzsystems möglichst wenig vom Ursprungssystem abweicht. Zaajier (2006) hat mehrere Modellierungsmöglichkeiten nach dem Konzept der „Effective-Fixity-Length“ miteinander verglichen. Bei einer Einspannlänge des 4-fachen Durchmessers zeigte sich die beste Übereinstimmung der ersten Struktureigenfrequenzen.

Um den Einfluss der Lagerungsbedingungen auf die Eigenfrequenzen zu untersuchen, wurde ein FEM-Modell der Tragstruktur aus Schwerkraftfundament und UHFFB Turm erstellt und die ersten Eigenfrequenzen berechnet. Die Massen der Rotorblätter, Gondel und Nabe wurden dabei als Punktmassen am Turmkopf idealisiert. Basierend auf den mit dem FEM-Modell berechneten Eigenfrequenzen wurde dann in Flex 5 die Einspannlänge der Monopile-Gründung unterhalb des Meeresboden so gewählt, dass die mit Flex 5 berechneten ersten Eigenfrequenzen am Ersatzsystem mit denen des FEM-Modells möglichst genau übereinstimmen. Wegen der hohen Steifigkeit der Stahlbetonhohlkästen wurde nur eine sehr geringe Einspannlänge von 0,70 m benötigt (vgl. Bild 8.2-3), wobei die ersten 0,10 m oberhalb der Einspannung die Wandstärke des Ersatzsystems 1,125 m betrug, um der erhöhten Steifigkeit der Stahlbetonkästen Rechnung zu tragen.



a) Schwerkraftfundament

b) Monopile-Gründung mit entsprechender Einspannlänge als Ersatzsystem für die Modellierung in Flex 5

Bild 8.2-3: Modellierung des Fundaments

Auf Grundlage der ausgeführten Überlegungen wurde die WEA in Flex 5 gemäß den in Bild 8.2-4 ersichtlichen Eingabedaten modelliert. Die Sandfüllung im inneren des Fundaments wurde in Form von Einzelmassen berücksichtigt, wobei bedingt durch die Wahl der Stationen die Einzelmassen an keiner Stelle einen größeren Abstand als 6,0 m aufweisen. Diese Näherung schien bezüglich des dynamischen Verhaltens der OWEA und zur Ermittlung der Schnittgrößen im Turm hinreichend genau. Da innerhalb der Berechnungsroutinen von Flex 5 die gesamte im Fundament vorhandene Wassermasse zur modalen Massenmatrix addiert wird, wird die Wichte der Sandfüllung unter Auftrieb angesetzt. Somit ist im Inneren des Monopiles sowohl das im Porenraum des Sandes befindliche Wasser, als auch die Sandfüllung selber erfasst.

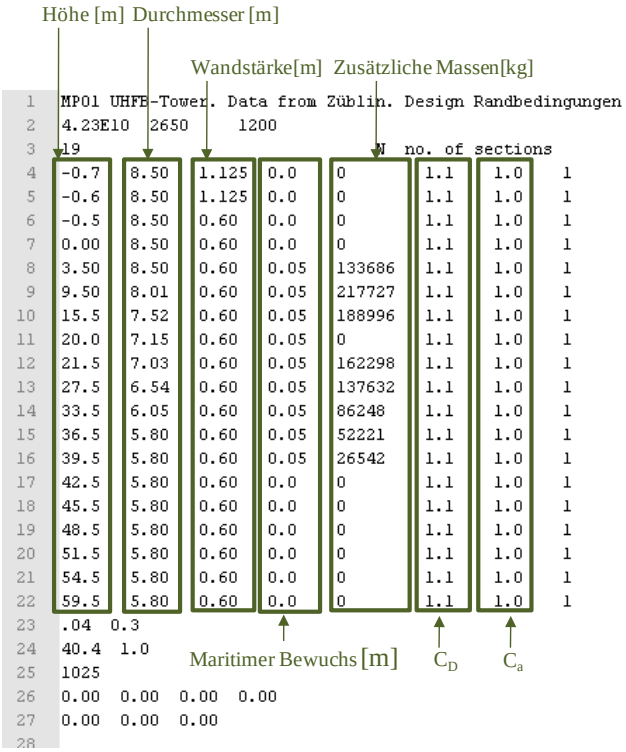


Bild 8.2-4: Flex 5 Eingabedatei für das Fundament

Daneben wurde auch der maritime Bewuchs berücksichtigt. Infolge des maritimen Bewuchses kann von einer rauen Oberfläche ausgegangen werden. Die Reynolds Zahl liegt für alle Querschnitte über $2 \cdot 10^5$, so dass sich aus der Tabelle 8.2-1 die hydrodynamischen Beiwerte C_D und C_M zu 1,1 und 2,0 ergeben.

Tabelle 8.2-1: Hydrodynamische Beiwerte C_D und C_M nach Germanischer Lloyd (2005)

Reynolds number	**smooth cylinder**		**rough cylinder**	
	C_D	C_M	C_D	C_M
$\leq 2 \cdot 10^5$	1.2	2.0	1.2	2.0
$> 2 \cdot 10^5$	0.7	1.6	1.1	2.0

Der Beiwert C_a ergibt sich dann nach folgender Gleichung:

$$C_M = 1 + C_a \qquad (8\text{-}3)$$

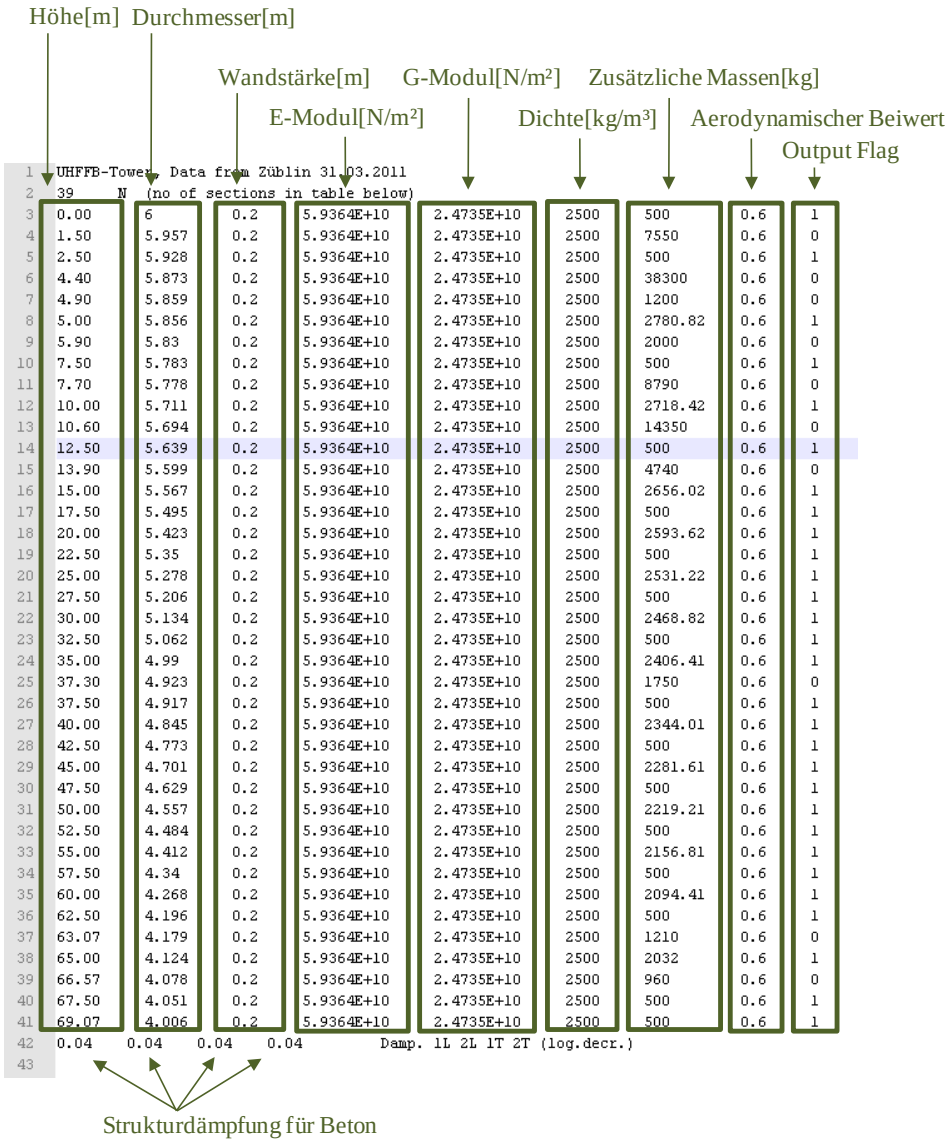
In Bild 8.2-5 sind die Eingabedaten für die Modellierung eines UHFFB Turms mit konischen Geometrie und einer Wandstärke von 200 mm dargestellt.

Die in Bild 8.2-5 angegeben zusätzlichen Massen handelte es sich gelegentlich um die Summe mehrere Massen unterschiedlicher Herkunft. Zu unterscheiden sind Einzelkomponenten, wie Plattformen und Ausrüstungen, die an definierten Höhen liegen, und kontinuierlichen Zusatzmassen, wie Leitern oder Kabel (vgl. Tabelle 8.2-2). Kontinuierliche Zusatzmassen konnten in Flex 5 nicht angegeben werden. Deshalb wurden diese Massen alle 2,5 m zu einer punktuellen Masse zusammengefasst. Mit Berücksichtigung des Ortsfaktors von 9,81 m/s² ergab sich so eine Zusatzmasse von 500 kg alle 2,5 m. Alle 5,0 m wurde eine weitere Zusatzmasse definiert, die der geschätzten Masse der Spanngliedführungen entsprach. Hierbei wurde angenommen, dass der Druckring der Spanngliedführung immer an der Innenseite des Segmentringes anschließt.

Zur Berücksichtigung des Schwingungsverhaltens des UHFFB Turms muss in der Eingabedatei das logarithmische Dämpfungsdekrement δ_s für die Strukturdämpfung des verwendeten Materials angegeben werden. Da für UHFFB noch keine Werte vorliegen, wurde der Wert für hochfesten Beton nach DIBt (2004) angenommen. Dort wird für δ_s ein Wert von 0,4 vorgeschlagen.

Regelung

Neben der mechanischen Modellierung der Windenergieanlage ist es für die Simulation auch erforderlich, das Regelungsverhalten abbilden zu können. Der sogenannte Regler einer WEA fungiert quasi als Bordcomputer und steuert neben der Windausrichtung auch das An- und Abfahren der WEA. Weiterhin gibt der Regler das Generatorsollmoment und den Sollpitchwinkel der Rotorblätter vor. Damit wird gewährleistet, dass die Anlage zu jedem Zeitpunkt möglichst nahe an ihrem optimalen Betriebspunkt operiert. Umgekehrt bedeutet dies auch, dass der Regelalgorithmus nicht unerhebliche Auswirkungen auf die Anlage wirkenden Lasten hat. So führt beispielsweise ein sehr träge arbeitender Regler oft zu geringeren Ermüdungslasten, aber zu höheren Extremlasten. Auch ist es möglich Resonanzen innerhalb der WEA durch gezielte Eingriffe des Reglers zu vermeiden. So steuert der Regelalgorithmus bei vielen Windenergieanlagen der Multimegawattklasse beispielsweise die Drehgeschwindigkeit des Rotors gezielt, um Resonanzschwingungen des Turmes zu unterbinden. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde ein am SWE programmierter Regler erstellt, der neben der einfachen Regelung von Generatormoment und Pitchwinkel auch in der Lage ist, das An- und Abfahren der WEA sowie verschiedene Notstopps zu simulieren.




```
UHFFB-Tower  Data from Züblin 31.03.2011
39     N  (no of sections in table below)
0.00    6       0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
1.50    5.957   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    7550    0.6     0
2.50    5.928   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
4.40    5.873   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    38300   0.6     0
4.90    5.859   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    1200    0.6     0
5.00    5.856   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    2780.82 0.6     1
5.90    5.83    0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    2000    0.6     0
7.50    5.783   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
7.70    5.778   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    8790    0.6     0
10.00   5.711   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    2718.42 0.6     1
10.60   5.694   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    14350   0.6     0
12.50   5.639   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
13.90   5.599   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    4740    0.6     0
15.00   5.567   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    2656.02 0.6     1
17.50   5.495   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
20.00   5.423   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    2593.62 0.6     1
22.50   5.35    0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
25.00   5.278   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    2531.22 0.6     1
27.50   5.206   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
30.00   5.134   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    2468.82 0.6     1
32.50   5.062   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
35.00   4.99    0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    2406.41 0.6     1
37.30   4.923   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    1750    0.6     0
37.50   4.917   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
40.00   4.845   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    2344.01 0.6     1
42.50   4.773   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
45.00   4.701   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    2281.61 0.6     1
47.50   4.629   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
50.00   4.557   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    2219.21 0.6     1
52.50   4.484   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
55.00   4.412   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    2156.81 0.6     1
57.50   4.34    0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
60.00   4.268   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    2094.41 0.6     1
62.50   4.196   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
63.07   4.179   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    1210    0.6     0
65.00   4.124   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    2032    0.6     1
66.57   4.078   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    960     0.6     0
67.50   4.051   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
69.07   4.006   0.2     5.9364E+10      2.4735E+10      2500    500     0.6     1
0.04    0.04    0.04    0.04            Damp. 1L 2L 1T 2T (log.decr.)
```

Bild 8.2-5: Flex 5 Eingabedatei für den UHFFB Turm

Tabelle 8.2-2: Zusätzliche Turmmassen

Höhenlage der Einzelkomponenten (bezogen auf UK Turm)	Einzelkomponenten (Plattformen, Ausrüstungen etc.)	kontinuierliche Zusatzmasse (Kabel, Leiter etc.)
[m]	[kN]	1,962 kN/m
1,50	74,07	
4,40	375,72	
4,90	11,77	
5,90	19,62	
7,70	86,23	
10,60	140,77	
13,90	46,50	
37,30	17,17	
63,07	11,87	
66,57	9,42	

Rotor-Gondel-System

Moderne Windenergieanlagen der 5 MW-Klasse sind derzeit unter anderem von den Herstellern AREVA Wind, REpower Systems AG, Vestas A.S. und Enercon erhältlich. Den vorgenannten Anlagen liegen jedoch unterschiedliche Konzepte und Bauarten zu Grunde.

Die Anlage des Herstellers Enercon beispielsweise ist eine getriebelose Anlage und verfügt daher über einen in Durchmesser und Gewicht vielfach größeren Generator als die der übrigen Hersteller. Bedingt durch die vergleichsweise große Masse der Gondel ist sie nach derzeitigem Kenntnisstand für den Einsatz auf See weitestgehend ungeeignet.

Die Anlagen der Hersteller REpower Systems AG und Vestas A.S. sind Anlagen mit sogenanntem aufgelöstem Triebstrang, was bedeutet, dass die einzelnen Bauteile innerhalb der Gondel (Antriebswelle, Getriebe, Generator und Frequenzumrichter) baulich getrennt sind. Die bauliche Trennung hat den Vorteil der separaten Auswechselbarkeit der Komponenten im Falle eines Defektes, führt aber auch zu hohen Kopfmassen, die jedoch immer noch weit unter dem Niveau von getriebelosen Anlagen liegen.

Die Firma AREVA Wind verfolgt ein Hybridkonzept der beiden vorgenannten Konzepte. Hierbei wird nicht vollständig auf ein Getriebe verzichtet, sondern das übliche schnell drehende Getriebe (n = 1/97) durch ein langsameres ersetzt, welches eine wesentlich kleinere Bauform aufweist. Zudem sind die einzelnen Komponenten derart miteinander kombiniert, dass beispielsweise Teile der Getriebeschale zugleich als Lagerung der Hauptwelle fungieren, was eine äußerst kompakte Bauweise und Gewichtsersparnis bringt. Zudem sind Frequenzumrichter und dergleichen nicht in der Gondel, sondern in der unteren Sektion des Turmes untergebracht, was die Turmkopfmasse weiter reduziert.

Für die Simulation der Windenergieanlagen stehen im Rahmen öffentlich geförderter Forschungsprojekte in der Regel keine Anlagenmodelle der Hersteller zur Verfügung. Die öffentlich verfügbaren Angaben reichen keinesfalls aus, um eine Windenergieanlage der vorgenannten Hersteller zu simulieren. Für verschiedene Studien wurde daher am „National Renewables Energie Lab“ eine Referenzturbine entwickelt, welche bereits in diversen Forschungsprojekten (z.B. EU-Projekt UpWind) eingesetzt wurde. Die Turbine ist beschrieben bei Jonkman et. al. (2009). Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde diese Turbine entsprechend den Angaben der *Design Basis* angepasst. Insbesondere wurde hierzu die Gondelmasse auf 239,4 to und die Masse der Nabe auf 62 to (ohne Rotorblätter) reduziert. Weiterhin wurden die Massenschwerpunkte gemäß den Angaben der *Design Basis* definiert und die Rotorblätter auf eine Länge von 116,0 m herunterskaliert. Bei der Skalierung wurde darauf geachtet, dass die Eigenfrequenzen der Blätter nicht verändert werden, d.h. mit der Reduzierung der Masse ging eine entsprechende Erhöhung der Steifigkeit einher. Der geringere Rotordurchmesser führte zudem zu einem Heraufsetzen der Nennwindgeschwindigkeit auf etwa 12,5 m/s, was den vorgegebenen Anlagendaten entspricht.

8.2.4 Definition der Lastfälle

In Germanischer Lloyd (2005) werden alle für die Lastrechnung benötigten Angaben definiert. Diese Richtlinie ist in der Windenergiebrache zur Zertifizierung der Windenergieanlagen weit verbreitet und wird fast ausnahmslos von Bauherren, sowie den Versicherungen und finanzierenden Banken gefordert.

Der Richtlinie kann für jeden Lastfall (DLC, engl. *Design Load Case*) entnommen werden, welche Wind- und Wellenbedingungen anzusetzen sind. Es wird zwischen Lastfällen für die Bemessung der Tragfähigkeit (engl. *Ultimate*), die mit einem U gekennzeichnet sind, und Lastfällen für die Bemessung der Ermüdung (engl. *Fatigue*), die mit einem F gekennzeichnet sind, unterschieden. Bei Tragfähigkeitslastfällen wird nochmals genauer differenziert zwischen normalen (N), extremen (E), anormalen (A) und Transport (T) Situationen. Dies wirkt sich entsprechend auf die anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwerte aus.

Lastrechnungen für Windenergieanlagen umfassen in der Regel mehrere hundert Simulationszeitreihen und werden daher bei Herstellern von Windenergieanlagen vollständig automatisiert durchgeführt, wobei die Simulationsmodelle und gegebenenfalls Umgebungsbedingungen wie z.B. Wind- und Wellenanregungen in entsprechenden Datenbanken verwaltet werden. Da eine solche Infrastruktur am SWE nicht verfügbar ist, wurde entschieden, die Untersuchungen auf die mutmaßlichen für Turm und Fundament relevanten Lastfälle zu reduzieren. Hierbei konnte auf die Simulationserfahrung des SWE aus anderen Forschungsprojekten zurückgegriffen werden. Im Einzelnen wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes die in Tabelle 8.2-3 markierten Lastfälle untersucht.

Nach Gasch und Twele (2010) werden für den Nachweis der Tragfähigkeit der Turmstruktur die 50 Jahresböe (DLC 6.1) oder die Betriebsböe mit kombinierter extremer Windrichtungsänderung (DLC 1.3) maßgebend. Diese konnten ebenso untersucht werden wie der für den Nachweis der Ermüdung bedeutendste Ermüdungslastfall (DLC 1.2), der während der Betriebsdauer am häufigsten vorkommt. Da aber nicht alle Ermüdungslastfälle untersucht werden konnten, ist beim späteren Nachweis der Betriebsfestigkeit der Anteil der fehlenden Lastfälle sinnvoll abzuschätzen, weil jeder Lastfall zur Gesamtschädigung beiträgt. Diese Abschätzung geschieht dadurch, dass der Nachweis nur dann eingehalten ist, wenn die Gesamtschädigung kleiner oder gleich 90% ist.

Tabelle 8.2-3: Lastfälle nach Germanischer Lloyd (2005) und rot markiert die mit Flex 5 untersuchten Lastfälle

Design situation	DLC	Wind conditions[1]	Marine conditions	Other conditions	Type of analysis	Partial safety factors
1. Power production	1.1	NTM $V_{in} \le V_{hub} \le V_{out}$	Irregular sea state with $H_s(V)$ or acc. to scatter diagram		U	N
	1.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Irregular sea state with $H_s(V)$ or acc. to scatter diagram		F	*
	1.3	ECD $V_{in} \le V_{hub} \le V_r$	$H=H_s(V)$		U	E
	1.4	NWP $V_{in} \le V_{hub} \le V_{out}$	$H=H_s(V)$	External electrical fault	U	N
	1.5	EOG_1 $V_{in} \le V_{hub} \le V_{out}$	$H=H_s(V)$	Grid loss	U	N
	1.6	EOG_{50} $V_{in} \le V_{hub} \le V_{out}$	$H=H_s(V)$		U	E
	1.7	EWS $V_{in} \le V_{hub} \le V_{out}$	$H=H_s(V)$		U	E
	1.8	EDC_{50} $V_{in} \le V_{hub} \le V_{out}$	$H=H_s(V)$		U	E
	1.9	ECG $V_{in} \le V_{hub} \le V_r$	$H=H_s(V)$		U	E
	1.10	NWP $V_{in} \le V_{hub} \le V_{out}$	$H=H_s(V)$	Ice formation on blades and structure	F / U	* / E
	1.11	Temperature effects, if applicable see Section 4.3.4			U	E
	1.12	Earthquakes, if applicable see Section 4.3.5			U	A
	1.13	NWP $V_{hub} = V_r$ or V_{out}	$H=H_s(V)$	Grid loss	F	*
	1.14	NWP $V_{hub} = V_r$ or V_{out}	-	Sea ice	F/U	*/E
	1.15	NWP $V_{hub} = V_r$ or V_{out}	$H=H_{max1}$ or $H_{max}(V)$		U	N
2. Power production plus occurrence of fault	2.1	NWP $V_{in} \le V_{hub} \le V_{out}$	$H=H_s(V)$	Fault in the control system	U	N
	2.2	NWP $V_{in} \le V_{hub} \le V_{out}$	$H=H_s(V)$	Fault in safety system or preceding internal electrical fault	U	A
	2.3	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Irregular sea state with $H_s(V)$ or acc. to scatter diagram	Fault in the control system or safety system	F	*
3. Start-up	3.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	$H=H_s(V)$		F	*
	3.2	EOG_1 $V_{in} \le V_{hub} \le V_{out}$	$H=H_s(V)$		U	N
	3.3	EDC_1 $V_{in} \le V_{hub} \le V_{out}$	$H=H_s(V)$		U	N
4. Normal shut-down	4.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	$H=H_s(V)$		F	*
	4.2	EOG_1 $V_{in} \le V_{hub} \le V_{out}$	$H=H_s(V)$		U	N

Tabelle 8.2-3 (fortgesetzt): Lastfälle nach Germanischer Lloyd (2005) und rot markiert die mit Flex 5 untersuchten Lastfälle

Design situation	DLC	Wind conditions[1]	Marine conditions	Other conditions	Type of analysis	Partial safety factors
5. Emergency shut-down	5.1	NWP $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	$H=H_s(V)$		U	N
6. Parked (standstill or idling)	6.1a	EWM $V_{hub}=V_{ref}$ Turbulent wind model	Irregular sea state with H_{s50}	Wind wave misalignment	U	E
	6.1b	EWM $V_{hub}=V_{e50}$ Steady wind model	$H=H_{red50}$	Wind wave misalignment	U	E
	6.1c	EWM $V_{hub}=V_{red50}$ Steady wind model	$H=H_{max50}$	Wind wave misalignment	U	E
	6.2a	EWM $V_{hub}=V_{ref}$ Turbulent wind model	Irregular sea state with H_{s50}	Grid loss	U	A
	6.2b	EWM $V_{hub}=V_{e50}$ Steady wind model	$H=H_{red50}$	Grid loss	U	A
	6.3a	EWM $V_{hub}=V_1$ Turbulent wind model	Irregular sea state with H_{s1}	Extreme oblique inflow	U	E
	6.3b	EWM $V_{hub}=V_{e1}$ Steady wind model	$H=H_{red50}$	Extreme oblique inflow	U	E
	6.4	NTM $V_{hub} < 0.7\ V_{ref}$	Irregular sea state with $H_s(V)$		F	*
	6.5	EDC_{50} $V_{hub} = V_{ref}$	$H=H_{red1}$	Ice formation on blades and structure	U	E
	6.6	Temperature effects, if applicable see Section 4.3.4			U	E
	6.7	EWM $V_{hub}=V_{50red}$ Steady wind model	-	50 year sea ice	U	E

8.3 Ermittlung der Schnittgrößen

8.3.1 Allgemeines

Die Belastung einer Windenergieanlage wird mit Hilfe einer gesamtdynamischen Berechnung, die die stochastischen Einflüsse aus den Umgebungsbedingungen, der Strukturdynamik und der aktiven Betriebsführung der Windenergieanlage berücksichtigt, ermittelt. Da in Flex 5 lediglich das Eigengewicht und die Ausbaulasten bei der Berechnung der Belastung berücksichtigt werden können, musste die Belastung aus der Vorspannung des UHFFB Turms separat ermittelt werden, ebenso wie die Belastungen infolge Temperatur und Imperfektion. Daneben waren auch die Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung zu beachten. Eine Übersicht über die Ermittlung der Schnittgrößen ist in Bild 8.3-1 gegeben.

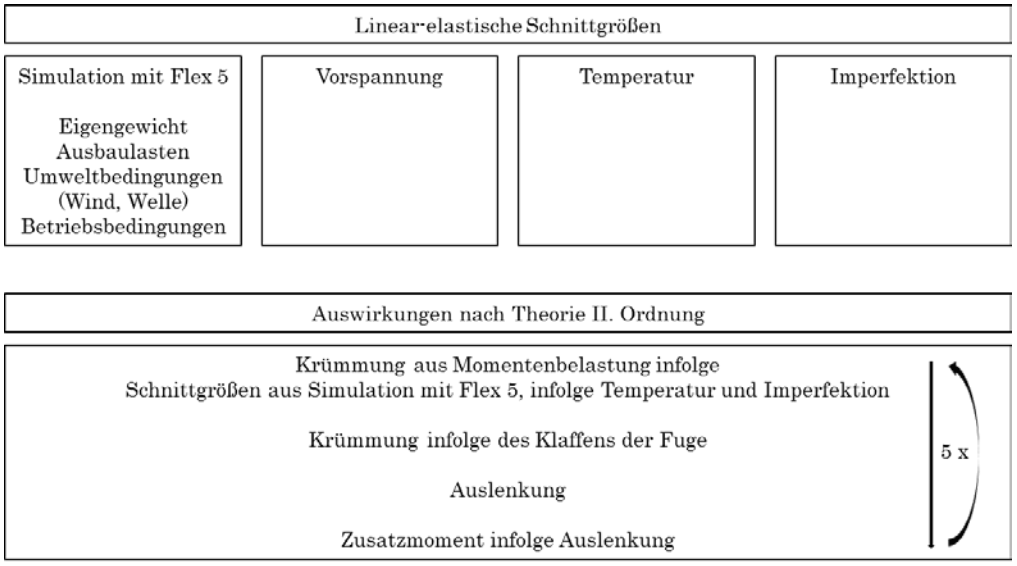
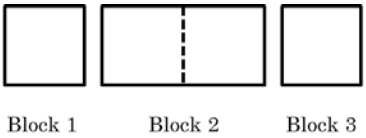


Bild 8.3-1: Ermittlung der Schnittgrößen

8.3.2 Schnittgrößen als Ergebnis der Simulation mit Flex 5

In Flex 5 werden an definierten Stellen der Windenergieanlage sogenannte Sensoren platziert. Die standardmäßig an jeder Höhenkote platzierten Sensoren sind wie richtige Messsensoren zu verstehen, die über die Simulationsdauer ihren jeweiligen Messwert protokollieren.

Die Bezeichnung der einzelnen Sensoren wird von Flex 5 automatisch durchgeführt und besteht immer aus einer vierstelligen Zahl die in drei Blöcke einzuteilen ist:



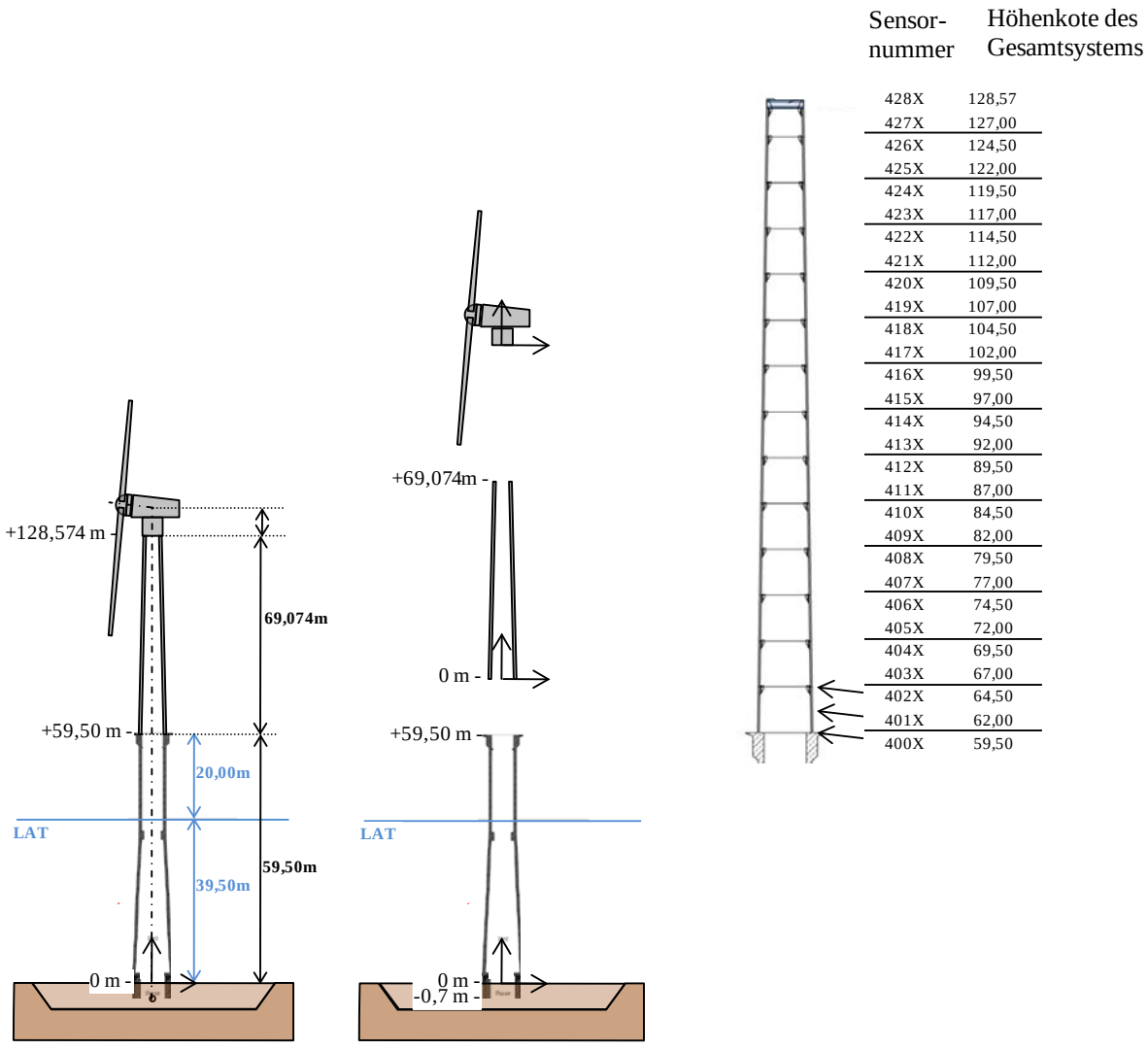
Block 1: 4 Sensor im Turm
5 Sensor im Fundament

Block 2: Durchlaufende Nummerierung der Sensoren, mit der Höhe zunehmend, beginnend im Ursprung des jeweiligen Teilsystems bei "00".

Block 3: Angabe, welche Schnittgröße der Sensor angibt:

1	N	Normalkraft
2	F_y	Querkraft
3	F_z	Querkraft
4	M_x	Torsionsmoment
5	M_y	Biegemoment
6	M_z	Biegemoment
7	F_{yz}	Querkraft
8	M_{yz}	Biegemoment
9	u_y	Verschiebung
0	u_z	Verschiebung

In Bild 8.3-2 sind die Koordinatensystem der Teilsysteme Fundament und Turm sowie die Sensoren des UHFFB Turms dargestellten.



Sensor-nummer	Höhenkote des Gesamtsystems
428X	128,57
427X	127,00
426X	124,50
425X	122,00
424X	119,50
423X	117,00
422X	114,50
421X	112,00
420X	109,50
419X	107,00
418X	104,50
417X	102,00
416X	99,50
415X	97,00
414X	94,50
413X	92,00
412X	89,50
411X	87,00
410X	84,50
409X	82,00
408X	79,50
407X	77,00
406X	74,50
405X	72,00
404X	69,50
403X	67,00
402X	64,50
401X	62,00
400X	59,50

a) Gesamtsystem b) Teilsysteme c) Sensornummern des UHFFB Turms

Bild 8.3-2: Koordinatensysteme und Höhenkoten sowie Sensornummern in Flex 5

In Anhang B finden sich die mit Flex 5 in einer gesamtdynamischen Berechnung ermittelten Schnittgrößen. Bei den Schnittgrößen handelt es sich um die charakteristischen Werte. Diese müssen für die Bemessungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) noch mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt werden. Da es nach einer gesamtdynamischen Berechnung nicht mehr möglich ist, zwischen Lasten aus Umwelt, Betrieb, Eigengewicht oder anderer Herkunft zu unterscheiden, muss nach Germanischer Lloyd (2005) der höchste Teilsicherheitsbeiwert der korrespondierenden Bemessungssituation gewählt und ein Nachweis mit globalem Sicherheitsbeiwert geführt werden. Nach Tabelle 8.3-1 ist dies für die Bemessungssituationen „Normal“ und „Extreme“ 1,35.

Tabelle 8.3-1: Teilsicherheitsbeiwerte für Lasten nach Germanischer Lloyd (2005)

Herkunft der Last	Ungünstige Lasten				Günstige Lasten
	Art der Bemessungssituation				alle Bemessungssituationen
	N Normal	**E** Extreme	**A** Abnormal	**T** Transport und Errichtung	
Umwelt	1,2	1,35	1,1	1,5	0,9
Betrieb	1,2	1,35	1,1	1,5	0,9
Eigengewicht	1,1 / 1,35 [1)]	1,1 / 1,35 [1)]	1,1	1,25	0,9
sonstige Trägheitskräfte	1,2	1,25	1,1	1,3	0,9
Temperatur	-	1,35	-	-	0,9

[1)] Für den Fall, dass das Gewicht nicht durch Gewichtskontrolle bestätigt ist.

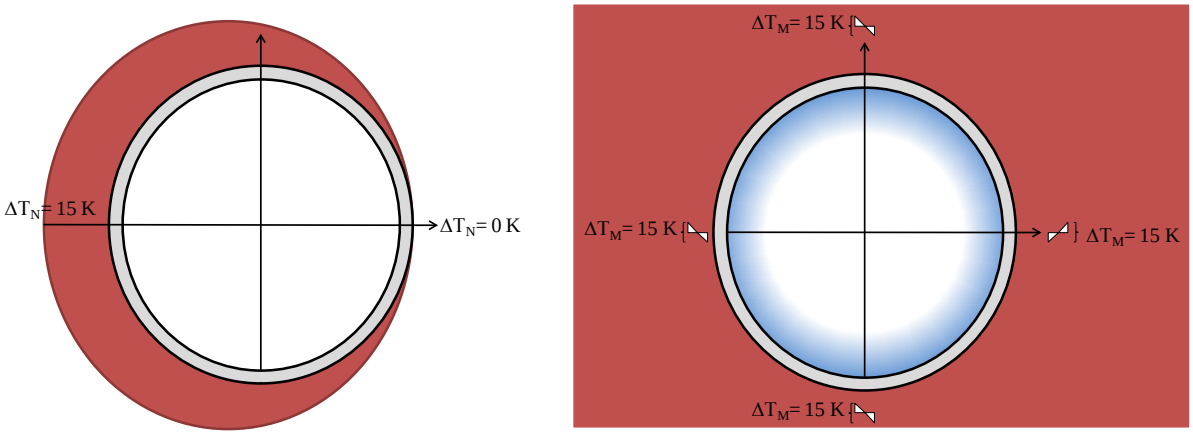
Nach Germanischer Lloyd (2005) wird für die Ermüdungslastfälle der Teilsicherheitsbeiwert zu 1,0 gesetzt.

8.3.3 Schnittgrößen aus Vorspannung

Die Dimensionierung der Vorspannkraft sowie die sich daraus ergebenden Schnittgrößen sind in Abschnitt 8.5.2.1 erläutert.

8.3.4 Schnittgrößen aus Temperatur

Dem Germanischen Lloyd (2005) zu Folge müssen für Beton- und für Stahltürme zusätzliche Lasten infolge Temperatur berücksichtigt werden. Hierbei sind zwei verschiedene Arten der Temperaturverteilung zu unterscheiden. Zum einen der in Bild 8.3-3a dargestellte Temperaturanteil ΔT_N, zum anderen der in Bild 8.3-3b dargestellt Temperaturanteil ΔT_M.



a) Temperaturanteil ΔT_N b) Temperaturanteil ΔT_M

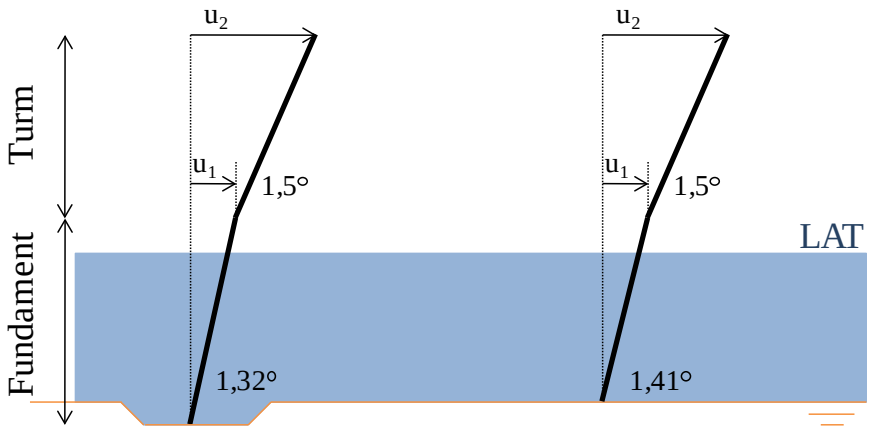
Bild 8.3-3: Temperaturverteilung nach Germanischer Lloyd (2005)

ΔT_M wirkt über den kompletten Umfang und bewirkt eine lineare Temperaturverteilung von 15 K durch die Wandstärke. Dieser Lastfall tritt ein wenn z.B. die Temperatur im Turm durch Maschinenabwärme höher ist als die Außentemperatur. Daraus entsteht jedoch keine zusätzliche Momentenbelastung sondern lediglich Querzugspannungen. In den weiteren Untersuchungen wird nicht weiter auf diese eingegangen. Bei detaillierten Nachweisen der einzelnen Segmente müssen sie aber berücksichtigt werden.

Durch einseitige Sonneneinstrahlung kann sich eine Seite des Turmes stärker erwärmen als die andere. Die daraus resultierende Belastung wird durch den Temperaturanteil ΔT_N berücksichtigt, wobei eine über die Wandstärke konstante Temperatur herrscht. Diese verläuft cosinusförmig über einen 180°-Bereich des Turmes mit einem Maximalwert von 15 K. Der Temperaturanteil ΔT_N erzeugt somit eine einseitige Verlängerung bzw. Krümmung des Turms. Dementsprechend entsteht eine horizontale Auslenkung, die in Kombination mit dem Eigengewicht und den Ausbaulasten zu einer zusätzlichen Momentenbelastung führt.

8.3.5 Schnittgrößen aus Imperfektion

Zusätzlich zu den Schnittgrößen aus der gesamtdynamischen Berechnung muss eine Imperfektion der Tragstruktur in Form einer Schiefstellung berücksichtigt werden. Diese beinhaltet Toleranzen bei der Installation und ungleichmäßige Setzungen im Betrieb. Da sich die angegeben Winkel für die Schiefstellung auf die Unterkante der Stahlbetonhohlkästen beziehen, müssen diese für das Ersatzsystem, aufgrund der verkürzten Fundamentlänge, angepasst werden. Hierzu wird in Näherung angenommen, dass die Teilverschiebungen gleich sind, sofern die Verschiebungen u_1 und u_2 gleich groß sind (vgl. Bild 8.3-4).



a) Tragstruktur mit Schwerkraftfundament

b) Tragstruktur mit Monopile-Gründung als Ersatzsystem

Bild 8.3-4: Schiefstellung der Tragstruktur

Ausgehend von einer Schiefstellung des Schwerkraftfundaments von 1,32° ergibt sich für das Ersatzsystem der Monopile-Gründung eine Schiefstellung von 1,41°. Da die Turmlänge in beiden Systemen gleich groß ist, bleibt auch die Schiefstellung bei 1,5°.

Die Schiefstellung führt in Kombination mit dem Eigengewicht und den Ausbaulasten zu einer Momentenbelastung.

8.3.6 Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung

Bei den mit Flex 5 berechneten Schnittgrößen handelt es sich um linear-elastische Schnittgrößen. Aufgrund des möglichen Momentenzuwachses infolge von Kräften am verformten System müssen die Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung untersucht werden.

Die Berechnung der Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung erfolgt iterativ. Beim ersten Iterationsschritt besteht die Momentenbelastung M_0 aus drei Anteilen infolge:

- Simulation mit Flex 5;
- Temperatur;
- Schiefstellung.

Die Momentenbelastung M_0 erzeugt eine Krümmung des Querschnitts. Hierbei wird auch das Verhalten der Fuge (überdrückt oder klaffend) zwischen den Segmenten des UHFFB Turms berücksichtigt. Mit dem Prinzip der virtuellen Arbeit lässt sich aus dem Krümmungsverlauf und einem virtuellen Moment die horizontale Auslenkung ermitteln. Am verformten System wird dann das Zusatzmoment ΔM_0 bestimmt. In Addition mit dem Ursprungsmoment entsteht so die neue Momentenbelastung $M_1 = M_0 + \Delta M_0$, die wiederum ein Zusatzmoment ΔM_1 ergibt. Dies wird so lange wiederholt, bis sich das Zusatzmoment einem Grenzwert nähert. Es zeigte sich, dass die Momentenbelastung in der Regel in weniger als fünf Iterationsschritten gegen einen Grenzwert konvergierte und somit die Iteration beendet werden konnte.

8.4 Ermüdung

Ein Nachweis der Ermüdung kann in drei Stufen geführt werden:

- Stufe 1: Spannungsbegrenzung (Quasi-Dauerfestigkeitsnachweis);
- Stufe 2: Nachweis über schädigungsäquivalente Spannungen bzw. Spannungsschwingbreiten (vereinfachter Betriebsfestigkeitsnachweis);
- Stufe 3: expliziter Betriebsfestigkeitsnachweis.

In steigender Reihenfolge erhöht sich hierbei zwar die Genauigkeit des Nachweises, aber auch der Aufwand zur Nachweisführung und zur Lastermittlung [Zilch und Zehetmaier (2009)].

Um das tatsächliche Ermüdungsverhalten möglichst genau vorherzusagen, wurde der explizite Betriebsfestigkeitsnachweis (Stufe 3) geführt. Vorteilhaft hierbei ist, dass durch die vorherige Simulation mit Flex 5 für die Lastfälle ein genauer zeitlicher Verlauf der Schnittgrößen vorhanden ist. Es werden jedoch zwei Einschränkungen getroffen:

1. Beim Nachweis werden nur Schädigungen infolge Biegung und daraus resultierenden Normalspannungen berücksichtigt. Andere Ursachen für Schädigungen, wie Querkraft oder Torsion, werden nicht berücksichtigt.
2. Die Ermüdungslasten werden unidirektional betrachtet. Dies liegt auf der sicheren Seite und bedeutet, dass die Biegemomente immer in die gleiche Richtung wirkend angenommen werden und so auch die Schädigungen immer an der gleichen Stelle entstehen. Für eine genaue Untersuchung müsste bekannt sein, aus welcher Richtung Wind und Welle mit welcher Häufigkeit und Intensität auftraten, damit die Richtung des auftretenden Moments bekannt wäre. Hierzu sind jedoch keine Angaben vorhanden.

Für den expliziten Betriebsfestigkeitsnachweis (Stufe 3) mussten die Momentenverläufe der mit Flex 5 simulierten Ermüdungslastfälle ausgewertet werden. Dabei wurden diese unter Anwendung des Rainflow-Verfahrens auf die Anzahl der Schwingspiele je Mittelwert und Schwingweite reduziert und das Ergebnis in einer sogenannten Markov-Matrix eingetragen (vgl. Bild 8.4-1). Als Schwingweite wurden 500 kNm gewählt.

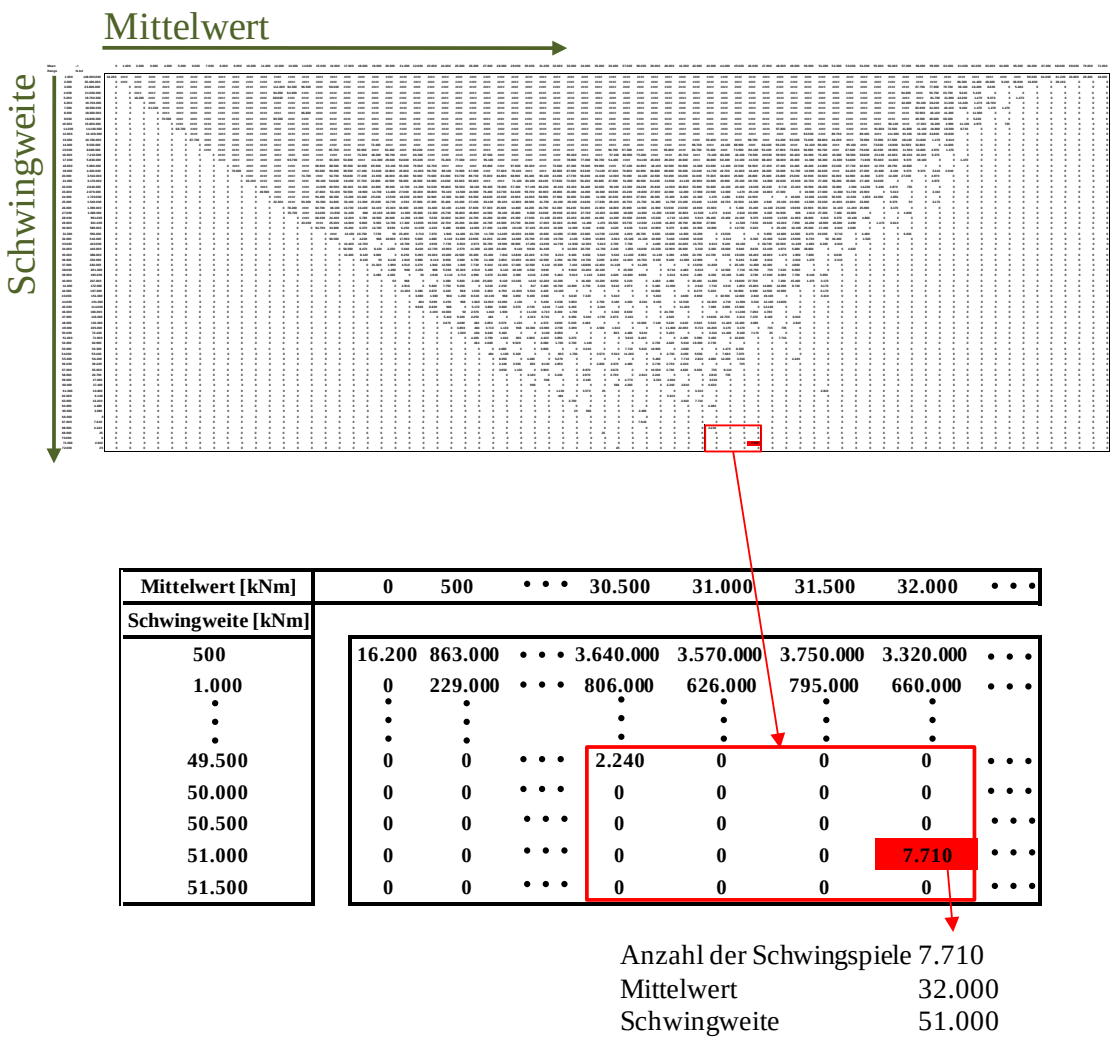


Bild 8.4-1: Markov-Matrix

8.5 Nachweis der Tragstruktur

8.5.1 Allgemeines

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden mehrere Turmvarianten (Variante 1 bis Variante 5, vgl. Tabelle 8.5-1) untersucht, mit dem Ziel, die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit des UHFFB Turms prinzipiell nachzuweisen sowie durch eine Minimierung der Wandungsstärke der Turmsegmente den Materialverbrauch zu reduzieren.

Tabelle 8.5-1: Untersuchte Turmvarianten

	Variante 1	Variante 2 [1)]	Variante 3	Variante 4 [1)]	Variante 5
Wandungsstärke des Turms	konstant: 200 mm		abgestuft: 110 mm 125 mm 155 mm		abgestuft: 110 mm 140 mm 190 mm
Betonvolumen des Turms	208,45 m³		142,89 m³ -31,45 %		164,28 m³ -21,19 %
Dimensionierung der Vorspannung	Klaffen der Fuge im ULS		Fuge überdrückt im ULS		Fuge überdrückt im ULS

[1)] Variante 2 und Variante 4 wurden im Rahmen dieses Abschlussberichts nicht dokumentiert.

Die Eigenfrequenzanalyse der Tragstruktur bestehend aus Schwerkraftfundament und UHFFB Turm zeigte, dass bei einem UHFFB Turm mit einer Wandungsstärke von 200 mm ein ausreichender Abstand zwischen der Eigenfrequenz der Tragstruktur und den Erregerfrequenzen gewährleistet ist (vgl. Abschnitt 8.1.4, Variante A). Daher stellte der UHFFB Turm mit einer Wandungsstärke von 200 mm den Ausgangspunkt bzw. die Turmvariante 1 für die folgenden Untersuchungen dar.

Die Auslegung des Turmtragwerks einer WEA ist in der Regel ein iterativer Prozess. Eine Veränderung der Turmgeometrie wirkt sich auch auf die gesamtdynamische Berechnung aus, so dass die Schnittgrößen neu ermittelt werden müssen. Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich bei den mit Flex 5 ermittelten Schnittgrößen, die im Rahmen dieses Forschungsprojekts zur Dimensionierung der Vorspannkraft und zum Führen der Nachweise verwendet wurden, nicht um den Maximal- und Minimalwerte einer Schnittgröße und den dazu korrespondierenden Schnittgrößen aus einem Lastfall, sondern um die Maximal- und Minimalwerte der Schnittgrößen aus allen mit Flex 5 simulierten Lastfällen handelt (Einhüllende). Dies wurde für die Auslegung des Turmtragwerks bzw. für die überschlägige Bemessung als hinreichend genau erachtet und führte zudem zu einer wesentlichen Reduzierung des Berechnungsaufwandes.

Der Bemessung der Turmstruktur wurden die in Kapitel 6 definierten Bemessungswerte zu Grunde gelegt, die auf den im Rahmen dieses Forschungsprojekts durchgeführten experimentellen Untersuchungen an UHFFB mit der Bezeichnung Ductal® der Firma Lafarge beruhen (vgl. Kapitel 5). Im Hinblick auf eine spätere baupraktische Umsetzung der Turmstruktur sollten die in der Ausschreibung geforderten Festigkeitswerte jedoch so gewählt werden, dass diese von mehreren UHFFB-Mischungen erreicht werden können.

8.5.2 Turmvariante 1

8.5.2.1 Dimensionierung der Vorspannkraft

Bei der Dimensionierung der Vorspannkraft sind zwei Nachweise zu unterscheiden:

- Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS): Nachweis der Dekompression;
- Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS): Nachweis, dass die Klaffung der Fuge auf 1/3 des Querschnitts begrenzt ist (in Anlehnung an den Segmentbrückenbau).

Dabei wurde in beiden Fällen iterativ vorgegangen. Zunächst wurde eine Vorspannkraft angenommen, um dann zusammen mit den Schnittgrößen aus der Simulation mit Flex 5 sowie infolge Temperatur und Imperfektion die Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung zu berechnen. Wurde der jeweilige Nachweis im SLS und ULS eingehalten, war eine mögliche Vorspannkraft gefunden. War einer der Nachweise nicht eingehalten, wurde die Vorspannkraft erhöht.

Als Spannglieder für den UHFFB Turm wurden die „Compact Mono Multi (CMM)“ Spannglieder des Litzenspannverfahrens VT-CMM KD für externe Vorspannung ohne Verbund der Firma BBR VT International Ltd gemäß der dafür vorliegenden allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung [DIBt (2010)] vorgesehen. Die für die Spannglieder zulässigen Vorspannkräfte sind der Tabelle 8.5-2 zu entnehmen.

Tabelle 8.5-2: Zulässige Vorspannkräfte für die „Compact Mono Multi (CMM)“ Spannglieder des Litzenspannverfahrens VT-CMM KD für externe Vorspannung ohne Verbund [DIBt (2010)]

Spannglied	**Anzahl Litzen**	**Vorspannkraft St 1570/1770 $f_{p0,1k}$ = 1.500 N/mm²**	
		$P_{m0,max}$ [kN]	**$P_{0,max}$ [kN]**
1 x 02-165	2	440	466
2 x 02-165 1 x 04-165	4	881	933
3 x 02-165	6	1.321	1.399
2 x 04-165 4 x 02-165	8	1.762	1.865
3 x 04-165	12	2.642	2.798
4 x 04-165	16	3.523	3.730

Um die Anzahl der benötigten Spannglieder zu minimieren, wurden diese über die Höhe des UHFFB Turms entsprechend dem Momentenverlauf zweimal abgestuft. Die Abstufungen befanden sich oberhalb der Höhenkoten von 84,50 m und 109,50 m.

In einem ersten Schritt wurde die Anzahl der Spannglieder ermittelt, die sich maximal unter Einhaltung der geforderten Mindestabstände im Konsolenbereich der Segmente verankern lassen.

Maximale Anzahl der Spannglieder unter Einhaltung der Mindestabstände

Den weiteren Betrachtungen wird das Spannglied mit der Bezeichnung VT-CMM 4x04-165 KD zu Grunde gelegt. Bei diesem Spannglied sind 4 Litzen á 165 mm² durch eine PE-Schutzhülle zu einem Band zusammengefasst, vier dieser Bänder bilden ein Spannglied. Für dieses Spannglied ist bei Betonfestigkeiten größer als 32 MPa ein Mindestrandabstand von 230 mm und ein Mindestachsabstand von 420 mm einzuhalten, wobei sich die Abstände auf den Spanngliedmittelpunkt beziehen (vgl. Bild 8.5-1).

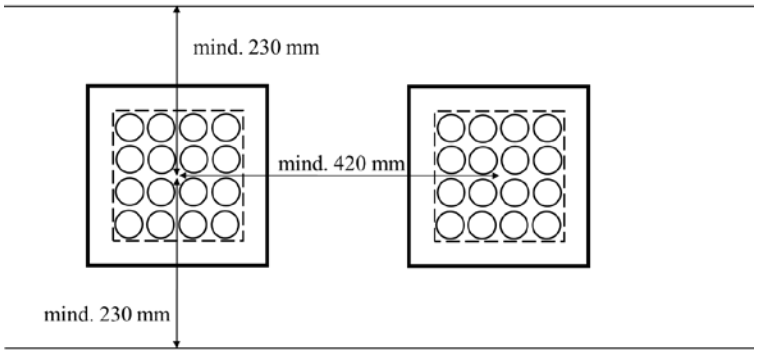


Bild 8.5-1: Mindestabstände für das Spannglied mit der Bezeichnung VT-CMM 4x04-165 KD [DIBt (2010)]

Aus den Mindestabständen lässt sich dann die maximale Anzahl der Spannglieder über die Höhe des UHFFB Turms ableiten (vgl. Bild 8.5-2). Eine entsprechende Anordnung der Spannglieder über den Umfang einer Konsole zur Verankerung der Spannglieder ist für die entsprechenden Segmente in Bild 8.5-3 abgebildet.

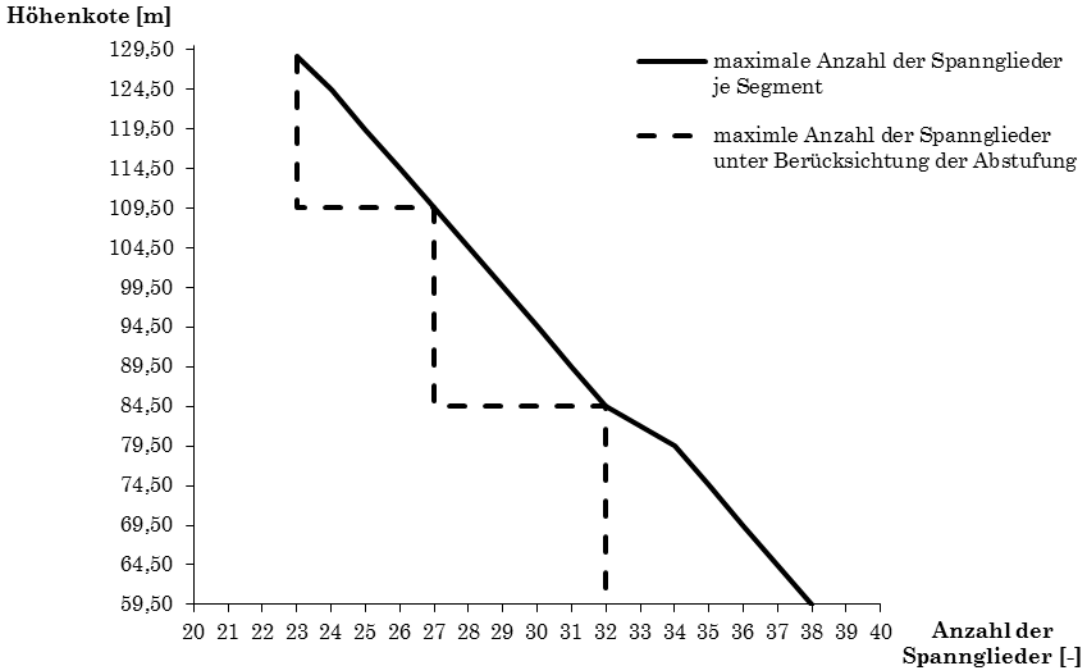
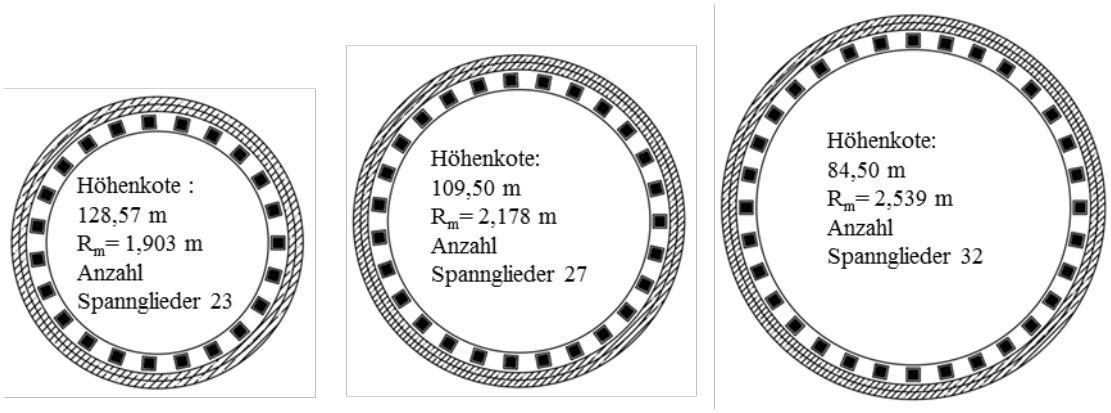


Bild 8.5-2: Maximale Anzahl der Spannglieder über die Höhe des UHFFB Turms



a) Turmkopf b) 1. Abstufung c) 2. Abstufung

Bild 8.5-3: Maximale Anzahl der Spannglieder bei Segmenten mit Konsolen zur Verankerung der Spannglieder

Nachweis der Dekompression

Es darf im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) nicht vorkommen, dass ein Klaffen der Fugen entsteht, wodurch die Steifigkeit der Turmstruktur verändert wird. Hierzu muss die minimale Vorspannkraft N_P ermittelt werden, bei der gerade noch keine Zugspannungen auftreten. Dies ist die Vorspannkraft zum Zeitpunkt $t = \infty$ nach Abschluss der Spannkraftverluste aus Kriechen, Schwinden und Relaxation.

Nach DIN 1045-1 (2008) muss der Nachweis der Dekompression für die quasi-ständige Lastfallkombination geführt werden. In Übereinstimmung mit dem Germanischen Lloyd vereinbarte die Ed. Züblin AG jedoch eine andere Vorgehensweise für den Nachweis der Dekompression, die darin besteht, dass in 99 % der Dauer aller Ermüdungslastfälle der Nachweis der Dekompression erbracht sein muss. Dem zu Folge müssen die einwirkenden Schnittgrößen mit der Dauer, in der sie auftreten, gewichtet werden. Durch die Gewichtung können die Schnittgrößen bestimmt werden, die größer sind als die Schnittgrößen, die in 99% der Zeit auftreten. Im Folgenden werden die Momente aus dieser Berechnung mit „LDD99%“ gekennzeichnet.

Da die Normalkräfte, die mit Flex 5 ermittelt wurden, unter anderem wegen Unwuchten oder Massenträgheiten schwanken, wird für den Nachweis der Dekompression die minimale Normalkraft aus allen mit Flex 5 simulierten Lastfälle herangezogen.

Die Randspannung für den Nachweis der Dekompression lässt sich wie folgt bestimmen:

$$\sigma_c = -\frac{\gamma_M \cdot |N_{\min}| + \gamma_M \cdot |N_{P\infty}|}{A} + \frac{\gamma_M \cdot |M_{LDD99\%}| + \gamma_M \cdot |M_{temp}| + \gamma_M \cdot |M_{imp}|}{W} + \frac{\Delta M_{TheoII}}{W} < 0 \qquad (8\text{-}4)$$

mit

σ_c	Normalspannung am Rand
N_{min}	minimale Normalkraft aller mit Flex 5 simulierten Lastfälle
$N_{P\infty}$	mittlere Vorspannkraft zum Zeitpunkt t=∞
$M_{LDD99\%}$	einwirkendes Moment aus LDD99%
M_{temp}	einwirkendes Moment infolge Temperatur
M_{imp}	einwirkendes Moment infolge Imperfektion
ΔM_{TheoII}	Momentenzuwachs aus Theorie II. Ordnung
A	Querschnittsfläche
W	Widerstandsmoment des Querschnitts
$\gamma_m = 1{,}0$	Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen

Durch Umformen der Gl. (8-5) nach der mittleren Vorspannkraft $N_{P\infty}$ zum Zeitpunkt t = ∞ erhält man:

$$erf.\ N_{P\infty} = -|N_{\min}| + \frac{\left(|M_{LDD99\%}| + |M_{temp}| + |M_{imp}|\right) \cdot A}{W} + \frac{\Delta M_{TheoII} \cdot A}{W} \qquad (8\text{-}5)$$

Die Vorgehensweise der Ed. Züblin AG beim Nachweis der Dekompression beinhaltet die 99% - Fraktile über alle Ermüdungslastfälle. Wie bereits in Abschnitt 8.2.4 erwähnt, konnten mit Flex 5 nicht alle Ermüdungslastfälle simuliert werden. Deshalb wurde noch ein weiterer Nachweis der Dekompression geführt, bei dem die maximalen Schnittgrößen aus den Power Production Lastfällen DLC 1.1, DLC 1.3 und DLC 1.5 - 1.9 sowie den Ermüdungslastfällen DLC 3.1 und DLC 4.1 Berücksichtigung fanden. Im Folgenden werden die Momente aus dieser Berechnung mit „PP“ gekennzeichnet. Entsprechend Gl. (8-5) ergibt sich dann:

$$erf.\ N_{P\infty} = -|N_{\min}| + \frac{\left(|M_{PP}| + |M_{temp}| + |M_{imp}|\right) \cdot A}{W} + \frac{\Delta M_{TheoII} \cdot A}{W} \qquad (8\text{-}6)$$

Die Ergebnisse für die Nachweise der Dekompression nach Gl. (8-5) und Gl. (8-6) sind dem Anhang B.1.2.1 zu entnehmen.

Begrenzung der Klaffung der Fuge

In Anlehnung an den Segmentbrückenbau wurde eine Klaffung der Fuge im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) zugelassen, jedoch auf 1/3 des Querschnitts begrenzt.

Für die Untersuchung wurde das maximale Moment aus allen mit Flex 5 simulierten Lastfällen herangezogen. Hinsichtlich der Normalkraft wurde eine differenziert Betrachtung vorgenommen. Einerseits kann die Normalkraft als entlastend angenommen werden, da diese, wie auch die Vorspannkraft, die Druckspannung in der Fuge erhöht und so dem Klaffen entgegenwirkt. Hierzu ist also die minimale Normalkraft aller Lastfälle als günstig wirkende Last anzusetzen, d.h.:

$$N_{Ed} = \gamma \cdot N_k = 0{,}9 \cdot N_{\min} \qquad (8\text{-}7)$$

Andererseits erhöht die Normalkraft die Biegemomente nach Theorie II. Ordnung, was sich negativ auf die Klaffung der Fuge auswirkt. Für diesen Fall ist die maximale Normalkraft aller mit Flex 5 simulierten Lastfälle anzusetzen, d.h.:

$$N_{Ed} = \gamma \cdot N_k = 1{,}35 \cdot N_{\max} \qquad (8\text{-}8)$$

Die Randspannung für die Untersuchung lässt sich wie folgt bestimmen:

$$\sigma_{Ed} = -\frac{\left|N_{Ed}\right| + \gamma_P \cdot \left|N_{P\infty}\right|}{A} + \frac{\gamma_M \cdot \left|M_{\max}\right| + \gamma_{Mt} \cdot \left|M_{temp}\right| + \gamma_{Mi} \cdot \left|M_{imp}\right|}{W} + \frac{\Delta M_{TheoII}}{W} < 0 \qquad (8\text{-}9)$$

mit

σ_{Ed}	Normalspannung am Rand
N_{Ed}	Normalkraft nach Gl. (8-7) bzw. Gl. (8-8)
$N_{P\infty}$	mittlere Vorspannkraft zum Zeitpunkt t=∞
M_{max}	maximales Moment aller mit Flex 5 simulierten Lastfälle
M_{temp}	einwirkendes Moment infolge Temperatur
M_{imp}	einwirkendes Moment infolge Imperfektion
ΔM_{TheoII}	Momentenzuwachs aus Theorie II. Ordnung
A	Querschnittsfläche
W	Widerstandsmoment des Querschnitts
$\gamma_P = 1{,}0$	Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen aus Vorspannung
$\gamma_M = 1{,}35$	Teilsicherheitsbeiwert für die mit Flex 5 simulierten Einwirkungen
$\gamma_{Mt} = 1{,}0$	Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen aus Temperatur
$\gamma_{Mi} = 1{,}0$	Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen aus Imperfektion

Durch Umformen der Gl. (8-9) nach der mittleren Vorspannkraft $N_{P\infty}$ zum Zeitpunkt $t = \infty$ erhält man:

$$erf.\,N_{P\infty} = -\left|N_{Ed}\right| + \frac{\left(1{,}35\cdot\left|M_{\max}\right| + 1{,}0\cdot\left|M_{temp}\right| + 1{,}0\cdot\left|M_{imp}\right|\right)\cdot A}{W} + \frac{\Delta M_{TheoII}\cdot A}{W} \qquad (8\text{-}10)$$

Die Ergebnisse für die Begrenzung der Klaffung der Fuge nach Gl. (8-10) sind dem Anhang B.1.2.2 zu entnehmen.

Berechnung der Anzahl der benötigten Spannglieder

Bei der Berechnung der Anzahl der benötigten Spannglieder sind die Spannkraftverluste zu berücksichtigen.

Nach Grünberg und Göhlmann (2011) sind bei normalfesten Beton Spannkraftverluste von 25 % eine realistische Annahme. Da wärmebehandelter UHFFB jedoch eine sehr viel geringere Endkriechzahl besitzt und nicht weiter schwindet (vgl. Abschnitt 6.4), wurde, basierend auf einer überschlägigen Berechnung der Spannkraftverluste, für die Berechnung der Anzahl der benötigten Spannglieder Spannkraftverluste von 12,5 % angesetzt.

Nach DIN 1045-1 (2008) sind im Gebrauchszustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) mögliche Streuungen der Vorspannkraft zu berücksichtigen. Die charakteristische Vorspannkraft bewegt sich dann zwischen $P_{k,sup}$ und $P_{k,inf}$, wobei der jeweils ungünstigere Wert anzuwenden ist:

$$P_{k,\sup} = r_{\sup}\cdot P_{mt} \qquad (8\text{-}11)$$

$$P_{k,\inf} = r_{\inf}\cdot P_{mt} \qquad (8\text{-}12)$$

mit
- $P_{k,sup}$ oberer charakteristischer Wert der Vorspannkraft
- $P_{k,inf}$ unterer charakteristischer Wert der Vorspannkraft
- r_{sup} = 1,05
- r_{inf} = 0,95
- P_{mt} Mittelwert der Vorspannkraft

Da im SLS zum Zeitpunkt t = 0 die Fugen überdrückt sind und untersucht wird, ob die Spannungsgrenzen eingehalten sind, ist auf der sicheren Seite liegend eine höhere Vorspannkraft und somit r_{sup} anzusetzen. Für den Zeitpunkt $t = \infty$ ist zu kontrollieren, dass weiterhin kein Klaffen der Fuge auftritt und deshalb ist auf der sicheren Seite liegend eine niedrigere Vorspannkraft und somit r_{inf} anzusetzen.

Für Berechnungen im Gebrauchszustand der Tragfähigkeit (ULS) dürfen Streuungen vernachlässigt werden, d.h. $r_{sup} = r_{inf} = 1$. Der Bemessungswert der Vorspannkraft ergibt sich nach DIN 1045-1 (2008) zu:

$$P_d = \gamma_p \cdot P_{mt} \qquad (8\text{-}13)$$

mit P_d Bemessungswert der Vorspannkraft
$\gamma_P = 1{,}0$ Teilsicherheitsbeiwert der Vorspannung
P_{mt} Mittelwert der Vorspannkraft

Durch die Abstufung ergeben sich drei Bereiche für die Vorspannkräfte mit jeweils unterschiedlichen Rechenwerten für die Vorspannkraft. Diese sind in der Tabelle 8.5-3 zusammengefasst.

Tabelle 8.5-3: Rechenwerte der Vorspannkraft (Turmvariante 1)

		Rechenwerte			
		SLS		ULS	
Spannglieder	Vorspannkraft	t = 0	t = ∞	t = 0	t = ∞
VT-CMM 4x04-165 KD	P_{m0} [kN]	$P_{k,sup}$ [kN]	$P_{k,inf}$ [kN]	P_d [kN]	P_d [kN]
11	11 x 3523 = 38753	38753 x 1,05 = 40690,65	38753 x 0,95 x 0,875 = 32213,43	38753 x 1,0 = 38753,00	38753 x 1,0 x 0,875 = 33908,88
14	14 x 3523 = 49322	49322 x 1,05 = 51788,10	49322 x 0,95 x 0,875 = 40998,91	49322 x 1,0 = 49322,00	49322 x 1,0 x 0,875 = 43156,75
25	25 x 3523 = 88075	88075 x 1,05 = 92478,75	88075 x 0,95 x 0,875= 73212,34	88075 x 1,0 = 88075,00	88075 x 1,0 x 0,875 = 77065,63

Die Berechnung der Anzahl der benötigten Spannglieder ist in Anhang B.1.2.3 zu finden.

8.5.2.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)

Hinsichtlich der Segmente werden Spannungsnachweise für die Normal- und Schubspannung sowie Ermüdungsnachweise geführt. Zudem wird überprüft, ob die Kraftübertragung in der Fuge gewährleistet ist.

Es sei darauf hingewiesen, dass stets das maximale Biegemoment und die maximale Querkraft aus allen mit Flex 5 simulierten Lastfällen angesetzt wurden. Bei der Ansetzung der Normalkraft wurde folgende Unterscheidung getroffen:

- maximale Normalkraft aus allen mit Flex 5 simulierten Lastfällen (N_{max}) + Vorspannung zum Zeitpunkt t = 0 (N_{P0});
- maximale Normalkraft aus allen mit Flex 5 simulierten Lastfällen (N_{max}) + Vorspannung zum Zeitpunkt t = ∞ ($N_{P\infty}$);
- minimale Normalkraft aus allen mit Flex 5 simulierten Lastfällen (N_{min}) + Vorspannung zum Zeitpunkt t = 0 (N_{P0});
- minimale Normalkraft aus allen mit Flex 5 simulierten Lastfällen (N_{min}) + Vorspannung zum Zeitpunkt t = ∞ ($N_{P\infty}$).

Normalspannungsnachweis

Bei der Ermittlung der Schnittgrößen durch nichtlineare Verfahren ist nach DIN 1045-1 (2008) mit den Mittelwerten der Baustofffestigkeit zu rechnen. Nach DIN 1045-1 (2008) darf für Betone ab C55/67 der Mittelwert der Druckfestigkeit wie folgt angenommen werden:

$$f_{cR} = 0{,}85 \cdot \alpha \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c'} \qquad (8\text{-}14)$$

mit f_{ck} [MPa] charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons (5 % - Fraktilwert)

γ_c' [-] Faktor zur Berücksichtigung der größeren Streuungen der Materialeigenschaften bei hochfestem Beton ($\gamma_c' = 1{,}0$, vgl. Abschnitt 6.2.1)

α [-] Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Langzeiteinwirkungen auf die Druckfestigkeit von Beton

DIN 1045-1 (2008) geht von einem Teilsicherheitswert für Beton von $\gamma_c = 1{,}5$ aus. Der Teilsicherheitsbeiwert für UHFFB beträgt jedoch $\gamma_c = 1{,}3$. Um dies zu berücksichtigen, wurde in Gl. (8-14) der Vorfaktor von 0,85 vernachlässigt.

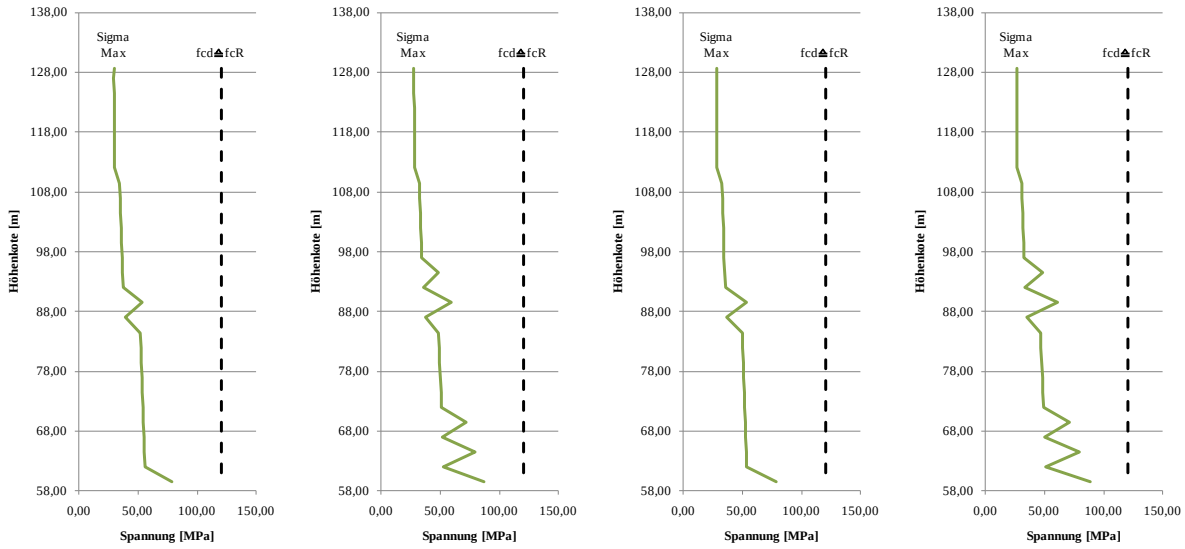
Da bei nichtlinearen Verfahren eine Differenzierung zwischen den Lastursprüngen und damit einer Gewichtung durch Teilsicherheitsbeiwerte nicht mehr möglich ist, wird auf einen einheitlichen, globalen Teilsicherheitsbeiwert γ_R =1,3 (für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen und Nachweis gegen Ermüdung) zurückgegriffen. Für den Rechenwert der Druckfestigkeit ergibt sich somit:

$$f_{cRd} = \frac{f_{cR}}{\gamma_R} = \frac{\alpha \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c'}}{\gamma_R} = \frac{0{,}85 \cdot \frac{183{,}8}{1{,}0}}{1{,}3} = 120{,}2\ MPa \qquad (8\text{-}15)$$

Der zu führende Nachweis für die Normalspannungen lautet also:

$$\sigma_{Ed} \leq f_{cRd} \qquad (8\text{-}16)$$

Die maximalen Spannungen σ_{Ed} treten immer an der gedrückten Seite des Kreisringquerschnitts auf. In Bild 8.5-4 ist zu erkennen, dass die Spannungen immer unterhalb von f_{cRd} = 120,18 MPa lagen. Die Spannungsspitzen weisen auf die Stellen hin, an denen eine Klaffung der Fuge auftrat.



a) $N_{max} + N_{P0}$ b) $N_{max} + N_{P\infty}$ c) $N_{min} + N_{P0}$ d) $N_{min} + N_{P\infty}$

Bild 8.5-4: Normalspannungsverlauf im ULS über die Höhe des Turms (Turmvariante 1)

Schubspannungsnachweis

Die Schubspannungen ergeben sich aus den im Querschnitt wirkenden Querkräften und dem Torsionsmoment:

$$\tau_{Ed} = \tau_{V,Ed} + \tau_{M_T,Ed} \qquad (8\text{-}17)$$

mit τ_{Ed} Bemessungswert der Schubspannung
$\tau_{V,Ed}$ Bemessungswert der Schubspannung infolge Querkraft
$\tau_{MT,Ed}$ Bemessungswert der Schubspannung infolge Torsionsmoment

Da Flex 5 keine Schubspannungen ausgibt, sondern lediglich Querkräfte und das Torsionsmoment, müssen diese in Schubspannungen umgerechnet werden.

Nach Läpple (2007) ist die Schubspannung infolge einer Querkraft über den Umfang eines Kreisringquerschnitts veränderlich. Diese lässt sich in Abhängigkeit des Drehwinkels φ (vgl. Bild 8.5-5) wie folgt berechnen:

$$\tau_{V,Ed}(\varphi) = \frac{V_{Ed}}{\pi \cdot r_m \cdot b} \cdot \cos(\varphi) \qquad (8\text{-}18)$$

mit $\tau_{V,Ed}$ Bemessungswert der Schubspannung infolge Querkraft
V_{Ed} Bemessungswert der einwirkenden Querkraft
r_m mittlere Radius
b Wandungsstärke

Die maximale Schubspannung tritt demnach bei φ = 0° und φ = 180° auf. In der Wirkungslinie der Querkraft selbst ist die Schubspannung gleich Null.

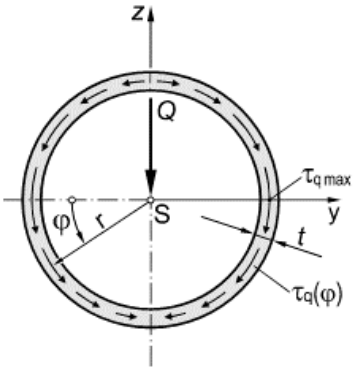


Bild 8.5-5: Schubspannungsverteilung infolge Querkraft [Läpple (2007]

Nach Gross et al. (2007) ist die Schubspannung infolge eines Torsionsmoments über den gesamten Umfang eines Kreisringquerschnitts konstant und lässt sich wie folgt berechnen:

$$\tau_{M_T,Ed} = \frac{M_{T,Ed}}{W_T} = \frac{M_{T,Ed}}{2 \cdot \pi \cdot r_m^{\,2} \cdot b} \qquad (8\text{-}19)$$

mit $\tau_{MT,Ed}$ Bemessungswert der Schubspannung infolge Torsionsmoment
$M_{T,Ed}$ Bemessungswert des einwirkenden Torsionsmoments
r_m mittlere Radius
b Wandungsstärke

Für den Schubspannungsnachweis wird zunächst vorausgesetzt, dass die Segmente an überdrückte Fugen angrenzen (B-Bereiche). Der Schubspannungsnachweis wird dann an zwei Stellen im Segment geführt:

- an der Stelle der maximalen Schubspannung (in Segmentmitte in der xy-Ebene, vgl. Bild 8.5-6);
- an der Stelle der minimalen Schubspannung und der minimalen Normalspannung (in Segmentmitte in der xz-Ebene, vgl. Bild 8.5-6).

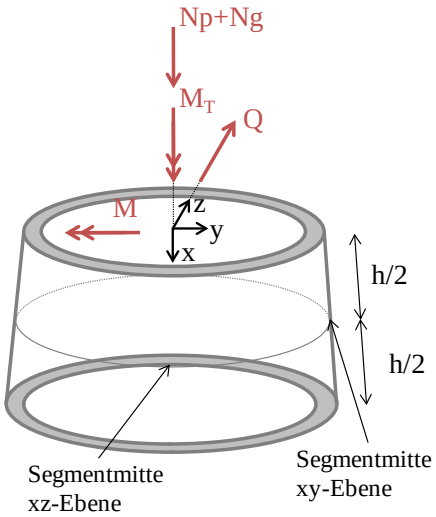


Bild 8.5-6: Definition der Stellen für den Schubspannungsnachweis im Segment

In Segmentmitte in der xy-Ebene werden die aus der Normalkraft N_g und der Vorspannkraft N_P resultierenden Normalspannungen vom Biegemoment nicht beeinflusst. Damit ergibt sich die Normalspannung in Segmentmitte in der xy-Ebene zu:

$$\sigma_{Ed} = -\left|\frac{N_g + N_p}{A}\right| \qquad (8\text{-}20)$$

In Segmentmitte in der xz-Ebene beeinflusst das Biegemoment die aus der Normalkraft N_g und der Vorspannkraft N_P resultierenden Normalspannungen. Damit ergibt sich die minimale Normalspannung in Segmentmitte in der xz-Ebene zu:

$$\sigma_{Ed} = -\left|\frac{N_g + N_p}{A}\right| + \left|\frac{M}{W}\right| \qquad (8\text{-}21)$$

Mit der Kenntnis der Normal- und Schubspannung können dann mit Hilfe des Mohr'schen Spannungskreises (vgl. Bild 8.5-7) die beiden Hauptspannungen ermittelt werden:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{Ed}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{Ed}}{2}\right)^2 + \tau_{Ed}{}^2} \qquad (8\text{-}22)$$

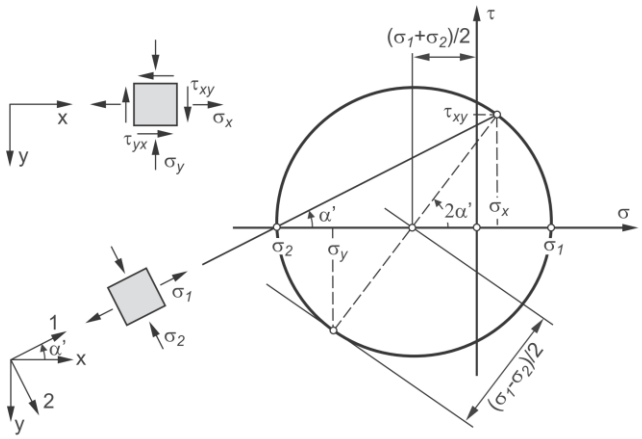


Bild 8.5-7: Mohr'scher Spannungskreis [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Bei den Hauptspannungen handelt es sich um die Hauptzug- und die Hauptdruckspannung. Diese wurden mit den folgenden Festigkeitswerten verglichen:

$$|\sigma_1| \leq f_{ctd,el} = 5{,}3\ MPa \qquad (8\text{-}23)$$

$$|\sigma_2| \leq f_{cRd} = 120{,}2\ MPa \qquad (8\text{-}24)$$

Die Schubspannungsnachweise sind in Anhang B.1.3.2 zu finden.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Nachweise für die Segmente, die an eine klaffende Fuge angrenzen, bestenfalls überschlägig gültig sind, da nicht mehr von einer linearen Spannungsverteilung ausgegangen werden kann. Für eine detaillierte Untersuchung dieser Segmente (D-Bereiche) ist eine Berechnung mit Hilfe der Finiten Element Methode (FEM) notwendig.

In wie weit die Stahlfasern für die Aufnahme von Zugspannungen angesetzt werden können und ob auf eine herkömmliche Bewehrung gänzlich verzichtet werden kann, wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht weiter untersucht.

Kraftübertragung in der Fuge

Bei dem Nachweis der Kraftübertagung in der Fuge wurde angenommen, dass die Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche „sehr glatt“ ist. Für diesen Fall ist nach DIN 1045-1 (2008) $c_j = 0$ und $\mu = 0{,}5$.

Nach Grünberg und Göhlmann (2011) lässt sich bei einer überdrückten Fuge die Tragfähigkeit wie folgt nachweisen (vgl. Bild 8.5-8a):

$$V_{Ed} + \frac{M_{T,Ed}}{2 \cdot r_m} \leq -0{,}25 \cdot N_{Ed} \qquad (8\text{-}25)$$

Für eine klaffende Fuge geben Grünberg und Göhlmann (2011) die folgende quadratische Interkation für den Tragfähigkeitsnachweis an:

$$\left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,ct}}\right)^2 + \left(\frac{M_{T,Ed}}{M_{T,Rd(ct)}}\right)^2 \leq 1 \qquad (8\text{-}26)$$

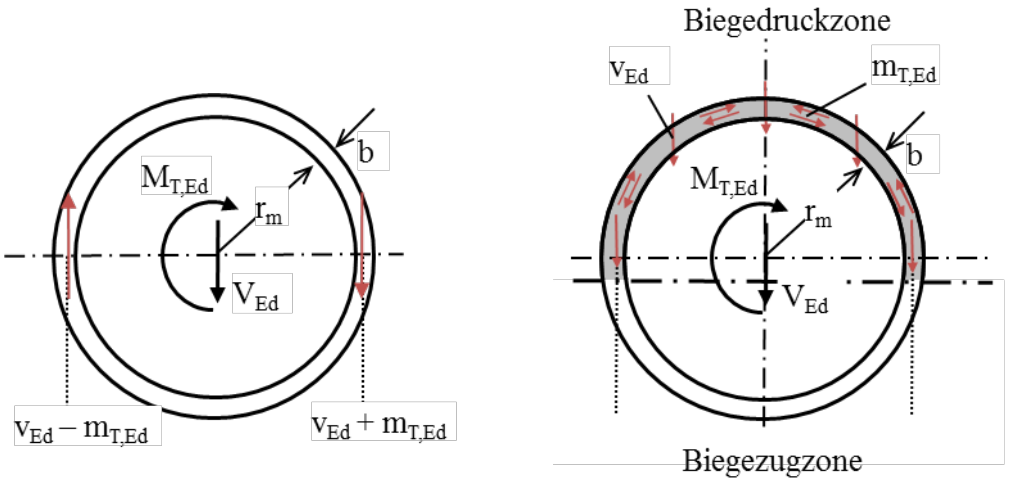
mit

$$V_{Rd,ct} = -\mu \cdot F_{cd} \qquad (8\text{-}27)$$

und

$$M_{T,Rd(ct)} = -\mu \cdot F_{cd} \cdot \frac{b}{3} \qquad (8\text{-}28)$$

Die Beanspruchung einer überdrückten und einer klaffenden Fuge ist in Bild 8.5-8 dargestellt.



a) überdrückt b) klaffend

Bild 8.5-8: Beanspruchung von Fugen [Grünberg und Göhlmann (2011)]

Die Nachweise für die Kraftübertragung in der Fuge finden sind in Anhang B.1.3.3. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem Klaffen der Fuge der Tragfähigkeitsnachweis nicht eingehalten wurde. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass sich im überdrückten Teilquerschnitt kein Bredt'scher Schubfluss mehr aufbauen kann und das Torsionsmoment allein über das St. Venant'sche Widerstandsmoment abgetragen werden muss [Grünberg und Göhlmann (2011)].

Der Nichteinhalt der Tragfähigkeitsnachweise wird unter Umständen auch dadurch verschärft, dass für die Nachweise die Maximal- und Minimalwerte der Schnittgrößen aus allen mit Flex 5 simulierten Lastfällen verwendet wurden und nicht die korrespondierenden Schnittgrößen aus einem Lastfall.

Ermüdungsnachweis

Grundlage des Ermüdungsnachweises sind die in Abschnitt 6.3 vorgestellten Wöhlerlinien für normalfesten und hochfesten Beton in Anlehnung an CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010) sowie die von Wefer (2010) vorgeschlagenen Wöhlerlinien für UHFFB.

Dem Ermüdungsnachweis liegt die lineare Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner zugrunde:

$$D = \sum_{i=1}^{J} \frac{n_i}{N_i} \leq D_{\lim} = 1 \qquad (8\text{-}29)$$

mit D Gesamtschädigung
n_i Schwingspielzahl mit der Schwingweite $\Delta\sigma$
N_i Bruchschwingspielzahl bei der Schwingweite $\Delta\sigma$

Hierbei wird angenommen, dass die Summe aller Teilschädigungen die Gesamtschädigung ergibt.

Wie bereits in Abschnitt 8.4 erwähnt, wurde die Gesamtschädigung nur zu 90% ausgenutzt, da mit Flex 5 nicht alle Ermüdungslastfälle simuliert werden konnten.

Hinsichtlich seines Ermüdungsverhaltens weist Beton eine starke Abhängigkeit von der Mittelspannung auf. Die Bruchlastspielzahl nimmt bei gleicher Schwingbreite mit wachsender Mittelspannung ab, was dazu führt, dass sich eine höhere Teilschädigung ergibt. Dies hat zur Folge, dass es einen bedeutenden Einfluss bei der Ermüdungsberechnung hat, ob die Vorspannkräfte zum Zeitpunkt t = 0 oder zum Zeitpunkt t = ∞ angenommen werden, d.h. ob die zeitabhängigen Spannkraftverluste bereits eingetreten sind oder nicht. Auf der sicheren Seite liegend werden die Vorspannkräfte zum Zeitpunkt t = 0 angenommen.

Der Ermüdungsnachweis wurde an verschiedenen Höhenkoten mit Hilfe der jeweiligen Markov-Matrix (vgl. Abschnitt 8.4) geführt. Dabei werden aus den Einträgen der Markov-Matrix die Teilschädigungen berechnet. Die einzelnen Berechnungsschritte sind in Seidl (2002) erläutert.

Die Ergebnisse der Ermüdungsnachweise auf Grundlage der unterschiedlichen Wöhlerlinien zeigen, wie deutlich sich die Gesamtschädigung, vor allem mit zunehmender Höhenkote, unterscheiden (vgl. Tabelle 8.5-4). Dies ist auf die Abweichung der unterschiedlichen Wöhlerlinien voneinander zurückzuführen. Während die Einträge in der Markov-Matrix für die Höhenkote 59,50 m größtenteils im Bereich von 10^4 bis 10^5 Schwingungen liegen, also in einem Bereich, in dem die unterschiedlichen Wöhlerlinien geringer voneinander abweichen, liegen die für die Höhenkote 128,57 m größtenteils im Bereich von 10^6 bis 10^7 Schwingungen, also in einem Bereich, in dem die unterschiedlichen Wöhlerlinien stärker voneinander abweichen.

Tabelle 8.5-4: Gesamtschädigung an verschiedenen Höhenköten der Turmvariante 1

Höhenkote	Sensor	Gesamtschädigung	
		CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010)	Wefer (2010)
128,57 m	428X	7,63E-28	2,44E-10
112,00 m	421X	3,69E-43	4,11E-11
109,50 m	420X	2,38E-34	3,09E-10
87,00 m	411X	3,88E-18	2,06E-09
84,50 m	410X	3,68E-06	2,49E-06
59,50 m	400X	7,30E-06	3,31E-06

Um den Einfluss einzelner Einträge in der Markov-Matrix auf die Gesamtschädigung zu verdeutlichen, sind in Bild 8.5-9 und Bild 8.5-10 die Teilschädigungen für die unterschiedlichen Wöhlerlinien auf Basis der gleichen Markov-Matrix dargestellt. Man erkennt, dass mit der Wöhlerlinie für normalfesten und hochfesten Beton in Anlehnung an CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010) einzelne Einträge in der Markov-Matrix teilweise die 4 bis 6-fache Teilschädigung verursachen im Vergleich mit der von Wefer (2010) vorgeschlagenen Wöhlerlinie für UHFFB. Dennoch ist die Gesamtschädigung am Turmfuß ist nach Tabelle 8.5-4 jedoch nur etwa doppelt so groß. Folglich muss das Niveau der restlichen Teilschädigungen auf Grundlage der Wöhlerlinien nach Wefer (2010) höher liegen als auf Grundlage der Wöhlerlinien für normalfesten und hochfesten Beton in Anlehnung an CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010).

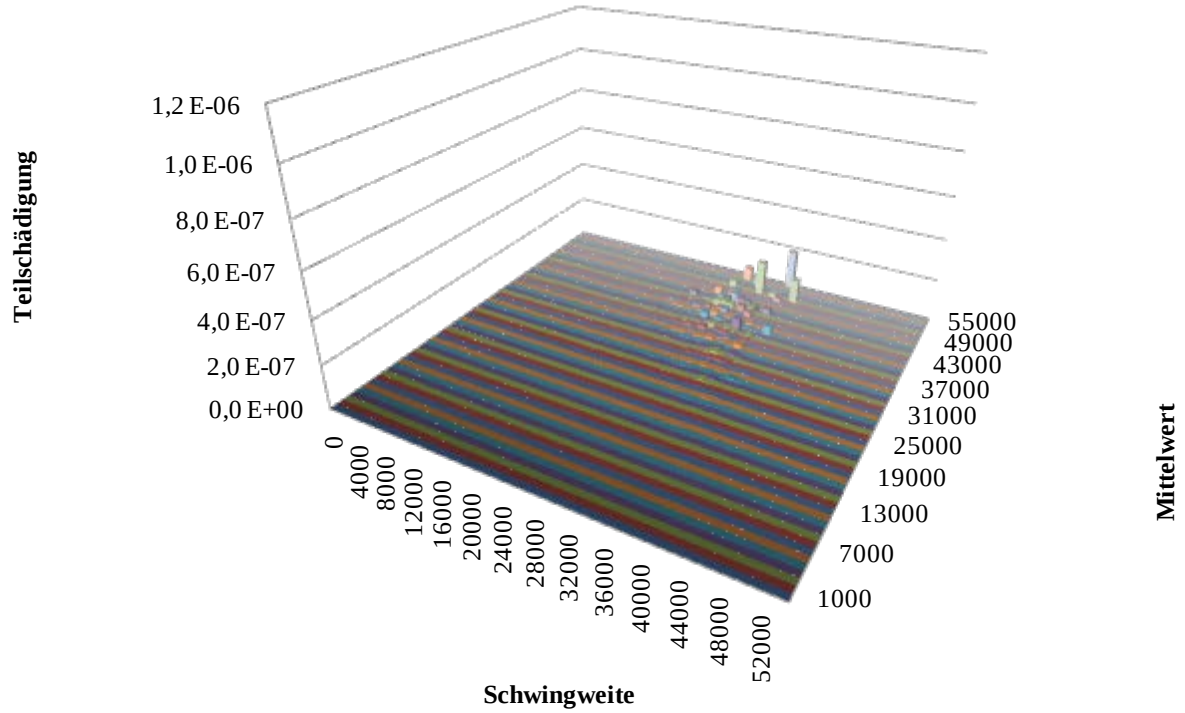


Bild 8.5-9: Teilschädigung am Turmfuß (Höhenkote 59,50 m) auf Grundlage der Wöhlerlinien nach Wefer (2010)

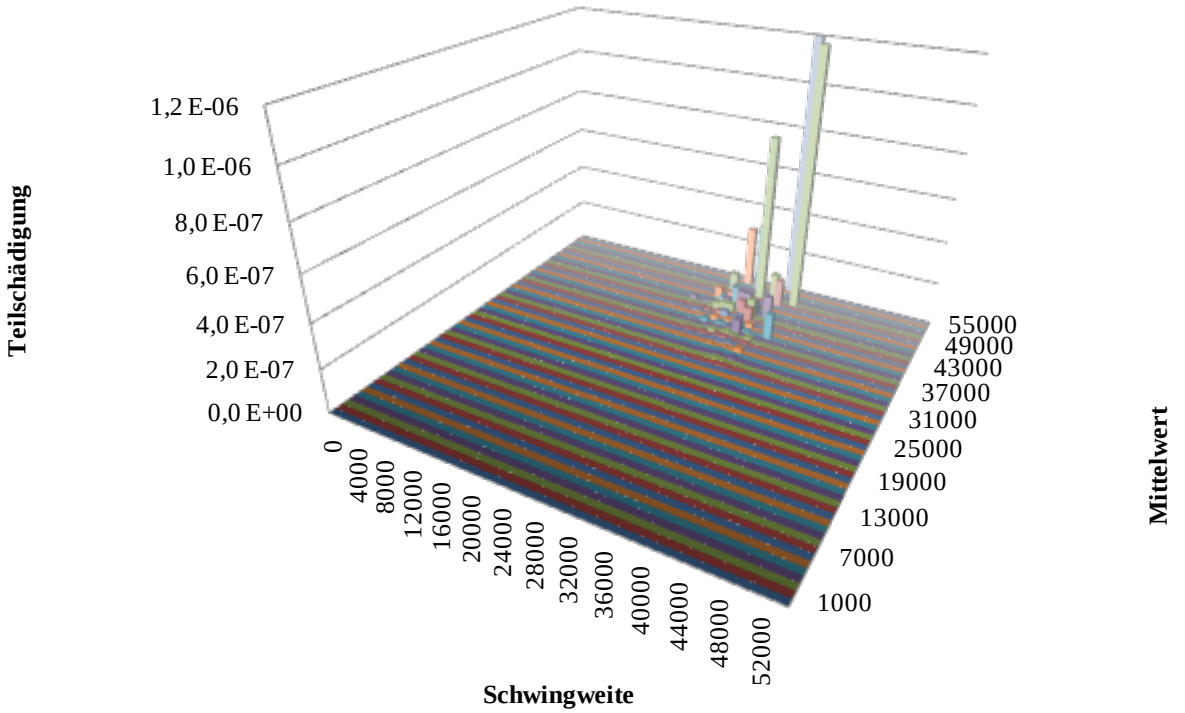


Bild 8.5-10: Teilschädigung am Turmfuß (Höhenkote 59,50 m) auf Grundlage der Wöhlerlinien für normalfesten und hochfesten Beton in Anlehnung an CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010)

8.5.2.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Nach DIN 1045-1 (2008) sind zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit unter anderem die folgenden Nachweise gefordert:

- Nachweis der Dekompression;
- Begrenzung der Spannung im Beton;
- Begrenzung der Verformung;
- Begrenzung der Rissbreite.

Es sei darauf hingewiesen, dass stets die minimale Normalkraft aus allen mit Flex 5 simulierten Lastfällen angesetzt wurde. Dazu wurden die folgenden Schnittgrößen angesetzt:

- Vorspannung zum Zeitpunkt t = 0 (N_{P0})

  Maximales Moment aus Power Production Lastfällen (DLC 1.1, DLC1.3, DLC 1.5 - 1.9) und den Ermüdungslastfällen DLC 3.1 und DLC 4.1 + M_{temp} + M_{imp}

- Vorspannung zum Zeitpunkt t = ∞ ($N_{P\,\infty}$)

  Maximales Moment aus Power Production Lastfällen (DLC 1.1, DLC 1.3, DLC 1.5 - 1.9) und den Ermüdungslastfällen DLC 3.1 und DLC 4.1 + M_{temp} + M_{imp}

- Vorspannung zum Zeitpunkt t = 0 (N_{P0})

  Moment aus der 99%-Fraktile (MLDD99%) + M_{temp} + M_{imp}

- Vorspannung zum Zeitpunkt t = ∞ ($N_{P\,\infty}$)

  Moment aus der 99%-Fraktile (MLDD99%) + M_{temp} + M_{imp}

Nachweis der Dekompression

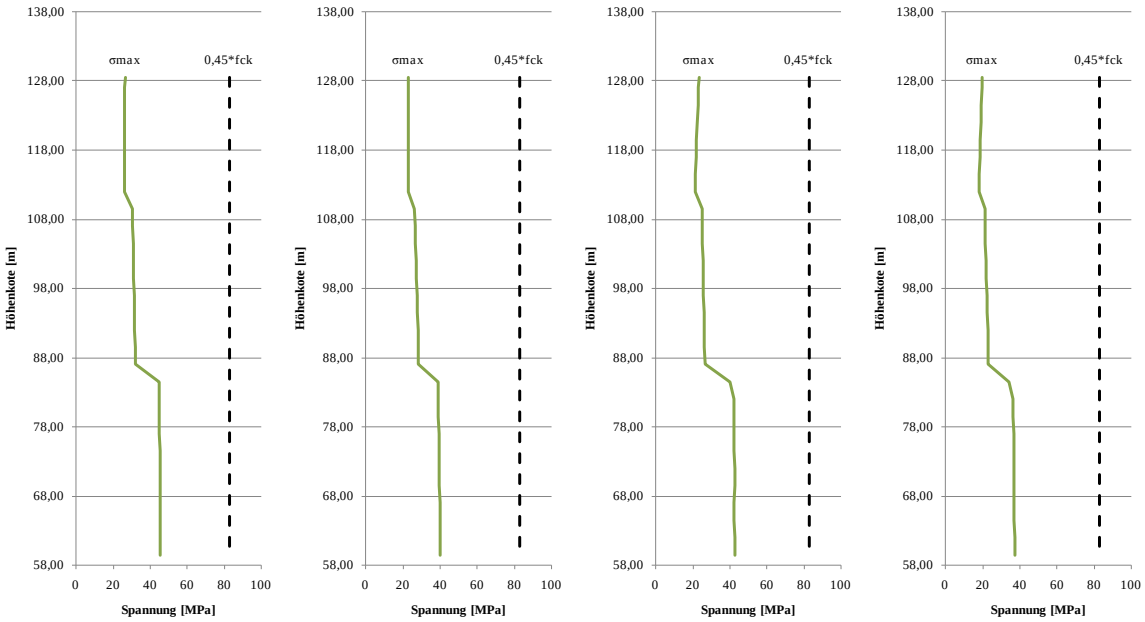
Der Nachweis der Dekompression wurde bereits im Zusammenhang mit der Dimensionierung der Vorspannkraft durchgeführt (vgl. Abschnitt 8.5.2.1).

Begrenzung der Spannungen im Beton

Bei einer Druckspannung von mehr als $0{,}45 \cdot f_{ck}$ verändert sich das Kriechverhalten von Normalbeton stark. Deshalb muss für Bauwerke, deren Gebrauchstauglichkeit durch Kriechvorgänge beeinflusst wird, die Spannung im SLS auf $0{,}45 \cdot f_{ck}$ begrenzt werden.

Nach Schmidt et al. (2008) ist diese Spannungsbegrenzung auf für UHFFB anzuwenden. Die Betondruckspannung werden deshalb gemäß DIN 1045-1 (2008) unter der quasi-ständigen Einwirkungskombination auf $0{,}45 \cdot f_{ck} = 0{,}45 \cdot 183{,}8$ MPa = 82,7 MPa begrenzt.

In Bild 8.5-11 ist zu erkennen, dass die Spannungen immer unterhalb von $0{,}45 \cdot f_{ck}$ = 82,7 MPa lagen.



a) $N_{min}+ N_{P0}$ $M_{PP}+M_{temp}+M_{imp}$ b) $N_{min}+ N_{P\infty}$ $M_{PP}+M_{temp}+M_{imp}$ c) $N_{min}+ N_{P0}$ $M_{LDD99\%}+M_{temp}+M_{imp}$ d) $N_{min}+ N_{P\infty}$ $M_{LDD99\%}+M_{temp}+M_{imp}$

Bild 8.5-11: Normalspannungsverlauf im SLS über die Höhe des Turms (Turmvariante 1)

Bauwerke, die sich im unmittelbaren Spritzwasserbereich von Meerwasser oder in salzhaltiger Luft ohne direkten Meerwasserkontakt befinden, werden in die Expositionsklassen XS3 bzw. XS1 eingestuft. Der UHFFB Turm der OWEA fällt genau in diese Klassen. Da keine weiteren Maßnahmen zur Vermeidung von Längsrissen getroffen wurden, muss für diese Expositionsklassen in Übereinstimmung mit Schmidt et al. (2008) nach DIN 1045-1 (2008) unter der seltenen Einwirkungskombination die Betondruckspannung auf $0{,}6 \cdot f_{ck}$ begrenzt werden. In Germanischer Lloyd (2005) wird keine Lastkombination angegeben, die dieser Einwirkungskombination entspricht. Grünberg und Göhlmann (2011) geben jedoch an, dass die seltene Einwirkungskombination dem DLC 1.6 entspricht. Bisherige Berechnungen im SLS decken diesen DLC bereits durch die maximalen Schnittgrößen der Power Produktion Lastfälle ab.

Begrenzung der Verformungen

In Germanischer Lloyd (2005) ist für die maximale Verformung des Turmtragwerks einer OWEA kein expliziter Grenzwert angegeben. Die maximale Verformung ist lediglich so zu begrenzen, dass die Gebrauchstauglichkeit nicht beeinträchtigt und eine Schädigung verhindert wird.

Begrenzung der Rissbreiten

Der Nachweis der Begrenzung der Rissbreiten ist nicht trivial. Die DIN 1045-1 (2008) schreibt für die Begrenzung der Rissbreiten eine Mindestbewehrung vor. In wie weit die Stahlfasern für die Begrenzung der Rissbreite angesetzt werden können, wird nicht angegeben.

Schmidt et al. (2008) geben an, dass im Einzelfall zu untersuchen ist, ob Stahlfasern als Mindestbewehrung angesetzt werden können. Sie weisen darauf hin, dass durch die Art der Fasern, dem Fasergehalt, der Faserorientierung und der Verteilung im Querschnitt große Unterschiede auftreten können.

8.5.3 Turmvariante 3

Im Vergleich zur Turmvariante 1 wurde für die weiteren Turmvarianten die Wandungsstärke über die Höhe des Turms bereichsweise reduziert. Die Bereiche entsprachen dabei den Abstufungen der Spannglieder.

Nach Germanischer Lloyd muss die Wandungsstärke mindestens 1/20 des Radius betragen, um zu garantieren, dass die "pipe bending theory" eingehalten ist. Unter Berücksichtigung dessen wurde für Turmvariante 3 die Wandungsstärke wie in Bild 8.5-12 dargestellt gewählt.

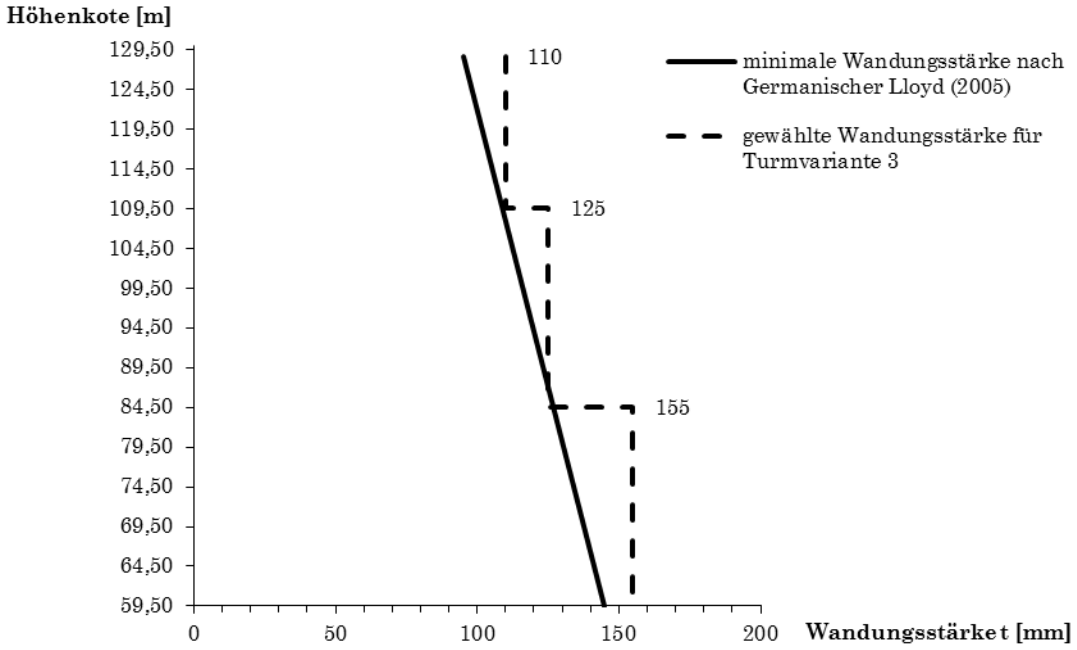


Bild 8.5-12: Minimale Wandungsstärke über die Höhe des UHFFB Turms nach Germanischer Lloyd (2005)

Es wurde erneut eine Eigenfrequenzanalyse durchgeführt, um sicher zu stellen, dass auch bei veränderter Turmgeometrie ein ausreichender Abstand zwischen der Eigenfrequenz der Tragstruktur und den Erregerfrequenzen gewährleistet ist (vgl. Bild 8.5-13). Im Vergleich zu Turmvariante 1 änderte sich der Streubereich der 1. Eigenfrequenz nicht wesentlich.

Die Veränderung der Turmgeometrie wirkt sich auch auf die gesamtdynamische Berechnung aus, so dass die Schnittgrößen neu ermittelt werden mussten. Diese sind in Anhang B.2.1 angegeben.

Um ein Versagen der Kraftübertragung in der Fuge zu vermeiden, wurden für Turmvariante 3 die Vorspannkräfte so gewählt, dass die Fugen auch im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) überdrückt sind. Die Anzahl der dafür benötigten Spannglieder sowie die Rechenwerte der Vorspannkräfte kann der Tabelle 8.5-5 entnommen werden.

Trotz der dünneren Wandungsstärke der Segmente und der höheren Vorspannkräfte konnte der Normalspannungsnachweis (vgl. Bild 8.5-14) und der Schubspannungsnachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) eingehalten werden. Auch die Kraftübertragung in der Fuge konnte unter der Voraussetzung, dass die Fugen auch im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) überdrückt sind, nachgewiesen werden. Die Berechnungen hierfür sind im Anhang B.2.2.3 zu finden.

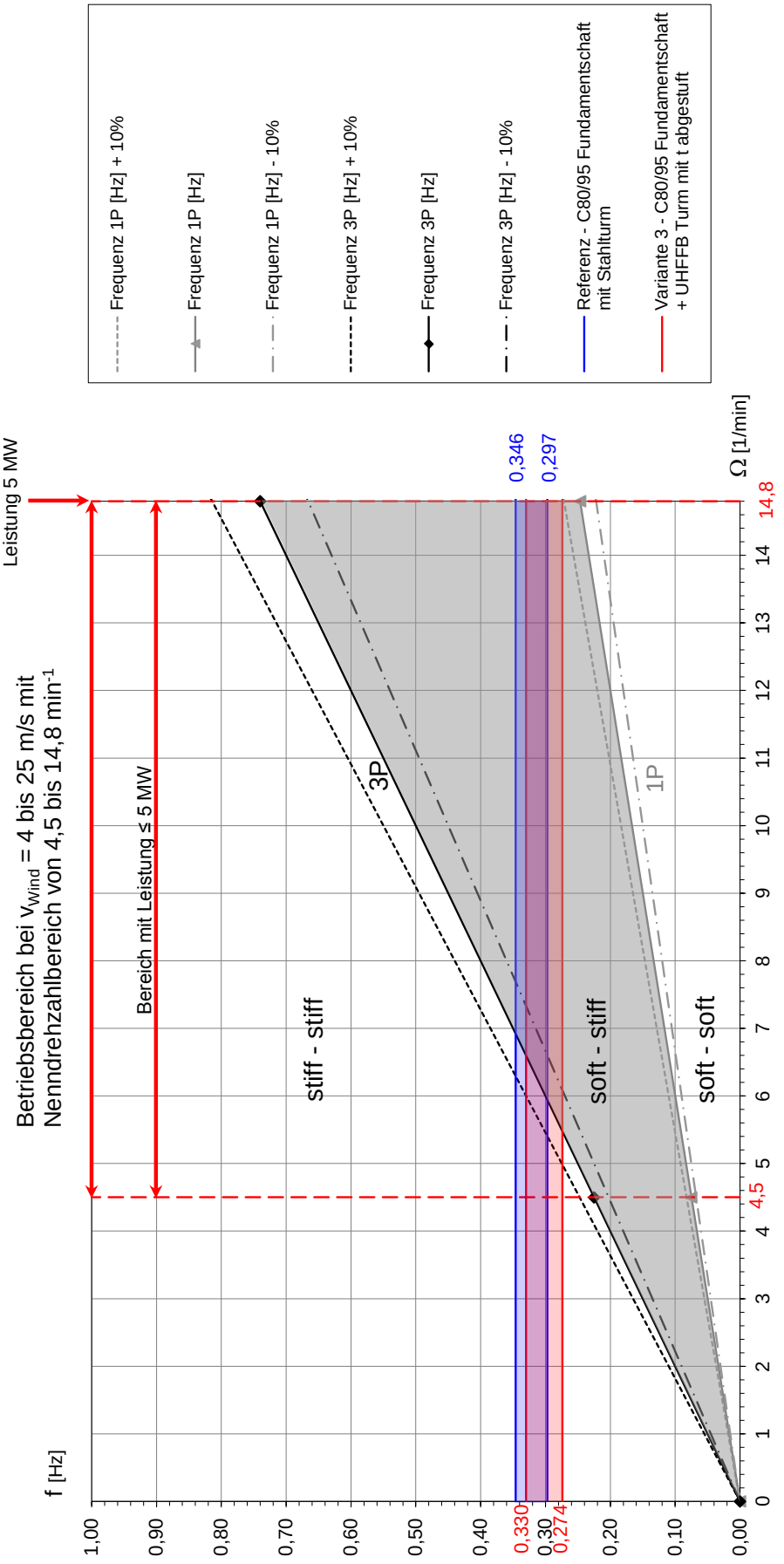
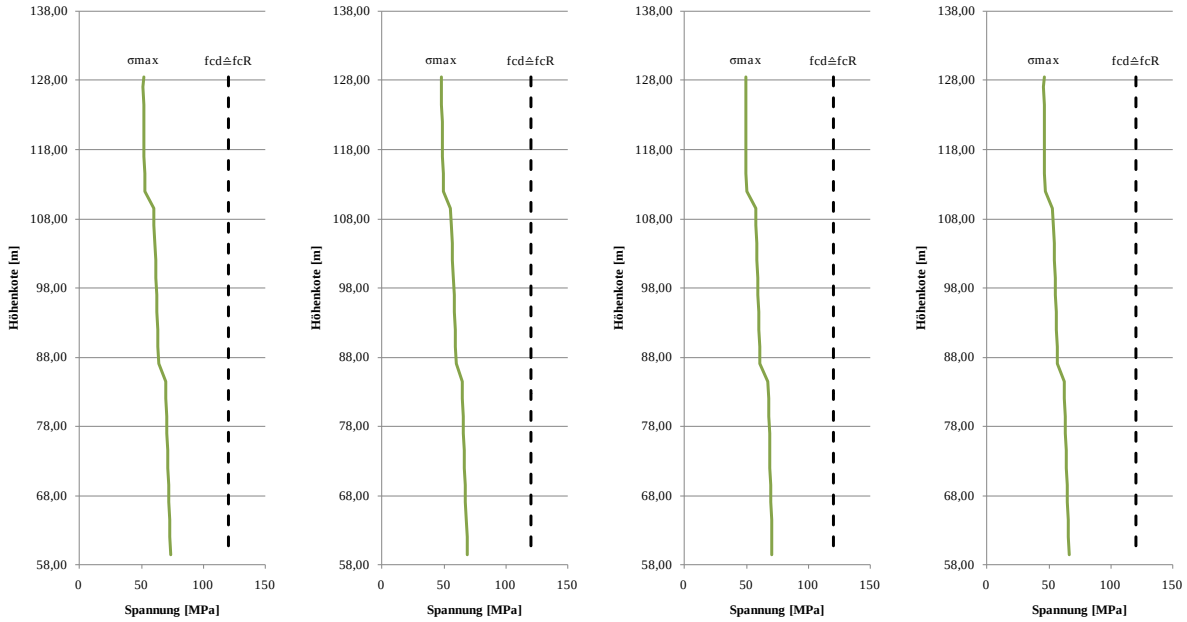


Bild 8.5-13: Resonanzdiagramm (engl. *Campbell-Diagram*) für Turmvariante 3 mit C80/95 Fundamentschaft und Turm aus UHFFB mit abgestufter Wandungsstärke

Tabelle 8.5-5: Rechenwerte der Vorspannkraft (Turmvariante 3)

		Rechenwerte			
		SLS		ULS	
Spannglieder	Vorspannkraft	t = 0	t = ∞	t = 0	t = ∞
VT-CMM 4x04-165 KD	P_{m0} [kN]	$P_{k,sup}$ [kN]	$P_{k,inf}$ [kN]	P_d [kN]	P_d [kN]
11	11 x 3523 = 38753	38753 x 1,05 = 40690,65	38753 x 0,95 x 0,875 = 32213,43	38753 x 1,0 = 38753,00	38753 x 1,0 x 0,875 = 33908,88
17	17 x 3523 = 59891	59891 x 1,05 = 62885,55	59891 x 0,95 x 0,875 = 49784,39	59891 x 1,0 = 59891,00	59891 x 1,0 x 0,875 = 52404,63
29	29 x 3523 = 102167	102167 x 1,05 = 107275,35	102167 x 0,95 x 0,875= 84926,32	102167 x 1,0 = 102167,00	102167 x 1,0 x 0,875 = 89396,13



a) $N_{max} + N_{P0}$ b) $N_{max} + N_{P\infty}$ c) $N_{min} + N_{P0}$ d) $N_{min} + N_{P\infty}$

Bild 8.5-14: Normalspannungsverlauf im ULS über die Höhe des Turms (Turmvariante 3)

Die Erhöhung der Vorspannkräfte zum Einhalt des Kraftübertrags in der Fuge hat jedoch einen negativen Einfluss auf den Ermüdungsnachweis, da dadurch die Mittelspannung und somit das Schädigungsniveau angehoben wird. Die Ergebnisse der Ermüdungsnachweise sind in Tabelle 8.5-6 dargestellt. Daraus kann entnommen werden, dass weder die Ermüdungsnachweise auf Grundlage der Wöhlerlinien für normalfesten und hochfesten Beton in Anlehnung an CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010) noch auf Grundlage der Wöhlerlinien nach Wefer (2010) eingehalten werden.

Tabelle 8.5-6: Gesamtschädigung an verschiedenen Höhenköten der Turmvariante 3

Höhenkote	Sensor	Gesamtschädigung	
		CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010)	Wefer (2010)
128,57 m	428X	0,0075	6,80E-05
112,00 m	421X	2,08E-08	3,80E-07
109,50 m	420X	0,022	0,00022
87,00 m	411X	**0,98**	0,00311
84,50 m	410X	**11565,21**	**66,32**
59,50 m	400X	**1443,00**	**6,74**

Die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) wurden eingehalten.

8.5.4 Turmvariante 5

Im Vergleich zu Turmvariante 3 wurde die Wandungsstärke im unteren und mittleren Bereich erhöht, um ein Ermüdungsversagen zu vermeiden.

Es wurde erneut eine Eigenfrequenzanalyse durchgeführt, um sicher zu stellen, dass auch bei veränderter Turmgeometrie ein ausreichender Abstand zwischen der Eigenfrequenz der Tragstruktur und den Erregerfrequenzen gewährleistet ist (vgl. Bild 8.5-15). Im Vergleich zu Turmvariante 1 und Turmvariante 3 verschob sich der Streubereich der 1. Eigenfrequenz im Resonanzdiagramm geringfügig nach oben.

Die Veränderung der Turmgeometrie wirkt sich auch auf die gesamtdynamische Berechnung aus, so dass die Schnittgrößen neu ermittelt werden mussten. Diese sind in Anhang B.3.1 angegeben.

Um ein Versagen der Kraftübertragung in der Fuge zu vermeiden, wurden auch für Turmvariante 5 die Vorspannkräfte so gewählt, dass die Fugen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) überdrückt sind. Die Anzahl der dafür benötigten Spannglieder sowie die Rechenwerte der Vorspannkräfte kann der Tabelle 8.5-7 entnommen werden.

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) wurden die Spannungsnachweise für die Normal- und Schubspannung eingehalten. Zudem waren sowohl die Kraftübertragung in der Fuge gewährleistet als auch die Ermüdungsnachweise eingehalten (vgl. Tabelle 8.5-8).

Die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) wurden ebenso eingehalten.

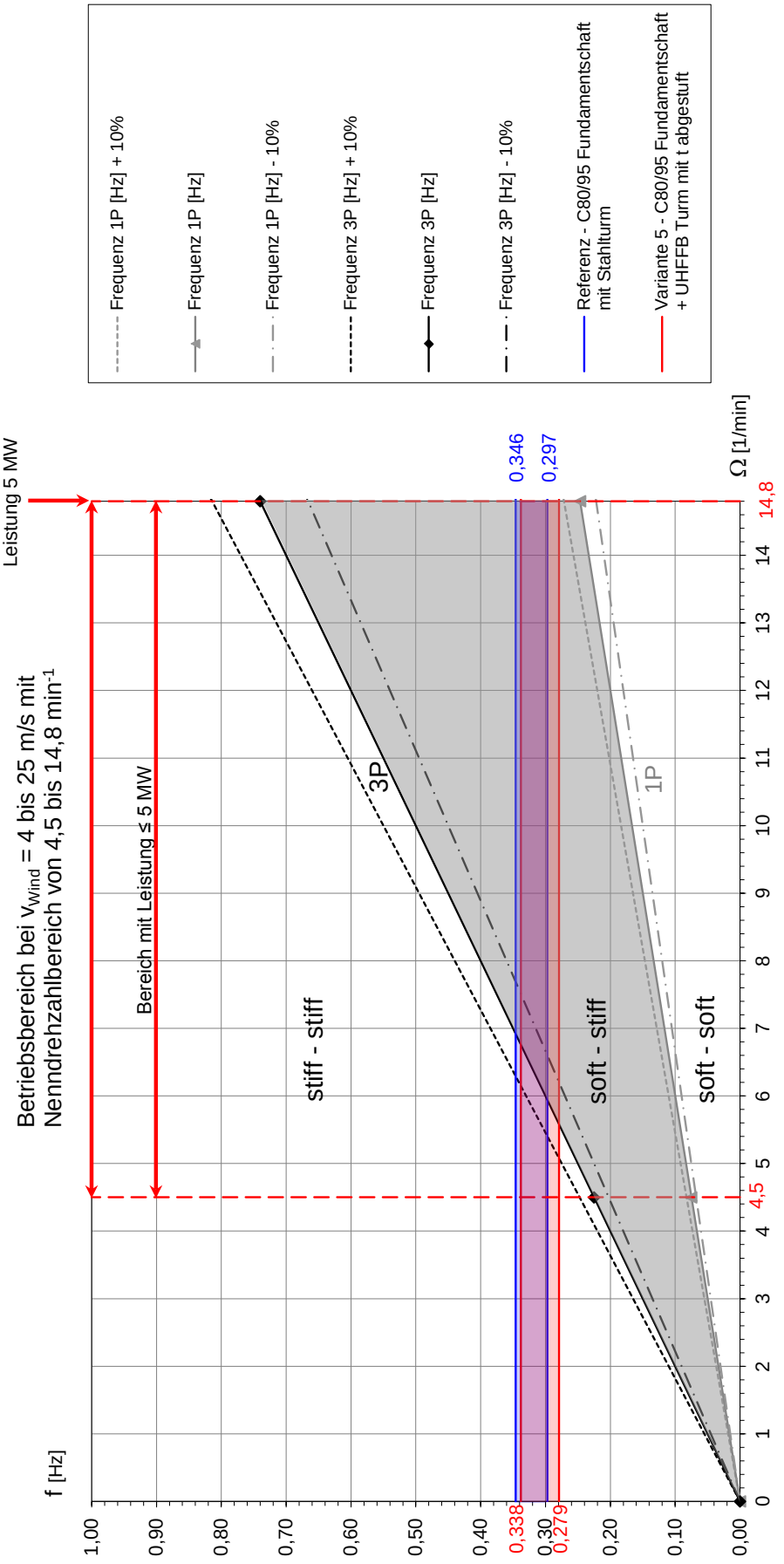


Bild 8.5-15: Resonanzdiagramm (engl. *Campbell-Diagram*) für Turmvariante 5 mit C80/95 Fundamentschaft und Turm aus UHFFB mit abgestufter Wandungsstärke

Tabelle 8.5-7: Rechenwerte der Vorspannkraft (Turmvariante 5)

		Rechenwerte			
		SLS		ULS	
Spannglieder	Vorspannkraft	t = 0	t = ∞	t = 0	t = ∞
VT-CMM 4x04-165 KD	P_{m0} [kN]	$P_{k,sup}$ [kN]	$P_{k,inf}$ [kN]	P_d [kN]	P_d [kN]
11	11 x 3523 = 38753	38753 x 1,05 = 40690,65	38753 x 0,95 x 0,875 = 32213,43	38753 x 1,0 = 38753,00	38753 x 1,0 x 0,875 = 33908,88
17	17 x 3523 = 59891	59891 x 1,05 = 62885,55	59891 x 0,95 x 0,875 = 49784,39	59891 x 1,0 = 59891,00	59891 x 1,0 x 0,875 = 52404,63
30	30 x 3523 = 105690	105690 x 1,05 = 110974,50	105690 x 0,95 x 0,875= 87854,81	105690 x 1,0 = 105690,00	105690 x 1,0 x 0,875 = 92478,75

Tabelle 8.5-8: Gesamtschädigung an verschiedenen Höhenköten der Turmvariante 5

Höhenkote	Sensor	Gesamtschädigung	
		CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010)	Wefer (2010)
128,57 m	428X	0,00813404	7,03E-05
112,00 m	421X	2,93E-08	4,83E-07
109,50 m	420X	2,23E-06	4,82E-06
87,00 m	411X	0,00124739	4,49E-05
84,50 m	410X	0,66614419	0,00118791
59,50 m	400X	0,12357924	0,00050717

8.5.5 Vergleich der untersuchten Turmvarianten

Ein Vergleich der untersuchten Turmvarianten zeigt, dass zwei Nachweise maßgebend wurden:

- der Nachweis des Kraftübertrags in der klaffenden Fuge;
- der Ermüdungsnachweis.

Zwischen den beiden Nachweisen besteht eine starke Interaktion. Wird der Kraftübertrag in der Fuge dadurch gewährleistet, dass die Vorspannkraft erhöht wird, wird der Ermüdungsnachweis maßgebend. Wird die Vorspannkraft verringert, um den Ermüdungsnachweis einzuhalten, ist der Kraftübertrag in der Fuge nicht mehr gewährleistet.

Tabelle 8.5-9: Vergleich der untersuchten Turmvarianten

	Variante 1	Variante 2 [1)]	Variante 3	Variante 4 [1)]	Variante 5
Wandungsstärke des Turms	konstant: 200 mm		abgestuft: 110 mm 125 mm 155 mm		abgestuft: 110 mm 140 mm 190 mm
Betonvolumen des Turms	208,45 m³		142,89 m³ -31,45 %		164,28 m³ -21,19 %
Dimensionierung der Vorspannung	Klaffen der Fuge im ULS		Fuge überdrückt im ULS		Fuge überdrückt im ULS
benötigte Anzahl an Spanngliedern	25		29		30
Gesamtlänge der Spannglieder	1184,81 m		1359,81 m +12,87 %		1384,81 m +16,88 %
nicht eingehaltener Nachweis	Schubspannung in der Fuge		Ermüdung		-

[1)] Variante 2 und Variante 4 wurden im Rahmen dieses Abschlussberichts nicht dokumentiert.

Bei Turmvariante 5 wurden alle Nachweise eingehalten, trotz deutlicher Reduzierung der Wandungsstärke im oberen und mittleren Bereich. Insgesamt ließ sich das benötigte Betonvolumen im Vergleich zur Turmvariante 1 um 21,19% reduzieren.

Eine Steigerung der Fugentragfähigkeit, bei der die Kräfte auch über die klaffende Fuge übertragen werden können, hätte zur Folge, dass die Vorspannkräfte reduziert werden können. Daraus würde eine geringere Ermüdungsbelastung resultieren, die eine weitere Reduktion der Wandungsstärke ermöglichen würde.

9 Versuche an Fugen

9.1 Allgemeines

9.1.1 Lage der Fuge im Bauteil

Randl et al. (2008) wiesen darauf hin, dass die Tragfähigkeit von Fugen unter anderem von der Lage der Fuge im Bauteil abhängt. Dabei gilt es folgende Unterscheidung zu treffen:

- Beanspruchung der Fuge durch „Längsschub“ (dabei tritt die Schubbeanspruchung parallel zur Bauteilachse oder Bauteileben auf; vgl. Bild 9.1-1);
- Beanspruchung der Fuge durch „Biegeschub“ (dabei tritt die Schubbeanspruchung senkrecht zur Bauteilachse oder Bauteileben auf; vgl. Bild 9.1-2).

Diese Unterscheidung ist deshalb bedeutend, da die Bemessungsformeln in den einschlägigen Normen des Hochbaus in der Regel für „längsschubbeanspruchte“ Fugen hergeleitet wurden und nach Randl et al. (2008) nicht bedenkenlos bei einer anderen Art der Schubbeanspruchung angewendet werden dürfen. Bemessungsansätze für „biegebeanspruchte“ Fugen können den Richtlinien des Segmentbrückenbaus [DBV (1999)] und Forschungsarbeiten aus dem Bereich des Segmentbrückenbaus entnommen werden [Specker (2001)].

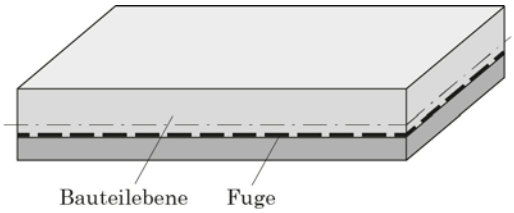
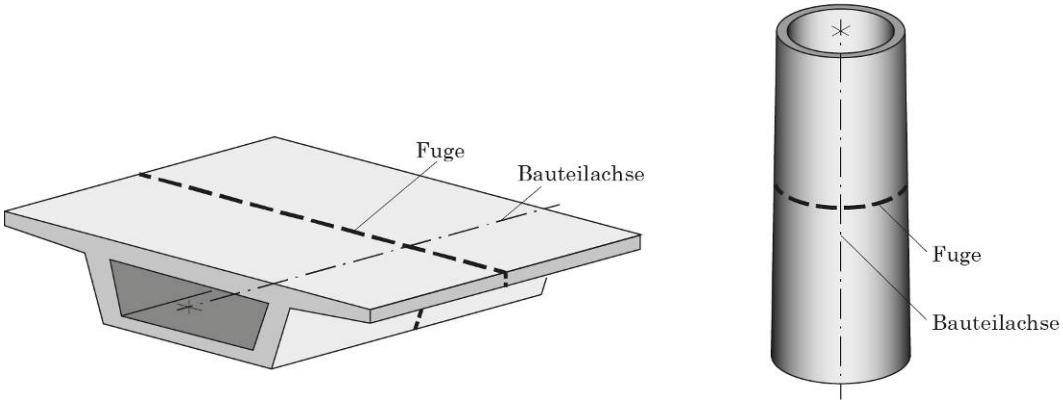


Bild 9.1-1: Schubbeanspruchung parallel zur Bauteilebene am Beispiel einer Fertigteildecke mit Ortbetonergänzung



a) Segmentfertigteilbrücke b) Turmtragwerk in Segmentbauweise

Bild 9.1-2: Schubbeanspruchung senkrecht zur Bauteilachse

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts liegt der Fokus auf der experimentellen Untersuchung von „biegeschubbeanspruchten“ Fugen, wie sie bei Fertigteiltürmen in Segmentbauweise vorkommen.

9.1.2 Fugenarten

Nach einer ausführlichen Studie der gebräuchlichen Fugenarten bei Segmentfertigteilbrücken nahmen Guckenberger et al. (1980) eine Abgrenzung der Fugen nach deren Dicke vor. Demnach lassen sich die folgenden Fugenarten unterscheiden:

- Verfüllfugen (Fugen mit Füllmaterial in Form von Beton oder Zementmörtel);
- Pressfugen (Fugen mit einer dünnen Zwischenschicht aus Epoxidharz- oder Zementmörtel);
- Trockenfugen (Fugen ohne Füllmaterial oder Zwischenschicht).

Die Vorteile der Trockenfugen gegenüber den Press- und Verfüllfugen wurden unter anderem von Specker (2001) diskutiert. Diese liegen insbesondere im Bereich der Herstellung und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- niedrigere Kosten durch verkürzte Bauzeit, da kein zusätzlicher Zeitaufwand für die Aushärtung des Füllmaterials oder der Zwischenschicht anfällt;
- einfache Montage und Demontage der Segmente durch Lösen der Vorspannung.

Auf Grund der genannten Vorteile wurden für das im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelte Konzept für Turmtragwerke aus UHFFB in Segmentbauweise vorgeschlagen, dass die Fugen als Trockenfugen ausgeführt werden.

9.2 Übersicht über das Versuchsprogramm zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen

9.2.1 Zweck der Versuche

Zur Beurteilung des grundsätzlichen Tragverhaltens von segmentären Tragwerken im Vergleich zu monolithischen Tragwerken interessieren nach Guckenberger et al. (1980) die folgenden Fragestellungen:

1. Wie entwickeln sich die Biege- und Schubrisse im Segment und wieweit wird deren Verteilung und deren Verlauf von den Fugen beeinflusst?
2. Bis zu welcher Höhe können Druckstrebenkräfte bei gegebenem Druckstrebenwinkel über die Fuge übertragen werden?

Zur Beurteilung der ersten Frage werden üblicherweise Bauteilversuche durchgeführt.

Die zweite Frage lässt sich in der Regel durch Versuche an kleinteiligen Versuchskörpern beantworten. Nach Randl et al. (2008) kann die Tragfähigkeit von Fugen durch rein theoretische Überlegungen nicht vorhergesagt werden, da die zur Beschreibung der wesentlichen Traganteile verwendeten Beiwerte in den einschlägigen Bemessungsformeln nur an Hand von Versuchen kalibriert werden können. Aus diesem Grund wurden zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen experimentelle Untersuchungen sowohl unter statischer als auch zyklischer Belastung durchgeführt.

9.2.2 Geometrie der Versuchskörper und Auswertung der Versuche

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Fuge bzw. der Grenzbeziehung der in der Fuge wirkenden Schub- und Normalspannungen werden üblicherweise Schub-Druck-Versuche an prismatischen Versuchskörpern durchgeführt (vgl. Bild 9.2-1).

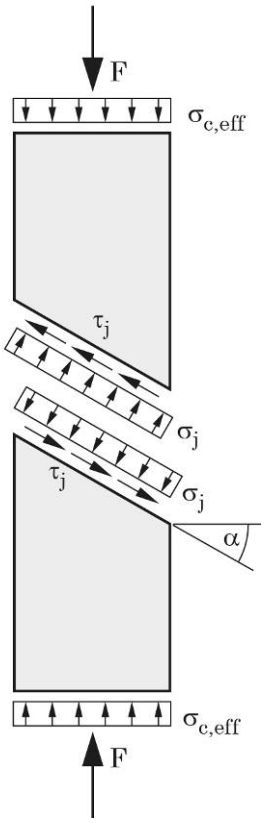


Bild 9.2-1: Versuchskörper für die Durchführung von Schub-Druck-Versuchen zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Fugen

In Bild 9.2-2 ist die gedachte Lage der Versuchskörper in einem Turmtragwerk in Segmentbauweise dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass die sich aus der Druckstrebenkraft ergebenden und vom Druckstrebenwinkel abhängigen Beanspruchungskombinationen in der Fuge über die Variation des Fugenneigungswinkels α der Versuchskörper erfasst werden können.

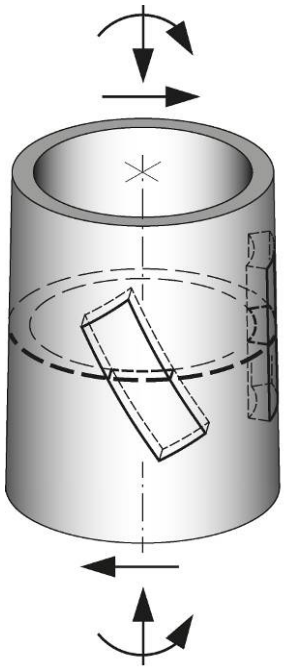


Bild 9.2-2: Gedachte Lage der prismatischen Versuchskörper in einem Turmtragwerk in Segmentbauweise

Für die Auswertung der Schub-Druck-Versuche nach Bild 9.2-1 wird ein einaxialer Spannungszustand angenommen:

$$\sigma_{c,eff} = -\frac{|F|}{A_c} \qquad (9\text{-}1)$$

mit $\sigma_{c,eff}$ [MPa] in Richtung der Prüfkraft wirkende Spannung
F [N] Prüfkraft
A_c [mm²] Querschnittfläche des Versuchskörpers

Anschließend können unter Berücksichtigung des Fugenneigungswinkels α die in der Fuge wirkenden Schub- und Normalspannungen wie folgt berechnet werden:

$$\tau_j = \sigma_{c,eff} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \qquad (9\text{-}2)$$

$$\sigma_j = \sigma_{c,eff} \cdot \cos^2\alpha \qquad (9\text{-}3)$$

mit τ_j [MPa] Schubspannung in der Fuge
σ_j [MPa] Normalspannung in der Fuge
$\sigma_{c,eff}$ [MPa] in Richtung der Prüfkraft wirkende Spannung
α [°] Fugenneigungswinkel

Die Ergebnisse der Schub-Druck-Versuche können zweckmäßig in einem Schub-Druck-Diagramm dargestellt werden (vgl. Bild 9.2-3), das aus theoretischen Überlegungen von Zelger und Rüsch (1961) hervorging. Dabei wird derjenige Punkt in das Schub-Druck-Diagramm eingetragen, der die in der Fuge wirkende Schub- und Normalspannung bei Versagen des Versuchskörpers beschreibt.

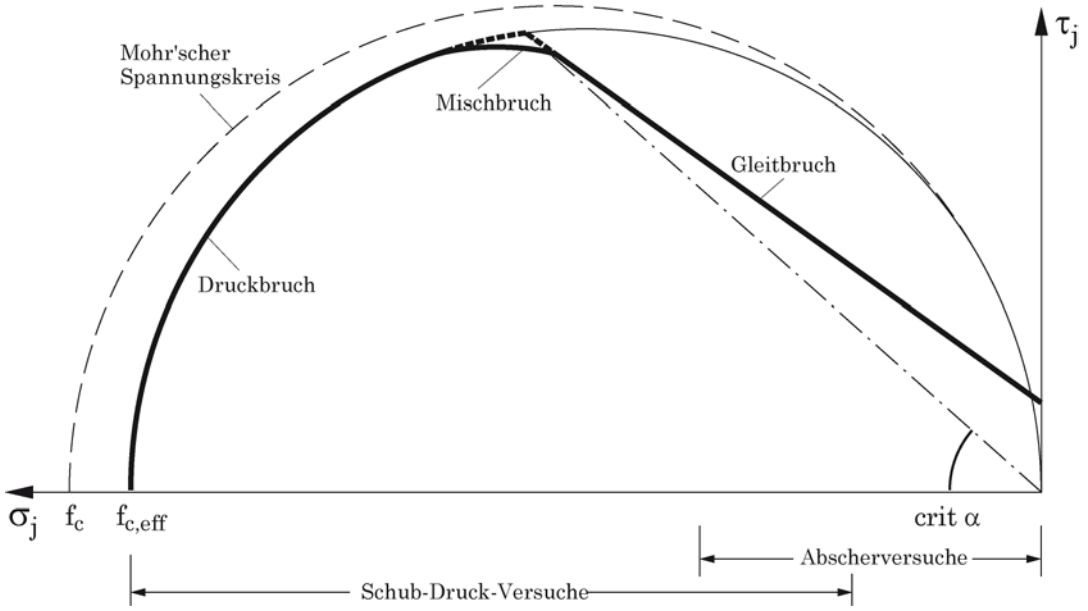


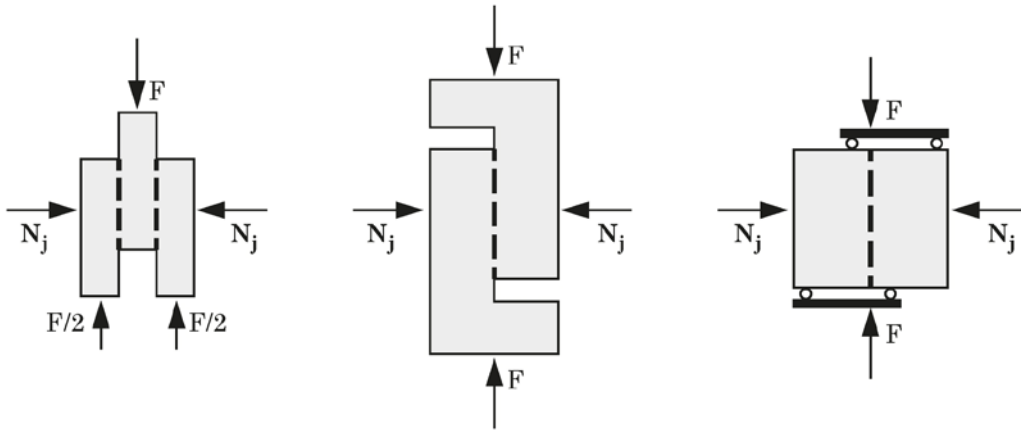
Bild 9.2-3: Grenzbeziehung der in der Fuge wirkenden Schub- und Normalspannung bei Versagen des Versuchskörpers nach Guckenberger et al. (1980)

Aus dem Schub-Druck-Diagramm lassen sich die zwei unterschiedlichen Versagensarten des Versuchskörpers ablesen. Ist der Fugenneigungswinkel α des Versuchskörpers kleiner als der kritische Fugenneigungswinkel crit α, dann kommt es zu einem „Druckbruch“ durch das Versagen des Betons. In diesem Fall beeinflusst der Fugenneigungswinkel α die Tragfähigkeit nicht. Ist der Fugenneigungswinkel α des Versuchskörpers größer als der kritische Fugenneigungswinkel crit α, dann kommt es zu einem „Gleitbruch“ durch das Versagen der Fuge. In diesem Fall wird die Tragfähigkeit vom Fugenneigungswinkel α beeinflusst und kann durch das Coulomb’sche Bruchkriterium beschrieben werden:

$$\tau_j = c + \mu \cdot \sigma_j \qquad (9\text{-}4)$$

mit	τ_j [MPa]	Schubspannung in der Fuge
	σ_j [MPa]	Normalspannung in der Fuge
	c [MPa] und μ [-]	Beiwerte, die von der Rauigkeit der Fuge abhängen

Bei Schub-Druck-Versuchen erhöhen sich während des Versuchs die Schub- und Normalspannung in der Fuge proportional zu der in Richtung der Prüfkraft wirkenden Spannung. Soll die Normalspannung in der Fuge σ_j bzw. die normal zur Fuge wirkende Kraft N_j während des Versuchs konstant sein, so können alternativ Abscherversuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Fugen durchgeführt werden. Bild 9.2-4 zeigt dafür einige Versuchskörper.



a) b) c)

Bild 9.2-4: Versuchskörper für die Durchführung von Abscherversuchen zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Fugen nach Mehlhorn et al. (1977)

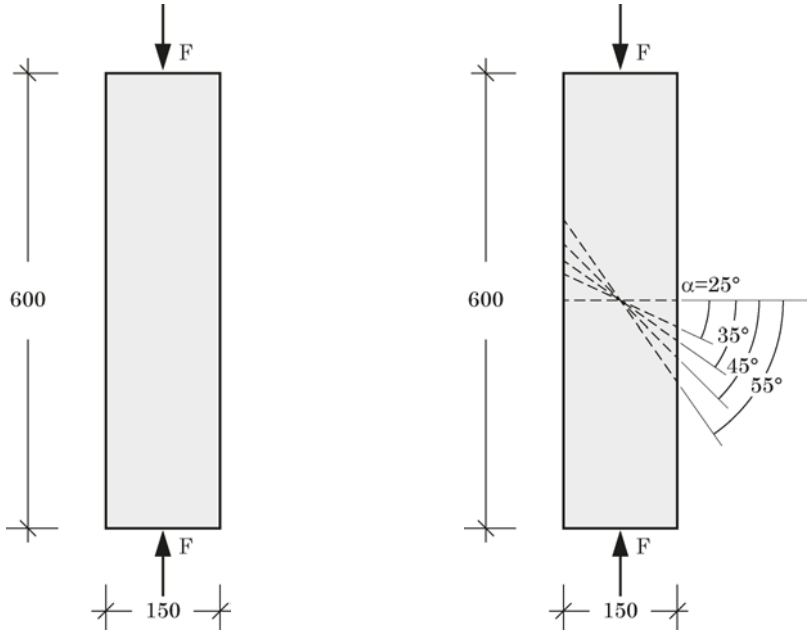
9.2.3 Versuchsprogramm

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung (vgl. Kapitel 10) wurden Druck- und Schub-Druck-Versuche nach Bild 9.2-5 durchgeführt. Es wurden insgesamt 53 Versuchskörper geprüft. Dabei handelte es sich um:

- Druckversuche an 5 Versuchskörpern ohne Fuge (Referenzprismen);
- Schub-Druck-Versuche an:
  - 9 Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge (jeweils 3 Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 0°, 25° und 35°);
  - 9 Versuchskörpern mit gestrahlter Fuge (jeweils 3 Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 0°, 25° und 35°);
  - 15 Versuchskörpern mit rauer Fuge (jeweils 3 Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 0°, 25°, 35°, 45° und 55°);
  - 15 Versuchskörpern mit verzahnter Fuge (jeweils 3 Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 0°, 25°, 35°, 45° und 55°).

Die Fugengeometrie ist in Abschnitt 9.2.4 beschrieben.

Die Durchführung der Schub-Druck-Versuche hatte zum Ziel, die Grenzbeziehung zwischen der Schub- und Normalspannung in der Fuge zu ermitteln, um so den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche bzw. der Fugengeometrie auf die Tragfähigkeit von Trockenfugen beurteilen zu können.



a) Druckversuche b) Schub-Druck-Versuche

Bild 9.2-5: Versuchskörper, die im Rahmen dieses Forschungsprojekts zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung verwendet wurden (Abmessungen in mm)

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung (vgl. Kapitel 11) wurden Abscherversuche an Versuchskörpern nach Bild 9.2-6 durchgeführt.

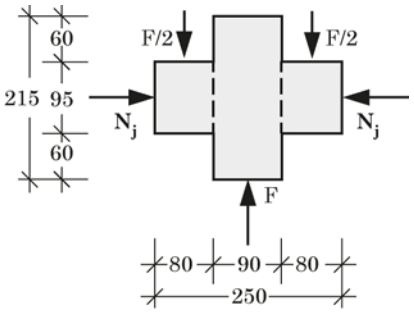


Bild 9.2-6: Versuchskörper, die im Rahmen dieses Forschungsprojekts zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung verwendet wurden (Abmessungen in mm)

Die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung hatte zum Ziel, das Ermüdungsverhalten der Fugen in Abhängigkeit der Fugennormalspannung zu untersuchen. Dabei wurden die Bruchlastspielzahlen und der Verlauf der Verschiebung parallel zu den Fugen infolge der zyklischen Belastung festgehalten. Bei Durchläufern wurde eine Prüfung der Resttragfähigkeit vorgenommen. Die Abscherversuche wurden zunächst unter statischer Belastung durchgeführt, um daraus die Absolutwerte der Ober- und Unterlasten für die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung abzuleiten. Insgesamt wurden 78 Versuchskörper geprüft. Dabei handelte es sich um:

- Abscherversuche unter statischer Belastung an:
  - 15 Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge (jeweils 5 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa);

- 22 Versuchskörpern mit verzahnter Fuge (jeweils 5 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa und 7 Versuchskörpern mit eine Fugennormalspannung von 0 MPa);

- Abscherversuche unter zyklischer Belastung an:
  - 12 Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge (jeweils 1 oder 2 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa oder 90 MPa und einer bezogenen Oberlast von 0,80, 0,85 oder 0,90);
  - 29 Versuchskörpern mit verzahnter Fuge (jeweils 1 oder 2 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa oder 90 MPa und einer bezogenen Oberlast von 0,80, 0,85 oder 0,90 sowie jeweils 3 oder 6 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 0 MPa und einer bezogenen Oberlast von 0,60, 0,65, 0,70, 0,75 oder 0,80).

9.2.4 Fugengeometrie

Die in der Trockenfuge wirkende Schubkraft wird bei Vorhandensein einer Druckkraft in erster Linie durch Kohäsion und durch Reibung übertragen. Der Schubkraftwiderstand der Fuge ist somit maßgeblich von der Rauigkeit der Fuge abhängig.

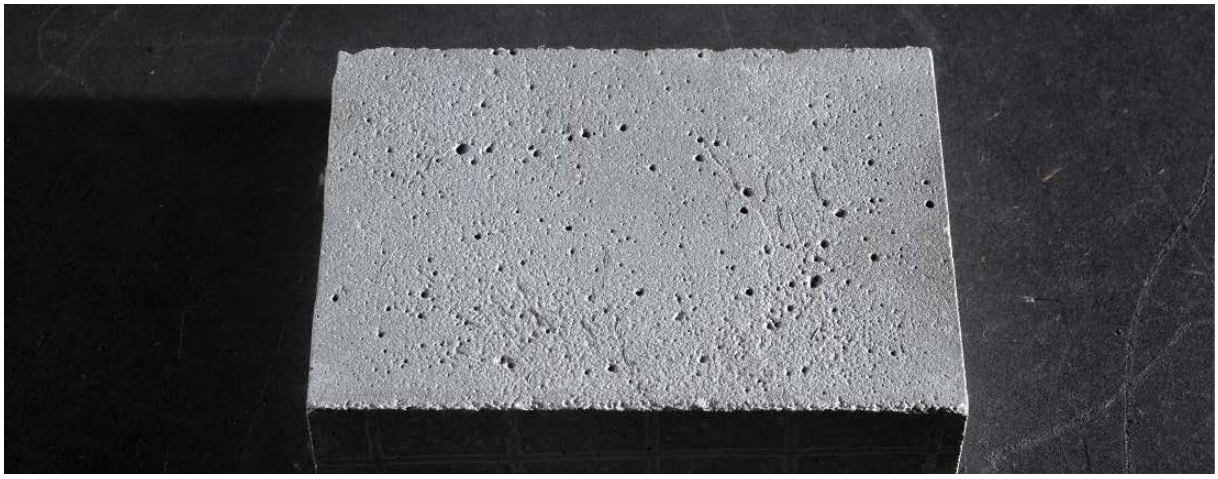
Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden experimentelle Untersuchungen an Trockenfugen zwischen kleinteiligen Versuchskörpern aus UHFFB mit folgender Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche durchgeführt:

- sehr glatt;
- gestrahlt;
- rau;
- verzahnt.

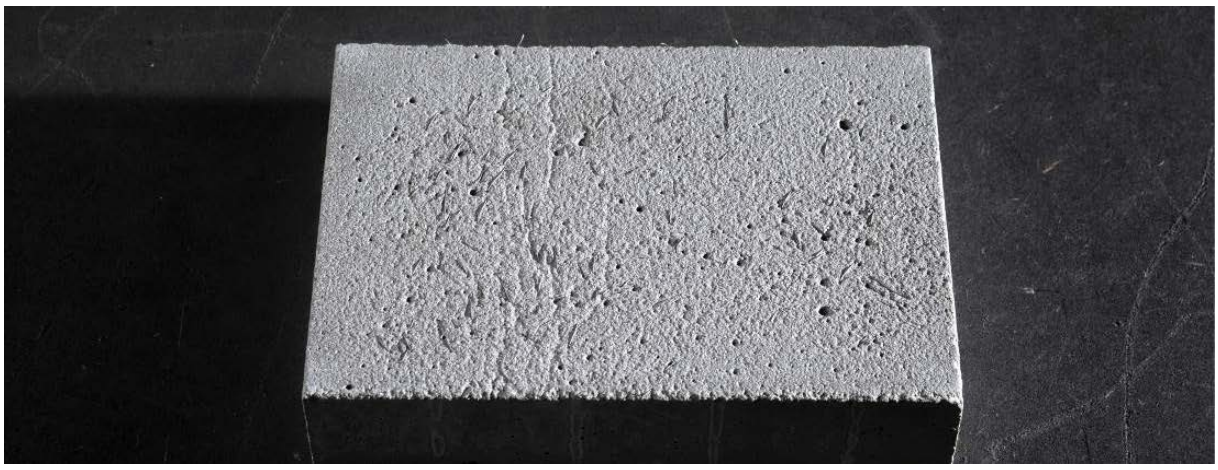
Eine sehr glatte Oberfläche wird in der Regel dadurch erreicht, dass die Oberfläche gegen Stahl, Kunststoff oder eine speziell geglättete Holzschalung betoniert wird [DIN 1045-1 (2008)]. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden die Kontaktflächen, bei denen eine sehr glatte Oberfläche angestrebt wurde, gegen den Kunststoff PE 500 betoniert und nach dem Ausschalen nicht weiter bearbeitet.

Die Kontaktflächen, bei denen eine leicht aufgeraute Oberfläche angestrebt wurde, wurden zunächst gegen den Kunststoff PE 500 betoniert und nach dem Ausschalen gestrahlt. Beim Strahlen wird ein Strahlmittel mit hoher Geschwindigkeit auf die zu behandelnde Oberfläche gelenkt. Das Strahlmittel wird dabei beispielsweise durch Druckluft beschleunigt. Die Wirkung ist stets eine abrasive, d.h. es kommt stets zu einem mechanischen Abtrag von Oberflächenschichten. Das Resultat hängt dabei im Wesentlichen vom gewählten Strahlmittel und der zu bearbeitenden Oberfläche ab. Aus diesem Grund wurde die abrasive Wirkung unterschiedlicher Strahlmittel auf Oberflächen aus Ductal® untersucht (vgl. Bild 9.2-7). Dabei zeigte sich, dass es bei Sand als Strahlmittel kaum zu einem Abtrag von Oberflächenschichten kam, bei Stahlperlen als Strahlmittel hingegen die Stahlfasern freigelegt wurden. Ein zufriedenstellendes Resultat wurde mit Korund (Korndurchmesser von 1 bis 2 mm) als Strahlmittel erreicht, wobei der Druck der Druckluft 6,5 bar betrug. Dabei kam es zu einer deutlicheren Aufrauhung als bei der Verwendung von Sand als Strahlmittel, ohne dass die Stahlfasern freigelegt wurden, wie dies bei der Verwendung von Stahlperlen als Strahlmittel der Fall war. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieses Forschungsprojekts die Kontaktflächen, bei denen eine leichte aufgeraute Oberfläche angestrebt wurde, mit Korund (Korndurchmesser von 1 bis 2 mm) als Strahlmittel gestrahlt, wobei der Druck der Druckluft 6,5 bar betrug.

a) Sand



b) Korund



c) Stahlperlen

Bild 9.2-7: Abrasive Wirkung unterschiedlicher Strahlmittel auf einer Oberfläche aus Ductal®

Eine raue Oberfläche wurde dadurch erreicht, dass die Kontaktflächen gegen ein profiliertes Stahlblech betoniert wurden. Bei der Profilierung handelte es sich um „Noppen“, die einem Kugelsegment entsprechen. Die Geometrie der Kugelsegmente ist in Bild 9.2-8 dargestellt. Die Kugelsegmente waren in einem orthogonalen Raster im Abstand von 37,5 mm angeordnet.

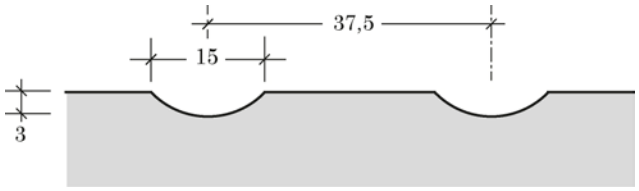


Bild 9.2-8: Geometrie der Kugelsegmente in der rauen Fuge der Versuchskörper zur Durchführung der Schub-Druck-Versuche (Abmessungen in mm)

Die Geometrie einer gleichmäßigen Verzahnung lässt sich allgemein mit den folgenden Parametern beschreiben:

- Neigung der Zahnflanke γ normal zur Fuge;
- Zahnhöhe t;
- Länge der Zahnkrone z_k.

Die Wahl der Parameter für die im Rahmen dieses Forschungsprojekts untersuchten Verzahnung orientierte sich an den theoretischen und experimentellen Arbeiten von Schmid (2000) und Dehlinger (2004), deren Untersuchungen unter anderem eine optimierte Zahngeometrie von Zahnleisten aus Stahl zur konzentrierten Einleitung von Tangentialkräften in Konstruktionsbeton zum Ziel hatte. Diese empfahlen für die Neigung der Zahnflanke γ einen Winkel von 20° und ein Verhältnis von 2:1 für die Länge der Zahnkrone zur Zahnhöhe. Die daraus resultierenden Abmessungen für die Versuchskörper zur Durchführung der Schub-Druck-Versuche sind in Bild 9.2-9 und für die Versuchskörper zur Durchführung der Abscherversuche in Bild 9.2-10 dargestellt.

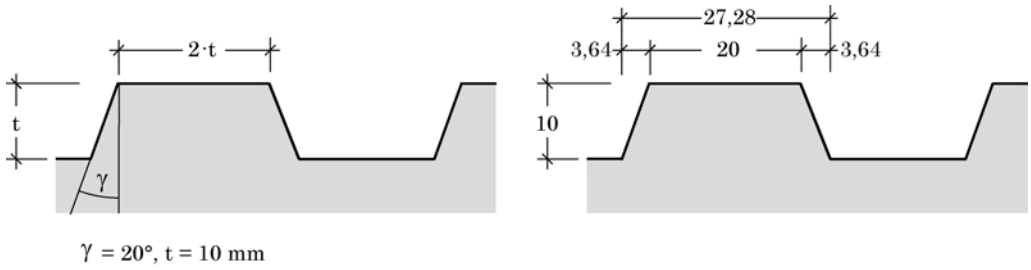


Bild 9.2-9: Geometrie der Verzahnung der Fuge der Versuchskörper zur Durchführung der Schub-Druck-Versuche (Abmessungen in mm)

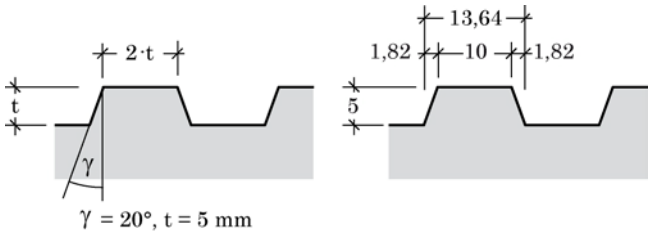


Bild 9.2-10: Geometrie der Verzahnung der Fuge der Versuchskörper zur Durchführung der Abscherversuche (Abmessungen in mm)

9.2.5 Herstellung und Passgenauigkeit der Fugen

Um eine gleichmäßige Kraftübertragung in der Fuge zu gewährleisten, bedarf es einer sehr hohen Passgenauigkeit zwischen den Segmenten. Im Hinblick auf eine hohe Passgenauigkeit der Fuge sind zur Herstellung der Segmente die folgenden Verfahren vorstellbar:

- CNC-gesteuerte Nachbehandlung der Fuge;
- Hochpräzisionsschalungen aus Stahl;
- Match-Cast-Verfahren.

Mit Hilfe einer CNC-Fräse kann eine mechanische Nachbehandlung der Fuge erfolgen. Dieses Verfahren hat die Firma Max Bögl GmbH bei der Herstellung der Bogensegmente für die Wild-Brücke in Völkermarkt verwendet (vgl. Bild 9.2-11). Nach Angaben der Firma konnte eine Fugenebenheit von weniger als 0,1 mm erreicht werden. Allerdings handelte es sich dabei um Fugen mit einer ebenen Kontaktfläche, und es ist fraglich, ob bei Fugen mit profilierter Kontaktfläche der Aufwand des Fräsens wirtschaftlich vertretbar ist.

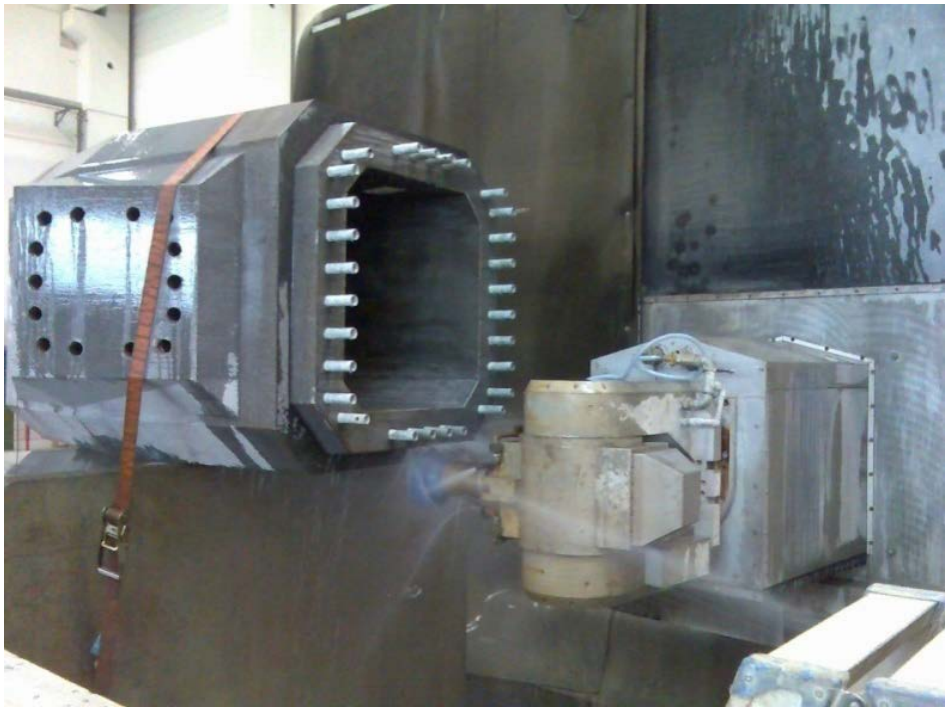


Bild 9.2-11: CNC-gesteuerte Nachbehandlung der Fuge [Hecht (2012)]

Hochpräzisionsschalungen aus Stahl stellen eine weitere Möglichkeit dar, eine hohe Passgenauigkeit in der Fuge zu erreichen. Im Rahmen eines an der TU Graz durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsprojekts für einen Fahrwegträger aus UHFFB wurden die Segmente mit einer Hochpräzisionsschalung aus Stahl hergestellt. Dabei wurde eine Fugenebenheit von weniger als 0,3 mm erreicht [Reichel (2011)].

Das Match-Cast-Verfahren ist ein bewehrtes Herstellungsverfahren aus dem Segmentbrückenbau. Dabei dient das jeweils zuvor betonierte Segment als Abschalung für das zu betonierende Segment, um eine möglichst hohe Passgenauigkeit der Segmente im Hinblick auf die Fuge zu erzielen. Die Fugen werden im Segmentbrückenbau üblicherweise verzahnt ausgebildet (vgl. Bild 9.2-12).

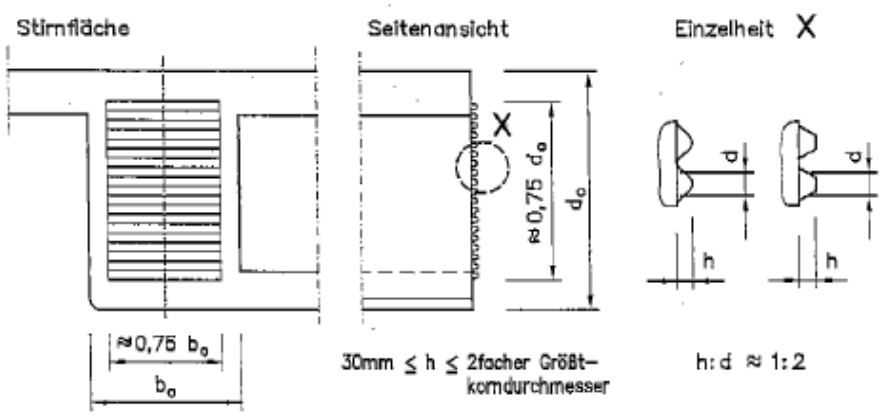


Bild 9.2-12: Ausbildung der Verzahnung im Steg [DBV (1999)]

Aus dem Segmentbrückenbau ist bekannt, dass es zu temperaturinduzierten Verformungen durch den Abfluss von Hydratationswärme aus dem frisch betonierten Segment in das erhärtete Schalungssegment kommt. Im alten Segment stellt sich ein Temperaturgradient ein, der zu einer Verbiegung führt. Erhärtet dann das neu betonierte Segment gegen das verkrümmte Schalungssegment, so verbleibt in diesem ein Bogen mit einem Stich. Nach dem Trennen und Abkühlen bildet sich im alten Segment dieser Bogen wieder zurück [Abendeh et al. (2005)]. Bei kreisringförmigen Segmenten sollte dieser Effekt jedoch eine eher untergeordnete Rolle spielen.

Für das im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelte Konzept für Turmtragwerke aus UHFFB in Segmentbauweise wurde für die Herstellung der Segmente das Match-Cast-Verfahren vorgeschlagen und dem entsprechend bei der Herstellung der kleinteiligen Versuchskörper aus UHFFB angewandt.

10 Versuche zur Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung

10.1 Versuchsprogramm und Bezeichnung der Versuchs- und Probekörper

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung wurden experimentelle Untersuchungen an kleinteiligen Versuchskörpern aus UHFFB nach dem in Bild 9.2-5 dargestellten Prinzip durchgeführt. Die Versuchskörper wurden in insgesamt acht Chargen hergestellt (Chargen C4 bis C11).

Die Versuchskörper für die Durchführung der Schub-Druck-Versuche wurden im Match-Cast-Verfahren hergestellt, um eine möglichst hohe Passgenauigkeit der Fuge zu gewährleisten. Dabei diente das jeweils zuerst betonierte untere Versuchskörperteil als Abschalung für das zu betonierende obere Versuchskörperteil. Die Versuchskörper unterschieden sich zum einen in der Fugenausbildung und zum anderen im Fugenneigungswinkel. Es wurden Fugen mit folgender Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche untersucht:

- sehr glatt;
- gestrahlt;
- rau;
- verzahnt.

Die Versuchskörper mit sehr glatter und gestrahlter Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche besaßen einen Fugenneigungswinkel α von 0°, 25° und 35°. Die Versuchskörper mit rauer und verzahnter Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche besaßen einen Fugenneigungswinkel α von 0°, 25°, 35°, 45° und 55°. Innerhalb der Chargen C4 und C5 wurden zudem zwei bzw. drei Referenzprismen ohne Fuge hergestellt.

Für jede Charge wurden auch Probekörper hergestellt, die zur Bestätigung der in Abschnitt 5.3.3 und 5.4.3 ermittelten Materialkennwerte sowie zur Kontrolle der Chargen untereinander dienten. Dabei enthielt jede Charge drei Zylinder für die Durchführung von Druckversuchen. Die Chargen C4 und C5 enthielt zusätzlich drei weitere Zylinder, an denen zuerst eine E-Modul-Prüfung und anschließend ein kraftgeregelter Druckversuch mit Verformungsmessung durchgeführt wurden. Des Weiteren enthielt jede Charge drei Prismen zur Durchführung von Biegezugversuchen.

Eine Übersicht über das Versuchsprogramm zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung zusammen mit der Anzahl der Versuchs- und Probekörper ist in Tabelle 10.1-1 dargestellt.

Tabelle 10.1-1: Versuchsprogramm zur Untersuchung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung

Prüfverfahren			Charge							
			C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
Druckversuche	Zylinder		3	3	3	3	3	3	3	3
E-Modul-Prüfung und Druckversuche	Zylinder		3	3						
Biegezugversuche	Prismen		3	3	3	3	3	3	3	3
Schub-Druck-Versuche	Referenzprismen (ohne Fuge)		2	3						
	Versuchskörper mit sehr glatter Fuge	$\alpha_1 = 0°$		3						
		$\alpha_2 = 25°$		3						
		$\alpha_3 = 35°$		3						
	Versuchskörper mit gestrahlter Fuge	$\alpha_1 = 0°$			3					
		$\alpha_2 = 25°$			3					
		$\alpha_3 = 35°$			3					
	Versuchskörper mit rauer Fuge	$\alpha_1 = 0°$					3			
		$\alpha_2 = 25°$					3			
		$\alpha_3 = 35°$					3			
		$\alpha_4 = 45°$					3			
		$\alpha_5 = 55°$					3			
	Versuchskörper mit verzahnter Fuge	$\alpha_1 = 0°$								3
		$\alpha_2 = 25°$								3
		$\alpha_3 = 35°$								3
		$\alpha_4 = 45°$								3
		$\alpha_5 = 55°$								3

Die Zylinder und Prismen für die Druck- und Biegezugversuche wurden nach der in Abschnitt 5.1 erläuterten Systematik gekennzeichnet.

Die Kennzeichnung der Versuchskörper bzw. Versuchskörperhälften für die Schub-Druck-Versuche erfolgte nach folgender Systematik:

Prüfverfahren – Nummer des Versuchskörpers – Oberflächenbeschaffenheit_Fugenneigung – Material – Charge – Herstelldatum

Prüfverfahren:	FS	Versuchskörper für Schub-Druck-Versuche unter statischer Belastung
Nummer des Versuchskörpers:	<Nummer>	fortlaufend je Charge
Oberflächenbeschaffenheit:	RP	Referenzprisma (ohne Fuge)
	SG	sehr glatt
	G	gestrahlt
	R	rau
	V	verzahnt
Fugenneigung:	<Winkel>	
Material:	DFM2	Ductal ®, *fibres métalliques* (Stahlfasern), Premix G2
Charge:	C<Nummer>	
Herstelldatum:	<Tag>_<Monat>_<Jahr>	

z.B. Kennzeichnung eines Versuchskörpers ohne Fuge: FS – 1 – RP – DFM2 – C4 – 29_11_2011

Kennzeichnung eines Versuchskörpers mit Fuge: FS – 1 – SG_0 – DFM2 (C4 und C5)

- untere Versuchskörperhälfte: FS – 1 – SG_0 – DFM2 – C4 – 29_11_2011
- obere Versuchskörperhälfte: FS – 1 – SG_0 – DFM2 – C5 – 30_11_2011

10.2 Versuchs- und Probekörper

10.2.1 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften

Alle Versuchs- und Probekörper wurden aus UHFFB mit der Bezeichnung Ductal® der Firma Lafarge hergestellt. Die Zusammensetzung von Ductal® kann der Tabelle 5.2-1 entnommen werden, der Mischablauf kann der Tabelle 5.2-2.

Der Tabelle 10.2-1 können für die Chargen C4 bis C11 das Herstelldatum, das Chargenvolumen sowie die Frischbetoneigenschaften entnommen werden.

Tabelle 10.2-1: Frischbetoneigenschaften der Chargen C4 bis C11

Charge	Herstelldatum	Volumen	Frischbetoneigenschaften			
			Temperatur	Ausbreitmaß	Rohdichte	Luftporen-gehalt
		[l]	[°C]	[mm]	[kg/dm³]	[%]
C4	29.11.2011	87,7	29,9	307,5	2,49	2,9
C5	30.11.2011	103,7	29,7	307,5	2,46	2,7
C6	05.12.2011	70,7	27,3	305	2,53	3,0
C7	06.12.2011	74,1	28,2	295	2,49	3,0
C8	09.01.2012	74,1	30,5	305	2,53	2,2
C9	10.01.2012	112,9	31,9	307,5	2,49	2,5
C10	16.01.2012	107,2	28,4	297,5	2,52	2,8
C11	17.01.2012	120,8	29,7	297,5	2,50	2,9
Mittelwert		m	29,45	302,81	2,50	2,75
Standardabweichung		s	1,45	5,25	0,02	0,28
Variationskoeffizient		v	4,92 %	1,73 %	0,99 %	10,10 %

10.2.2 Geometrie der Versuchs- und Probekörper

10.2.2.1 Druckversuche und E-Modul-Prüfung

Die Zylinder für die Druckversuche und die E-Modul-Prüfung haben einen Durchmesser d von 100 mm und eine Höhe h von 200 mm.

10.2.2.2 Biegezugversuche

Die Prismen für die Durchführung der Biegezugversuche haben einen Querschnitt mit einer Breite b von 75 mm und einer Höhe h von 7 5mm sowie eine Länge von 550mm.

10.2.2.3 Schub-Druck-Versuche

Die Versuchskörper für die Schub-Druck-Versuche bestanden aus zwei Teilen, einer unteren und einer oberen Versuchskörperhälfte. Die Abmessungen der einzelnen Versuchskörperhälften ist für die Versuchskörper mit sehr glatter und gestrahlter Fuge in Bild 10.2-1, für die Versuchskörper mit rauer Fuge in Bild 10.2-2 und für die Versuchskörper mit verzahnter Fuge in Bild 10.2-3 dargestellt. Die Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen bzw. die Fugengeometrie wurde in Abschnitt 9.2.4 beschrieben.

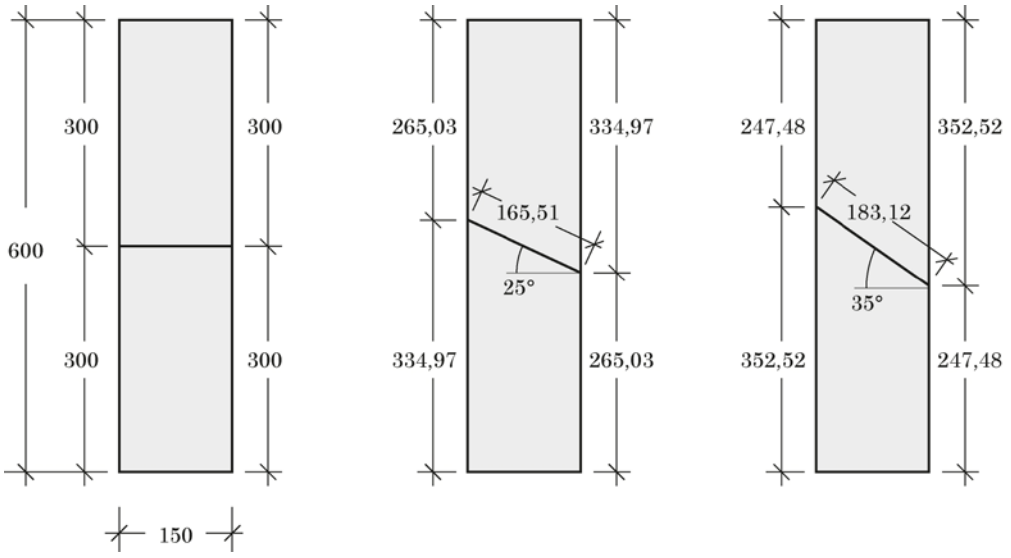


Bild 10.2-1: Abmessung der einzelnen Versuchskörperhälften mit sehr glatter und gestrahlter Fuge (Abmessungen in mm)

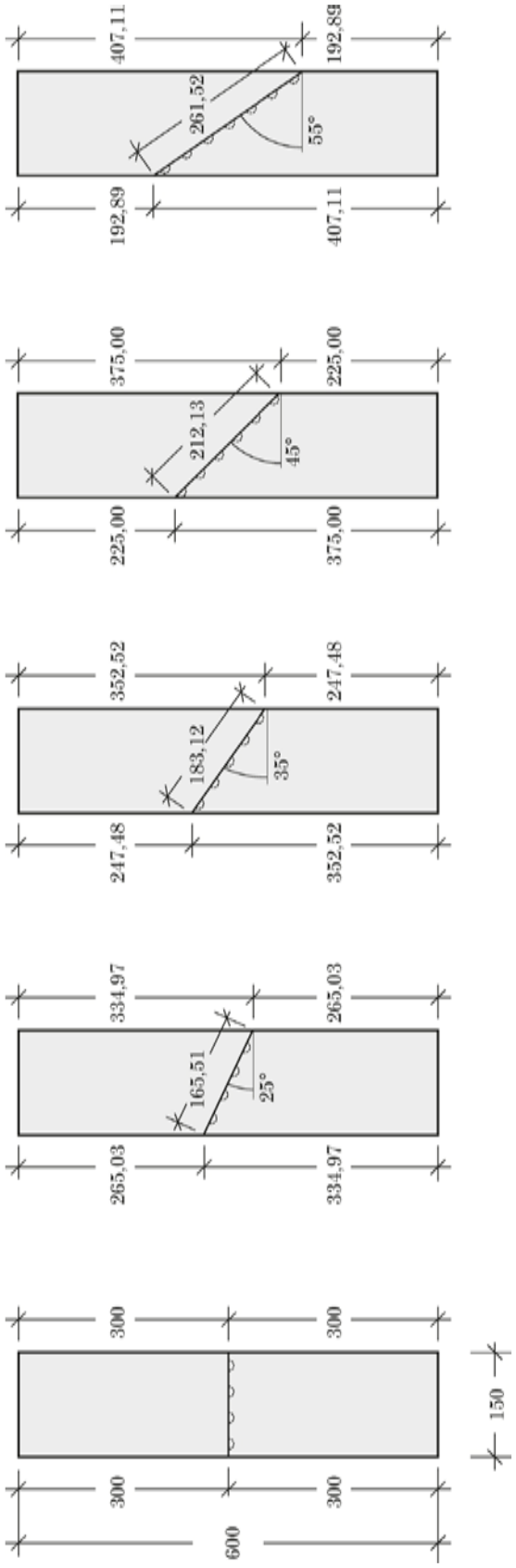


Bild 10.2-2: Abmessung der einzelnen Versuchskörperhälften mit rauer Fuge (Abmessungen in mm)

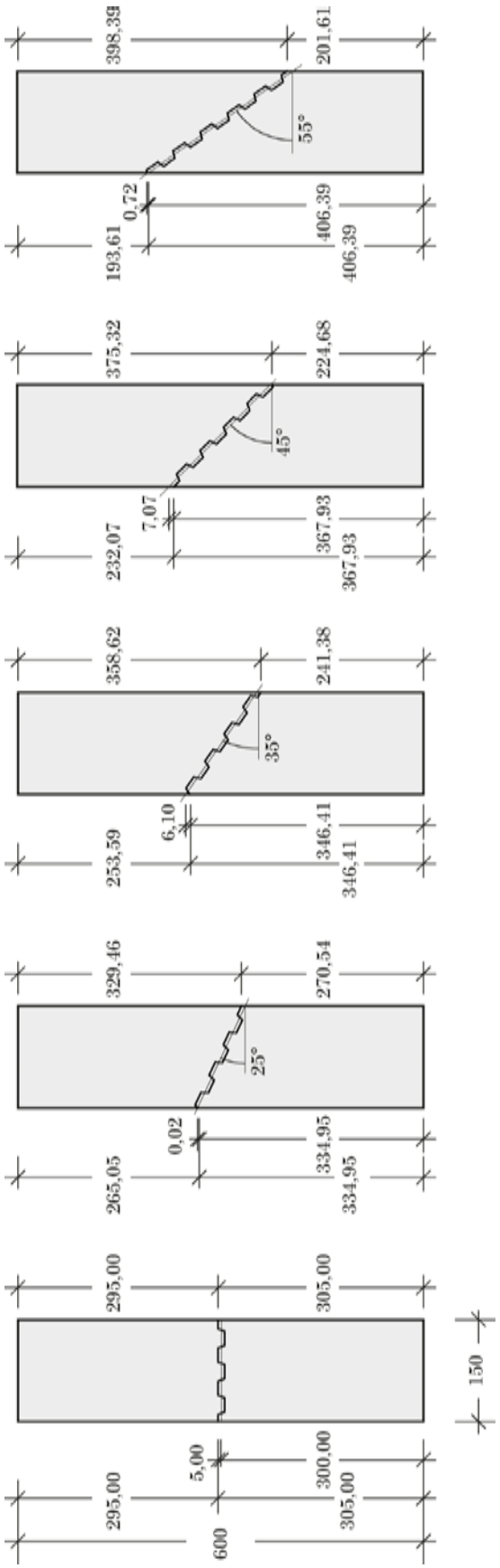


Bild 10.2-3: Abmessung der einzelnen Versuchskörperhälften mit verzahnter Fuge (Abmessungen in mm)

10.2.3 Herstellen und Lagerung der Versuchs- und Probekörper

Die Schalungen zur Herstellung der Zylinder für die Druckversuche und E-Modul-Prüfungen sowie zur Herstellung der Prismen für die Biegezugversuche sind in Bild 5.2-2 abgebildet. Vor dem Einbringen des Betons wurden die Innenflächen der Schalungen mit Schalöl behandelt.

Die Schalungen zur Herstellung der Versuchskörper für die Schub-Druck-Versuche sind in Bild 10.2-4 abgebildet. Um eine möglichst hohe Passgenauigkeit der Fugen zu gewährleisten, wurden die Probeköper im Match-Cast-Verfahren hergestellt. Dabei wurde zuerst die untere Versuchskörperhälfte betoniert (vgl. Bild 10.2-5). Die untere Versuchskörperhälfte wurde dabei gegen eine Abschalung mit der angestrebten Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche betoniert. Das Abschalteil bestand entweder aus PE 500 oder einem profiliertem Blech. Am nächsten Tag wurden die Abschalteile aus der Schalung entfernt und die obere Versuchskörperhälfte betoniert (vgl. Bild 10.2-6).

a) Betonage gegen Abschalung aus PE 500 zur Herstellung einer sehr glatten und (später) gestrahlten Fuge

b) Abschalung aus profiliertem Stahlblech zur Herstellung einer rauen Fuge

c) Abschalung aus PE 500 zur Herstellung einer verzahnten Fuge

Bild 10.2-4: Schalungen zur Herstellung der unteren Versuchskörperhälfte für Schub-Druck-Versuche

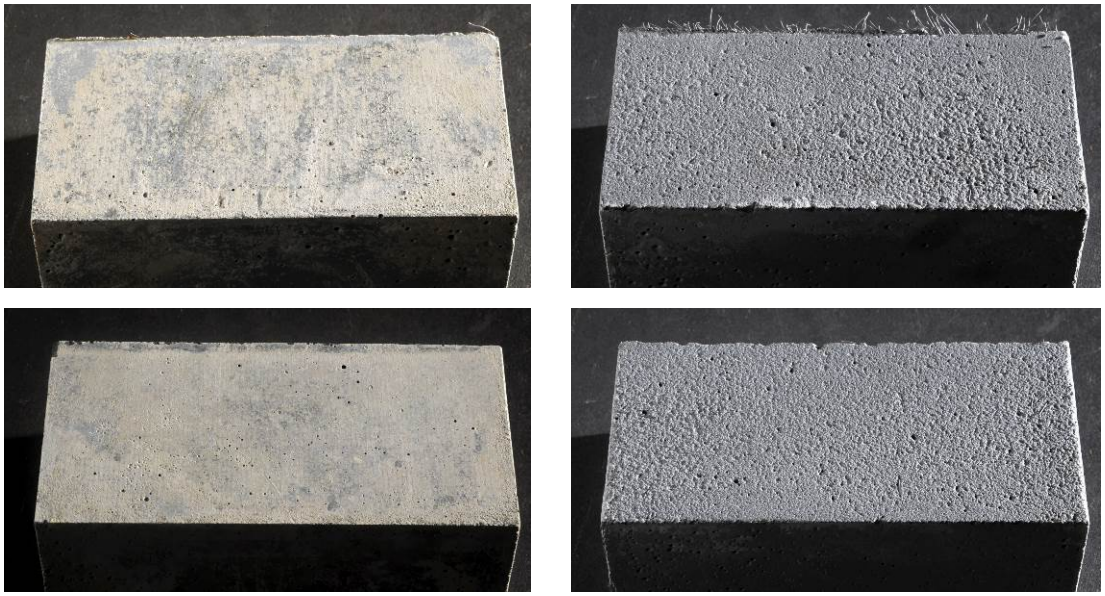
Vor dem Einbringen des Betons wurden die Innenflächen der Schalungen stets mit Schalöl behandelt. Einzige Ausnahme bildeten die Kontaktflächen der unteren Versuchskörperhälften. Diese wurden vor der Betonage der oberen Versuchskörperhälften mit einem Trennmittel mit der Bezeichnung „Curing Compound TM P-OT“ der Firma Tillmann behandelt, um beim Ausschalen die einzelnen Versuchskörperhälften wieder leicht voneinander trennen zu können. Aufgrund der selbstverdichtenden Eigenschaften von Ductal® war ein Verdichten mittels rütteln nicht erforderlich. Nach dem Befüllen der Schalungen wurden die Betonoberflächen umgehend mit Wasser eingesprüht, um eine „Elefantenhautbildung“ auf der Oberfläche so weit wie möglich zu verhindern. Zudem wurden die Versuchskörper mit einer Folie abgedeckt.

Bild 10.2-5: Befüllen der Schalungen zur Herstellung der unteren Versuchskörperhälfte für die Schub-Druck-Versuche (verzahnte Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche)

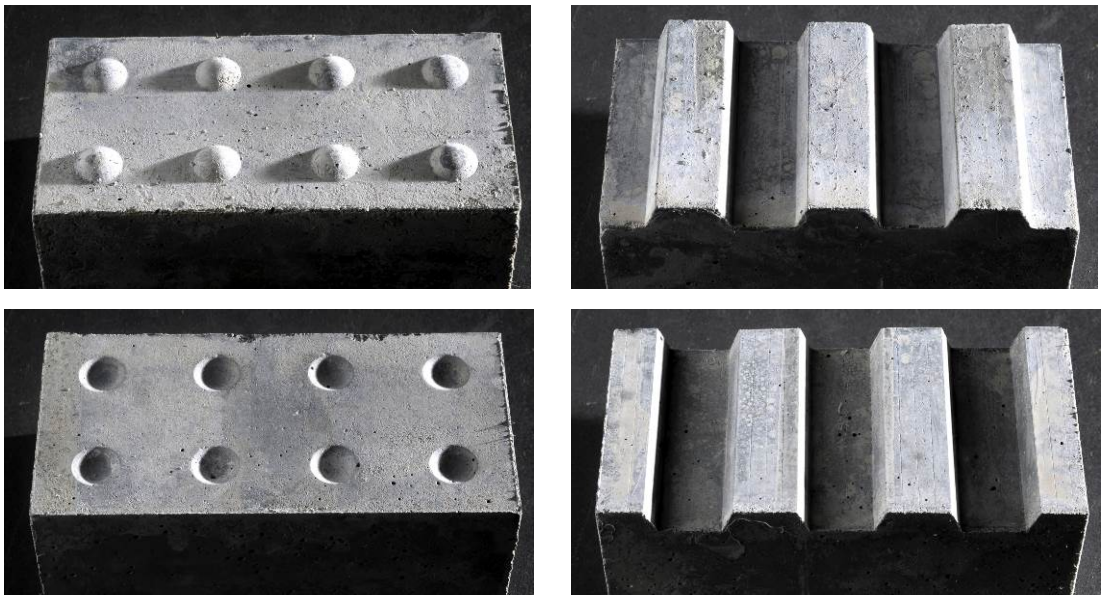
Bild 10.2-6: Befüllen der Schalungen zur Herstellung der oberen Versuchskörperhälfte für die Schub-Druck-Versuche (verzahnte Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche)

Nach dem Ausschalen wurden die Versuchs- und Probekörper für die Wärmebehandlung in ein Wasserbecken gelegt. Die Wassertemperatur wurde von etwa 15°C auf ungefähr 90°C langsam aufgeheizt und schließlich für mindestens 48 Stunden konstant gehalten. Nachdem Ausschalten der Heizung und dem Absinken der Wassertemperatur auf unter 35°C konnten die Versuchs- und Probekörper aus dem Wasserbecken entnommen werden.

Nach der Entnahme aus dem Wasserbecken wurden die Versuchskörper für die Durchführung der Schub-Druck-Versuche mit einem Hochdruckreiniger gereinigt, um insbesondere die Kontaktflächen von Rückständen des Trennmittels zu befreien. Bis zur Prüfung wurden die Versuchs- und Probekörper trocken und vor Zugluft geschützt bei 19 bis 21°C auf einem Lattenrost gelagert. In Bild 10.2-7 sind exemplarisch die Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen bzw. die Fugengeometrien der oberen und der untere Versuchskörperhälften bei einem Fugenneigungswinkel α von 0° abgebildet.



a) sehr glatt b) gestrahlt



c) rau d) verzahnt

Bild 10.2-7: Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen bzw. Fugengeometrie der oberen (jeweils oberes Bild) und der unteren Versuchskörperhälften (jeweils unteres Bild) der Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 0° für die Durchführung der Schub-Druck-Versuche

Durch die Anwendung des Match-Cast-Verfahrens konnte eine hohe Passgenauigkeit der Fugen erreicht werden. Zur Veranschaulichung dessen wurde exemplarisch ein Versuchskörper mit sehr glatter, gestrahlter, rauer und verzahnter Fuge fotografiert, wobei eine Lichtquelle von hinten auf die Fuge gerichtet war, um einen eventuellen Spalt bzw. eine Passungenauigkeit der Fuge sichtbar zu machen (vgl. Bild 10.2-8).

a) sehr glatt

b) gestrahlt

c) rau

d) verzahnt

Bild 10.2-8: Passgenauigkeit der Fuge bei den Versuchskörpern für die Durchführung der Schub-Druck-Versuche

10.3 Druckversuche und E-Modul-Prüfung

10.3.1 Versuchsstand und –durchführung

Die Druckversuche wurden an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMPA)) überwiegend mit einer 5000 kN Druckprüfmaschine der Firma Tonindustrie Prüftechnik durchgeführt. Die E-Modul-Prüfungen und die anschließenden kraftgeregelten Druckversuche mit Verformungsmessung wurden mit einer 3000 kN Drückprüfmaschine der Firma MFL Prüf- und Meßsysteme GmbH durchgeführt.

Die kraftgeregelten Druckversuche wurden in Anlehnung an DIN 1048-Teil 5 (1991) durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 0,6 MPa/s und wurde kontinuierlich bis zum Bruch des Probekörpers gesteigert. Es wurde die beim Bruch erreichte maximale Prüfkraft F_{max} aufgezeichnet.

Die Prüfung des E-Moduls erfolgte an jeweils drei Zylindern der Chargen C4 und C5 und wurde in Anlehnung an DIN 1048-Teil 5 (1991) durchgeführt. Das Belastungsschema für die Durchführung der E-Modul-Prüfung ist in Bild 5.3-1 dargestellt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug durchweg 0,6 MPa/s.

Im Anschluss an die Prüfung des E-Moduls wurde an den Zylindern ein kraftgeregelter Druckversuch mit Verformungsmessung durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug durchweg 0,6 MPa/s.

10.3.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper

Die Zylinder für die Druckversuche und die E-Modul-Prüfung wurden zunächst auf eine Länge von etwas mehr als 200 mm durch beidseitiges Sägen gekürzt. Im Anschluss erfolgte ein Abschleifen der Schnittflächen mit einer Nassschleifmaschine.

Vor der Prüfung wurden die tatsächlichen Abmessungen (Durchmesser d, Höhe h) sowie die Masse der Zylinder protokolliert (vgl. Anhang C.1).

Die Instrumentierung der Zylinder sowohl bei der E-Modul-Prüfung als auch bei den kraftgeregelten Druckversuchen war wie in Abschnitt 5.3.2 beschrieben.

10.3.3 Versuchsergebnisse

10.3.3.1 Druckversuche

Detaillierte Angaben zu den Abmessungen der einzelnen Zylinder und die gemessenen maximalen Prüfkräfte F_{max} sowie die gemessenen Kraft-Verformungs-Kurven finden sich im Anhang C.1.

Die gemessene maximale Prüfkraft F_{max} wurde nach Gl. (5-2) in die äquivalente Druckfestigkeit f_c umgerechnet. Die Längenänderung Δl wurde nach Gl. (5-3) in die äquivalente Betondruckdehnung ε_c umgerechnet.

In Bild 10.3-1 und Bild 10.3-2 sind die σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Chargen C4 und C5 als Ergebnis der kraftgeregelten Druckversuche mit Verformungsmessung dargestellt. Die Kurven weisen alle bis zum Erreichen der Druckfestigkeit f_c einen ähnlichen Verlauf auf.

In Tabelle 10.3-1 sind für die Chargen C4 bis C11 die bei allen Druckversuchen ermittelten Druckfestigkeiten f_c sowie die bei den kraftgeregelten Druckversuchen mit Verformungsmessung ermittelten Betondruckdehnungen ε_{c1} aufgeführt. Der Mittelwert der Druckfestigkeit f_{cm} ergab sich zu -223,6 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 4,39 %. Für die Betondruckdehnung ε_{c1} ergab sich ein Mittelwert von -4,06 ‰. Der Variationskoeffizient fiel mit 7,81 % ebenfalls sehr gering aus.

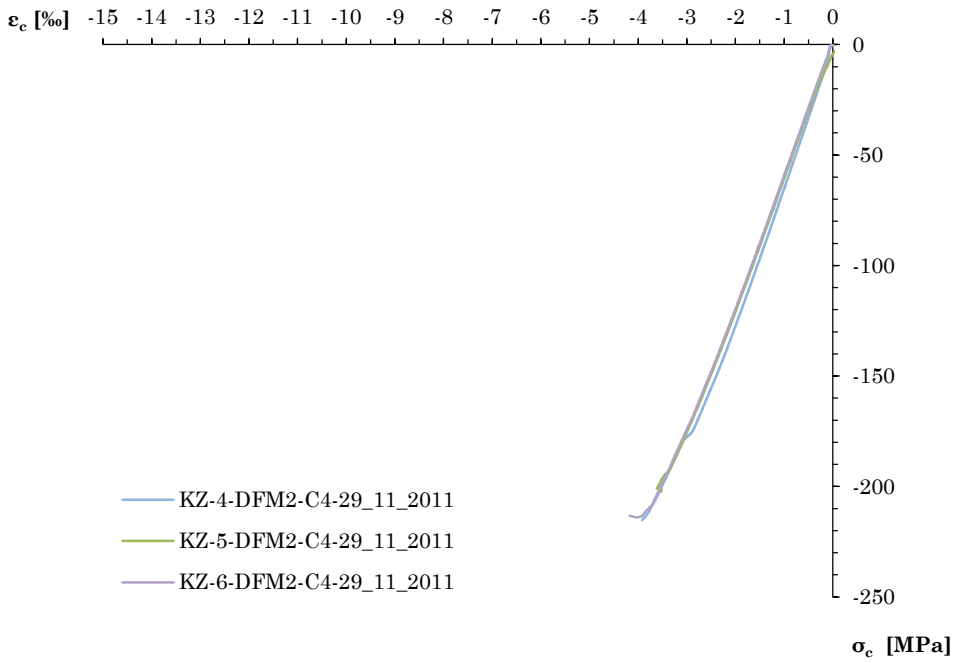


Bild 10.3-1: σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Charge C4 als Ergebnis der kraftgeregelten Druckversuche mit Verformungsmessung

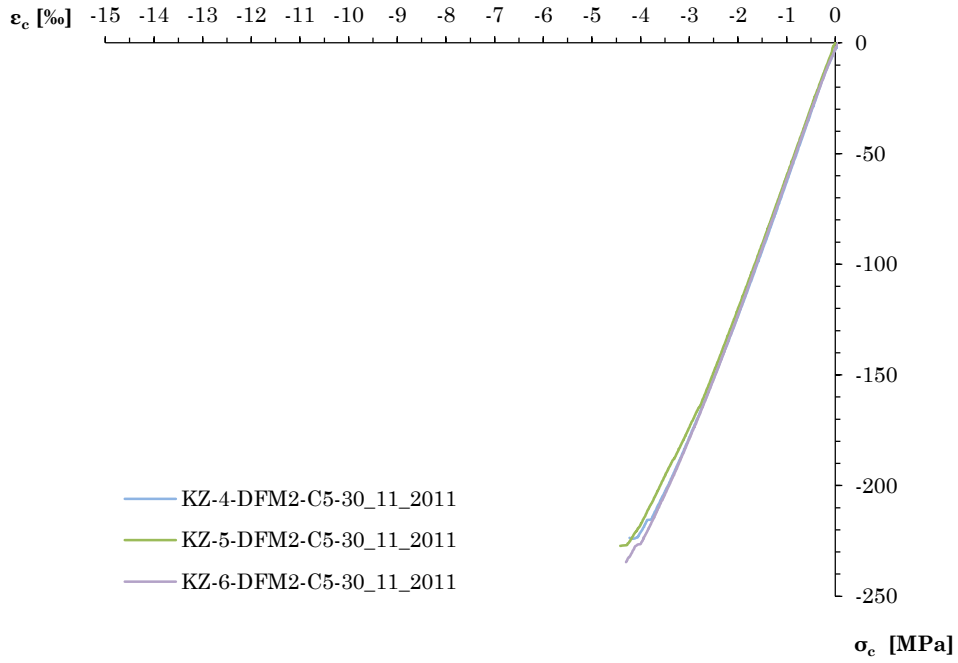


Bild 10.3-2: σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Charge C5 als Ergebnis der kraftgeregelten Druckversuche mit Verformungsmessung

Tabelle 10.3-1: Ergebnisse der kraftgeregelten Druckversuche der Chargen C4 bis C11

Kennzeichnung	f_c	m	s	v	ε_{c1}	m	s	v
	[MPa]				[‰]			
KZ-1-DFM2-C4-29_11_2011	-214,6							
KZ-2-DFM2-C4-29_11_2011	-223,5							
KZ-3-DFM2-C4-29_11_2011	-216,6	(-218,2) [1)]						
KZ-4-DFM2-C4-29_11_2011	-216,3				-3,91			
KZ-5-DFM2-C4-29_11_2011	-203,2				-3,53			
KZ-6-DFM2-C4-29_11_2011	-213,9	-214,7	6,58	3,06 %	-4,04	-3,83	0,27	6,93 %
KZ-1-DFM2-C5-30_11_2011	-232,7							
KZ-2-DFM2-C5-30_11_2011	-228,7							
KZ-3-DFM2-C5-30_11_2011	-230,5	(-230,6) [1)]						
KZ-4-DFM2-C5-30_11_2011	-224,0				-4,17			
KZ-5-DFM2-C5-30_11_2011	-227,3				-4,42			
KZ-6-DFM2-C5-30_11_2011	-236,2	-229,9	4,26	1,85 %	-4,30	-4,30	0,13	2,91 %
KZ-1-DFM2-C6-05_12_2011	-233,2							
KZ-2-DFM2-C6-05_12_2011	-220,7							
KZ-3-DFM2-C6-05_12_2011	-224,8	-226,3	6,36	2,81 %				
KZ-1-DFM2-C7-06_12_2011	-206,3							
KZ-2-DFM2-C7-06_12_2011	-222,7							
KZ-3-DFM2-C7-06_12_2011	-215,9	-214,9	8,23	3,83 %				
KZ-1-DFM2-C8-09_01_2012	-231,5							
KZ-2-DFM2-C8-09_01_2012	-196,4							
KZ-3-DFM2-C8-09_01_2012	-223,4	-217,1	18,40	8,48 %				
KZ-1-DFM2-C9-10_01_2012	-225,4							
KZ-2-DFM2-C9-10_01_2012	-225,5							
KZ-3-DFM2-C9-10_01_2012	-230,7	-227,2	3,03	1,33 %				
KZ-1-DFM2-C10-16_01_2012	-233,4							
KZ-2-DFM2-C10-16_01_2012	-224,2							
KZ-3-DFM2-C10-16_01_2012	-236,2	-231,3	6,27	2,71 %				

Tabelle 10.3-1 (fortgesetzt): Ergebnisse der kraftgeregelten Druckversuche der Chargen C4 bis C11

Kennzeichnung		f_c	m	s	v	ε_{c1}	m	s	v
		[MPa]				[‰]			
KZ-1-DFM2-C11-17_01_2012		-235,6							
KZ-2-DFM2-C11-17_01_2012		-223,3							
KZ-3-DFM2-C11-17_01_2012		-230,5	-229,8	6,17	2,69 %				
Mittelwert	m	-223,6				-4,06			
Standardabweichung	s	9,81				0,32			
Variationskoeffizient	v	4,39 %				7,81 %			

[1] Der Mittelwert der Druckfestigkeit f_{cm} der ersten drei Zylinder der Charge diente zur Festlegung der oberen Prüfspannung σ_o bei der E-Modul-Prüfung.

In Bild 10.3-3 ist die Zylinderdruckfestigkeit f_c in Abhängigkeit vom Alter der Zylinder der Chargen C4 bis C11 zum Zeitpunkt der Prüfung aufgetragen. Einige Chargen wurden im Alter von 10 bis 18 Tagen, die Mehrzahl der Chargen jedoch im Alter von 51 bis 66 Tagen geprüft. Ein Einfluss des Alters der Zylinder auf die Zylinderdruckfestigkeit f_c ist kaum gegeben.

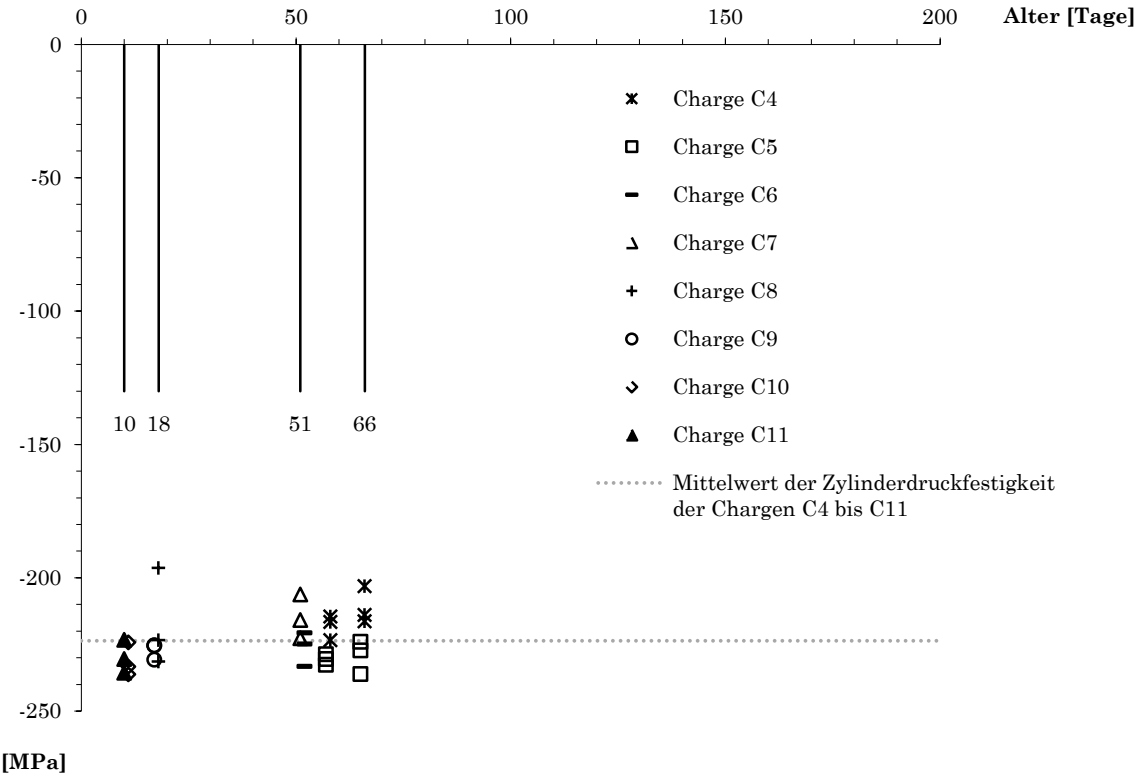


Bild 10.3-3: Zylinderdruckfestigkeit f_c in Abhängigkeit vom Alter der Zylinder der Chargen C4 bis C11 zum Zeitpunkt der Prüfung

10.3.3.2 E-Modul-Prüfung

Der E-Modul berechnet sich nach Gl. (5-4) aus der oberen und unteren Prüfspannung und den dazu korrespondierenden Dehnungen bei der dritten Belastung des in Bild 5.3-1 dargestellten Belastungsschemas.

Detaillierte Angaben zu der oberen und unteren Prüfspannung und Dehnung der einzelnen Zylinder finden sich im Anhang C.1. Die berechneten E-Module für die einzelnen Zylinder der Chargen C4 und C5 können der Tabelle 10.3-2 entnommen werden. Der Mittelwert des E-Moduls beträgt 59391 MPa. Der Variationskoeffizient fällt mit 0,65 % sehr gering aus.

Zum Zeitpunkt der Prüfung des E-Moduls wiesen die Zylinder ein Alter von 62 Tagen (Charge C4) bzw. 64 Tagen (Charge C5) auf. Ein Einfluss des Alters der Probekörper auf den E-Modul ist nicht zu erkennen.

Tabelle 10.3-2: Bei E-Modul-Prüfungen an Zylindern der Chargen C4 und C5 ermittelte Sekantenmodul

Kennzeichnung		E_c [MPa]	m	s	v
KZ-4-DFM2-C4-29_11_2011		59369			
KZ-5-DFM2-C4-29_11_2011		58717			
KZ-6-DFM2-C4-29_11_2011		59714	59267	506	0,85 %
KZ-4-DFM2-C5-30-11-2011		59677			
KZ-5-DFM2-C5-30-11-2011		59670			
KZ-6-DFM2-C5-30-11-2011		59198	59515	274	0,46 %
Mittelwert	m	59391			
Standardabweichung	s	389			
Variationskoeffizient	v	0,65 %			

10.4 Biegezugversuche

10.4.1 Versuchsstand und –durchführung

Der Versuchsstand für die Biegezugversuche sowie die Durchführung der Versuche ist in Abschnitt 5.4.1 beschrieben.

10.4.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper

Die Vorbereitung der Prismen für die Biegezugversuche ist in Abschnitt 5.4.2.1 beschrieben. Der sich aus den protokollierten Querschnittsabmessungen ergebende Mittelwert für die Querschnittsbreite b und die Querschnittshöhe h ist in Anhang C.2 aufgeführt.

Die Instrumentierung der Prismen für die Biegezugversuche ist ebenfalls in Abschnitt 5.4.2.1 dargestellt.

10.4.3 Versuchsergebnisse

Die Biegezugrandspannung σ_{ctfl} wird nach Gl. (5-6) berechnet. Der Verlauf der Biegezugrandspannung σ_{ctfl} wird über die gemittelte Mittendurchbiegung w_m aufgetragen. In Bild 10.4-1 bis Bild 10.4-8 sind die σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Chargen C4 bis C11 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche dargestellt.

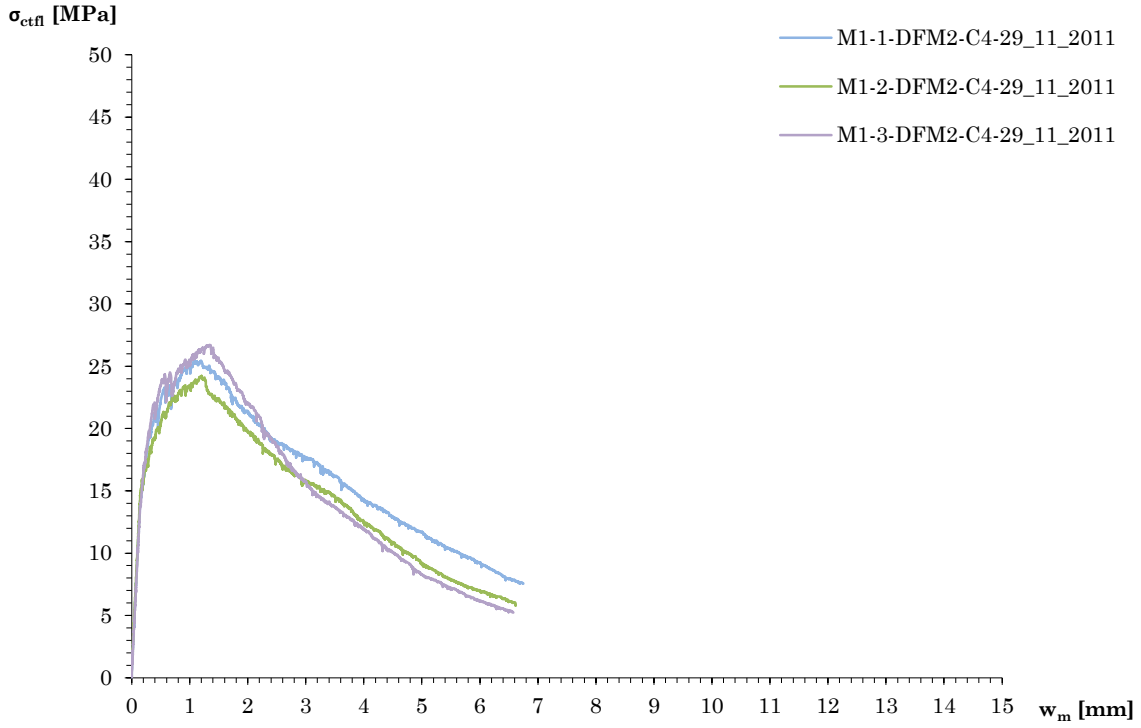


Bild 10.4-1: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C4 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

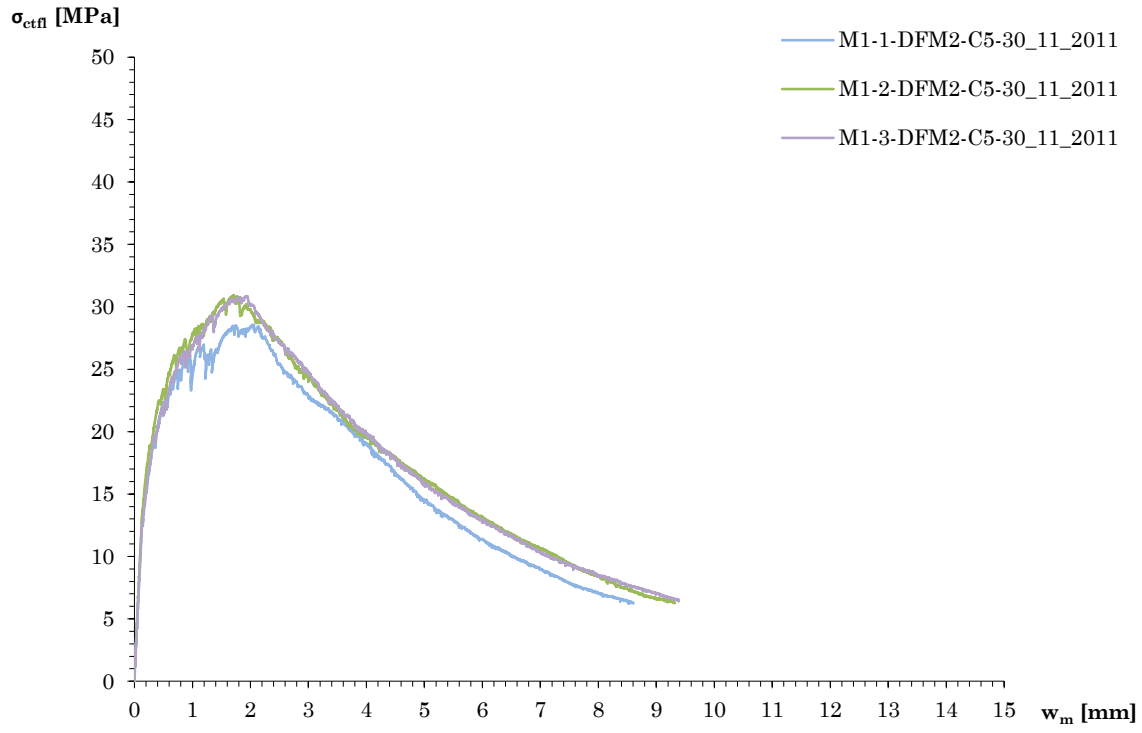


Bild 10.4-2: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C5 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

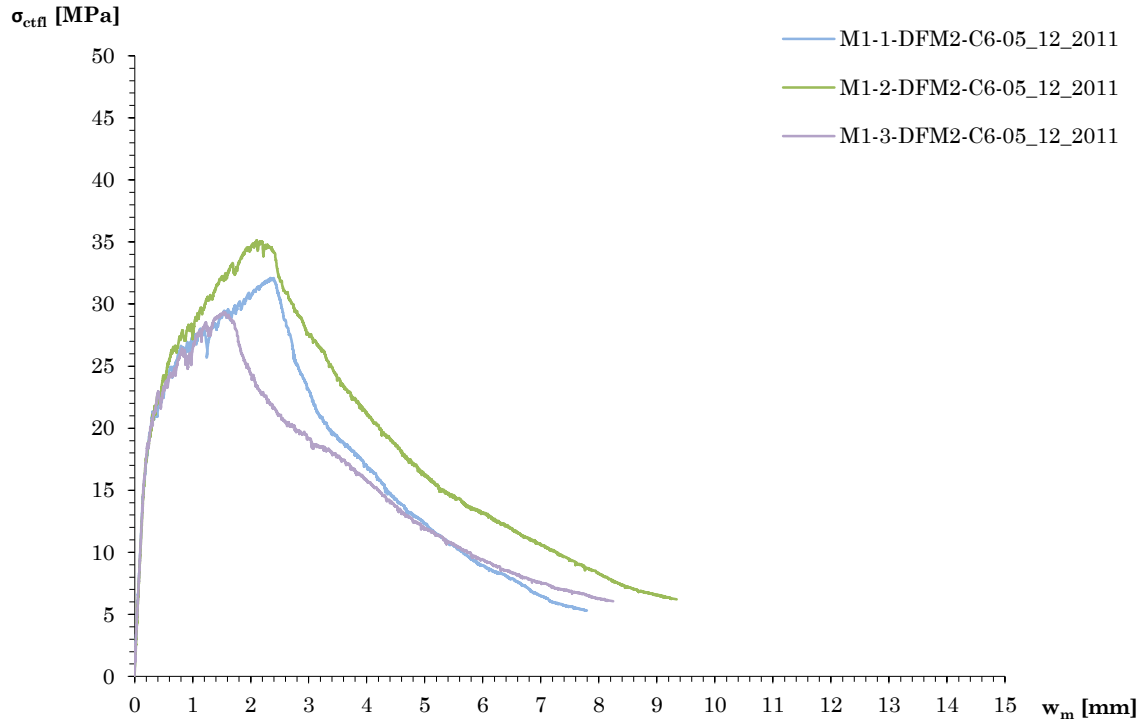


Bild 10.4-3: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C6 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

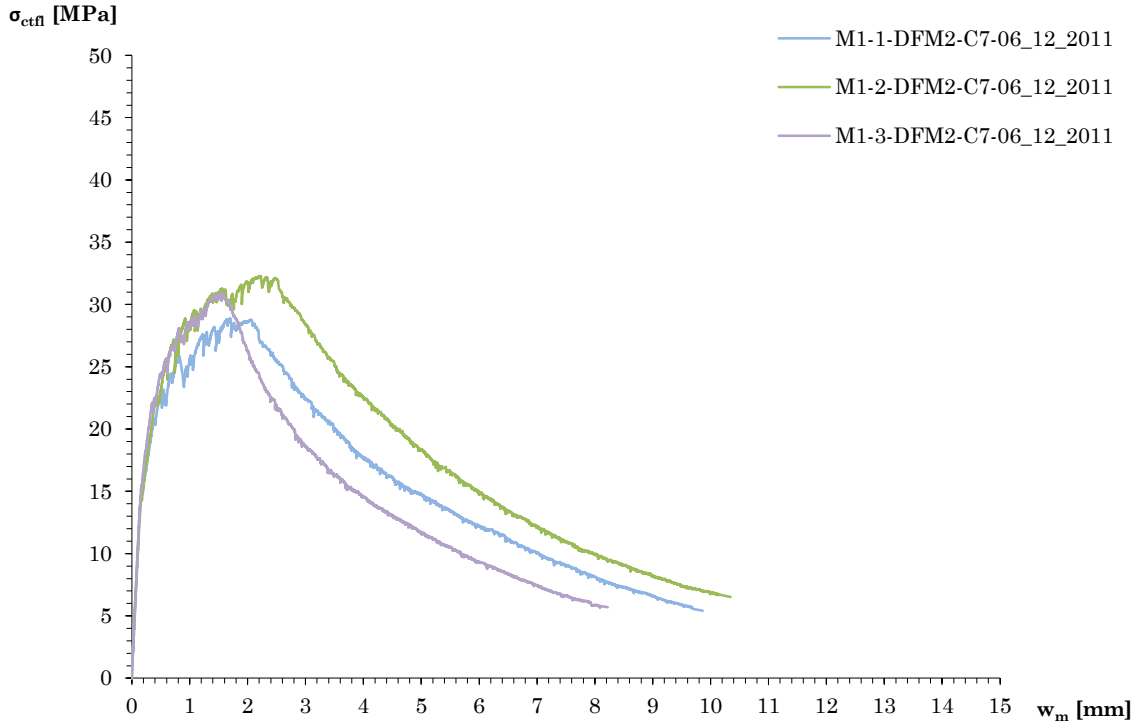


Bild 10.4-4: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C7 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

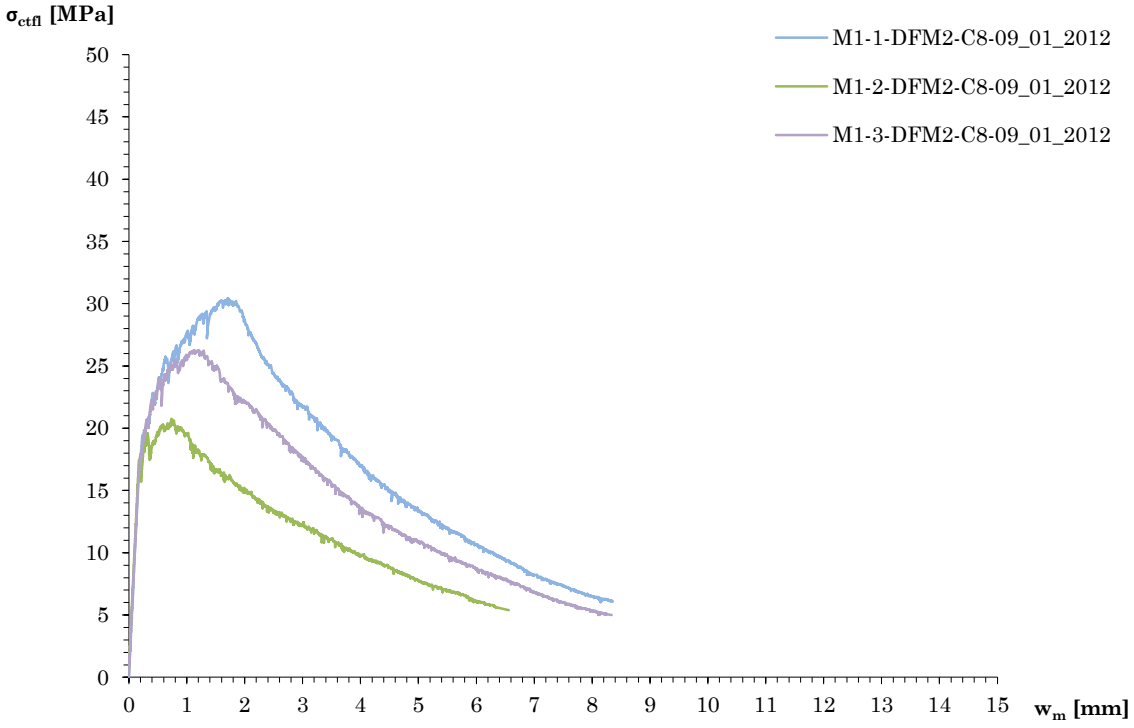


Bild 10.4-5: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C8 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

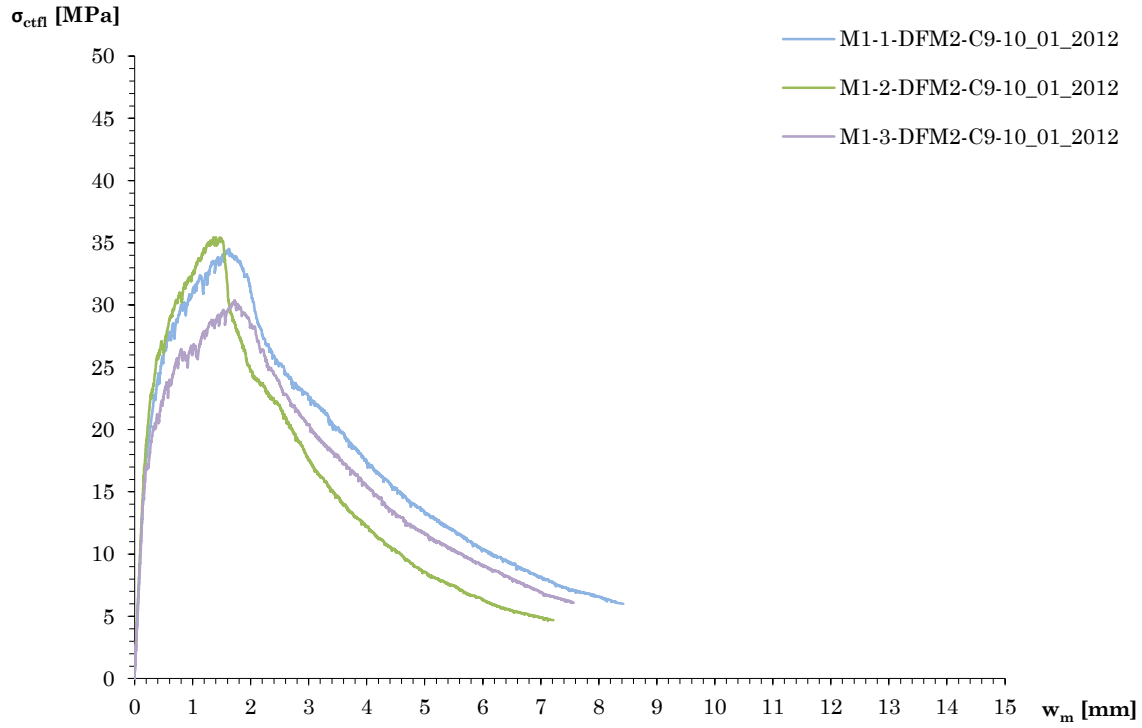


Bild 10.4-6: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C9 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

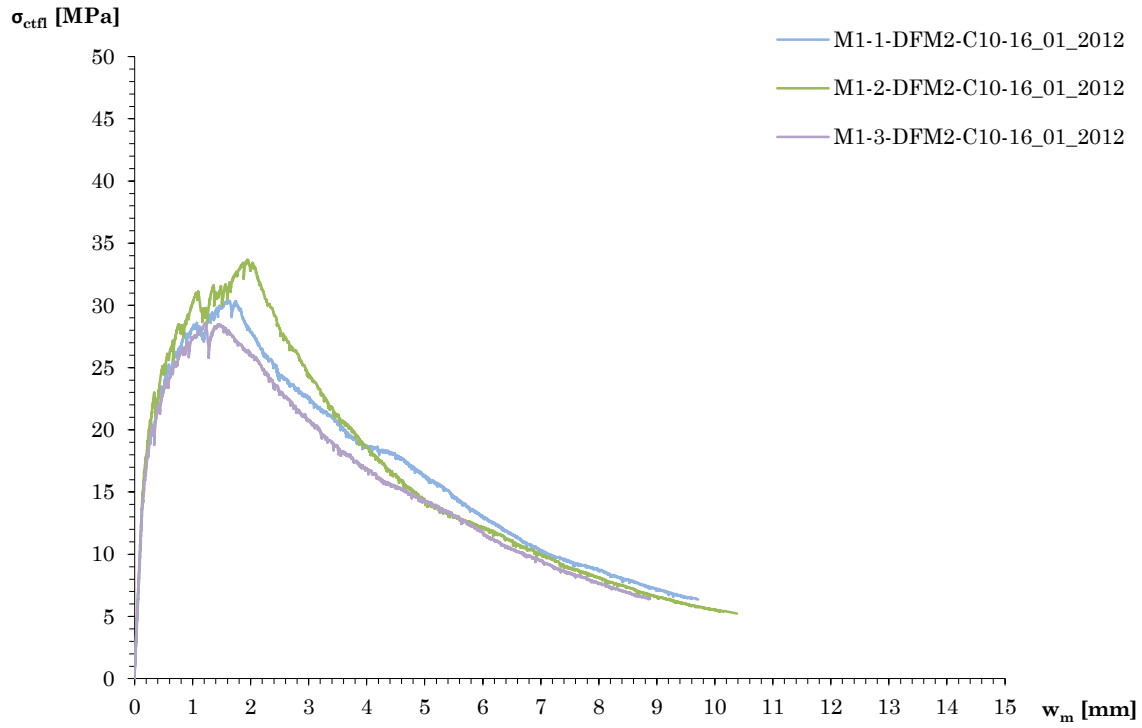


Bild 10.4-7: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C10 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

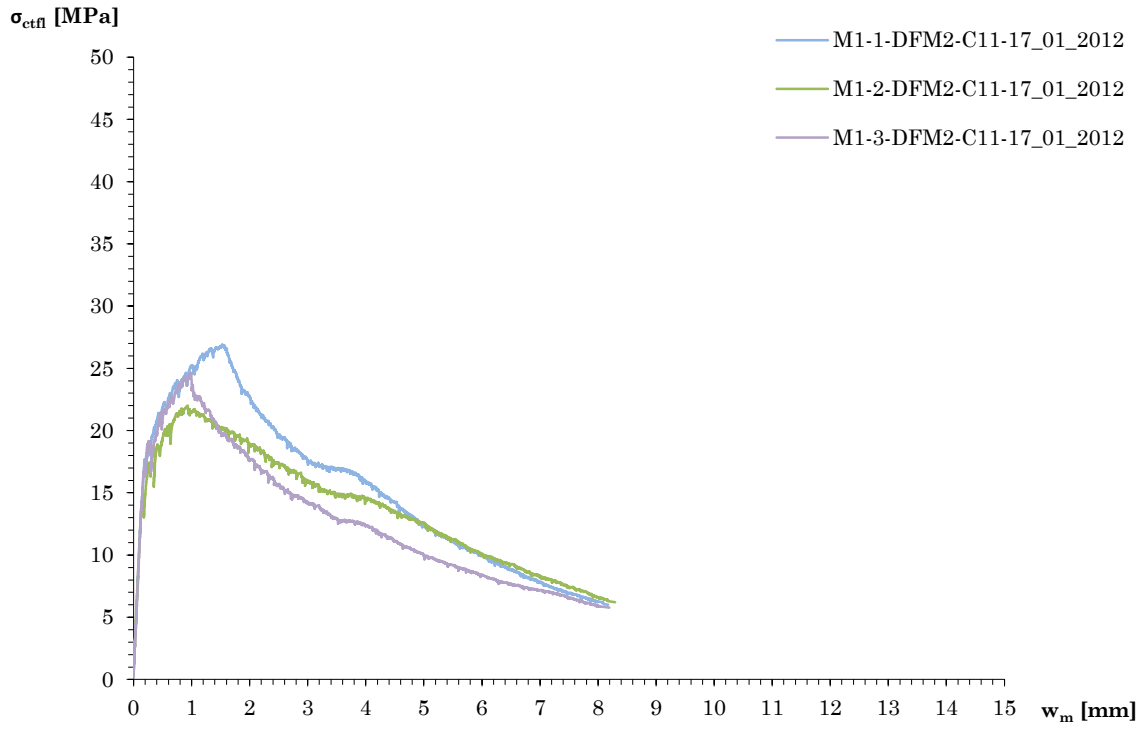


Bild 10.4-8: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C11 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

In Tabelle 10.4-1 sind für die Chargen C4 bis C11 die ermittelten Elastizitätsgrenzen der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ sowie die dazu korrespondierenden Mittendurchbiegungen $w_m(f_{ctfl,el})$ aufgeführt. Der Mittelwert der Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ ergab sich zu 14,60 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 8,49 %. Für die zur Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ korrespondierende Mittendurchbiegungen $w_m(f_{ctfl,el})$ ergab sich ein Mittelwert von 0,15 mm. Der Variationskoeffizient betrug 9,56 %.

In Tabelle 10.4-2 sind für die Chargen C4 bis C11 die ermittelten Biegezugfestigkeiten f_{ctfl} sowie die dazu korrespondierenden Mittendurchbiegungen $w_m(f_{ctfl})$ aufgeführt. Der Mittelwert der Biegezugfestigkeit f_{ctfl} ergab sich zu 29,14 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 13,52 %. Für die zur Biegezugfestigkeit f_{ctfl} korrespondierenden Mittendurchbiegungen w_m (f_{ctfl}) ergab sich ein Mittelwert von 1,55 mm bei einem Variationskoeffizienten von 27,12 %.

Im Anhang C.2 sind für die Chargen C4 bis C11 die Prismen und die Lage der Risslokalisierung abgebildet.

In Bild 10.4-9 ist die Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ und in Bild 10.4-10 die Biegezugfestigkeit f_{ctfl} in Abhängigkeit vom Alter der Prismen zum Zeitpunkt der Prüfung aufgetragen. Einige Chargen wurden im Alter von 27 bis 34 Tagen, andere im Alter von 65 bis 71 Tagen geprüft. In beiden Fällen ist ein Einfluss des Alters der Prismen nicht zu erkennen.

Tabelle 10.4-1: Bei weggeregelten Biegezugversuchen an Prismen der Chargen C4 bis C11 ermittelte Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ und korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl,el})$

Kennzeichnung	$f_{ctfl,el}$	m	s	v	$w_m(f_{ctfl,el})$	m	s	v
	[MPa]				[mm]			
M1-1-DFM2-C4-29_11_2011	14,71				0,15			
M1-2-DFM2-C4-29_11_2011	15,04				0,15			
M1-3-DFM2-C4-29_11_2011	13,57	14,44	0,77	5,35 %	0,14	0,15	0,01	3,91 %
M1-1-DFM2-C5-30_11_2011	13,75				0,14			
M1-2-DFM2-C5-30_11_2011	13,17				0,13			
M1-3-DFM2-C5-30_11_2011	12,71	13,23	0,74	5,58 %	0,13	0,14	0,00	3,10 %
M1-1-DFM2-C6-05_12_2011	14,32				0,14			
M1-2-DFM2-C6-05_12_2011	15,49				0,16			
M1-3-DFM2-C6-05_12_2011	15,75	15,19	0,76	5,00 %	0,16	0,15	0,01	7,12 %
M1-1-DFM2-C7-06_12_2011	14,13				0,15			
M1-2-DFM2-C7-06_12_2011	13,01				0,13			
M1-3-DFM2-C7-06_12_2011	13,70	13,61	0,56	4,14 %	0,14	0,14	0,01	6,24 %
M1-1-DFM2-C8-09_01_2012	17,45				0,18			
M1-2-DFM2-C8-09_01_2012	17,42				0,17			
M1-3-DFM2-C8-09_01_2012	15,80	16,89	0,94	5,59 %	0,16	0,17	0,01	6,33 %
M1-1-DFM2-C9-10_01_2012	14,58				0,15			
M1-2-DFM2-C9-10_01_2012	14,76				0,14			
M1-3-DFM2-C9-10_01_2012	14,74	14,70	0,10	0,66 %	0,15	0,15	0,01	3,96 %
M1-1-DFM2-C10-16_01_2012	15,90				0,15			
M1-2-DFM2-C10-16_01_2012	14,96				0,14			
M1-3-DFM2-C10-16_01_2012	13,88	14,91	1,01	6,76 %	0,13	0,14	0,01	9,20 %
M1-1-DFM2-C11-17_01_2012	14,28				0,14			
M1-2-DFM2-C11-17_01_2012	13,52				0,13			
M1-3-DFM2-C11-17_01_2012	13,69	13,83	0,40	2,88 %	0,13	0,13	0,00	2,72 %
Mittelwert	m	14,60			0,15			
Standardabweichung	s	1,24			0,01			
Variationskoeffizient	v	8,49 %			9,56 %			

Tabelle 10.4-2: Bei weggeregelten Biegezugversuchen an Prismen der Chargen C4 bis C11 ermittelte Biegezugfestigkeit f_{ctfl} und korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl})$

Kennzeichnung	f_{ctfl}	m	s	v	$w_m(f_{ctfl})$	m	s	v
	[MPa]				[mm]			
M1-1-DFM2-C4-29_11_2011	25,45				1,08			
M1-2-DFM2-C4-29_11_2011	24,22				1,20			
M1-3-DFM2-C4-29_11_2011	26,72	25,46	1,25	4,92 %	1,34	1,21	0,13	11,00 %
M1-1-DFM2-C5-30_11_2011	28,58				2,06			
M1-2-DFM2-C5-30_11_2011	30,93				1,71			
M1-3-DFM2-C5-30_11_2011	30,87	30,13	1,34	4,45 %	1,93	1,90	0,18	9,25 %
M1-1-DFM2-C6-05_12_2011	32,11				2,34			
M1-2-DFM2-C6-05_12_2011	35,13				2,10			
M1-3-DFM2-C6-05_12_2011	29,37	32,20	2,88	8,94 %	1,54	1,99	0,41	20,68 %
M1-1-DFM2-C7-06_12_2011	28,88				1,69			
M1-2-DFM2-C7-06_12_2011	32,28				2,19			
M1-3-DFM2-C7-06_12_2011	30,88	30,68	1,71	5,57 %	1,58	1,82	0,33	17,90 %
M1-1-DFM2-C8-09_01_2012	30,45				1,71			
M1-2-DFM2-C8-09_01_2012	20,74				0,74			
M1-3-DFM2-C8-09_01_2012	26,29	25,83	4,87	18,85 %	1,12	1,19	0,49	41,16 %
M1-1-DFM2-C9-10_01_2012	34,52				1,62			
M1-2-DFM2-C9-10_01_2012	35,44				1,40			
M1-3-DFM2-C9-10_01_2012	30,36	33,44	2,71	8,09 %	1,72	1,58	0,16	10,40 %
M1-1-DFM2-C10-16_01_2012	30,37				1,63			
M1-2-DFM2-C10-16_01_2012	33,69				1,95			
M1-3-DFM2-C10-16_01_2012	28,59	30,88	2,59	8,38 %	1,22	1,60	0,36	22,73 %
M1-1-DFM2-C11-17_01_2012	26,89				1,52			
M1-2-DFM2-C11-17_01_2012	22,00				0,93			
M1-3-DFM2-C11-17_01_2012	24,66	24,52	2,45	9,99 %	0,98	1,14	0,33	28,82 %
Mittelwert m	29,14				1,55			
Standardabweichung s	3,94				0,42			
Variationskoeffizient v	13,52 %				27,12 %			

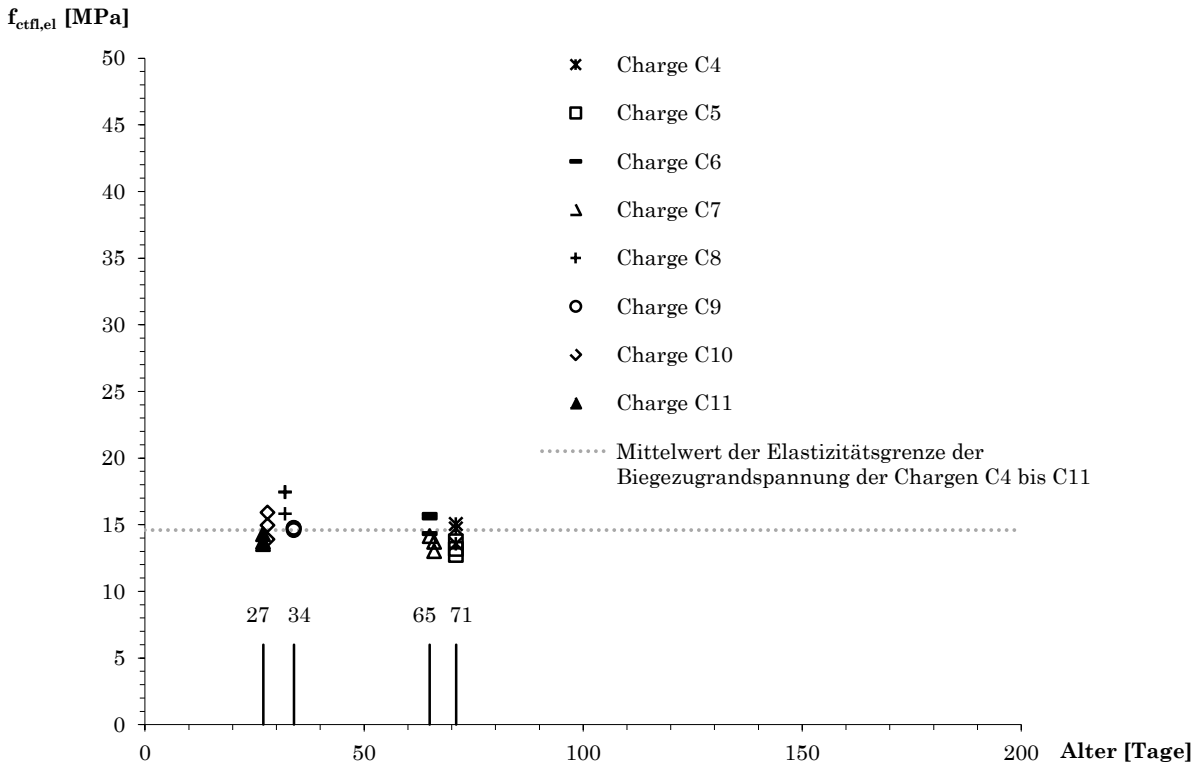


Bild 10.4-9: Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ in Abhängigkeit vom Alter der Prismen der Chargen C4 bis C11 zum Zeitpunkt der Prüfung

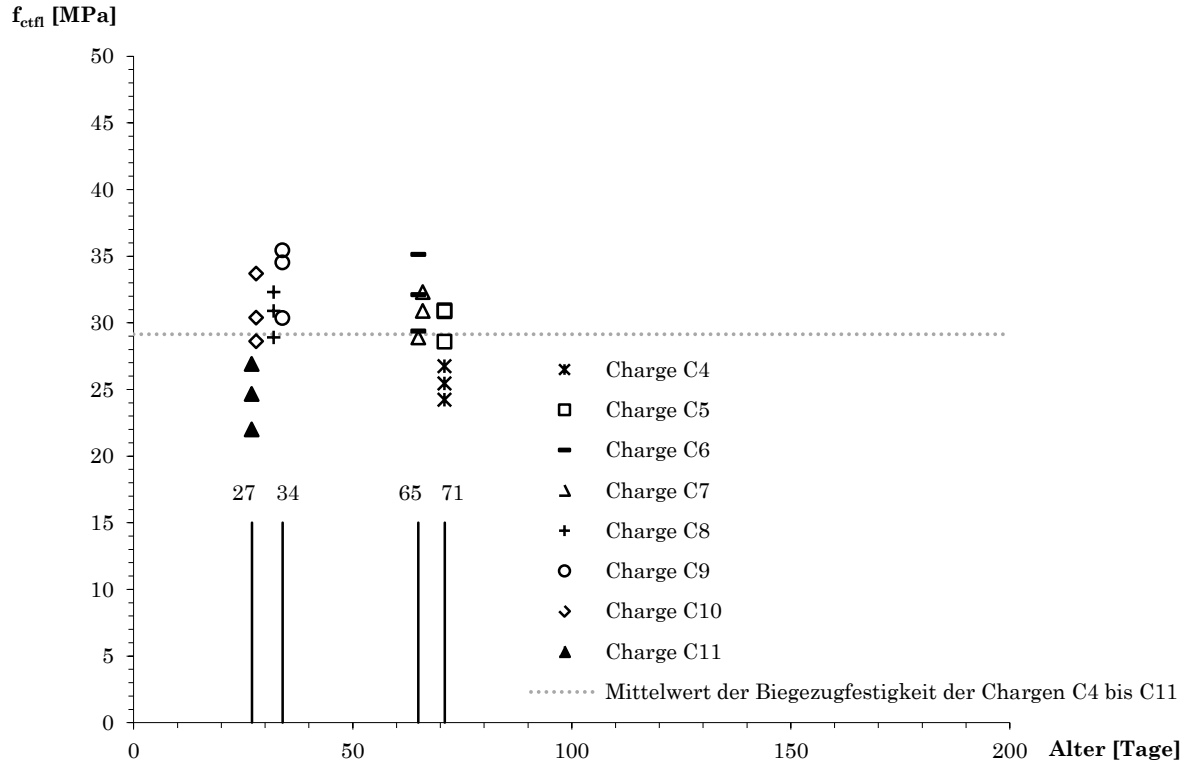
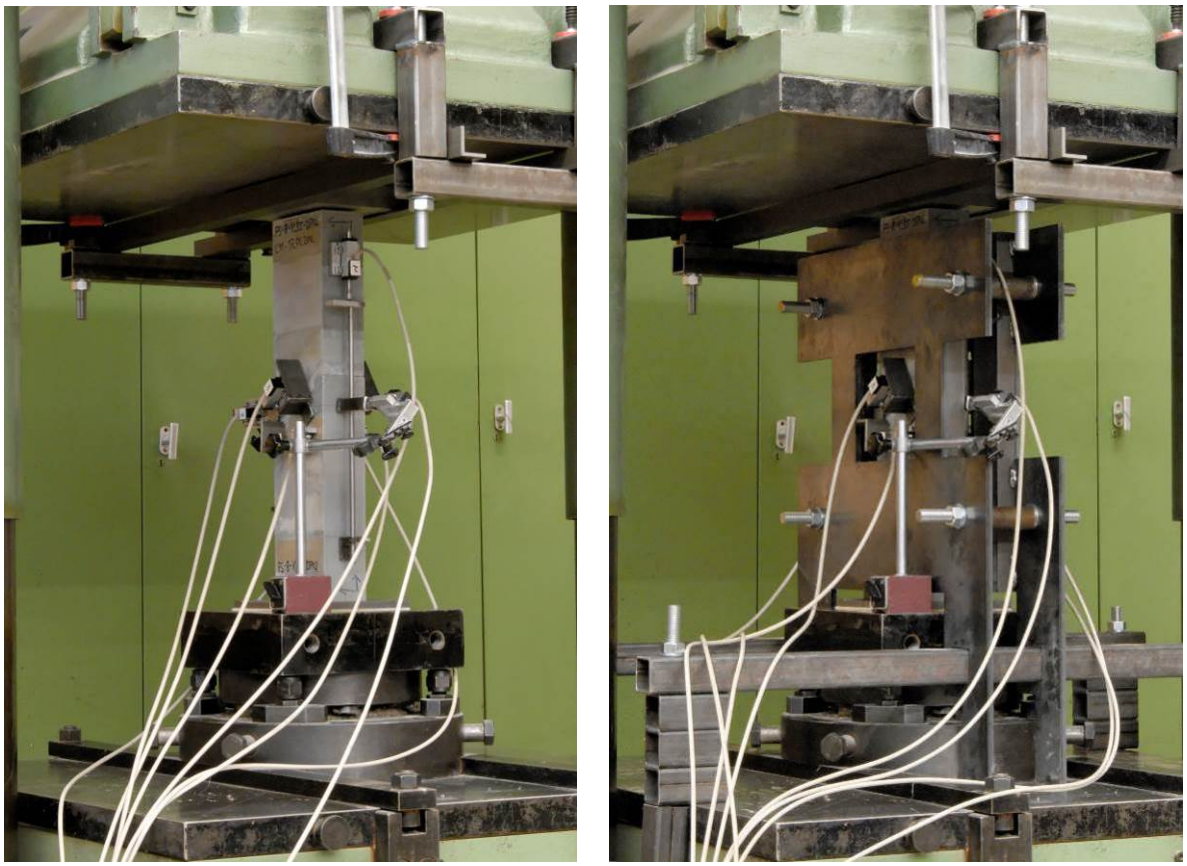


Bild 10.4-10: Biegezugfestigkeit f_{ctfl} in Abhängigkeit vom Alter der Prismen der Chargen C4 bis C11 zum Zeitpunkt der Prüfung

10.5 Schub-Druck-Versuche

10.5.1 Versuchsstand und –durchführung

Die Schub-Druck-Versuche wurden an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMPA)) mit einer 10000 kN Druckprüfmaschine der Firma Mohr & Federhaff AG durchgeführt. In Bild 10.5-1 ist der Versuchsstand mit eingebautem Versuchskörper abgebildet.



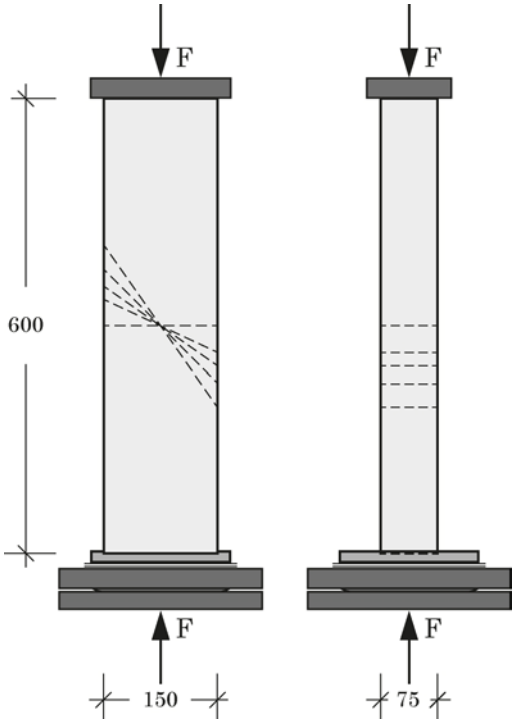
a) Versuchskörper mit geneigter Fuge und Instrumentierung ohne Schutzvorrichtung

b) Versuchskörper mit geneigter Fuge und Instrumentierung mit Schutzvorrichtung

Bild 10.5-1: Versuchsstand für die Durchführung der Schub-Druck-Versuche

Die Versuchseinrichtung ist schematisch in Bild 10.5-2 dargestellt. Die Prüfkraft F wurde über die untere Lastplatte in vertikaler Richtung nach oben aufgebracht. Eine auf der unteren Lastplatte angebrachte Kalotte sorgte dafür, dass bei geringfügig schrägen Lasteinleitungsflächen die Prüfkraft gleichmäßig in den Versuchskörper eingeleitet wurde. Auf der Kalotte war ein Gleitlager angebracht. Das Gleitlager bestand aus zwei 1 mm dicken PTFE-Folien, zwischen denen sich eine Fettschicht befand.

Die Durchführung der Schub-Druck-Versuche erfolgte weggeregelt über den Maschinenweg des Prüfzylinders. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde dabei im aufsteigenden Ast bis zum Erreichen des Tragwiderstandes stufenweise verringert (vgl. Anhang C.3).



a) Vorderansicht b) Seitenansicht

Bild 10.5-2: Versuchseinrichtung für die Durchführung der Schub-Druck-Versuche (schematisch)

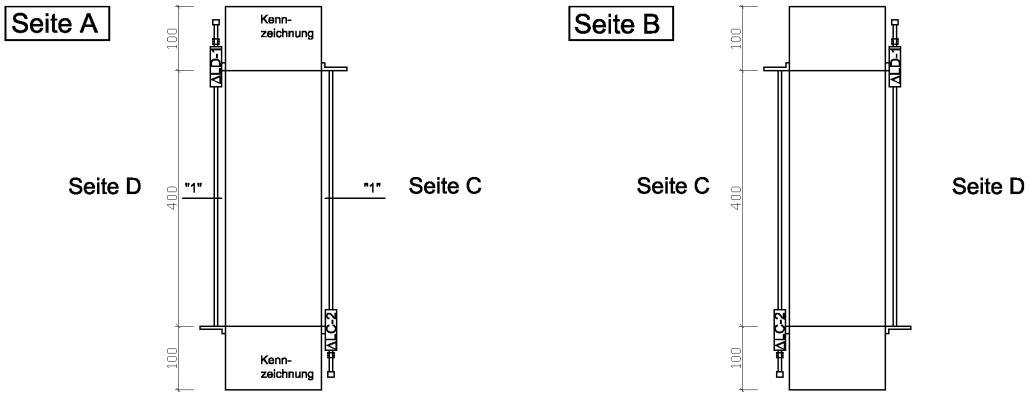
Trotz der niedrigen Belastungsgeschwindigkeit kam es auf Grund der enorm hohen Energie, die bei Erreichen bzw. Überschreitung des Tragwiderstandes freigesetzt wurde, bis auf wenige Ausnahmen zu einem schlagartigen Versagen der Versuchskörper, so dass ein abfallender Ast der Versuchskurve nicht ermittelt werden konnte. Das schlagartige Versagen der Versuchskörper hatte auch zur Folge, dass bei der Durchführung der Versuche eine Schutzvorrichtung um die Versuchskörper herum angebracht werden musste (vgl. Bild 10.5-1b), die das Herausschleudern der Versuchskörper aus der Prüfmaschine verhinderte und die Instrumentierung vor Schaden bewahrte.

10.5.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Versuchskörper

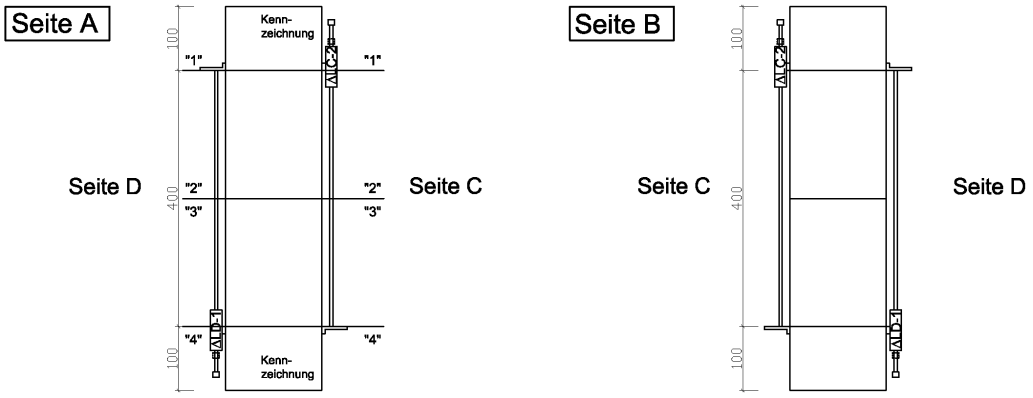
Vor der Prüfung wurden die tatsächlichen Abmessungen der Versuchskörper protokolliert. Für die Versuchskörpern ohne Fuge (Referenzprismen) ist der Mittelwert für die Querschnittsbreite b und die Querschnittshöhe h im Schnitt “1”-“1” in Anhang C.3.1 aufgeführt. Bei den Versuchskörpern mit Fuge wurden zunächst die tatsächlichen Abmessungen der unteren Versuchskörperhälfte im Schnitt “4”-“4” und der oberen Versuchskörperhälfte im Schnitt “1”-“1” notiert. Der Mittelwert für die Querschnittsbreite b und die Querschnittshöhe h der kleineren der beiden Querschnittsflächen ist dann in Anhang C.3 aufgeführt.

Bei den Versuchskörpern ohne Fuge (Referenzprismen) und mit horizontaler Fuge bestand die Instrumentierung aus zwei potentiometrischen Wegaufnehmern vom Typ T 25 der Firma Novotechnik mit einem Nennmessbereich von 25 mm. Mit ihnen wurde die Längenänderung Δl der Versuchskörper in Belastungsrichtung gemessen. Bei den Versuchskörpern mit geneigter Fuge wurden zusätzlich dazu im Bereich der Fuge weitere potentiometrischen Wegaufnehmern vom Typ T 25 der Firma Novotechnik mit einem Nennmessbereich von 25 mm angebracht. Dabei wurde mit den Wegaufnehmern ΔLA-3 und ΔLB-4 die Verschiebung Δs parallel zur Fuge gemessen. Mit den horizontal angebrachten Wegaufnehmern ΔLC-5 und ΔLD-6 sowie ΔLA-7 und ΔLB-8 und der damit gemessenen horizontalen

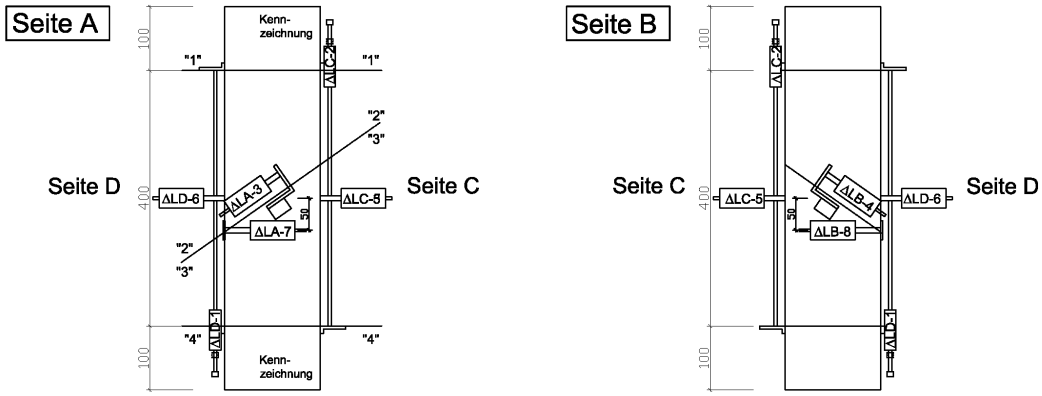
Bewegung der Versuchskörperhälften relativ zueinander konnte auf die Verformung Δn normal zur Fuge zurückgerechnet werden. Die genaue Anordnung und Bezeichnung der potentiometrischen Wegaufnehmer kann dem Bild 10.5-3 entnommen werden.



a) Versuchskörper ohne Fuge (Referenzprismen)



b) Versuchskörper mit horizontaler Fuge



c) Versuchskörper mit geneigter Fuge

Bild 10.5-3: Instrumentierung der Versuchskörper für die Durchführung der Schub-Druck-Versuche

Zusätzlich wurden die Prüfkraft F und der Maschinenweg aufgezeichnet. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte mit einer Messfrequenz von 5 Hz.

10.5.3 Versuchsergebnisse

10.5.3.1 Auswertung der Versuche

Die Druckversuche an Versuchskörpern ohne Fuge (Referenzprismen) wurden im Wesentlichen wie in Abschnitt 5.3.3.1 beschrieben ausgewertet.

Die Auswertung der Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit Fuge sowie die Darstellung der Ergebnisse in einem Schub-Druck-Diagramm wurde in Abschnitt 9.2.2 beschrieben. Auf die in der Fuge auftretenden Verformungen Δs parallel zur Fuge und Δn normal zur Fuge in Abhängigkeit von den in der Fuge wirkenden Kräften bzw. Spannungen wird im Rahmen dieses Abschlussberichts nicht näher eingegangen.

10.5.3.2 Versuchskörper ohne Fuge (Referenzprismen)

Detaillierte Angaben zu den Querschnittsabmessungen der einzelnen Versuchskörper ohne Fuge (Referenzprismen) und die gemessenen maximalen Prüfkräfte F_{max} sowie die gemessenen Kraft-Verformungs-Kurven und Bruchbilder der Versuchskörper finden sich im Anhang C.3.1.

Die gemessene maximale Prüfkraft F_{max} wurde nach Gl. (5-2) in die äquivalente Druckfestigkeit f_c umgerechnet. Die Längenänderung Δl wurde nach Gl. (5-3) in die äquivalente Betondruckdehnung ε_c umgerechnet.

In Bild 10.5-4 und Bild 10.5-5 sind die σ_c -ε_c-Kurven der Versuchskörper ohne Fuge (Referenzprismen) der Chargen C4 und C5 als Ergebnis der weggeregelten Druckversuche dargestellt. Die Kurven weisen alle bis zum Erreichen der Druckfestigkeit f_c einen ähnlichen Verlauf auf. Eine Ausnahme davon bildet die Kurve des Versuchskörpers FS-1-RP-DFM2-C5-30_11_2011, der eine schräge Lasteinleitungsfläche aufwies. Dieses könnte über die Kalotte nicht ausgeglichen werden, so dass der Versuchskörper in Folge der ungleichmäßigen Belastung der Lasteinleitungsfläche frühzeitig versagte. Ein abfallender Ast konnte bei keinem der Versuchskörper gemessen werden.

In Tabelle 10.5-1 sind die bei den weggeregelten Druckversuchen ermittelten Druckfestigkeiten f_c sowie die dazu korrespondierenden Betondruckdehnungen ε_{c1} aufgeführt. Der Mittelwert der Druckfestigkeit f_{cm} ergab sich zu -206,4 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 5,24 %. Für die Betondruckdehnung ε_{c1} ergab sich ein Mittelwert von -4,51 ‰. Der Variationskoeffizient fiel mit 3,44 % ebenfalls sehr gering aus.

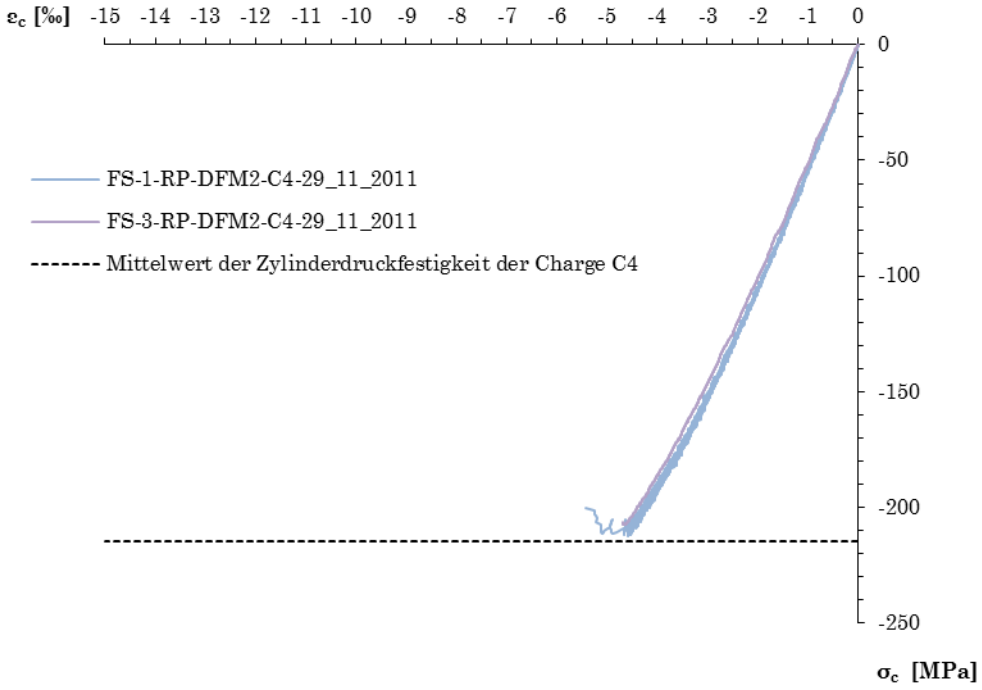


Bild 10.5-4: σ_c -ε_c-Kurven der Versuchskörper der Charge C4 als Ergebnis der weggeregelten Druckversuche

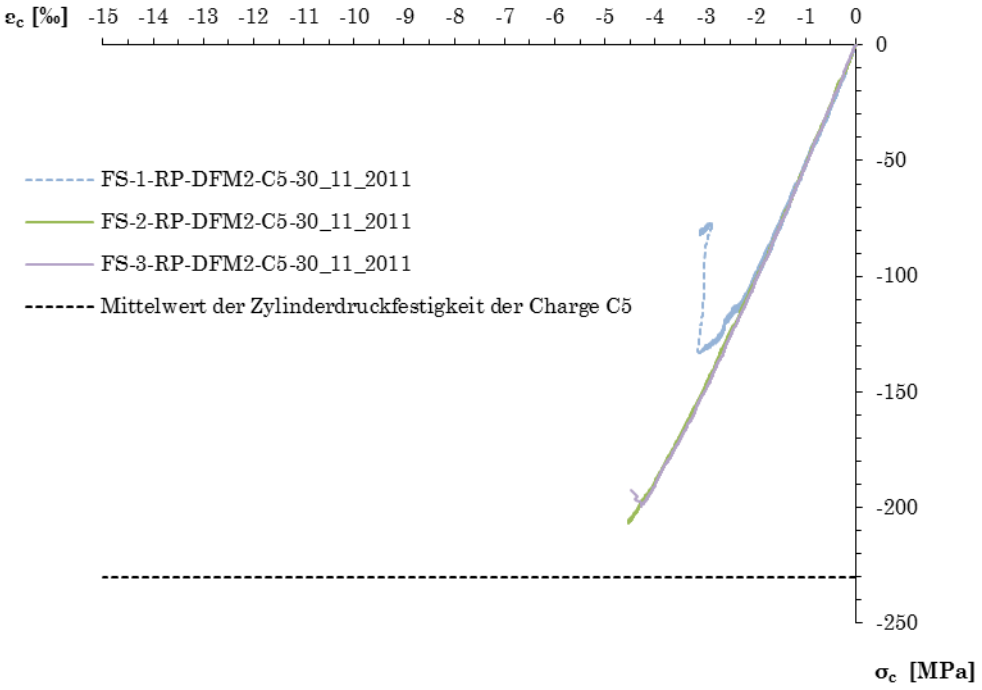


Bild 10.5-5: σ_c -ε_c-Kurven der Versuchskörper der Charge C5 als Ergebnis der weggeregelten Druckversuche

Tabelle 10.5-1: Ergebnisse der Druckversuche an Versuchskörpern ohne Fuge (Referenzprismen)

Kennzeichnung		f_c	m	s	v	ε_{c1}	m	s	v
		[MPa]				[‰]			
FS-1-RP-DFM2-C4-29_11_2011		-212,1				-4,58			
FS-2-RP-DFM2-C4-29_11_2011	[1]								
FS-3-RP-DFM2-C4-29_11_2011		-207,6	-209,9	3,24	1,54 %	-4,64	-4,61	0,04	0,92 %
FS-1-RP-DFM2-C5-30_11_2011	[2]	-133,3				-3,13			
FS-2-RP-DFM2-C5-30_11_2011		-206,6				-4,53			
FS-3-RP-DFM2-C5-30_11_2011		-199,5	-203,0	5,03	2,48 %	-4,29	-4,41	0,17	3,87 %
Mittelwert	m	-206,4				-4,51			
Standardabweichung	s	5,24				0,16			
Variationskoeffizient	v	2,54 %				3,44 %			

[1] Der Probeköper wurde nicht geprüft, da er bereits vor der Prüfung eine Schädigung aufwies.

[2] Der Versuchskörper wies eine schräge Lasteinleitungsfläche auf. Die Ergebnisse des Versuchskörpers wurden bei der Mittelwertbildung und der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.

Vergleicht man die Ergebnisse mit den Mittelwerten der Zylinderdruckfestigkeit der entsprechenden Charge, so stellt man fest, dass die Druckfestigkeit der Referenzprismen stets niedriger ist als der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit (vgl. Bild 10.5-4 und Bild 10.5-5). Dies deutet auf einen Einfluss der Versuchskörperform auf die ermittelten Festigkeitswerte hin. Bei der Umrechnung der Festigkeitswerte gilt es dies zu berücksichtigen. Basierend auf den im Rahmen dieses Forschungsprojekts ermittelten Festigkeitswerten an den Referenzprismen und Zylindern ergibt sich der folgende Umrechnungsbeiwert (vgl. Bild 10.5-6 und Tabelle 10.5-2):

$$f_{c,pr,150/75/600} = 0{,}93 \cdot f_{c,cyl,100/200} \qquad (10\text{-}1)$$

mit $f_{c,pr,150/75/600}$ [MPa] Druckfestigkeit der Referenzprismen (b/h/l = 150/75/600 mm)
$f_{c,cyl,100/200}$ [MPa] Zylinderdruckfestigkeit der Probekörper (d/h = 100/200 mm)

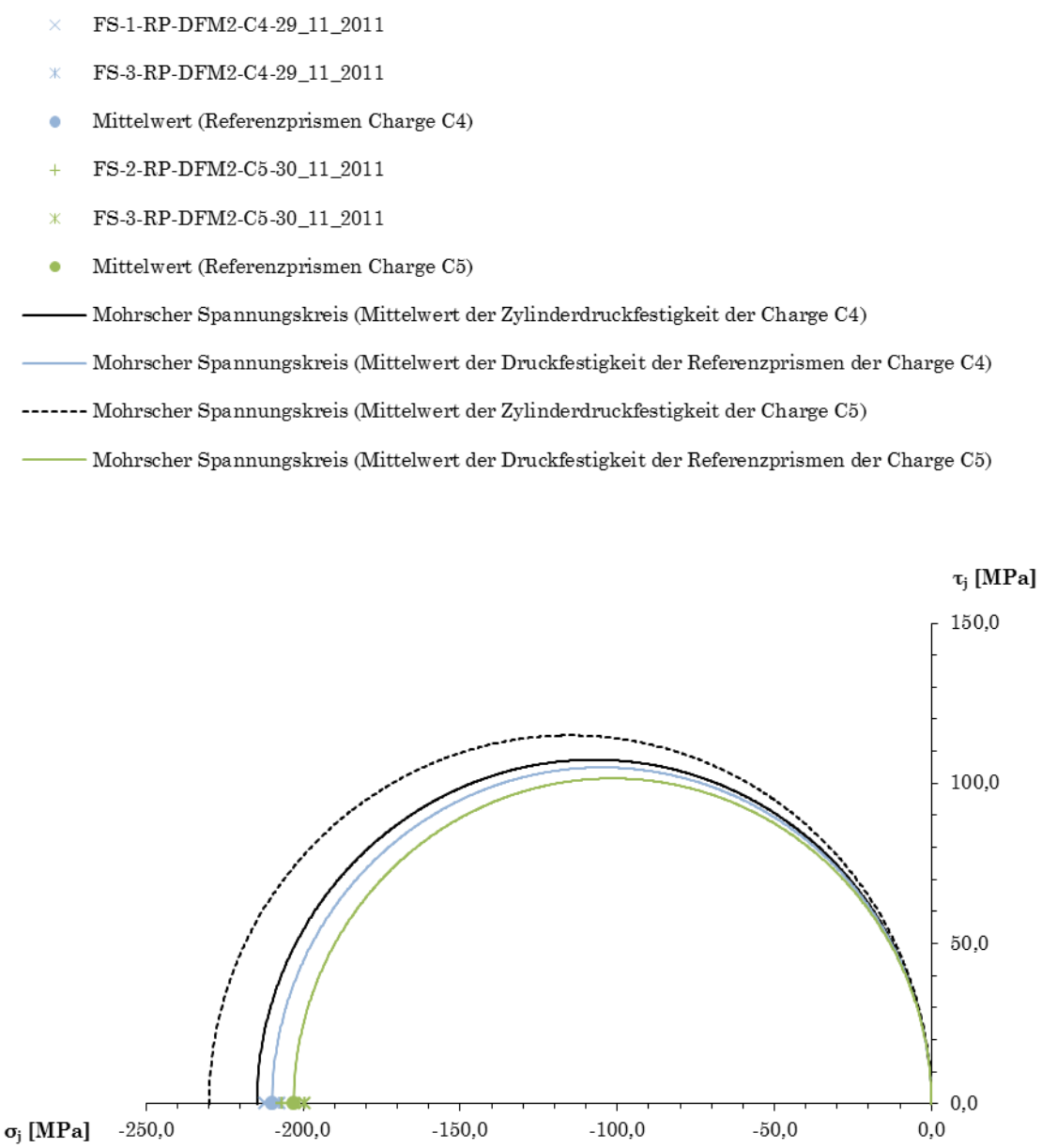


Bild 10.5-6: Schub-Druck-Diagramm für Versuchskörper ohne Fuge (Referenzprismen)

Tabelle 10.5-2: Umrechnung der an Prismen und Zylindern ermittelten Festigkeitswerte

Charge	Druckfestigkeit der Referenzprismen				Zylinderdruckfestigkeit				$f_{c,pr,150/75/600}$ / $f_{c,cyl,100/200}$
		m	s	v		m	s	v	
C4	$f_{c,pr,150/75/600}$	-209,9 MPa	3,24 MPa	1,54 %	$f_{c,cyl,100/200}$	-214,7 MPa	6,58 MPa	3,06 %	0,978
C5	$f_{c,pr,150/75/600}$	-203,0 MPa	5,03 MPa	2,48 %	$f_{c,cyl,100/200}$	-229,9 MPa	4,26 MPa	1,85 %	0,883
		-206,4 MPa				-222,3 MPa			0,928

10.5.3.3 Versuchskörper mit sehr glatter Fuge

Detaillierte Angaben zu den Querschnittsabmessungen der einzelnen Versuchskörper mit sehr glatter Fuge und die gemessenen maximalen Prüfkräfte F_{max} sowie die Bruchbilder der Versuchskörper finden sich im Anhang C.3.2.

Die gemessene maximale Prüfkraft F_{max} wurde nach Gl. (9-1) in die in Richtung der Prüfkraft wirkende Spannung $f_{c,eff}$ umgerechnet. Die dazu korrespondierenden Schub- und Normalspannungen τ_j und σ_j in der Fuge wurden nach Gl. (9-2) und Gl. (9-3) berechnet. Die Ergebnisse der Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge sind in Tabelle 10.5-3 zusammengefasst und in Bild 10.5-7 in einem Schub-Druck-Diagramm dargestellt. Des Weiteren ist im Schub-Druck-Diagramm der Mohr'sche Spannungskreis basierend auf dem Mittelwert der einaxialen Festigkeit der Versuchskörper mit einem Fugenneigungswindel α von 0° dargestellt. Dem Verlauf dieses Mohr'schen Spannungskreises und der Bruchbilder nach zu urteilen, erlitten auch die Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 25° einen „Druckbruch", wohingegen die Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 35° bereits bei einer niedrigen maximalen Prüfkraft F_{max} einen „Gleitbruch" erlitten.

Tabelle 10.5-3: Ergebnisse der Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge

Kennzeichnung	$f_{c,eff}$	α	τ_j	m	s	v	σ_j	m	s	v
	[MPa]	[°]	[MPa]				[MPa]			
FS-1-SG_0-DFM2 (C4 und C5)	-159,3	0	0,0				-159,3			
FS-2-SG_0-DFM2 (C4 und C5)	-191,8	0	0,0				-191,8			
FS-3-SG_0-DFM2 (C4 und C5)	-193,2	0	0,0	0			-193,2	-181,4	19,18	10,57 %
FS-4-SG_25-DFM2 (C4 und C5)	-175,7	25	67,3				-144,4			
FS-5-SG_25-DFM2 (C4 und C5)	-170,7	25	65,4				-140,2			
FS-6-SG_25-DFM2 (C4 und C5)	-193,4	25	74,1	68,9	4,57	6,62 %	-158,9	-147,8	9,79	6,62 %
FS-7-SG_35-DFM2 (C4 und C5)	-11,1	35	5,2				-7,4			
FS-8-SG_35-DFM2 (C4 und C5)	-11,7	35	5,5				-7,8			
FS-9-SG_35-DFM2 (C4 und C5)	-7,3	35	3,4	4,7	1,11	23,43 %	-4,9	-6,7	1,58	23,43 %

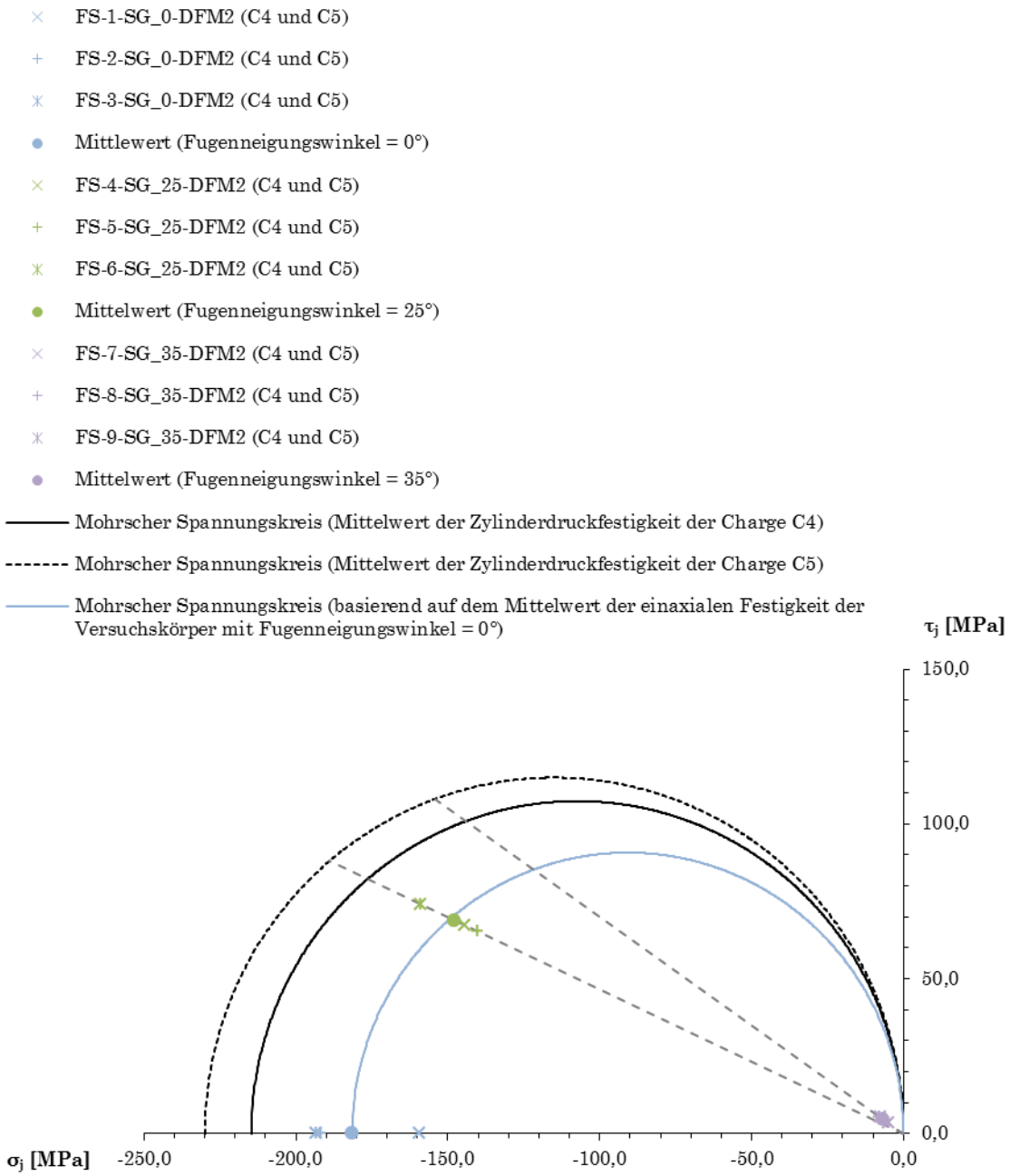


Bild 10.5-7: Schub-Druck-Diagramm für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge

10.5.3.4 Versuchskörper mit gestrahlter Fuge

Detaillierte Angaben zu den Querschnittsabmessungen der einzelnen Versuchskörper mit gestrahlter Fuge und die gemessenen maximalen Prüfkräfte F_{max} sowie die Bruchbilder der Versuchskörper finden sich im Anhang C.3.3.

Die gemessene maximale Prüfkraft F_{max} wurde nach Gl. (9-1) in die in Richtung der Prüfkraft wirkende Spannung $f_{c,eff}$ umgerechnet. Die dazu korrespondierenden Schub- und Normalspannungen τ_j und σ_j in der Fuge wurden nach Gl. (9-2) und Gl. (9-3) berechnet. Die Ergebnisse der Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit gestrahlter Fuge sind in Tabelle 10.5-4 zusammengefasst und in Bild 10.5-8 in einem Schub-Druck-Diagramm dargestellt. Des Weiteren ist im Schub-Druck-Diagramm der Mohr'sche Spannungskreis basierend auf dem Mittelwert der einaxialen Festigkeit der Versuchskörper mit einem Fugenneigungswindel α von 0° dargestellt. Dem Verlauf dieses Mohr'schen Spannungskreises und der Bruchbilder nach zu urteilen, erlitten auch die Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 25° einen „Druckbruch", wohingegen die Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 35° bereits bei einer niedrigen maximalen Prüfkraft F_{max} einen „Gleitbruch" erlitten. Der Probeköper FS-8-G_35-DFM2 (C6 und C7) war erst gar nicht prüfbar, da es bereits beim Aufbringen der Vorlast zum Abgleiten der oberen Versuchskörperhälfte kam.

Tabelle 10.5-4: Ergebnisse der Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit gestrahlter Fuge

Kennzeichnung	$f_{c,eff}$ [MPa]	α [°]	τ_j [MPa]	m	s	v	σ_j [MPa]	m	s	v
FS-1-G_0-DFM2 (C6 und C7)	-138,5	0	0,0				-138,5			
FS-2-G_0-DFM2 (C6 und C7)	-186,3	0	0,0				-186,3			
FS-3-G_0-DFM2 (C6 und C7)	-169,8	0	0,0	0			-169,8	-164,9	24,30	14,74 %
FS-4-G_25-DFM2 (C6 und C7)	-196,1	25	75,1				-161,1			
FS-5-G_25-DFM2 (C6 und C7)	-169,0	25	64,7				-138,8			
FS-6-G_25-DFM2 (C6 und C7)	-189,6	25	72,6	70,8	5,42	7,65 %	-155,8	-151,9	11,62	7,65 %
FS-7-G_35-DFM2 (C6 und C7)	-2,7	35	1,3				-1,8			
FS-8-G_35-DFM2 (C6 und C7) [1)]		35								
FS-9-G_35-DFM2 (C6 und C7)	-2,7	35	1,3	1,3	0,01	0,73 %	-1,8	-1,8	0,01	0,73 %

[1)] Der Probeköper war nicht prüfbar, da es bereits beim Aufbringen der Vorlast zum Abgleiten der oberen Versuchskörperhälfte kam.

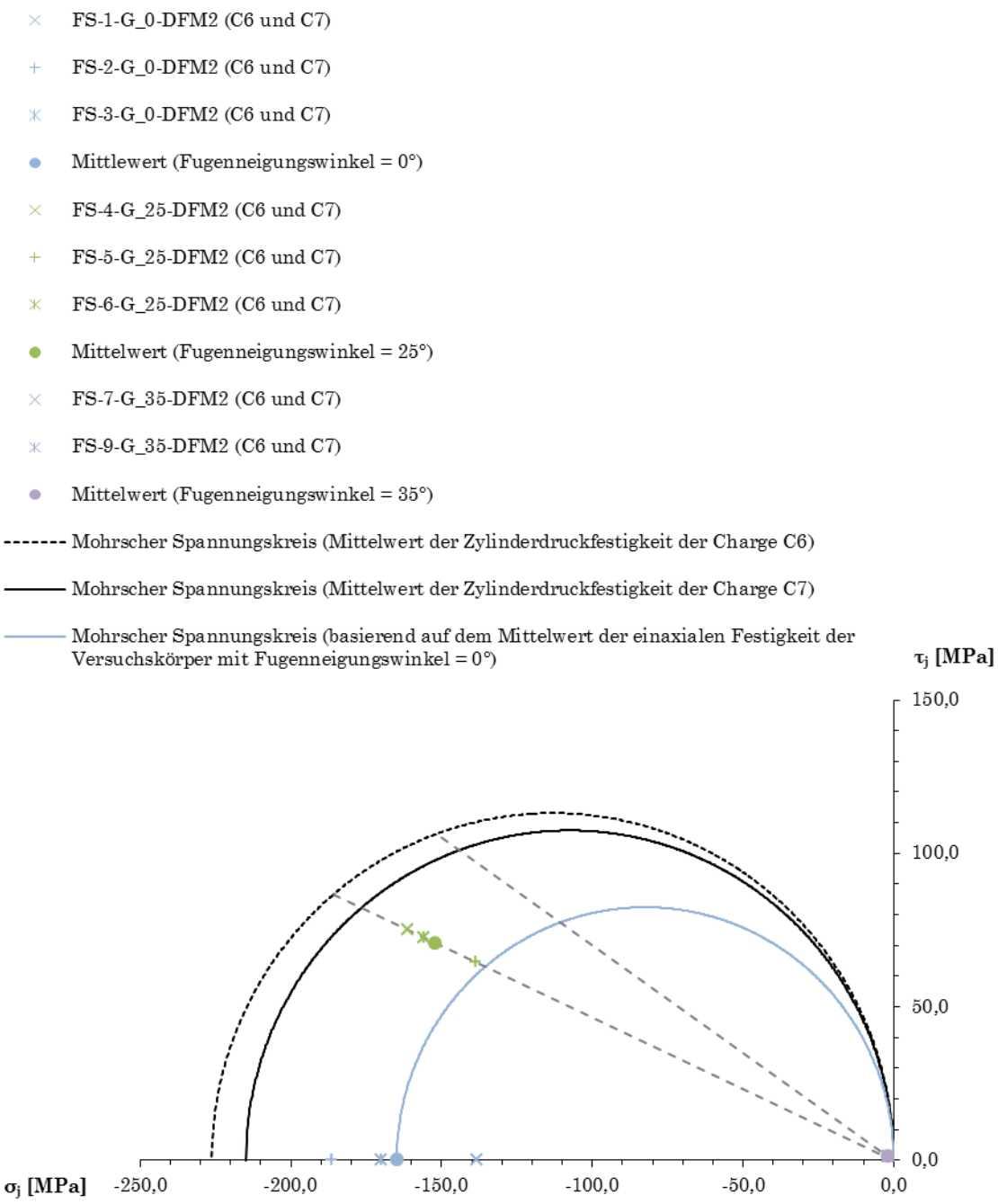


Bild 10.5-8: Schub-Druck-Diagramm für Versuchskörper mit gestrahlter Fuge

Im Vergleich zu den Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge besaßen die Versuchskörper mit gestrahlter Fuge bei einem Fugenneigungswinkel α von 35° eine niedrigere Tragfähigkeit. Das Ergebnis zeigt, dass sich das Strahlen von Oberflächen aus UHFFB nachteilig auf die Tragfähigkeit der Fuge auswirkt. Diese Beobachtung wurde bereits von Henze (2009) gemacht und wie folgt begründet:

- infolge der abrasiven Wirkung des Strahlens werden Oberflächenschichten abgetragen und es entstehen „Kuppen";
- das Aufbringen einer normal zur Fuge wirkenden Kraft verursacht hohe Spannungskonzentrationen an den punktuellen Kontaktstellen der „Kuppen";
- eine parallel zur Fuge wirkende Kraft und die damit einhergehende Verschiebung parallel zur Fuge führt zum Abscheren der „Kuppen" und zum Zermahlen des abgescherten Materials;
- der Abrieb in der Fuge reduziert die Reibung zwischen den Kontaktflächen.

10.5.3.5 Versuchskörper mit rauer Fuge

Detaillierte Angaben zu den Querschnittsabmessungen der einzelnen Versuchskörper mit rauer Fuge und die gemessenen maximalen Prüfkräfte F_{max} sowie die Bruchbilder der Versuchskörper finden sich im Anhang C.3.4.

Die gemessene maximale Prüfkraft F_{max} wurde nach Gl. (9-1) in die in Richtung der Prüfkraft wirkende Spannung $f_{c,eff}$ umgerechnet. Die dazu korrespondierenden Schub- und Normalspannungen τ_j und σ_j in der Fuge wurden nach Gl. (9-2) und Gl. (9-3) berechnet. Die Ergebnisse der Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit rauer Fuge sind in Tabelle 10.5-5 zusammengefasst und in Bild 10.5-9 in einem Schub-Druck-Diagramm dargestellt. Des Weiteren ist im Schub-Druck-Diagramm der Mohr'sche Spannungskreis basierend auf dem Mittelwert der einaxialen Festigkeit der Versuchskörper mit einem Fugenneigungswindel α von 0° dargestellt. Dem Verlauf dieses Mohr'schen Spannungskreises und der Bruchbilder nach zu urteilen, erlitten auch die Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 25° und 35° einen „Druckbruch", wohingegen die Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 45° und 55° einen „Gleitbruch" erlitten.

Tabelle 10.5-5: Ergebnisse der Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit rauer Fuge

Kennzeichnung	$f_{c,eff}$	α	τ_j	m	s	v	σ_j	m	s	v
	[MPa]	[°]	[MPa]				[MPa]			
FS-1-R_0-DFM2 (C8 und C9)	-199,4	0	0,0				-199,4			
FS-2-R_0-DFM2 (C8 und C9)	-185,6	0	0,0				-185,6			
FS-3-R_0-DFM2 (C8 und C9)	-188,0	0	0,0	0			-188,0	-191,0	7,36	3,85 %
FS-4-R_25-DFM2 (C8 und C9)	-170,9	25	65,5				-140,4			
FS-5-R_25-DFM2 (C8 und C9)	-196,2	25	75,2				-161,2			
FS-6-R_25-DFM2 (C8 und C9)	-207,1	25	79,3	73,3	7,11	9,69 %	-170,1	-157,2	15,24	9,69 %
FS-7-R_35-DFM2 (C8 und C9)	-178,8	35	84,0				-120,0			
FS-8-R_35-DFM2 (C8 und C9)	-190,3	35	89,4				-127,7			
FS-9-R_35-DFM2 (C8 und C9)	-194,3	35	91,3	88,2	3,76	4,26 %	-130,4	-126,0	5,37	4,26 %
FS-10-R_45-DFM2 (C8 und C9)	-29,6	45	14,8				-14,8			
FS-11-R_45-DFM2 (C8 und C9)	-39,0	45	19,5				-19,5			
FS-12-R_45-DFM2 (C8 und C9)	-31,2	45	15,6	16,6	2,51	15,10 %	-15,6	-16,6	2,51	15,10 %
FS-13-R_55-DFM2 (C8 und C9)	-11,9	55	5,6				-3,9			
FS-14-R_55-DFM2 (C8 und C9)	-14,8	55	7,0				-4,9			
FS-15-R_55-DFM2 (C8 und C9)	-8,2	55	3,8	5,5	1,56	28,49 %	-2,7	-3,8	1,09	28,49 %

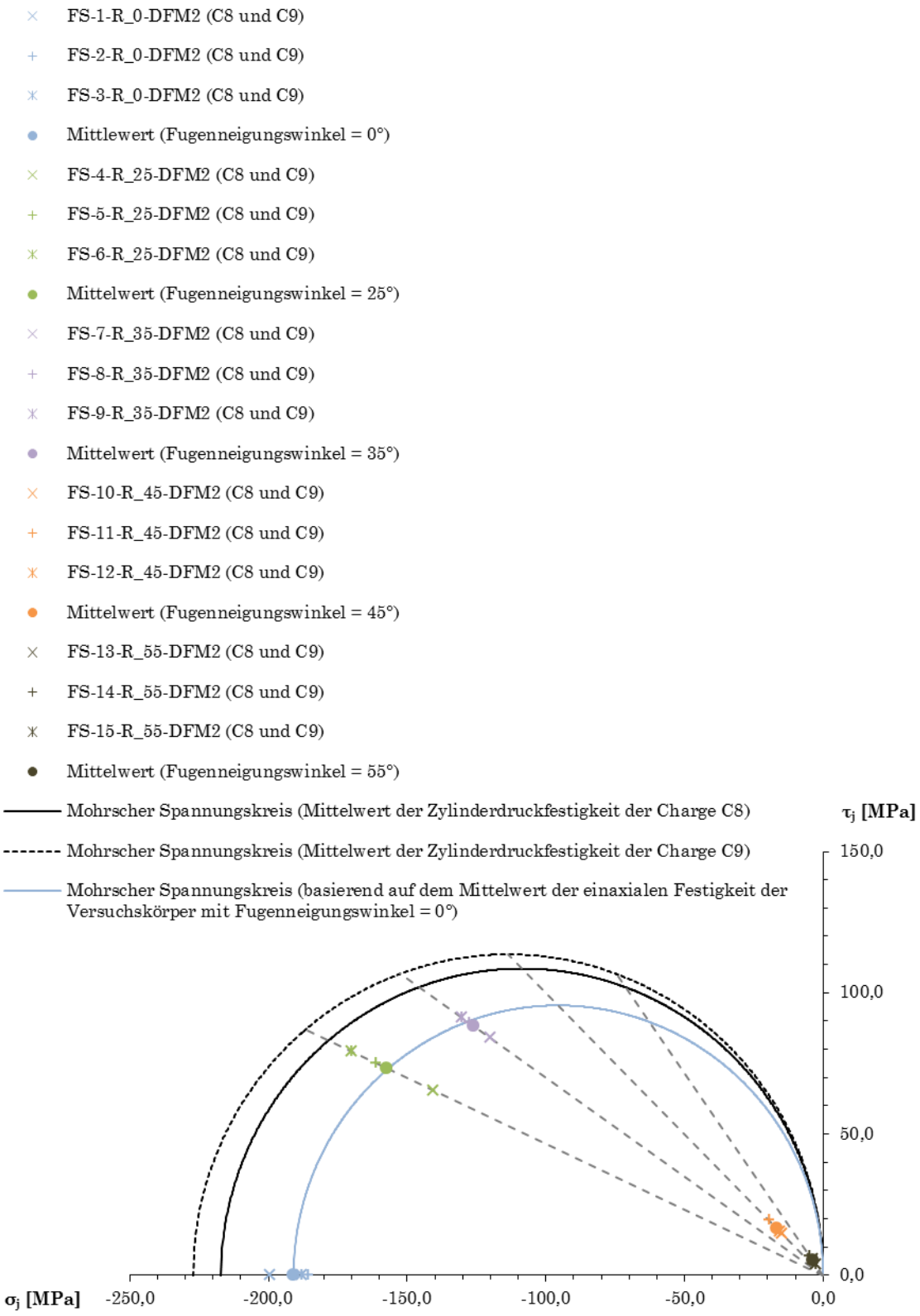


Bild 10.5-9: Schub-Druck-Diagramm für Versuchskörper mit rauer Fuge

10.5.3.6 Versuchskörper mit verzahnter Fuge

Detaillierte Angaben zu den Querschnittsabmessungen der einzelnen Versuchskörper mit verzahnter Fuge und die gemessenen maximalen Prüfkräfte F_{max} sowie die Bruchbilder der Versuchskörper finden sich im Anhang C.3.5.

Die gemessene maximale Prüfkraft F_{max} wurde nach Gl. (9-1) in die in Richtung der Prüfkraft wirkende Spannung $f_{c,eff}$ umgerechnet. Die dazu korrespondierenden Schub- und Normalspannungen τ_j und σ_j in der Fuge wurden nach Gl. (9-2) und Gl. (9-3) berechnet. Die Ergebnisse der Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge sind in Tabelle 10.5-6 zusammengefasst und in Bild 10.5-10 in einem Schub-Druck-Diagramm dargestellt. Des Weiteren ist im Schub-Druck-Diagramm der Mohr'sche Spannungskreis basierend auf dem Mittelwert der einaxialen Festigkeit der Versuchskörper mit einem Fugenneigungswindel α von 0° dargestellt. Dem Verlauf dieses Mohr'schen Spannungskreises und der Bruchbilder nach zu urteilen, erlitten auch die Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 25° erlitten einen „Druckbruch", wohingegen die Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 55° einen „Gleitbruch" erlitten. Bei den Versuchskörpern mit einem Fugenneigungswinkel α von 35° und 45° kam es den Bruchbildern nach zu einem durch die Verzahnung der Fuge hervorgerufenes Versagen von verzahnungsnahen Bereichen des Versuchskörpers, was auf einen „Mischbruch" hinweisen könnte oder ein vorzeitiges Versagen durch Spaltbruch.

Im Vergleich zu den Versuchskörpern mit rauer Fuge besaßen die Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einem Fugenneigungswinkel α von 35° eine leicht niedrigere Tragfähigkeit, bei einem Fugenneigungswinkel α von 45° und 55° jedoch eine weitaus höhere Tragfähigkeit.

Tabelle 10.5-6: Ergebnisse der Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge

Kennzeichnung	$f_{c,eff}$	α	τ_j	m	s	v	σ_j	m	s	v
	[MPa]	[°]	[MPa]				[MPa]			
FS-1-V_0-DFM2 (C10 und C11)	-189,4	0	0,0				-189,4			
FS-2-V_0-DFM2 (C10 und C11)	-190,3	0	0,0				-190,3			
FS-3-V_0-DFM2 (C10 und C11)	-203,6	0	0,0	0			-203,6	-194,4	7,97	4,10 %
FS-4-V_25-DFM2 (C10 und C11)	-192,8	25	73,9				-158,4			
FS-5-V_25-DFM2 (C10 und C11)	-181,3	25	69,5				-148,9			
FS-6-V_25-DFM2 (C10 und C11)	-197,7	25	75,7	73,0	3,22	4,42 %	-162,4	-156,6	6,92	4,42 %
FS-7-V_35-DFM2 (C10 und C11)	-163,0	35	76,6				-109,3			
FS-8-V_35-DFM2 (C10 und C11)	-156,6	35	73,6				-105,1			
FS-9-V_35-DFM2 (C10 und C11)	-177,4	35	83,4	77,8	5,03	6,46 %	-119,1	-111,2	7,18	6,46 %
FS-10-V_45-DFM2 (C10 und C11)	-136,9	45	68,4				-68,4			
FS-11-V_45-DFM2 (C10 und C11)	-149,1	45	74,6				-74,6			
FS-12-V_45-DFM2 (C10 und C11)	-145,5	45	72,7	71,9	3,14	4,37 %	-72,7	-71,9	3,14	4,37 %
FS-13-V_55-DFM2 (C10 und C11)	-119,5	55	56,2				-39,3			
FS-14-V_55-DFM2 (C10 und C11)	-121,1	55	56,9				-39,8			
FS-15-V_55-DFM2 (C10 und C11)	-122,1	55	57,4	56,8	0,62	1,09 %	-40,2	-39,8	0,43	1,09 %

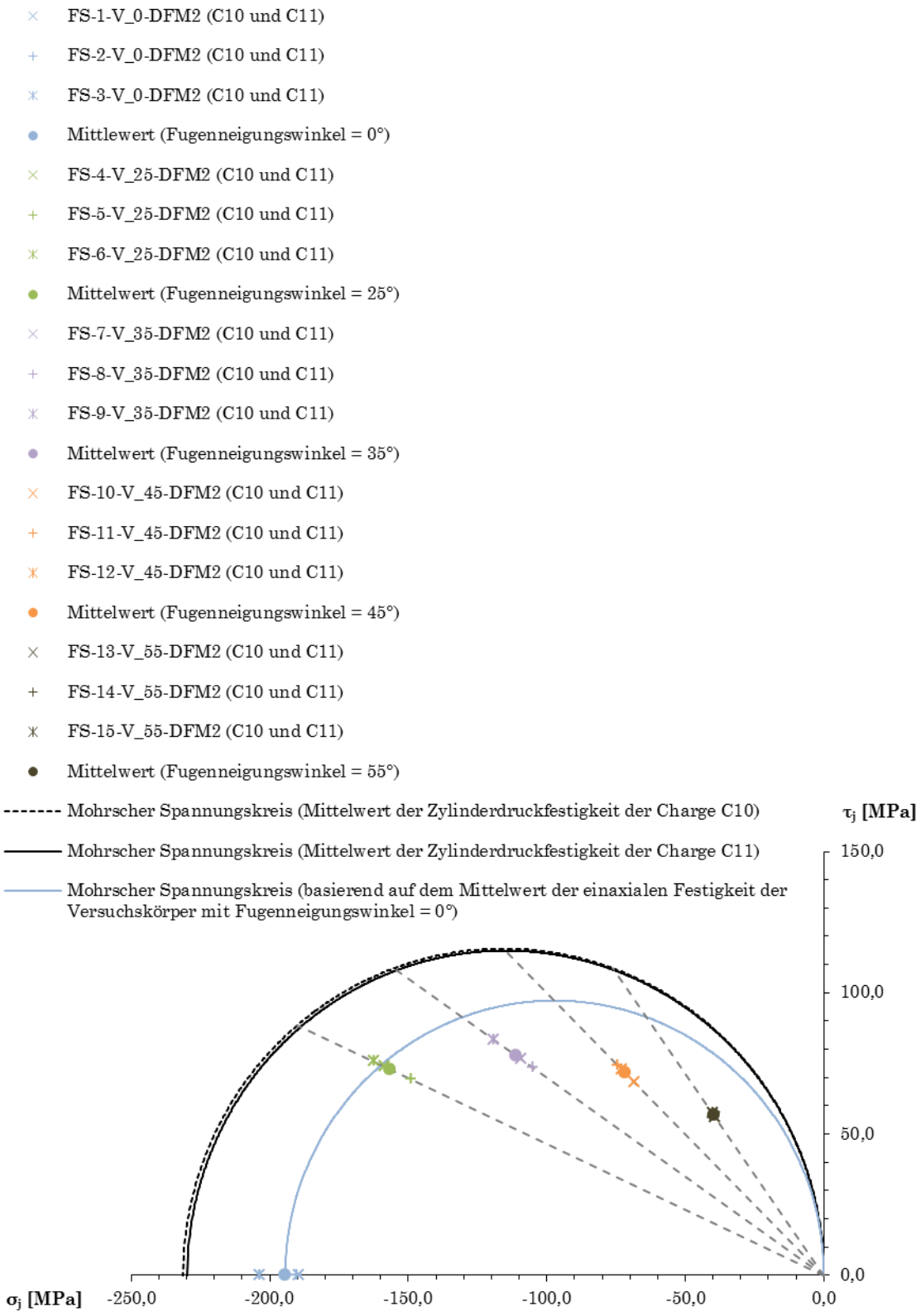


Bild 10.5-10: Schub-Druck-Diagramm für Versuchskörper mit verzahnter Fuge

10.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Durchführung der Schub-Druck-Versuche hatte zum Ziel, die Grenzbeziehung zwischen der Schub- und Normalspannung τ_j und σ_j in der Fuge zu ermitteln. Die Ergebnisse wurden wie in Abschnitt 9.2.2 erläutert zweckmäßig in einem Schub-Druck-Diagramm dargestellt.

Die Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit sehr glatter und gestrahlter Fuge ergaben, dass bei einem Fugenneigungswinkel α von 0° und 25° ein „Druckbruch“ auftritt, wohingegen bei einem Fugenneigungswinkel α von 35° bereits bei einer niedrigen maximalen Prüfkraft F_{max} einen „Gleitbruch“ auftritt. Dabei besaßen die Versuchskörper mit gestrahlter Fuge im Vergleich zu den Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge bei einem Fugenneigungswinkel α von 35° eine niedrigere Tragfähigkeit. Das Strahlen von Oberflächen aus UHFFB wirkt sich demnach nachteilig auf die Tragfähigkeit der Fuge aus.

Die Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit rauer Fuge führten bei einem Fugenneigungswinkel α von 0°, 25° und 35° zu einen „Druckbruch“, wohingegen bei einem Fugenneigungswinkel α von 45° und 55° ein „Gleitbruch“ auftrat. Die Versuchskörper mit verzahnter Fuge und einem Fugenneigungswinkel α von 0° oder 25° erlitten bei der Durchführung der Schub-Druck-Versuche einen „Druckbruch“, wohingegen bei einem Fugenneigungswinkel α von 55° ein „Gleitbruch“ auftrat. Bei einem Fugenneigungswinkel α von 35° und 45° kam es den Bruchbildern nach zu einem durch die Verzahnung der Fuge hervorgerufenes Versagen von verzahnungsnahen Bereichen des Versuchskörpers, was auf einen „Mischbruch“ hinweisen könnte oder ein vorzeitiges Versagen durch Spaltbruch. Im Vergleich zu den Versuchskörpern mit rauer Fuge besaßen die Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einem Fugenneigungswinkel α von 35° eine leicht niedrigere Tragfähigkeit, bei einem Fugenneigungswinkel α von 45° und 55° jedoch eine weitaus höhere Tragfähigkeit.

Daneben wurden auch Druckversuche an Zylindern und Biegezugversuche an Prismen durchgeführt, die zur Bestätigung der in Kapitel 5 ermittelten Materialkennwerte sowie zur Kontrolle der Chargen untereinander dienten. Es wurden die folgenden Materialkennwerte ermittelt:

- Druckfestigkeit an 30 Zylindern mit einem Durchmesser d von 100 mm und einer Höhe h von 200 mm:
  f_c = -223,6 MPa mit v = 4,39 %;
- E-Modul unter Druckbeanspruchung an 6 Zylindern mit einem Durchmesser d von 100 mm und einer Höhe h von 200 mm:
  E_c = 59391 MPa mit v = 0,65 %;
- Biegezugfestigkeit an 24 Prismen mit einer Querschnittsbreite b von 75 mm und einer Querschnittshöhe h von 75 mm:
  f_{ctfl} = 29,14 MPa mit v = 13,52 %.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Druckversuche an den Versuchskörpern ohne Fuge (Referenzprismen) mit den Mittelwerten der Zylinderdruckfestigkeit der entsprechenden Charge zeigte, dass die Druckfestigkeit der Referenzprismen stets niedriger ist als der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit der entsprechenden Charge. Dies deutet auf einen Einfluss der Versuchskörperform auf die ermittelten Festigkeitswerte hin, was es bei der Umrechnung der Festigkeitswerte zu berücksichtigen gilt. Basierend auf den ermittelten Festigkeitswerten an den Referenzprismen und Zylindern ergab sich ein Umrechnungsbeiwert von $f_{c,pr,150/75/600} = 0{,}93 \cdot f_{c,cyl,100/200}$.

11 Versuche zur Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung

11.1 Versuchsprogramm und Bezeichnung der Versuchs- und Probekörper

Aufbauend auf den experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung wurden weitere experimentelle Untersuchungen an kleinteiligen Versuchskörpern aus UHFFB zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung durchgeführt. Die Versuchskörper wurden in insgesamt acht Chargen hergestellt (Chargen C12 bis C19).

Die Versuche wurden als Abscherversuche nach dem in Bild 9.2-6 dargestellten Prinzip durchgeführt. Im Gegensatz zur Geometrie des in Bild 9.2-4a dargestellten Versuchskörpers wurde der mittlere Versuchskörperteil länger ausgebildet, so dass dieser durch die äußeren Versuchskörperteile zentriert wird.

Ebenso wie die Versuchskörper für die Durchführung der Schub-Druck-Versuche wurden auch die Versuchskörper für die Abscherversuche im Match-Cast-Verfahren hergestellt, um eine möglichst hohe Passgenauigkeit der Fugen zu gewährleisten. Dabei dienten die jeweils zuerst betonierten äußeren Versuchskörperteile als Abschalung für das zu betonierende mittlere Versuchskörperteil. Die Versuchskörper unterschieden sich in der Fugenausbildung. Es wurden Fugen mit folgender Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche untersucht:

- sehr glatt;
- verzahnt.

Zur Bestimmung der Absolutwerte der Ober- und Unterlast für die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung wurden zunächst Abscherversuche unter statischer Belastung durchgeführt. Dabei betrug die Fugennormalspannung sowohl bei den Versuchskörpern mit sehr glatter als auch bei den Versuchskörpern mit verzahnter Fuge 6 MPa, 40 MPa oder 90 MPa. Außerdem wurden Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa geprüft. Anschließend wurden die Abscherversuche unter zyklischer Belastung durchgeführt.

Für jede Charge wurden auch Probekörper hergestellt, die zur Bestätigung der in Abschnitt 5.3.3 und 5.4.3 ermittelten Materialkennwerte sowie zur Kontrolle der Chargen untereinander dienten. Dabei enthielt jede Charge drei Zylinder für die Durchführung von Druckversuchen sowie drei Prismen zur Durchführung von Biegezugversuchen.

Eine Übersicht über das Versuchsprogramm zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung zusammen mit der Anzahl der Versuchs- und Probekörper ist in Tabelle 11.1-1 dargestellt.

Tabelle 11.1-1: Versuchsprogramm zur Untersuchung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung

a) Druck- und Biegezugversuche

Prüfverfahren		Charge							
		C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
Druckversuche	Zylinder	3	3	3	3	3	3	3	3
Biegezugversuche	Prismen	3	3	3	3	3	3	3	3

b) Abscherversuche unter statischer Belastung

Prüfverfahren			Charge							
			C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
Abscherversuche	Versuchskörper mit sehr glatter Fuge	6 MPa		5						
		40 MPa				5				
		90 MPa						5		
	Versuchskörper mit verzahnter Fuge	6 MPa		5						
		40 MPa				5				
		90 MPa						5		
		0 MPa							7	

Tabelle 11.1-1 (fortgesetzt): Versuchsprogramm zur Untersuchung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung

c) Abscherversuche unter zyklischer Belastung

Prüfverfahren				Charge							
				C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
Abscherversuche	Versuchs-körper mit sehr glatter Fuge	6 MPa	0,90:0,05	2							
			0,85:0,05	1							
			0,80:0,05	2							
		40 MPa	0,90:0,05			1					
			0,85:0,05			1					
			0,80:0,05			1					
		90 MPa	0,90:0,05					2			
			0,85:0,05					1			
			0,80:0,05					1			
	Versuchs-körper mit verzahnter Fuge	6 MPa	0,90:0,05	1							
			0,85:0,05	1							
			0,80:0,05	1							
		40 MPa	0,90:0,05			1					
			0,85:0,05			2					
			0,80:0,05			1					
		90 MPa	0,90:0,05					1			
			0,85:0,05					2			
			0,80:0,05					1			
		0 MPa	0,80:0,05							3	
			0,75:0,05							3	
			0,70:0,05							3	
			0,65:0,05							6	
			0,60:0,05							3	

Die Zylinder und Prismen für die Druck- und Biegezugversuche wurden nach der in Abschnitt 5.1 erläuterten Systematik gekennzeichnet.

Die Kennzeichnung der Versuchskörper bzw. Versuchskörperteile für die Abscherversuche erfolgte nach folgender Systematik:

Prüfverfahren – Nummer des Versuchskörpers – Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche_Serie

Prüfverfahren:	FZ	Versuchskörper für Abscherversuche unter statischer und zyklischer Belastung
Nummer des Versuchskörpers:	<Nummer>	fortlaufend je Charge
Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche:	SG	sehr glatt
	V	verzahnt
Serie:	S1	Serie S1 mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa
	S2	Serie S2 mit einer Fugennormalspannung von 40 MPa
	S3	Serie S3 mit einer Fugennormalspannung von 90 MPa
	S4	Serie S4 mit einer Fugennormalspannung von 0 MPa

z.B. Kennzeichnung eines Versuchskörpers FZ – 1 – SG_S1

11.2 Versuchs- und Probekörper

11.2.1 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften

Alle Versuchs- und Probekörper wurden aus UHFFB mit der Bezeichnung Ductal® der Firma Lafarge hergestellt. Die Zusammensetzung von Ductal® kann der Tabelle 5.2-1 entnommen werden, der Mischablauf kann der Tabelle 5.2-2.

Der Tabelle 11.2-1 können für die Chargen C12 bis C19 das Herstelldatum, das Chargenvolumen sowie die Frischbetoneigenschaften entnommen werden.

Tabelle 11.2-1: Frischbetoneigenschaften der Chargen C12 bis C19

Charge	Herstelldatum	Volumen	Frischbetoneigenschaften			
			Temperatur	Ausbreitmaß	Rohdichte	Luftporen-gehalt
		[l]	[°C]	[mm]	[kg/dm³]	[%]
C12	08.10.2013	74,1	27,8	265	2,47	2,5
C13	09.10.2013	80,9	28,1	295	2,47	2,8
C14	14.10.2013	74,1	28,4	300	2,47	3,0
C15	15.10.2013	80,9	27,2	295	2,50	2,2
C16	21.10.2013	69,5	27,5	310	2,53	2,5
C17	22.10.2013	80,9	29,7	300	2,51	2,8
C18	04.11.2013	69,5	25,5	295	2,49	2,9
C19	05.11.2013	80,9	25,0	305	2,49	3,0
Mittelwert		m	27,40	295,63	2,49	2,71
Standardabweichung		s	1,53	13,48	0,02	0,29
Variationskoeffizient		v	5,58 %	4,56 %	0,86 %	10,51 %

11.2.2 Geometrie der Versuchs- und Probekörper

11.2.2.1 Druckversuche

Die Zylinder für die Druckversuche haben einen Durchmesser d von 100mm und eine Höhe h von 200 mm.

11.2.2.2 Biegezugversuche

Die Prismen für die Durchführung der Biegezugversuche haben einen Querschnitt mit einer Breite b von 75 mm und einer Höhe h von 75 mm und eine Länge von 550 mm.

11.2.2.3 Abscherversuche

Die Versuchskörper für die Abscherversuche bestanden aus drei Teilen, zwei äußeren Versuchskörperteilen und einem mittleren Versuchskörperteil. Ein Versuchskörper besaß somit zwei Fugen mit gleicher Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche. Die Geometrie und die Abmessungen der Versuchskörper ist in Bild 11.2-1 für die Versuchskörper mit sehr glatter Fuge und in Bild 11.2-2 für die Versuchskörper mit verzahnter Fuge dargestellt. Sowohl bei den Versuchskörpern mit sehr glatter als auch mit verzahnter Fuge hatten die Kontaktflächen eine Höhe h von 95 mm und eine Breite b von 50 mm. Die Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen bzw. die Fugengeometrie wurde in Abschnitt 9.2.4 beschrieben.

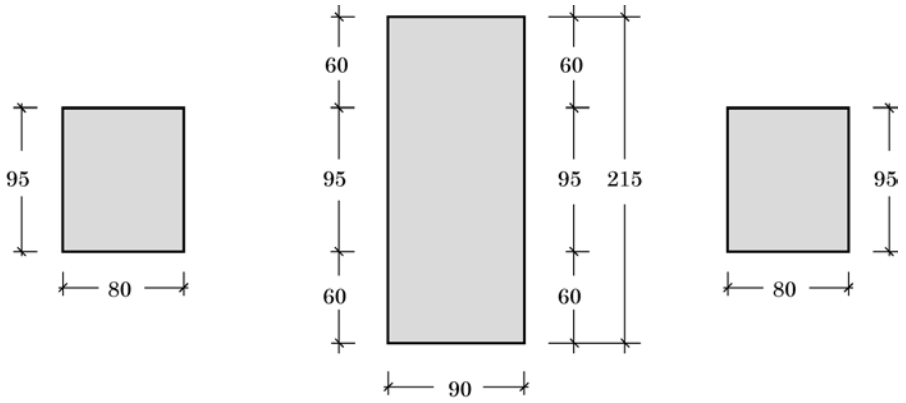


Bild 11.2-1: Geometrie der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge für die Abscherversuche (Abmessungen in mm)

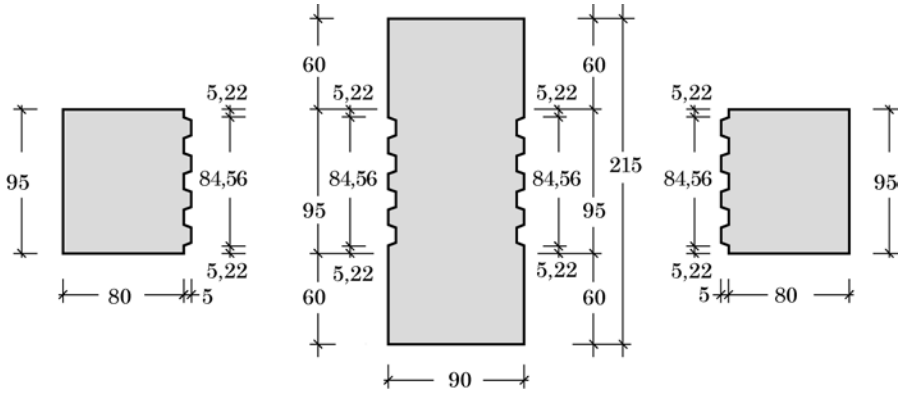


Bild 11.2-2: Geometrie der Versuchskörper mit verzahnter Fuge für die Abscherversuche (Abmessungen in mm)

11.2.3 Herstellen und Lagerung der Versuchs- Probekörper

Die Schalungen zur Herstellung der Zylinder für die Druckversuche und zur Herstellung der Prismen für die Biegezugversuche sind in Bild 5.2-2 abgebildet. Vor dem Einbringen des Betons wurden die Innenflächen der Schalungen mit Schalöl behandelt.

Die Schalungen zur Herstellung der Versuchskörper für die Abscherversuche sowie der Betonageablauf sind in Bild 11.2-3 und Bild 11.2-4 dargestellt. Um eine möglichst hohe Passgenauigkeit der Fugen zu gewährleisten, wurden die Probeköper im Match-Cast-Verfahren hergestellt. Dabei wurden die äußeren Versuchskörperteile zuerst betoniert. Als „Platzhalter“ für das mittlere Versuchskörperteil diente ein aus PE 500 gefräster Block mit gleicher Geometrie wie das zu betonierende mittlere Versuchskörperteil. Am nächsten Tag wurden die „Platzhalter“ aus der Schalung entfernt und die mittleren Versuchskörperteile betoniert.

Vor dem Einbringen des Betons wurden die Innenflächen der Schalungen stets mit Schalöl behandelt. Einzige Ausnahme bildeten die Kontaktflächen der äußeren Versuchskörperteile. Diese wurden vor der Betonage der mittleren Versuchskörperteile mit einem Trennmittel mit der Bezeichnung „Curing Compound TM P-OT“ der Firma Tillmann behandelt, um beim Ausschalen die einzelnen Versuchskörperteile wieder leicht voneinander trennen zu können. Aufgrund der selbstverdichtenden Eigenschaften von Ductal® war ein Verdichten mittels rütteln nicht erforderlich. Nach dem Befüllen der Schalungen wurden die Betonoberflächen umgehend mit Wasser eingesprüht, um eine „Elefantenhautbildung“ auf der Oberfläche so weit wie möglich zu verhindern. Zudem wurden die Versuchskörper mit einer Folie abgedeckt.

Nach dem Ausschalen wurden die Versuchs- und Probekörper für die Wärmebehandlung in ein Wasserbecken gelegt. Die Wassertemperatur wurde von etwa 15°C auf ungefähr 90°C langsam aufgeheizt und schließlich für mindestens 48 Stunden konstant gehalten. Nachdem Ausschalten der Heizung und dem Absinken der Wassertemperatur auf unter 35°C konnten die Versuchs- und Probekörper aus dem Wasserbecken entnommen werden.

Nach der Entnahme aus dem Wasserbecken wurden die Versuchskörper für die Durchführung der Abscherversuche mit einem Hochdruckreiniger gereinigt, um insbesondere die Kontaktflächen von Rückständen des Trennmittels zu befreien. Bis zur Prüfung wurden die Versuchs- und Probekörper trocken und vor Zugluft geschützt bei 19 bis 21°C auf einem Lattenrost gelagert. In Bild 11.2-5 und Bild 11.2-6 sind exemplarisch die Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen bzw. die Fugengeometrien der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge abgebildet.

Durch die Anwendung des Match-Cast-Verfahrens konnte eine hohe Passgenauigkeit der Fugen erreicht werden. Zur Veranschaulichung dessen wurde exemplarisch ein Versuchskörper mit sehr glatter und ein Versuchskörper mit verzahnter Fuge fotografiert, wobei eine Lichtquelle von hinten zunächst auf die linke und dann auf die rechte Fuge gerichtet war, um einen eventuellen Spalt bzw. eine Passungenauigkeit der Fuge sichtbar zu machen (vgl. Bild 11.2-7 und Bild 11.2-8).

Bild 11.2-3: Befüllen der Schalungen zur Herstellung der äußeren Versuchskörperteile für die Abscherversuche

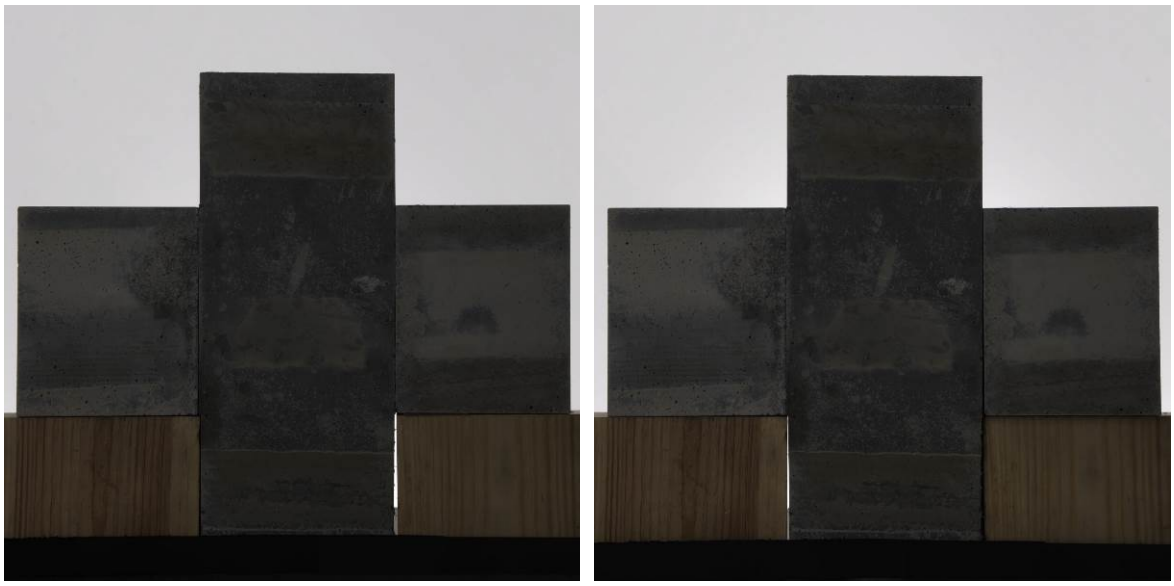
Bild 11.2-4: Befüllen der Schalungen zur Herstellung des mittleren Versuchskörperteils für die Abscherversuche

a) linker Versuchskörperteil (linke Fuge) | b) mittlerer Versuchskörperteil (linke Fuge) | c) mittlerer Versuchskörperteil (rechte Fuge) | d) rechter Versuchskörperteil (rechte Fuge)

Bild 11.2-5: Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen bzw. Fugengeometrie der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge für die Durchführung der Abscherversuche

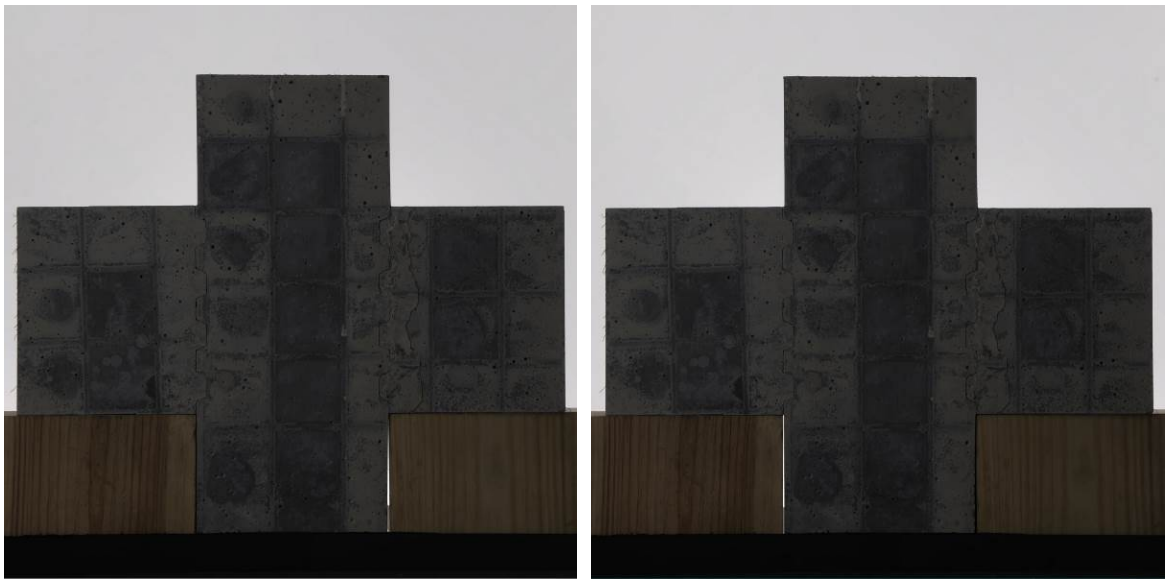
a) linker Versuchskörperteil (linke Fuge) | b) mittlerer Versuchskörperteil (linke Fuge) | c) mittlerer Versuchskörperteil (rechte Fuge) | d) rechter Versuchskörperteil (rechte Fuge)

Bild 11.2-6: Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen bzw. Fugengeometrie der Versuchskörper mit verzahnter Fuge für die Durchführung der Abscherversuche



a) linke Fuge b) rechte Fuge

Bild 11.2-7: Passgenauigkeit der Fugen bei den Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge für die Durchführung der Abscherversuche



a) linke Fuge b) rechte Fuge

Bild 11.2-8: Passgenauigkeit der Fugen bei den Versuchskörpern mit verzahnter Fuge für die Durchführung der Abscherversuche

11.3 Druckversuche

11.3.1 Versuchsstand und –durchführung

Die Druckversuche wurden an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMPA)) mit einer 5000 kN Druckprüfmaschine der Firma Tonindustrie Prüftechnik durchgeführt.

Die kraftgeregelten Druckversuche wurden in Anlehnung an DIN 1048-Teil 5 (1991) durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 0,6 MPa/s und wurde kontinuierlich bis zum Bruch des Probekörpers gesteigert. Es wurde die beim Bruch erreichte maximale Prüfkraft F_{max} aufgezeichnet.

11.3.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper

Die Zylinder zur Ermittlung der Druckfestigkeit wurden zunächst auf eine Länge von etwas mehr als 200 mm durch beidseitiges Sägen gekürzt. Im Anschluss erfolgte ein Abschleifen der Schnittflächen mit einer Nassschleifmaschine.

Vor der Prüfung wurden die tatsächlichen Abmessungen (Durchmesser d, Höhe h) der Zylinder protokolliert (vgl. Anhang D).

Die Instrumentierung der Zylinder war wie in Abschnitt 5.3.2 beschrieben.

11.3.3 Versuchsergebnisse

Detaillierte Angaben zu den Abmessungen der einzelnen Zylinder und die gemessenen maximalen Prüfkräfte F_{max} finden sich im Anhang D.

Die gemessene maximale Prüfkraft F_{max} wurde nach Gl. (5-2) in die äquivalente Druckfestigkeit f_c umgerechnet.

In Tabelle 11.3-1sind für die Chargen C12 bis C19 die ermittelten Druckfestigkeiten f_c aufgeführt. Der Mittelwert der Druckfestigkeit f_{cm} ergab sich zu -170,4 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 10,11 %.

Tabelle 11.3-1: Ergebnisse der kraftgeregelten Druckversuche der Chargen C12 bis C19

Kennzeichnung		f_c [MPa]	m	s	v
KZ-1-DFM2-C12-08_10_2013		-169,0			
KZ-2-DFM2-C12-08_10_2013		-176,8			
KZ-3-DFM2-C12-08_10_2013		-175,8	-173,8	4,26	2,45 %
KZ-1-DFM2-C13-09_10_2013		-168,8			
KZ-2-DFM2-C13-09_10_2013		-161,7			
KZ-3-DFM2-C13-09_10_2013		-186,3	-172,2	12,63	7,33 %
KZ-1-DFM2-C14-14_10_2013		-165,9			
KZ-2-DFM2-C14-14_10_2013		-161,5			
KZ-3-DFM2-C14-14_10_2013		-181,1	-169,5	10,26	6,06 %
KZ-1-DFM2-C15-15_10_2013		-160,8			
KZ-2-DFM2-C15-15_10_2013		-175,1			
KZ-3-DFM2-C15-15_10_2013		-207,6	-181,1	23,97	13,24 %
KZ-1-DFM2-C16-21_10_2013		-169,7			
KZ-2-DFM2-C16-21_10_2013		-164,5			
KZ-3-DFM2-C16-21_10_2013		-158,8	-164,3	5,45	3,31 %
KZ-1-DFM2-C17-22_10_2013		-209,2			
KZ-2-DFM2-C17-22_10_2013		-159,6			
KZ-3-DFM2-C17-22_10_2013		-172,3	-180,3	25,77	14,29 %
KZ-1-DFM2-C18-04_11_2013		-145,9			
KZ-2-DFM2-C18-04_11_2013		-160,9			
KZ-3-DFM2-C18-04_11_2013		-138,4	-148,4	11,46	7,72 %
KZ-1-DFM2-C19-05_11_2013		-156,6			
KZ-2-DFM2-C19-05_11_2013		-161,7			
KZ-3-DFM2-C19-05_11_2013		-201,0	-173,1	24,29	14,03 %
Mittelwert	m	-170,4			
Standardabweichung	s	17,22			
Variationskoeffizient	v	10,11 %			

In Bild 11.3-1 ist die Zylinderdruckfestigkeit f_c in Abhängigkeit vom Alter der Zylinder der Chargen C12 bis C19 zum Zeitpunkt der Prüfung aufgetragen. Die Chargen wurden im Alter von 156 bis 183 Tagen geprüft. Ein Einfluss des Alters der Zylinder auf die Zylinderdruckfestigkeit f_c ist kaum gegeben.

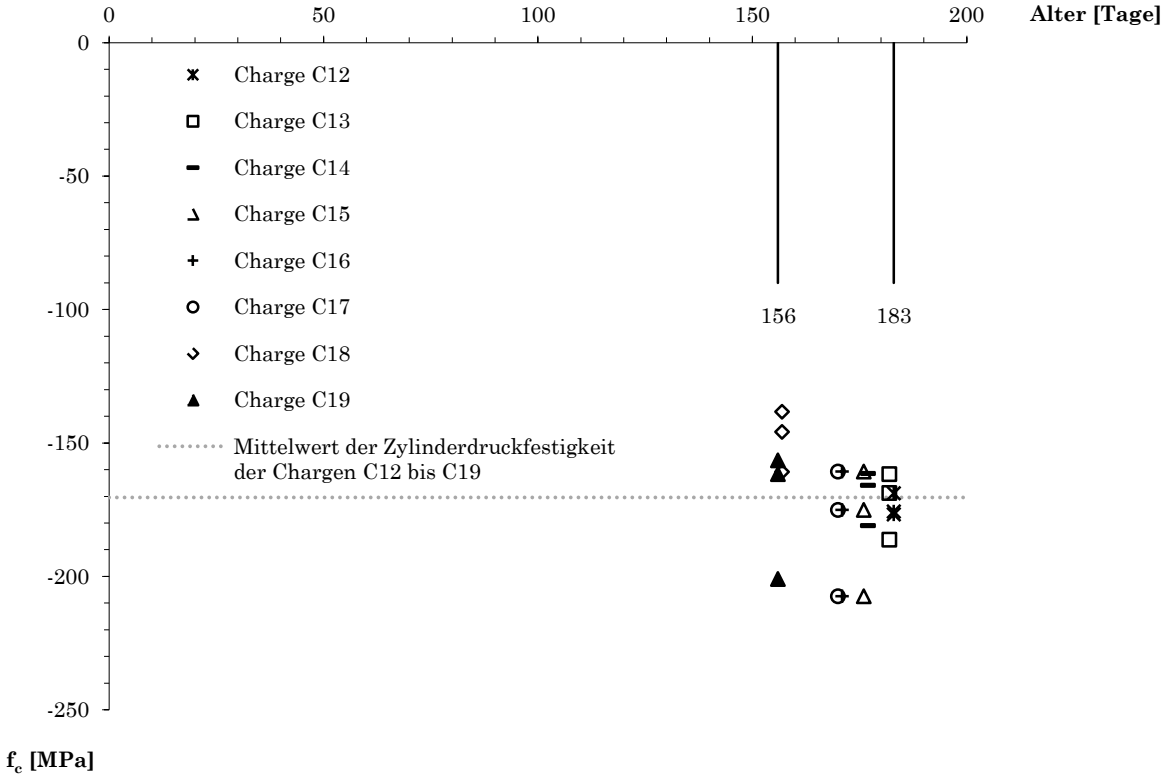


Bild 11.3-1: Zylinderdruckfestigkeit f_c in Abhängigkeit vom Alter der Zylinder der Chargen C12 bis C19 zum Zeitpunkt der Prüfung

11.4 Biegezugversuche

11.4.1 Versuchsstand und –durchführung

Der Versuchsstand für die Biegezugversuche sowie die Durchführung der Versuche ist in Abschnitt 5.4.1 beschrieben.

11.4.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper

Die Vorbereitung der Prismen für die Biegezugversuche ist in Abschnitt 5.4.2.1 beschrieben. Der sich aus den protokollierten Querschnittsabmessungen ergebende Mittelwert für die Querschnittsbreite b und die Querschnittshöhe h ist in Anhang D.2 aufgeführt.

Die Instrumentierung der Prismen für die Biegezugversuche ist ebenfalls in Abschnitt 5.4.2.1 dargestellt.

11.4.3 Versuchsergebnisse

Die Biegezugrandspannung σ_{ctfl} wird nach Gl. (5-6) berechnet. Der Verlauf der Biegezugrandspannung σ_{ctfl} wird über die gemittelte Mittendurchbiegung w_m aufgetragen. In Bild 11.4-1 bis Bild 11.4-8 sind die σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Chargen C12 bis C19 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche dargestellt.

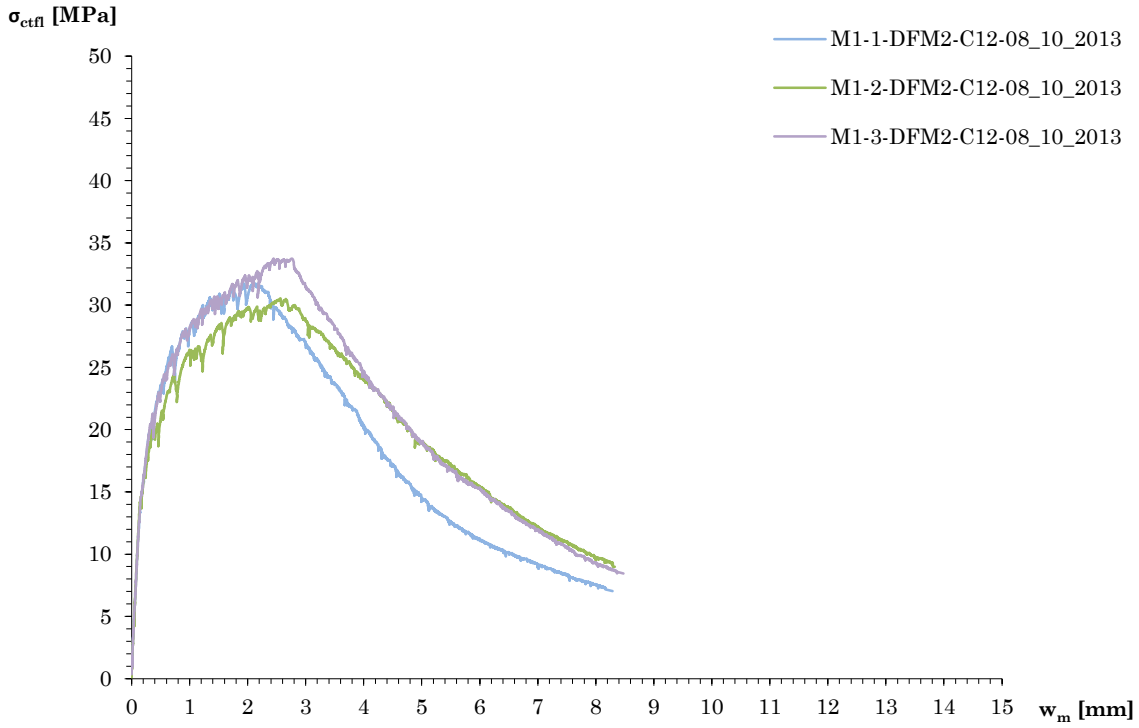


Bild 11.4-1: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C12 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

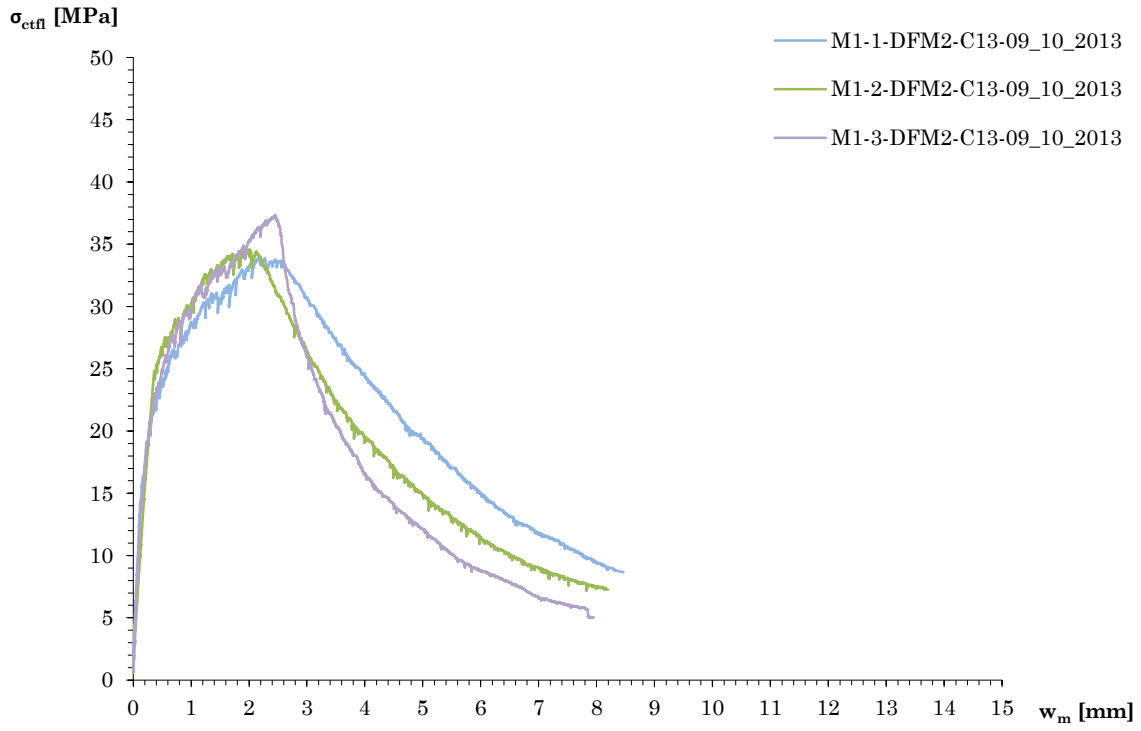


Bild 11.4-2: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C13 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

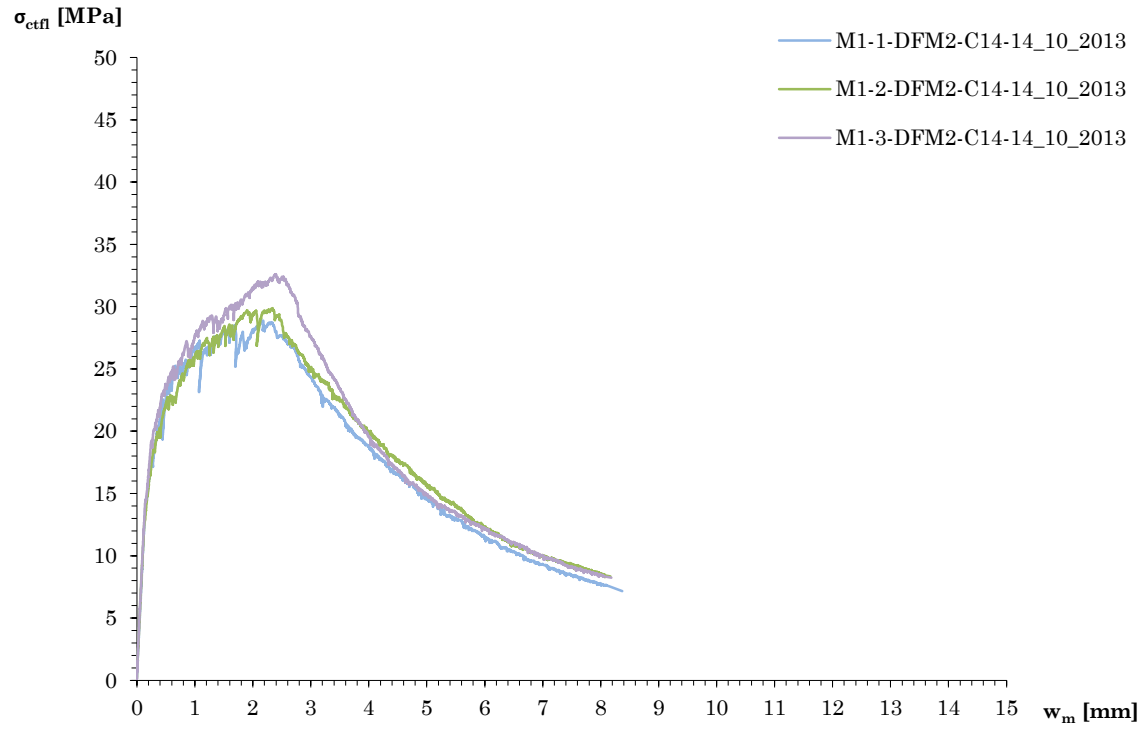


Bild 11.4-3: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C14 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

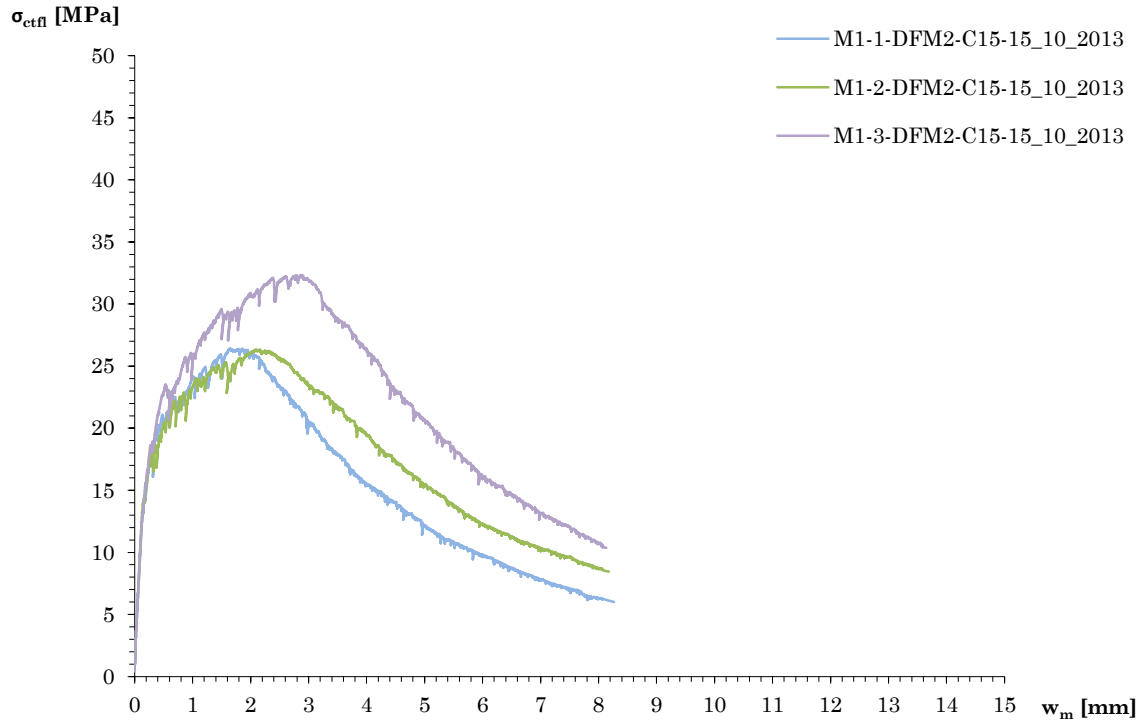


Bild 11.4-4: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C15 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

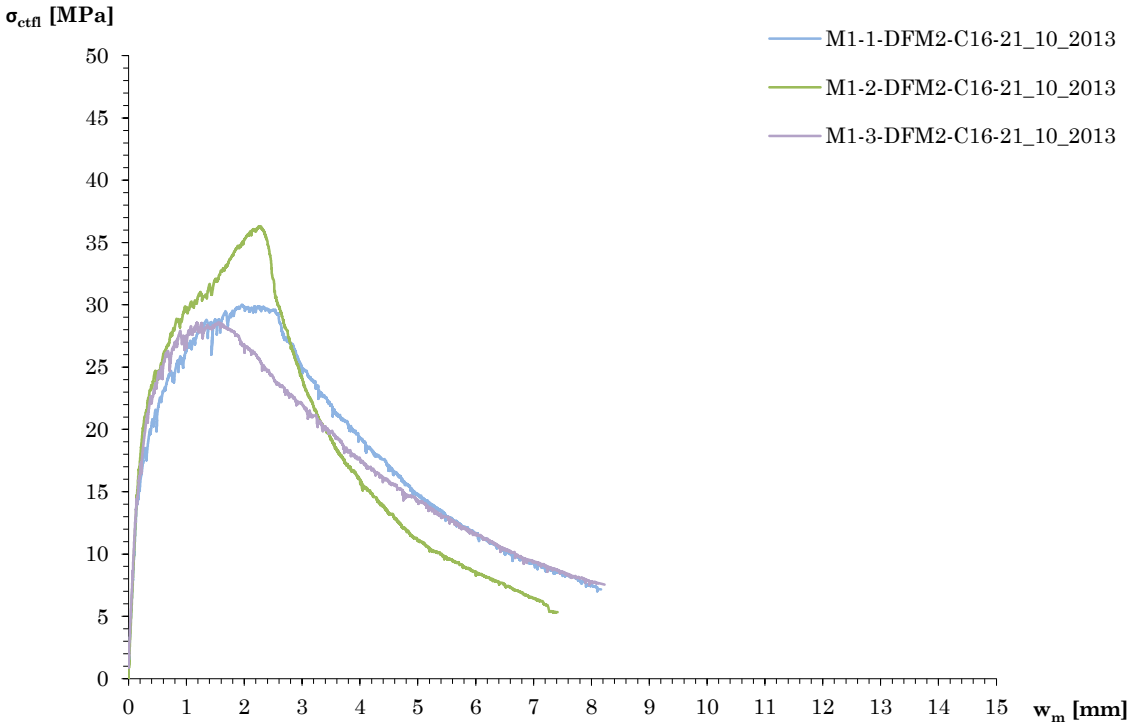


Bild 11.4-5: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C16 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

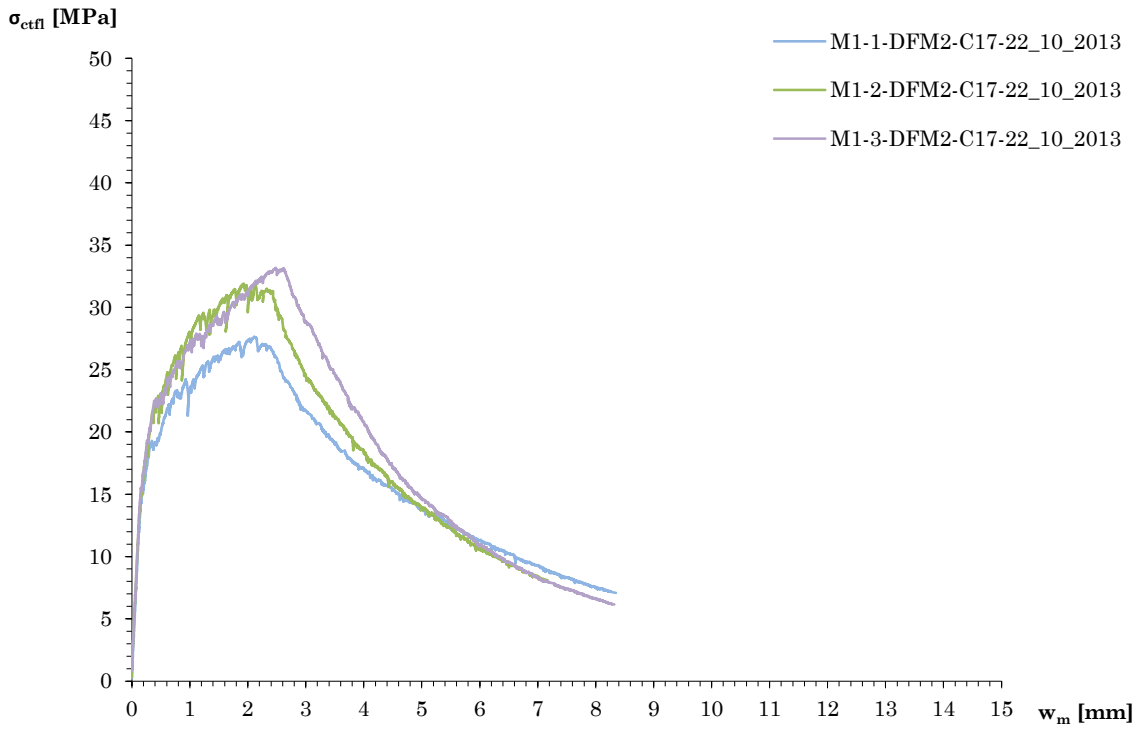


Bild 11.4-6: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C17 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

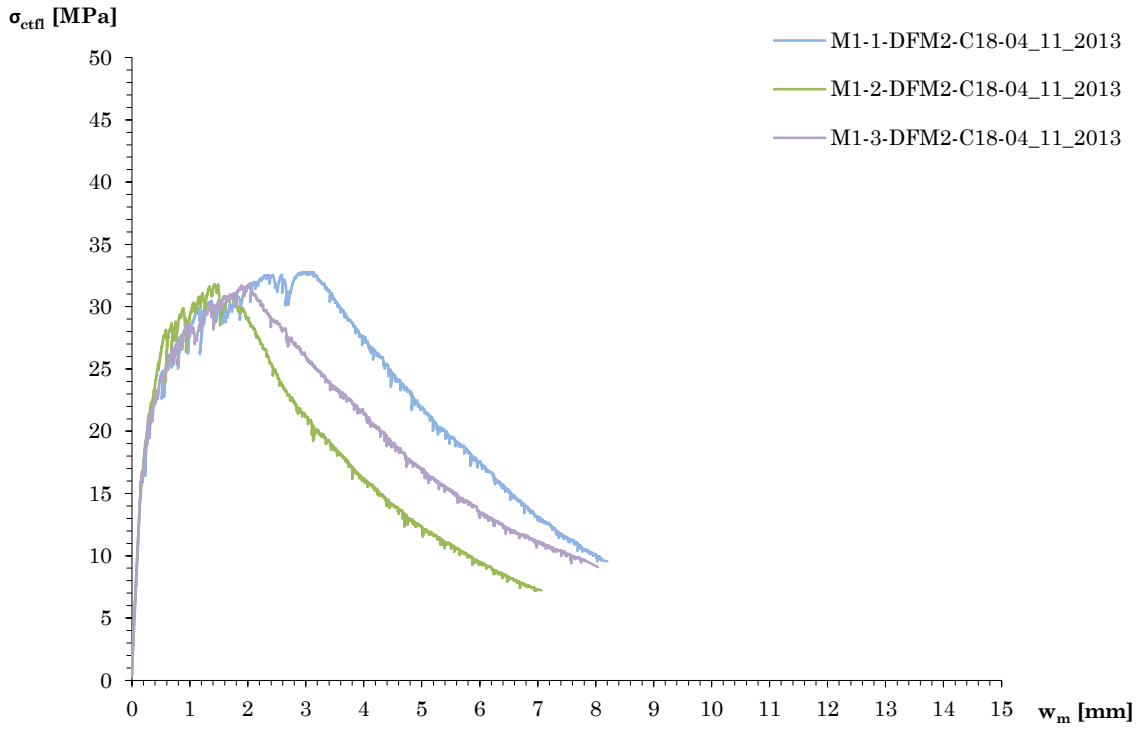


Bild 11.4-7: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C18 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

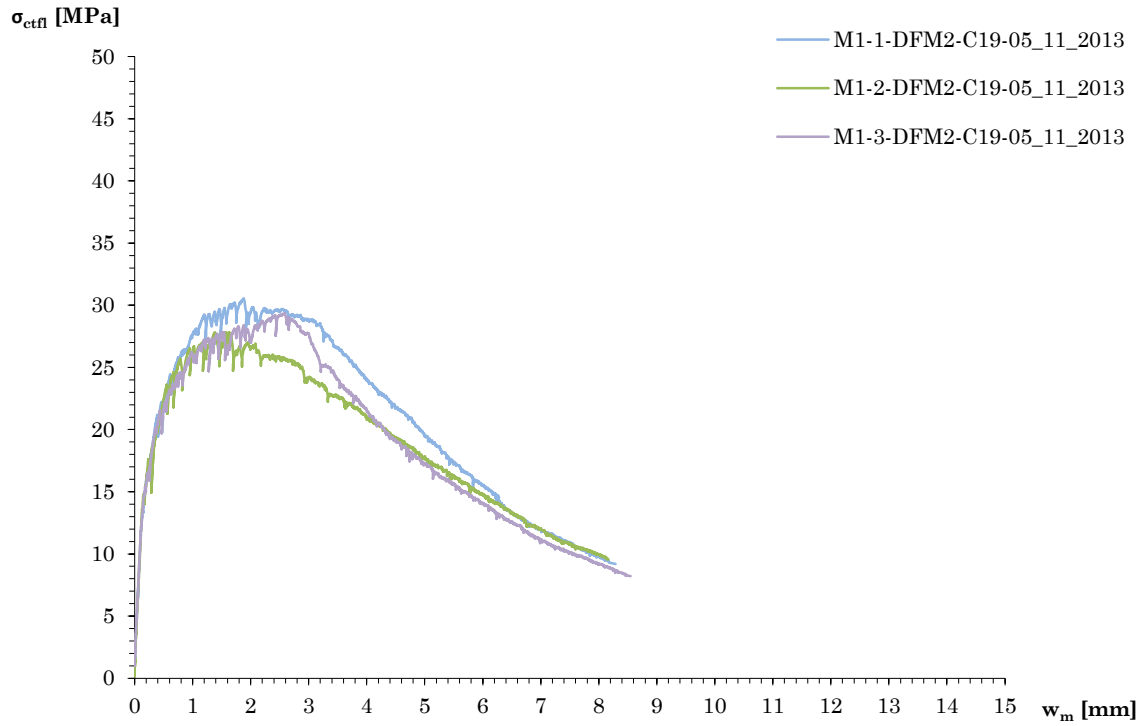


Bild 11.4-8: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C19 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche

In Tabelle 11.4-1 sind für die Chargen C12 bis C19 die ermittelten Elastizitätsgrenzen der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ sowie die dazu korrespondierenden Mittendurchbiegungen $w_m(f_{ctfl,el})$ aufgeführt. Der Mittelwert der Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ ergab sich zu 13,59 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 8,29 %. Für die zur Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ korrespondierende Mittendurchbiegungen $w_m(f_{ctfl,el})$ ergab sich ein Mittelwert von 0,13 mm. Der Variationskoeffizient betrug 9,28 %.

In Tabelle 11.4-2 sind für die Chargen C12 bis C19 die ermittelten Biegezugfestigkeiten f_{ctfl} sowie die dazu korrespondierenden Mittendurchbiegungen $w_m(f_{ctfl})$ aufgeführt. Der Mittelwert der Biegezugfestigkeit f_{ctfl} ergab sich zu 31,26 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 9,21 %. Für die zur Biegezugfestigkeit f_{ctfl} korrespondierenden Mittendurchbiegungen $w_m(f_{ctfl})$ ergab sich ein Mittelwert von 2,18 mm bei einem Variationskoeffizienten von 19,42 %.

Im Anhang D.2 sind für die Chargen C12 bis C19 die Prismen und die Lage der Risslokalisierung abgebildet.

In Bild 11.4-9 ist die Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ und in Bild 11.4-10 die Biegezugfestigkeit f_{ctfl} in Abhängigkeit vom Alter der Prismen zum Zeitpunkt der Prüfung aufgetragen. Die Chargen wurden im Alter von 154 bis 184 Tagen geprüft. In beiden Fällen ist ein Einfluss des Alters der Prismen nicht zu erkennen.

Tabelle 11.4-1: Bei weggeregelten Biegezugversuchen an Prismen der Chargen C12 bis C19 ermittelte Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ und korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl,el})$

Kennzeichnung	$f_{ctfl,el}$	m	s	v	$w_m(f_{ctfl,el})$	m	s	v
	[MPa]				[mm]			
M1-1-DFM2-C12-08_10_2013	11,60				0,11			
M1-2-DFM2-C12-08_10_2013	14,17				0,14			
M1-3-DFM2-C12-08_10_2013	12,62	12,80	1,29	10,10 %	0,13	0,13	0,01	10,41 %
M1-1-DFM2-C13-09_10_2013	14,35				0,12			
M1-2-DFM2-C13-09_10_2013								
M1-3-DFM2-C13-09_10_2013	13,79	14,07	0,40	2,82 %	0,13	0,13	0,00	3,64 %
M1-1-DFM2-C14-14_10_2013	13,85				0,14			
M1-2-DFM2-C14-14_10_2013	12,80				0,13			
M1-3-DFM2-C14-14_10_2013	14,40	13,68	0,81	5,93 %	0,14	0,14	0,01	4,74 %
M1-1-DFM2-C15-15_10_2013	13,42				0,13			
M1-2-DFM2-C15-15_10_2013	13,97				0,14			
M1-3-DFM2-C15-15_10_2013	12,44	13,28	0,78	5,87 %	0,12	0,13	0,01	7,98 %
M1-1-DFM2-C16-21_10_2013	14,09				0,14			
M1-2-DFM2-C16-21_10_2013	14,41				0,14			
M1-3-DFM2-C16-21_10_2013	12,66	13,72	0,93	6,76 %	0,12	0,13	0,01	11,03 %
M1-1-DFM2-C17-22_10_2013	11,89				0,12			
M1-2-DFM2-C17-22_10_2013	13,89				0,13			
M1-3-DFM2-C17-22_10_2013	14,30	13,36	1,29	9,65 %	0,13	0,13	0,01	6,95 %
M1-1-DFM2-C18-04_11_2013	15,78				0,15			
M1-2-DFM2-C18-04_11_2013	15,68				0,15			
M1-3-DFM2-C18-04_11_2013	14,47	15,31	0,73	4,77 %	0,14	0,15	0,01	4,97 %
M1-1-DFM2-C19-05_11_2013	12,05				0,11			
M1-2-DFM2-C19-05_11_2013	13,58				0,13			
M1-3-DFM2-C19-05_11_2013	12,31	12,65	0,82	6,46 %	0,12	0,12	0,01	6,46 %
Mittelwert	m	13,59			0,13			
Standardabweichung	s	1,13			0,01			
Variationskoeffizient	v	8,29 %			9,28 %			

Tabelle 11.4-2: Bei weggeregelten Biegezugversuchen an Prismen der Chargen C12 bis C19 ermittelte Biegezugfestigkeit f_{ctfl} und korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl})$

Kennzeichnung	f_{ctfl}	m	s	v	$w_m(f_{ctfl})$	m	s	v
	[MPa]				[mm]			
M1-1-DFM2-C12-08_10_2013	31,80				2,10			
M1-2-DFM2-C12-08_10_2013	30,54				2,56			
M1-3-DFM2-C12-08_10_2013	33,73	32,03	1,61	5,02 %	2,76	2,47	0,34	13,75 %
M1-1-DFM2-C13-09_10_2013	33,95				2,17			
M1-2-DFM2-C13-09_10_2013	34,58				1,98			
M1-3-DFM2-C13-09_10_2013	37,35	35,30	1,81	5,13 %	2,45	2,20	0,24	10,86 %
M1-1-DFM2-C14-14_10_2013	28,89				2,17			
M1-2-DFM2-C14-14_10_2013	29,87				2,34			
M1-3-DFM2-C14-14_10_2013	32,60	30,45	1,92	6,30 %	2,40	2,30	0,12	5,04 %
M1-1-DFM2-C15-15_10_2013	26,44				1,64			
M1-2-DFM2-C15-15_10_2013	26,34				2,16			
M1-3-DFM2-C15-15_10_2013	32,36	28,38	3,45	12,15 %	2,88	2,23	0,62	27,94 %
M1-1-DFM2-C16-21_10_2013	30,01				1,96			
M1-2-DFM2-C16-21_10_2013	36,32				2,27			
M1-3-DFM2-C16-21_10_2013	28,57	31,63	4,12	13,02 %	1,54	1,92	0,36	18,96 %
M1-1-DFM2-C17-22_10_2013	27,64				2,11			
M1-2-DFM2-C17-22_10_2013	31,92				1,93			
M1-3-DFM2-C17-22_10_2013	33,17	30,91	2,90	9,38 %	2,48	2,17	0,28	12,96 %
M1-1-DFM2-C18-04_11_2013	32,79				2,97			
M1-2-DFM2-C18-04_11_2013	31,78				1,48			
M1-3-DFM2-C18-04_11_2013	31,77	32,11	0,59	1,82 %	2,01	2,16	0,75	34,98 %
M1-1-DFM2-C19-05_11_2013	30,56				1,88			
M1-2-DFM2-C19-05_11_2013	27,83				1,38			
M1-3-DFM2-C19-05_11_2013	29,34	29,24	1,36	4,66 %	2,58	1,95	0,60	30,87 %
Mittelwert m	31,26				2,18			
Standardabweichung s	2,88				0,42			
Variationskoeffizient v	9,21%				19,42%			

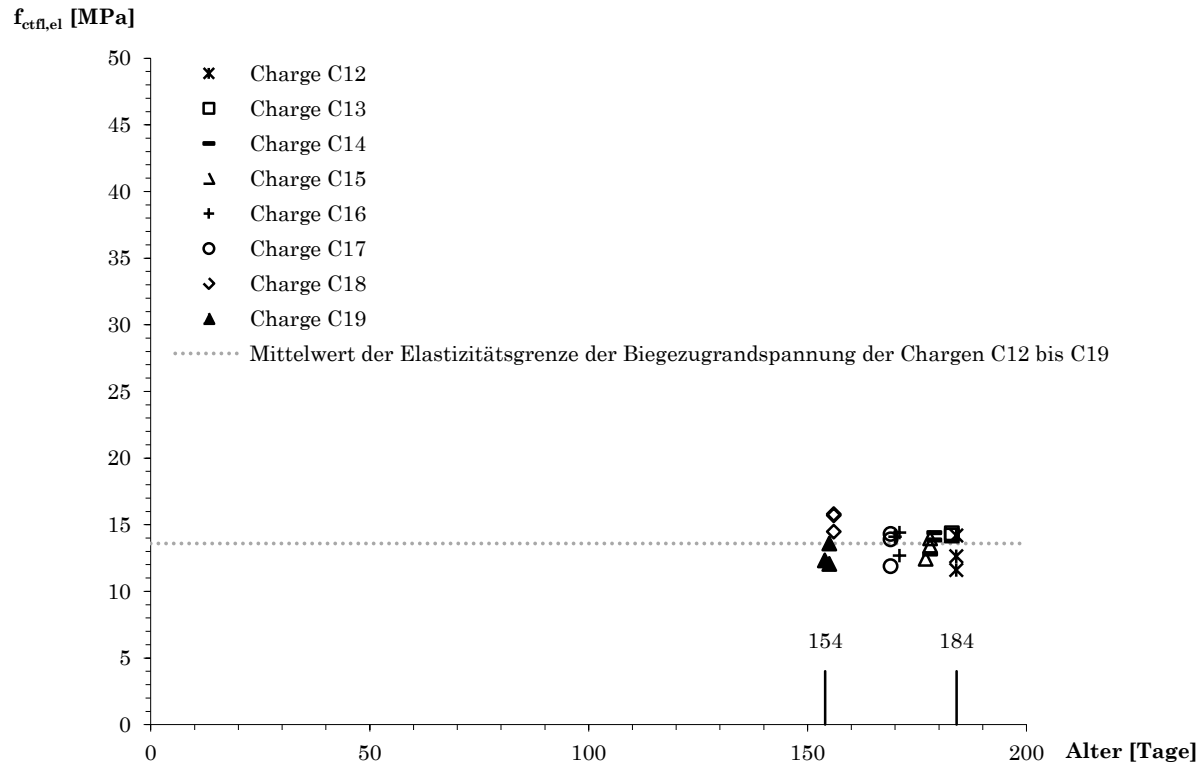


Bild 11.4-9: Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ in Abhängigkeit vom Alter der Prismen der Chargen C12 bis C19 zum Zeitpunkt der Prüfung

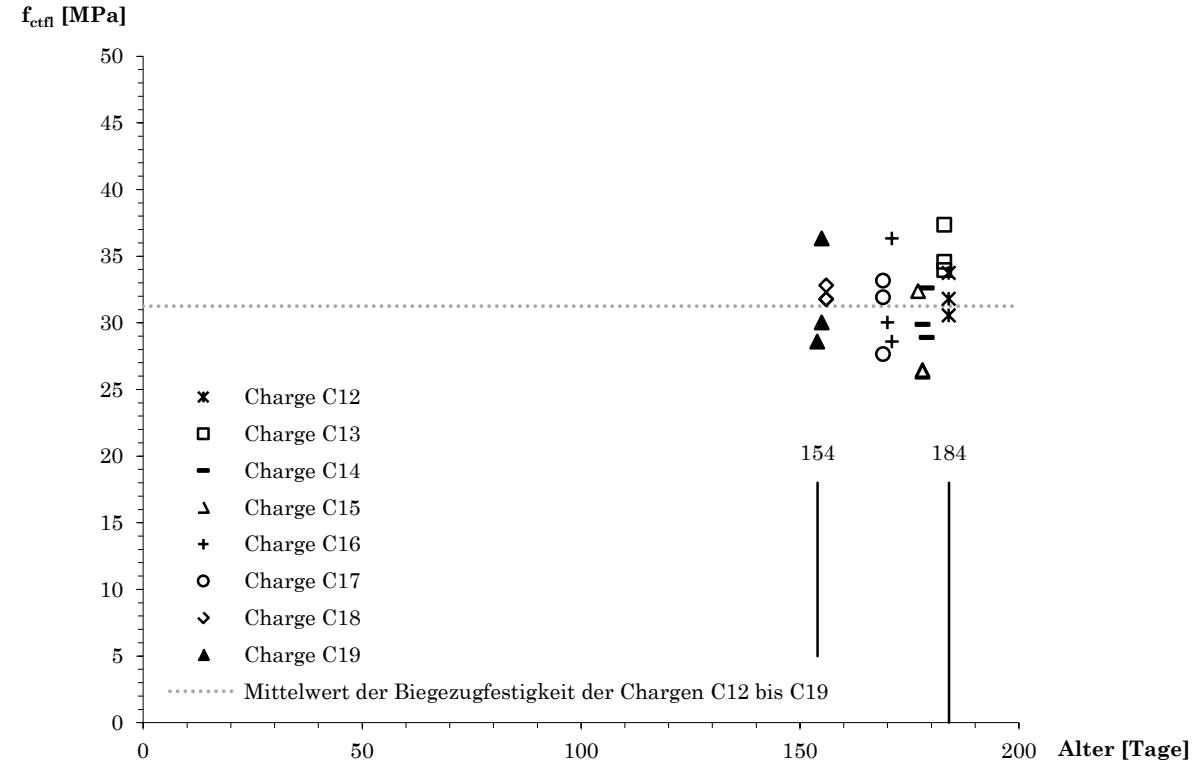


Bild 11.4-10: Biegezugfestigkeit f_{ctfl} in Abhängigkeit vom Alter der Prismen der Chargen C12 bis C19 zum Zeitpunkt der Prüfung

11.5 Abscherversuche

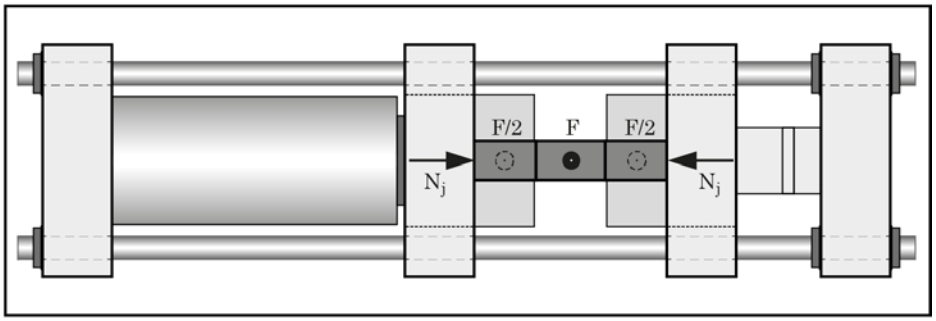
11.5.1 Versuchsstand und –durchführung

Die Schub-Druck-Versuche wurden an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMPA)) mit einem 1000 kN Zug- und Druckprüfzylinder der Firma Schenck durchgeführt. In Bild 11.5-1 ist der Versuchsstand mit eingebautem Versuchskörper abgebildet.

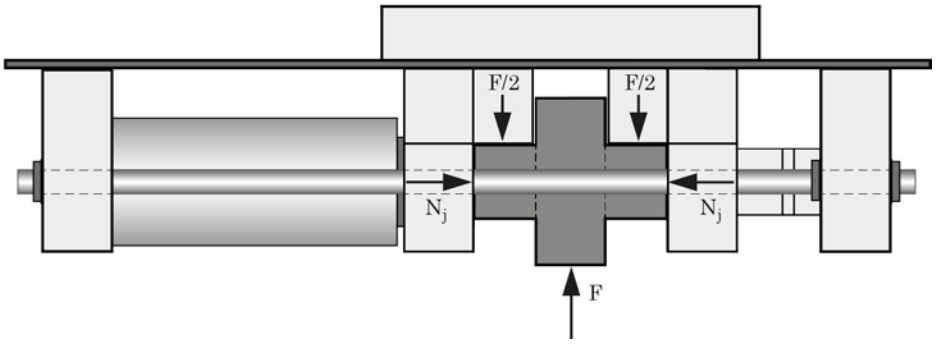
Bild 11.5-1: Versuchsstand für die Durchführung der Abscherversuche

Eine Draufsicht und eine Ansicht der Versuchseinrichtung ist schematisch in Bild 11.5-2 dargestellt. Die Versuchseinrichtung bestand aus einem unverschieblichen und einem horizontal verschieblichen L-förmigen Block zur Aufnahme der äußeren Versuchskörperteile. Zwischen den äußeren Versuchskörperteilen befand sich das mittlere Versuchskörperteil. Die normal zu den Fugen wirkende Kraft N_j wurde über einen hydraulischen Zylinder der Firma Lukas vom Typ HP 50/200 mit Hilfe einer Handpumpe aufgebracht und mit einer Kraftmessdose gemessen. Der hydraulische Zylinder mit einer Kapazität von 500 kN und die Kraftmessdose waren über zwei parallel angeordnete Gewindestangen kurzgeschlossen. Die Prüfkraft F wurde auf das mittlere Versuchskörperteil über die untere Lastplatte mit eingebauter Kalotte in vertikaler Richtung nach oben (!) aufgebracht. Bedingt durch diesen Umstand, und auf Grund herstellbedingter geringfügiger Abweichungen in den Abmessungen der äußeren Versuchskörperteile, gestaltete sich manchmal der Einbau der Versuchskörper dahingehend etwas

schwierig, die beiden äußeren Versuchskörperteile entgegen der Schwerkraft kraftschlüssig gegen die L-förmigen Blöcke zu drücken. Gelang dies nicht, hatte dies eine ungleichmäßige Belastung der Fugen und ein entsprechend frühes Versagen bei niedriger Prüfkraft F bzw. bei den Abscherversuchen unter zyklischer Belastung noch vor Erreichen der Oberspannung zur Folge.



a) Draufsicht



b) Ansicht

Bild 11.5-2: Versuchseinrichtung für die Durchführung der Abscherversuche (schematisch)

Das Belastungsschema für die Abscherversuche unter zyklischer Belastung ist in Bild 11.5-3 dargestellt. Zunächst wurde die normal zu den Fugen wirkende Kraft N_j über den hydraulischen Zylinder mit Hilfe der Handpumpe auf den Versuchskörper aufgebracht (Schritt ①). Im nächsten Schritt (Schritt ②) wurde dann bei konstanter Kraft N_j eine quasi-statische Belastung auf den Versuchskörper aufgebracht, indem die Prüfkraft F zunächst weggeregelt bei einer Belastungsgeschwindigkeit von 1,0 mm/min, dann kraftgeregelt bei einer Belastungsgeschwindigkeit von 1,67 kN/s, bis zum Erreichen der Mittellast gesteigert wurde. Nach Erreichen der Mittellast folgten dann die ersten zehn Lastwechsel, welche sinusförmig zwischen einer konstanten Oberlast und einer konstanten Unterlast bei einer Prüffrequenz von 0,1 Hz durchgeführt wurden. Dabei fand eine kontinuierlicher Messung der Messwerte statt (vgl. Abschnitt 11.5.2). Am Ende der ersten zehn Lastwechsel wurde auf dem Belastungsniveau der Mittellast verharrt, um das Messsystem umzustellen. In Schritt ③ wurde vom Belastungsniveau der Mittellast aus die zyklische Belastung in Form von sinusförmigen Schwingungen zwischen einer konstanten Oberlast und einer konstanten Unterlast auf den Versuchskörper aufgebracht. Um ein ruckartiges Einschwingen zu vermeiden, wurde die Prüffrequenz stufenweise von 1 Hz bis 10 Hz gesteigert, wozu in der Regel etwa 3000 Lastwechsel benötigt wurden. Während der zyklischen Belastung wurden die Messwerte nur periodisch aufgezeichnet (vgl. Abschnitt 11.5.2). Trat bei bis zu $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln kein Versagen der Fugen auf, wurde der Versuchskörper unter Beibehaltung der

normal zu den Fugen wirkenden Kraft N_j zunächst entlastet und dann die Resttragfähigkeit des Versuchskörpers unter Aufbringen einer statischer Belastung bestimmt (Schritt ④). Dabei wurde die Prüfkraft F weggeregelt mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,1 mm/min aufgebracht. Um die Versuchsdauer zu begrenzen, wurde ab einem Maschinenweg von 2 mm die Belastungsgeschwindigkeit auf 0,25 mm/min und ab einem Maschinenweg von 5 mm auf 1,0 mm/min erhöht. Die Messwerte wurden dabei kontinuierlicher aufgezeichnet (vgl. Abschnitt 11.5.2). Der Versuch wurde bei einem Maschinenweg von etwa 10 mm abgebrochen.

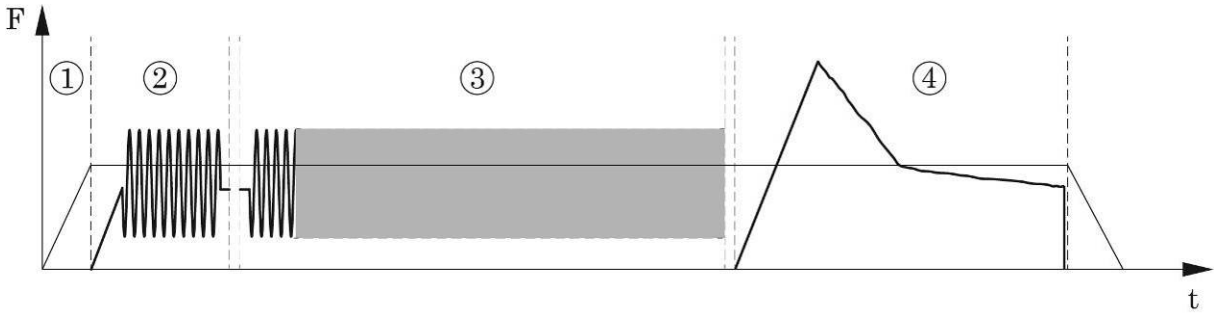


Bild 11.5-3: Belastungsschema für die Abscherversuche unter zyklischer Belastung

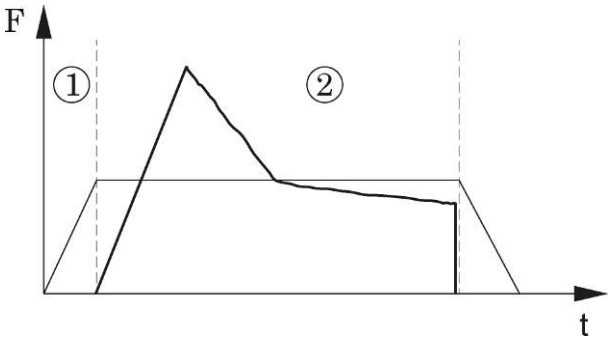


Bild 11.5-4: Belastungsschema für die Abscherversuche unter statischer Belastung

Bild 11.5-4 zeigt das Belastungsschema für die Abscherversuche unter statischer Belastung. Ebenso wie bei den Abscherversuchen unter zyklischer Belastung wurde zunächst die normal zu den Fugen wirkende Kraft N_j über den hydraulischen Zylinder mit Hilfe der Handpumpe auf den Versuchskörper aufgebracht (Schritt ①). Im nächsten Schritt (Schritt ②) wurde dann bei konstanter Kraft N_j eine statischer Belastung aufgebracht (entspricht Schritt ④ bei den Abscherversuche unter zyklischer Belastung). Dabei wurde die Prüfkraft F weggeregelt mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,1 mm/min aufgebracht. Um die Versuchsdauer zu begrenzen, wurde ab einem Maschinenweg von 2 mm die Belastungsgeschwindigkeit auf 0,25 mm/min und ab einem Maschinenweg von 5 mm auf 1,0 mm/min erhöht. Die Messwerte wurden dabei kontinuierlicher aufgezeichnet (vgl. Abschnitt 11.5.2). Der Versuch wurde bei einem Maschinenweg von etwa 10 mm abgebrochen.

11.5.2 Vorbereitung und Instrumentierung der Versuchskörper

Vor der Prüfung wurden die tatsächlichen Abmessungen der Kontaktflächen der äußeren Probeköperteile protokolliert. Der Mittelwert für die Querschnittsbreite b und die Querschnittshöhe h der kleineren der beiden Kontaktflächen ist in Anhang D.3 und D.4 aufgeführt.

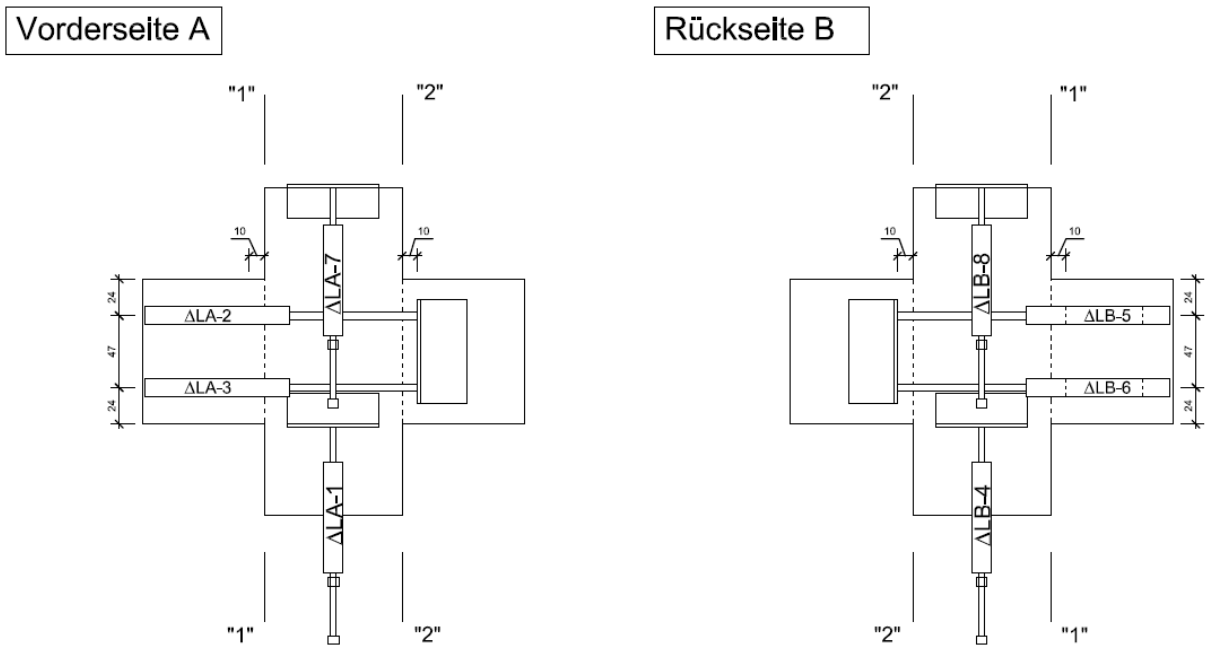


Bild 11.5-5: Instrumentierung der Versuchskörper für die Durchführung der Abscherversuche

Die Instrumentierung für die Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Oberflächenbeschaffenheit der Fuge war identisch. Sie bestand aus insgesamt acht induktiven Wegaufnehmern, deren Anordnung und Bezeichnung dem Bild 11.5-5 entnommen werden kann. Parallel zur Fuge waren induktive Wegaufnehmer vom Typ W5TK der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH mit einem Nennmessbereich von 10 mm angeordnet. Mit ihnen wurde die Verschiebung des mittleren Versuchskörperteils relativ zu den äußeren Versuchskörperteilen gemessen, wobei mit den Wegaufnehmern ΔLA-7 und ΔLB-8 die Verschiebung Δs_1 des unbelasteten Endes und mit den Wegaufnehmer ΔLA-7 und ΔLB-8 die Verschiebung Δs_2 des belasteten Endes aufgezeichnet wurde. Normal zur Fuge waren induktive Wegaufnehmer vom Typ W2TK der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH mit einem Nennmessbereich von 4 mm angeordnet. Mit ihnen wurde die Bewegung der Kontaktflächen relativ zueinander gemessen, wobei mit den Wegaufnehmern ΔLA-2 und ΔLB-5 die Bewegung Δn_1 und mit den Wegaufnehmer ΔLA-3 und ΔLB-6 die Bewegung Δn_2 aufgezeichnet wurde.

Zusätzlich wurden die Prüfkraft F und der Maschinenweg sowie die normal zu den Fugen wirkende Kraft N_j aufgezeichnet. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte bei den Abscherversuchen unter statischer Belastung mit einer Messfrequenz von 10 Hz. Bei den Abscherversuchen unter zyklischer Belastung wurden die Messwerte der ersten zehn Lastwechsel mit einer Messfrequenz von 10 Hz aufgezeichnet. Bei den weiteren Lastwechseln betrug die Messfrequenz 2400 Hz, allerdings wurde nur jeder fünfundzwanzigste Lastzyklus ausgewertet bzw. dessen Messwerte aufgezeichnet.

11.5.3 Versuchsergebnisse unter statischer Belastung

11.5.3.1 Auswertung der Versuche

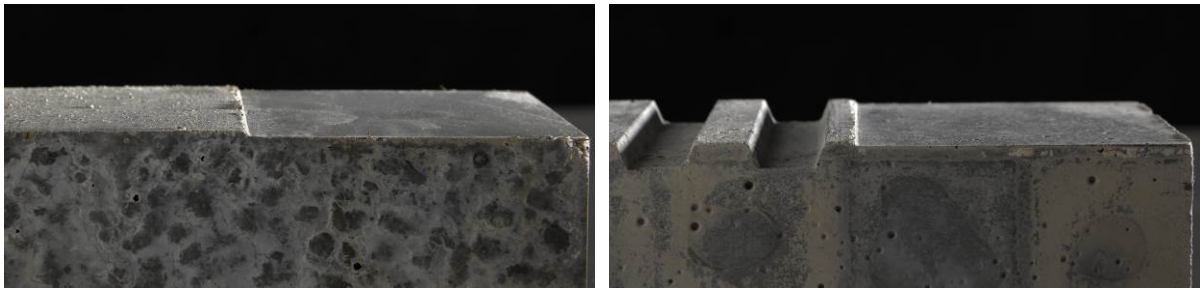
Bedingt durch die Geometrie der Versuchskörper wurden immer zwei Fugen geprüft. Aus der gemessenen Prüfkraft F lässt sich somit wie folgt die parallel zur Fuge wirkende Kraft V_j je Fuge berechnen:

$$V_j = \frac{F}{2} \qquad (11\text{-}1)$$

mit V_j [kN] parallel zur Fuge wirkende Kraft
F [kN] Prüfkraft

Die Verschiebungen Δs_1, Δs_2, Δn_1 und Δn_2 berechnen sich als Mittelwert der Messwerte der jeweils gegenüberliegenden Wegaufnehmer (vgl. Bild 11.5-5). Die Kraft-Verformungs-Kurven sowie eine photographische Dokumentation der Kontaktflächen bzw. der Bruchbilder finden sich im Anhang D.3.

Die Kontaktflächen des mittleren Versuchskörperteils standen leicht hervor (vgl. Bild 11.5-6), so dass sich mit zunehmender Verschiebung parallel zur Fuge die Fläche zwischen dem mittleren Versuchskörperteil und den äußeren Versuchskörperteilen verringerte. Dieser Umstand fand bei der Umrechnung der Kräfte in Spannungen Berücksichtigung.



a) sehr glatte Fuge b) verzahnte Fuge

Bild 11.5-6: Mittlerer Versuchskörperteil mit hervorstehenden Kontaktflächen

Die parallel zur Fuge wirkende Kraft V_j je Fuge wurde wie folgt in die Schubspannung τ_j umgerechnet:

$$\tau_j = \frac{V_j}{A_j - b \cdot \Delta s_2} \qquad (11\text{-}2)$$

mit τ_j [MPa] Schubspannung in der Fuge
V_j [N] parallel zur Fuge wirkende Kraft
A_j [mm²] Fläche der Fuge
b [mm] Breite der Fuge
Δs_2 [mm] Verschiebung des belasteten Endes des mittleren Versuchskörperteils
relativ zu den äußeren Versuchskörperteilen

Entsprechend wurde wie folgt die normal zur Fuge wirkende Kraft N_j in die Normalspannung σ_j umgerechnet:

$$\sigma_j = \frac{N_j}{A_j - b \cdot \Delta s_2} \qquad (11\text{-}3)$$

mit
σ_j [MPa]	Normalspannung in der Fuge
N_j [N]	normal zur Fuge wirkende Kraft
A_j [mm²]	Fläche der Fuge
b [mm]	Breite der Fuge
Δs_2 [mm]	Verschiebung des belasteten Endes des mittleren Versuchskörperteils relativ zu den äußeren Versuchskörperteilen

Die Ergebnisse für die Abscherversuche unter statischer Belastung sind in einem Diagramm mit vier Quadranten dargestellt. Dabei sind im II. Quadranten die τ_j-σ_j-Kurven dargestellt. Die zur Schubspannung τ_j korrespondierende Verschiebung Δs_1 ist in Form von τ_j-Δs_1-Kurven im I. Quadranten, die zur Normalspannung σ_j korrespondierende Verschiebung Δs_1 ist in Form von σ_j-Δs_1-Kurven im IV. Quadranten dargestellt.

Im Hinblick auf die aus den Abscherversuchen unter statischer Belastung abzuleitenden Belastungshorizonte für die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung wurden folgende Kriterien hinsichtlich des Versagens der Fugen unter statischer Belastung festgelegt:

- Versuchskörper mit sehr glatter Fuge: Einsetzen des Gleitens in der Fuge durch eine deutliche oder sprunghafte Zunahme der Verschiebung Δs_1 am unbelasteten Ende des mittleren Versuchskörperteils (die entsprechenden Spannungen und Verformungen wurden durch den Fußzeiger „r“ gekennzeichnet);
- Versuchskörper mit verzahnter Fuge: Bruch der Verzahnung (die entsprechenden Spannungen und Verformungen wurden durch den Fußzeiger „ult“ gekennzeichnet).

11.5.3.2 Ergebnisse für die Versuchskörper mit sehr glatter Fuge

In Bild 11.5-7 bis Bild 11.5-9 sind die Ergebnisse der Abscherversuche unter statischer Belastung für die Versuchskörper mit sehr glatter Fuge dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei den Versuchskörpern mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa das Gleiten in der Fuge mit einer kontinuierlichen Zunahme der Verschiebung Δs_1 einhergeht, bei den Versuchskörpern mit einer Fugennormalspannung von 40 MPa und den Versuchskörpern mit einer Fugennormalspannung von 90 MPa das Gleiten in der Fuge durch eine sprunghafte Zunahme der Verschiebung Δs_1 bei gleichzeitigem Abfall der Prüfkraft F gekennzeichnet ist. Eine Zunahme der Fugennormalspannung während der Versuche war nicht zu beobachten.

Bei Bild 11.5-10 bis Bild 11.5-12 handelt es sich um einen Ausschnitt aus den τ_j-Δs_1-Kurven der in Bild 11.5-7 bis Bild 11.5-9 dargestellten Diagramme. Darin sind die Punkte hervorgehoben, die das Versagen der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge kennzeichnen. Der Tabelle 11.5-1 bis Tabelle 11.5-3 können die entsprechenden Werte für die Schubspannung $\tau_{j,r}$, die Normalspannung $\sigma_{j,r}$ und die Verschiebung $\Delta s_{1,r}$ entnommen werden. Es sei darauf hingewiesen, dass bei der Mittelwertbildung und der weiteren Auswertung nicht die Ergebnisse aller Versuchskörper mit sehr glatter Fuge berücksichtigt wurden. Ein im Vergleich zu den anderen Versuchskörpern mit gleicher Fugennormalspannung frühes Versagen bei niedriger Prüfkraft F wurde einer ungleichmäßigen Belastung der Fugen zugeschrieben (FZ-10-SG_S1 und FZ-3-SG_S2).

Die Belastungshorizonte für die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung an Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge wurden auf Basis der Prüfkraft F_r berechnet (vgl. Tabelle 11.5-4).

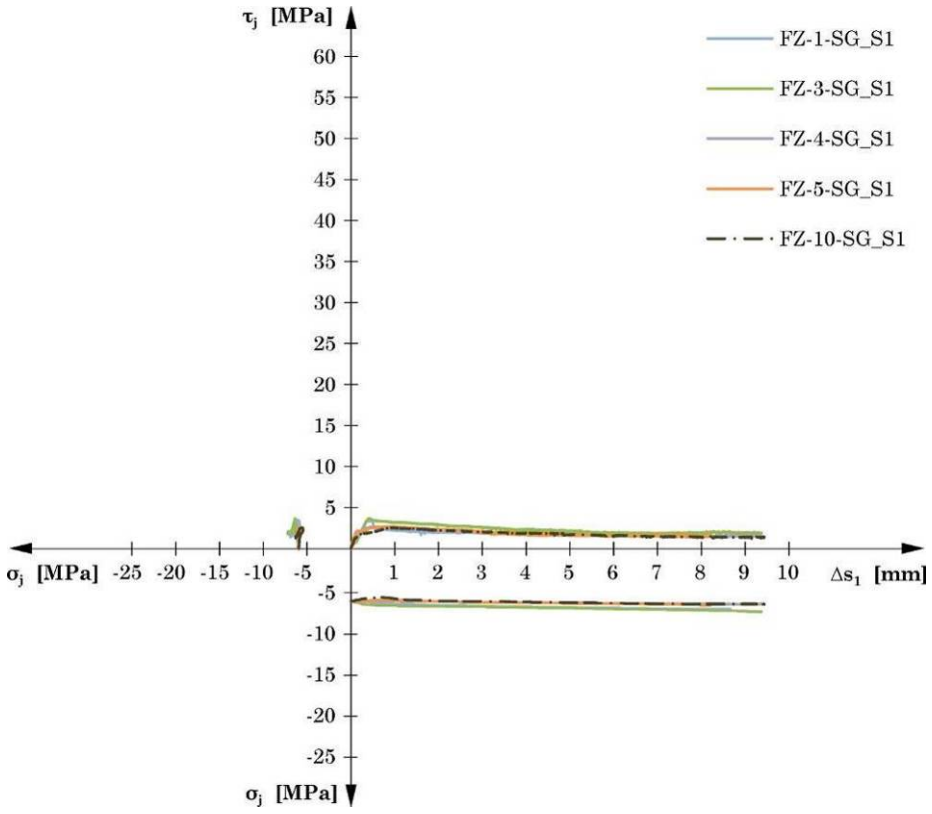


Bild 11.5-7: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa

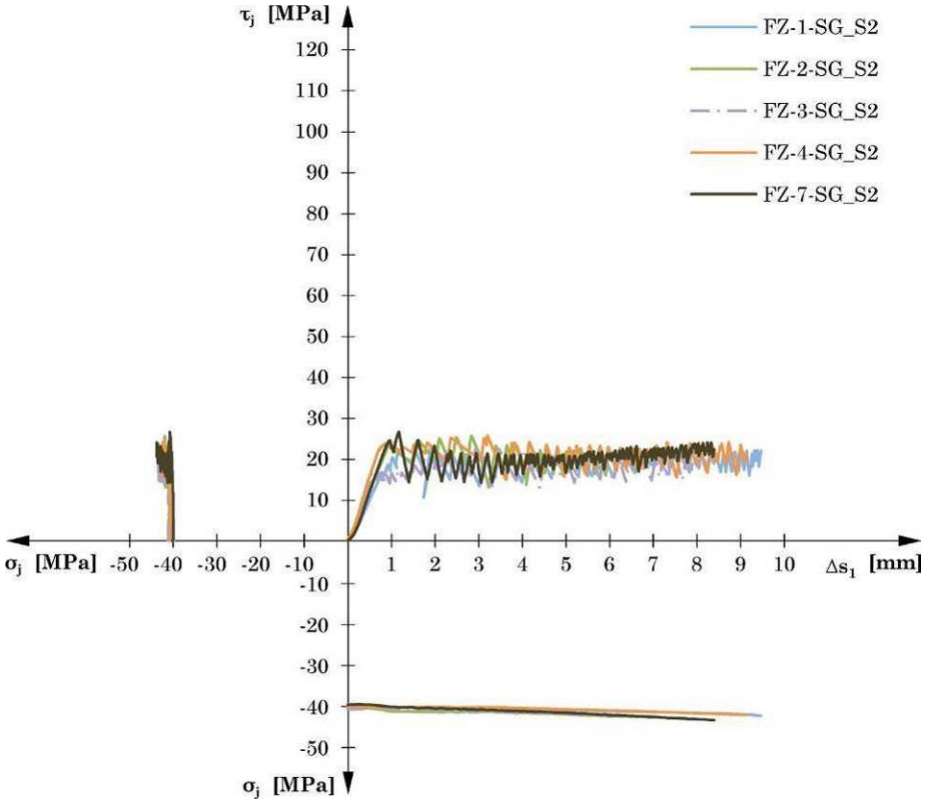


Bild 11.5-8: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa

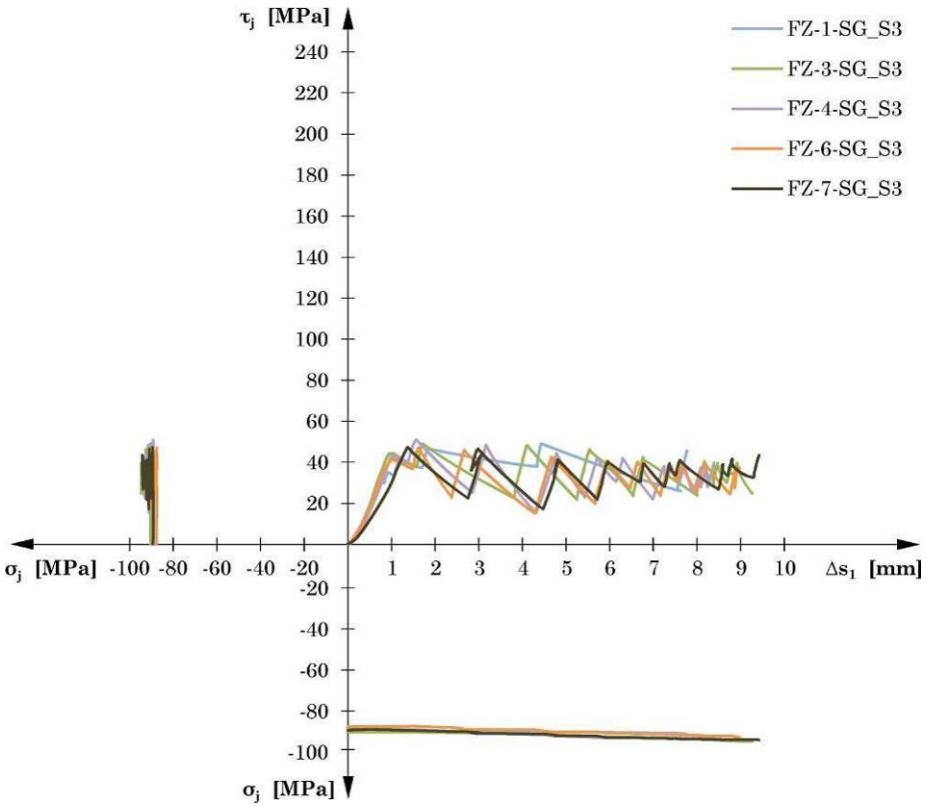


Bild 11.5-9: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Oberflächenbeschaffenheit der Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa

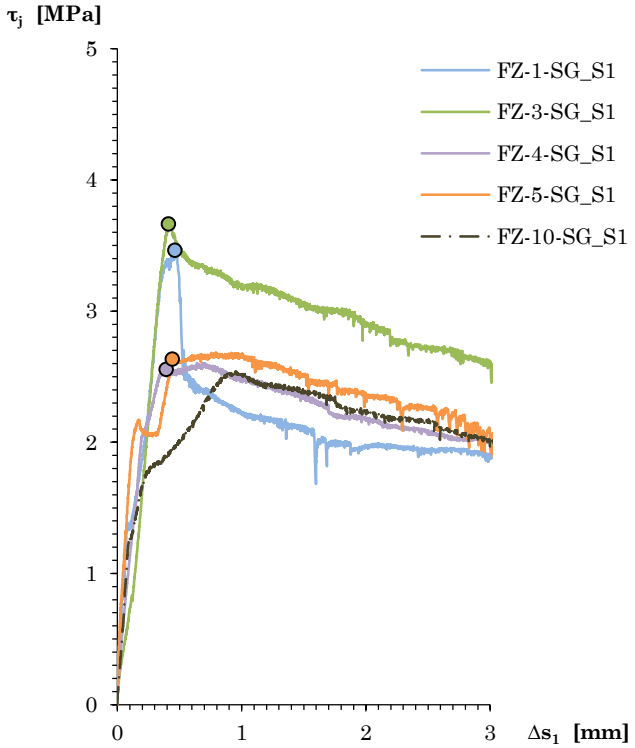


Bild 11.5-10: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-7)

Tabelle 11.5-1: Spannungen und Verschiebung $\Delta s_{1,r}$ bei Versagen der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa

Kennzeichnung		$\tau_{j,r}$ [MPa]	$\sigma_{j,r}$ [MPa]	$\Delta s_{1,r}$ [mm]
FZ-1-SG_S1		3,46	-6,06	0,463
FZ-3-SG_S1		3,66	-6,37	0,412
FZ-4-SG_S1		2,56	-5,96	0,394
FZ-5-SG_S1		2,63	-5,87	0,444
FZ-10-SG_S1 [1)]		2,54	-5,60	0,954
Mittelwert	m	3,08	-6,07	0,428
Standardabweichung	s	0,57	0,21	0,031
Variationskoeffizient	v	18,37 %	3,53 %	7,24 %

[1)] Die Ergebnisse des Versuchskörpers wurden bei der Mittelwertbildung und der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.

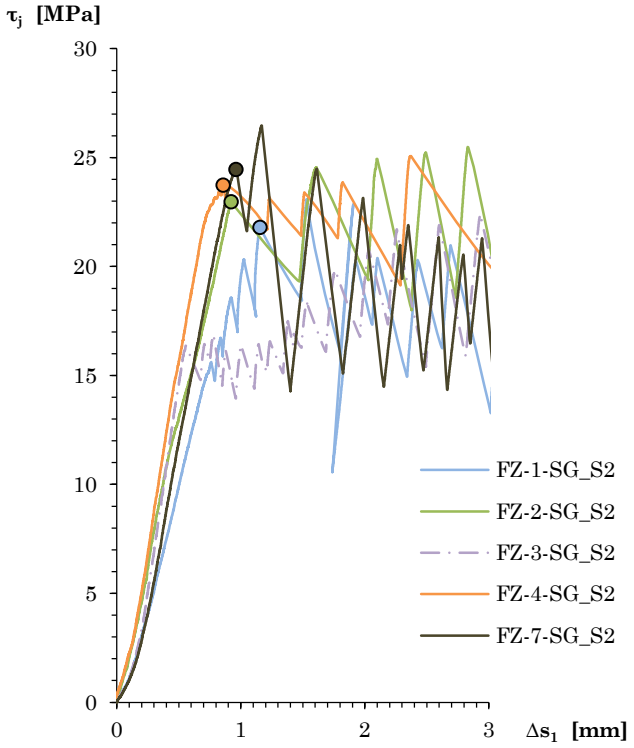


Bild 11.5-11: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-8)

Tabelle 11.5-2: Spannungen und Verschiebung $\Delta s_{1,r}$ bei Versagen der Versuchskörper mit sehr glatter Oberflächenbeschaffenheit der Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa

Kennzeichnung		$\tau_{j,r}$ [MPa]	$\sigma_{j,r}$ [MPa]	$\Delta s_{1,r}$ [mm]
FZ-1-SG_S2		21,79	-40,73	1,155
FZ-2-SG_S2		22,96	-41,63	0,923
FZ-3-SG_S2 [1)]		16,37	-41,02	0,558
FZ-4-SG_S2		23,73	-40,64	0,858
FZ-7-SG_S2		24,45	-40,57	0,962
Mittelwert	m	23,23	-40,89	0,974
Standardabweichung	s	1,14	0,49	0,128
Variationskoeffizient	v	4,89 %	1,21 %	13,12 %

[1)] Die Ergebnisse des Versuchskörpers wurden bei der Mittelwertbildung und der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.

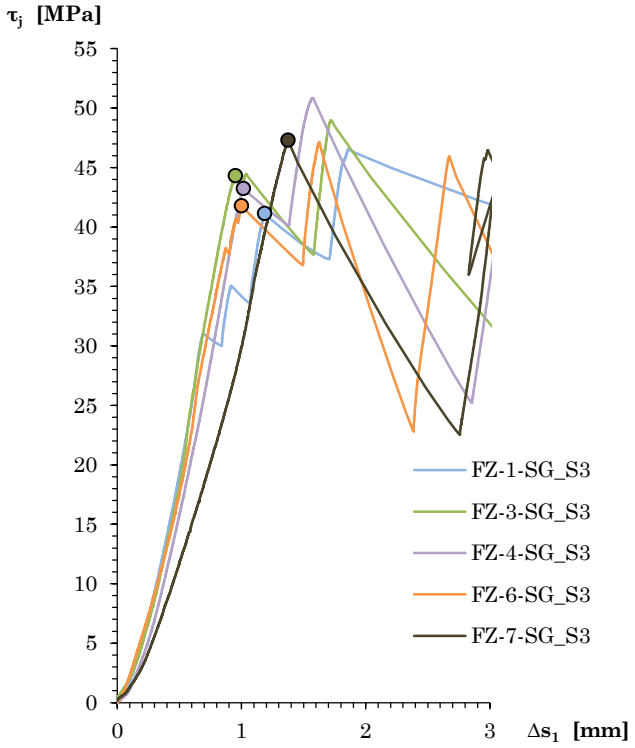


Bild 11.5-12: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-9)

Tabelle 11.5-3: Spannungen und Verschiebung $\Delta s_{1,r}$ bei Versagen der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa

Kennzeichnung		$\tau_{j,r}$ [MPa]	$\sigma_{j,r}$ [MPa]	$\Delta s_{1,r}$ [mm]
FZ-1-SG_S3		41,13	-89,79	1,187
FZ-3-SG_S3		44,32	-90,41	0,953
FZ-4-SG_S3		43,23	-89,00	1,018
FZ-6-SG_S3		41,79	-87,53	1,001
FZ-7-SG_S3		47,31	-89,46	1,375
Mittelwert	m	43,56	-89,24	1,106
Standardabweichung	s	2,44	1,08	0,174
Variationskoeffizient	v	5,60 %	1,21 %	15,72 %

Tabelle 11.5-4: Belastungshorizonte und entsprechende Absolutwerte der Ober- und Unterlasten für die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung an Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge

Fugennormal-spannung	Fugenversagen unter statischer Belastung				Belastungshorizonte unter zyklischer Belastung		
		m	s	v		F_o	F_u
[MPa]						[kN]	[kN]
6	F_r	29,3 kN	5,21 kN	17,78 %			
					0,90:0,05	26,4	1,5
					0,85:0,05	24,9	1,5
					0,80:0,05	23,4	1,5
40	F_r	215,6 kN	10,63 kN	4,93 %			
					0,90:0,05	194,0	10,8
					0,85:0,05	183,3	10,8
					0,80:0,05	172,5	10,8
90	F_r	412,2 kN	21,44 kN	5,20 %			
					0,90:0,05	371,0	20,6
					0,85:0,05	350,4	20,6
					0,80:0,05	329,8	20,6

11.5.3.3 Ergebnisse für die Versuchskörper mit verzahnter Fuge

In Bild 11.5-13 bis Bild 11.5-16 sind die Ergebnisse der Abscherversuche unter statischer Belastung für die Versuchskörper mit verzahnter Fuge dargestellt. Beim Bruch der Verzahnung kam es zu einem deutlichen Abfall der Prüfkraft F. Der Abfall der Prüfkraft F war umso ausgeprägter, wenn die Verzahnung der beiden Fugen gleichzeitig versagte. Versagte nur die Verzahnung einer Fuge, kam es zunächst zu einem geringeren, aber dennoch deutlichen Abfall der Prüfkraft F. Die Prüfkraft F stieg dann erneut bis zum Versagen der Verzahnung der anderen Fuge an, gefolgt von einem weiteren deutlichen Abfall. Während der Versuche war bei den Versuchskörpern mit einer Fugennormalspannung von 0 MPa, bei den Versuchskörpern mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa und bei den Versuchskörpern mit einer Fugennormalspannung von 40 MPa eine Zunahme der Fugennormalspannung zu beobachten. Bei den Versuchskörpern mit einer Fugennormalspannung von 90 MPa war die Fugennormalspannung bis zum Bruch der Verzahnung konstant und ist dann mit zunehmender Verschiebung Δs_1 stark abgefallen. Dies ist neben dem Bruch der Verzahnung auch auf das Versagen von verzahnungsnahen Bereichen der Versuchskörper zurückzuführen (vgl. Anhang D.3.2.3).

Bei Bild 11.5-17 bis Bild 11.5-20 handelt es sich um einen Ausschnitt aus den τ_j-Δs_1-Kurven der in Bild 11.5-13 bis Bild 11.5-16 dargestellten Diagramme. Darin sind die Punkte hervorgehoben, die das Versagen der Versuchskörper mit verzahnter Fuge kennzeichnen. Der Tabelle 11.5-5 bis Tabelle 11.5-8 können die entsprechenden Werte für die Schubspannung $\tau_{j,ult}$, die Normalspannung $\sigma_{j,ult}$ und die Verschiebung $\Delta s_{1,ult}$ entnommen werden. Es sei darauf hingewiesen, dass bei der Mittelwertbildung und der weiteren Auswertung nicht die Ergebnisse aller Versuchskörper mit verzahnter Fuge berücksichtigt wurden. Ein im Vergleich zu den anderen Versuchskörpern mit gleicher Fugennormalspannung frühes Versagen bei niedriger Prüfkraft F wurde einer ungleichmäßigen Belastung der Fugen zugeschrieben (FZ-2-V_S1, FZ-3-V_S2, FZ-10-V_S4 und FZ-21-V_S4).

Die Belastungshorizonte für die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge wurden auf Basis der Prüfkraft F_{ult} berechnet (vgl. Tabelle 11.5-9).

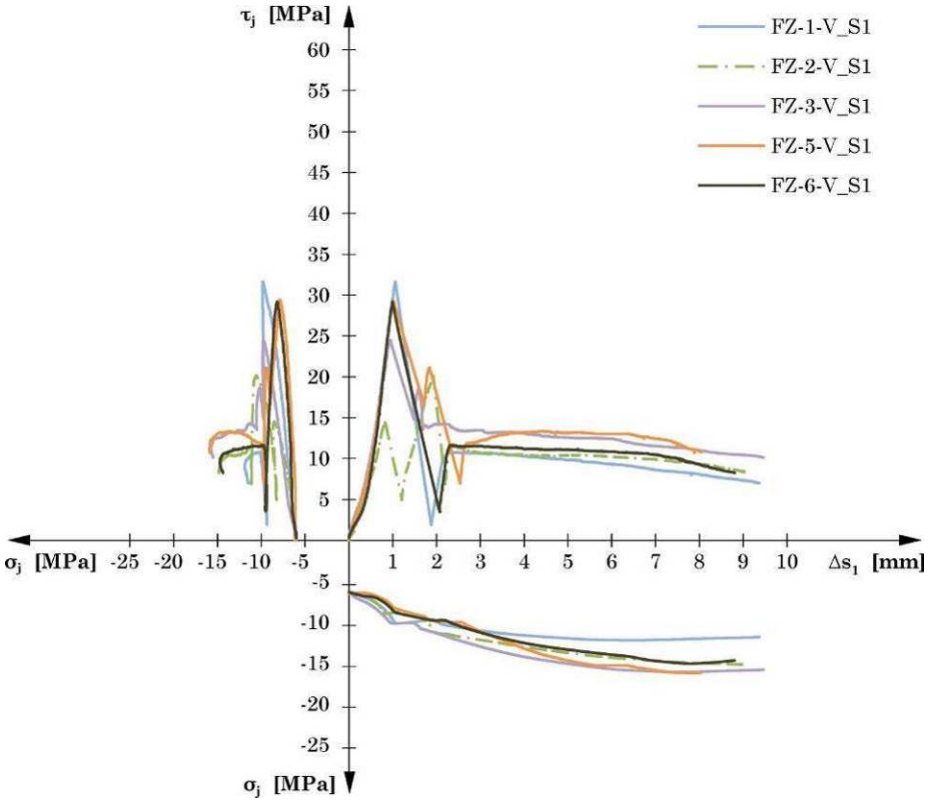


Bild 11.5-13: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa

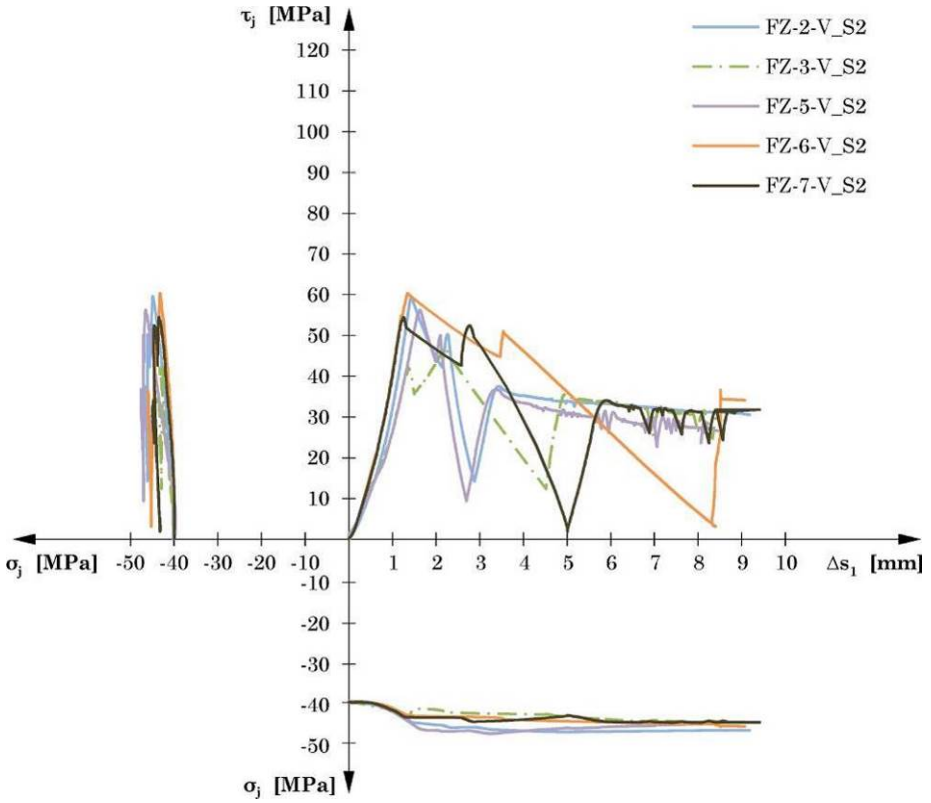


Bild 11.5-14: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa

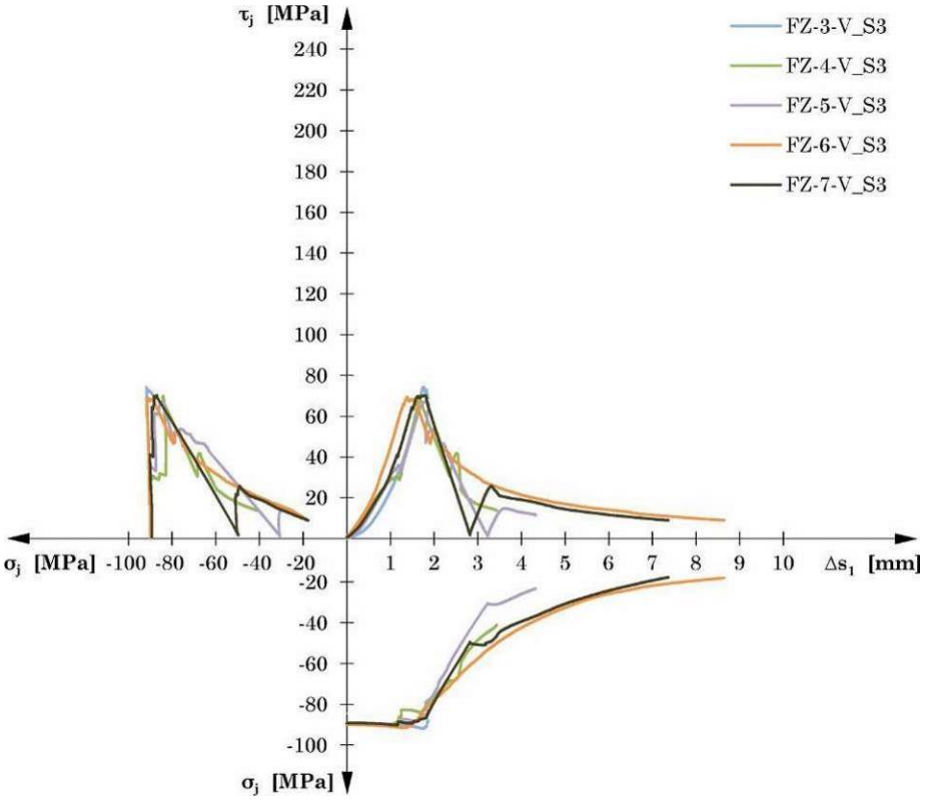


Bild 11.5-15: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa

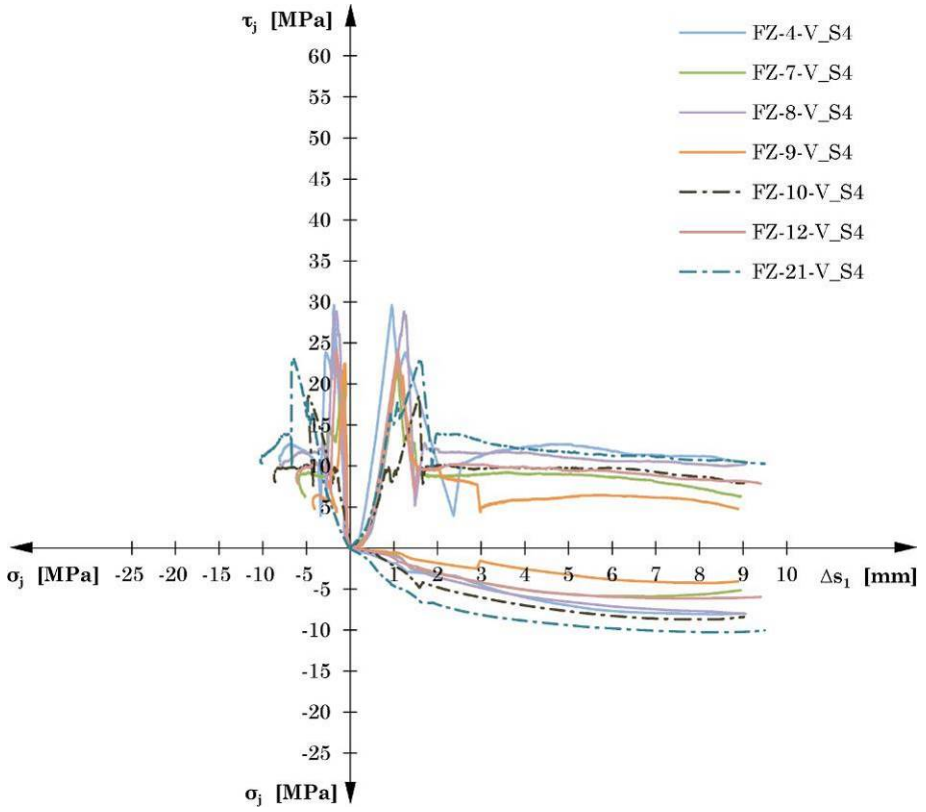


Bild 11.5-16: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa

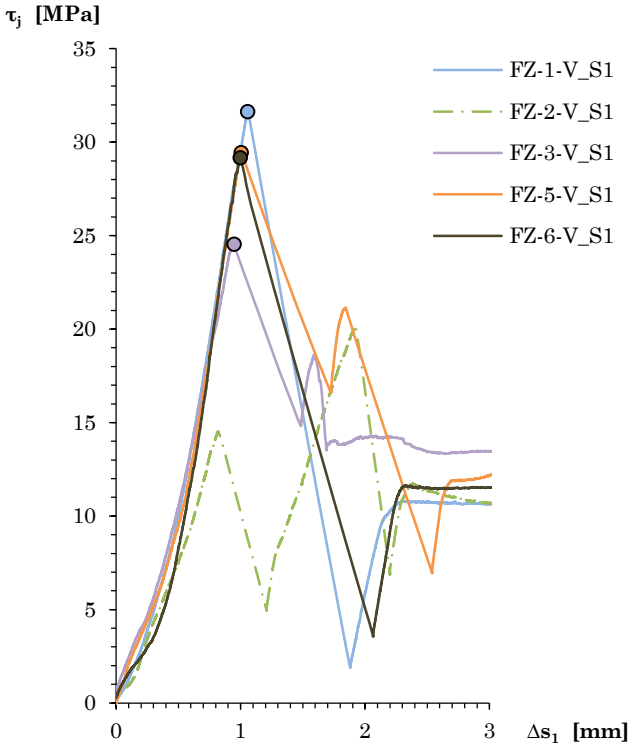


Bild 11.5-17: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-13)

Tabelle 11.5-5: Spannungen und Verschiebung $\Delta s_{1,ult}$ bei Versagen der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa

Kennzeichnung		$\tau_{j,ult}$ [MPa]	$\sigma_{j,ult}$ [MPa]	$\Delta s_{1,ult}$ [mm]
FZ-1-V_S1		31,62	-9,82	1,058
FZ-2-V_S1 [1)]		14,52	-8,51	0,823
FZ-3-V_S1		24,53	-9,75	0,949
FZ-5-V_S1		29,42	-7,87	1,006
FZ-6-V_S1		29,16	-8,19	0,997
Mittelwert	m	28,68	-8,91	1,002
Standardabweichung	s	2,98	1,03	0,045
Variationskoeffizient	v	10,39 %	11,51 %	4,45 %

[1)] Die Ergebnisse des Versuchskörpers wurden bei der Mittelwertbildung und der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.

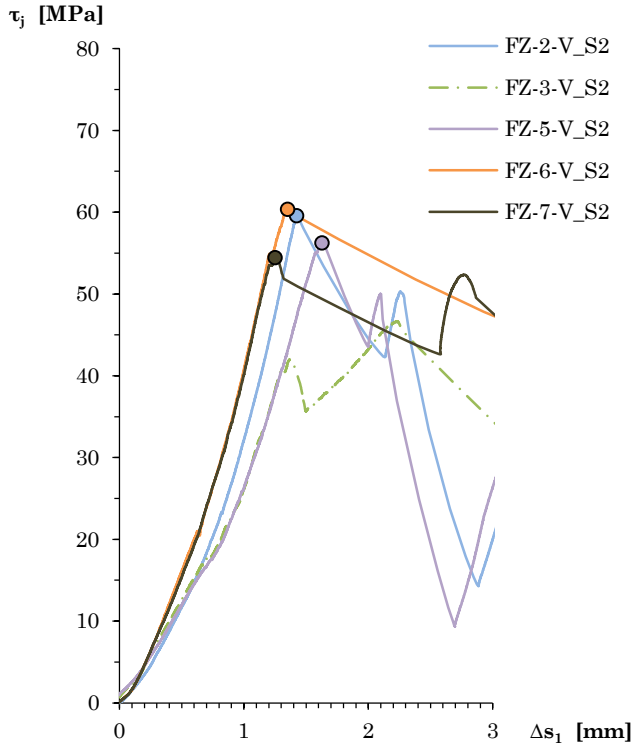


Bild 11.5-18: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-14)

Tabelle 11.5-6: Spannungen und Verschiebung $\Delta s_{1,ult}$ bei Versagen der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa

Kennzeichnung		$\tau_{j,ult}$ [MPa]	$\sigma_{j,ult}$ [MPa]	$\Delta s_{1,ult}$ [mm]
FZ-2-V_S2		59,56	-44,89	1,426
FZ-3-V_S2 [1)]		42,04	-43,31	1,371
FZ-5-V_S2		56,25	-46,49	1,628
FZ-6-V_S2		60,35	-43,23	1,352
FZ-7-V_S2		54,43	-43,44	1,251
Mittelwert	m	57,65	-44,51	1,414
Standardabweichung	s	2,79	1,51	0,160
Variationskoeffizient	v	4,83 %	3,40 %	11,28 %

[1)] Die Ergebnisse des Versuchskörpers wurden bei der Mittelwertbildung und der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.

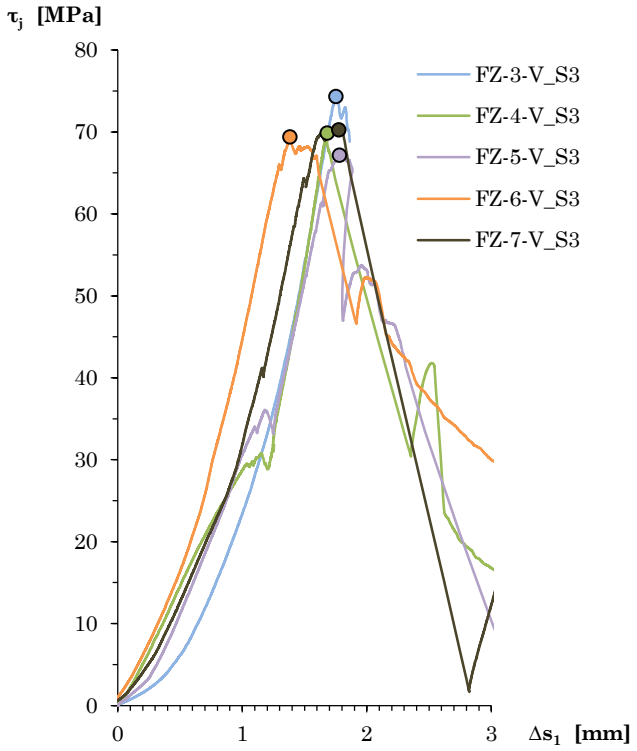


Bild 11.5-19: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-15)

Tabelle 11.5-7: Spannungen und Verschiebung $\Delta s_{1,ult}$ bei Versagen der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa

Kennzeichnung		$\tau_{j,ult}$ [MPa]	$\sigma_{j,ult}$ [MPa]	$\Delta s_{1,ult}$ [mm]
FZ-3-V_S3		74,34	-91,87	1,753
FZ-4-V_S3		69,86	-84,20	1,682
FZ-5-V_S3		67,15	-85,37	1,782
FZ-6-V_S3		69,40	-91,43	1,384
FZ-7-V_S3		70,24	-87,01	1,776
Mittelwert	m	70,20	-87,98	1,675
Standardabweichung	s	2,61	3,50	0,167
Variationskoeffizient	v	3,71 %	3,98 %	10,00 %

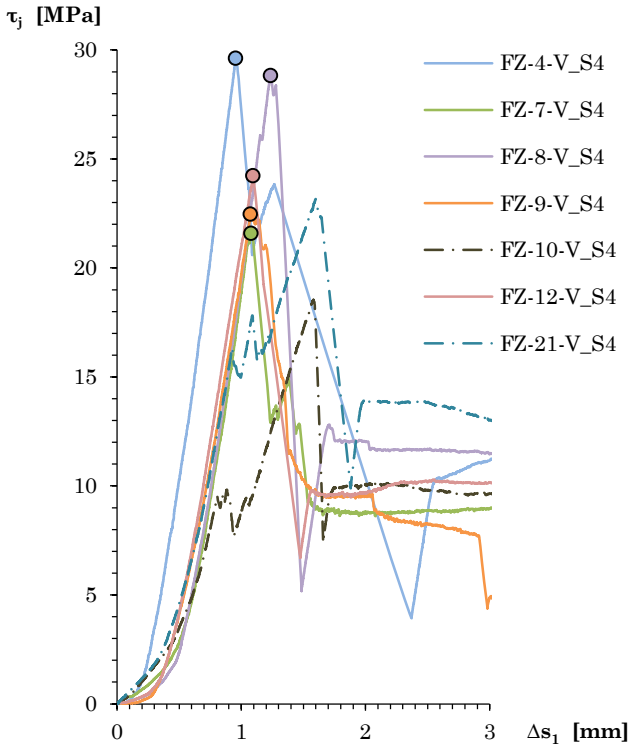


Bild 11.5-20: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-16)

Tabelle 11.5-8: Spannungen und Verschiebung $\Delta s_{1,ult}$ bei Versagen der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa

Kennzeichnung		$\tau_{j,ult}$ [MPa]	$\sigma_{j,ult}$ [MPa]	$\Delta s_{1,ult}$ [mm]
FZ-4-V_S4		29,62	-1,85	0,954
FZ-7-V_S4		21,59	-0,91	1,077
FZ-8-V_S4		28,83	-1,58	1,237
FZ-9-V_S4		22,47	-0,56	1,073
FZ-10-V_S4 [1)]		18,53	-4,76	1,581
FZ-12-V_S4		24,23	-1,59	1,095
FZ-21-V_S4 [1)]		23,17	-6,48	1,598
Mittelwert	m	25,35	-1,30	1,087
Standardabweichung	s	3,68	0,54	0,101
Variationskoeffizient	v	14,50 %	41,60 %	9,25 %

[1)] Die Ergebnisse der Versuchskörper wurden bei der Mittelwertbildung und der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.

Tabelle 11.5-9: Belastungshorizonte und entsprechende Absolutwerte der Ober- und Unterlasten für die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge

Fugennormal-spannung	Fugenversagen unter statischer Belastung				Belastungshorizonte unter zyklischer Belastung		
		m	s	v		F_o	F_u
[MPa]						[kN]	[kN]
6	F_{ult}	267,4 kN	28,35 kN	10,61 %			
					0,90:0,05	240,7	13,4
					0,85:0,05	227,3	13,4
					0,80:0,05	213,9	13,4
40	F_{ult}	539,1 kN	24,70 kN	4,58 %			
					0,90:0,05	485,2	27,0
					0,85:0,05	458,2	27,0
					0,80:0,05	431,3	27,0
90	F_{ult}	657,3 kN	27,95 kN	4,25 %			
					0,90:0,05	591,6	32,9
					0,85:0,05	558,7	32,9
					0,80:0,05	525,8	32,9
0	F_{ult}	237,0 kN	33,66 kN	14,20 %			
					0,80:0,05	189,6	11,9
					0,75:0,05	177,8	11,9
					0,70:0,05	165,9	11,9
					0,65:0,05	154,1	11,9
					0,60:0,05	142,2	11,9

11.5.4 Versuchsergebnisse unter zyklischer Belastung

11.5.4.1 Auswertung der Versuche

Das Verhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung wird in der Regel in Einstufenversuchen, auch Wöhlerversuche genannt, untersucht.

Bei den Abscherversuchen wurden die Versuchskörper einer zyklischen Belastung mit konstanter Oberlast F_o und konstanter Unterlast F_u unterworfen. Die Versuche endeten mit dem Versagen des Versuchskörpers bzw. der Fugen oder mit dem Erreichen der vorher festgelegten Anzahl von $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln (vgl. Abschnitt 11.5.1).

Die Ergebnisse der Wöhlerversuche wurden in einem Wöhlerdiagramm dargestellt. In das Diagramm wurden die Wertepaare aus der bezogenen Oberlast T_o und der zugehörigen Bruchlastspielzahl N_f eingetragen. Die bezogene Oberlast T_o sowie die bezogene Unterlast T_u sind dabei wie folgt definiert:

$$T_o = \frac{F_o}{F_r \quad bzw. \quad F_{ult}} \qquad (11\text{-}4)$$

$$T_u = \frac{F_u}{F_r \quad bzw. \quad F_{ult}} \qquad (11\text{-}5)$$

mit	T_o [-]	bezogene Oberlast
	T_u [-]	bezogene Unterlast
	F_o [kN]	Oberlast
	F_u [kN]	Unterlast
	F_r [mm]	Versagen der Fuge durch Gleiten (bei sehr glatter Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche)
	F_{ult} [kN]	Versagen der Fuge durch Bruch der Verzahnung

Des Weiteren wurde der Verlauf der Verschiebung Δs_1 infolge der zyklischen Belastung betrachtet, um Rückschlüsse über das Tragverhalten der Fugen während einer zyklischen Belastung ziehen zu können. Die Berechnung der Verschiebungen und Spannungen erfolgte dabei wie in Abschnitt 11.5.3.1 beschrieben.

Trat bis zu der vorher festgelegten Anzahl von $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln kein Versagen des Versuchskörpers bzw. der Fugen auf, wurde der Versuchskörper als Durchläufer bezeichnet und anschließend dessen Resttragfähigkeit unter statischer Belastung bestimmt. Die Berechnung der Verschiebungen und Spannungen sowie die Darstellung der Ergebnisse erfolgte dabei wie in Abschnitt 11.5.3.1 beschrieben.

11.5.4.2 Ergebnisse für die Versuchskörper mit sehr glatter Fuge

Eine Übersicht über die Versuchsergebnisse der Abscherversuche an Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge infolge einer zyklischen Belastung ist in Tabelle 11.5-10 dargestellt. Darin ist als Prüffrequenz f_p die Frequenz angegeben, bei der die Versuchskörper bzw. die Fugen versagten (0,1 Hz während der ersten zehn Lastwechsel, zwischen 1Hz und 10 Hz bis etwa 3000 Lastwechsel und 10 Hz ab etwa 3000 Lastwechsel).

Es sei nochmal darauf hingewiesen, dass die Absolutwerte der Oberlasten F_o und der Unterlasten F_u von den Mittelwerten der unter statischer Belastung zum Versagen der Fugen führenden Prüfkräfte F_r abgeleitet wurden. Wie die Abscherversuche unter statischer Belastung jedoch zeigten, unterlag die zum Versagen der Fugen führende Prüfkraft F_r zum Teil erheblichen Schwankungen. Demnach können die tatsächlichen Belastungshorizonte von den angestrebten Belastungshorizonten abweichen. Dies kann in Anbetracht der angestrebten hohen bezogenen Oberlasten T_o dazu führen, insbesondere bei gleichzeitig ungleichmäßiger Belastung der Fugen, dass die angestrebte bezogene Oberlast T_o nicht erreicht wird und der Versuchskörper bzw. die Fugen vorzeitig versagen. Die Versuchskörper, bei denen beim ersten Lastwechsel die Oberlast F_o nicht erreicht wurde, wurden für die weitere Auswertung nicht berücksichtigt (FZ-21-SG_S1 und FZ-9-SG_S1).

Tabelle 11.5-10: Ergebnisse der Abscherversuche an Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge infolge zyklischer Belastung

Fugennormal-spannung	Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	f_p	Bruchlastspielzahl		Bemerkung
			N_f	log N_f	
[MPa]		[Hz]	[-]	[-]	
6	FZ-7-SG_S1 (0,90 : 0,05)	10	2.000.501	6,301	Durchläufer
	FZ-21-SG_S1 (0,90 : 0,05)	0,1	0		Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 22,9 kN)
	FZ-13-SG_S1 (0,85 : 0,05)	10	2.000.002	6,301	Durchläufer
	FZ-17-SG_S1 (0,80 : 0,05)	10	2.000.001	6,301	Durchläufer
	FZ-9-SG_S1 (0,80 : 0,05)	0,1	0		Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 22,9 kN)
40	FZ-23-SG_S2 (0,90 : 0,05)	10	2.000.003	6,301	Durchläufer
	FZ-14-SG_S2 (0,85 : 0,05)	10	2.000.004	6,301	Durchläufer
	FZ-5-SG_S2 (0,80 : 0,05)	10	2.000.008	6,301	Durchläufer
90	FZ-18-SG_S3 (0,90 : 0,05)	10	2.000.000	6,301	Durchläufer
	FZ-12-SG_S3 (0,90 : 0,05)	1 - 10	150	2,176	Versagen
	FZ-11-SG_S3 (0,85 : 0,05)	10	2.000.000	6,301	Durchläufer
	FZ-14-SG_S3 (0,80 : 0,05)	10	2.000.005	6,301	Durchläufer

Darstellung der Versuchsergebnisse im Wöhlerdiagramm

In Bild 11.5-21 sind die Ergebnisse der Abscherversuche unter zyklischer Belastung an Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge in einem Wöhlerdiagramm dargestellt.

Unabhängig von der Fugennormalspannung und der angestrebten bezogenen Oberlast T_o traten fast ausschließlich Durchläufer auf. Lediglich bei einem Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 90 MPa und einer angestrebten bezogenen Oberlast von $T_o = 0{,}90$ trat ein frühzeitiges Versagen auf (FZ-12-SG_S3).

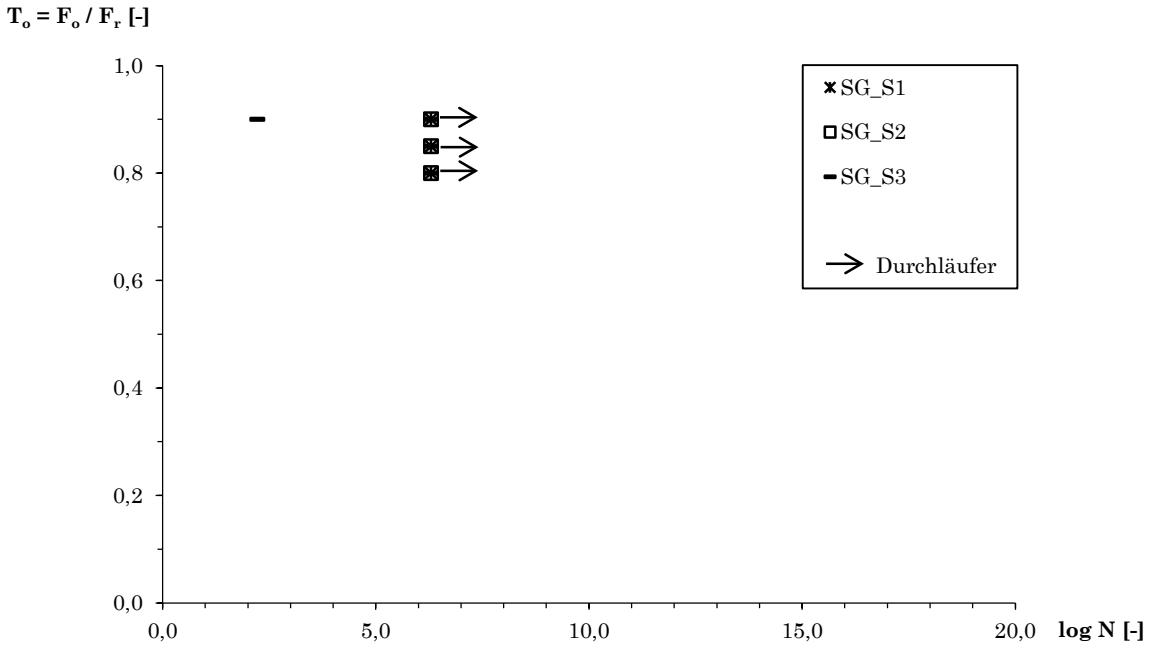


Bild 11.5-21: Vergleichende Darstellung der Bruchlastspielzahl der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa mit konstanter bezogener Unterlast $T_u = 0{,}05$

Verlauf der Verschiebung Δs_1 infolge der zyklischen Belastung

In Bild 11.5-22, Bild 11.5-24 und Bild 11.5-26 sind die τ_j-Δs_1-Kurven abgebildet. Aus diesen wird insbesondere der vollständige Verlauf der Verschiebung Δs_1 während der ersten zehn Lastwechsel in Relation zu der Bandbreite der gemessenen Verschiebung Δs_1 während der darauffolgenden Lastwechsel bis zum Versagen der Versuchskörper bzw. der Fugen oder dem Erreichen der vorher festgelegten Anzahl von $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln ersichtlich.

Der Verlauf der Verschiebung Δs_1 bis zum Versagen der Versuchskörper bzw. der Fugen oder dem Erreichen der vorher festgelegte Anzahl von $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln ist in Bild 11.5-23, Bild 11.5-25 und Bild 11.5-27 abgebildet. Dabei wurde die Anzahl der Lastwechsel N auf die Bruchlastspielzahl N_f bezogen, um Versuchskörper, bei denen ein frühzeitiges Versagen auftrat, mit Durchläufern vergleichen zu können. Der Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl zeigt, dass es während der zyklischen Belastung der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge zu keiner oder kaum einer Zunahme der Verschiebung Δs_1 kam.

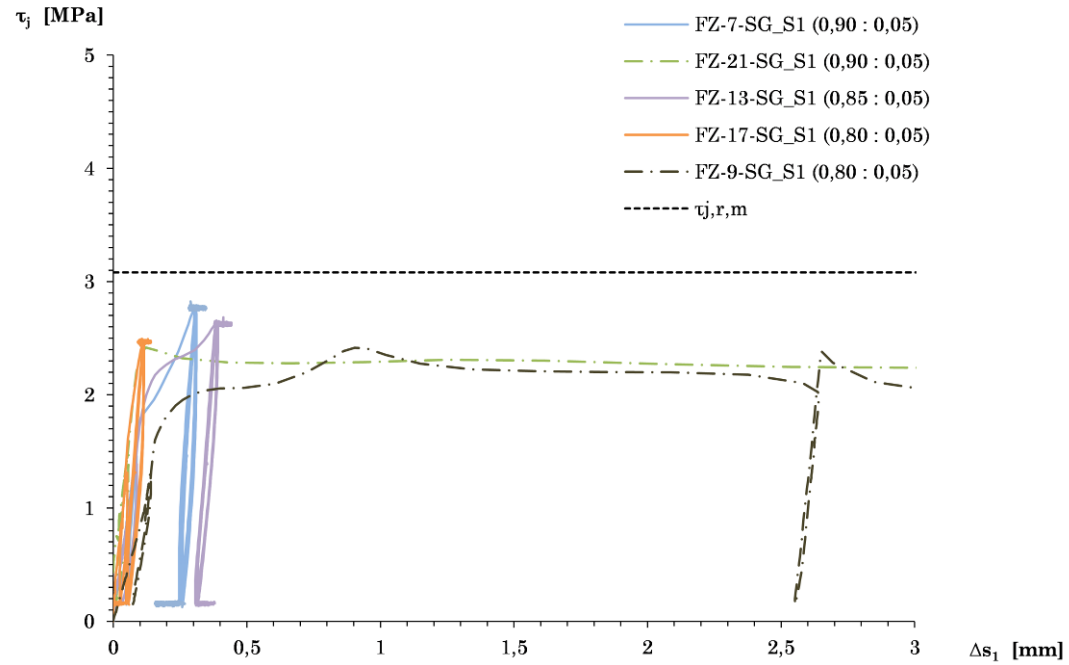


Bild 11.5-22: τ_j-Δs_1-Kurven infolge zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa

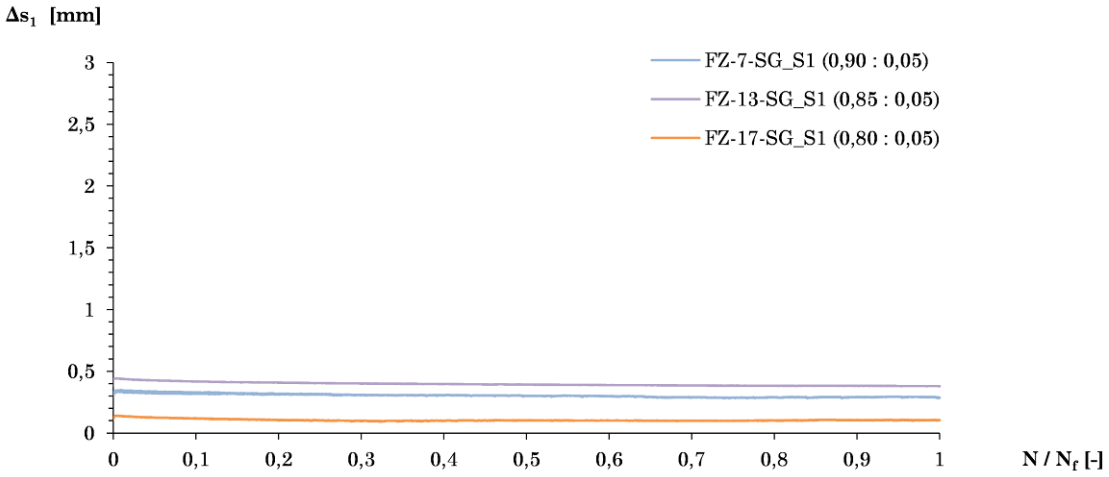


Bild 11.5-23: Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa

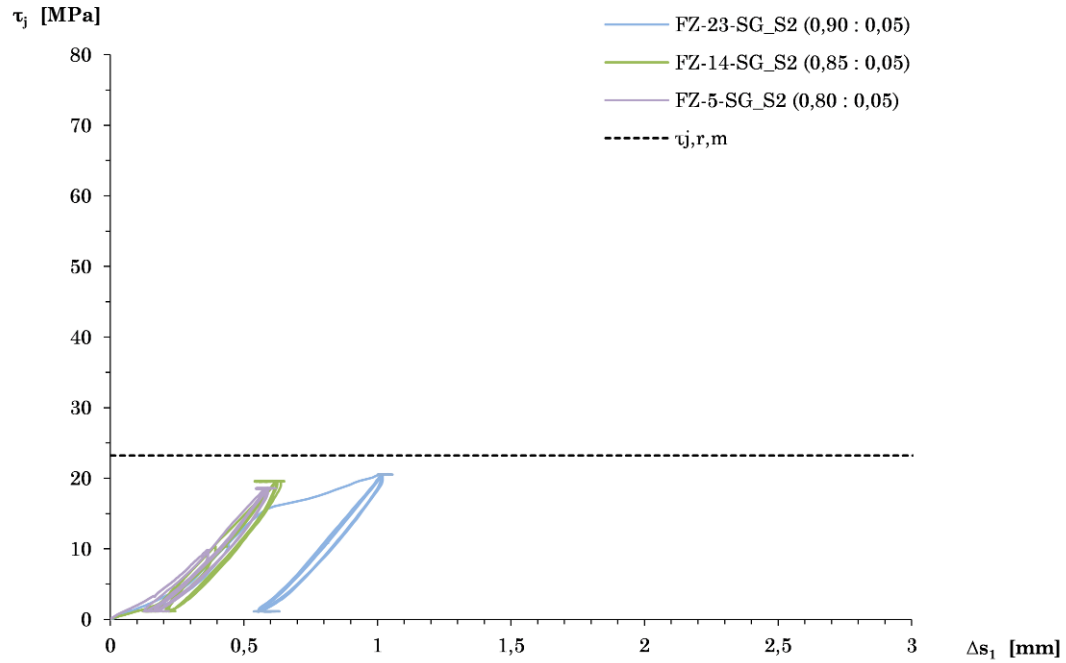


Bild 11.5-24: τ_j-Δs_1-Kurven infolge zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa

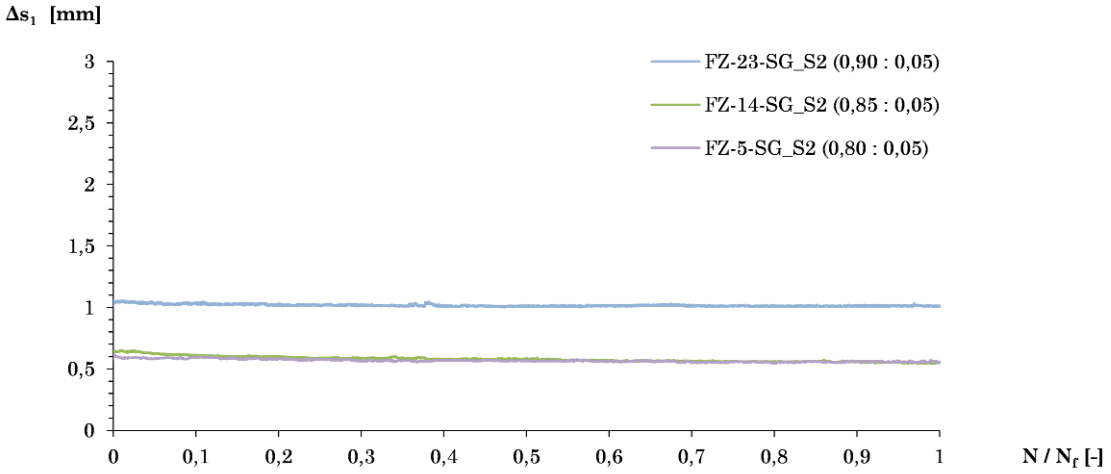


Bild 11.5-25: Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa

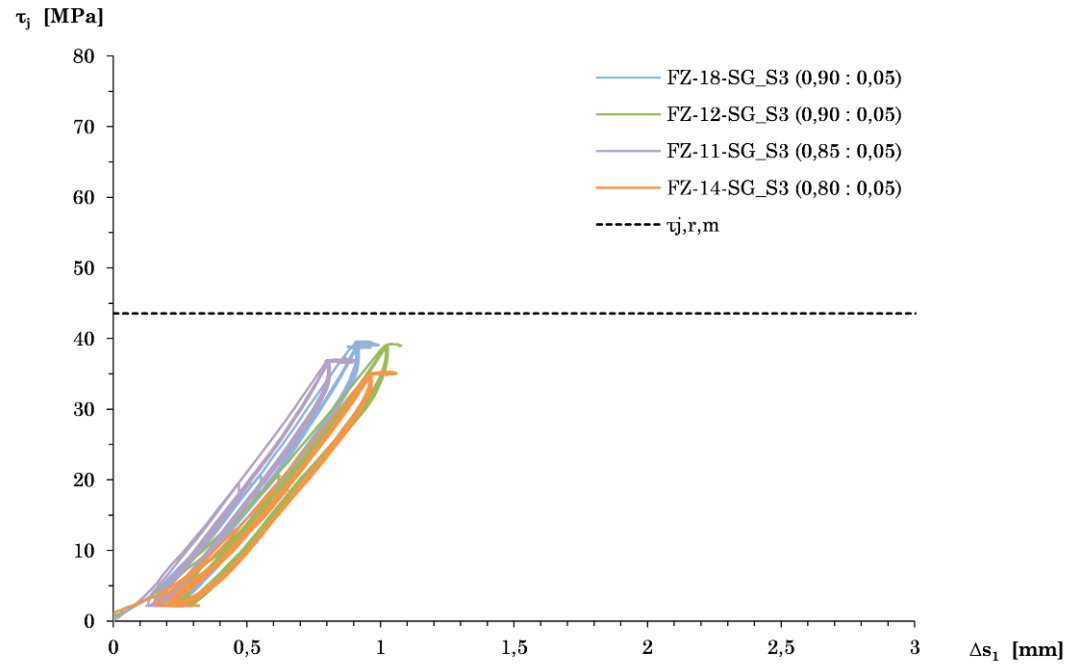


Bild 11.5-26: τ_j-Δs_1-Kurven infolge zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa

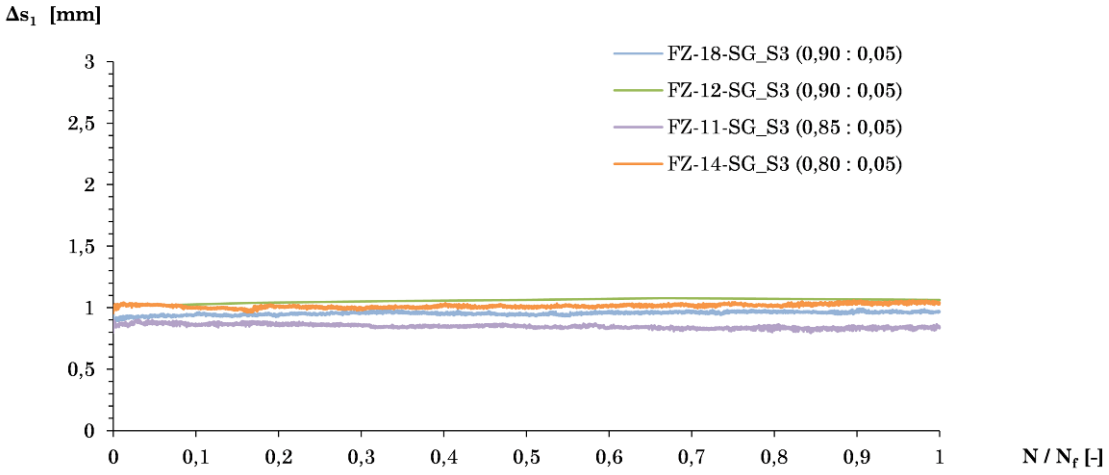


Bild 11.5-27: Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa

Prüfung der Resttragfähigkeit

In Bild 11.5-31 bis Bild 11.5-33 sind die Ergebnisse infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für die Versuchskörper mit sehr glatter Fuge dargestellt. Das dabei ermittelte Tragverhalten ist qualitativ mit dem ohne vorhergehende zyklische Belastung vergleichbar.

Bei Bild 11.5-31 bis Bild 11.5-33 handelt es sich um einen Ausschnitt aus den τ_j-Δs_1-Kurven der in Bild 11.5-31 bis Bild 11.5-33 dargestellten Diagramme. Darin sind die Punkte hervorgehoben, die das Versagen der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge kennzeichnen. Der Tabelle 11.5-11 bis Tabelle 11.5-13 können die entsprechenden Werte für die Schubspannung $\tau_{j,r}$, die Normalspannung $\sigma_{j,r}$ und die Verschiebung $\Delta s_{1,r}$ entnommen werden.

Es ist festzuhalten, dass die erreichten Schubspannung $\tau_{j,r}$ mit vorhergehender zyklischer Belastung durchwegs, und zwar um 16 % bis 74 %, über dem Mittelwert der Schubspannungen $\tau_{j,r}$ lagen, der sich aus den Abscherversuchen unter statischer Belastung ohne vorhergehende zyklische Belastung ergab. Die Versuchskörper erfuhren in diesen Fällen also keine Schädigung durch die zyklische Belastung.

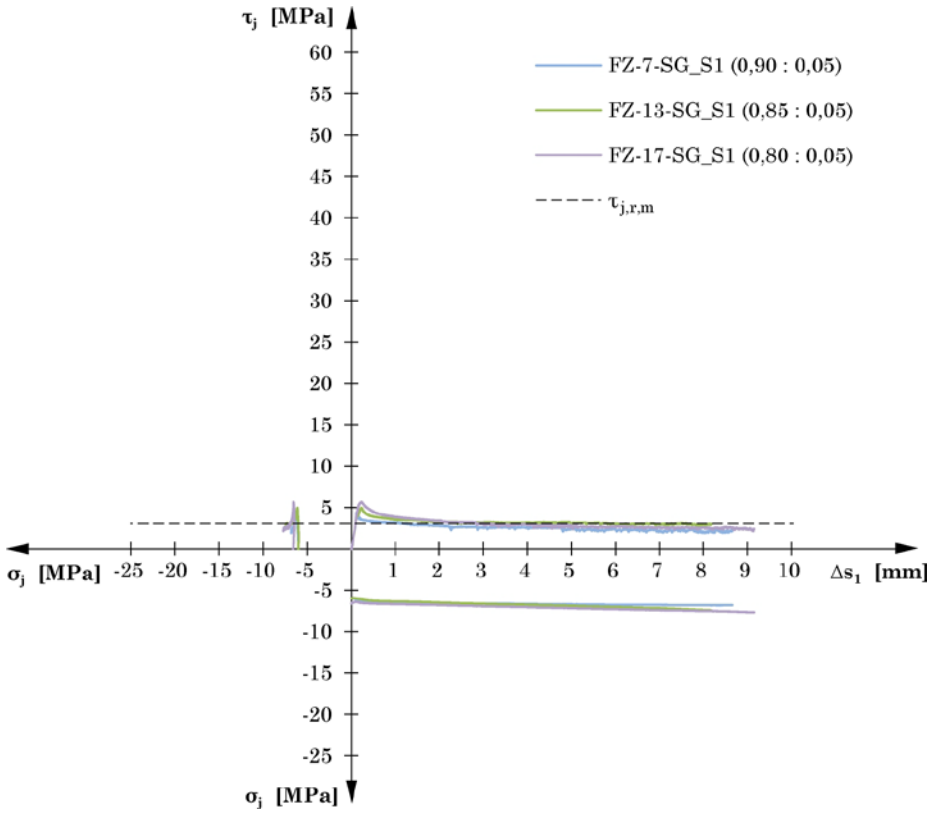


Bild 11.5-28: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa

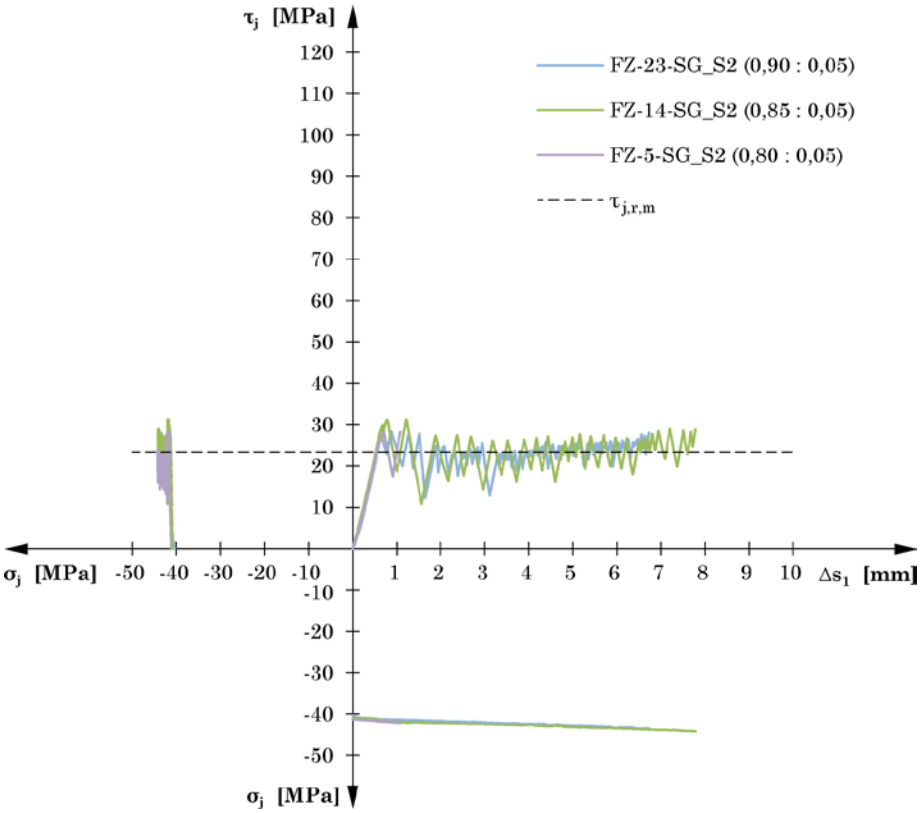


Bild 11.5-29: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa

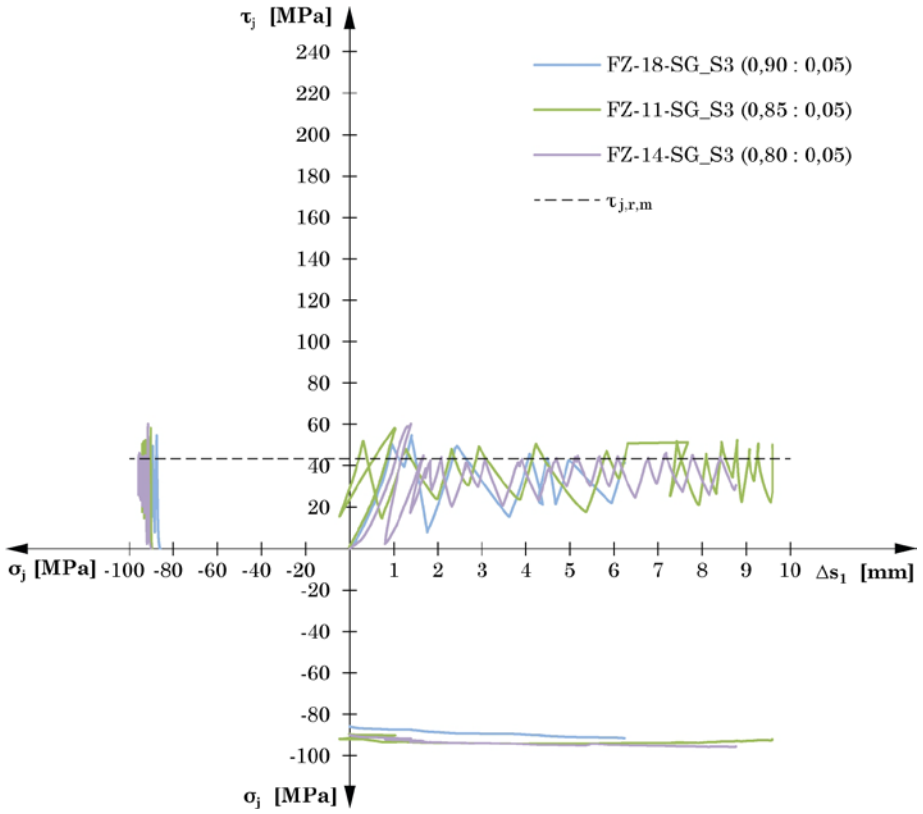


Bild 11.5-30: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa

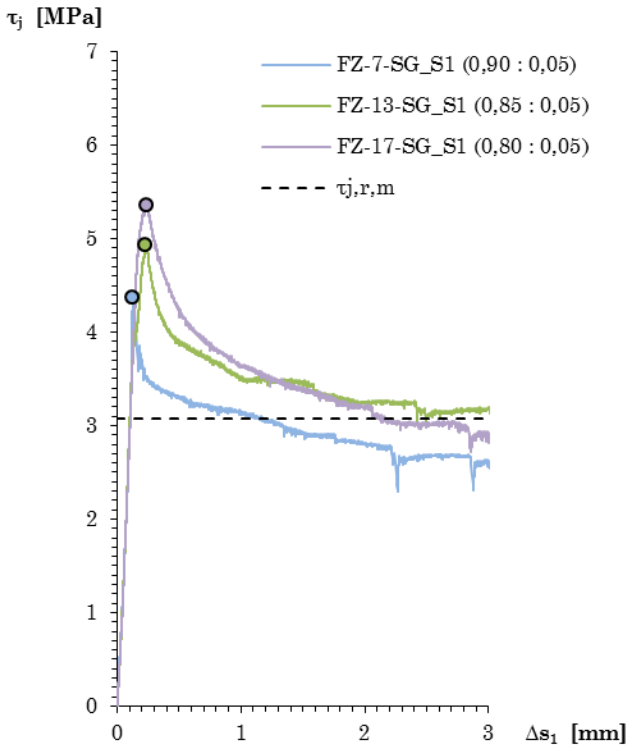


Bild 11.5-31: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-28)

Tabelle 11.5-11: Resttragfähigkeit der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa

Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Resttragfähigkeit bei Abscherversuchen unter statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung			Mittelwert der Tragfähigkeit bei Abscherversuchen unter statischer Belastung	$\tau_{j,r}$ / $\tau_{j,r,m}$
	$\tau_{j,r}$	$\sigma_{j,r}$	$\Delta s_{1,r}$	$\tau_{j,r,m}$	
	[MPa]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[-]
FZ-7-SG_S1 (0,90 : 0,05)	4,38	-6,24	0,127	3,08	1,42
FZ-13-SG_S1 (0,85 : 0,05)	4,93	-6,10	0,230	3,08	1,60
FZ-17-SG_S1 (0,80 : 0,05)	5,36	-6,21	0,234	3,08	1,74

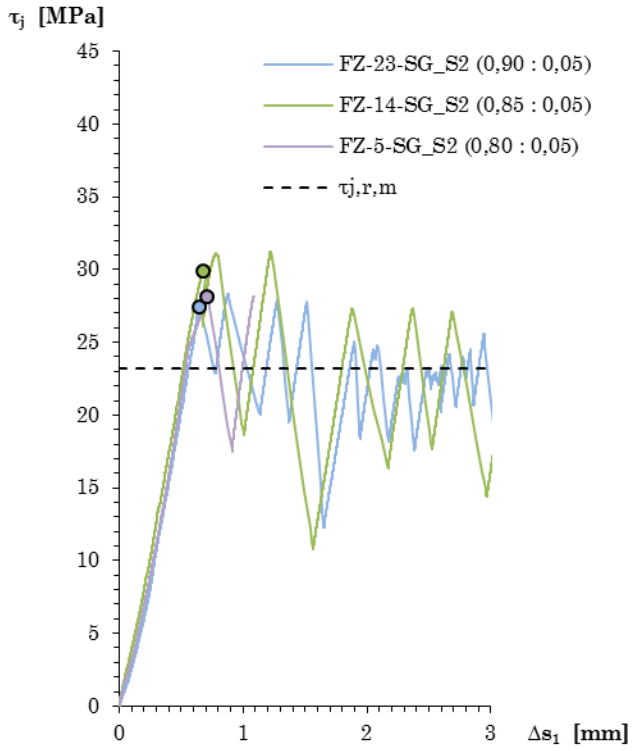


Bild 11.5-32: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-29)

Tabelle 11.5-12: Resttragfähigkeit der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa

Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Resttragfähigkeit bei Abscherversuchen unter statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung			Mittelwert der Tragfähigkeit bei Abscherversuchen unter statischer Belastung	$\tau_{j,r}$ / $\tau_{j,r,m}$
	$\tau_{j,r}$	$\sigma_{j,r}$	$\Delta s_{1,r}$	$\tau_{j,r,m}$	
	[MPa]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[-]
FZ-23-SG_S2 (0,90 : 0,05)	27,43	-41,28	0,648	23,23	1,18
FZ-14-SG_S2 (0,85 : 0,05)	29,84	-41,54	0,682	23,23	1,28
FZ-5-SG_S2 (0,80 : 0,05)	28,10	-41,85	0,716	23,23	1,21

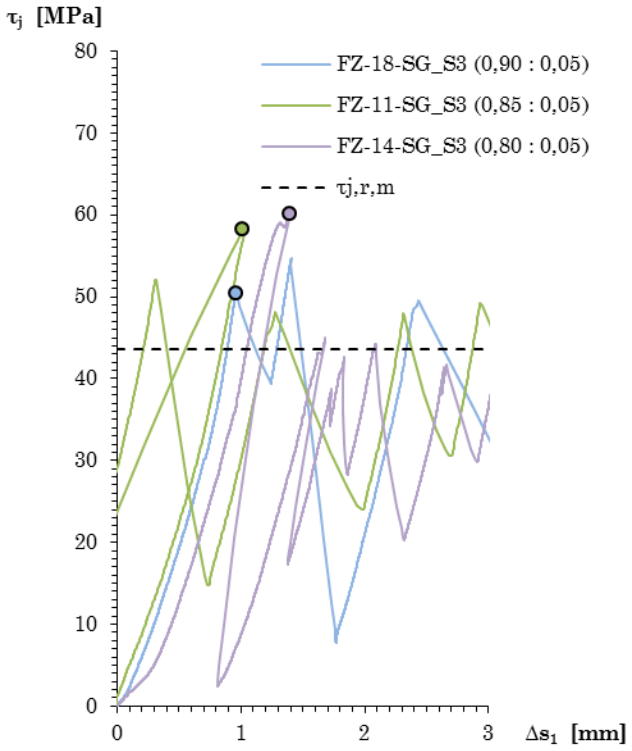


Bild 11.5-33: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-30)

Tabelle 11.5-13: Resttragfähigkeit der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa

Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Resttragfähigkeit bei Abscherversuchen unter statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung			Mittelwert der Tragfähigkeit bei Abscherversuchen unter statischer Belastung	$\tau_{j,r}$ / $\tau_{j,r,m}$
	$\tau_{j,r}$	$\sigma_{j,r}$	$\Delta s_{1,r}$	$\tau_{j,r,m}$	
	[MPa]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[-]
FZ-18-SG-S3 (0,90 :0,05)	50,35	-87,52	0,961	43,56	1,16
FZ-11-SG_S3 (0,85 :0,05)	58,21	-90,22	1,017	43,56	1,34
FZ-14-SG_S3 (0,80 : 0,05)	60,17	-91,68	1,393	43,56	1,38

11.5.4.3 Ergebnisse für die Versuchskörper mit verzahnter Fuge

Eine Übersicht über die Versuchsergebnisse der Abscherversuche an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge infolge einer zyklischen Belastung ist in Tabelle 11.5-14 dargestellt. Darin ist als Prüffrequenz f_p die Frequenz angegeben, bei der die Versuchskörper bzw. die Fugen versagten (0,1 Hz während der ersten zehn Lastwechsel, zwischen 1 Hz und 10 Hz bis etwa 3000 Lastwechsel und 10 Hz ab etwa 3000 Lastwechsel). Beim Versuchskörper FZ-13-V_S3 wurde, bedingt durch die hohe Beanspruchung der Prüfmaschine, lediglich eine Prüffrequenz f_p von 9 Hz erreicht.

Aus den gleichen wie bereits in Abschnitt 11.5.4.2 erwähnten Gründen wurden die Versuchskörper, bei denen beim ersten Lastwechsel die Oberlast F_o nicht erreicht wurde, für die weitere Auswertung nicht berücksichtigt (FZ-25-V_S4, FZ-13-V_S4, FZ-18-V_S4, FZ-19-V_S4, FZ-23-V_S4 und FZ-17-SG_S1).

Tabelle 11.5-14: Ergebnisse der Abscherversuche an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge infolge zyklischer Belastung

Fugennormal-spannung	Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	f_p	Bruchlastspielzahl		Bemerkung
			N_f	log N_f	
[MPa]		[Hz]	[-]	[-]	
6	FZ-7-V_S1 (0,90 : 0,05)	10	18.431	4,266	Versagen
	FZ-9-V_S1 (0,85 : 0,05)	10	815.172	5,911	Versagen
	FZ-4-V_S1 (0,80 : 0,05)	10	2.000.000	6,301	Durchläufer
40	FZ-23-V_S2 (0,90 : 0,05)	10	2.000.003	6,301	Durchläufer
	FZ-22-V_S2 (0,85 : 0,05)	10	2.000.010	6,301	Durchläufer
	FZ-8-V_S2 (0,85 : 0,05)	1 - 10	303	2,481	Versagen (bereits während der ersten zehn Lastwechsel kam es zur Schädigung des Versuchskörpers)
	FZ-1-V_S2 (0,80 : 0,05)	10	2.000.011	6,301	Durchläufer
90	FZ-13-V_S3 (0,90 : 0,05)	9	2.000.004	6,301	Durchläufer
	FZ-12-V_S3 (0,85 : 0,05)	10	2.000.507	6,301	Durchläufer
	FZ-15-V_S3 (0,85 : 0,05)	1 - 10	107	2,029	Versagen (bereits während der ersten zehn Lastwechsel kam es zur Schädigung des Versuchskörpers)
	FZ-2-V_S3 (0,80 : 0,05)	10	2.000.008	6,301	Durchläufer

Tabelle 11.5-14 (fortgesetzt): Ergebnisse der Abscherversuche an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge infolge zyklischer Belastung

Fugennormal-spannung	Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	f_p	Lastwechsel		Bemerkung
			N_f	log N_f	
[MPa]		[Hz]	[-]	[-]	
0	FZ-3-V_S4 (0,80 : 0,05)	1 - 10	2.533	3,404	Versagen
	FZ-15-V_S4 (0,80 : 0,05)	1 - 10	35	1,544	Versagen
	FZ-2-V_S4 (0,80 : 0,05)	0,1	5	0,699	Versagen
	FZ-16-V_S4 (0,75 : 0,05)	1 - 10	149	2,173	Versagen
	FZ-22-V_S4 (0,75 : 0,05)	1 - 10	101	2,004	Versagen
	FZ-25-V_S4 (0,75 : 0,05)	0,1	0		Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 146,3 kN)
	FZ-14-V_S4 (0,70 : 0,05)	10	249.194	5,397	Versagen
	FZ-6-V_S4 (0,70 : 0,05)	1 - 10	280	2,447	Versagen
	FZ-1-V_S4 (0,70 : 0,05)	0,1	1	0	Versagen
	FZ-5-V_S4 (0,65 : 0,05)	1 - 10	20	1,301	Versagen
	FZ-24-V_S4 (0,65 : 0,05)	0,1	2	0,301	Versagen
	FZ-13-V_S4 (0,65 : 0,05)	0,1	0		Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 106,4 kN)
	FZ-18-V_S4 (0,65 : 0,05)	0,1	0		Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 133,4 kN)
	FZ-19-V_S4 (0,65 : 0,05)	0,1	0		Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 143,2 kN)
	FZ-23-V_S4 (0,65 : 0,05)	0,1	0		Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 99,1 kN)
	FZ-11-V_S4 (0,60 : 0,05)	10	2.000.501	6,301	Durchläufer
	FZ-20-V_S4 (0,60 : 0,05)	1 - 10	1.485	3,172	Versagen
	FZ-17-V_S4 (0,60 : 0,05)	0,1	0		Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 113,9 kN)

Darstellung der Versuchsergebnisse im Wöhlerdiagramm

In Bild 11.5-34 sind die Ergebnisse der Abscherversuche unter zyklischer Belastung an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge in einem Wöhlerdiagramm dargestellt.

Bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa trat unabhängig von den angestrebten bezogenen Oberlasten T_o fast ausschließlich ein frühzeitiges Versagen auf. Lediglich beim Versuchskörper FZ-11-V_S4 mit einer Fugennormalspannung von 0 MPa und einer angestrebten bezogenen Oberlast T_o von 0,60 handelt es sich um einen Durchläufer. Mit zunehmender Fugennormalspannungen bei gleichzeitig höheren angestrebten Oberlasten T_o nahm die Bruchlastspielzahl zu. Bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa und 90 MPa handelte es sich bei mindestens einem Versuchskörper je angestrebter Oberlast T_o um einen Durchläufer.

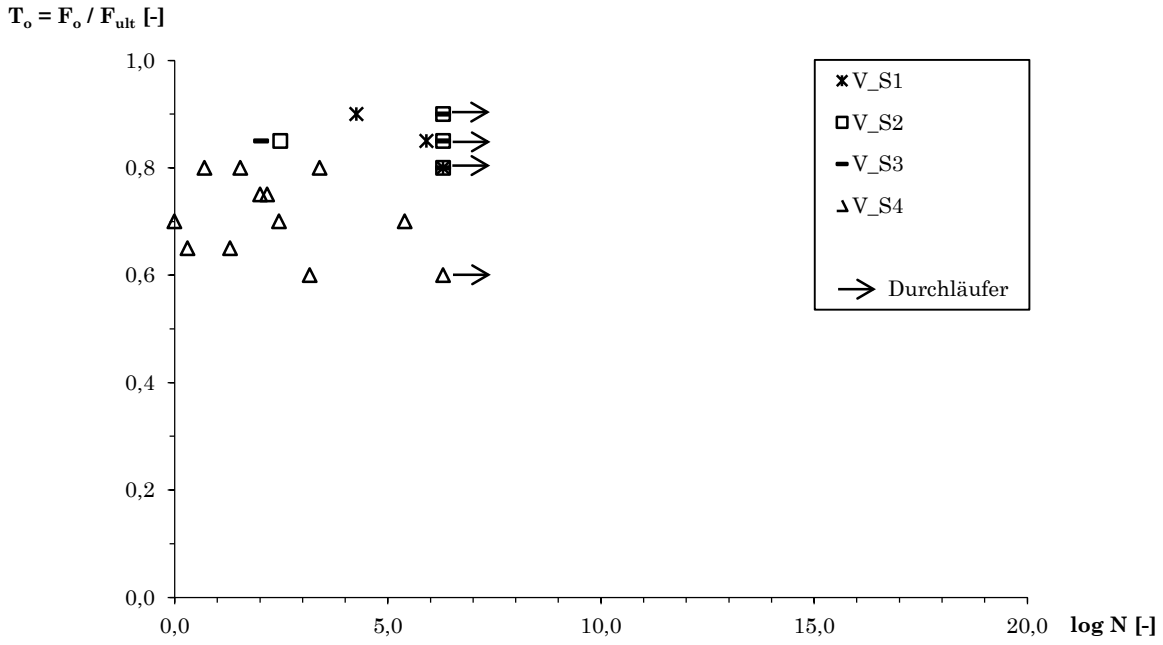


Bild 11.5-34: Vergleichende Darstellung der Bruchlastspielzahl der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa, 90 MPa und 0 MPa mit konstanter bezogener Unterlast $T_u = 0{,}05$

Verlauf der Verschiebung Δs_1 infolge der zyklischen Belastung

In Bild 11.5-35, Bild 11.5-37, Bild 11.5-39 und Bild 11.5-41 sind die τ_j-Δs_1-Kurven abgebildet. Aus diesen wird insbesondere der vollständige Verlauf der Verschiebung Δs_1 während der ersten zehn Lastwechsel in Relation zu der Bandbreite der gemessenen Verschiebung Δs_1 während der darauffolgenden Lastwechsel bis zum Versagen der Versuchskörper bzw. der Fugen oder dem Erreichen der vorher festgelegten Anzahl von $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln ersichtlich.

Der Verlauf der Verschiebung Δs_1 bis zum Versagen der Versuchskörper bzw. der Fugen oder dem Erreichen der vorher festgelegte Anzahl von $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln ist in Bild 11.5-36, Bild 11.5-38, Bild 11.5-40 und Bild 11.5-42 abgebildet. Dabei wurde die Anzahl der Lastwechsel N auf die Bruchlastspielzahl N_f bezogen, um Versuchskörper, bei denen ein frühzeitiges Versagen auftrat, mit Durchläufern vergleichen zu können. Der Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl zeigt, dass es während der zyklischen Belastung der Versuchskörper mit verzahnter Fuge im Allgemeinen zu keiner oder kaum einer Zunahme der Verschiebung Δs_1 kam. Lediglich bei einigen Ver-

suchskörpern mit einer Fugennormalspannung von 0 MPa kam es zu einer geringfügig größeren Zunahme der Verschiebung Δs_1. Eine deutliche Zunahme der Verschiebung Δs_1 war beim Versuchskörper FZ-8-V_S2 mit einer Fugennormalspannung von 40 MPa und einer angestrebten bezogenen Oberlast T_o von 0,85 zu beobachten, bei dem allerdings bereits während der ersten zehn Lastwechsel eine deutlich sichtbare Schädigung einer der beiden Fugen auftrat.

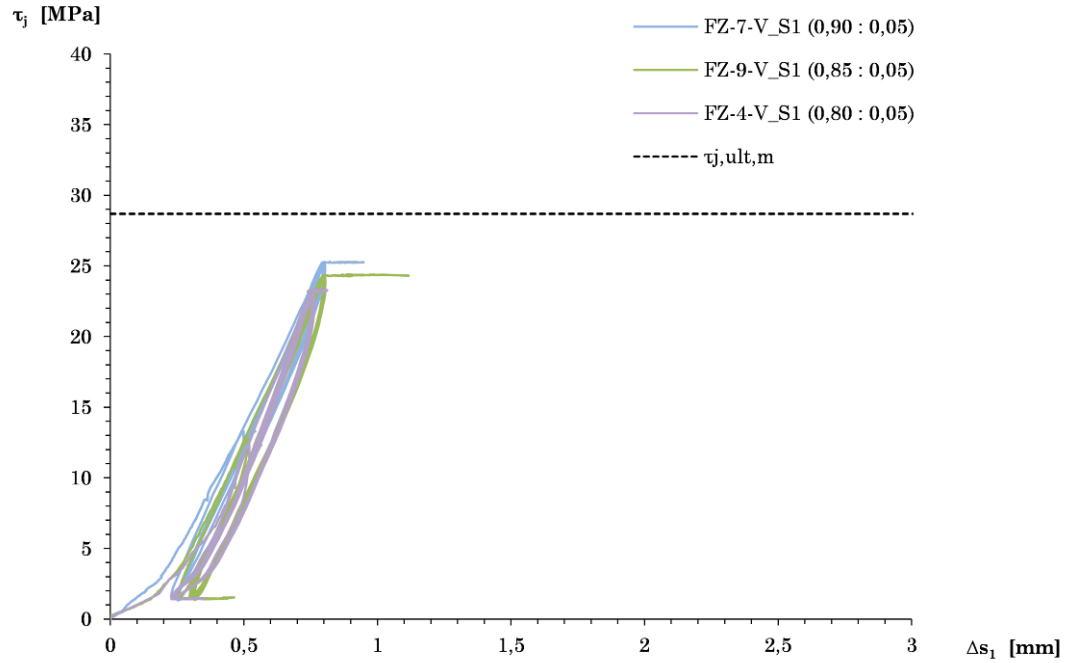


Bild 11.5-35: τ_j-Δs_1-Kurven infolge zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa

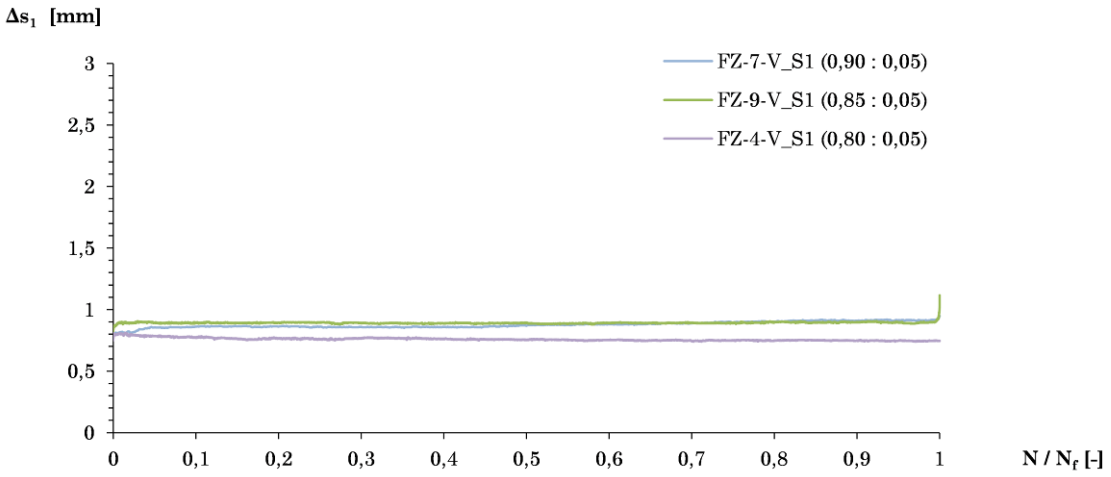


Bild 11.5-36: Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa

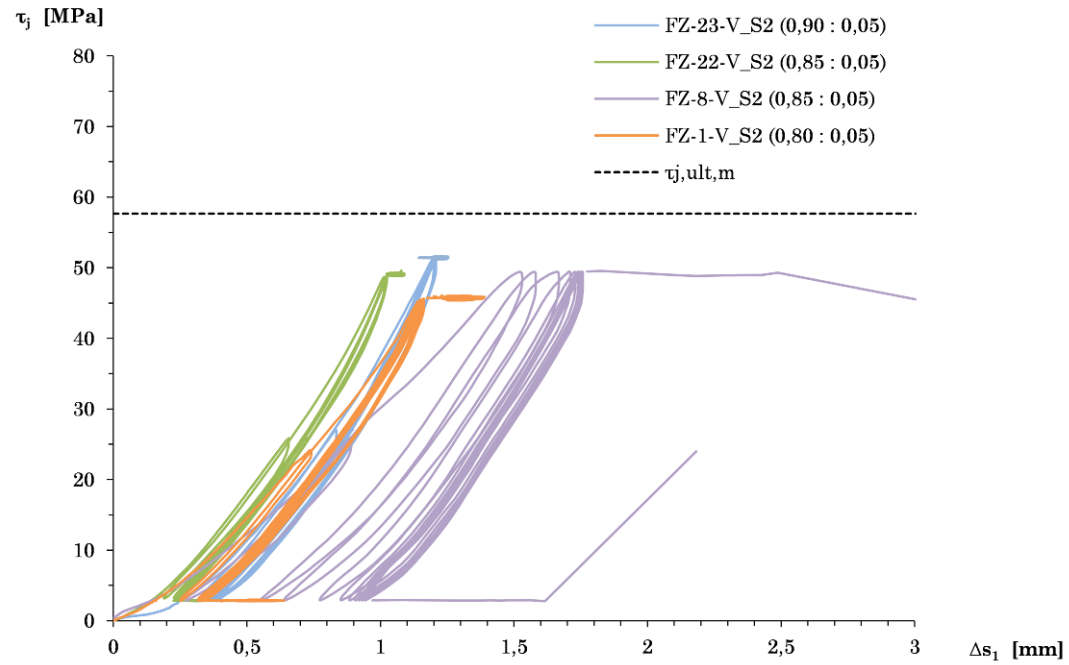


Bild 11.5-37: τ_j-Δs_1-Kurven infolge zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa

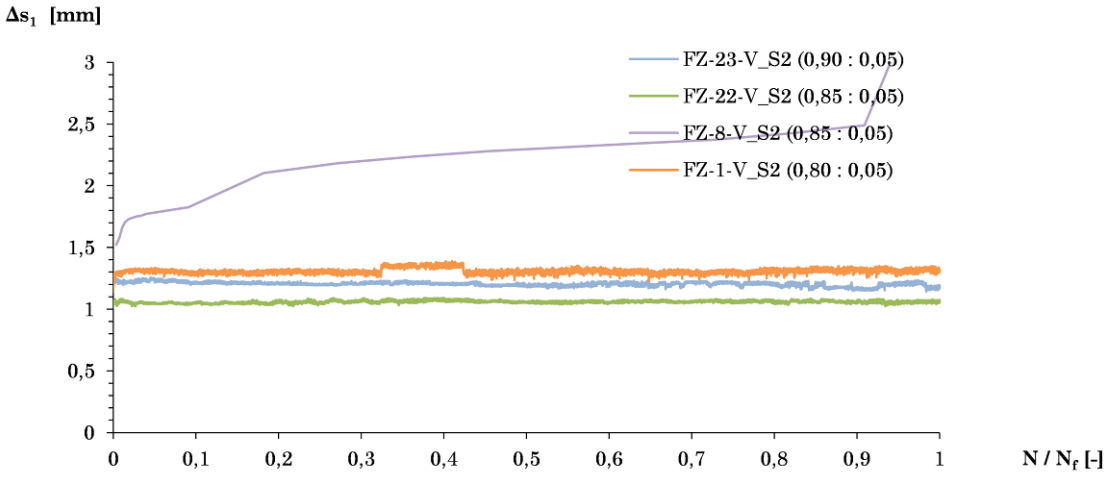


Bild 11.5-38: Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa

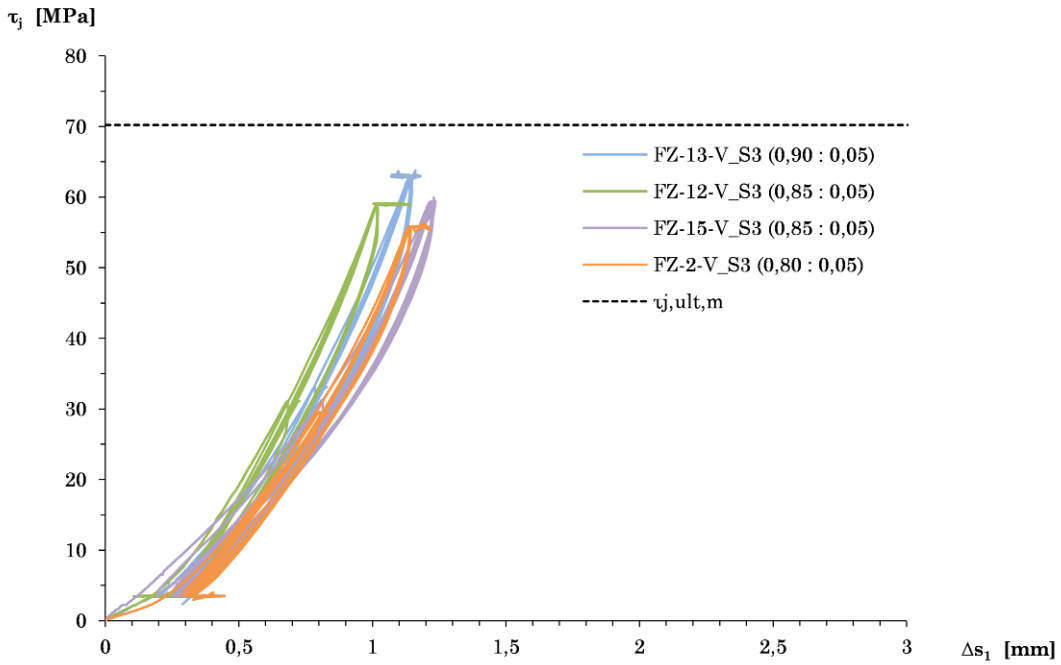


Bild 11.5-39: τ_j-Δs_1-Kurven infolge zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa

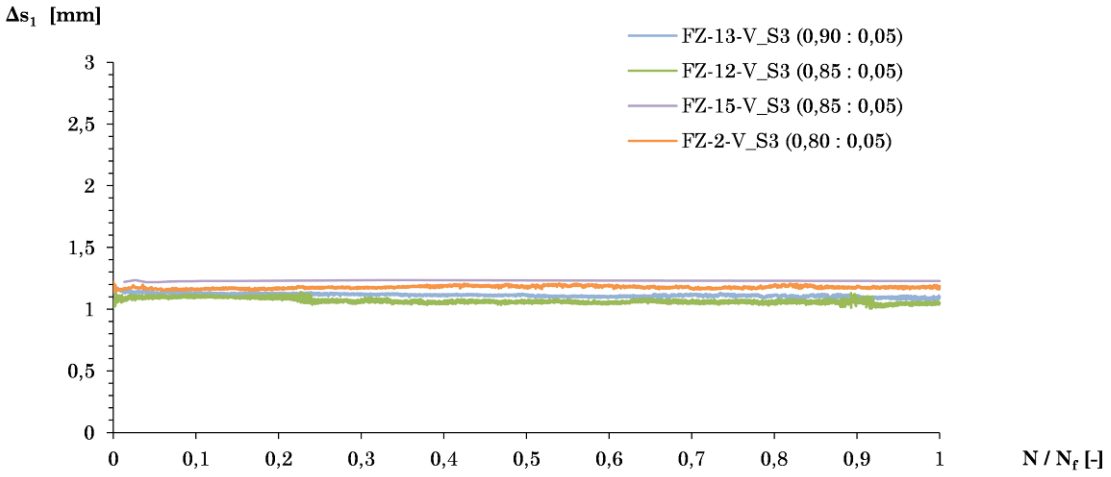


Bild 11.5-40: Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa

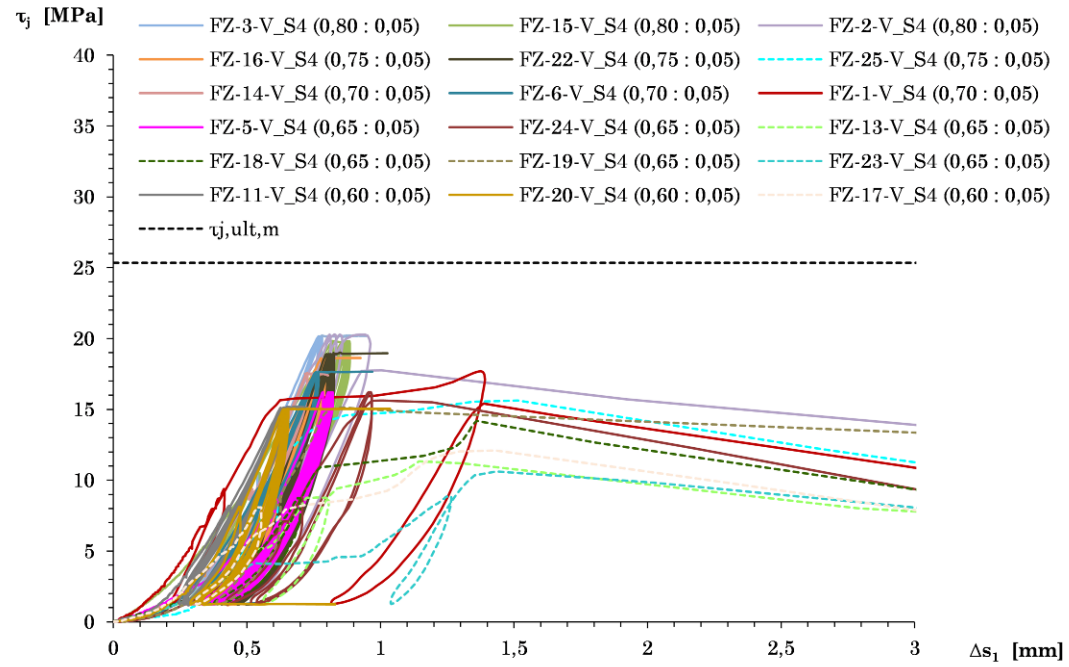


Bild 11.5-41: τ_j-Δs_1-Kurven infolge zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa

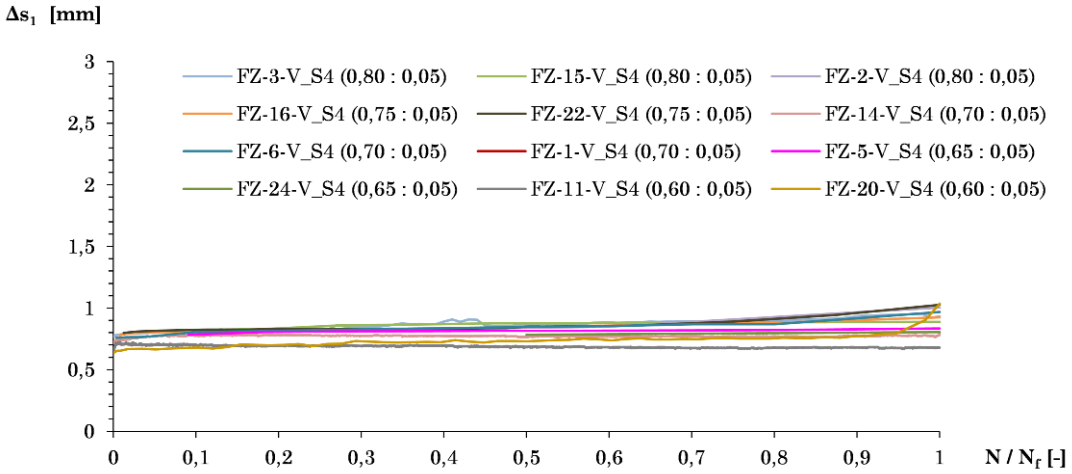


Bild 11.5-42: Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa

Prüfung der Resttragfähigkeit

In Bild 11.5-43 bis Bild 11.5-46 sind die Ergebnisse infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für die Versuchskörper mit verzahnter Fuge dargestellt. Das dabei ermittelte Tragverhalten ist zwar qualitativ mit dem ohne vorhergehender zyklischer Belastung vergleichbar, allerdings fiel bei den Abscherversuchen mit Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa die Prüfkraft F nach dem Bruch der Verzahnung auf nahezu 0 kN ab, bei den Abscherversuchen mit einer Fugennormalspannung von 90MPa konnte danach kein erneuter Anstieg der Prüfkraft F festgestellt werden.

Bei Bild 11.5-47 bis Bild 11.5-50 handelt es sich um einen Ausschnitt aus den τ_j-Δs_1-Kurven der in Bild 11.5-43 bis Bild 11.5-46 dargestellten Diagramme. Darin sind die Punkte hervorgehoben, die das Versagen der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge kennzeichnen. Der Tabelle 11.5-15 bis Tabelle 11.5-18 können die entsprechenden Werte für die Schubspannung $\tau_{j,ult}$, die Normalspannung $\sigma_{j,ult}$ und die Verschiebung $\Delta s_{1,ult}$ entnommen werden.

Bei den Abscherversuchen mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa lagen die erreichten Schubspannung $\tau_{j,ult}$ durchwegs, und zwar um 14 % bis 57 %, über dem Mittelwert der Schubspannungen $\tau_{j,ult}$, der sich aus den Abscherversuchen unter statischer Belastung ohne vorhergehende zyklische Belastung ergab. Die Versuchskörper hatten in diesen Fällen also keine Schädigung durch die zyklische Belastung erfahren. Beim Versuchskörper FZ-11-V_S4 mit einer Fugennormalspannung von 0 MPa und einer angestrebten bezogenen Oberlast T_o von 0,60 lag die erreichte Schubspannung $\tau_{j,ult}$ um 4% unterhalb dem Mittelwert der Schubspannungen $\tau_{j,ult}$, der sich aus den Abscherversuchen unter statischer Belastung ohne vorhergehende zyklische Belastung ergab.

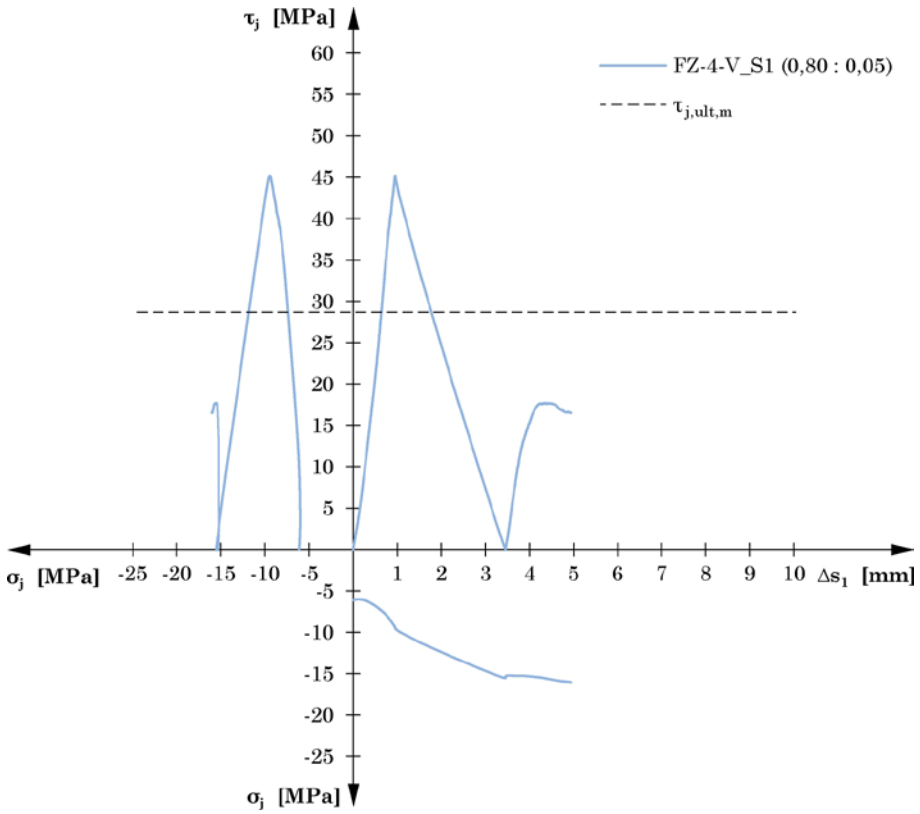


Bild 11.5-43: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa

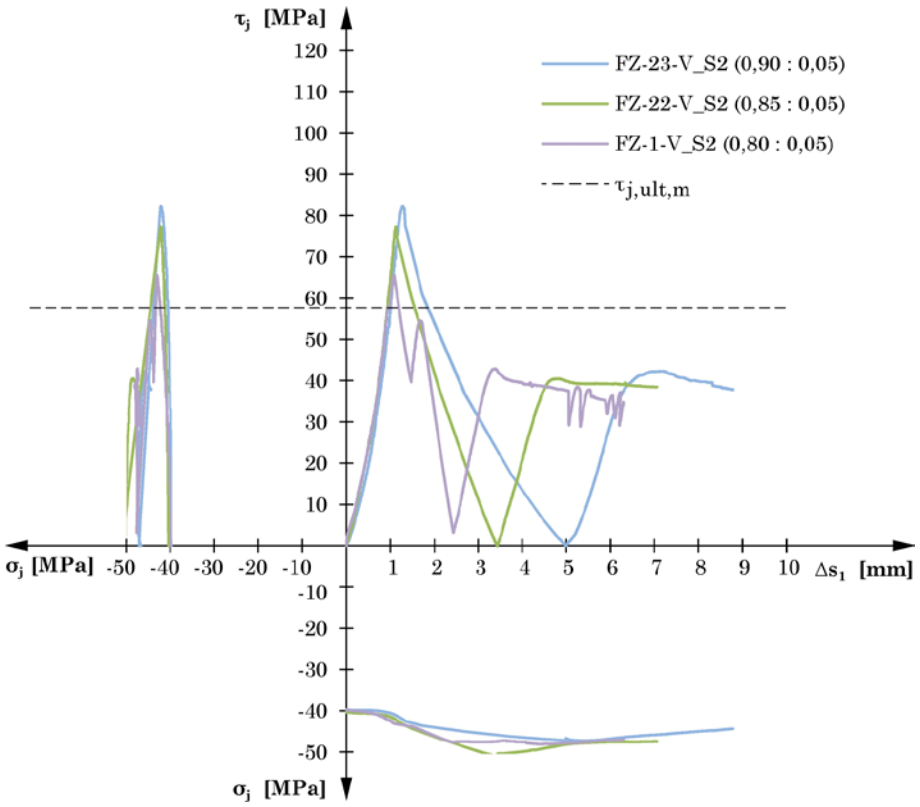


Bild 11.5-44: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa

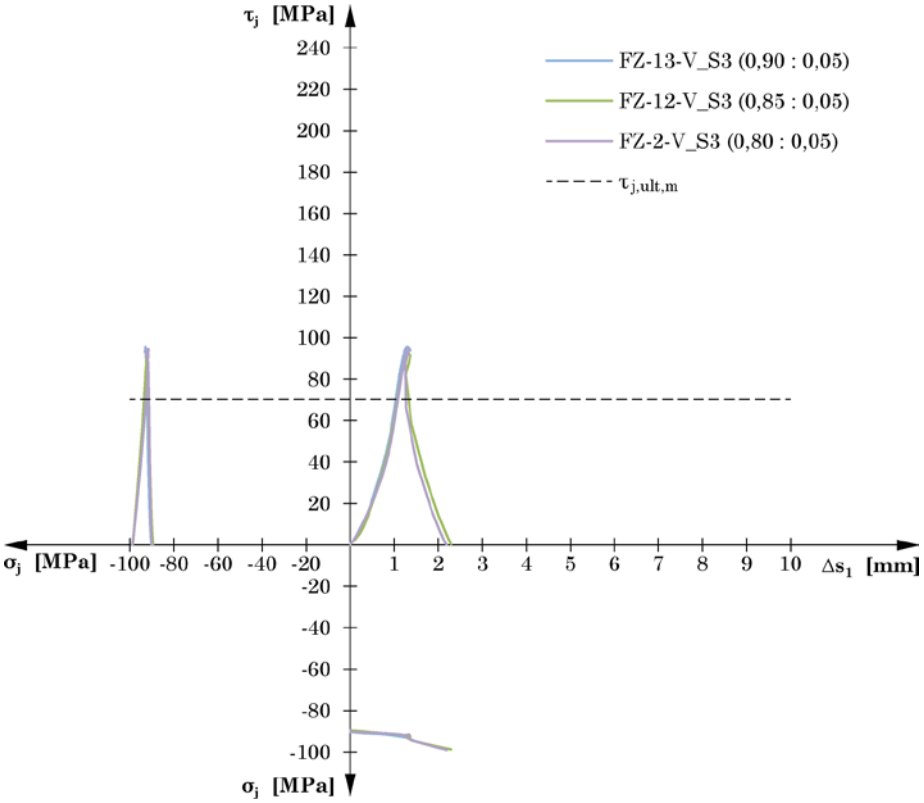


Bild 11.5-45: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa

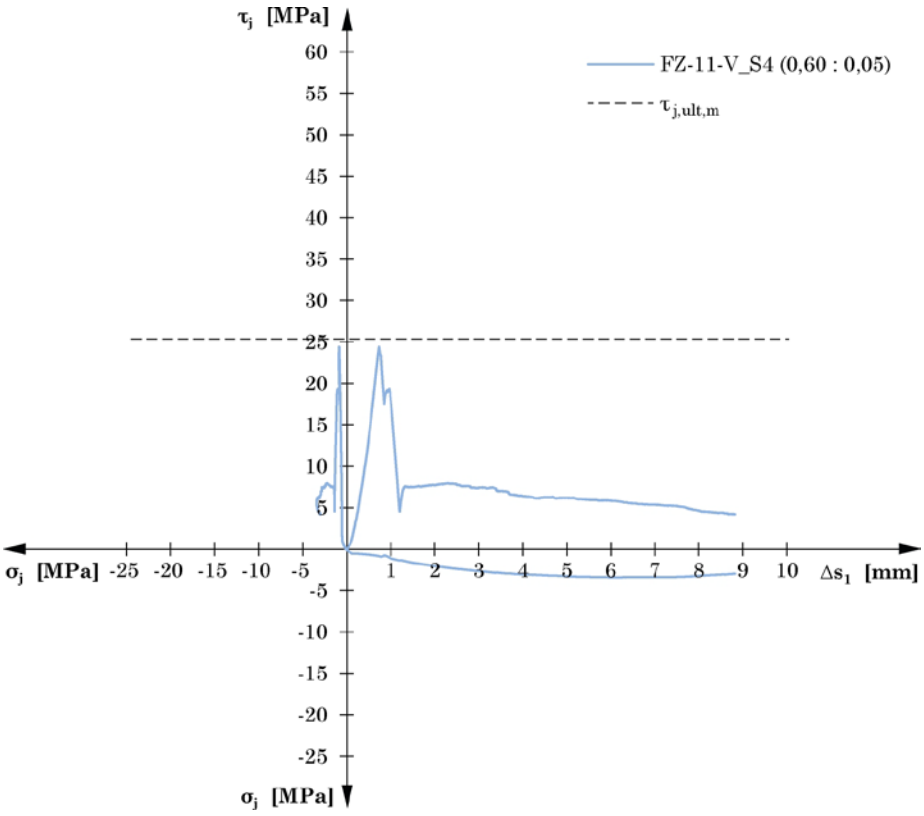


Bild 11.5-46: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa

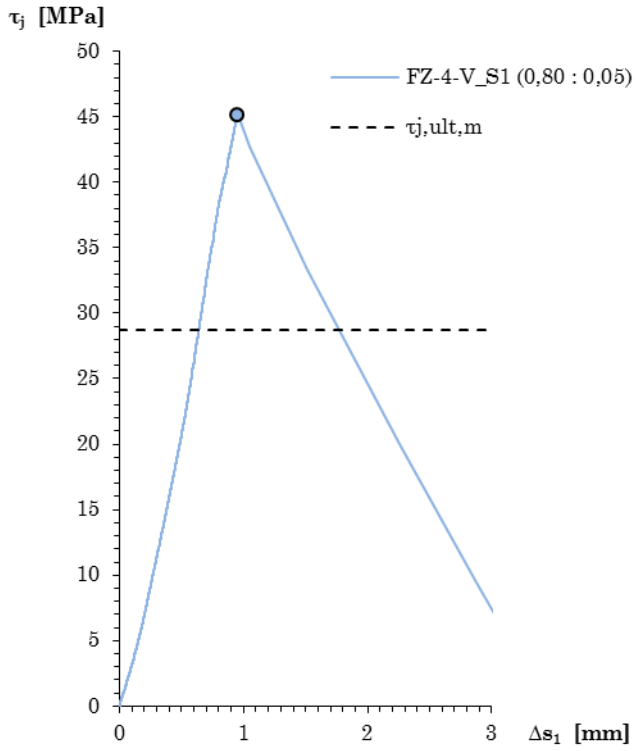


Bild 11.5-47: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-43)

Tabelle 11.5-15: Resttragfähigkeit der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa

Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Resttragfähigkeit bei Abscherversuchen unter statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung			Mittelwert der Tragfähigkeit bei Abscherversuchen unter statischer Belastung	$\tau_{j,ult}$ / $\tau_{j,ult,m}$
	$\tau_{j,ult}$	$\sigma_{j,ult}$	$\Delta s_{1,ult}$	$\tau_{j,ult,m}$	
	[MPa]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[-]
FZ-4-V_S1 (0,80 : 0,05)	45,16	-9,42	0,953	28,68	1,57

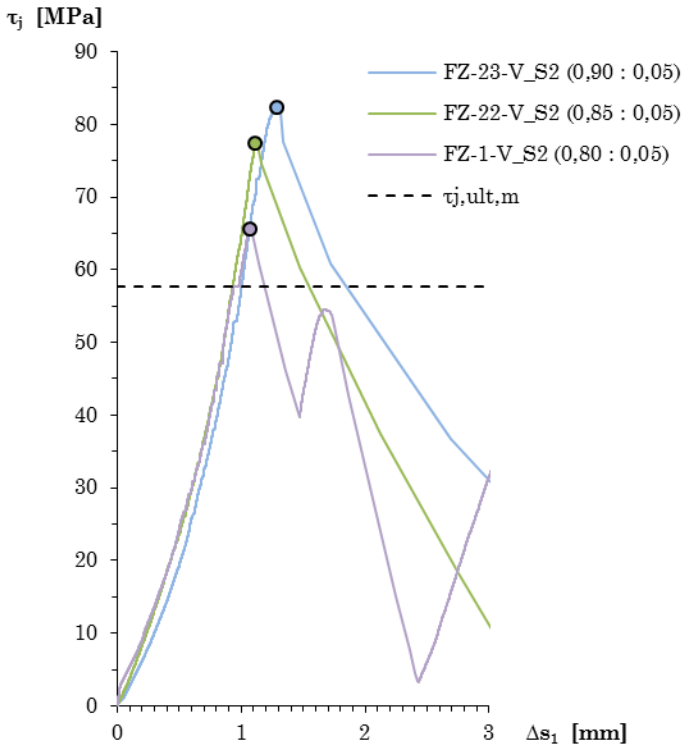


Bild 11.5-48: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-44)

Tabelle 11.5-16: Resttragfähigkeit der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa

Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Resttragfähigkeit bei Abscherversuchen unter statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung			Mittelwert der Tragfähigkeit bei Abscherversuchen unter statischer Belastung	$\tau_{j,ult}$ / $\tau_{j,ult,m}$
	$\tau_{j,ult}$	$\sigma_{j,ult}$	$\Delta s_{1,ult}$	$\tau_{j,ult,m}$	
	[MPa]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[-]
FZ-23-V_S2 (0,90 : 0,05)	82,25	-42,18	1,287	57,65	1,43
FZ-22-V_S2 (0,85 : 0,05)	77,32	-42,19	1,120	57,65	1,34
FZ-1-V_S2 (0,80 : 0,05)	65,51	-43,06	1,078	57,65	1,14

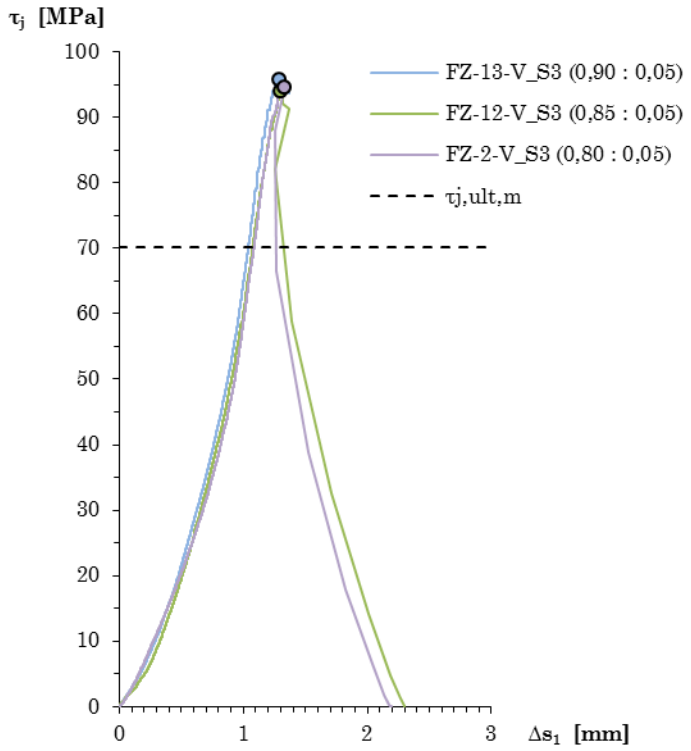


Bild 11.5-49: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-45)

Tabelle 11.5-17: Resttragfähigkeit der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa

Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Resttragfähigkeit bei Abscherversuchen unter statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung			Mittelwert der Tragfähigkeit bei Abscherversuchen unter statischer Belastung	$\tau_{j,ult}$ / $\tau_{j,ult,m}$
	$\tau_{j,ult}$	$\sigma_{j,ult}$	$\Delta s_{1,ult}$	$\tau_{j,ult,m}$	
	[MPa]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[-]
FZ-13-V_S3 (0,90 : 0,05)	95,67	-93,08	1,296	70,20	1,36
FZ-12-V_S3 (0,85 : 0,05)	93,95	-92,04	1,298	70,20	1,34
FZ-2-V_S3 (0,80 : 0,05)	94,59	-91,46	1,333	70,20	1,35

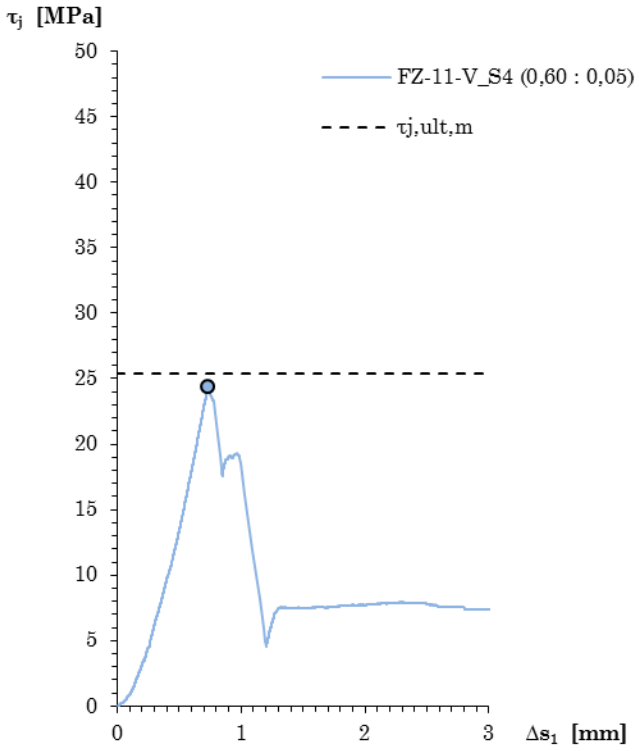


Bild 11.5-50: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-46)

Tabelle 11.5-18: Resttragfähigkeit der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa

Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Resttragfähigkeit bei Abscherversuchen unter statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung			Mittelwert der Tragfähigkeit bei Abscherversuchen unter statischer Belastung	$\tau_{j,r}$ / $\tau_{j,ult,m}$
	$\tau_{j,ult}$	$\sigma_{j,ult}$	$\Delta s_{1,ult}$	$\tau_{j,ult,m}$	
	[MPa]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[-]
FZ-11-V_S4 (0,60 : 0,05)	24,39	-0,85	0,736	25,35	0,96

11.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Durchführung der Abscherversuche unter statischer Belastung hatte vor allem die Bestimmung der Absolutwerte der Ober- und Unterlasten für die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung zum Ziel. Die Oberlasten F_o und die Unterlasten F_u wurden aus dem Mittelwert der unter statischer Belastung zum Versagen der Fugen führenden Prüfkräfte F_r bzw. F_{ult} berechnet. Die den jeweiligen Belastungshorizonten entsprechenden Absolutwerte sind für die Versuchskörper mit sehr glatter Fuge in Tabelle 11.5-4 und für die Versuchskörper mit verzahnter Fuge in Tabelle 11.5-9 angegeben.

Das Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung ist für die gleiche Fugennormalspannung vergleichend in Bild 11.6-1 bis Bild 11.6-4 dargestellt.

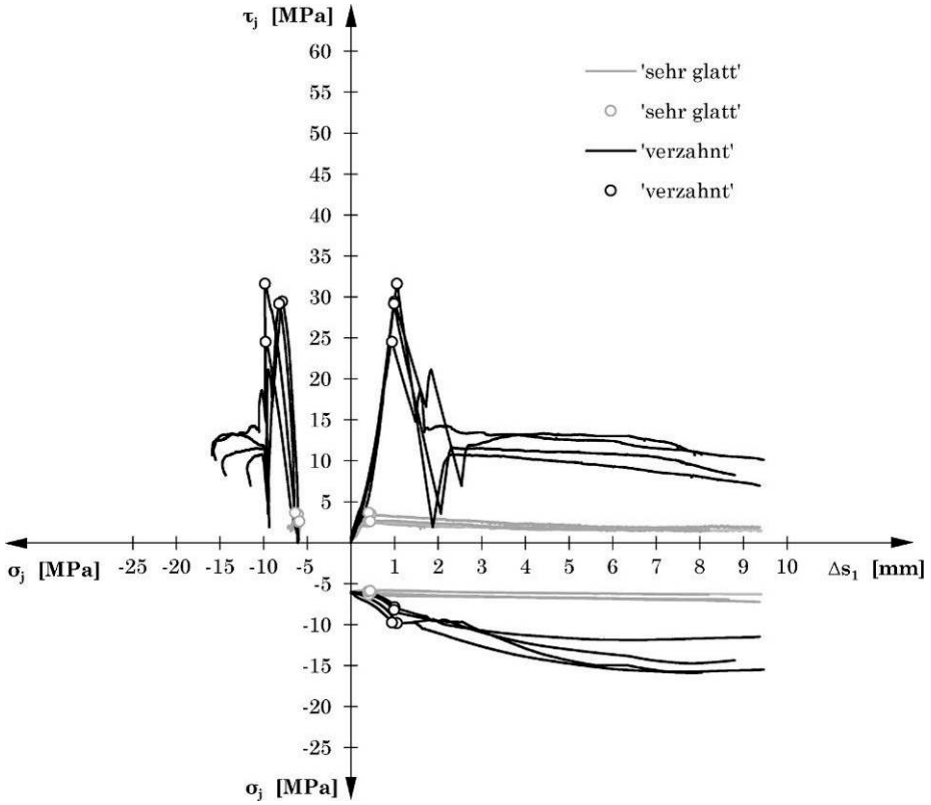


Bild 11.6-1: Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa

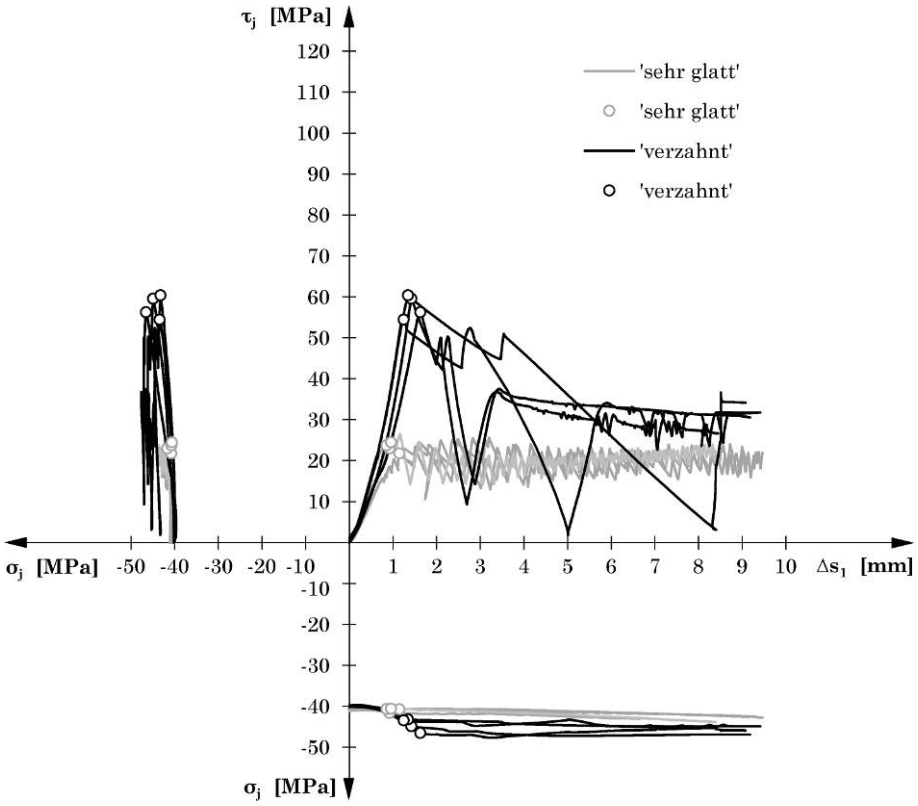


Bild 11.6-2: Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa

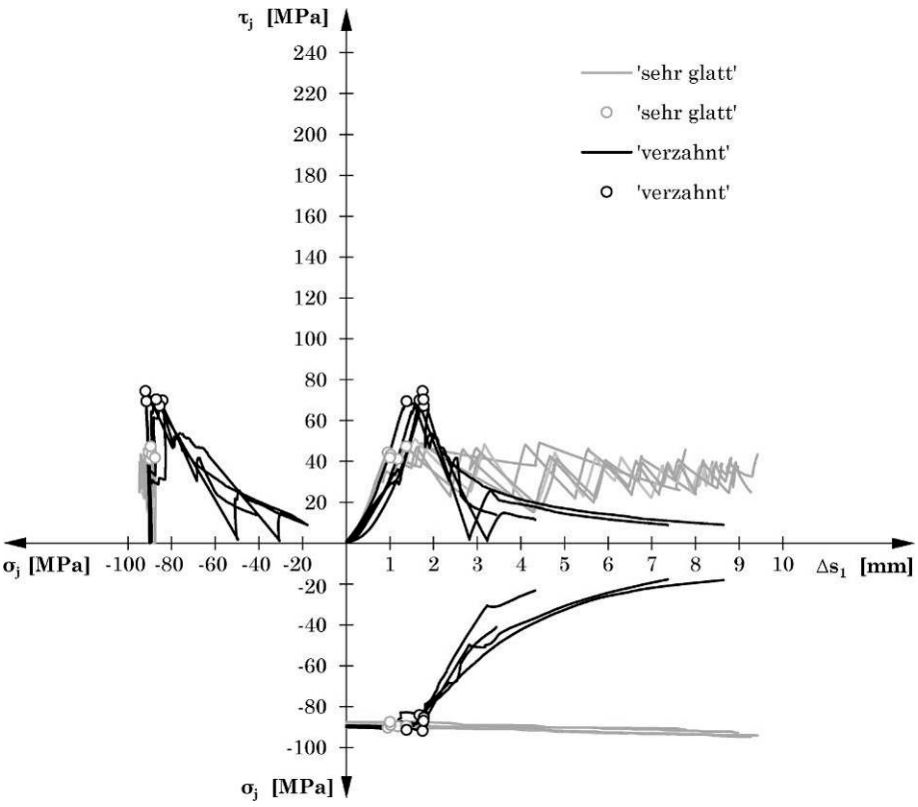


Bild 11.6-3: Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa

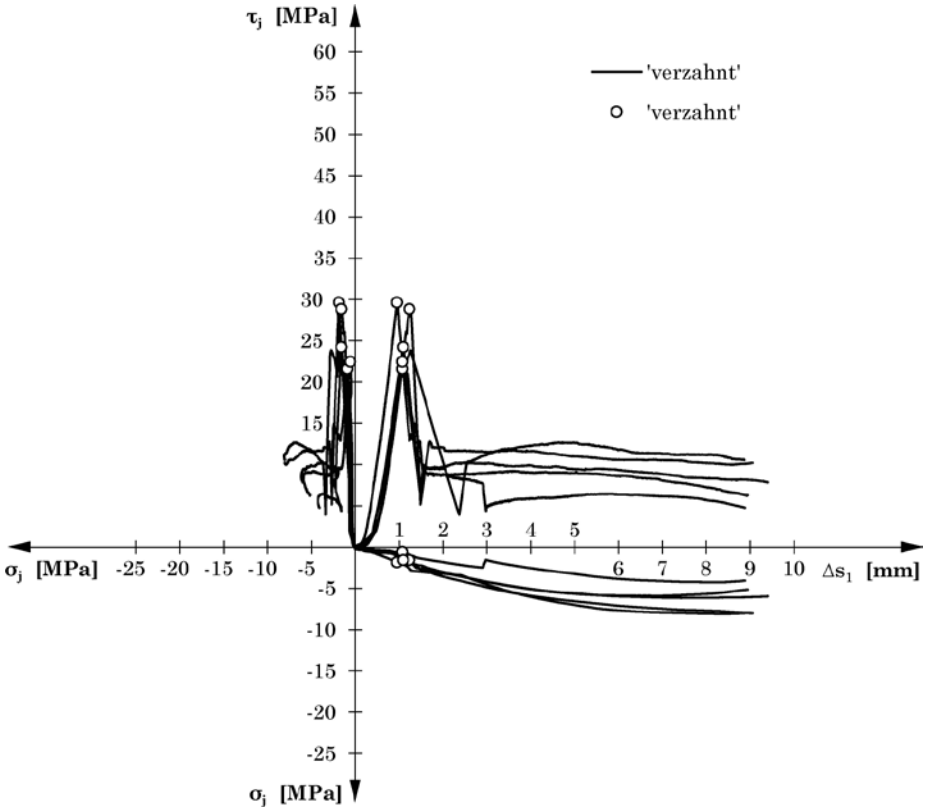


Bild 11.6-4: Tragverhalten der Versuchskörper mit verzahnter Fuge unter statischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa

Die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung hatte zum Ziel, das Ermüdungsverhalten der Fugen in Abhängigkeit der Fugennormalspannung zu untersuchen. Dabei wurden die Bruchlastspielzahlen und der Verlauf der Verschiebung parallel zu den Fugen infolge der zyklischen Belastung festgehalten. Bei Durchläufern wurde eine Prüfung der Resttragfähigkeit vorgenommen.

Es wurden dabei folgende Beobachtungen gemacht:

Bruchlastspielzahl

- Bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa trat sowohl bei Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge als auch bei Versuchskörpern mit verzahnter Fuge bei bezogenen Oberlasten T_o von 0,80, 0,85 und 0,90 mindestens ein Durchläufer auf. Die bezogene Unterlast T_u betrug bei allen Versuchskörpern 0,05.
- Bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa versagten die Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei bezogenen Oberlasten T_o von 0,65, 0,70, 0,75 und 0,80 frühzeitig. Lediglich bei einer bezogenen Oberlast T_o von 0,60 trat mindestens ein Durchläufer auf. Die bezogene Unterlast T_u betrug bei allen Versuchskörpern 0,05.

Verlauf der Verschiebung Δs_1 parallel zu den Fugen

- Bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa kam es sowohl bei Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge als auch bei Versuchskörpern mit verzahnter Fuge kaum zu einer Zunahme der Verschiebung Δs_1 parallel zu den Fugen infolge der zyklischen Belastung.
- Bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa kam es infolge der zyklischen Belastung bei einigen Versuchskörpern mit verzahnter Fuge zu einer geringfügig größeren Zunahme der Verschiebung Δs_1 parallel zu den Fugen.

Resttragfähigkeit

- Das Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung ist für die gleiche Fugennormalspannung vergleichend in Bild 11.6-5 bis Bild 11.6-8 dargestellt. Bei den Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge ist das ermittelte Tragverhalten qualitativ mit dem ohne vorhergehende zyklische Belastung vergleichbar. Bei den Versuchskörpern mit verzahnter Fuge ist dies ebenso der Fall, allerdings fiel bei den Abscherversuchen mit Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa die Prüfkraft F nach dem Bruch der Verzahnung auf nahezu 0 kN ab, bei den Abscherversuchen mit einer Fugennormalspannung von 90MPa konnte danach kein erneuter Anstieg der Prüfkraft F festgestellt werden.
- Bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa lagen die erreichten Schubspannung $\tau_{j,ult}$ nach vorhergehender zyklischer Belastung bei bezogenen Oberlasten T_o von 0,80, 0,85 und 0,90 sowohl bei den Versuchskörpern mit sehr glatter als auch bei den Versuchskörpern mit verzahnter Fuge durchwegs deutlich über dem Mittelwert der Schubspannungen $\tau_{j,ult}$, der sich aus den Abscherversuchen unter statischer Belastung ohne vorhergehende zyklische Belastung ergab.
- Bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa lag die erreichte Schubspannung $\tau_{j,ult}$ nach vorhergehender zyklischer Belastung bei einer bezogenen Oberlasten T_o von 0,60 geringfügig unterhalb dem Mittelwert der Schubspannungen $\tau_{j,ult}$, der sich aus den Abscherversuchen unter statischer Belastung ohne vorhergehende zyklische Belastung ergab.

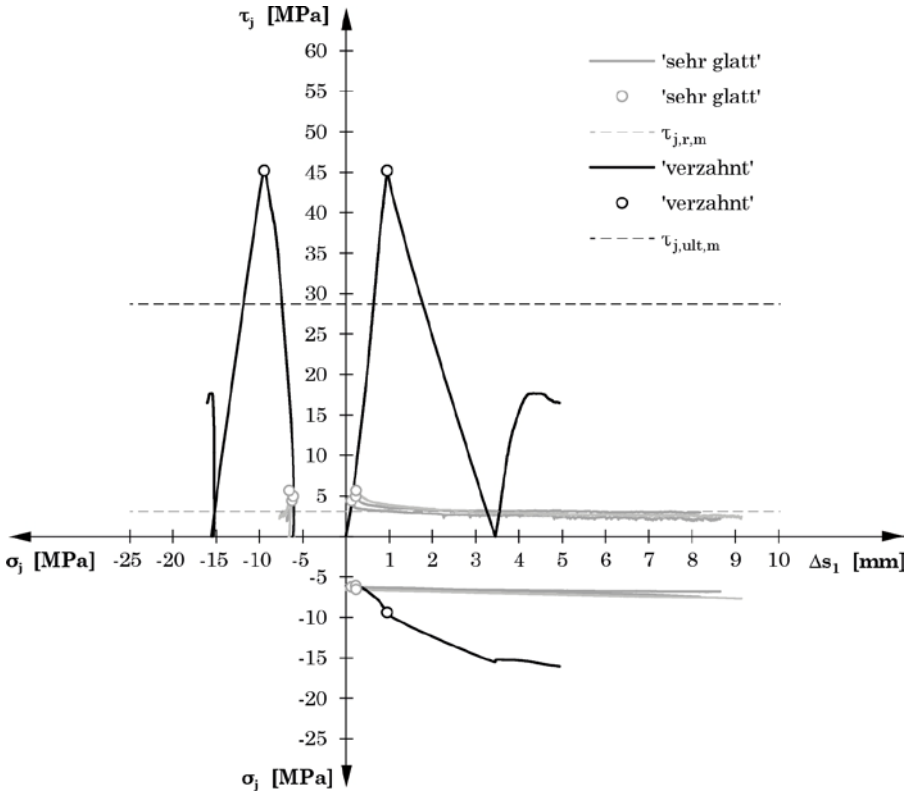


Bild 11.6-5: Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa

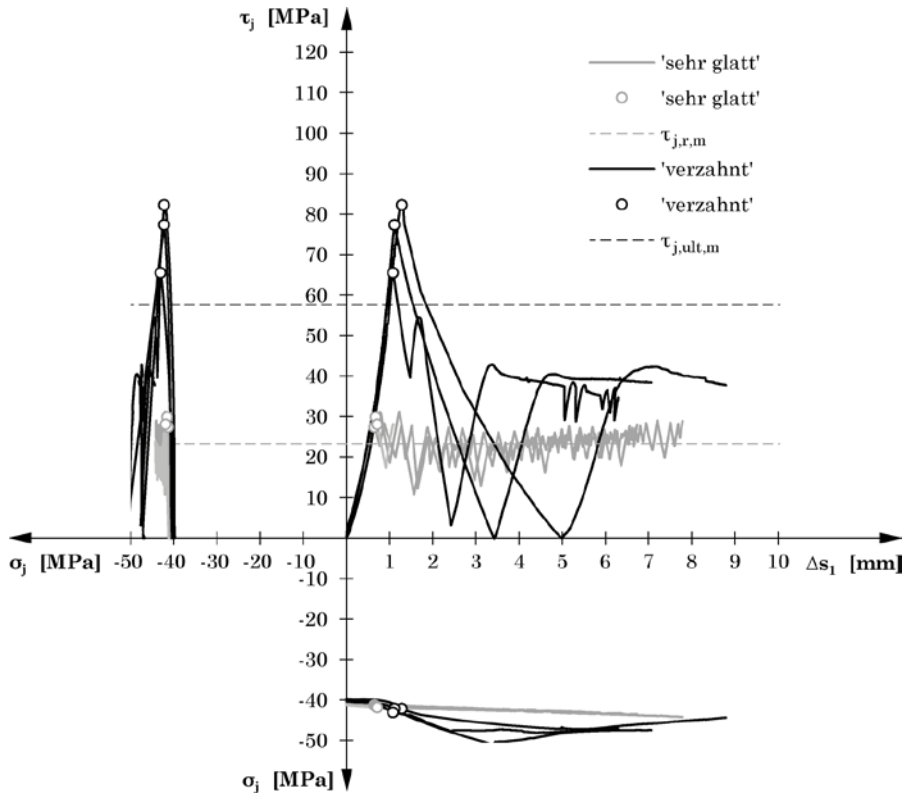


Bild 11.6-6: Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa

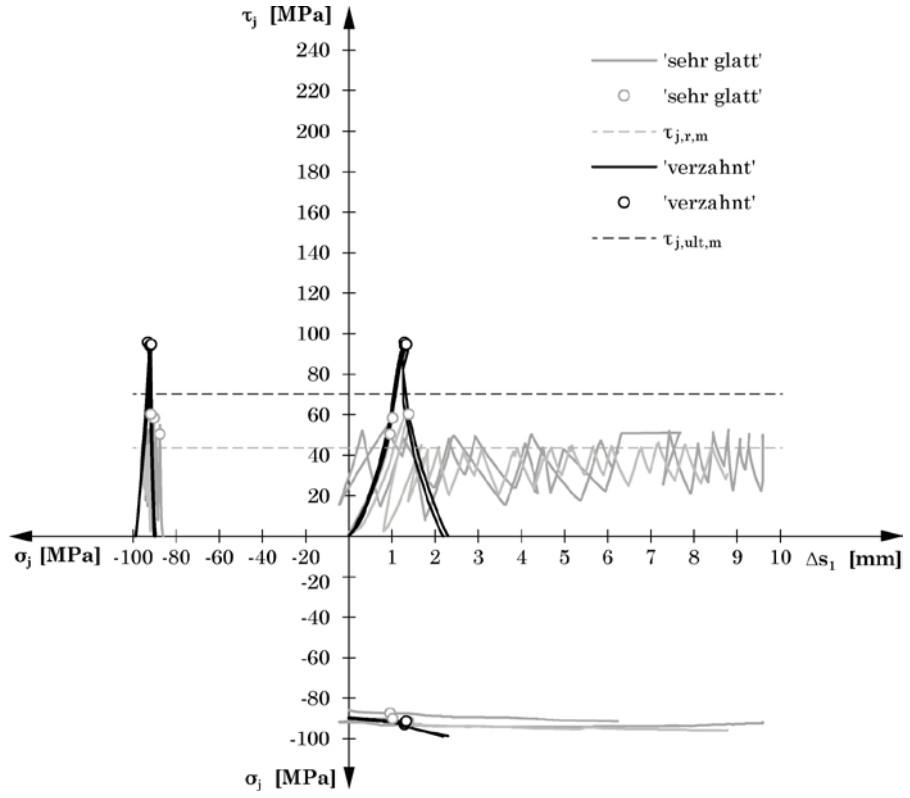


Bild 11.6-7: Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa

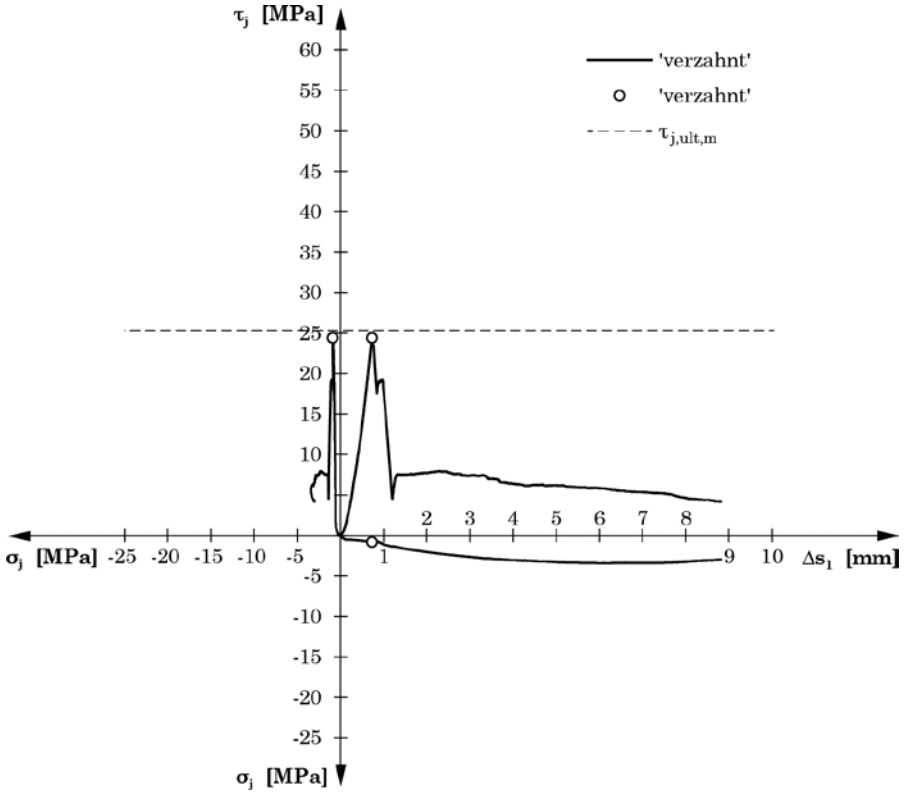


Bild 11.6-8: Tragverhalten der Versuchskörper mit verzahnter Fuge unter statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa

Daneben wurden auch Druckversuche an Zylindern und Biegezugversuche an Prismen durchgeführt, die zur Bestätigung der in Kapitel 5 ermittelten Materialkennwerte sowie zur Kontrolle der Chargen untereinander dienten. Es wurden die folgenden Materialkennwerte ermittelt:

- Druckfestigkeit an 24 Zylindern mit einem Durchmesser d von 100 mm und einer Höhe h von 200 mm:
  f_c = -170,4 MPa mit v = 10,11 %;
- Biegezugfestigkeit an 24 Prismen mit einer Querschnittsbreite b von 75 mm und einer Querschnittshöhe h von 75 mm:
  f_{ctfl} = 31,26 MPa mit v = 9,21 %.

12 Zusammenfassung und Ausblick

12.1 Zusammenfassung

In **Kapitel 1** wurde die Motivation für dieses Forschungsprojekt dargelegt sowie die Zielsetzungen formuliert.

Das **Kapitel 2** beinhaltet eine Zusammenfassung der Randbedingungen für den Entwurf und die Auslegung der Offshore-Windenergieanlage (OWEA). In der *Design Basis* wurden Angaben zum Standort und den Kenndaten der OWEA, zu den Baugrundeigenschaften sowie den maritimen Bedingungen und Windverhältnissen festgehalten.

In **Kapitel 3** wurden zunächst allgemein Gründungsstrukturen für OWEA vorgestellt und auf die Bedeutung des Bauablaufs bzw. des gesamten Logistikkonzepts für die Wirtschaftlichkeit einer OWEA eingegangen.

Im Anschluss daran wurde das von der Zentralen Technik der Ed. Züblin AG entwickelt STRABAG Serial System vorgestellt. Die der Systemlösung zugrunde liegende Tragstruktur stellte die Ausgangsbasis für die in den folgenden Kapiteln dokumentierte Machbarkeitsstudie dar, ob der auf das Schwerkraftfundament aufgesetzte Stahlrohrturm prinzipiell durch eine zentrisch vorgespannte Turmstruktur aus UHFFB in Segmentbauweise ersetzt werden kann.

In **Kapitel 4** wurde unter Berücksichtigung der in Kapitel 2 zusammengefassten Randbedingungen und dem in Kapitel 3 vorgestellten Logistikkonzept der Anforderungskatalog an Turmstrukturen für OWEA formuliert.

Unter Berücksichtigung der vielfältigen Anforderungen wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts ein Konzept für eine zentrisch vorgespannte Turmstruktur aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton (UHFFB) in Segmentbauweise entwickelt. Es wurden die Vorteile für die Verwendung des Hochleistungswerkstoffs UHFFB in Kombination mit der Segmentbauweise dargelegt. Die Geometrie des UHFFB Turms bzw. der Segmente sowie die Ausbildung der Fuge zwischen den Segmenten wurde beschrieben und es wurden die Vorteile einer zentrischen externen Vorspannung diskutiert. Das Vorspannkonzept sieht vor, dass die Spannglieder zwischen den Verankerungspunkten mit Hilfe von Konsolen, ausgebildet als Druckring am oberen Rand der Segmente, geführt werden. Damit sollen am verformten System die Einflüsse aus der Exzentrizität der Spannglieder in Bezug auf die Systemachse vermieden werden.

In **Kapitel 5** wurden das Versuchsprogramm, die Geometrie der Versuchs- und Probekörper und die verwendeten Versuchsstände zur Ermittlung der Spannungs-Verformungs-Beziehungen und der Materialkennwerte für den UHFFB mit der Bezeichnung Ductal® der Firma Lafarge vorgestellt. Der verwendete UHFFB war mit Stahlfasern (2,0 Vol.-%) vom Typ Redaelli (l_f/d_f=14/0,185) versehen und wurde einer Wärmebehandlung unterzogen.

Es wurden Druck-, Biegezug- und zentrische Zugversuche sowie E-Modul-Prüfungen durchgeführt. Die Versuchs- und Probekörper wurden in drei Chargen betoniert (Chargen C1 bis C3). Es wurden unter anderem die folgenden Materialkennwerte ermittelt:

- Druckfestigkeit an 18 Zylindern mit einem Durchmesser d von 100 mm und einer Höhe h von 200 mm:
  f_c = -211,3 MPa mit v = 5,70 %;
- E-Modul unter Druckbeanspruchung an 9 Zylindern mit einem Durchmesser d von 100 mm und einer Höhe h von 200 mm:
  E_c = 59364 MPa mit v = 1,14 %;

- Biegezugfestigkeit an 9 Prismen ohne Kerbe mit einer Querschnittsbreite b und einer Querschnittshöhe h von 75 mm:
  f_{ctfl} = 39,57 MPa mit v = 8,76 %;
- Biegezugfestigkeit und Rissbreite an 6 Prismen mit Kerbe mit einer Querschnittsbreite b von 75 mm und einer Querschnittshöhe h von 75 mm abzüglich einer Kerbtiefe von 25 mm:
  f_{ctfl} = 29,38 MPa mit v = 6,08 % und $w_r(f_{ctfl})$ = 0,55 mm mit v = 13,59 %;
- axiale Zugfestigkeit an 9 Versuchskörpern ohne Kerbe mit einer Querschnittsbreite b und einer Querschnittshöhe h von 75 mm:
  f_{ct} = 14,54 MPa mit v = 4,19 %;
- axiale Zugfestigkeit und Rissbreite an 9 Versuchskörpern mit Kerbe mit einer Querschnittsbreite b und einer Querschnittshöhe h von 50 mm:
  f_{ct} = 16,42 MPa mit v = 9,36 % und $w_r(f_{ct})$ = 0,306 mm mit v = 34,77 %.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum Materialverhalten von UHFFB bildeten die Grundlage für die Ableitung der Bemessungswerte für die Auslegung des UHFFB Turms. Diese wurden in **Kapitel 6** zusammengestellt. Es wurden die Bemessungswerte für die Druckfestigkeit und die Zugfestigkeit definiert. Die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} (5 % - Fraktilwert) ergab sich zu -183,8 MPa, die charakteristische 1D Zugfestigkeit $f_{ctk,1D}$ (5 % - Fraktilwert) ergab sich zu 22,74 MPa und die charakteristische Zugspannung an der Elastizitätsgrenze $f_{ctk,el}$ (5 % - Fraktilwert) ergab sich zu 7,67 MPa. Daneben wurde auch das Ermüdungsverhalten von UHFFB unter Druckschwellbelastung diskutiert. Hierzu wurden die Wöhlerlinien in Anlehnung an CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010) mit den von Wefer (2010) für UHFFB vorgeschlagenen Wöhlerlinien verglichen und festgestellt, dass diese voneinander abweichen.

In Ergänzung zu Kapitel 2 befasste sich das **Kapitel 7** mit der Ermittlung von repräsentativen Werten, die die am Standort der OWEA vorherrschenden maritimen Bedingungen und Windverhältnisse beschreiben. Dazu wurden die in der Nordsee am Standort der NSB II und der Forschungsplattform FINO1 aufgezeichneten Messdaten ausgewertet. Die Auswertung der Messdaten wurde beschrieben und die daraus abgeleiteten Scatter-Diagramme dargestellt. Eine Beurteilung hinsichtlich deren Brauchbarkeit für den gewählten Standort der OWEA ergab, dass die Scatter-Diagramme für den Standort der NSB II in die *Design Basis* übernommen und für die gesamtdynamische Berechnung der OWEA verwendet wurden.

Das **Kapitel 8** befasste sich mit der Auslegung des Turmtragwerks aus UHFFB in Segmentbauweise. Grundlegende dynamische Voruntersuchungen zeigten, dass die Steifigkeit des Gesamtsystems aus Schwerkraftfundament und UHFFB Turm ausreichend ist, um eine „soft-stiff“-Auslegung zu erreichen.

Die Beanspruchungen des Gesamtsystems aus Eigengewicht, den Umweltbedingungen Wind und Wellen sowie aus den Betriebsbedingungen wurden durch eine dynamische Berechnung des Gesamtsystems nach der Elastizitätstheorie mit dem Simulationsprogramm Flex 5 ermittelt. Für die Nachweise in den Grenzzuständen muss jedoch eine nichtlineare Berechnung der Schnittgrößen durchgeführt werden. Für die nichtlineare Berechnung ist die Biegemomenten-Krümmungs-Beziehung von entscheidender Bedeutung. Die Krümmung ist unter anderem auch vom Grad der Vorspannung abhängig, d.h. ob im Grenzzustand der Tragfähigkeit die Fugen zwischen den Segmenten überdrückt sind oder ob ein Klaffen der Fugen zugelassen wird.

Eine erste Vordimensionierung der Tragstruktur ergab, dass der Vorspanngrad für die Optimierung der Wandstärke der Segmente ausschlaggebend ist. Der Grund hierfür ist, dass das Ermüdungsverhalten von druckbeanspruchtem Beton eine deutliche Abhängigkeit von der Mittelspannung zeigt, also mit

wachsender Mittelspannung bei gleichen Schwingbreiten die Bruchschwingzahl abnimmt. Ein niedrigerer Vorspanngrad führt demzufolge zu einer wirtschaftlicheren Turmstruktur. Dies setzt jedoch voraus, dass die Kraftübertragung in den Fugen durch eine geeignete Fugenausbildung sichergestellt werden kann, und zwar insbesondere die Kraftübertragung über teilweise geöffnete Fugen - auch bei Torsion - und die Kraftweiterleitung in die anschließenden Segmente. Aus diesem Grund wurden als Teil dieses Forschungsprojekts experimentelle Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer und zyklischer Belastung durchgeführt.

In **Kapitel 9** wurde zunächst allgemein eine Charakterisierung von Fugen hinsichtlich deren Lage im Bauteil und deren Ausbildung vorgenommen sowie die Notwendigkeit experimenteller Untersuchungen zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Fugen dargelegt. Des Weiteren wurde auf die im Rahmen dieses Forschungsprojekts verwendeten Versuchskörpergeometrien, die untersuchten Fugengeometrien und das verwendete Herstellungsverfahren eingegangen.

In **Kapitel 10** sind das Versuchsprogramm, die Geometrie der Versuchskörper für die Durchführung der Schub-Druck-Versuche und der verwendete Versuchstand zur Ermittlung der Tragfähigkeit von sehr glatten, gestrahlten, rauen und verzahnten Trockenfugen unter statischer Belastung beschrieben. Die Versuchskörper wurden in acht Chargen betoniert (Chargen C4 bis C11).

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung (vgl. Kapitel 10) wurden insgesamt 53 Versuchskörper geprüft. Dabei handelte es sich um:

- Druckversuche an 5 Versuchskörpern ohne Fuge (Referenzprismen);
- Schub-Druck-Versuche an:
  - 9 Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge (jeweils 3 Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 0°, 25° und 35°);
  - 9 Versuchskörpern mit gestrahlter Fuge (jeweils 3 Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 0°, 25° und 35°);
  - 15 Versuchskörpern mit rauer Fuge (jeweils 3 Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 0°, 25°, 35°, 45° und 55°);
  - 15 Versuchskörpern mit verzahnter Fuge (jeweils 3 Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 0°, 25°, 35°, 45° und 55°).

Die Durchführung der Schub-Druck-Versuche hatte zum Ziel, die Grenzbeziehung zwischen der Schub- und Normalspannung τ_j und σ_j in der Fuge zu ermitteln, um so den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche bzw. der Fugengeometrie auf die Tragfähigkeit von Trockenfugen beurteilen zu können.

Die Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit sehr glatter und gestrahlter Fuge ergaben, dass bei einem Fugenneigungswinkel α von 0° und 25° ein „Druckbruch“ auftritt, wohingegen bei einem Fugenneigungswinkel α von 35° bereits bei einer niedrigen maximalen Prüfkraft F_{max} einen „Gleitbruch“ auftritt. Dabei besaßen die Versuchskörper mit gestrahlter Fuge im Vergleich zu den Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge bei einem Fugenneigungswinkel α von 35° eine niedrigere Tragfähigkeit. Das Strahlen von Oberflächen aus UHFFB wirkt sich demnach nachteilig auf die Tragfähigkeit der Fuge aus.

Die Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit rauer Fuge führten bei einem Fugenneigungswinkel α von 0°, 25° und 35° zu einen „Druckbruch“, wohingegen bei einem Fugenneigungswinkel α von 45° und 55° einen „Gleitbruch“ auftrat. Die Versuchskörper mit verzahnter Fuge und einem Fugenneigungswinkel α von 0° oder 25° erlitten bei der Durchführung der Schub-Druck-Versuche einen „Druckbruch“, wohingegen bei einem Fugenneigungswinkel α von 55° ein „Gleitbruch“ auftrat. Bei

einem Fugenneigungswinkel α von 35° und 45° kam es den Bruchbildern nach zu einem durch die Verzahnung der Fuge hervorgerufenes Versagen von verzahnungsnahen Bereichen des Versuchskörpers, was auf einen „Mischbruch“ hinweisen könnte oder ein vorzeitiges Versagen durch Spaltbruch. Im Vergleich zu den Versuchskörpern mit rauer Fuge besaßen die Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einem Fugenneigungswinkel α von 35° eine leicht niedrigere Tragfähigkeit, bei einem Fugenneigungswinkel α von 45° und 55° jedoch eine weitaus höhere Tragfähigkeit.

Daneben wurden auch Druckversuche an Zylindern und Biegezugversuche an Prismen durchgeführt, die zur Bestätigung der in Kapitel 5 ermittelten Materialkennwerte sowie zur Kontrolle der Chargen untereinander dienten. Es wurden die folgenden Materialkennwerte ermittelt:

- Druckfestigkeit an 30 Zylindern mit einem Durchmesser d von 100 mm und einer Höhe h von 200 mm:
  f_c = -223,6 MPa mit v = 4,39 %;
- E-Modul unter Druckbeanspruchung an 6 Zylindern mit einem Durchmesser d von 100 mm und einer Höhe h von 200 mm:
  E_c = 59391 MPa mit v = 0,65 %;
- Biegezugfestigkeit an 24 Prismen mit einer Querschnittsbreite b und einer Querschnittshöhe h von 75 mm:
  f_{ctfl} = 29,14 MPa mit v = 13,52 %.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Druckversuche an den Versuchskörpern ohne Fuge (Referenzprismen) mit den Mittelwerten der Zylinderdruckfestigkeit der entsprechenden Charge zeigte, dass die Druckfestigkeit der Referenzprismen stets niedriger ist als der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit der entsprechenden Charge. Dies deutet auf einen Einfluss der Versuchskörperform auf die ermittelten Festigkeitswerte hin, was es bei der Umrechnung der Festigkeitswerte zu berücksichtigen gilt. Basierend auf den ermittelten Festigkeitswerten an den Referenzprismen und Zylindern ergab sich ein Umrechnungsbeiwert von $f_{c,pr,150/75/600} = 0{,}93 \cdot f_{c,cyl,100/200}$.

In **Kapitel 11** sind das Versuchsprogramm, die Geometrie der Versuchskörper für die Durchführung der Abscherversuche und der verwendete Versuchsstand zur Ermittlung der Tragfähigkeit von sehr glatten und verzahnten Fugen unter zyklischer Belastung beschrieben. Die Versuchskörper wurden in acht Chargen betoniert (Chargen C12 bis C19).

Die Abscherversuche wurden zunächst unter statischer Belastung durchgeführt, um daraus die Absolutwerte der Ober- und Unterlasten für die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung abzuleiten.

Insgesamt wurden 78 Versuchskörper geprüft. Dabei handelte es sich um:

- Abscherversuche unter statischer Belastung an:
  - 15 Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge (jeweils 5 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa);
  - 22 Versuchskörpern mit verzahnter Fuge (jeweils 5 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa und 7 Versuchskörpern mit eine Fugennormalspannung von 0 MPa);
- Abscherversuche unter zyklischer Belastung an:
  - 12 Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge (jeweils 1 oder 2 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa oder 90 MPa und einer bezogenen Oberlast von 0,80, 0,85 oder 0,90);

- 29 Versuchskörpern mit verzahnter Fuge (jeweils 1 oder 2 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa oder 90 MPa und einer bezogenen Oberlast von 0,80, 0,85 oder 0,90 sowie jeweils 3 oder 6 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 0 MPa und einer bezogenen Oberlast von 0,60, 0,65, 0,70, 0,75 oder 0,80).

Die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung hatte zum Ziel, das Ermüdungsverhalten der Fugen in Abhängigkeit der Fugennormalspannung zu untersuchen. Dabei wurden die Bruchlastspielzahlen und der Verlauf der Verschiebung parallel zu den Fugen infolge der zyklischen Belastung festgehalten. Bei Durchläufern wurde eine Prüfung der Resttragfähigkeit vorgenommen. Hinsichtlich der Bruchlastspielzahl wurden die folgenden Beobachtungen gemacht:

- Bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa trat sowohl bei Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge als auch bei Versuchskörpern mit verzahnter Fuge bei bezogenen Oberlasten T_o von 0,80, 0,85 und 0,90 mindestens ein Durchläufer auf. Die bezogene Unterlast T_u betrug bei allen Versuchskörpern 0,05.
- Bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa versagten die Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei bezogenen Oberlasten T_o von 0,65, 0,70, 0,75 und 0,80 frühzeitig. Lediglich bei einer bezogenen Oberlast T_o von 0,60 trat mindestens ein Durchläufer auf. Die bezogene Unterlast T_u betrug bei allen Versuchskörpern 0,05.

Bei der Auswertung des Verlaufs der Verschiebung Δs_1 parallel zu den Fugen ergab sich folgendes Bild:

- Bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa kam es sowohl bei Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge als auch bei Versuchskörpern mit verzahnter Fuge kaum zu einer Zunahme der Verschiebung Δs_1 parallel zu den Fugen infolge der zyklischen Belastung.
- Bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa kam es infolge der zyklischen Belastung bei einigen Versuchskörpern mit verzahnter Fuge zu einer geringfügig größeren Zunahme der Verschiebung Δs_1 parallel zu den Fugen.

Die Prüfung der Resttragfähigkeit ergab Folgendes:

- Das Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung ist für die gleiche Fugennormalspannung vergleichend in Bild 11.6-5 bis Bild 11.6-8 dargestellt. Bei den Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge ist das ermittelte Tragverhalten qualitativ mit dem ohne vorhergehende zyklische Belastung vergleichbar. Bei den Versuchskörpern mit verzahnter Fuge ist dies ebenso der Fall, allerdings fiel bei den Abscherversuchen mit Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa die Prüfkraft F nach dem Bruch der Verzahnung auf nahezu 0 kN ab, bei den Abscherversuchen mit einer Fugennormalspannung von 90MPa konnte danach kein erneuter Anstieg der Prüfkraft F festgestellt werden.
- Bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa lagen die erreichten Schubspannung $\tau_{j,ult}$ nach vorhergehender zyklischer Belastung bei bezogenen Oberlasten T_o von 0,80, 0,85 und 0,90 sowohl bei den Versuchskörpern mit sehr glatter als auch bei den Versuchskörpern mit verzahnter Fuge durchwegs deutlich über dem Mittelwert der Schubspannungen $\tau_{j,ult}$, der sich aus den Abscherversuchen unter statischer Belastung ohne vorhergehende zyklische Belastung ergab.
- Bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa lag die erreichte Schubspannung $\tau_{j,ult}$ nach vorhergehender zyklischer Belastung bei einer bezogenen Oberlasten T_o von 0,60 geringfügig unterhalb dem Mittelwert der Schubspannungen $\tau_{j,ult}$, der sich aus den Abscherversuchen unter statischer Belastung ohne vorhergehende zyklische Belastung ergab.

Daneben wurden auch Druckversuche an Zylindern und Biegezugversuche an Prismen durchgeführt, die zur Bestätigung der in Kapitel 5 ermittelten Materialkennwerte sowie zur Kontrolle der Chargen untereinander dienten. Es wurden die folgenden Materialkennwerte ermittelt:

- Druckfestigkeit an 24 Zylindern mit einem Durchmesser d von 100 mm und einer Höhe h von 200 mm:
  f_c = -170,4 MPa mit v = 10,11 %;
- Biegezugfestigkeit an 24 Prismen mit einer Querschnittsbreite b von 75 mm und einer Querschnittshöhe h von 75 mm:
  f_{ctfl} = 31,26 MPa mit v = 9,21 %.

12.2 Schlussfolgerung und Ausblick

Mit dem Forschungsprojekt wurde ein wichtiger Beitrag zur Entwicklung von Türmen für Offshore-Windenergieanlagen aus UHFFB in Segmentbauweise geleistet. Es wurde gezeigt, dass die Verwendung des Hochleistungswerkstoffs UHFFB in Kombination mit der Segmentbauweise eine vielversprechende Alternative zu Turmstrukturen aus Stahl darstellt.

Um über das Stadium der Machbarkeitsstudie hinauszukommen und den Bau eines ersten Prototyps voranzutreiben, sind jedoch weitere, über dieses Forschungsprojekt hinausgehende, Fragestellungen zu klären. Dies betrifft unter anderem die Erarbeitung einer Norm für den Hochleistungswerkstoff UHFFB sowie Bemessungsgrundlagen und –regeln speziell für Turmtragwerke aus UHFFB in Segmentbauweise. Diesbezüglich sollen auf Grundlage der im Rahmen dieses Forschungsprojekts durchgeführten experimentellen Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer und zyklischer Belastung und auf Grundlage theoretischer und empirischer Ansätze ein Bemessungsmodell für Trockenfugen entwickelt werden. Des Weitern sind herstellungstechnische Fragestellungen zu klären. Zum einen betrifft dies die unter praktischen Gesichtspunkten erreichbare Passgenauigkeit in der Fuge sowie die Auswirkungen von Passungenauigkeiten oder sonstigen Imperfektionen auf die Kraftübertragung in der Fuge. Zum anderen gilt es, ein geeignetes Betonageverfahren bzw. eine geeignete Befüllmethode festzulegen, mit der im Hinblick auf die spätere Beanspruchung der Segmente eine optimale Verteilung und Orientierung der Fasern erzielt werden kann.

Schrifttum

Abendeh, R.; Brockmann; C.; Fischer, O.; Rombach, G. A. (2005): Temperaturinduzierte, bleibende Verformungen von Brückensegmenten bei der Herstellung im Kontaktverfahren. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 3, S. 207-215. Ernst & Sohn, Berlin, 2005

AFGC/SETRA (2002): Bétons fibrés à ultra-hautes performances. Recommandations provisoires. Documents scientifiques et techniques. Association Française de Génie Civil, Setra, Bagneux Cedex, janvier 2002, 152 pp (in French and English)

Briese, D.; Westhäuser, M. (2013): Zukunftsperspektiven und Herausforderungen der Offshore-Windenergie. S. 1-32. In: Böttcher, J. (Hrsg.): Handbuch Offshore-Windenergie – Rechtliche, technische und wirtschaftliche Aspekte. Oldenbourg Verlag, München, 2013

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2007): Standard Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen. BSH-Nr. 7005, Hamburg und Rostock, 2007

Bundesregierung (2002): Perspektiven für Deutschland – Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. URL: http://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/Nachhaltigkeit-wiederhergestellt/perspektiven-fuer-deutschland-langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (aufgerufen am 31.03.2014)

CEB-FIP MC 90 (1993): Design of concrete structures. CEB-FIP-Model-Code 1990. Thomas Telford, 1993

CEB-FIP MC 2010 (2010): Design of concrete structures. CEB-FIP-Model-Code 2010. First complete draft of fib Special Activity Group 5 (2010)

Clauss, G.F.; Lehmann, E.; Östergaard, C. (1988): Meerestechnische Konstruktionen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 1988

Cordle, A.; Jonkman, J. (2011): State of the Art in Floating Wind Turbine Design Tools. In: Proceedings of the 21st International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, USA, June 19-24, 2011

Dannenberg, L. (2013): Offshore-Windenergieanlagen und Entwicklungstendenzen. S. 289-329. In: Böttcher, J. (Hrsg.): Handbuch Offshore-Windenergie – Rechtliche, technische und wirtschaftliche Aspekte. Oldenbourg Verlag, München, 2013

DBV (1999): Empfehlungen für Segmentfertigteilbrücken mit externen Spanngliedern. Deutscher Beton-Verein/Bundesministerium für Verkehr, Ausgabe 1999

Dehlinger, Ch. (2004): Stählerne Verzahnungen für Stahlbetonkonstruktionen. Dissertation, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart, 2004

DIBt (2004): Richtlinie für Windenergieanlagen. Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung. Fassung März 2004. Schriften des DIBt, Heft 8, 2004

DIBt (2009): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung - Zulassungsnummer Z-13.1-82. Antragstelle: SUSPA-DSI GmbH, Deutschland. Zulassungsgegenstand: SUSPA-Litzenspannverfahren 150 mm²

DIBt (2010): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung - Zulassungsnummer Z-13.3-110. Antragstelle: BBR VT International Ltd, Schweiz. Zulassungsgegenstand: Litzenspannverfahren VT-CMM KD für externe Vorspannung nach DIN 1045-1:2008-08 und DIN Fachbericht 102-2003

DIN 1045-1 (2008): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion. S. 1 - 183. (Concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 1: Design). Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, August 2008

DIN 1048-5 (1991): Prüfverfahren für Beton - Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. S. 1 - 8. (Testing methods for concrete - Part 5: Hardened concrete, specially prepared specimens). Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Juni 1991

DIN EN 61400-3 (2010): Windenergieanlagen - Teil 3: Auslegungsanforderungen für Windenergieanlagen auf offener See (IEC 61400-3:2009); Deutsche Fassung EN 61400-3:2009. S. 1-129. (Wind Turbines – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines (IEC 61400-3:2009); German version EN 61400-3:2009). DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., VDE Verlag, Berlin, Januar 2010

Ender, C. (2014): Wind Energy Use in Germany – Status 31.12.2013. DEWI Magazin No. 44, February 2014

Fédération Internationale du Beton – fib-TG 8.6 (2010): Recommendations for Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete - UHPFRC. Draft (2010) of Taskgroup 8.6, fib, 2010

Frettlöhr, B.; Reineck, K.-H. (2009). Versuche zum Maßstabseinfluss bei kombinierter Beanspruchung aus Biegung und Längskraft von dünnen Bauteilen aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben RE 813/6-1 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG);Titel: Maßstabseinfluss bei kombinierter Beanspruchung aus Biegung und Längskraft von dünnen Bauteilen aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton; Antragsteller: Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Reineck, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK); Mitantragsteller: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt, Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe in Bauwesen. Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart, September 2009

Frettlöhr, B. (2011): Bemessung von Bauteilen aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton (UHFFB). Dissertation, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart, 2011

Gasch, R.; Twele, J. (2010): Windkraftanlagen. Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb. 6. Auflage. Teubner, Wiesbaden, 2010

Germanischer Lloyd (2005): Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines. Edition 2005. Germanischer Lloyd, Hamburg, 2005

Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S. (2001): Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften. 2. Auflage. Kuper, H. (Hrsg.): Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau. Ernst & Sohn, Berlin, 2001

Grünberg, J.; Göhlmann, J. (2011): Windenergieanlagen in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise. S. 21-168. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2011: Kraftwerke, Faserbeton. Ernst & Sohn, Berlin, 2011

Guckenberger, K.; Daschner, F.; Kupfer, H. (1980): Segmentäre Spannbetonträger im Brückenbau. DAfStb Heft 311. Ernst & Sohn, Berlin, 1980

Han, N.; Walraven, J.C. (1993): Sustained loading effects in high strength concrete. S. 1076-1083. In: Holand, I.; Sellevold, E. (Hrsg.): Proceedings High-Strength Concrete, Vol. 2, Lillehammer, 1993

Hartwig, U.; Mayer, T. (2012): Entwurfsaspekte bei Gründungen für Offshore-Windenergieanlagen. Bautechnik 89 (2012), Heft 3, S.153-161

Hau, E. (2008): Windkraftanlagen – Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 4., vollständig neu bearbeitete Auflage. Springer-Verlag, Berlin, 2008

Hecht, M. (2012): Practical use of fibre-reinforced UHPC in construction – production of precast elements for Wild-Brücke in Völkermarkt. S. 889-896. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Glotzbach, C.; Fröhlich, S.; Piotrowski, S. (Hrsg.): Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction. Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 19, 2012

Henze, S. (2009): Entwicklung und Beschreibung des Tragverhaltens einer modularen Fachwerkkonstruktion aus Hochleistungsbeton. Dissertation, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Leipzig, 2009

IEC 61400-1 (2005): Wind turbines - Part 1: Design requirements. International Electrotechnical Commission, August 2005

Jonkman, J. M. (2007): Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine. Technical Report, NREL/TP-500-41958, November 2007

Jonkman, J. M.; Butterfield, S.; Musial, W.; Scott, G. (2009): Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. Technical Report, NREL/TP-500-38060, February 2009

Kühn, M. (2011): Offshore-Windparks. S. 547-571. In: Gasch, R.; Twele, J. (Hrsg.): Windkraftanlagen – Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb. 7., aktualisierte Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011

Läpple, V. (2007): Lösungsbuch zur Einführung in die Festigkeitslehre. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007

Loukili, A. (1996): Bétons de poudres réactives et comportement différé. PhD thesis, Ecole centrale de Nantes, France, 1996

Markovic, I. (2006): High-Performance Hybrid-Fibre Concrete-Development and Utilisation. Dissertation, TU Delft, 2006

Mehlhorn, G.; Schwing, H; Berg, K.-R. (1977): Versuche zur Schubtragfähigkeit verzahnter Fugen. DAfStb Heft 311. Ernst & Sohn, Berlin, 1980

Mittendorf, K. (2006): Hydromechanical design parameters and design loads for offshore wind energy converters. Dissertation, Institut für Strömungsmechanik und Elektrisches Rechnen im Bauwesen, Leibniz Universität Hannover. Berichte Nr. 71, 2006

Musial, W.; Butterfield, S.; Boone, A. (2003): Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines. In: Collection of the 2004 ASME Wind Energy Symposium Technical Papers at the 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, 5-8 January, 2004. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) and American Society of Mechanical Engineers (ASME), pp. 476-486. NREL/CP-500-36504

Müller, H. S.; Burkart, I. (2009): Materialgesetze für das Spannungs-Dehnungs-Zeitverhalten von ultrahochfestem Beton. Arbeitsbericht zum Forschungsprojekt MU-1368-9-2 des Schwerpunktprogramms SPP1182 der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG). Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA) der Universität Karlsruhe, April 2009

Petersen, Ch. (2000): Dynamik der Baukonstruktionen. Korrigierter Nachdruck 2000. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig/Wiesbaden, 2000

Randl, N.; Zilch, K.; Müller, A. (2008): Bemessung nachträglich ergänzter Betonbauteile mit längsschubbeanspruchter Fuge. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 7, S. 482-497. Ernst & Sohn, Berlin, 2008

Reichel, M. (2011): Dünnwandige Segmentfertigteilbauweisen im Brückenbau aus gefasertem Ultrahochleistungsbeton (UHFB). In: Tue, N. V. (Hrsg.): Schriftenreihe des Instituts für Betonbau, Volume 1. Verlag der Technischen Universität Graz, 2011

Rinder, T. (2003): Hochfester Beton unter Dauerzuglast. DAfStb Heft 544. Beuth Verlag, Berlin, 2003

Rombach, G. (2003): Spannbetonbau. Ernst & Sohn, Berlin, 2003

Sandner, F.; Cheng, P. W. (2013): Conceptual design of floating wind turbines. In: Proceedings of 9th PhD Seminar on Wind Energy in Europe, Uppsala University Campus Gotland, Sweden, September 18-20, 2013

Sandner; F.; Schlipf, D.; Matha, D.; Cheng, P. W. (2014): Integrated optimization of floating wind turbine systems. In: Proceedings of the 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE, San Francisco, California, USA, June 8-13, 2014

Schaumann, P.; Seidel, M. (1999): Weiterentwicklung der Verfahren zur sicheren und wirtschaftlichen Bemessung von Türmen für Windkraftanlagen mit hoher Leistung. Schriftenreihe Heft 18, Institut für Stahlbau, Universität Hannover, 1999

Schmid, V. (2000): Hochbelastete Verbindungen mit Zahnleisten in Hybridtragwerken aus Konstruktionsbeton und Stahl. Dissertation, Institut für Konstruktion und Entwurf II, Universität Stuttgart, 2000

Schmidt, M.; Bunje, K.; Dehn, F.; Droll, K.; Fehling, E.; Greiner, S.; Horvath, J.; Kleen, Eu.; Müller, Ch.; Reineck, K.-H.; Schachinger, I.; Teichmann, T.; Teutsch, M.; Thiel, R.; Tue, N. V. (2008): Sachstandbericht Ultrahochfester Beton. DAfStb Heft 561. Beuth Verlag, Berlin, 2008

Schönlin, K. (1988): Ermittlung der Orientierung, Menge und Verteilung der Fasern in faserbewehrtem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 83 (1988), Heft 6, S. 168–171. Ernst & Sohn, Berlin, 1988

Seidl, M. (2002): Auslegung von Hybridtürmen für Windenergieanlagen. Beton- und Stahlbetonbau 97 (2002), Heft 11, S. 564–575. Ernst & Sohn, Berlin, 2002

Sodeikat, Ch.; Schönemann, U.; Lautz, M.; Schießl, P.; Gehlen, Ch. (2004): Untersuchungen an den Spannverankerungen dreier Straßenbrücken in München. Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004), Heft 4, S. 278-288. Ernst & Sohn, Berlin, 2004

Specker, A. (2001): Der Einfluss der Fugen auf die Querkraft- und Torsionstragfähigkeit extern vorgespannter Segmentbrücken. Dissertation, Arbeitsbereich Massivbau, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2001

Stiftungslehrstuhl Windenergie (2010): Entwurf von Windenergieanlagen I. Vorlesungsskript, Stiftungslehrstuhl Windenergie, Universität Stuttgart, 2010

Tue, N. V.; Schenck, G.; Schwarz, J. (2005): Absicherung der statisch erhobenen Festbetonkennwerte für die neue Normengeneration. Forschungsbericht vom Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Leipzig, Januar 2005

Urban, S.; Strauss, A.; Wagner, R.; Reiterer, M.; Dehlinger, Ch. (2012a): Experimentelle Untersuchungen von ermüdungsbeanspruchten Betonstrukturen zur Feststellung des realen Schädigungsgrades. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 7, S. 463-475. Ernst & Sohn, Berlin, 2012

Urban, S.; Strauss, A.; Macho, W.; Bergmeister, K..; Dehlinger, Ch.; Reiterer, M. (2012b): Zyklisch belastete Betonstrukturen. Bautechnik 89 (2012), Heft 11, S. 737-753. Ernst & Sohn, Berlin, 2012

Wefer, M. (2010): Materialverhalten und Bemessungswerte von ultrahochfestem Beton unter einaxialer Ermüdungsbeanspruchung. Dissertation, Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover. Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 7, 2010

Wesche, K. (1977): Baustoffe für tragende Bauteile. Band 1 – Baustoffkenngrößen, Meßtechnik, Statistik. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Bauverlag , Wiesbaden und Berlin, 1977

Wiemann, J.; Lesny, , K.; Richwien, W. (2005): Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen - Gründungskonzepte und geotechnische Grundlagen. 2. Auflage. In: Richwien, W. (Hrsg.): Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik. Verlag Glückauf, Essen, 2005

Zaajier, M.B. (2006): Foundation modelling to assess dynamic behaviour of offshore wind turbines. Applied Ocean Research, Volume 28, Issue 1, S.45-57. Elsevier, February 2006

Zeiler, M.; Dahlke, C.; Nolte, N. (2005): Offshore-Windparks in der AWZ von Nord- und Ostsee. pro*met* 31 (2005), Nr. 1, S. 71-76

Zelger, C.; Rüsch, H. (1961): Der Einfluß von Fugen auf die Festigkeit von Fertigteilschalen. Beton- und Stahlbetonbau 56 (1961), Heft 10, S. 234-237. Ernst & Sohn, Berlin, 1961

Zilch, K.; Zehetmaier, G. (2010): Bemessung im konstruktiven Ingenieurbau. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Springer-Verlag, Berlin, 2010

Verzeichnis der Bilder

Bild 1.1-1: Installierte Leistung der an Land und auf See errichteten Windenergieanlagen [Ender (2014)] 17
Bild 1.1-2: Kostensenkungspotentiale entlang der Wertschöpfungskette der Offshore-Windenergie [www.windresearch.de] 18
Bild 2.2-1: Offshore-Windparks in der AWZ der Nordsee [www.bsh.de] 24
Bild 2.2-2: Wassertiefen in der AWZ der Nordsee [www.bsh.de] 24
Bild 2.4-1: Definition der Wasserstände [DIN EN 61400-3 (2010)] 27
Bild 3.1-1: Komponenten einer OWEA [DIN EN 61400-3 (2010)] 29
Bild 3.3-1: Bauablauf bei einer OWEA mit Monopile-Gründung [www.enbw.com] 32
Bild 3.4-1: Terminal für die Serienfertigung von OWEA [www.strabag-offshore.com] 33
Bild 3.4-2: Installationsschiff [Hartwig und Mayer (2012)] 34
Bild 3.4-3: OWEA mit Tragstruktur bestehend aus Schwerkraftfundament und Stahlrohrturm [Hartwig und Mayer (2012)] 34
Bild 3.4-4: Testfundament im Maßstab 1:1 [Hartwig und Mayer (2012)] 36
Bild 4.3-1: Längsschnitt der Tragstruktur bestehend aus Schwerkraftfundament und UHFFB Turm 40
Bild 4.3-2: Zentrische externe Vorspannung [Grünberg und Göhlmann (2011)] 41
Bild 4.3-3: Korrosionsschutz externer Spannglieder [Rombach (2003)] 42
Bild 4.3-4: Verankerung der externen Vorspannung am Turmkopf 43
Bild 4.3-5: Spanngliedführung und -verankerung der externen Vorspannung mit Hilfe von Konsolen 43
Bild 4.3-6: Übergang vom UHFFB Turm zum Schwerkraftfundament 44
Bild 4.3-7: Innenansicht des UHFFB Turms 44
Bild 4.3-8: Fuge mit Dichtung zwischen den zentrisch vorgespannten Turmsegmenten aus UHFFB 45
Bild 5.2-1: Geometrie des Versuchskörpers für zentrische Zugversuche (Abmessungen in mm) 51
Bild 5.2-2: Schalungen zur Herstellung der Zylinder und Prismen 52
Bild 5.2-3: Schalungen zur Herstellung der Versuchskörper für die zentrischen Zugversuche 52
Bild 5.2-4: „Elefantenhautbildung“ auf der nicht geschalten Oberfläche 53
Bild 5.2-5: Betonageablauf zur Herstellung der Versuchskörper für die zentrischen Zugversuche 53
Bild 5.2-6: Beladenes Wasserbecken vor dem Wassereinfüllen für die Wärmebehandlung 54

Bild 5.3-1: Belastungsschema für die E-Modul-Prüfung [DIN 1048-Teil 5 (1991)] 55
Bild 5.3-2: „Anlauf“ (Gegenkrümmung) der Kraft-Verformungs-Kurve in der Nähe des Ursprungs nach Grübl et al. (2001) 57
Bild 5.3-3: σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Charge C1 als Ergebnis der verformungsgeregelten Druckversuche (bei den Zylindern KZ-4-DFM2-C1-06_09_2010 und KZ-5-DFM2-C1-06_09_2010 konnte der abfallende Ast der Versuchskurve nicht ermittelt werden) 58
Bild 5.3-4: σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Charge C2 als Ergebnis der verformungsgeregelten Druckversuche (beim Zylinder KZ-5-DFM2-C2-13_09_2010 kam es zu einem vollständigen Datenverlust) 58
Bild 5.3-5: σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Charge C3 als Ergebnis der verformungsgeregelten Druckversuche (bei den Zylindern KZ-4-DFM2-C3-20_09_2010 und KZ-5-DFM2-C3-20_09_2010 konnte der abfallende Ast der Versuchskurve nicht ermittelt werden) 59
Bild 5.3-6: Zylinderdruckfestigkeit f_c in Abhängigkeit vom Alter der Zylinder der Chargen C1 bis C3 zum Zeitpunkt der Prüfung 61
Bild 5.3-7: E-Modul E_c in Abhängigkeit vom Alter der Zylinder der Chargen C1 bis C3 zum Zeitpunkt der Prüfung 62
Bild 5.3-8: Approximation der σ_c -ε_c-Kurve für Ductal® nach Frettlöhr (2011) 63
Bild 5.3-9: Approximation der σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Chargen C1 bis C3 64
Bild 5.4-1: Versuchsstand für die Durchführung der Biegezugversuche mit eingebautem Prisma mit Kerbe 65
Bild 5.4-2: Instrumentierung der Prismen ohne Kerbe für die Durchführung der Biegezugversuche 66
Bild 5.4-3: Instrumentierung der Prismen mit Kerbe für die Durchführung der Biegezugversuche 67
Bild 5.4-4: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen ohne Kerbe der Charge C1 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 68
Bild 5.4-5: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen ohne Kerbe der Charge C2 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 68
Bild 5.4-6: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen ohne Kerbe der Charge C3 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 69
Bild 5.4-7: Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ in Abhängigkeit vom Alter der Prismen ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 zum Zeitpunkt der Prüfung 71
Bild 5.4-8: Biegezugfestigkeit f_{ctfl} in Abhängigkeit vom Alter der Prismen ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 zum Zeitpunkt der Prüfung 71
Bild 5.4-9: Definition einer aus einem Biegezugversuch ermittelten charakteristischen σ_{ctfl}-w_m-Kurve [Frettlöhr (2011)] 72
Bild 5.4-10: Mittlere charakteristische σ_{ctfl}-w_m-Kurve der Probekörper ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 72

Bild 5.4-11: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen mit Kerbe der Charge C3 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 74

Bild 5.4-12: σ_{ctfl}-w_r-Kurven der Prismen mit Kerbe der Charge C3 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 74

Bild 5.4-13: Biegezugfestigkeit f_{ctfl} in Abhängigkeit vom Alter der Prismen mit Kerbe der Charge C3 zum Zeitpunkt der Prüfung 76

Bild 5.5-1: Versuchsstand für die Durchführung der zentrischen Zugversuche 77

Bild 5.5-2: Instrumentierung der Versuchskörper ohne Kerbe für die Durchführung der zentrischen Zugversuche 78

Bild 5.5-3: Elemente des optischen Messbereichs bei Versuchskörpern ohne Kerbe 79

Bild 5.5-4: Instrumentierung der Versuchskörper mit Kerbe für die Durchführung der zentrischen Zugversuche 80

Bild 5.5-5: Elemente des optischen Messbereichs bei Versuchskörpern mit Kerbe 81

Bild 5.5-6: σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven der Versuchskörper ohne Kerbe der Charge C2 als Ergebnis der weggeregelten zentrischen Zugversuche 83

Bild 5.5-7: σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven der Versuchskörper ohne Kerbe der Charge C3 als Ergebnis der weggeregelten zentrischen Zugversuche 84

Bild 5.5-8: Verlauf der Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ in Abhängigkeit vom Alter der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 zum Zeitpunkt der Prüfung 87

Bild 5.5-9: Verlauf der Zugfestigkeit f_{ct} in Abhängigkeit vom Alter der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 zum Zeitpunkt der Prüfung 87

Bild 5.5-10: Definition einer aus einem zentrischen Zugversuch ermittelten charakteristischen σ_{ct}-ε_{ct}-Kurve [Frettlöhr (2011)] 88

Bild 5.5-11: Mittlere charakteristische σ_{ct}-ε_{ct}-Kurve der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 als Ergebnis der weggeregelten zentrischen Zugversuche 88

Bild 5.5-12: Mittlerer E-Modul E_{ctm} der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 unter Zugbeanspruchung im Vergleich zum mittleren E-Modul E_{cm} der Zylinder unter Druckbeanspruchung 91

Bild 5.5-13: σ_{ct}-w_r-Kurven der Versuchskörper ohne Kerbe der Charge C2 basierend auf optischer Messung bei der Durchführung weggeregelter zentrischer Zugversuche 95

Bild 5.5-14: σ_{ct}-w_r-Kurven der Versuchskörper ohne Kerbe der Charge C3 basierend auf optischer Messung bei der Durchführung weggeregelter zentrischer Zugversuche 96

Bild 5.5-15: Vergleich der Bruchenergie G_{cr2} und $G_{cr2,optische\ Messung}$ der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 99

Bild 5.5-16: σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven der Versuchskörper mit Kerbe der Charge C1 als Ergebnis der weggeregelten zentrischen Zugversuche 100

Bild 5.5-17: σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven der Versuchskörper mit Kerbe der Charge C2 als Ergebnis der weggeregelten zentrischen Zugversuche 101

Bild 5.5-18: Verlauf der Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ in Abhängigkeit vom Alter der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 zum Zeitpunkt der Prüfung 104

Bild 5.5-19: Verlauf der Zugfestigkeit f_{ct} in Abhängigkeit vom Alter der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 zum Zeitpunkt der Prüfung 104

Bild 5.5-20: Mittlere charakteristische σ_{ct}-ε_{ct}-Kurven der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 als Ergebnis der weggeregelten zentrischen Zugversuche 105

Bild 5.5-21: σ_{ct}-w_r-Kurven der Versuchskörper mit Kerbe der Charge C1 basierend auf der optischen Messung sowie Rissöffnungsmessern bei weggeregelten zentrischen Zugversuchen 107

Bild 5.5-22: σ_{ct}-w_r-Kurven der Versuchskörper mit Kerbe der Charge C2 basierend auf der optischen Messung sowie Rissöffnungsmessern bei weggeregelten zentrischen Zugversuchen 108

Bild 5.5-23: Vergleich der Bruchenergie G_{cr2} und $G_{cr2,optische\ Messung}$ der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 111

Bild 5.5-24: Schnittführung zur Probenentnahme und Lage der Bruchflächen 112

Bild 5.5-25: Bruchfläche im Bereich der Kerbe 112

Bild 5.5-26: Messeinrichtung für die Aufnahmen der Schnittflächen der Proben [Frettlöhr (2011)] 113

Bild 5.5-27: Geometrische Zusammenhänge zur Ableitung des Faserorientierungsfaktors [Frettlöhr (2011] 114

Bild 5.5-28: Verlauf der Approximationskurve nach Gl. (5-16) [Frettlöhr (2011)] 115

Bild 6.2-1: Bemessungskurve für Druckbeanspruchung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) von Ductal® mit 2,0 Vol.-% Stahlfasern vom Typ Redaelli (l_f /d_f = 14/0,185) 124

Bild 6.2-2: Verlauf der Materialkurve zur Beschreibung des Zugtragverhaltens von UHFFB für unterschiedliche Faserorientierungsfaktoren η (unmaßstäbliche Darstellung des ansteigenden Astes) [Frettlöhr (2011)] 126

Bild 6.3-1: Wöhlerlinien für normalfesten und hochfesten Beton nach CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010) 129

Bild 6.3-2: Wöhlerlinien für UHFFB nach Wefer (2010) und für normalfesten und hochfesten Beton nach CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010) 132

Bild 7.2-1: Standorte der Messstationen NSB II und FINO1 [www.bsh.de, ergänzt] 135

Bild 7.2-2: Detailzeichnung der NSB II [www.bsh.de] 136

Bild 7.2-3: Detailzeichnung der Forschungsplattform FINO1 [www.bsh.de] 136

Bild 7.3-1: Flussdiagramm für die Auswertung der Messdaten der NSB II mit der Software MATLAB 139

Bild 7.3-2: Kontrolle der Wellendaten am Beispiel der signifikanten Wellenhöhe und der dazugehörigen Nulldurchgangsperiode 141

Bild 7.3-3: Statistischen Verteilung der am Standort der NSB II gemessenen Windgeschwindigkeiten und Weibull-Verteilung gemäß den Angaben in der *Design Basis* 143

Bild 7.3-4: Auftretenswahrscheinlichkeit signifikanter Wellenhöhen H_s und zugehöriger Peak-Perioden T_p am Standort der NSB II 143

Bild 7.3-5: Wellenhöhen H_s und zugehöriger Nulldurchgangsperiode T_z am Standort der NSB II 144

Bild 7.3-6: Berechnung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Wellenereignisses am Beispiel der Windklasse von 8 bis 10 m/s 145

Bild 7.3-7: Scatter-Diagramme der unterschiedlichen Windklassen für den Standort der NSB II 146

Bild 7.3-8: Flussdiagramm für die Auswertung der Messdaten der Forschungsplattform FINO1 mit der Software MATLAB 150

Bild 7.3-9: Scatter-Diagramme der unterschiedlichen Windklassen für den Standort der Forschungsplattform FINO1 151

Bild 8.1-1: Zu betrachtende Hauptrichtungen bei der Ermittlung der Gründungsfedersteifigkeiten 155

Bild 8.1-2: Prinzipskizze des Mehrmassenschwingermodells 156

Bild 8.1-3: 1. Eigenfrequenz in Abhängigkeit von der Wandungsstärke t des UHFFB Turms für Variante A 161

Bild 8.1-4: 1. Eigenfrequenz in Abhängigkeit vom vertikalen Bettungsmodul k_{sv} für unterschiedliche Wandungsstärken t des UHFFB Turms von Variante A 162

Bild 8.1-5: 1. Eigenfrequenz in Abhängigkeit von der Wandungsstärke t des UHFFB Turms für Variante B 163

Bild 8.1-6: Resonanzdiagramm (engl. *Campbell-Diagram*) für Variante A mit C80/95 Fundamentschaft und Turm aus UHFFB mit t = 200 mm Wandungsstärke 165

Bild 8.1-7: Resonanzdiagramm (engl. *Campbell-Diagram*) für Variante B mit Fundamentschaft und Turm aus UHFFB mit t = 200 mm Wandungsstärke 166

Bild 8.2-1: Einfluss auf die Belastung von OWEA [Stiftungslehrstuhl Windenergie (2010)] 167

Bild 8.2-2: Flussdiagramm zu Flex 5 171

Bild 8.2-3: Modellierung des Fundaments 172

Bild 8.2-4: Flex 5 Eingabedatei für das Fundament 173

Bild 8.2-5: Flex 5 Eingabedatei für den UHFFB Turm 175

Bild 8.3-1: Ermittlung der Schnittgrößen 180

Bild 8.3-2: Koordinatensysteme und Höhenkoten sowie Sensornummern in Flex 5 181

Bild 8.3-3: Temperaturverteilung nach Germanischer Lloyd (2005) 183

Bild 8.3-4: Schiefstellung der Tragstruktur 184
Bild 8.4-1: Markov-Matrix 187
Bild 8.5-1: Mindestabstände für das Spannglied mit der Bezeichnung VT-CMM 4x04-165 KD [DIBt (2010)] 190
Bild 8.5-2: Maximale Anzahl der Spannglieder über die Höhe des UHFFB Turms 190
Bild 8.5-3: Maximale Anzahl der Spannglieder bei Segmenten mit Konsolen zur Verankerung der Spannglieder 191
Bild 8.5-4: Normalspannungsverlauf im ULS über die Höhe des Turms (Turmvariante 1) 197
Bild 8.5-5: Schubspannungsverteilung infolge Querkraft [Läpple (2007] 198
Bild 8.5-6: Definition der Stellen für den Schubspannungsnachweis im Segment 199
Bild 8.5-7: Mohr'scher Spannungskreis [Zilch und Zehetmaier (2010)] 200
Bild 8.5-8: Beanspruchung von Fugen [Grünberg und Göhlmann (2011)] 202
Bild 8.5-9: Teilschädigung am Turmfuß (Höhenkote 59,50 m) auf Grundlage der Wöhlerlinien nach Wefer (2010) 204
Bild 8.5-10: Teilschädigung am Turmfuß (Höhenkote 59,50 m) auf Grundlage der Wöhlerlinien für normalfesten und hochfesten Beton in Anlehnung an CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010) 204
Bild 8.5-11: Normalspannungsverlauf im SLS über die Höhe des Turms (Turmvariante 1) 206
Bild 8.5-12: Minimale Wandungsstärke über die Höhe des UHFFB Turms nach Germanischer Lloyd (2005) 207
Bild 8.5-13: Resonanzdiagramm (engl. *Campbell-Diagram*) für Turmvariante 3 mit C80/95 Fundamentschaft und Turm aus UHFFB mit abgestufter Wandungsstärke 208
Bild 8.5-14: Normalspannungsverlauf im ULS über die Höhe des Turms (Turmvariante 3) 209
Bild 8.5-15: Resonanzdiagramm (engl. *Campbell-Diagram*) für Turmvariante 5 mit C80/95 Fundamentschaft und Turm aus UHFFB mit abgestufter Wandungsstärke 212
Bild 9.1-1: Schubbeanspruchung parallel zur Bauteilebene am Beispiel einer Fertigteildecke mit Ortbetonergänzung 215
Bild 9.1-2: Schubbeanspruchung senkrecht zur Bauteilachse 215
Bild 9.2-1: Versuchskörper für die Durchführung von Schub-Druck-Versuchen zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Fugen 217
Bild 9.2-2: Gedachte Lage der prismatischen Versuchskörper in einem Turmtragwerk in Segmentbauweise 218
Bild 9.2-3: Grenzbeziehung der in der Fuge wirkenden Schub- und Normalspannung bei Versagen des Versuchskörpers nach Guckenberger et al. (1980) 219
Bild 9.2-4: Versuchskörper für die Durchführung von Abscherversuchen zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Fugen nach Mehlhorn et al. (1977) 220

Bild 9.2-5: Versuchskörper, die im Rahmen dieses Forschungsprojekts zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung verwendet wurden (Abmessungen in mm) 221

Bild 9.2-6: Versuchskörper, die im Rahmen dieses Forschungsprojekts zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung verwendet wurden (Abmessungen in mm) 221

Bild 9.2-7: Abrasive Wirkung unterschiedlicher Strahlmittel auf einer Oberfläche aus Ductal® 223

Bild 9.2-8: Geometrie der Kugelsegmente in der rauen Fuge der Versuchskörper zur Durchführung der Schub-Druck-Versuche (Abmessungen in mm) 224

Bild 9.2-9: Geometrie der Verzahnung der Fuge der Versuchskörper zur Durchführung der Schub-Druck-Versuche (Abmessungen in mm) 224

Bild 9.2-10: Geometrie der Verzahnung der Fuge der Versuchskörper zur Durchführung der Abscherversuche (Abmessungen in mm) 224

Bild 9.2-11: CNC-gesteuerte Nachbehandlung der Fuge [Hecht (2012)] 225

Bild 9.2-12: Ausbildung der Verzahnung im Steg [DBV (1999)] 226

Bild 10.2-1: Abmessung der einzelnen Versuchskörperhälften mit sehr glatter und gestrahlter Fuge (Abmessungen in mm) 231

Bild 10.2-2: Abmessung der einzelnen Versuchskörperhälften mit rauer Fuge (Abmessungen in mm) 232

Bild 10.2-3: Abmessung der einzelnen Versuchskörperhälften mit verzahnter Fuge (Abmessungen in mm) 233

Bild 10.2-4: Schalungen zur Herstellung der unteren Versuchskörperhälfte für Schub-Druck-Versuche 234

Bild 10.2-5: Befüllen der Schalungen zur Herstellung der unteren Versuchskörperhälfte für die Schub-Druck-Versuche (verzahnte Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche) 235

Bild 10.2-6: Befüllen der Schalungen zur Herstellung der oberen Versuchskörperhälfte für die Schub-Druck-Versuche (verzahnte Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche) 236

Bild 10.2-7: Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen bzw. Fugengeometrie der oberen (jeweils oberes Bild) und der unteren Versuchskörperhälften (jeweils unteres Bild) der Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel α von 0° für die Durchführung der Schub-Druck-Versuche 237

Bild 10.2-8: Passgenauigkeit der Fuge bei den Versuchskörpern für die Durchführung der Schub-Druck-Versuche 238

Bild 10.3-1: σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Charge C4 als Ergebnis der kraftgeregelten Druckversuche mit Verformungsmessung 240

Bild 10.3-2: σ_c -ε_c-Kurven der Zylinder der Charge C5 als Ergebnis der kraftgeregelten Druckversuche mit Verformungsmessung 240

Bild 10.3-3: Zylinderdruckfestigkeit f_c in Abhängigkeit vom Alter der Zylinder der Chargen C4 bis C11 zum Zeitpunkt der Prüfung 242

Bild 10.4-1: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C4 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 244

Bild 10.4-2: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C5 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 245

Bild 10.4-3: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C6 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 245

Bild 10.4-4: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C7 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 246

Bild 10.4-5: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C8 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 246

Bild 10.4-6: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C9 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 247

Bild 10.4-7: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C10 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 247

Bild 10.4-8: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C11 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 248

Bild 10.4-9: Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ in Abhängigkeit vom Alter der Prismen der Chargen C4 bis C11 zum Zeitpunkt der Prüfung 251

Bild 10.4-10: Biegezugfestigkeit f_{ctfl} in Abhängigkeit vom Alter der Prismen der Chargen C4 bis C11 zum Zeitpunkt der Prüfung 251

Bild 10.5-1: Versuchsstand für die Durchführung der Schub-Druck-Versuche 252

Bild 10.5-2: Versuchseinrichtung für die Durchführung der Schub-Druck-Versuche (schematisch) 253

Bild 10.5-3: Instrumentierung der Versuchskörper für die Durchführung der Schub-Druck-Versuche 254

Bild 10.5-4: σ_c -ε_c-Kurven der Versuchskörper der Charge C4 als Ergebnis der weggeregelten Druckversuche 256

Bild 10.5-5: σ_c -ε_c-Kurven der Versuchskörper der Charge C5 als Ergebnis der weggeregelten Druckversuche 256

Bild 10.5-6: Schub-Druck-Diagramm für Versuchskörper ohne Fuge (Referenzprismen) 258

Bild 10.5-7: Schub-Druck-Diagramm für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge 260

Bild 10.5-8: Schub-Druck-Diagramm für Versuchskörper mit gestrahlter Fuge 262

Bild 10.5-9: Schub-Druck-Diagramm für Versuchskörper mit rauer Fuge 265

Bild 10.5-10: Schub-Druck-Diagramm für Versuchskörper mit verzahnter Fuge 268

Bild 11.2-1: Geometrie der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge für die Abscherversuche (Abmessungen in mm) 276

Bild 11.2-2: Geometrie der Versuchskörper mit verzahnter Fuge für die Abscherversuche (Abmessungen in mm) 276

Verzeichnis der Bilder 365

Bild 11.2-3: Befüllen der Schalungen zur Herstellung der äußeren Versuchskörperteile für die Abscherversuche 278

Bild 11.2-4: Befüllen der Schalungen zur Herstellung des mittleren Versuchskörperteils für die Abscherversuche 279

Bild 11.2-5: Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen bzw. Fugengeometrie der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge für die Durchführung der Abscherversuche 280

Bild 11.2-6: Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen bzw. Fugengeometrie der Versuchskörper mit verzahnter Fuge für die Durchführung der Abscherversuche 280

Bild 11.2-7: Passgenauigkeit der Fugen bei den Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge für die Durchführung der Abscherversuche 281

Bild 11.2-8: Passgenauigkeit der Fugen bei den Versuchskörpern mit verzahnter Fuge für die Durchführung der Abscherversuche 281

Bild 11.3-1: Zylinderdruckfestigkeit f_c in Abhängigkeit vom Alter der Zylinder der Chargen C12 bis C19 zum Zeitpunkt der Prüfung 284

Bild 11.4-1: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C12 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 285

Bild 11.4-2: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C13 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 286

Bild 11.4-3: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C14 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 286

Bild 11.4-4: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C15 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 287

Bild 11.4-5: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C16 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 287

Bild 11.4-6: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C17 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 288

Bild 11.4-7: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C18 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 288

Bild 11.4-8: σ_{ctfl}-w_m-Kurven der Prismen der Charge C19 als Ergebnis der weggeregelten Biegezugversuche 289

Bild 11.4-9: Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ in Abhängigkeit vom Alter der Prismen der Chargen C12 bis C19 zum Zeitpunkt der Prüfung 292

Bild 11.4-10: Biegezugfestigkeit f_{ctfl} in Abhängigkeit vom Alter der Prismen der Chargen C12 bis C19 zum Zeitpunkt der Prüfung 292

Bild 11.5-1: Versuchsstand für die Durchführung der Abscherversuche 293

Bild 11.5-2: Versuchseinrichtung für die Durchführung der Abscherversuche (schematisch) 294

Bild 11.5-3: Belastungsschema für die Abscherversuche unter zyklischer Belastung 295

Bild 11.5-4: Belastungsschema für die Abscherversuche unter statischer Belastung 295

Bild 11.5-5: Instrumentierung der Versuchskörper für die Durchführung der Abscherversuche 296

Bild 11.5-6: Mittlerer Versuchskörperteil mit hervorstehenden Kontaktflächen 297

Bild 11.5-7: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa 299

Bild 11.5-8: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa 300

Bild 11.5-9: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Oberflächenbeschaffenheit der Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa 300

Bild 11.5-10: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-7) 301

Bild 11.5-11: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-8) 302

Bild 11.5-12: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-9) 303

Bild 11.5-13: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa 306

Bild 11.5-14: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa 306

Bild 11.5-15: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa 307

Bild 11.5-16: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa 307

Bild 11.5-17: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-13) 308

Bild 11.5-18: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-14) 309

Bild 11.5-19: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-15) 310

Bild 11.5-20: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-16) 311

Bild 11.5-21: Vergleichende Darstellung der Bruchlastspielzahl der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa mit konstanter bezogener Unterlast $T_u = 0,05$ 315

Bild 11.5-22: τ_j-Δs_1-Kurven infolge zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa 316

Bild 11.5-23: Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa 316

Bild 11.5-24: τ_j-Δs_1-Kurven infolge zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa 317

Bild 11.5-25: Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa 317

Bild 11.5-26: τ_j-Δs_1-Kurven infolge zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa 318

Bild 11.5-27: Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa 318

Bild 11.5-28: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa 319

Bild 11.5-29: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa 320

Bild 11.5-30: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa 320

Bild 11.5-31: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-28) 321

Bild 11.5-32: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-29) 322

Bild 11.5-33: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung für Versuchskörper mit sehr

glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-30) 323

Bild 11.5-34: Vergleichende Darstellung der Bruchlastspielzahl der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa, 90 MPa und 0 MPa mit konstanter bezogener Unterlast $T_u = 0{,}05$ 326

Bild 11.5-35: τ_j-Δs_1-Kurven infolge zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa 327

Bild 11.5-36: Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa 327

Bild 11.5-37: τ_j-Δs_1-Kurven infolge zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa 328

Bild 11.5-38: Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa 328

Bild 11.5-39: τ_j-Δs_1-Kurven infolge zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa 329

Bild 11.5-40: Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa 329

Bild 11.5-41: τ_j-Δs_1-Kurven infolge zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa 330

Bild 11.5-42: Verlauf der Verschiebung Δs_1 gegenüber der Bruchlastspielzahl für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa 330

Bild 11.5-43: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa 332

Bild 11.5-44: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa 332

Bild 11.5-45: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa 333

Bild 11.5-46: τ_j-σ_j-Kurven sowie τ_j / σ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa 333

Bild 11.5-47: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-43) 334

Bild 11.5-48: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-44) 335

Bild 11.5-49: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-45) 336

Bild 11.5-50: τ_j-Δs_1-Kurven infolge statischer Belastung nach Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung für Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa (Ausschnitt aus Bild 11.5-46) 337

Bild 11.6-1: Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa 338

Bild 11.6-2: Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa 339

Bild 11.6-3: Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa 339

Bild 11.6-4: Tragverhalten der Versuchskörper mit verzahnter Fuge unter statischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa 340

Bild 11.6-5: Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa 341

Bild 11.6-6: Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa 342

Bild 11.6-7: Tragverhalten der Versuchskörper mit sehr glatter und verzahnter Fuge unter statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa 342

Bild 11.6-8: Tragverhalten der Versuchskörper mit verzahnter Fuge unter statischer Belastung nach vorhergehender zyklischer Belastung bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa 343

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.2-1: Kenndaten der OWEA 25
Tabelle 2.3-1: Dynamischer Bettungsmodul und Federsteifigkeiten je Fundamentplatte 26
Tabelle 2.4-1: Wasserstände und Tidenhub 26
Tabelle 2.4-2: Wellen am Standort 27
Tabelle 2.4-3: Strömungsgeschwindigkeiten auf Höhe der Wasserlinie 27
Tabelle 2.5-1: Parameter für Weibull-Verteilung der Windgeschwindigkeiten 28
Tabelle 5.1-1: Versuchsprogramm zur Untersuchung des Materialverhaltens von UHFFB 47
Tabelle 5.2-1: Zusammensetzung von Ductal® 49
Tabelle 5.2-2: Mischablauf für Ductal® 49
Tabelle 5.2-3: Frischbetoneigenschaften der Chargen C1 bis C3 50
Tabelle 5.3-1: Ergebnisse der kraft- und verformungsgeregelten Druckversuche der Chargen C1 bis C3 60
Tabelle 5.3-2: Bei E-Modul-Prüfungen an Zylindern der Chargen C1 bis C3 ermittelte Sekantenmodul 62
Tabelle 5.4-1: Bei weggeregelten Biegezugversuchen an Prismen ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 ermittelte Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ und korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl,el})$ 69
Tabelle 5.4-2: Bei weggeregelten Biegezugversuchen an Prismen ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 ermittelte Biegezugfestigkeit f_{ctfl} und korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl})$ 70
Tabelle 5.4-3: Charakteristische Punkte des aufsteigenden Astes der mittleren charakteristischen σ_{ctfl}-w_m-Kurve der Probekörper ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 73
Tabelle 5.4-4: Charakteristische Punkte des abfallenden Astes der mittleren charakteristischen σ_{ctfl}-w_m-Kurve der Probekörper ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 73
Tabelle 5.4-5: Bei weggeregelten Biegezugversuchen an Prismen mit Kerbe der Charge C3 ermittelte Biegezugfestigkeit f_{ctfl} und korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl})$ sowie Rissbreite $w_r(f_{ctfl})$ 75
Tabelle 5.5-1: Bei weggeregelten zentrischen Zugversuchen an Versuchskörpern ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 ermittelte Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ und korrespondierende Betonzugdehnung ε_{ct} ($f_{ct,el}$) 85
Tabelle 5.5-2: Bei weggeregelten zentrischen Zugversuchen an Versuchskörpern ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 ermittelte Zugfestigkeit f_{ct} und korrespondierende Betonzugdehnung $\varepsilon_{ct}(f_{ct})$ 86

Tabelle 5.5-3: Charakteristische Punkte des aufsteigenden Astes der mittleren charakteristischen σ_{ct}-ε_{ct}-Kurve der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 89

Tabelle 5.5-4: Charakteristische Punkte des abfallenden Astes der mittleren charakteristischen σ_{ct}-ε_{ct}-Kurve der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 89

Tabelle 5.5-5: Bei weggeregelten zentrischen Zugversuchen an Versuchskörpern ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 ermittelte E-Modul E_{ct} 90

Tabelle 5.5-6: Elastische Energie G_{el} der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 93

Tabelle 5.5-7: „Multi-cracking“ Energie G_{cr1} der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 93

Tabelle 5.5-8: Bruchenergie G_{cr2} der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 94

Tabelle 5.5-9: Rissbreite $w_r(f_{ct})$ der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 basierend auf der optischen Messung 97

Tabelle 5.5-10: Bruchenergie $G_{cr2,optische\ Messung}$ der Versuchskörper ohne Kerbe der Chargen C2 und C3 98

Tabelle 5.5-11: Bei weggeregelten zentrischen Zugversuchen an Versuchskörpern mit Kerbe der Chargen C1 und C2 ermittelte Elastizitätsgrenze der Zugspannung $f_{ct,el}$ und korrespondierende Betonzugdehnung $\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$ 102

Tabelle 5.5-12: Bei weggeregelten zentrischen Zugversuchen an Versuchskörpern mit Kerbe der Chargen C1 und C2 ermittelte Zugfestigkeit f_{ct} und korrespondierende Betonzugdehnung $\varepsilon_{ct}(f_{ct})$ 103

Tabelle 5.5-13: Charakteristische Punkte des aufsteigenden Astes der mittleren charakteristischen σ_{ct}-ε_{ct}-Kurve der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 105

Tabelle 5.5-14: Charakteristische Punkte des abfallenden Astes der mittleren charakteristischen σ_{ct}-ε_{ct}-Kurve der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 106

Tabelle 5.5-15: Bruchenergie G_{cr2} der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 106

Tabelle 5.5-16: Rissbreite $w_r(f_{ct})$ der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 basierend auf der optischen Messung 109

Tabelle 5.5-17: Bruchenergie $G_{cr2,optische\ Messung}$ der Versuchskörper mit Kerbe der Chargen C1 und C2 110

Tabelle 5.5-18: Ergebnisse der Faserorientierungsmessung als Mittelwerte der ungekerbten Querschnitte und Ermittlung der 1D Zugfestigkeit $f_{ct,1D}$ 116

Tabelle 5.5-19: Ergebnisse der Faserorientierungsmessung im gekerbten Querschnitt (Bruchfläche)und Ermittlung der 1D Zugfestigkeit $f_{ct,1D}$ 117

Tabelle 5.6-1: Zusammenfassung der ermittelten Spannungs-Verformungs-Beziehungen und der Materialkennwerte 119

Verzeichnis der Tabellen 373

Tabelle 6.1-1: Teilsicherheitsbeiwerte für UHPC (=UHFFB) sowie Betonstahl und Spannstahl nach dem Entwurf der fib-TG 8.6 (2010) 121

Tabelle 6.2-1: Berechnung des 5 % - Fraktilwerts der Druckfestigkeit f_{ck} (t-Verteilung nach Student) 122

Tabelle 6.2-2: Berechnung des 5 % - Fraktilwerts der 1D Zugfestigkeit $f_{ctk,1D}$ (t-Verteilung nach Student) 127

Tabelle 6.2-3: Berechnung des 5 % - Fraktilwerts der Zugspannung an der Elastizitätsgrenze $f_{ctk,el}$ (t-Verteilung nach Student) 127

Tabelle 7.2-1: Winddaten der NSB II und der Forschungsplattform FINO1 137

Tabelle 7.2-2: Wellendaten der NSB II und der Forschungsplattform FINO1 137

Tabelle 7.3-1: Faktoren für unterschiedliche Mittelungszeiträume bezogen auf den 10-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit [Germanischer Lloyd (2005)] 140

Tabelle 8.2-1: Hydrodynamische Beiwerte C_D und C_M nach Germanischer Lloyd (2005) 173

Tabelle 8.2-2: Zusätzliche Turmmassen 175

Tabelle 8.2-3: Lastfälle nach Germanischer Lloyd (2005) und rot markiert die mit Flex 5 untersuchten Lastfälle 178

Tabelle 8.3-1: Teilsicherheitsbeiwerte für Lasten nach Germanischer Lloyd (2005) 182

Tabelle 8.5-1: Untersuchte Turmvarianten 188

Tabelle 8.5-2: Zulässige Vorspannkräfte für die „Compact Mono Multi (CMM)“ Spannglieder des Litzenspannverfahrens VT-CMM KD für externe Vorspannung ohne Verbund [DIBt (2010)] 189

Tabelle 8.5-3: Rechenwerte der Vorspannkraft (Turmvariante 1) 195

Tabelle 8.5-4: Gesamtschädigung an verschiedenen Höhenköten der Turmvariante 1 203

Tabelle 8.5-5: Rechenwerte der Vorspannkraft (Turmvariante 3) 209

Tabelle 8.5-6: Gesamtschädigung an verschiedenen Höhenköten der Turmvariante 3 210

Tabelle 8.5-7: Rechenwerte der Vorspannkraft (Turmvariante 5) 213

Tabelle 8.5-8: Gesamtschädigung an verschiedenen Höhenköten der Turmvariante 5 213

Tabelle 8.5-9: Vergleich der untersuchten Turmvarianten 214

Tabelle 10.1-1: Versuchsprogramm zur Untersuchung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung 228

Tabelle 10.2-1: Frischbetoneigenschaften der Chargen C4 bis C11 230

Tabelle 10.3-1: Ergebnisse der kraftgeregelten Druckversuche der Chargen C4 bis C11 241

Tabelle 10.3-2: Bei E-Modul-Prüfungen an Zylindern der Chargen C4 und C5 ermittelte Sekantenmodul 243

Tabelle 10.4-1: Bei weggeregelten Biegezugversuchen an Prismen der Chargen C4 bis C11 ermittelte Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ und korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl,el})$ 249

Tabelle 10.4-2: Bei weggeregelten Biegezugversuchen an Prismen der Chargen C4 bis C11 ermittelte Biegezugfestigkeit f_{ctfl} und korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl})$ 250

Tabelle 10.5-1: Ergebnisse der Druckversuche an Versuchskörpern ohne Fuge (Referenzprismen) 257

Tabelle 10.5-2: Umrechnung der an Prismen und Zylindern ermittelten Festigkeitswerte 258

Tabelle 10.5-3: Ergebnisse der Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge 259

Tabelle 10.5-4: Ergebnisse der Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit gestrahlter Fuge 261

Tabelle 10.5-5: Ergebnisse der Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit rauer Fuge 264

Tabelle 10.5-6: Ergebnisse der Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge 267

Tabelle 11.1-1: Versuchsprogramm zur Untersuchung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung 272

Tabelle 11.2-1: Frischbetoneigenschaften der Chargen C12 bis C19 275

Tabelle 11.3-1: Ergebnisse der kraftgeregelten Druckversuche der Chargen C12 bis C19 283

Tabelle 11.4-1: Bei weggeregelten Biegezugversuchen an Prismen der Chargen C12 bis C19 ermittelte Elastizitätsgrenze der Biegezugrandspannung $f_{ctfl,el}$ und korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl,el})$ 290

Tabelle 11.4-2: Bei weggeregelten Biegezugversuchen an Prismen der Chargen C12 bis C19 ermittelte Biegezugfestigkeit f_{ctfl} und korrespondierende Mittendurchbiegung $w_m(f_{ctfl})$ 291

Tabelle 11.5-1: Spannungen und Verschiebung $\Delta s_{1,r}$ bei Versagen der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa 301

Tabelle 11.5-2: Spannungen und Verschiebung $\Delta s_{1,r}$ bei Versagen der Versuchskörper mit sehr glatter Oberflächenbeschaffenheit der Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa 302

Tabelle 11.5-3: Spannungen und Verschiebung $\Delta s_{1,r}$ bei Versagen der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa 303

Tabelle 11.5-4: Belastungshorizonte und entsprechende Absolutwerte der Ober- und Unterlasten für die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung an Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge 304

Tabelle 11.5-5: Spannungen und Verschiebung $\Delta s_{1,ult}$ bei Versagen der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa 308

Tabelle 11.5-6: Spannungen und Verschiebung $\Delta s_{1,ult}$ bei Versagen der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa 309

Tabelle 11.5-7: Spannungen und Verschiebung $\Delta s_{1,ult}$ bei Versagen der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa 310

Tabelle 11.5-8: Spannungen und Verschiebung $\Delta s_{1,ult}$ bei Versagen der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa 311

Tabelle 11.5-9: Belastungshorizonte und entsprechende Absolutwerte der Ober- und Unterlasten für die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge 312

Tabelle 11.5-10: Ergebnisse der Abscherversuche an Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge infolge zyklischer Belastung 314

Tabelle 11.5-11: Resttragfähigkeit der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa 321

Tabelle 11.5-12: Resttragfähigkeit der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa 322

Tabelle 11.5-13: Resttragfähigkeit der Versuchskörper mit sehr glatter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa 323

Tabelle 11.5-14: Ergebnisse der Abscherversuche an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge infolge zyklischer Belastung 324

Tabelle 11.5-15: Resttragfähigkeit der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa 334

Tabelle 11.5-16: Resttragfähigkeit der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 40 MPa 335

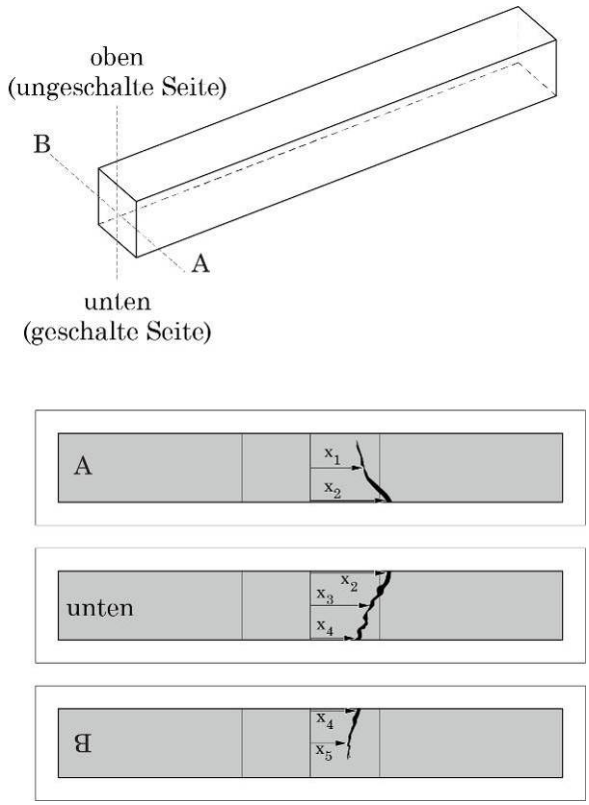
Tabelle 11.5-17: Resttragfähigkeit der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 90 MPa 336

Tabelle 11.5-18: Resttragfähigkeit der Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa 337

Anhang A Materialverhalten von UHFFB

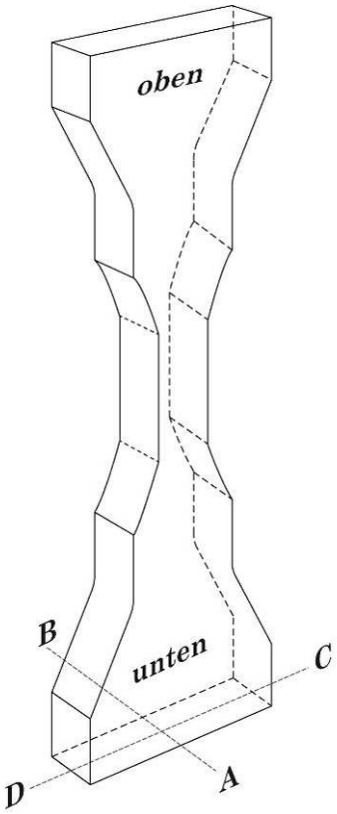
In Anhang A.1 sind die Ergebnisse der Druckversuche und E-Modul-Prüfungen der Chargen C1 bis C3 dargestellt. Je Charge ist eine Tabelle für die kraftgeregelten Druckversuche, für die E-Modul-Prüfung und die weggeregelten Druckversuche mit den wesentlichen Daten zur Versuchsdurchführung, den Probekörpern und den Prüfkräften bzw. -spannungen angegeben. Für die Probekörper, an denen verformungsgeregelte Druckversuche durchgeführt wurden, ist jeweils die Kraft-Längenänderungs-Kurve angegeben.

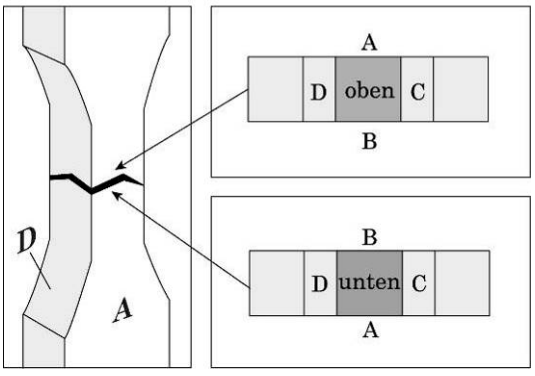
In Anhang A.2 sind die Ergebnisse der Biegezugversuche an Probekörpern ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 dargestellt. Je Charge ist eine Tabelle mit den wesentlichen Daten zur Versuchsdurchführung, den Probekörpern und den Prüfkräften bzw. -spannungen angegeben. Des Weiteren ist für jeden Probekörper die Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve angegeben sowie eine photographische Dokumentation der Risslokalisierung. Dabei wurde auch die Entfernung von der Mitte der Prismen zum Riss gemessen und protokolliert. Im nachfolgenden Bild ist die Anordnung der Fotos in Bezug auf die für die Prismen ohne Kerbe festgelegten Bezeichnungen sowie die gemessenen Entfernungen von der Mitte der Prismen zum Riss schematisch dargestellt.



In Anhang A.3 sind die Ergebnisse der Biegezugversuche an Probekörpern mit Kerbe der Chargen C1 bis C3 dargestellt. Je Charge ist eine Tabelle mit den wesentlichen Daten zur Versuchsdurchführung, den Probekörpern und den Prüfkräften bzw. -spannungen angegeben. Des Weiteren sind für jeden Probekörper die Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve sowie die Kraft-Rissöffnungs-Beziehung angegeben.

In Anhang A.4 sind die Ergebnisse der zentrischen Zugversuche an Versuchskörpern ohne Kerbe der Chargen C1 bis C3 dargestellt. Je Charge ist eine Tabelle mit den wesentlichen Daten zur Versuchsdurchführung, den Probekörpern und den Prüfkräften bzw. -spannungen angegeben. Des Weiteren sind für jeden Probekörper die Kraft-Längenänderungs-Kurve und die Kraft-Rissöffnungs-Beziehung sowie eine photographische Dokumentation der Risslokalisierung angegeben. Im nachfolgenden Bild ist die Anordnung der Fotos in Bezug auf die für die Versuchskörper ohne Kerbe festgelegten Bezeichnungen schematisch dargestellt.





In Anhang A.5 sind die Ergebnisse der zentrischen Zugversuche an Versuchskörpern mit Kerbe der Chargen C1 bis C3 dargestellt. Je Charge ist eine Tabelle mit den wesentlichen Daten zur Versuchsdurchführung, den Probekörpern und den Prüfkräften bzw. -spannungen angegeben. Des Weiteren sind für jeden Probekörper die Kraft-Längenänderungs-Kurve und die Kraft-Rissöffnungs-Beziehung angegeben.

A.1 Druckversuche und E-Modul-Prüfung

A.1.1 Charge C1

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 MPa/s)

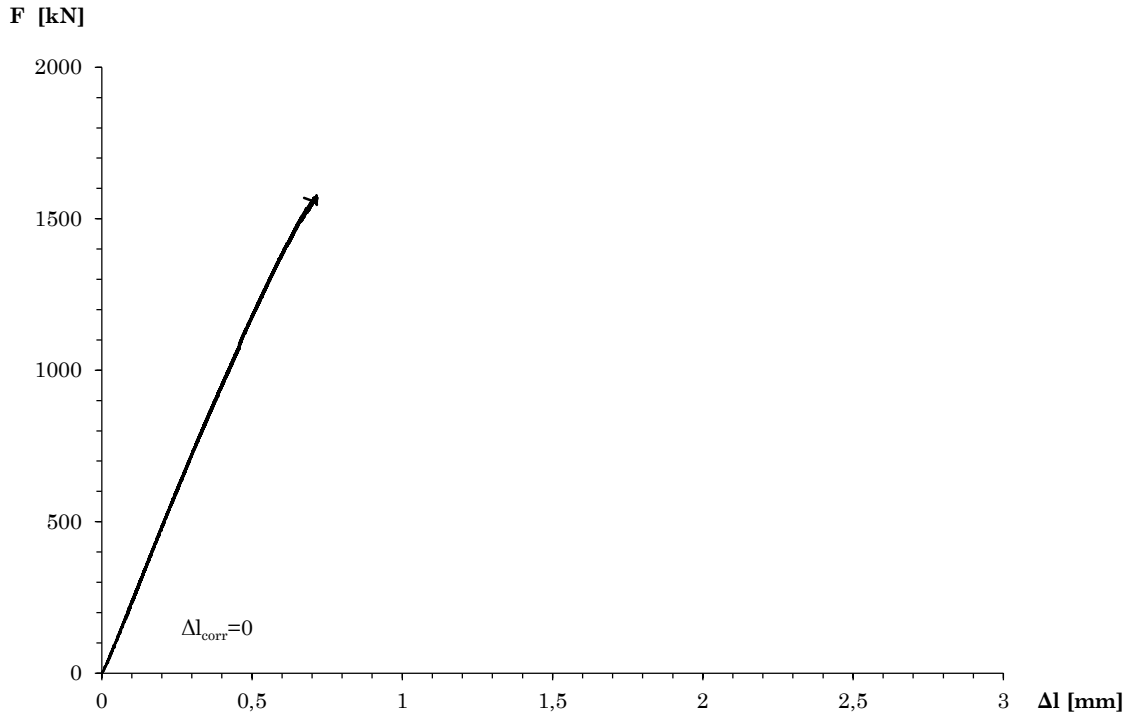
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C1-06_09_2010	24.09.2010	18	99,5	199,3	3,989	2,574	1646,2	-211,7
KZ-2-DFM2-C1-06_09_2010	24.09.2010	18	99,5	199,5	3,985	2,568	1750,5	-225,1
KZ-3-DFM2-C1-06_09_2010	24.09.2010	18	99,5	200,0	4,017	2,583	1601,6	-206,0
Mittelwert	m							-214,3
Standardabweichung	s							9,83
Variationskoeffizient	v							4,59 %

E-Modul-Prüfung (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 MPa/s)

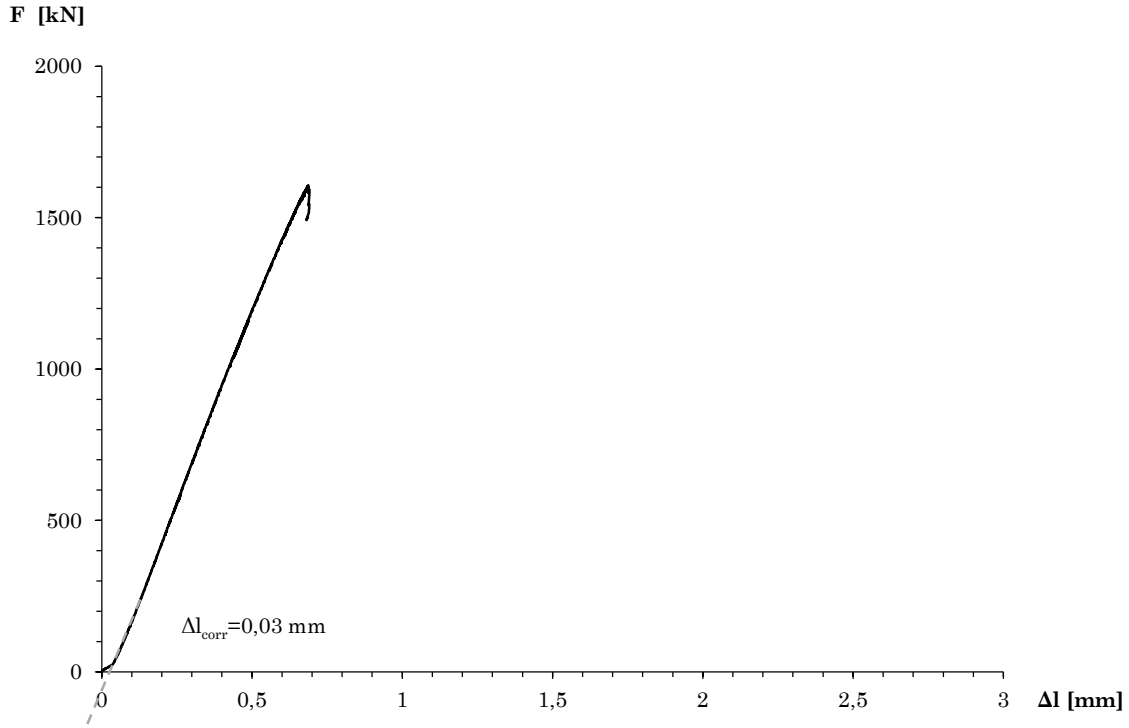
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Prüfspannung bei der dritten Belastung		Dehnung bei der dritten Belastung		E_c
			d	h	σ_u	σ_o	ε_u	ε_o	
		[Tage]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[‰]	[‰]	[MPa]
KZ-4-DFM2-C1-06_09_2010	24.09.2010	18	99,5	200,6	-0,514	-71,145	-0,033	-1,230	59023
KZ-5-DFM2-C1-06_09_2010	24.09.2010	18	99,5	199,1	-0,476	-71,094	-0,013	-1,197	59677
KZ-6-DFM2-C1-06_09_2010	24.09.2010	18	99,5	198,8	-0,527	-71,428	-0,013	-1,210	59249
Mittelwert	m								59316
Standardabweichung	s								332
Variationskoeffizient	v								0,56 %

Verformungsgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,030 mm/min)

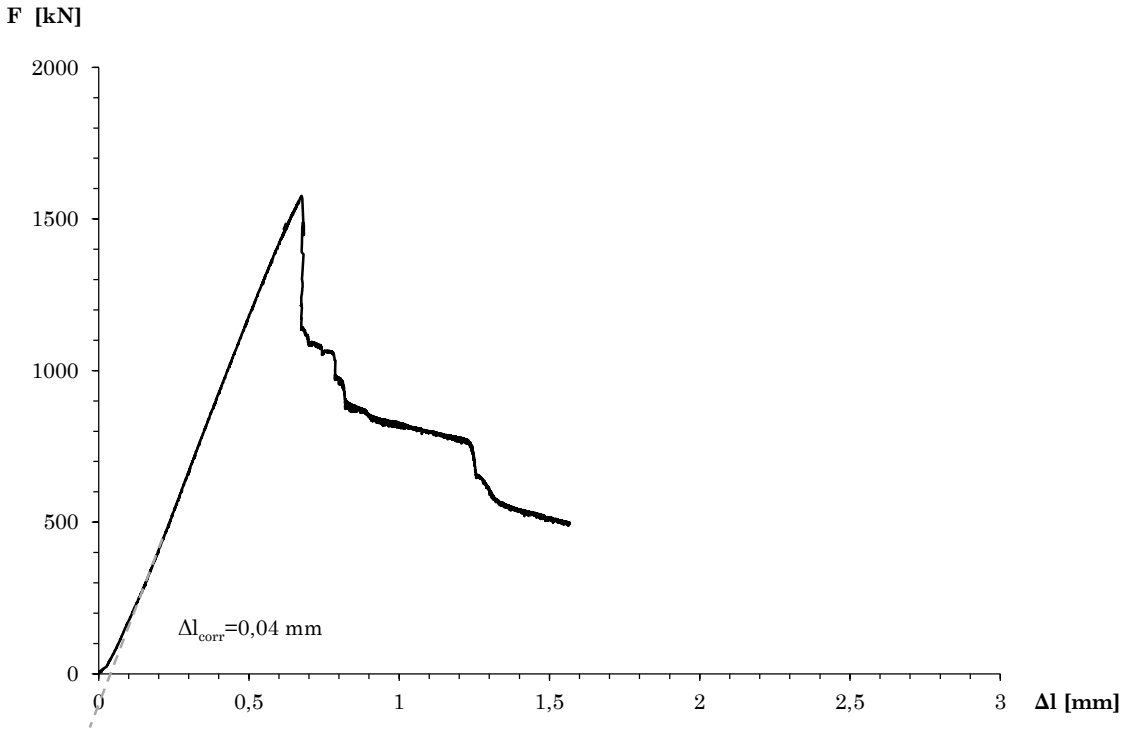
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c	ε_{c1}
			d	h	m	ρ			
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]	[‰]
KZ-4-DFM2-C1-06_09_2010	21.10.2010	45	99,5	200,6	4,035	2,586	1576,0	-202,7	-3,85
KZ-5-DFM2-C1-06_09_2010	21.10.2010	45	99,5	199,1	3,958	2,557	1606,7	-206,6	-3,83
KZ-6-DFM2-C1-06_09_2010	21.10.2010	45	99,5	198,8	3,979	2,575	1576,2	-202,7	-3,74
Mittelwert	m							-204,0	-3,81
Standardabweichung	s							2,27	0,06
Variationskoeffizient	v							1,11 %	1,56 %



KZ-4-DFM2-C1-06_09_2010 (Messlänge: l=185,7 mm)



KZ-5-DFM2-C1-06_09_2010 (Messlänge: l=171,4 mm)



KZ-6-DFM2-C1-06_09_2010 (Messlänge: l=170,0 mm)

A.1.2 Charge C2

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 MPa/s)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C2-13_09_2010	27.09.2010	14	99,5	201,0	4,026	2,576	1442,2	-185,5
KZ-2-DFM2-C2-13_09_2010	27.09.2010	14	99,5	199,0	3,964	2,562	1541,7	-198,3
KZ-3-DFM2-C2-13_09_2010	27.09.2010	14	99,5	197,4	3,923	2,556	1629,8	-209,6
Mittelwert	m							-197,8
Standardabweichung	s							12,07
Variationskoeffizient	v							6,10 %

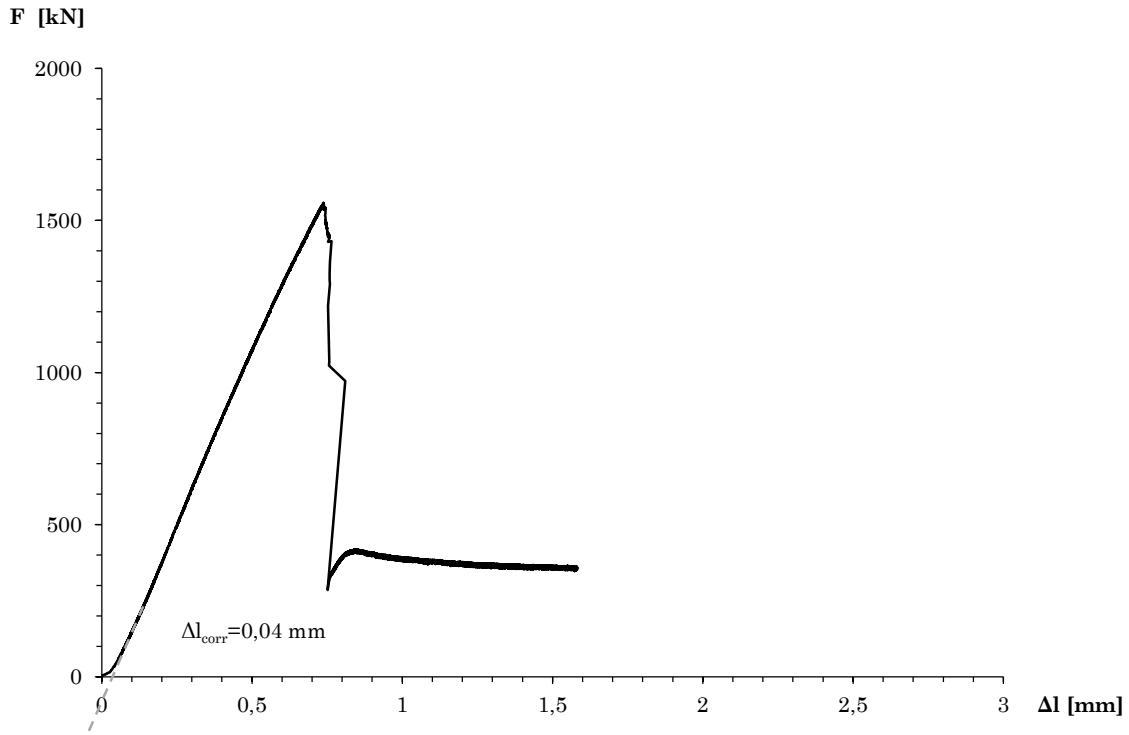
E-Modul-Prüfung (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 MPa/s)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Prüfspannung bei der dritten Belastung		Dehnung bei der dritten Belastung		E_c
			d	h	σ_u	σ_o	ε_u	ε_o	
		[Tage]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[‰]	[‰]	[MPa]
KZ-4-DFM2-C2-13_09_2010	27.09.2010	14	99,5	199,1	-0,553	-65,950	-0,013	-1,107	59814
KZ-5-DFM2-C2-13_09_2010	27.09.2010	14	99,5	199,1	-0,502	-65,718	-0,043	-1,130	60015
KZ-6-DFM2-C2-13_09_2010	27.09.2010	14	99,5	199,9	-0,514	-65,937	-0,030	-1,113	60390
Mittelwert	m								60073
Standardabweichung	s								292
Variationskoeffizient	v								0,49 %

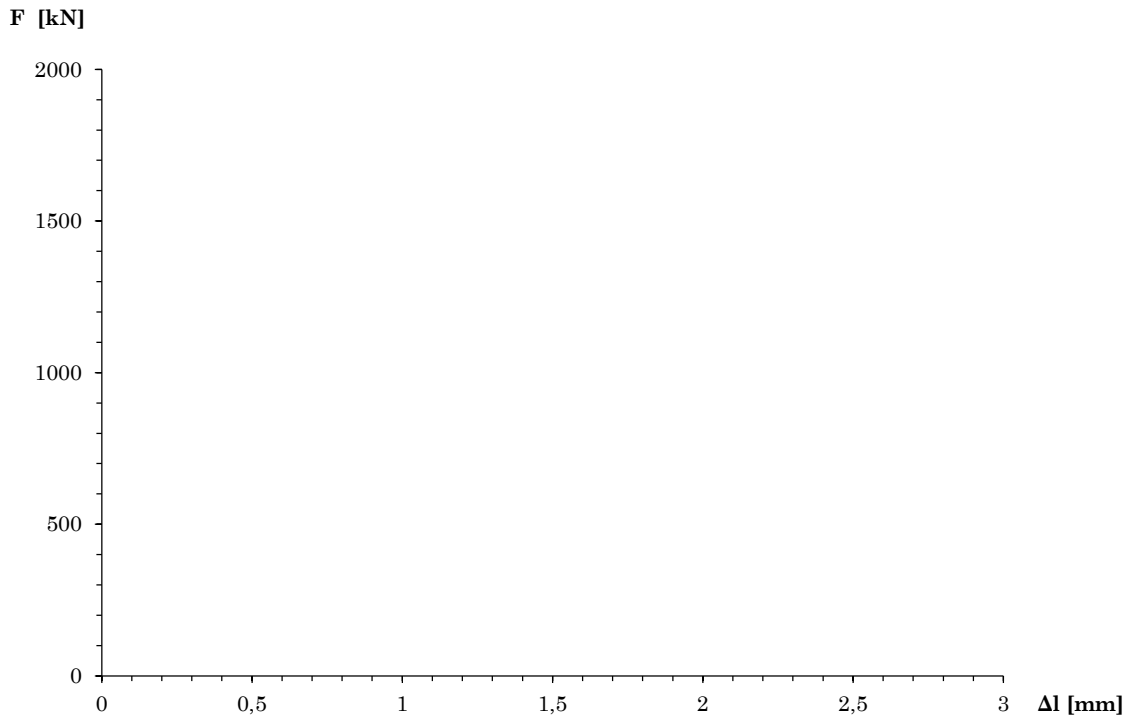
Verformungsgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,015 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c	ε_{c1}
			d	h	m	ρ			
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]	[‰]
KZ-4-DFM2-C2-13_09_2010	07.10.2010	24	99,5	199,1	3,954	2,554	1557,6	-200,3	-3,79
KZ-5-DFM2-C2-13_09_2010 [1)]	07.10.2010	24	99,5	199,1	3,968	2,563			
KZ-6-DFM2-C2-13_09_2010	07.10.2010	24	99,5	199,9	3,985	2,564	1599,7	-205,7	-3,72
Mittelwert	m							-203,0	-3,75
Standardabweichung	s							3,83	0,05
Variationskoeffizient	v							1,89 %	1,33 %

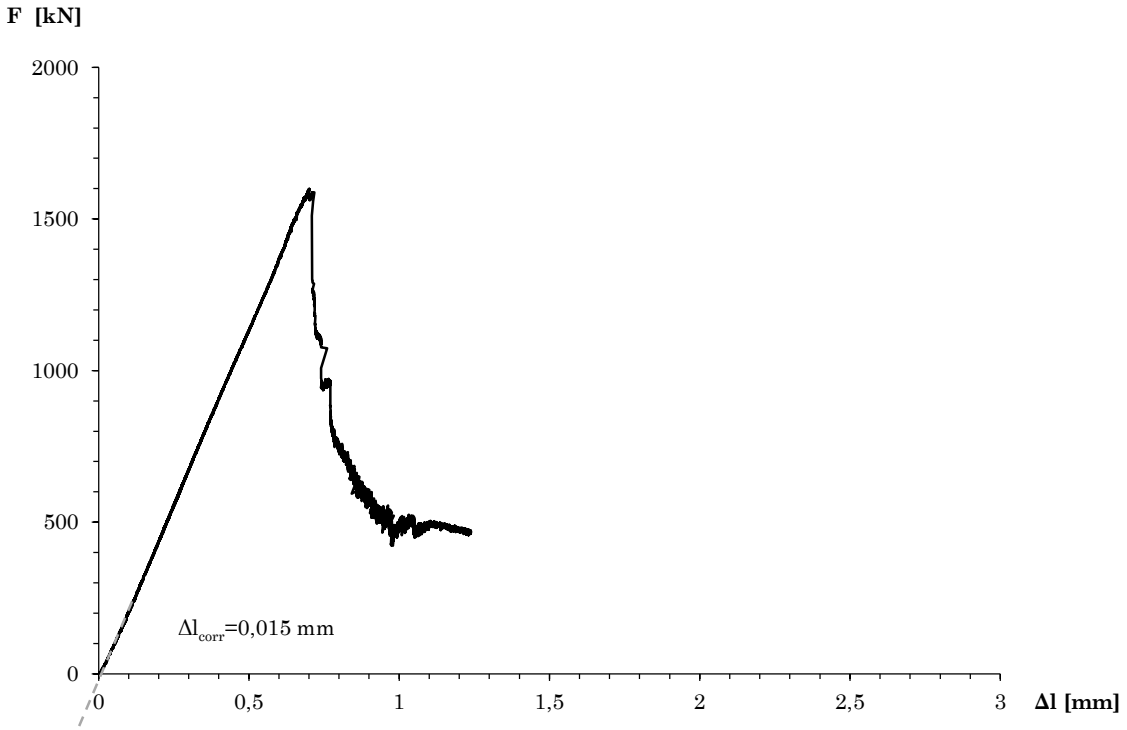
[1)] Beim Probekörper KZ-5-DFM2-C2-13_09_2010 kam es bei der Durchführung des verformungsgeregelten Druckversuchs zu einem vollständigen Datenverlust.



KZ-4-DFM2-C2-13_09_2010 (Messlänge: l=184,5 mm)



Beim Probekörper KZ-5-DFM2-C2-13_09_2010 kam es bei der Durchführung des verformungsgeregelten Druckversuchs zu einem vollständigen Datenverlust.



KZ-6-DFM2-C2-13_09_2010 (Messlänge: l=184,5 mm)

A.1.3 Charge C3

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 MPa/s)

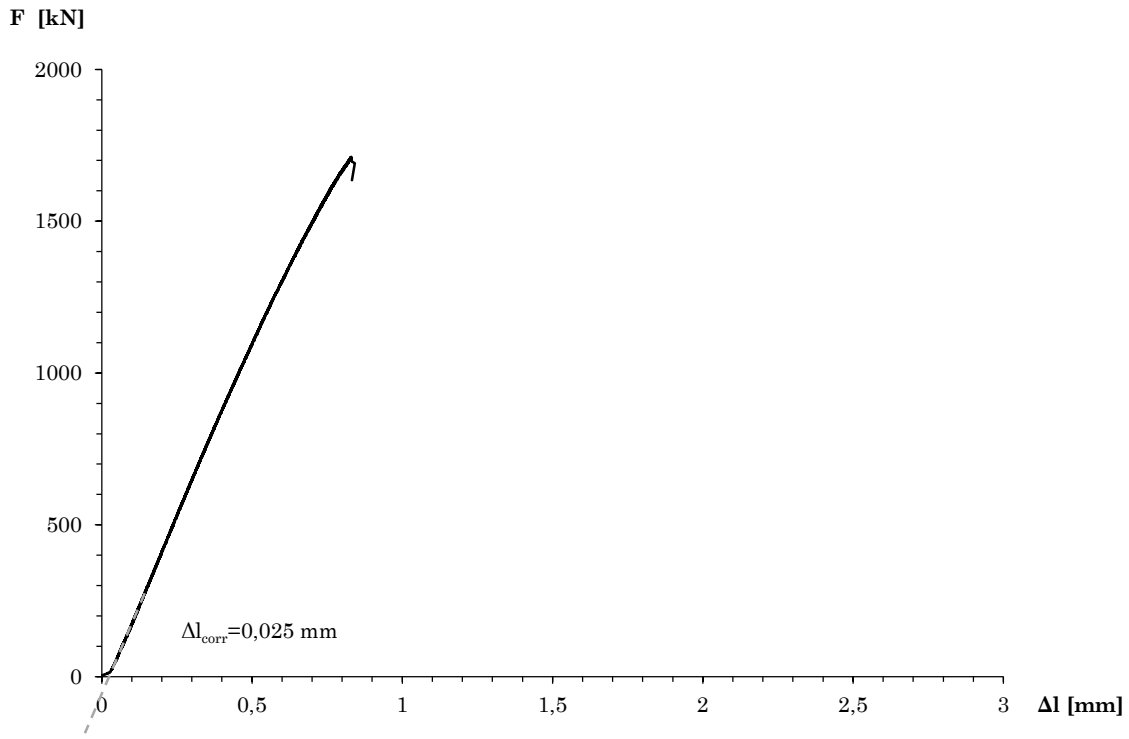
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C3-20_09_2010	11.10.2010	21	99,5	198,2	3,938	2,555	1738,3	-223,6
KZ-2-DFM2-C3-20_09_2010	11.10.2010	21	99,5	200,3	3,991	2,562	1721,3	-221,4
KZ-3-DFM2-C3-20_09_2010	11.10.2010	21	99,5	199,6	3,968	2,557	1810,4	-232,8
Mittelwert	m							-225,9
Standardabweichung	s							6,08
Variationskoeffizient	v							2,69 %

E-Modul-Prüfung (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 MPa/s)

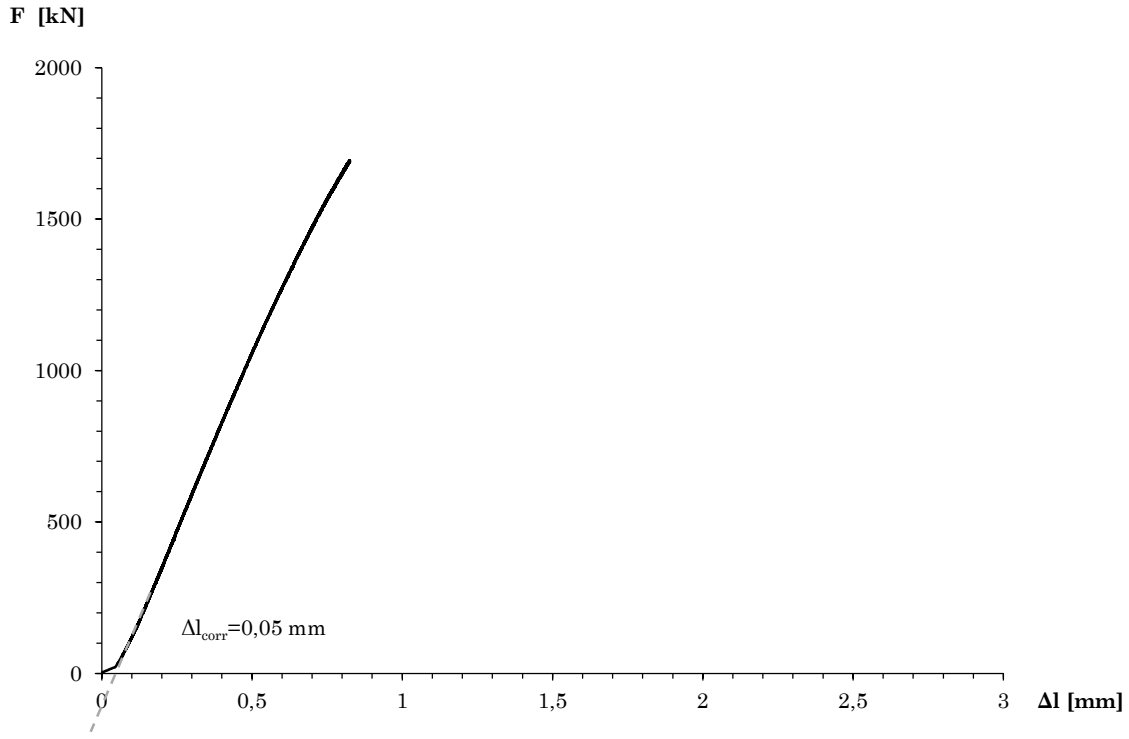
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Prüfspannung bei der dritten Belastung		Dehnung bei der dritten Belastung		E_c
			d	h	σ_u	σ_o	ε_u	ε_o	
		[Tage]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[‰]	[‰]	[MPa]
KZ-4-DFM2-C3-20_09_2010	13.10.2010	23	99,5	202,8	-0,476	-74,605	-0,023	-1,280	58989
KZ-5-DFM2-C3-20_09_2010	13.10.2010	23	99,5	200,8	-0,476	-75,286	-0,047	-1,333	58143
KZ-6-DFM2-C3-20_09_2010	13.10.2010	23	99,5	200,9	-0,489	-75,196	-0,030	-1,297	58980
Mittelwert	m								58704
Standardabweichung	s								486
Variationskoeffizient	v								0,83 %

Verformungsgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: [1] 0,015 mm/min oder [2] 0,030 mm/min)

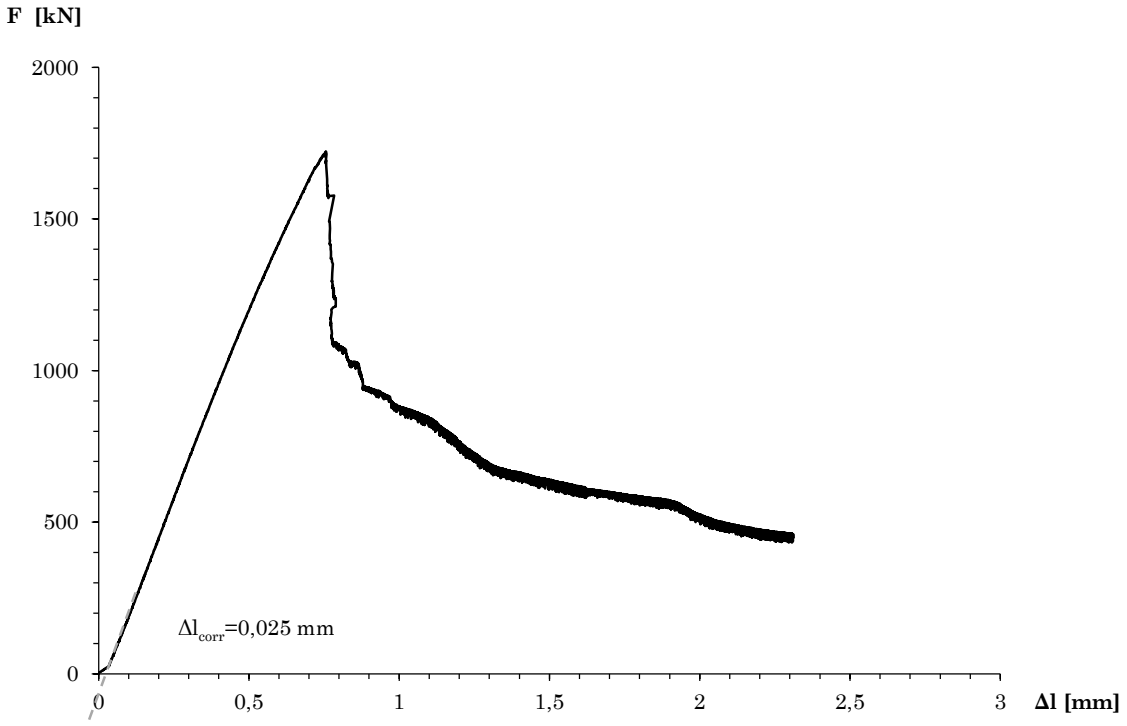
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c	ε_{c1}
			d	h	m	ρ			
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]	[‰]
KZ-4-DFM2-C3-20_09_2010 [1]	21.10.2010	31	99,5	202,8	4,022	2,550	1712,3	-220,2	-4,30
KZ-5-DFM2-C3-20_09_2010 [1]	21.10.2010	31	99,5	200,8	4,029	2,580	1694,4	-217,9	-4,25
KZ-6-DFM2-C3-20_09_2010 [2]	21.10.2010	31	99,5	200,9	4,012	2,568	1722,7	-221,6	-4,24
Mittelwert	m							-219,9	-4,26
Standardabweichung	s							1,84	0,04
Variationskoeffizient	v							0,84 %	0,85 %



KZ-4-DFM2-C3-20_09_2010 (Messlänge: l=187,0 mm)



KZ-5-DFM2-C3-20_09_2010 (Messlänge: l=182,6 mm)



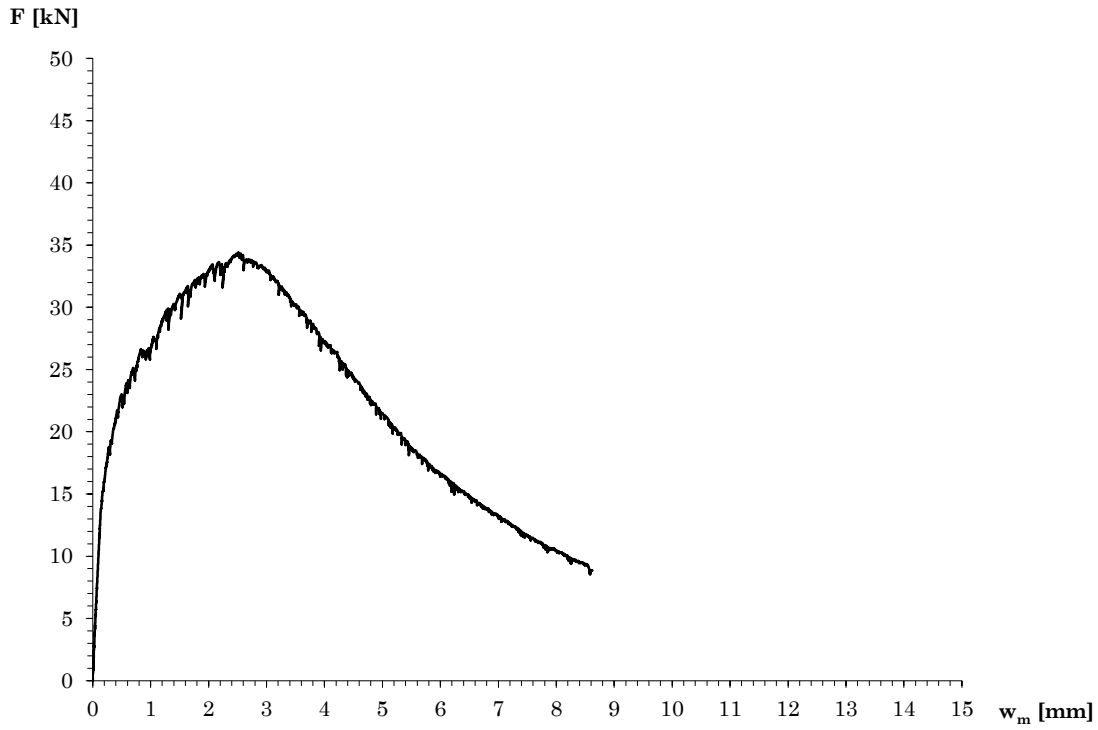
KZ-6-DFM2-C3-20_09_2010 (Messlänge: l=172,6 mm)

A.2 Biegezugversuche – Probekörper ohne Kerbe

A.2.1 Charge C1

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

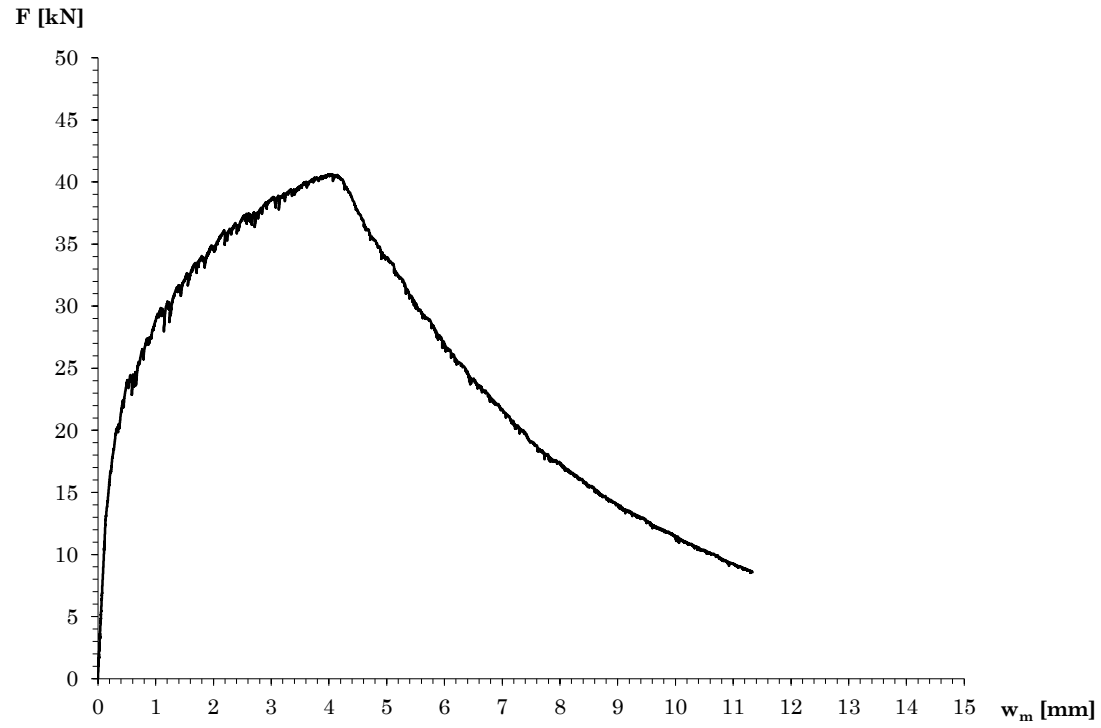
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C1-06_09_2010	27.09.2010	21	74,7	75,3	13,81	14,72	0,14	34,44	36,72	2,51
M1-2-DFM2-C1-06_09_2010	27.09.2010	21	75,6	75,0	13,07	13,84	0,14	40,63	43,01	4,00
M1-3-DFM2-C1-06_09_2010	27.09.2010	21	75,9	74,4	13,20	14,03	0,14	41,91	44,53	3,70
Mittelwert	m					17,62	0,18		39,57	3,00
Standardabweichung	s					3,96	0,05		3,47	0,60
Variationskoeffizient	v					22,49 %	26,25 %		8,76 %	19,83 %



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

b) Risslokalisierung (x_1 = 47 mm, x_2 = 64 mm, x_3 = 49 mm, x_4 = 63 mm, x_5 = 48 mm)

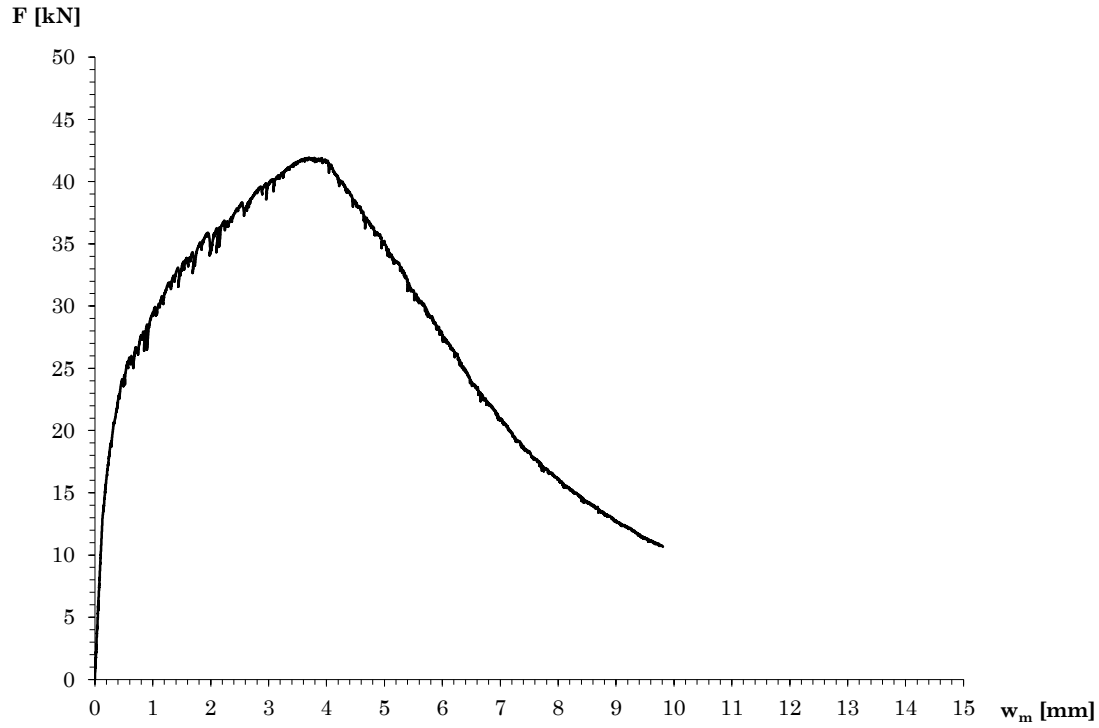
M1-1-DFM2-C1-06_09_2010



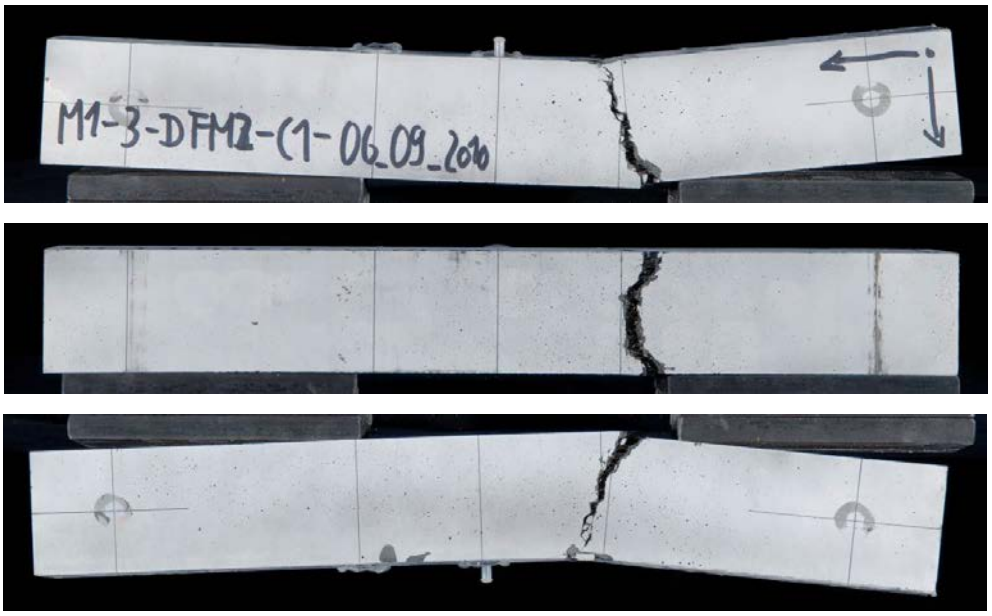
a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

b) Risslokalisierung (x_1 = 35 mm, x_2 = 52 mm, x_3 = 25 mm, x_4 = 28 mm, x_5 = 21 mm)

M1-2-DFM2-C1-06_09_2010; (a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



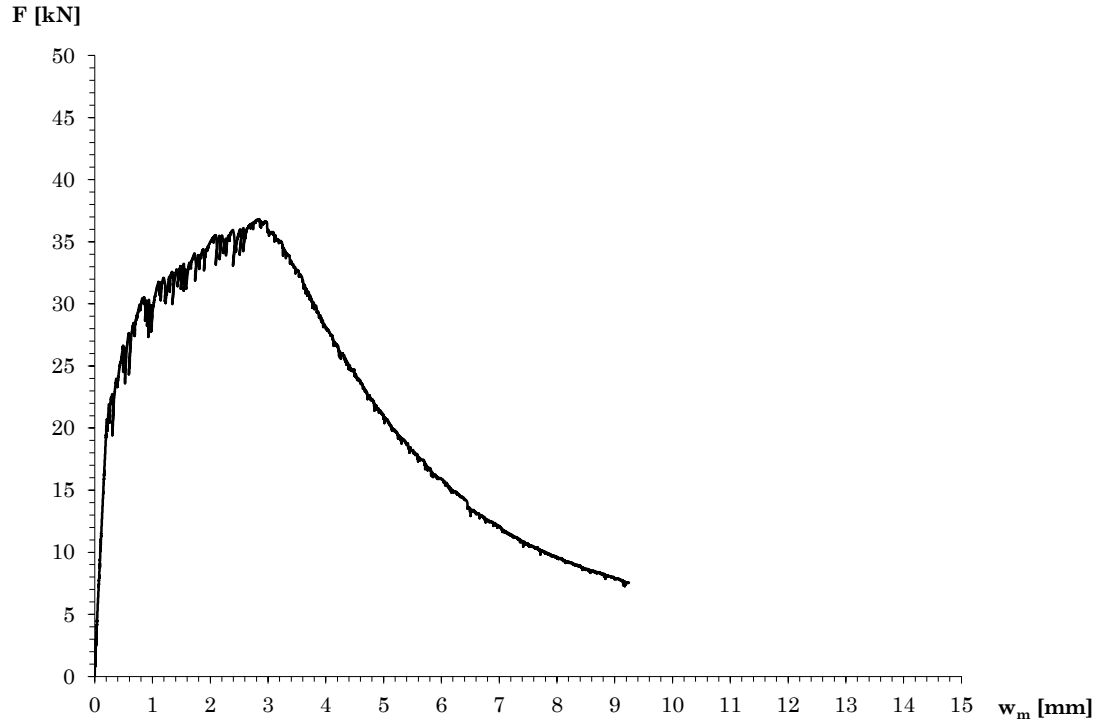
b) Risslokalisierung (x_1 = 75 mm, x_2 = 89 mm, x_3 = 77 mm, x_4 = 87 mm, x_5 = 71 mm)

M1-3-DFM2-C1-06_09_2010

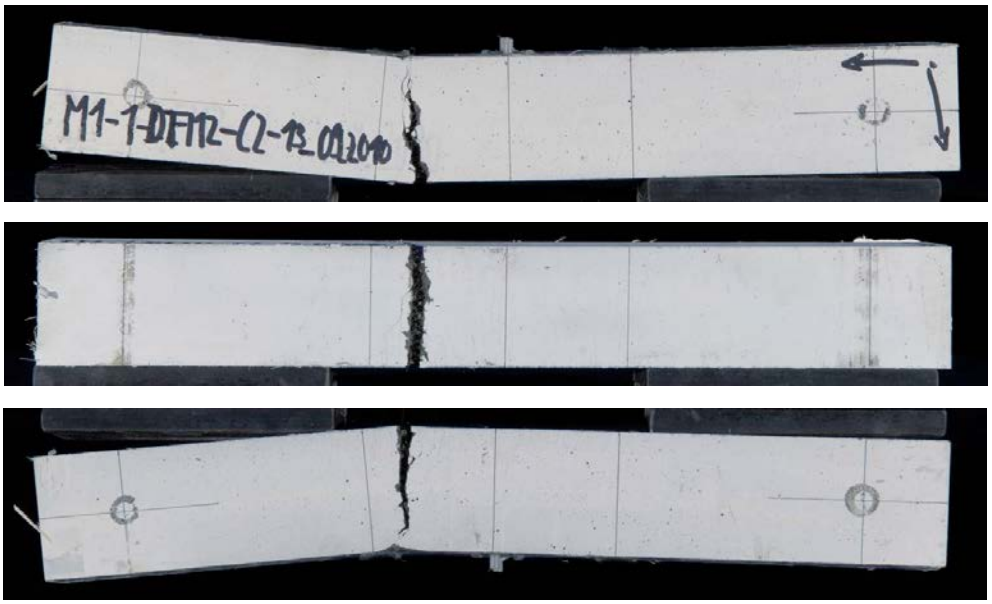
A.2.2 Charge C2

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C2-13_09_2010	23.09.2010	10	76,5	74,0	20,70	21,94	0,21	36,82	39,02	2,85
M1-2-DFM2-C2-13_09_2010	24.09.2010	11	76,6	75,7	19,95	20,65	0,20	40,10	41,51	2,91
M1-3-DFM2-C2-13_09_2010	24.09.2010	11	77,6	75,5	22,19	22,74	0,21	41,67	42,71	2,91
Mittelwert	m					21,78	0,21		41,08	2,89
Standardabweichung	s					1,06	0,01		1,88	0,04
Variationskoeffizient	v					4,85 %	2,95 %		4,57 %	1,22 %

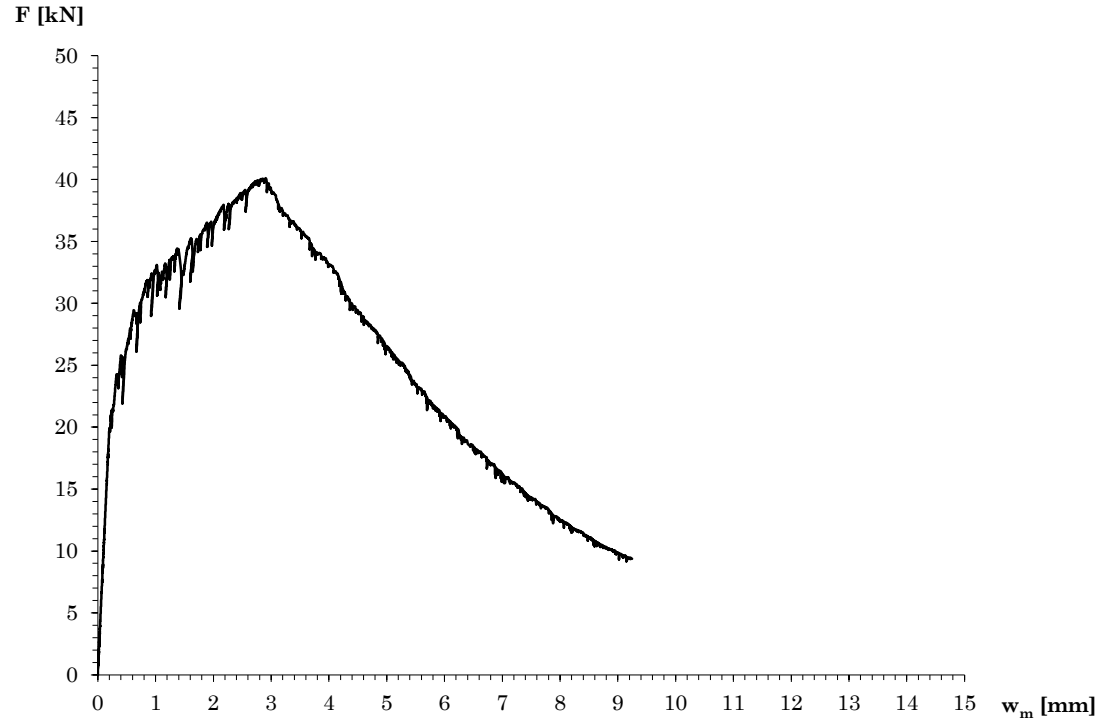


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

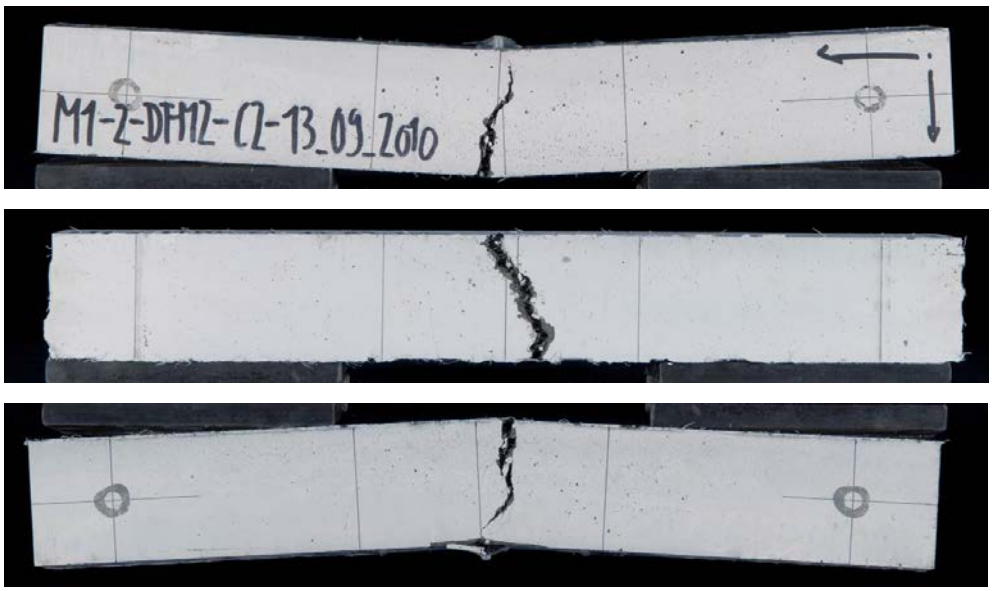


b) Risslokalisierung (x_1 = 55 mm, x_2 = 51 mm, x_3 = 50 mm, x_4 = 52 mm, x_5 = 54 mm)

M1-1-DFM2-C2-13_09_2010

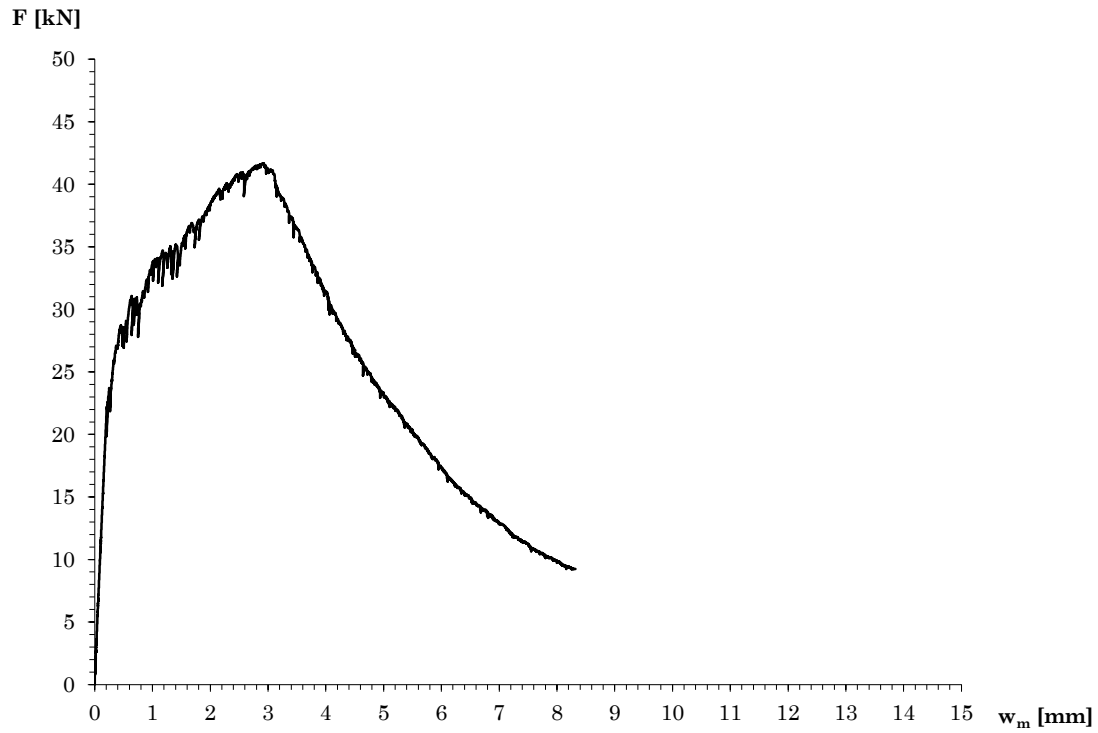


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

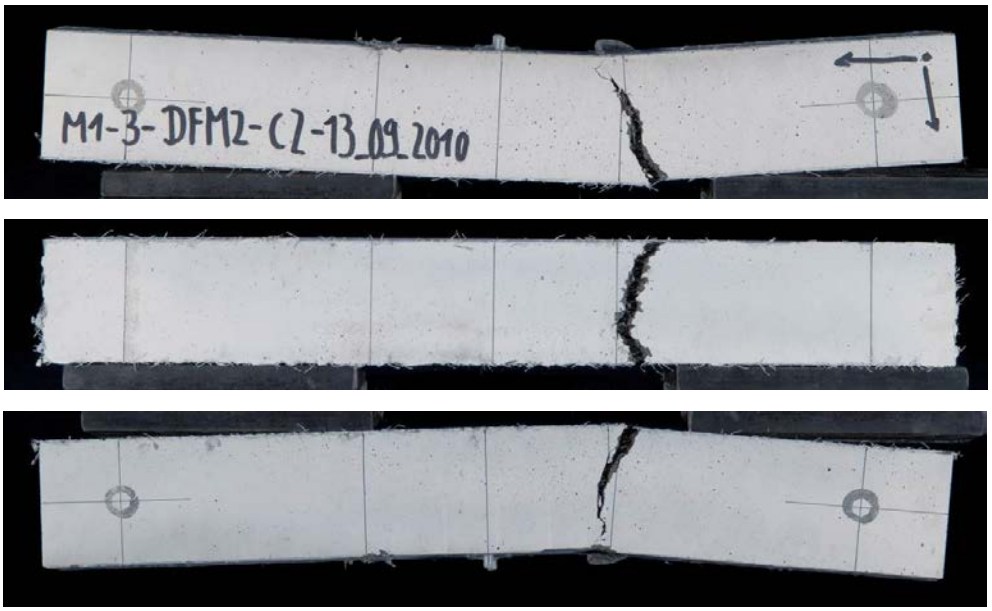


b) Risslokalisierung (x_1 = 4 mm, x_2 = 9 mm, x_3 = 7 mm, x_4 = 11 mm, x_5 = 12 mm)

M1-2-DFM2-C2-13_09_2010



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



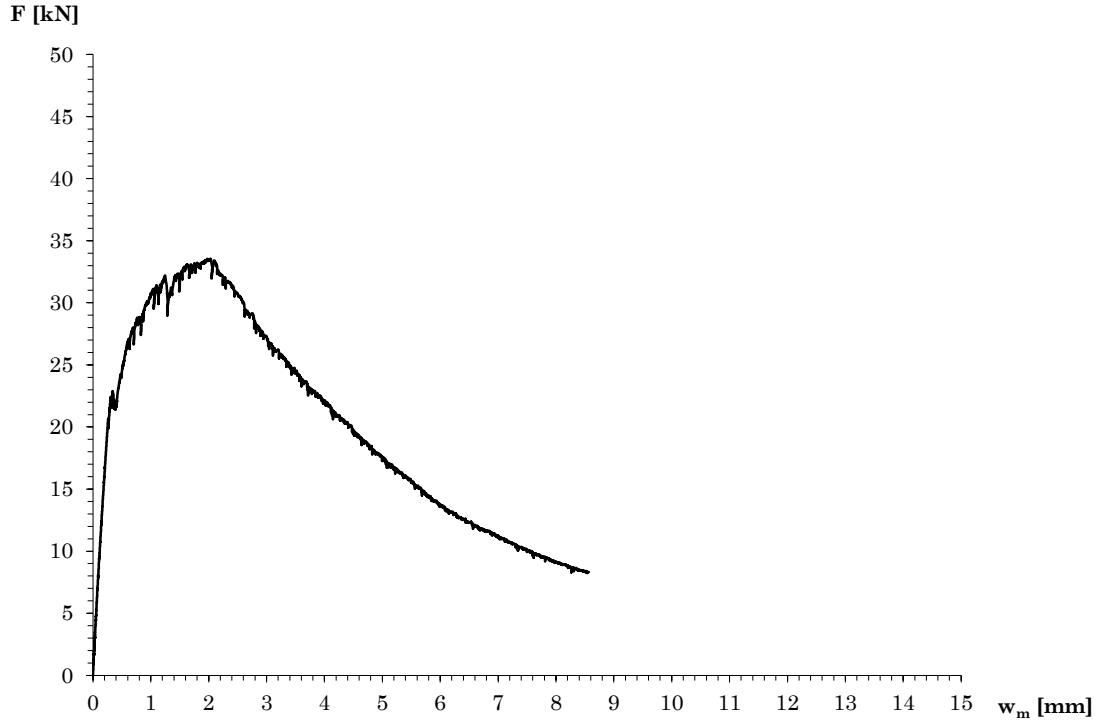
b) Risslokalisierung (x_1 = 79 mm, x_2 = 93 mm, x_3 = 80 mm, x_4 = 86 mm, x_5 = 68 mm)

M1-3-DFM2-C2-13_09_2010

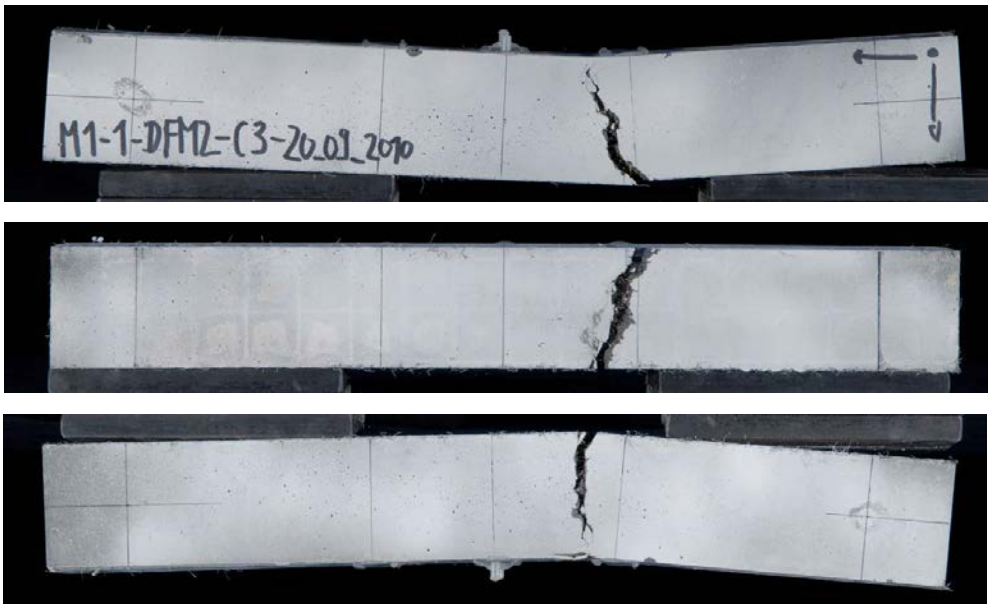
A.2.3 Charge C3

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C3-20_09_2010	10.11.2010	51	76,8	74,4	20,63	21,65	0,26	33,55	35,21	2,03
M1-2-DFM2-C3-20_09_2010	10.11.2010	51	75,9	75,0	14,05	14,80	0,15	33,81	35,62	3,30
M1-3-DFM2-C3-20_09_2010	10.11.2010	51	76,5	75,3	13,63	14,20	0,14	36,31	37,82	2,81
Mittelwert	m					16,89	0,18		36,22	2,71
Standardabweichung	s					4,14	0,07		1,40	0,64
Variationskoeffizient	v					24,52 %	38,04 %		3,87 %	23,61 %

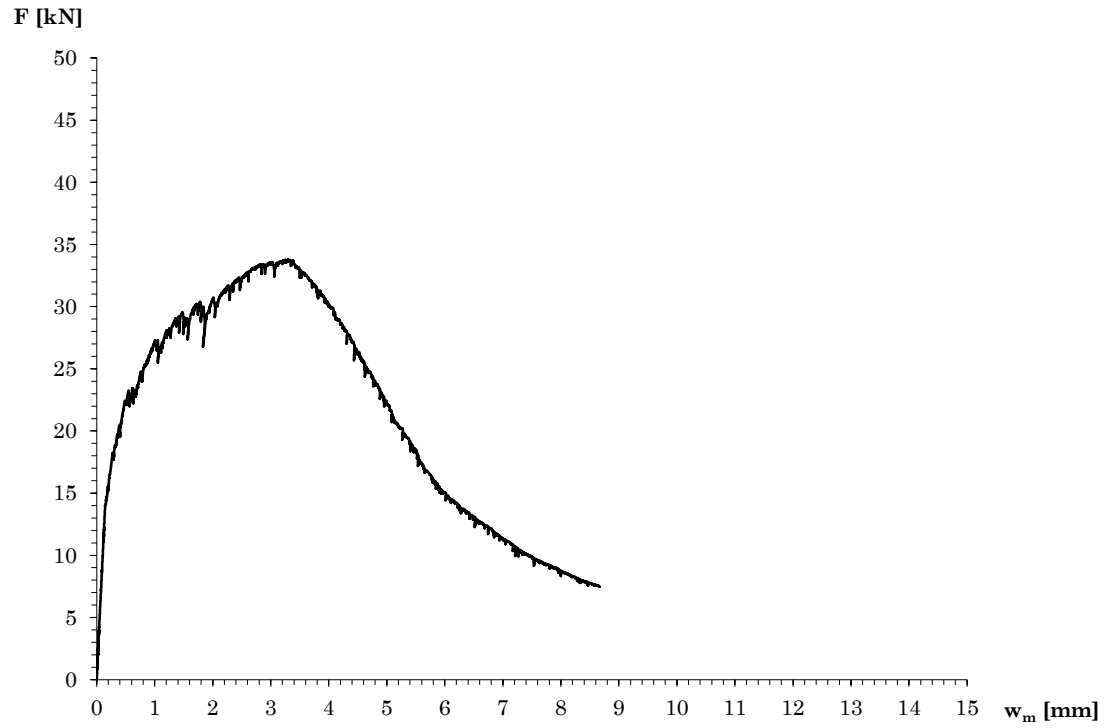


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

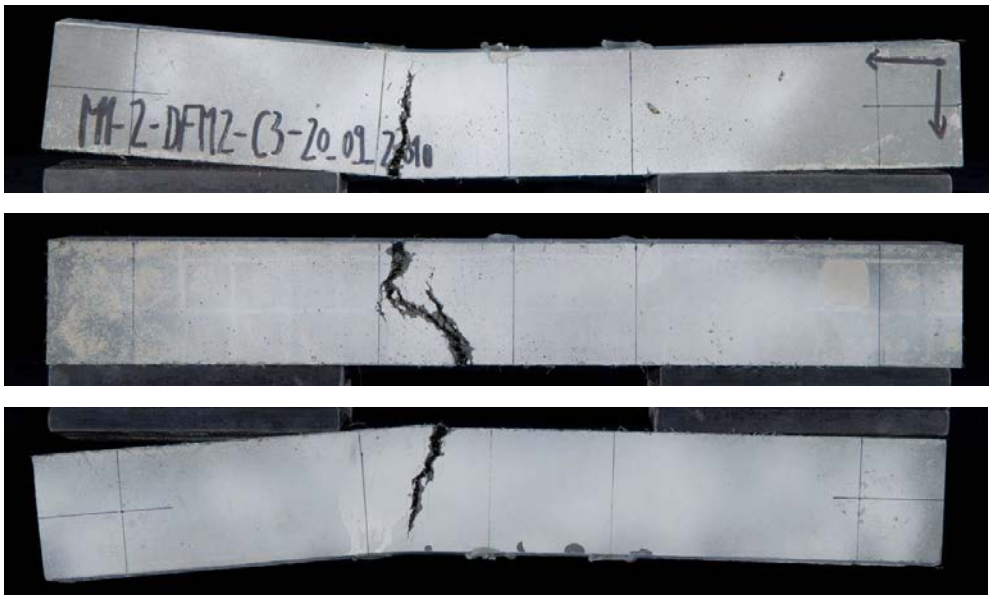


b) Risslokalisierung (x_1 = 64 mm, x_2 = 80 mm, x_3 = 68 mm, x_4 = 53 mm, x_5 = 52 mm)

M1-1-DFM2-C3-20_09_2010

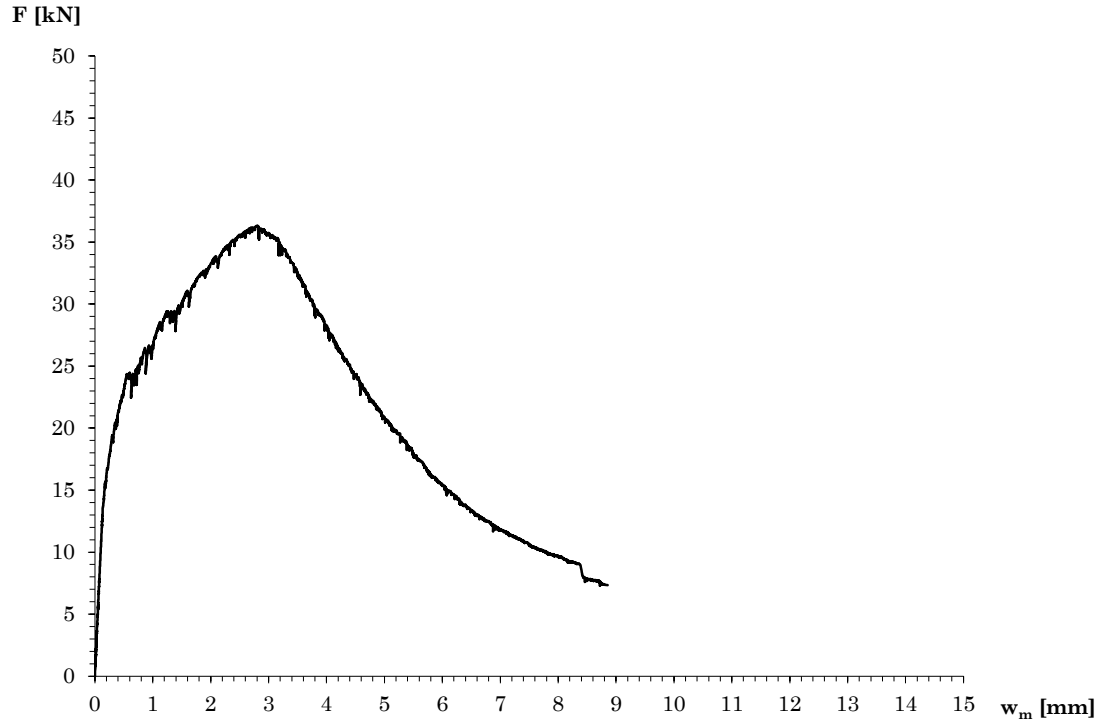


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

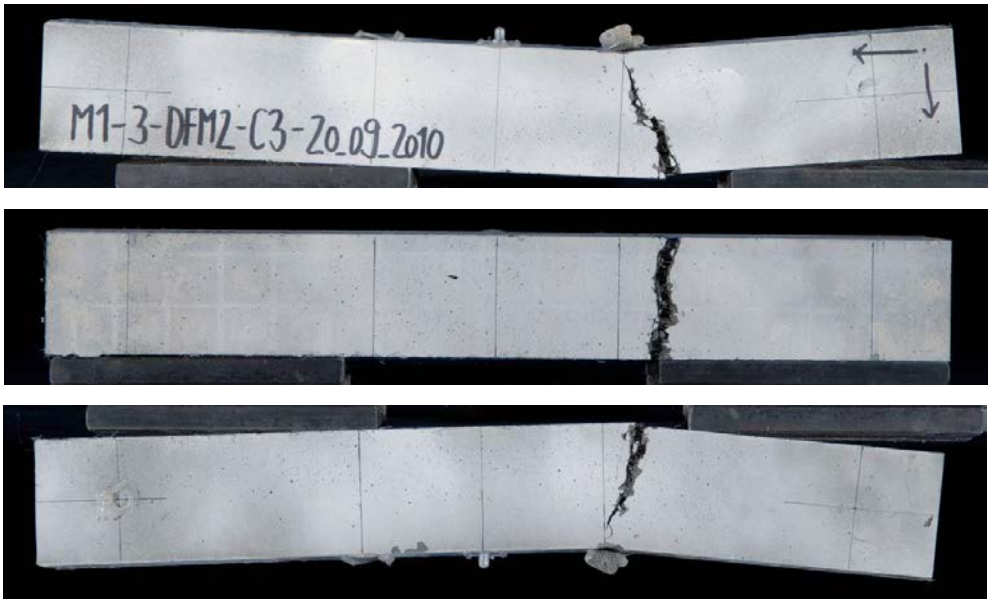


b) Risslokalisierung (x_1 = 60 mm, x_2 = 67 mm, x_3 = 57 mm, x_4 = 25 mm, x_5 = 41 mm)

M1-2-DFM2-C3-20_09_2010



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



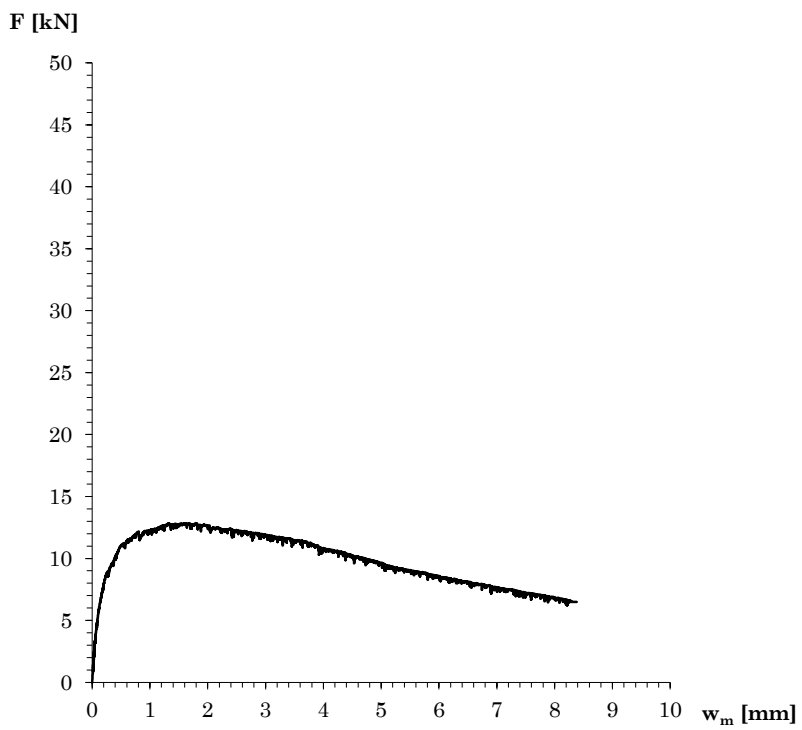
b) Risslokalisierung (x_1 = 85 mm, x_2 = 100 mm, x_3 = 100 mm, x_4 = 95 mm, x_5 = 85 mm)

M1-3-DFM2-C3-20_09_2010

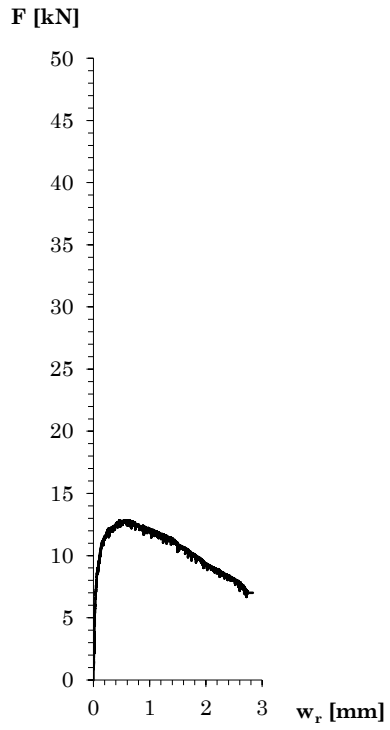
A.3 Biegezugversuche – Probekörper mit Kerbe

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Kerbtiefe	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$	$r_m(f_{ctfl})$
			b	h	h_k				
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[mm]	[MPa]
M1-4-DFM2-C3-20_09_2010	17.11.2010	58	74,9	75,8	25,5	12,84	30,75	1,79	0,64
M1-5-DFM2-C3-20_09_2010	17.11.2010	58	75,0	76,0	25,5	13,26	31,65	1,40	0,49
M1-6-DFM2-C3-20_09_2010	17.11.2010	58	74,6	75,8	25,9	11,34	27,74	1,56	0,56
M1-7-DFM2-C3-20_09_2010	19.11.2010	60	75,3	76,1	25,7	12,42	29,65	1,73	0,62
M1-8-DFM2-C3-20_09_2010	19.11.2010	60	75,2	76,1	25,8	11,21	26,90	1,25	0,45
M1-9-DFM2-C3-20_09_2010	12.11.2010	53	74,3	75,1	25,0	12,25	29,59	1,62	0,57
Mittelwert	m						29,38	1,56	0,55
Standardabweichung	s						1,79	0,21	0,08
Variationskoeffizient	v						6,08 %	13,24 %	13,59 %

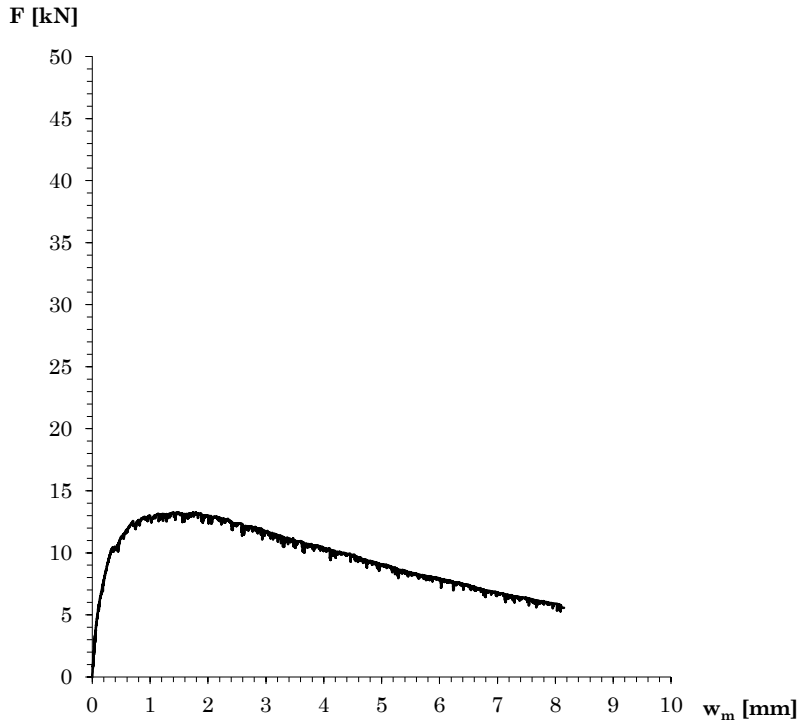


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

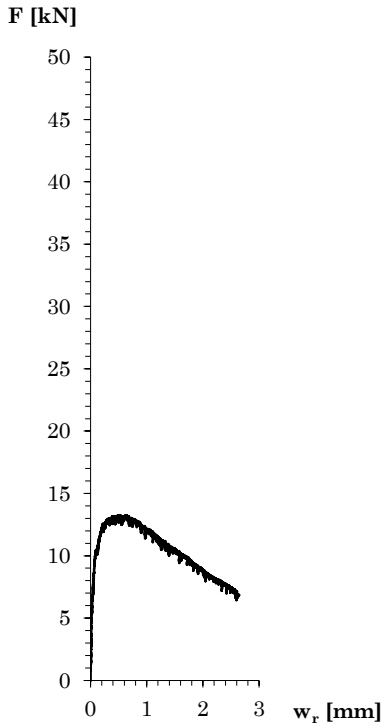


b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

M1-4-DFM2-C3-20_09_2010

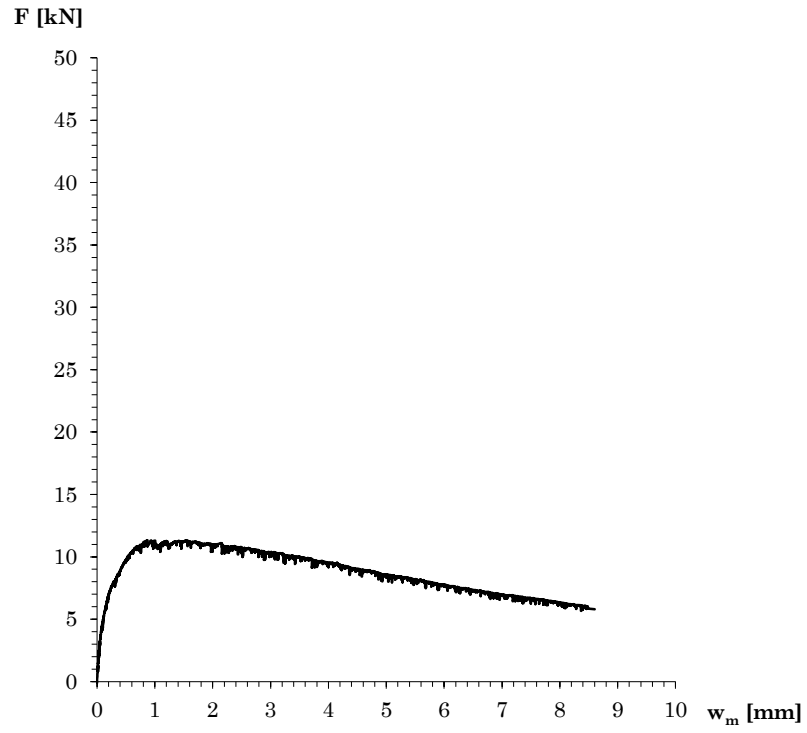


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

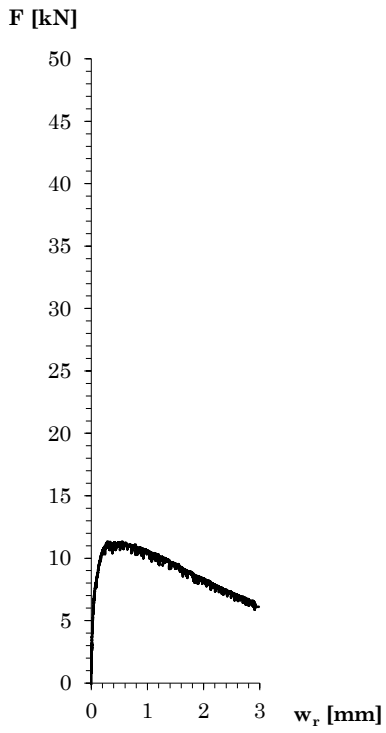


b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

M1-5-DFM2-C3-20_09_2010

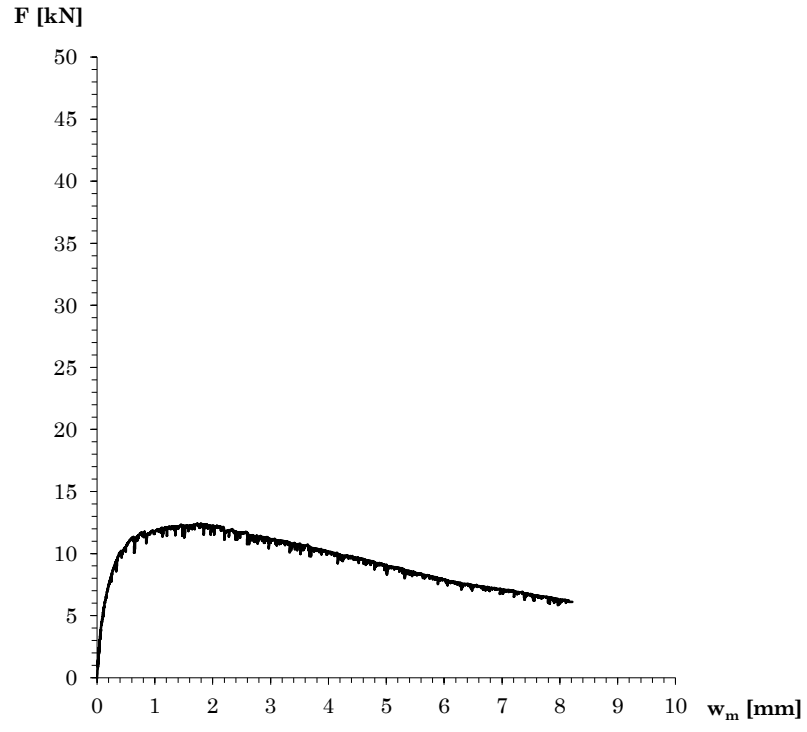


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

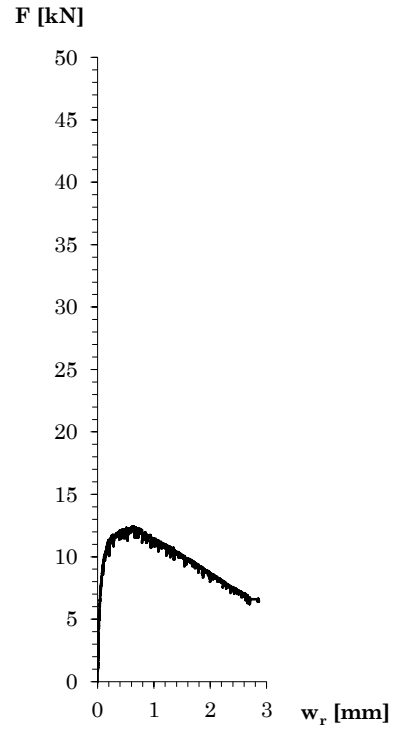


b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

M1-6-DFM2-C3-20_09_2010

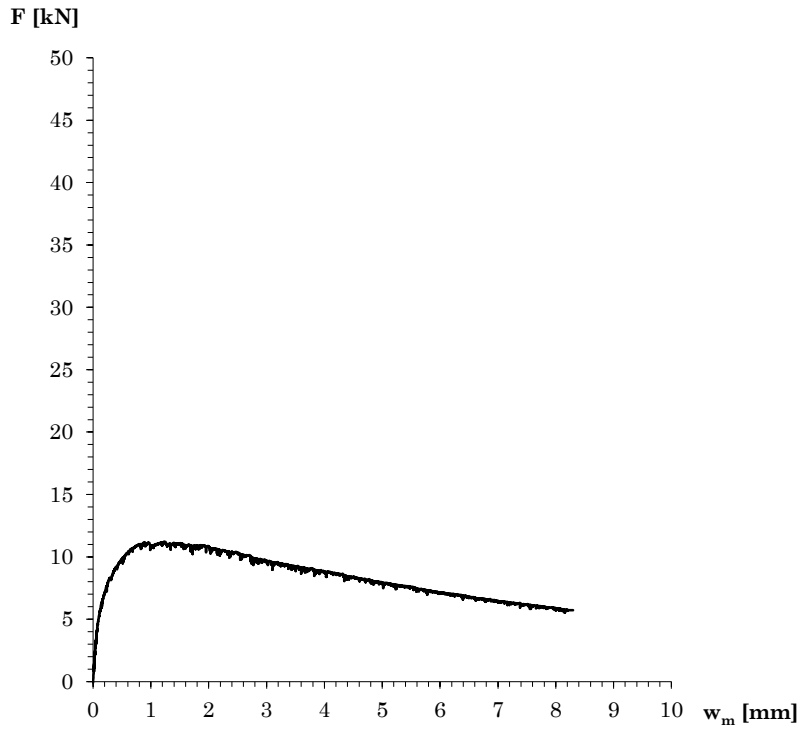


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

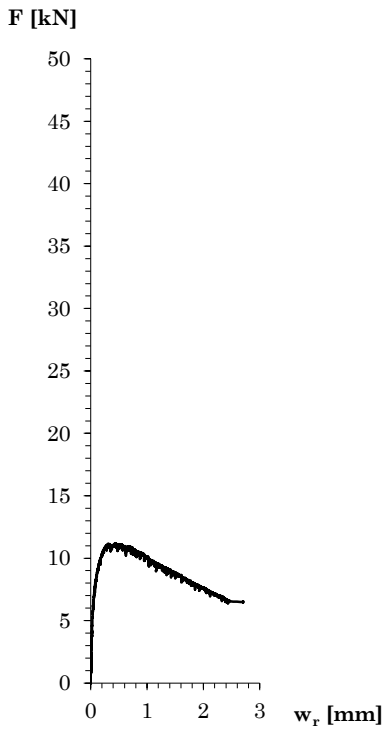


b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

M1-7-DFM2-C3-20_09_2010

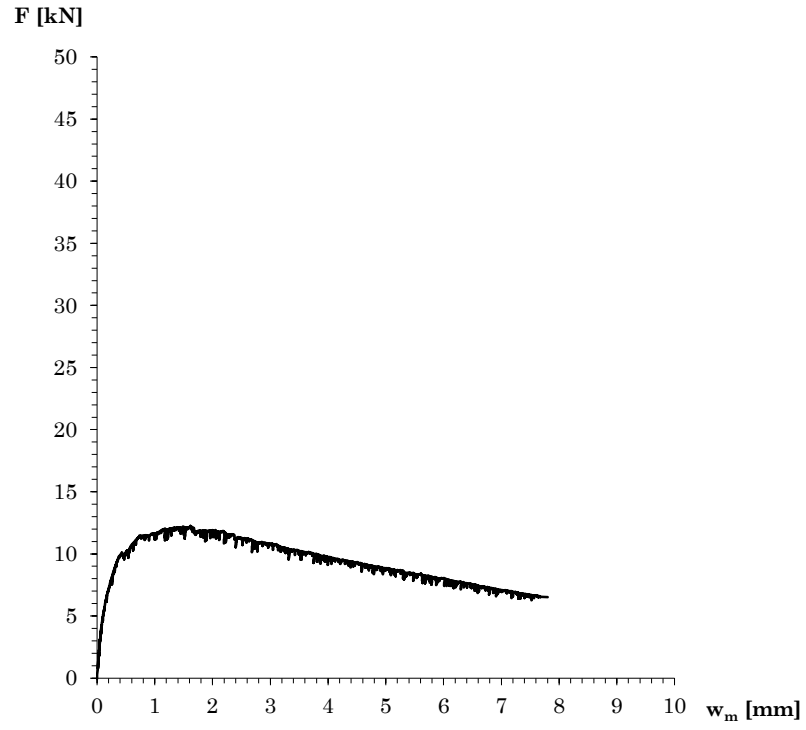


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

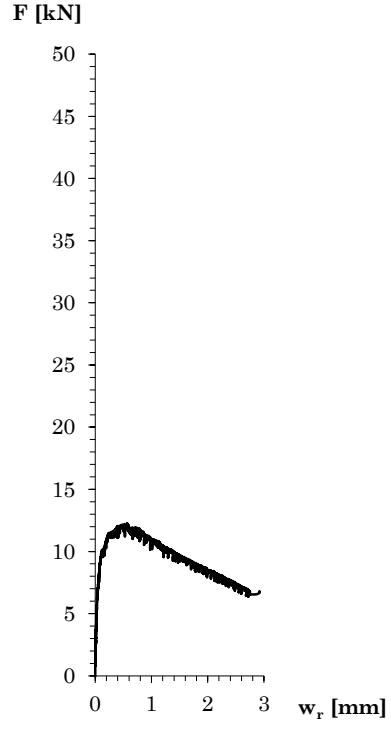


b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

M1-8-DFM2-C3-20_09_2010



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

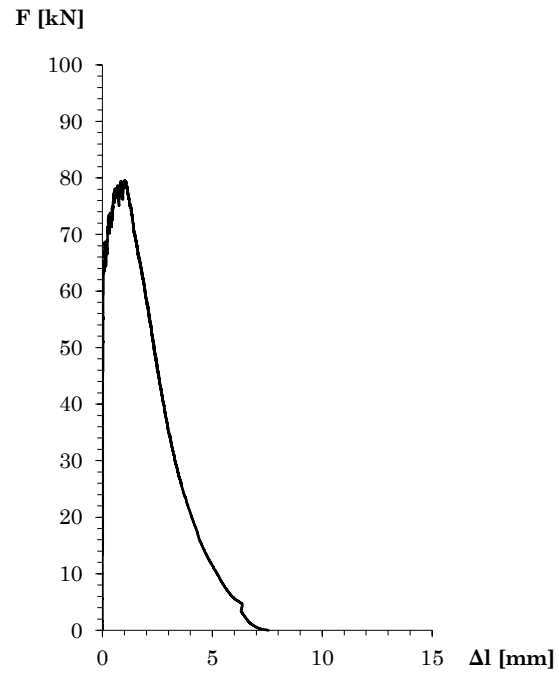
M1-9-DFM2-C3-20_09_2010

A.4 Zentrische Zugversuche – Versuchskörper ohne Kerbe

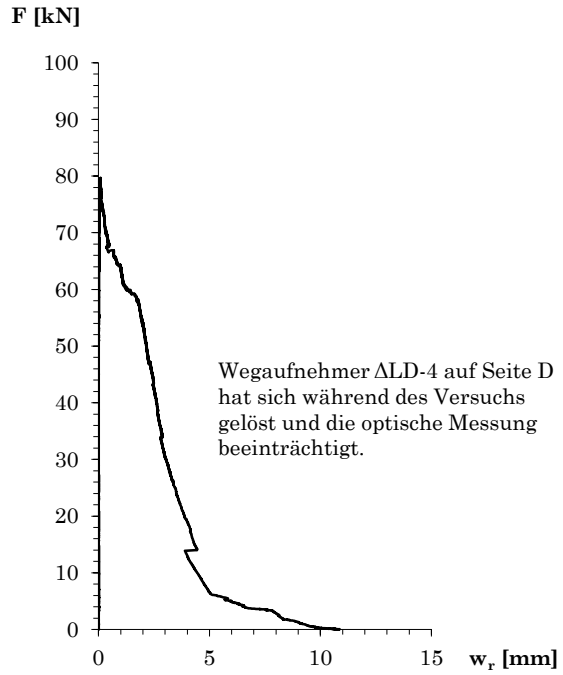
A.4.1 Charge C2

Weggeregelte zentrische Zugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ct,el}$	$f_{ct,el}$	$\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$	F_{max}	f_{ct}	$\varepsilon_{ct}(f_{ct})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[‰]	[kN]	[MPa]	[‰]
N1-4-DFM2-C2-13_09_2010	04.10.2010	21	74,8	74,6	51,11	9,16	0,14	79,53	14,26	6,71
N1-5-DFM2-C2-13_09_2010	04.10.2010	21	75,1	74,5	53,33	9,54	0,20	78,07	13,96	6,48
N1-6-DFM2-C2-13_09_2010	05.10.2010	22	75,1	74,6	53,57	9,56	0,12	78,30	13,98	4,94
Mittelwert	m					9,42	0,15		14,07	6,04
Standardabweichung	s					0,22	0,04		0,16	0,96
Variationskoeffizient	v					2,39 %	27,24 %		1,17 %	15,89 %



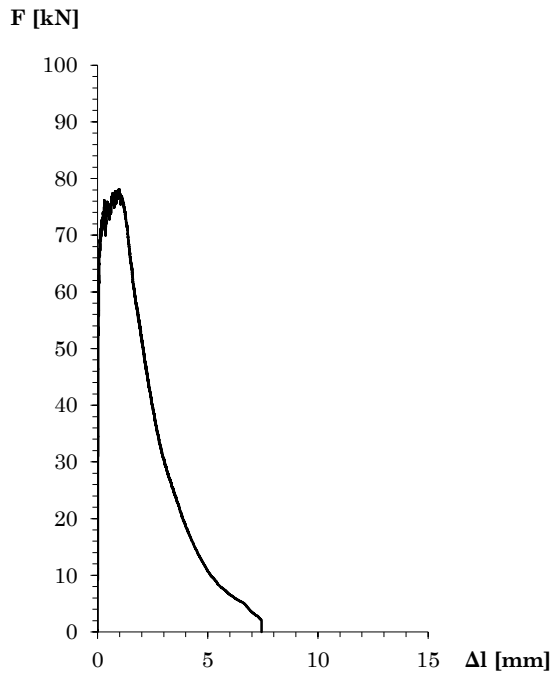
a) Kraft-Längenänderungs-Kurve
(Messlänge: l=150,5 mm)



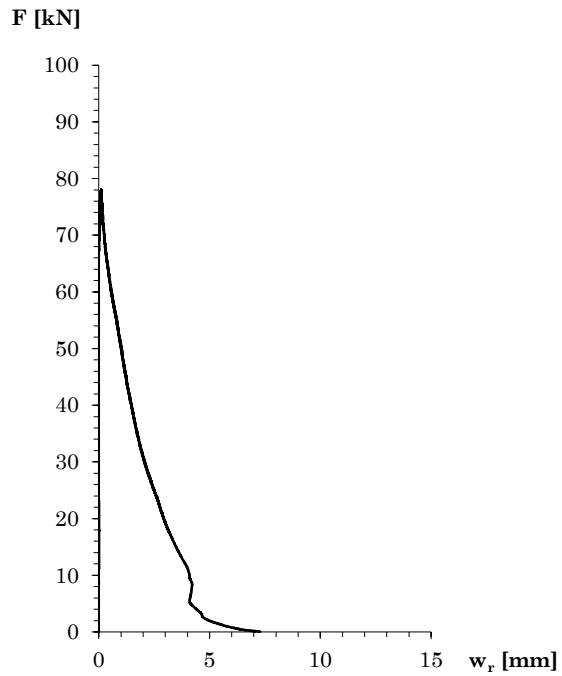
b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

c) Risslokalisierung

N1-4-DFM2-C2-13_09_2010



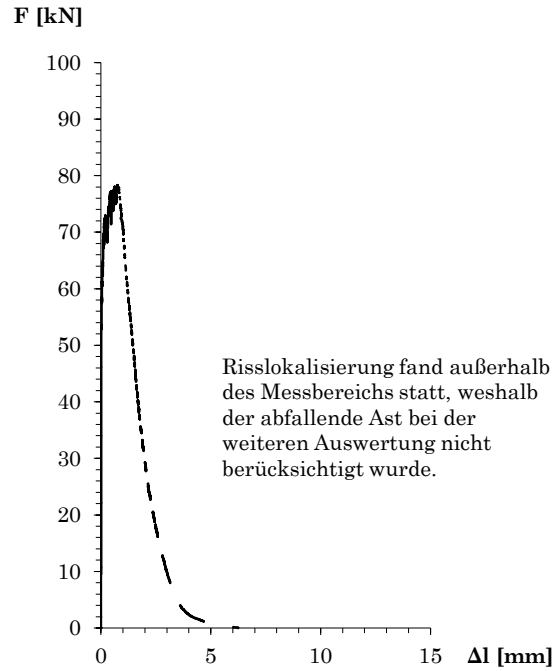
a) Kraft-Längenänderungs-Kurve (Messlänge: l=152 mm)



b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

c) Risslokalisierung

N1-5-DFM2-C2-13_09_2010



a) Kraft-Längenänderungs-Kurve (Messlänge: l=151 mm)

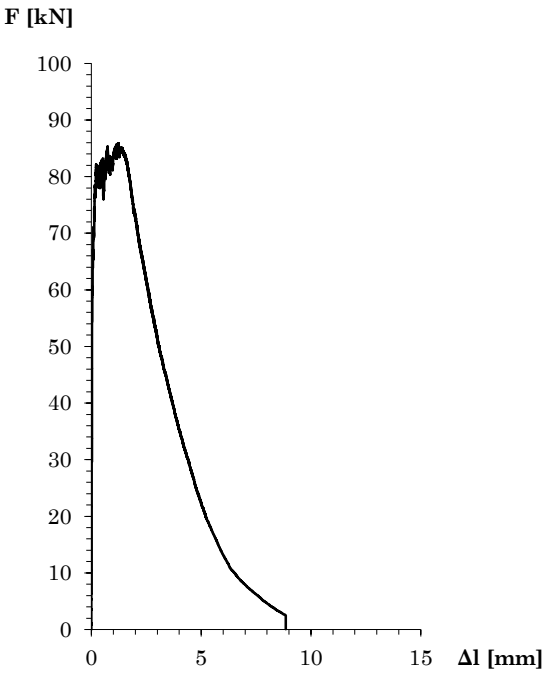
b) Risslokalisierung

N1-6-DFM2-C2-13_09_2010

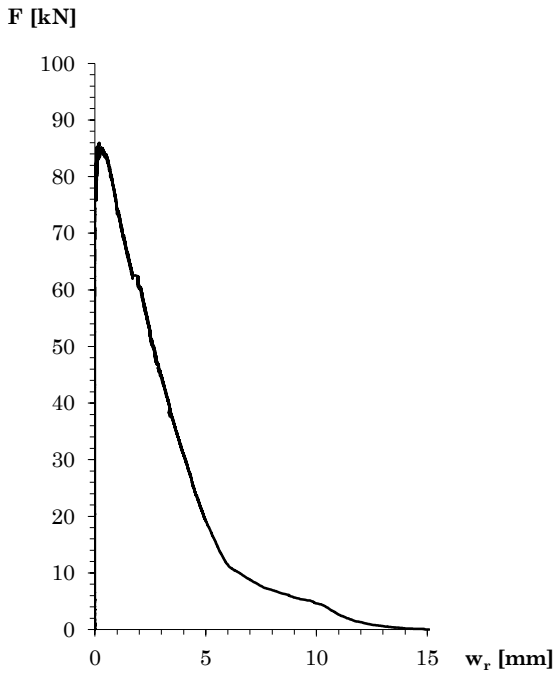
A.4.2 Charge C3

Weggeregelte zentrische Zugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

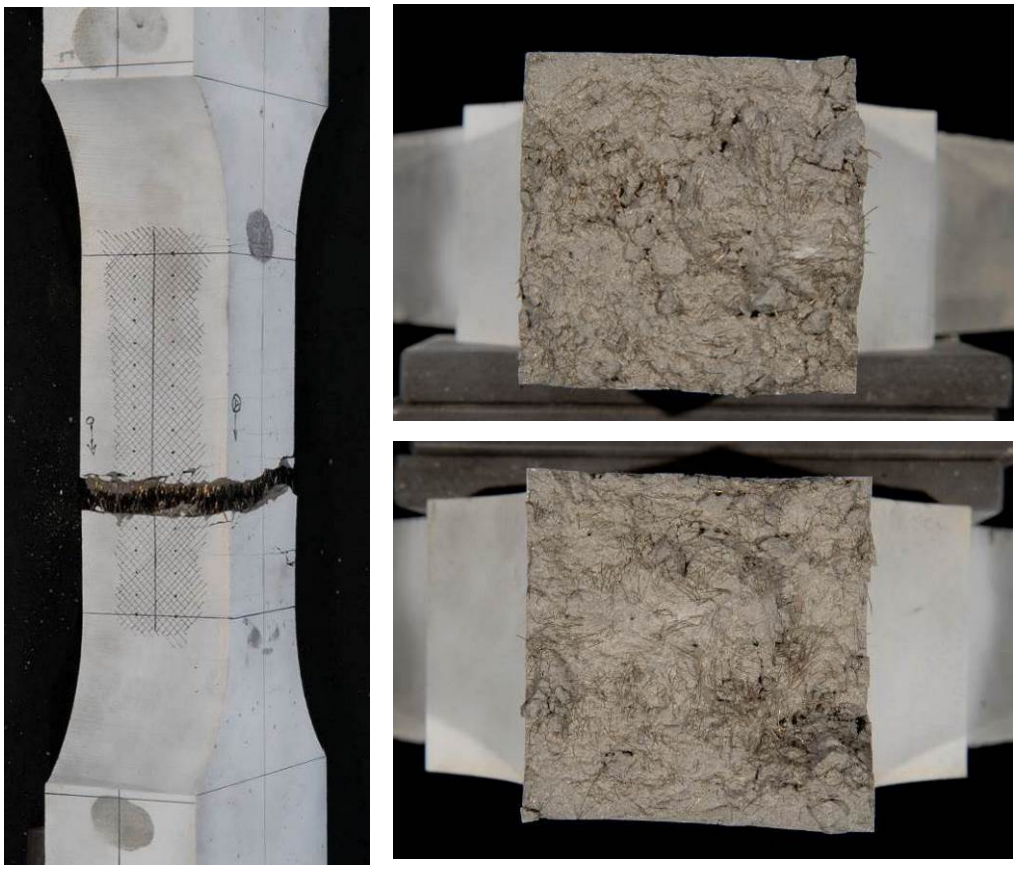
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ct,el}$	$f_{ct,el}$	$\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$	F_{max}	f_{ct}	$\varepsilon_{ct}(f_{ct})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[‰]	[kN]	[MPa]	[‰]
N1-1-DFM2-C3-20_09_2010	05.10.2010	15	74,9	74,5	60,55	10,86	0,24	85,90	15,40	8,19
N1-2-DFM2-C3-20_09_2010	05.10.2010	15	74,8	74,5	58,72	10,54	0,16	82,10	14,74	3,50
N1-3-DFM2-C3-20_09_2010	05.10.2010	15	75,1	74,6	60,04	10,72	0,25	79,60	14,22	5,08
N1-4-DFM2-C3-20_09_2010	05.10.2010	15	75,3	74,5	63,14	11,27	0,17	87,35	15,59	6,50
N1-5-DFM2-C3-20_09_2010	05.10.2010	15	75,3	74,5	58,71	10,47	0,21	82,10	14,65	5,85
N1-6-DFM2-C3-20_09_2010	05.10.2010	15	75,3	74,5	47,30	8,44	0,20	78,83	14,06	3,96
Mittelwert	m					10,38	0,21		14,78	5,51
Standardabweichung	s					1,00	0,04		0,62	1,72
Variationskoeffizient	v					9,59 %	17,19 %		4,18 %	31,28 %



a) Kraft-Längenänderungs-Kurve
(Messlänge: l=150,5 mm)

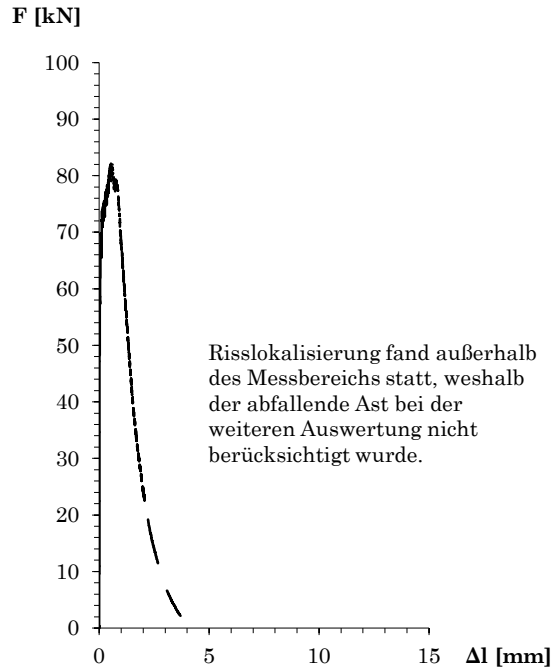


b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung



c) Risslokalisierung

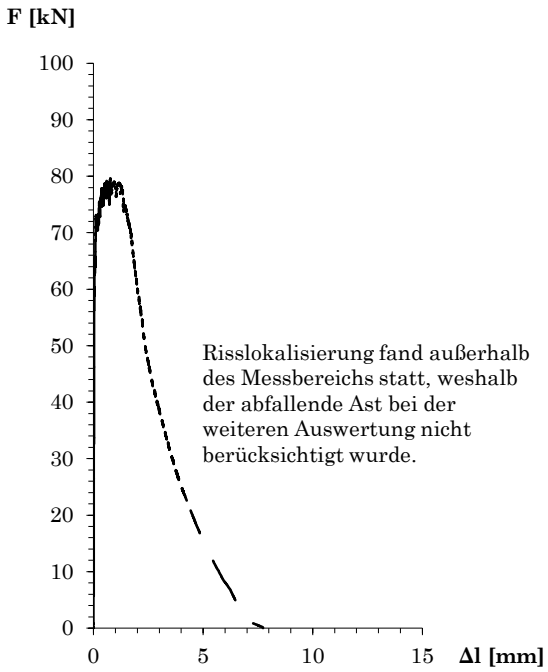
N1-1-DFM2-C3-20_09_2010



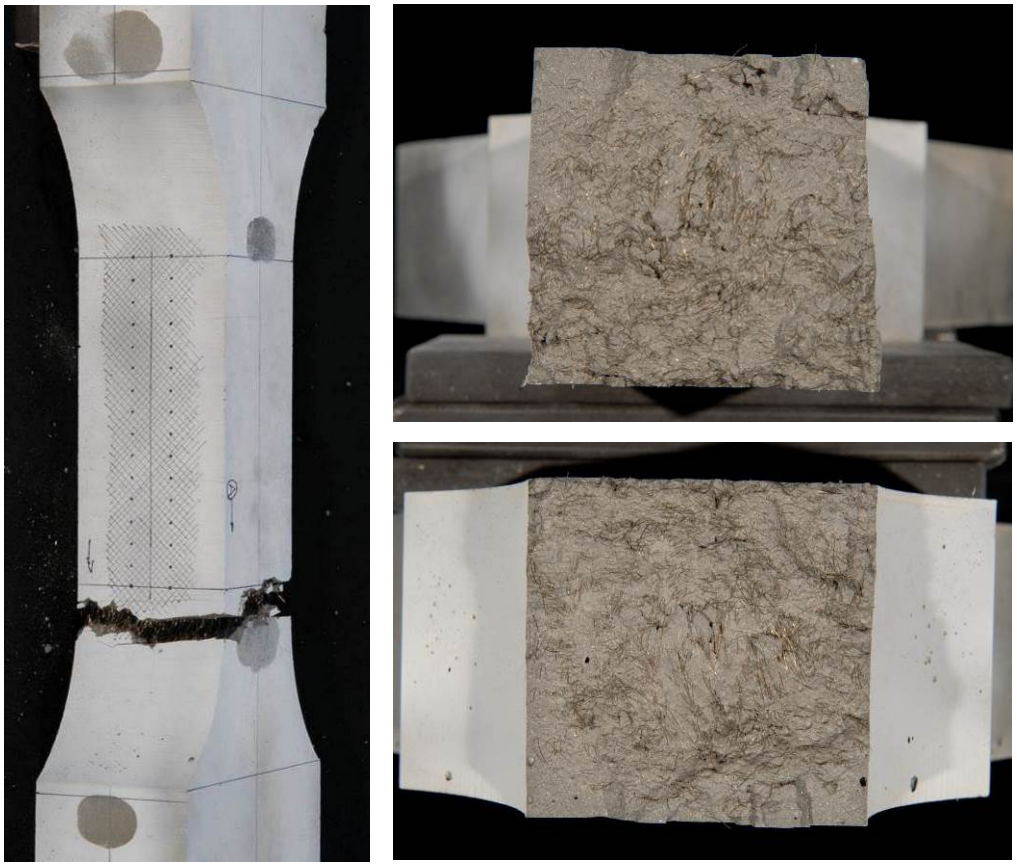
a) Kraft-Längenänderungs-Kurve (Messlänge: l=151 mm)

b) Risslokalisierung

N1-2-DFM2-C3-20_09_2010

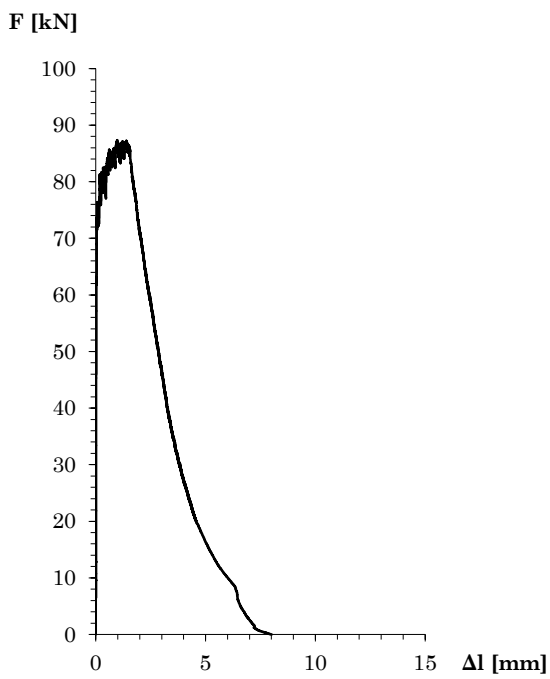


a) Kraft-Längenänderungs-Kurve (Messlänge: l=151,5 mm)

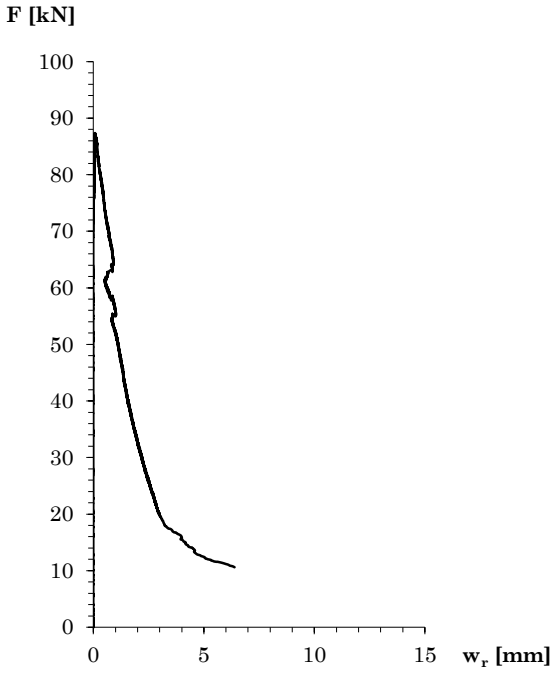


b) Risslokalisierung

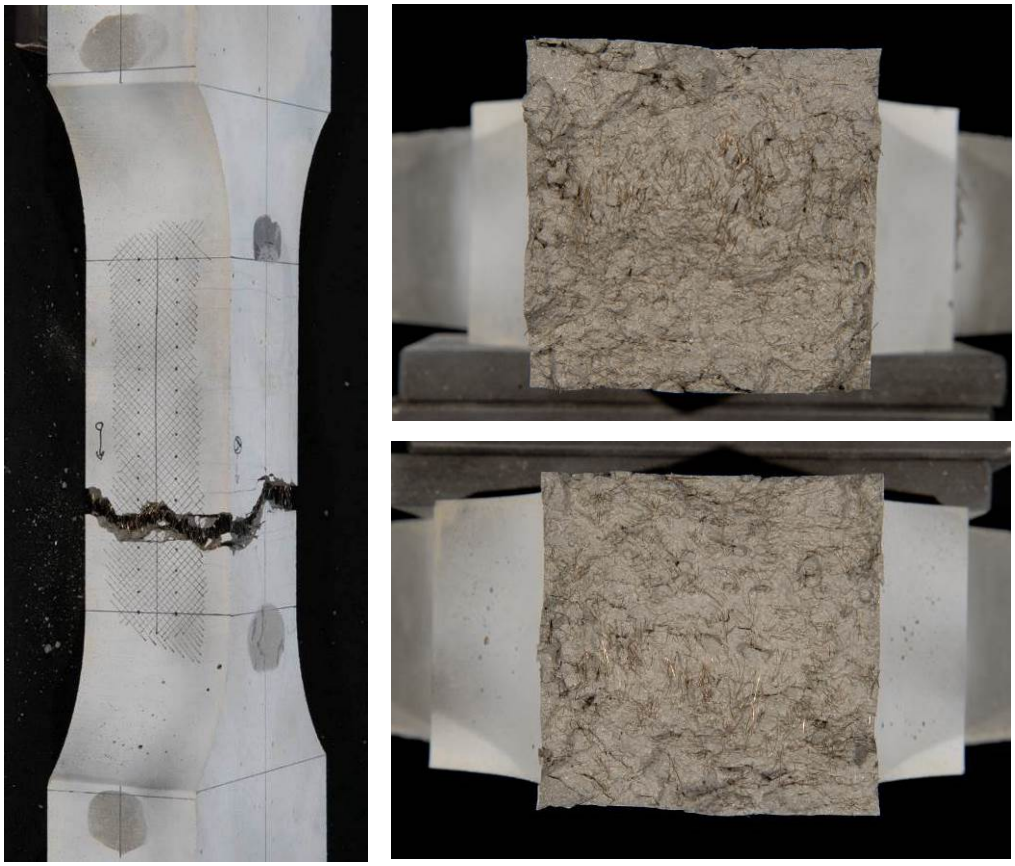
N1-3-DFM2-C3-20_09_2010



a) Kraft-Längenänderungs-Kurve (Messlänge: l=150 mm)

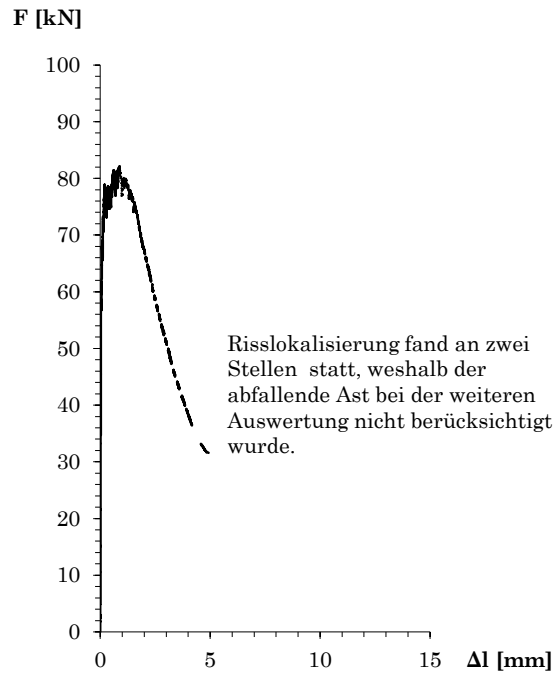


b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung



c) Risslokalisierung

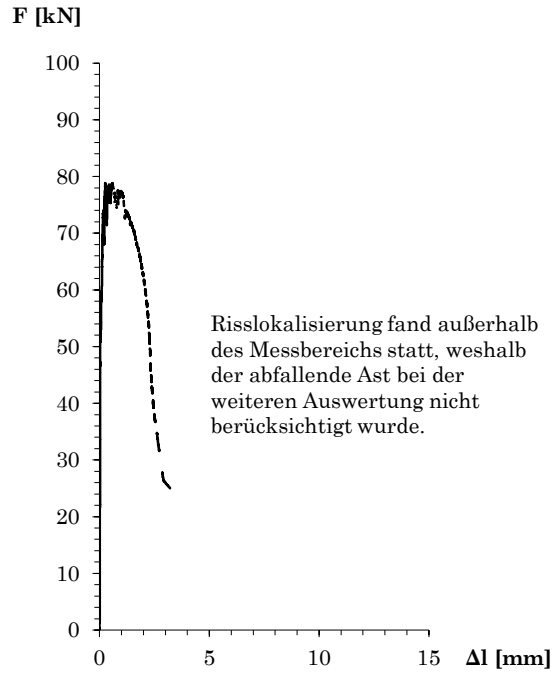
N1-4-DFM2-C3-20_09_2010



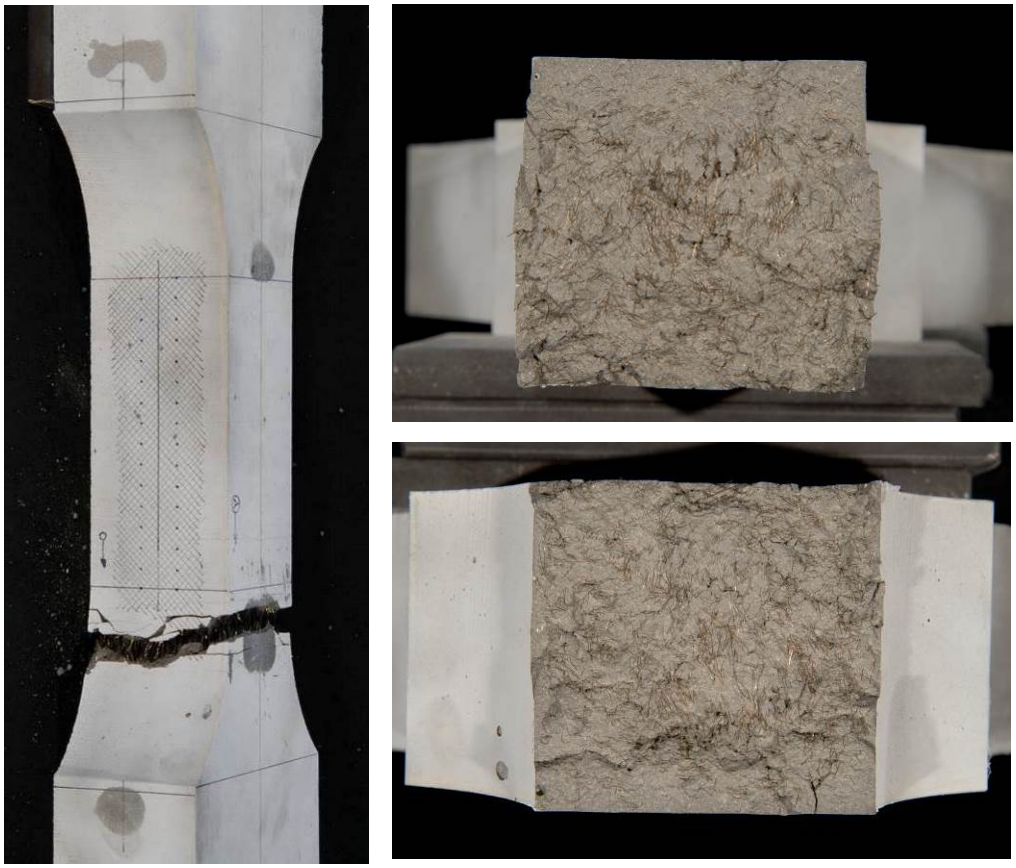
a) Kraft-Längenänderungs-Kurve (Messlänge: l=150 mm)

b) Risslokalisierung

N1-5-DFM2-C3-20_09_2010



a) Kraft-Längenänderungs-Kurve (Messlänge: l=149,5 mm)



b) Risslokalisierung

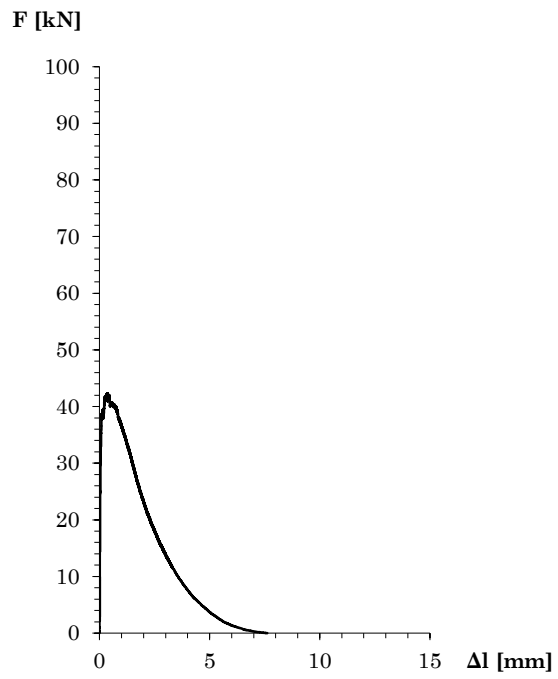
N1-6-DFM2-C3-20_09_2010

A.5 Zentrische Zugversuche – Versuchskörper mit Kerbe

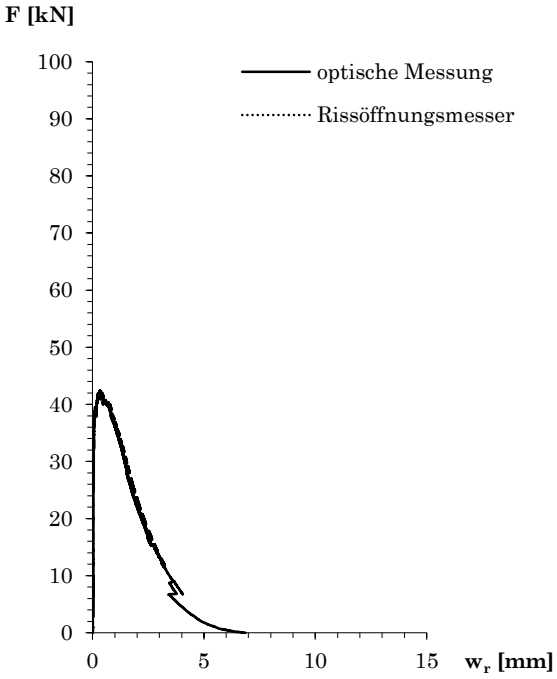
A.5.1 Charge C1

Weggeregelte zentrische Zugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ct,el}$	$f_{ct,el}$	$\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$	F_{max}	f_{ct}	$\varepsilon_{ct}(f_{ct})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[‰]	[kN]	[MPa]	[‰]
N1-1-DFM2-C1-06_09_2010	06.10.2010	30	50,1	48,8	16,80	6,88	0,15	42,34	17,35	2,39
N1-2-DFM2-C1-06_09_2010	06.10.2010	30	52,6	49,2	22,47	8,69	0,15	46,77	18,10	3,44
N1-3-DFM2-C1-06_09_2010	06.10.2010	30	52,1	48,2	23,55	9,38	0,18	42,44	16,91	1,08
N1-4-DFM2-C1-06_09_2010	06.10.2010	30	52,5	49,1	22,81	8,86	0,13	40,40	15,69	2,45
N1-5-DFM2-C1-06_09_2010	07.10.2010	31	52,5	49,3	22,22	8,60	0,15	33,00	12,77	1,60
N1-6-DFM2-C1-06_09_2010	07.10.2010	31	52,0	48,9	22,82	8,98	0,13	41,08	16,16	2,82
Mittelwert	m					8,57	0,15		16,16	2,30
Standardabweichung	s					0,87	0,02		1,87	0,85
Variationskoeffizient	v					10,14 %	11,66 %		11,56 %	36,92 %

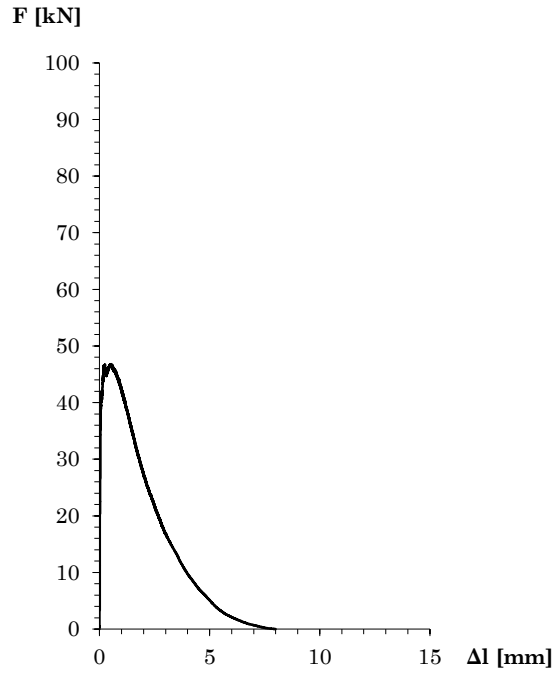


a) Kraft-Längenänderungs-Kurve (Messlänge: l=150,0 mm)

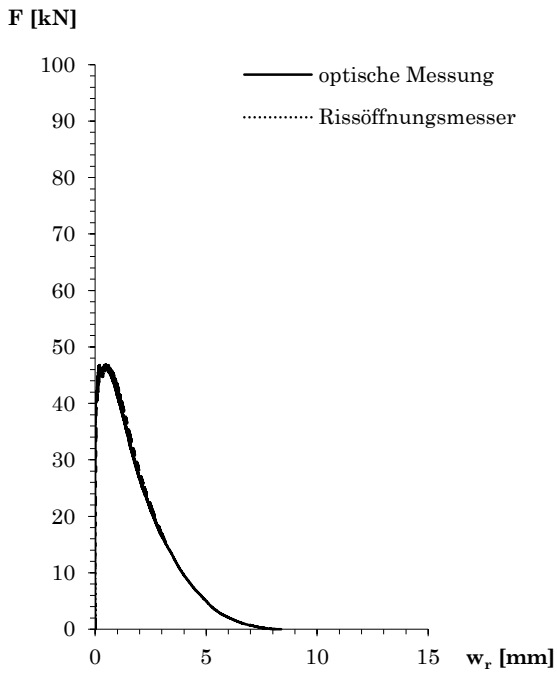


b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

N1-1-DFM2-C1-06_09_2010

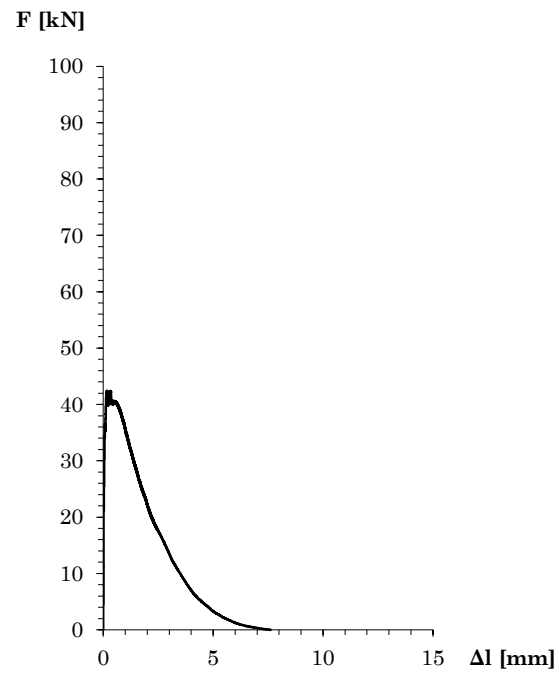


a) Kraft-Längenänderungs-Kurve (Messlänge: l=150,0 mm)

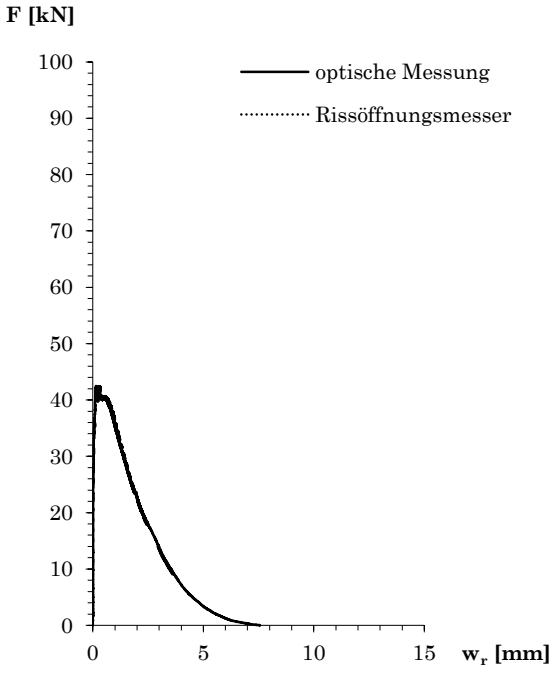


b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

N1-2-DFM2-C1-06_09_2010

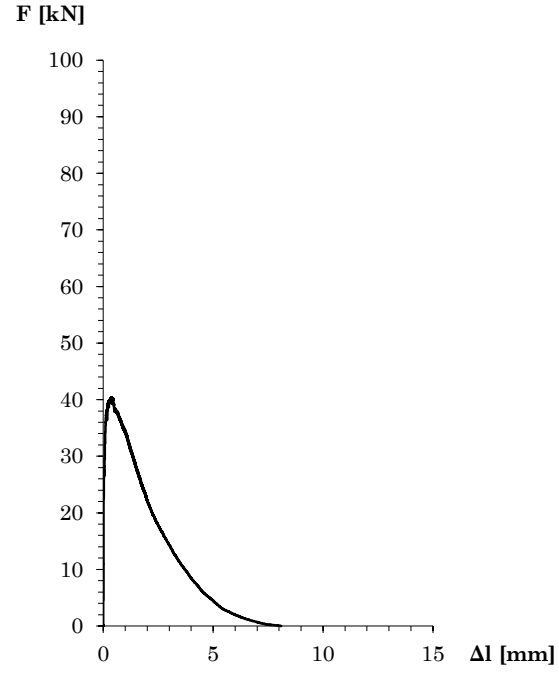


a) Kraft-Längenänderungs-Kurve (Messlänge: l=150,0 mm)

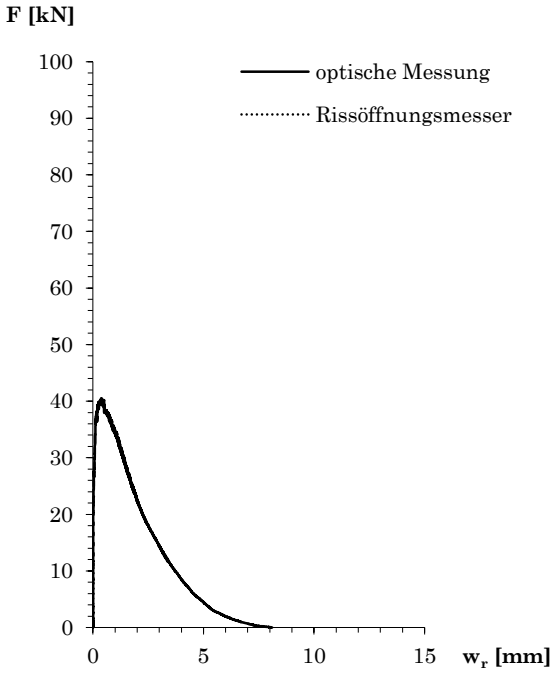


b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

N1-3-DFM2-C1-06_09_2010

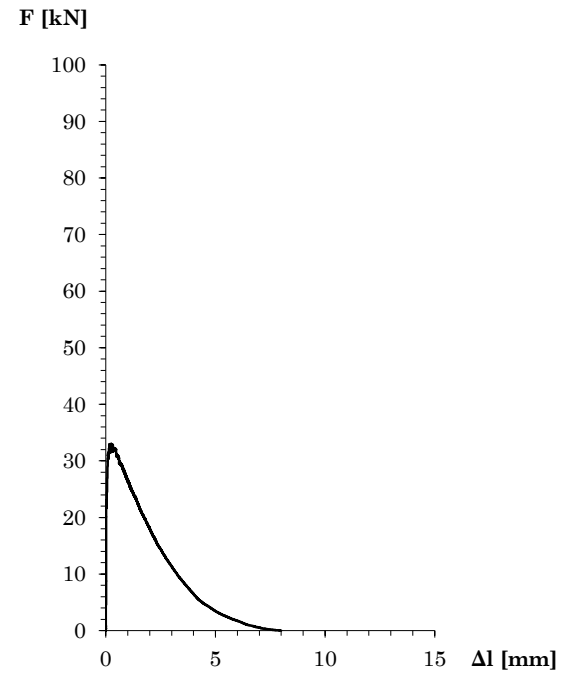


a) Kraft-Längenänderungs-Kurve (Messlänge: l=150,25 mm)

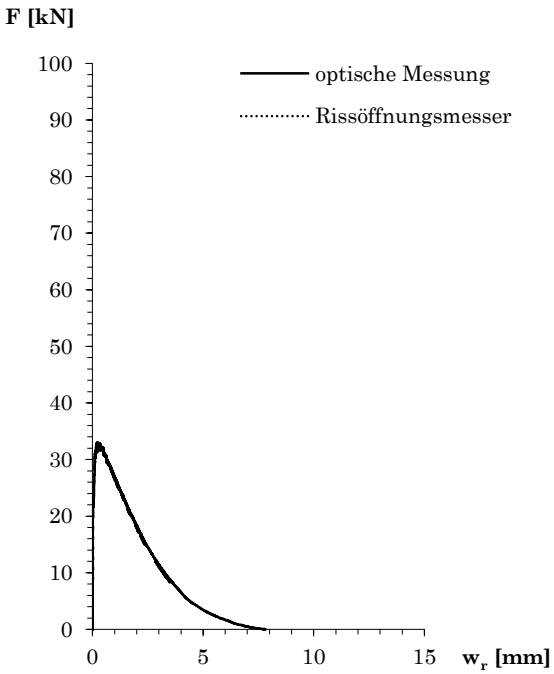


b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

N1-4-DFM2-C1-06_09_2010

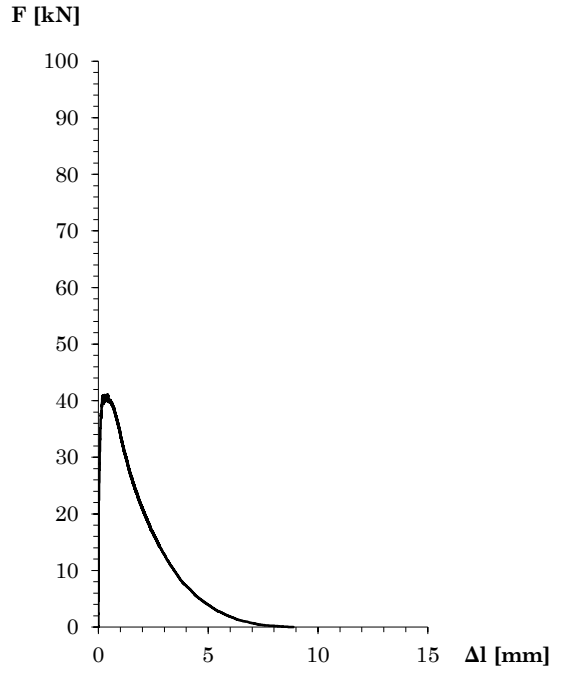


a) Kraft-Längenänderungs-Kurve
(Messlänge: l=150,5 mm)

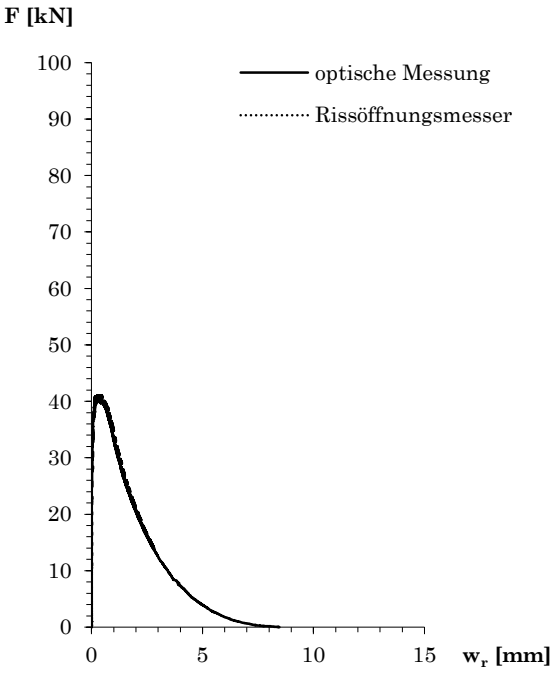


b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

N1-5-DFM2-C1-06_09_2010



a) Kraft-Längenänderungs-Kurve
(Messlänge: l=150,0 mm)



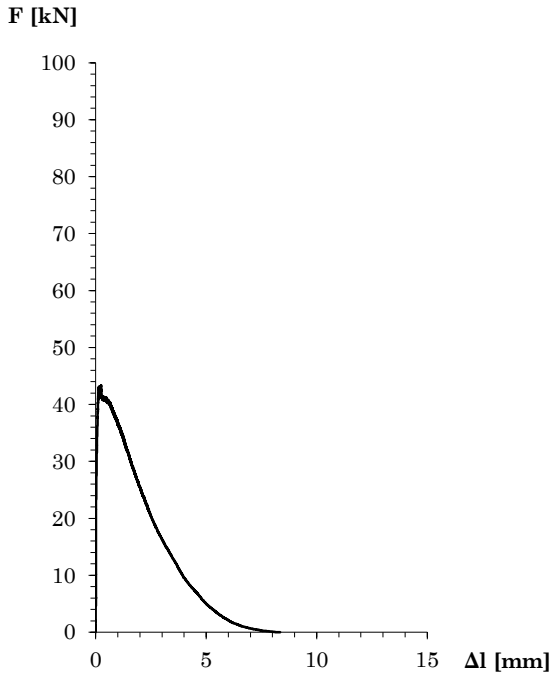
b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

N1-6-DFM2-C1-06_09_2010

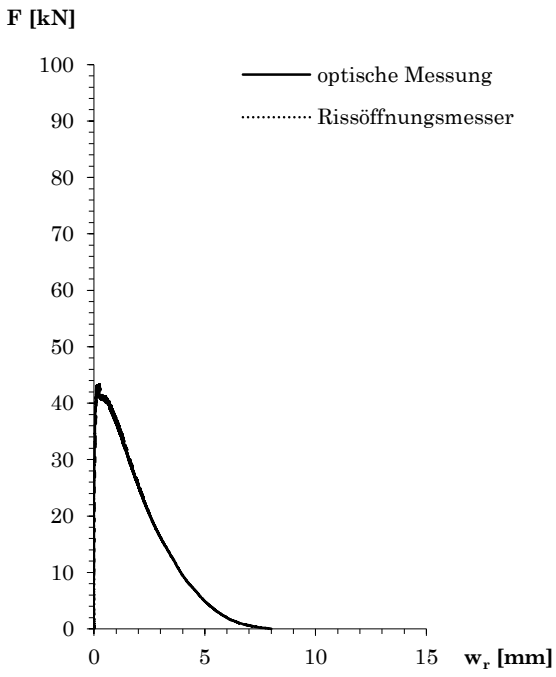
A.5.2 Charge C2

Weggeregelte zentrische Zugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ct,el}$	$f_{ct,el}$	$\varepsilon_{ct}(f_{ct,el})$	F_{max}	f_{ct}	$\varepsilon_{ct}(f_{ct})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[‰]	[kN]	[MPa]	[‰]
N1-1-DFM2-C2-13_09_2010	07.10.2010	24	52,4	48,1	23,68	9,41	0,13	43,31	17,22	1,58
N1-2-DFM2-C2-13_09_2010	07.10.2010	24	52,0	48,2	18,42	7,36	0,11	42,67	17,04	2,64
N1-3-DFM2-C2-13_09_2010	06.10.2010	23	51,8	48,7	20,98	8,32	0,17	41,62	16,51	1,41
Mittelwert	m					8,36	0,13		16,93	1,87
Standardabweichung	s					1,03	0,03		0,37	0,66
Variationskoeffizient	v					12,31 %	21,43 %		2,17 %	35,46 %

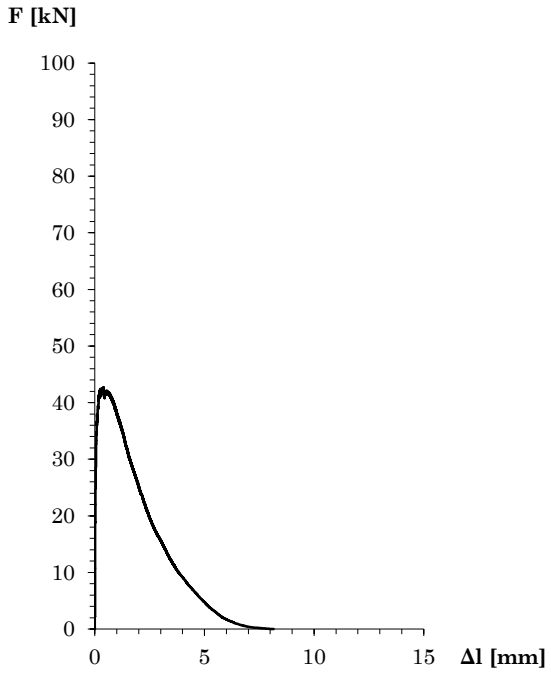


a) Kraft-Längenänderungs-Kurve (Messlänge: l=150,5 mm)

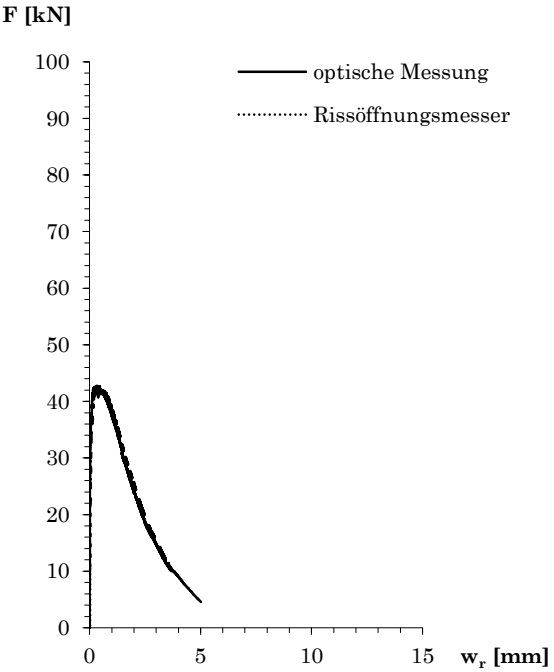


b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

N1-1-DFM2-C2-13_09_2010

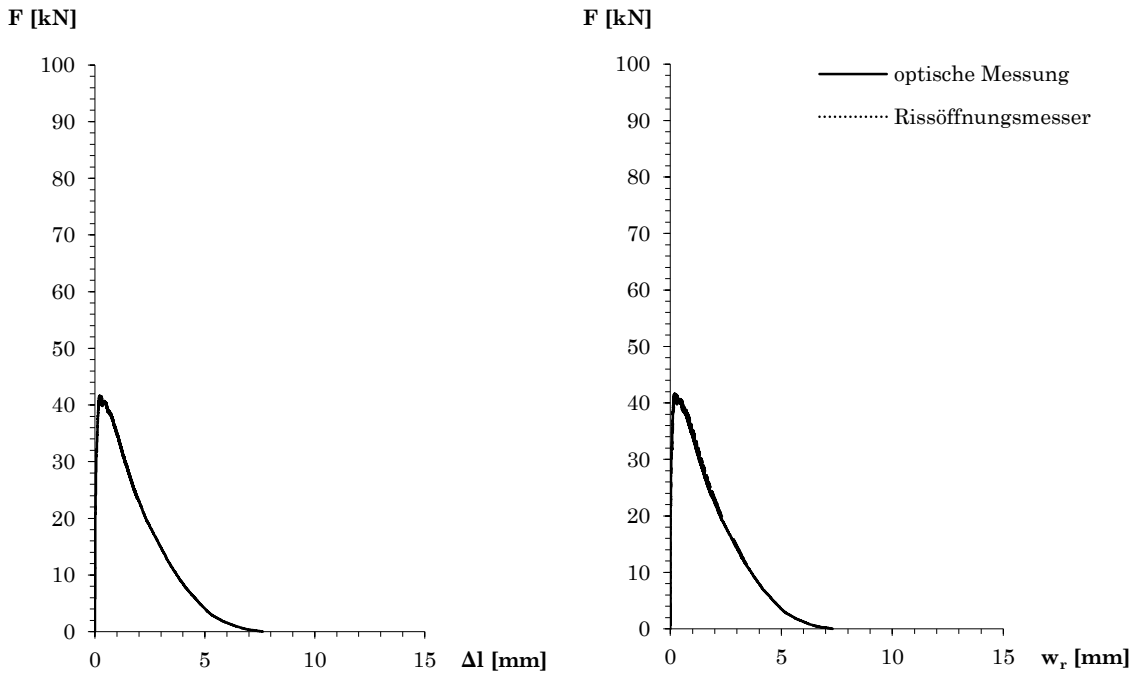


a) Kraft-Längenänderungs-Kurve (Messlänge: l=150,75 mm)



b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

N1-2-DFM2-C2-13_09_2010



a) Kraft-Längenänderungs-Kurve (Messlänge: l=149,75 mm)

b) Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

N1-3-DFM2-C2-13_09_2010

Anhang B Schnittgrößen und Ergebnisse der UHFFB Turmvarianten

B.1 Turmvariante 1

B.1.1 Schnittgrößen

B.1.1.1 Schnittgrößen aus der Simulation mit Flex 5 (charakteristische Schnittgrößen)

Maximallasten DLC 1.1					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.837,00	16.780,00	901,80	10.060,00
127,00	427X	3.935,00	16.420,00	906,00	10.060,00
124,50	426X	4.114,00	15.850,00	912,90	10.060,00
122,00	425X	4.283,00	15.300,00	918,70	10.060,00
119,50	424X	4.459,00	14.980,00	924,00	10.060,00
117,00	423X	4.622,00	14.790,00	928,30	10.060,00
114,50	422X	4.804,00	14.590,00	932,40	10.060,00
112,00	421X	4.973,00	14.690,00	935,90	10.060,00
109,50	420X	5.161,00	15.620,00	939,50	10.060,00
107,00	419X	5.335,00	17.900,00	943,00	10.060,00
104,50	418X	5.530,00	20.190,00	947,80	10.060,00
102,00	417X	5.709,00	22.500,00	953,30	10.060,00
99,50	416X	5.910,00	24.820,00	959,90	10.060,00
97,00	415X	6.095,00	27.140,00	965,90	10.060,00
94,50	414X	6.319,00	29.480,00	973,00	10.060,00
92,00	413X	6.510,00	31.810,00	978,60	10.060,00
89,50	412X	6.723,00	34.150,00	984,50	10.060,00
87,00	411X	6.919,00	36.490,00	989,40	10.060,00
84,50	410X	7.138,00	38.830,00	994,40	10.060,00
82,00	409X	7.340,00	41.180,00	998,40	10.060,00
79,50	408X	7.565,00	43.530,00	1.002,00	10.060,00
77,00	407X	7.773,00	45.890,00	1.006,00	10.060,00
74,50	406X	8.004,00	48.260,00	1.009,00	10.060,00
72,00	405X	8.264,00	50.650,00	1.011,00	10.060,00
69,50	404X	8.642,00	53.070,00	1.015,00	10.060,00
67,00	403X	8.947,00	55.530,00	1.016,00	10.060,00
64,50	402X	9.210,00	58.010,00	1.018,00	10.060,00
62,00	401X	9.822,00	60.500,00	1.020,00	10.060,00
59,50	400X	10.120,00	63.010,00	1.021,00	10.060,00

Maximallasten DLC 1.2					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.790,00	17.780,00	963,10	8.539,00
127,00	427X	3.887,00	17.380,00	968,10	8.539,00
124,50	426X	4.067,00	16.760,00	976,10	8.539,00
122,00	425X	4.236,00	16.150,00	982,40	8.539,00
119,50	424X	4.412,00	15.550,00	987,70	8.539,00
117,00	423X	4.575,00	14.990,00	991,50	8.539,00
114,50	422X	4.757,00	14.440,00	995,00	8.539,00
112,00	421X	4.925,00	13.980,00	997,30	8.539,00
109,50	420X	5.114,00	14.380,00	998,80	8.539,00
107,00	419X	5.288,00	16.630,00	1.000,00	8.539,00
104,50	418X	5.482,00	18.900,00	1.001,00	8.539,00
102,00	417X	5.662,00	21.230,00	1.002,00	8.539,00
99,50	416X	5.862,00	23.660,00	1.004,00	8.539,00
97,00	415X	6.048,00	26.100,00	1.006,00	8.539,00
94,50	414X	6.271,00	28.540,00	1.011,00	8.539,00
92,00	413X	6.462,00	30.970,00	1.015,00	8.539,00
89,50	412X	6.675,00	33.410,00	1.019,00	8.539,00
87,00	411X	6.872,00	35.830,00	1.022,00	8.539,00
84,50	410X	7.091,00	38.260,00	1.025,00	8.539,00
82,00	409X	7.293,00	40.680,00	1.028,00	8.539,00
79,50	408X	7.518,00	43.100,00	1.030,00	8.538,00
77,00	407X	7.725,00	45.510,00	1.031,00	8.538,00
74,50	406X	7.957,00	47.920,00	1.031,00	8.538,00
72,00	405X	8.216,00	50.340,00	1.031,00	8.538,00
69,50	404X	8.595,00	52.770,00	1.037,00	8.538,00
67,00	403X	8.899,00	55.200,00	1.040,00	8.538,00
64,50	402X	9.163,00	57.650,00	1.042,00	8.538,00
62,00	401X	9.774,00	60.110,00	1.050,00	8.538,00
59,50	400X	10.080,00	62.580,00	1.055,00	8.538,00

Maximallasten DLC 1.3					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.578,00	17.820,00	879,60	6.619,00
127,00	427X	3.675,00	18.130,00	880,90	6.619,00
124,50	426X	3.854,00	19.110,00	883,20	6.619,00
122,00	425X	4.024,00	20.100,00	885,30	6.620,00
119,50	424X	4.200,00	21.090,00	887,30	6.620,00
117,00	423X	4.363,00	22.090,00	889,00	6.620,00
114,50	422X	4.545,00	23.090,00	890,90	6.620,00
112,00	421X	4.713,00	24.100,00	892,50	6.620,00
109,50	420X	4.901,00	25.110,00	894,30	6.620,00
107,00	419X	5.076,00	26.120,00	896,00	6.620,00
104,50	418X	5.270,00	27.140,00	898,30	6.620,00
102,00	417X	5.450,00	28.680,00	900,40	6.620,00
99,50	416X	5.650,00	30.900,00	902,80	6.620,00
97,00	415X	5.835,00	33.120,00	904,80	6.619,00
94,50	414X	6.059,00	35.350,00	907,20	6.619,00
92,00	413X	6.250,00	37.590,00	909,20	6.619,00
89,50	412X	6.463,00	39.820,00	911,70	6.619,00
87,00	411X	6.659,00	42.060,00	914,00	6.619,00
84,50	410X	6.879,00	44.300,00	916,60	6.619,00
82,00	409X	7.080,00	46.540,00	918,80	6.619,00
79,50	408X	7.306,00	48.770,00	921,20	6.619,00
77,00	407X	7.513,00	51.000,00	926,00	6.618,00
74,50	406X	7.745,00	53.230,00	933,40	6.618,00
72,00	405X	8.004,00	55.450,00	941,40	6.619,00
69,50	404X	8.383,00	57.660,00	952,70	6.619,00
67,00	403X	8.687,00	59.870,00	961,10	6.619,00
64,50	402X	8.951,00	62.070,00	968,00	6.619,00
62,00	401X	9.562,00	64.250,00	984,20	6.619,00
59,50	400X	9.863,00	66.420,00	991,10	6.619,00

Maximallasten DLC 1.5					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.462,00	14.260,00	550,80	2.296,00
127,00	427X	3.560,00	14.990,00	557,30	2.296,00
124,50	426X	3.739,00	16.270,00	568,80	2.295,00
122,00	425X	3.908,00	17.650,00	579,10	2.295,00
119,50	424X	4.084,00	19.060,00	589,20	2.295,00
117,00	423X	4.247,00	20.500,00	598,00	2.295,00
114,50	422X	4.429,00	21.970,00	607,30	2.295,00
112,00	421X	4.598,00	23.480,00	615,40	2.295,00
109,50	420X	4.786,00	25.000,00	624,10	2.295,00
107,00	419X	4.960,00	26.550,00	631,60	2.295,00
104,50	418X	5.154,00	28.130,00	640,00	2.295,00
102,00	417X	5.334,00	29.730,00	647,80	2.295,00
99,50	416X	5.535,00	31.340,00	657,10	2.295,00
97,00	415X	5.720,00	32.980,00	665,40	2.295,00
94,50	414X	5.944,00	34.640,00	675,50	2.295,00
92,00	413X	6.135,00	36.320,00	683,40	2.295,00
89,50	412X	6.348,00	38.010,00	691,80	2.295,00
87,00	411X	6.544,00	39.720,00	699,00	2.295,00
84,50	410X	6.763,00	41.440,00	706,70	2.296,00
82,00	409X	6.965,00	43.190,00	713,10	2.296,00
79,50	408X	7.190,00	44.940,00	720,00	2.296,00
77,00	407X	7.398,00	46.720,00	725,60	2.296,00
74,50	406X	7.629,00	48.510,00	731,60	2.296,00
72,00	405X	7.889,00	50.320,00	738,10	2.296,00
69,50	404X	8.267,00	52.160,00	747,60	2.296,00
67,00	403X	8.572,00	54.020,00	754,10	2.296,00
64,50	402X	8.835,00	55.890,00	758,80	2.296,00
62,00	401X	9.447,00	57.810,00	772,00	2.296,00
59,50	400X	9.748,00	59.740,00	776,50	2.296,00

Maximallasten DLC 1.6					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.524,00	11.520,00	997,80	2.159,00
127,00	427X	3.621,00	12.230,00	1.004,00	2.159,00
124,50	426X	3.800,00	13.890,00	1.015,00	2.159,00
122,00	425X	3.970,00	15.680,00	1.025,00	2.159,00
119,50	424X	4.146,00	17.530,00	1.034,00	2.159,00
117,00	423X	4.309,00	19.420,00	1.043,00	2.159,00
114,50	422X	4.491,00	21.340,00	1.052,00	2.159,00
112,00	421X	4.659,00	23.310,00	1.060,00	2.159,00
109,50	420X	4.847,00	25.300,00	1.068,00	2.159,00
107,00	419X	5.022,00	27.340,00	1.076,00	2.159,00
104,50	418X	5.216,00	29.400,00	1.083,00	2.159,00
102,00	417X	5.396,00	31.500,00	1.090,00	2.159,00
99,50	416X	5.596,00	33.630,00	1.097,00	2.159,00
97,00	415X	5.781,00	35.790,00	1.104,00	2.159,00
94,50	414X	6.005,00	37.980,00	1.111,00	2.159,00
92,00	413X	6.196,00	40.210,00	1.117,00	2.159,00
89,50	412X	6.409,00	42.460,00	1.124,00	2.159,00
87,00	411X	6.605,00	44.730,00	1.130,00	2.159,00
84,50	410X	6.824,00	47.030,00	1.137,00	2.159,00
82,00	409X	7.026,00	49.340,00	1.143,00	2.159,00
79,50	408X	7.252,00	51.680,00	1.150,00	2.159,00
77,00	407X	7.459,00	54.020,00	1.155,00	2.159,00
74,50	406X	7.691,00	56.530,00	1.161,00	2.159,00
72,00	405X	7.950,00	59.380,00	1.167,00	2.159,00
69,50	404X	8.328,00	62.260,00	1.174,00	2.159,00
67,00	403X	8.633,00	65.180,00	1.180,00	2.159,00
64,50	402X	8.897,00	68.110,00	1.185,00	2.159,00
62,00	401X	9.508,00	71.070,00	1.195,00	2.159,00
59,50	400X	9.809,00	74.050,00	1.199,00	2.159,00

Maximallasten DLC 1.7					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.582,00	15.690,00	572,20	8.848,00
127,00	427X	3.680,00	15.250,00	573,00	8.848,00
124,50	426X	3.859,00	14.560,00	574,50	8.848,00
122,00	425X	4.028,00	13.870,00	575,80	8.848,00
119,50	424X	4.204,00	13.170,00	577,00	8.849,00
117,00	423X	4.367,00	12.500,00	578,20	8.849,00
114,50	422X	4.549,00	11.840,00	579,30	8.849,00
112,00	421X	4.718,00	11.170,00	580,40	8.849,00
109,50	420X	4.906,00	10.820,00	581,40	8.849,00
107,00	419X	5.080,00	12.050,00	582,40	8.849,00
104,50	418X	5.274,00	13.310,00	583,30	8.849,00
102,00	417X	5.454,00	14.590,00	584,20	8.849,00
99,50	416X	5.655,00	15.880,00	585,10	8.849,00
97,00	415X	5.840,00	17.190,00	585,90	8.849,00
94,50	414X	6.064,00	18.500,00	586,90	8.848,00
92,00	413X	6.255,00	19.820,00	587,60	8.848,00
89,50	412X	6.467,00	21.150,00	588,30	8.848,00
87,00	411X	6.664,00	22.490,00	588,90	8.848,00
84,50	410X	6.883,00	23.820,00	589,50	8.848,00
82,00	409X	7.085,00	25.170,00	590,00	8.848,00
79,50	408X	7.310,00	26.510,00	590,40	8.848,00
77,00	407X	7.518,00	27.860,00	590,70	8.848,00
74,50	406X	7.749,00	29.210,00	591,00	8.848,00
72,00	405X	8.009,00	30.570,00	591,20	8.848,00
69,50	404X	8.387,00	31.920,00	591,60	8.848,00
67,00	403X	8.692,00	33.280,00	591,70	8.848,00
64,50	402X	8.955,00	34.630,00	591,60	8.848,00
62,00	401X	9.567,00	35.990,00	592,10	8.848,00
59,50	400X	9.868,00	37.360,00	592,20	8.849,00

Maximallasten DLC 1.8					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.526,00	14.950,00	690,00	3.646,00
127,00	427X	3.624,00	14.670,00	693,50	3.646,00
124,50	426X	3.803,00	14.240,00	699,60	3.646,00
122,00	425X	3.972,00	13.820,00	705,00	3.646,00
119,50	424X	4.148,00	13.400,00	710,10	3.646,00
117,00	423X	4.311,00	13.000,00	714,60	3.646,00
114,50	422X	4.493,00	12.600,00	719,10	3.646,00
112,00	421X	4.662,00	12.200,00	722,90	3.646,00
109,50	420X	4.850,00	11.810,00	726,80	3.646,00
107,00	419X	5.024,00	11.940,00	730,10	3.646,00
104,50	418X	5.219,00	13.670,00	733,40	3.646,00
102,00	417X	5.398,00	15.440,00	736,10	3.646,00
99,50	416X	5.599,00	17.220,00	738,90	3.646,00
97,00	415X	5.784,00	19.020,00	741,20	3.646,00
94,50	414X	6.008,00	20.840,00	743,80	3.646,00
92,00	413X	6.199,00	22.670,00	745,80	3.646,00
89,50	412X	6.412,00	24.500,00	747,90	3.646,00
87,00	411X	6.608,00	26.340,00	749,70	3.646,00
84,50	410X	6.827,00	28.190,00	751,70	3.646,00
82,00	409X	7.029,00	30.050,00	753,50	3.646,00
79,50	408X	7.254,00	31.910,00	755,40	3.646,00
77,00	407X	7.462,00	33.770,00	757,10	3.646,00
74,50	406X	7.693,00	35.630,00	758,90	3.646,00
72,00	405X	7.953,00	37.500,00	761,10	3.646,00
69,50	404X	8.331,00	39.360,00	764,50	3.646,00
67,00	403X	8.636,00	41.230,00	767,20	3.646,00
64,50	402X	8.899,00	43.100,00	769,40	3.646,00
62,00	401X	9.511,00	44.970,00	775,80	3.646,00
59,50	400X	9.812,00	46.850,00	778,40	3.646,00

Maximallasten DLC 1.9					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.547,00	12.430,00	1.130,00	1.548,00
127,00	427X	3.644,00	13.120,00	1.132,00	1.548,00
124,50	426X	3.823,00	14.260,00	1.137,00	1.548,00
122,00	425X	3.993,00	15.450,00	1.140,00	1.548,00
119,50	424X	4.169,00	16.690,00	1.144,00	1.548,00
117,00	423X	4.332,00	17.960,00	1.148,00	1.548,00
114,50	422X	4.514,00	19.260,00	1.152,00	1.549,00
112,00	421X	4.682,00	20.600,00	1.155,00	1.549,00
109,50	420X	4.870,00	21.970,00	1.157,00	1.549,00
107,00	419X	5.044,00	23.370,00	1.160,00	1.549,00
104,50	418X	5.239,00	24.810,00	1.163,00	1.549,00
102,00	417X	5.419,00	26.710,00	1.166,00	1.549,00
99,50	416X	5.619,00	29.570,00	1.169,00	1.548,00
97,00	415X	5.804,00	32.450,00	1.171,00	1.548,00
94,50	414X	6.028,00	35.340,00	1.174,00	1.548,00
92,00	413X	6.219,00	38.240,00	1.177,00	1.548,00
89,50	412X	6.432,00	41.150,00	1.181,00	1.548,00
87,00	411X	6.628,00	44.070,00	1.186,00	1.548,00
84,50	410X	6.847,00	47.000,00	1.190,00	1.548,00
82,00	409X	7.049,00	49.940,00	1.194,00	1.548,00
79,50	408X	7.275,00	52.880,00	1.198,00	1.548,00
77,00	407X	7.482,00	55.830,00	1.201,00	1.548,00
74,50	406X	7.714,00	58.780,00	1.204,00	1.548,00
72,00	405X	7.973,00	61.740,00	1.208,00	1.548,00
69,50	404X	8.351,00	64.700,00	1.213,00	1.548,00
67,00	403X	8.656,00	67.660,00	1.216,00	1.548,00
64,50	402X	8.920,00	70.620,00	1.218,00	1.548,00
62,00	401X	9.531,00	73.620,00	1.224,00	1.548,00
59,50	400X	9.832,00	76.670,00	1.226,00	1.548,00

Maximallasten DLC 3.1					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.824,00	12.800,00	839,80	6.811,00
127,00	427X	3.921,00	12.670,00	843,40	6.811,00
124,50	426X	4.101,00	12.830,00	849,10	6.811,00
122,00	425X	4.270,00	13.180,00	853,80	6.811,00
119,50	424X	4.446,00	13.640,00	857,80	6.811,00
117,00	423X	4.609,00	14.130,00	860,90	6.811,00
114,50	422X	4.791,00	14.630,00	863,50	6.811,00
112,00	421X	4.959,00	15.180,00	865,40	6.811,00
109,50	420X	5.148,00	15.780,00	866,80	6.811,00
107,00	419X	5.322,00	16.400,00	867,60	6.811,00
104,50	418X	5.516,00	17.030,00	867,80	6.811,00
102,00	417X	5.696,00	18.970,00	867,60	6.811,00
99,50	416X	5.896,00	21.080,00	866,90	6.811,00
97,00	415X	6.082,00	23.200,00	865,80	6.811,00
94,50	414X	6.305,00	25.330,00	865,00	6.811,00
92,00	413X	6.496,00	27.460,00	868,20	6.811,00
89,50	412X	6.709,00	29.590,00	872,30	6.811,00
87,00	411X	6.906,00	31.730,00	876,10	6.811,00
84,50	410X	7.125,00	33.860,00	880,20	6.811,00
82,00	409X	7.327,00	35.980,00	883,60	6.811,00
79,50	408X	7.552,00	38.110,00	887,40	6.811,00
77,00	407X	7.759,00	40.220,00	890,40	6.811,00
74,50	406X	7.991,00	42.340,00	893,40	6.811,00
72,00	405X	8.250,00	44.440,00	898,10	6.811,00
69,50	404X	8.629,00	46.540,00	908,40	6.811,00
67,00	403X	8.933,00	48.620,00	916,30	6.811,00
64,50	402X	9.197,00	50.700,00	922,60	6.811,00
62,00	401X	9.809,00	52.760,00	937,50	6.811,00
59,50	400X	10.110,00	54.950,00	944,00	6.811,00

Maximallasten DLC 4.1					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.747,00	14.240,00	811,60	6.454,00
127,00	427X	3.845,00	14.380,00	813,30	6.454,00
124,50	426X	4.024,00	14.620,00	816,00	6.454,00
122,00	425X	4.193,00	14.890,00	818,40	6.454,00
119,50	424X	4.369,00	15.160,00	821,60	6.454,00
117,00	423X	4.532,00	15.460,00	824,30	6.454,00
114,50	422X	4.714,00	15.770,00	827,40	6.454,00
112,00	421X	4.882,00	16.330,00	830,40	6.454,00
109,50	420X	5.071,00	16.920,00	834,30	6.454,00
107,00	419X	5.245,00	17.520,00	838,60	6.454,00
104,50	418X	5.439,00	18.140,00	843,60	6.454,00
102,00	417X	5.619,00	18.780,00	848,10	6.454,00
99,50	416X	5.819,00	19.950,00	852,80	6.454,00
97,00	415X	6.005,00	21.860,00	856,80	6.454,00
94,50	414X	6.229,00	23.780,00	861,20	6.454,00
92,00	413X	6.419,00	25.700,00	864,50	6.454,00
89,50	412X	6.632,00	27.610,00	867,60	6.454,00
87,00	411X	6.829,00	29.530,00	870,00	6.454,00
84,50	410X	7.048,00	31.450,00	872,10	6.454,00
82,00	409X	7.250,00	33.380,00	873,50	6.454,00
79,50	408X	7.475,00	35.520,00	874,70	6.454,00
77,00	407X	7.682,00	37.680,00	879,60	6.454,00
74,50	406X	7.914,00	39.850,00	884,30	6.454,00
72,00	405X	8.173,00	42.020,00	888,90	6.454,00
69,50	404X	8.552,00	44.190,00	894,70	6.454,00
67,00	403X	8.857,00	46.350,00	898,30	6.454,00
64,50	402X	9.120,00	48.510,00	900,60	6.454,00
62,00	401X	9.732,00	50.660,00	905,60	6.454,00
59,50	400X	10.030,00	52.810,00	906,80	6.454,00

Maximallasten DLC 6.1 a S					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.292,00	11.750,00	594,70	604,30
127,00	427X	3.390,00	12.220,00	609,50	604,30
124,50	426X	3.569,00	12.990,00	635,30	604,20
122,00	425X	3.738,00	13.800,00	659,30	604,10
119,50	424X	3.914,00	14.630,00	683,10	604,00
117,00	423X	4.077,00	15.490,00	704,90	603,90
114,50	422X	4.259,00	16.380,00	727,70	603,80
112,00	421X	4.428,00	17.290,00	748,50	603,70
109,50	420X	4.616,00	18.230,00	770,30	603,60
107,00	419X	4.790,00	19.190,00	790,10	603,60
104,50	418X	4.985,00	20.170,00	810,70	603,50
102,00	417X	5.164,00	21.170,00	829,40	603,50
99,50	416X	5.365,00	22.190,00	848,90	603,40
97,00	415X	5.550,00	23.220,00	866,50	603,40
94,50	414X	5.774,00	24.270,00	885,80	603,40
92,00	413X	5.965,00	25.340,00	902,20	603,30
89,50	412X	6.178,00	26.420,00	919,20	603,30
87,00	411X	6.374,00	27.510,00	934,50	603,30
84,50	410X	6.593,00	29.260,00	950,10	603,20
82,00	409X	6.795,00	31.650,00	964,20	603,20
79,50	408X	7.020,00	34.080,00	978,60	603,20
77,00	407X	7.228,00	36.530,00	991,50	603,10
74,50	406X	7.459,00	39.020,00	1.005,00	603,10
72,00	405X	7.719,00	41.550,00	1.018,00	603,10
69,50	404X	8.097,00	44.110,00	1.034,00	603,00
67,00	403X	8.402,00	46.700,00	1.047,00	603,00
64,50	402X	8.665,00	49.330,00	1.058,00	602,90
62,00	401X	9.277,00	52.000,00	1.076,00	602,90
59,50	400X	9.578,00	54.710,00	1.087,00	602,80

Maximallasten DLC 6.1a T					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.763,00	13.450,00	737,40	4.865,00
127,00	427X	3.861,00	13.950,00	743,30	4.865,00
124,50	426X	4.040,00	14.810,00	753,20	4.864,00
122,00	425X	4.209,00	15.760,00	762,10	4.864,00
119,50	424X	4.385,00	16.780,00	781,10	4.864,00
117,00	423X	4.548,00	18.080,00	799,20	4.864,00
114,50	422X	4.730,00	19.550,00	818,40	4.863,00
112,00	421X	4.898,00	21.090,00	835,80	4.863,00
109,50	420X	5.087,00	22.670,00	854,00	4.863,00
107,00	419X	5.261,00	24.300,00	870,60	4.862,00
104,50	418X	5.455,00	25.970,00	887,90	4.862,00
102,00	417X	5.635,00	27.670,00	903,60	4.862,00
99,50	416X	5.835,00	29.400,00	920,00	4.861,00
97,00	415X	6.021,00	31.160,00	934,70	4.861,00
94,50	414X	6.245,00	32.940,00	951,10	4.861,00
92,00	413X	6.435,00	34.750,00	964,90	4.861,00
89,50	412X	6.648,00	36.580,00	979,30	4.860,00
87,00	411X	6.845,00	38.420,00	992,10	4.860,00
84,50	410X	7.064,00	40.300,00	1.005,00	4.860,00
82,00	409X	7.266,00	42.190,00	1.017,00	4.859,00
79,50	408X	7.491,00	44.110,00	1.030,00	4.859,00
77,00	407X	7.698,00	46.200,00	1.041,00	4.859,00
74,50	406X	7.930,00	48.440,00	1.052,00	4.859,00
72,00	405X	8.189,00	50.790,00	1.066,00	4.858,00
69,50	404X	8.568,00	53.410,00	1.084,00	4.858,00
67,00	403X	8.873,00	56.060,00	1.097,00	4.858,00
64,50	402X	9.136,00	58.750,00	1.109,00	4.857,00
62,00	401X	9.748,00	61.490,00	1.129,00	4.857,00
59,50	400X	10.050,00	64.250,00	1.140,00	4.857,00

Maximallasten DLC 6.1b					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.249,00	12.670,00	932,50	95,28
127,00	427X	3.346,00	13.370,00	955,70	95,26
124,50	426X	3.525,00	14.510,00	995,90	95,23
122,00	425X	3.695,00	15.710,00	1.033,00	95,18
119,50	424X	3.871,00	16.950,00	1.070,00	95,12
117,00	423X	4.034,00	18.240,00	1.104,00	95,07
114,50	422X	4.216,00	19.560,00	1.139,00	95,02
112,00	421X	4.384,00	20.930,00	1.172,00	94,97
109,50	420X	4.572,00	22.320,00	1.205,00	94,94
107,00	419X	4.747,00	23.750,00	1.236,00	94,89
104,50	418X	4.941,00	25.200,00	1.268,00	94,88
102,00	417X	5.121,00	27.780,00	1.296,00	94,84
99,50	416X	5.321,00	31.040,00	1.326,00	94,80
97,00	415X	5.506,00	34.370,00	1.353,00	94,79
94,50	414X	5.730,00	37.780,00	1.383,00	94,77
92,00	413X	5.921,00	41.260,00	1.408,00	94,77
89,50	412X	6.134,00	44.800,00	1.434,00	94,75
87,00	411X	6.330,00	48.410,00	1.458,00	94,73
84,50	410X	6.549,00	52.080,00	1.482,00	94,71
82,00	409X	6.751,00	55.800,00	1.503,00	94,71
79,50	408X	6.976,00	59.580,00	1.525,00	94,69
77,00	407X	7.184,00	63.410,00	1.545,00	94,67
74,50	406X	7.415,00	67.290,00	1.565,00	94,63
72,00	405X	7.675,00	71.230,00	1.585,00	94,59
69,50	404X	8.053,00	75.210,00	1.610,00	94,55
67,00	403X	8.358,00	79.250,00	1.630,00	94,52
64,50	402X	8.621,00	83.340,00	1.647,00	94,49
62,00	401X	9.233,00	87.500,00	1.676,00	94,43
59,50	400X	9.534,00	91.700,00	1.692,00	94,36

Maximallasten DLC 6.1c					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.313,00	12.170,00	712,00	455,80
127,00	427X	3.410,00	12.710,00	729,40	455,80
124,50	426X	3.589,00	13.610,00	759,30	455,80
122,00	425X	3.759,00	14.550,00	786,70	455,70
119,50	424X	3.934,00	15.520,00	813,50	455,70
117,00	423X	4.097,00	16.540,00	838,70	455,70
114,50	422X	4.279,00	17.590,00	866,30	455,70
112,00	421X	4.448,00	18.660,00	891,60	455,70
109,50	420X	4.636,00	19.770,00	918,00	455,70
107,00	419X	4.810,00	20.910,00	942,20	455,70
104,50	418X	5.005,00	22.070,00	967,40	455,70
102,00	417X	5.184,00	23.260,00	990,40	455,70
99,50	416X	5.385,00	24.470,00	1.014,00	455,70
97,00	415X	5.570,00	25.710,00	1.036,00	455,70
94,50	414X	5.794,00	26.970,00	1.060,00	455,70
92,00	413X	5.985,00	28.770,00	1.081,00	455,70
89,50	412X	6.198,00	31.480,00	1.102,00	455,70
87,00	411X	6.394,00	34.250,00	1.121,00	455,70
84,50	410X	6.613,00	37.070,00	1.140,00	455,70
82,00	409X	6.815,00	39.930,00	1.158,00	455,70
79,50	408X	7.040,00	42.840,00	1.176,00	455,70
77,00	407X	7.248,00	45.800,00	1.192,00	455,60
74,50	406X	7.479,00	48.790,00	1.209,00	455,60
72,00	405X	7.739,00	51.830,00	1.226,00	455,60
69,50	404X	8.117,00	54.910,00	1.247,00	455,60
67,00	403X	8.422,00	58.040,00	1.263,00	455,60
64,50	402X	8.685,00	61.210,00	1.277,00	455,60
62,00	401X	9.297,00	64.440,00	1.302,00	455,50
59,50	400X	9.598,00	67.710,00	1.315,00	455,50

B.1.1.2 Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen)

		Maximum aller Lastfälle				Minimum aller Lastfälle			
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.837,00	17.820,00	1.130,00	10.060,00	2.803,00	2.805,00	0,01	-8.349,00
127,00	427X	3.935,00	18.130,00	1.132,00	10.060,00	2.901,00	2.473,00	0,02	-8.349,00
124,50	426X	4.114,00	19.110,00	1.137,00	10.060,00	3.080,00	2.509,00	0,01	-8.349,00
122,00	425X	4.283,00	20.100,00	1.140,00	10.060,00	3.249,00	1.866,00	0,02	-8.349,00
119,50	424X	4.459,00	21.090,00	1.144,00	10.060,00	3.425,00	766,60	0,01	-8.349,00
117,00	423X	4.622,00	22.090,00	1.148,00	10.060,00	3.588,00	43,56	0,02	-8.349,00
114,50	422X	4.804,00	23.090,00	1.152,00	10.060,00	3.770,00	17,11	0,02	-8.349,00
112,00	421X	4.973,00	24.100,00	1.172,00	10.060,00	3.939,00	9,84	0,01	-8.348,00
109,50	420X	5.161,00	25.300,00	1.205,00	10.060,00	4.127,00	39,68	0,01	-8.348,00
107,00	419X	5.335,00	27.340,00	1.236,00	10.060,00	4.301,00	12,81	0,03	-8.348,00
104,50	418X	5.530,00	29.400,00	1.268,00	10.060,00	4.495,00	16,50	0,02	-8.348,00
102,00	417X	5.709,00	31.500,00	1.296,00	10.060,00	4.675,00	4,86	0,01	-8.348,00
99,50	416X	5.910,00	33.630,00	1.326,00	10.060,00	4.876,00	7,48	0,00	-8.348,00
97,00	415X	6.095,00	35.790,00	1.353,00	10.060,00	5.061,00	1,26	0,01	-8.348,00
94,50	414X	6.319,00	37.980,00	1.383,00	10.060,00	5.285,00	6,61	0,02	-8.348,00
92,00	413X	6.510,00	41.260,00	1.408,00	10.060,00	5.476,00	1,03	0,02	-8.348,00
89,50	412X	6.723,00	44.800,00	1.434,00	10.060,00	5.689,00	2,97	0,02	-8.348,00
87,00	411X	6.919,00	48.410,00	1.458,00	10.060,00	5.885,00	1,52	0,02	-8.348,00
84,50	410X	7.138,00	52.080,00	1.482,00	10.060,00	6.104,00	2,39	0,01	-8.348,00
82,00	409X	7.340,00	55.800,00	1.503,00	10.060,00	6.306,00	1,04	0,01	-8.348,00
79,50	408X	7.565,00	59.580,00	1.525,00	10.060,00	6.531,00	3,38	0,03	-8.348,00
77,00	407X	7.773,00	63.410,00	1.545,00	10.060,00	6.739,00	1,83	0,01	-8.348,00
74,50	406X	8.004,00	67.290,00	1.565,00	10.060,00	6.970,00	2,62	0,03	-8.348,00
72,00	405X	8.264,00	71.230,00	1.585,00	10.060,00	7.230,00	0,80	0,02	-8.348,00
69,50	404X	8.642,00	75.210,00	1.610,00	10.060,00	7.608,00	0,76	0,03	-8.348,00
67,00	403X	8.947,00	79.250,00	1.630,00	10.060,00	7.913,00	4,27	0,04	-8.348,00
64,50	402X	9.210,00	83.340,00	1.647,00	10.060,00	8.176,00	2,07	0,03	-8.347,00
62,00	401X	9.822,00	87.500,00	1.676,00	10.060,00	8.788,00	0,53	0,03	-8.347,00
59,50	400X	10.120,00	91.700,00	1.692,00	10.060,00	9.089,00	1,62	0,03	-8.347,00

B.1.1.3 Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Power Production Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen)

		Maximum der Power Production Lastfälle				Minimum der Power Production Lastfälle			
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.837,00	17.820,00	1.130,00	10.060,00	2.990,00	2.805,00	0,01	-8.349,00
127,00	427X	3.935,00	18.130,00	1.132,00	10.060,00	3.087,00	2.473,00	0,06	-8.349,00
124,50	426X	4.114,00	19.110,00	1.137,00	10.060,00	3.266,00	2.869,00	0,01	-8.349,00
122,00	425X	4.283,00	20.100,00	1.140,00	10.060,00	3.436,00	2.590,00	0,02	-8.349,00
119,50	424X	4.459,00	21.090,00	1.144,00	10.060,00	3.612,00	2.063,00	0,04	-8.349,00
117,00	423X	4.622,00	22.090,00	1.148,00	10.060,00	3.774,00	1.782,00	0,07	-8.349,00
114,50	422X	4.804,00	23.090,00	1.152,00	10.060,00	3.957,00	1.512,00	0,03	-8.349,00
112,00	421X	4.973,00	24.100,00	1.155,00	10.060,00	4.125,00	1.108,00	0,04	-8.348,00
109,50	420X	5.161,00	25.300,00	1.157,00	10.060,00	4.313,00	284,80	0,01	-8.348,00
107,00	419X	5.335,00	27.340,00	1.160,00	10.060,00	4.487,00	12,81	0,03	-8.348,00
104,50	418X	5.530,00	29.400,00	1.163,00	10.060,00	4.682,00	16,50	0,02	-8.348,00
102,00	417X	5.709,00	31.500,00	1.166,00	10.060,00	4.862,00	9,58	0,02	-8.348,00
99,50	416X	5.910,00	33.630,00	1.169,00	10.060,00	5.062,00	9,13	0,00	-8.348,00
97,00	415X	6.095,00	35.790,00	1.171,00	10.060,00	5.247,00	9,77	0,04	-8.348,00
94,50	414X	6.319,00	37.980,00	1.174,00	10.060,00	5.471,00	7,18	0,02	-8.348,00
92,00	413X	6.510,00	40.210,00	1.177,00	10.060,00	5.662,00	6,53	0,02	-8.348,00
89,50	412X	6.723,00	42.460,00	1.181,00	10.060,00	5.875,00	4,26	0,02	-8.348,00
87,00	411X	6.919,00	44.730,00	1.186,00	10.060,00	6.071,00	1,66	0,03	-8.348,00
84,50	410X	7.138,00	47.030,00	1.190,00	10.060,00	6.290,00	2,39	0,02	-8.348,00
82,00	409X	7.340,00	49.940,00	1.194,00	10.060,00	6.492,00	1,09	0,02	-8.348,00
79,50	408X	7.565,00	52.880,00	1.198,00	10.060,00	6.718,00	6,05	0,03	-8.348,00
77,00	407X	7.773,00	55.830,00	1.201,00	10.060,00	6.925,00	6,86	0,06	-8.348,00
74,50	406X	8.004,00	58.780,00	1.204,00	10.060,00	7.156,00	2,62	0,04	-8.348,00
72,00	405X	8.264,00	61.740,00	1.208,00	10.060,00	7.416,00	6,39	0,02	-8.348,00
69,50	404X	8.642,00	64.700,00	1.213,00	10.060,00	7.795,00	0,76	0,03	-8.348,00
67,00	403X	8.947,00	67.660,00	1.216,00	10.060,00	8.099,00	4,27	0,04	-8.348,00
64,50	402X	9.210,00	70.620,00	1.218,00	10.060,00	8.363,00	2,08	0,07	-8.347,00
62,00	401X	9.822,00	73.620,00	1.224,00	10.060,00	8.974,00	1,49	0,03	-8.347,00
59,50	400X	10.120,00	76.670,00	1.226,00	10.060,00	9.275,00	4,08	0,04	-8.347,00

B.1.1.4 Sonstige Schnittgrößen: $M_{LDD99\%}$, M_{temp}, M_{imp} (charakteristische Schnittgrößen)

		LDD 99%	Mtemp	Mimp
Höhenkote [m]	Sensor	Myz [kNm]	Myz [kNm]	Myz [kNm]
128,57	428X	10.990,00	0,00	0,00
127,00	427X	10.850,00	26,81	115,53
124,50	426X	10.780,00	54,56	305,44
122,00	425X	10.725,00	87,73	507,08
119,50	424X	10.725,00	122,72	719,77
117,00	423X	10.725,00	156,13	943,99
114,50	422X	10.710,00	191,13	1.178,88
112,00	421X	10.716,00	224,21	1.425,68
109,50	420X	10.854,00	258,78	1.683,54
107,00	419X	11.430,00	291,09	1.953,72
104,50	418X	12.740,00	324,76	2.235,28
102,00	417X	14.440,00	355,83	2.529,54
99,50	416X	16.218,00	388,14	2.835,59
97,00	415X	17.880,00	417,51	3.154,80
94,50	414X	19.584,00	447,99	3.486,12
92,00	413X	21.406,00	475,28	3.832,10
89,50	412X	23.100,00	503,55	4.190,58
87,00	411X	24.955,00	528,16	4.563,01
84,50	410X	28.728,00	553,62	4.948,27
82,00	409X	40.363,00	575,06	5.347,87
79,50	408X	42.624,00	597,22	5.760,69
77,00	407X	45.248,00	615,01	6.188,24
74,50	406X	47.712,00	633,37	6.629,41
72,00	405X	50.398,00	646,99	7.085,70
69,50	404X	52.640,00	661,13	7.559,01
67,00	403X	54.880,00	670,31	8.057,07
64,50	402X	57.375,00	679,86	8.575,09
62,00	401X	59.890,00	683,76	9.110,33
59,50	400X	62.700,00	687,95	9.685,63

B.1.2 Dimensionierung der Vorspannkraft

B.1.2.1 Nachweis der Dekompression

Höhenkote	Radius	Wandstärke						Moment aus LDD 99%				Moment aus Powerproduction				
	rm	b	W	A	N_{min}	M_{imp}	M_{temp}	$M_{LDD99\%}$	ΔM_{theo2}	$N_{p\infty}$	M_{ed}	M_{PP}	ΔM_{theo2}	$N_{p\infty}$	M_{ed}	σ_x
[m]	[m]	[m]	[m³]	[m²]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[MPa]
	128,57	1,90	0,20	2,17	2,39	2.803,00	0,00	0,00	10.990,00	0,00	10.000,00	10.990,00	-0,28	17.820,00	0,00	22.000,00	17.820,00	-2,15
	127,00	1,93	0,20	2,22	2,42	2.901,00	115,53	26,81	10.850,00	25,81	10.000,00	11.018,15	-0,37	18.130,00	42,81	22.000,00	18.315,15	-2,04
	124,50	1,96	0,20	2,31	2,47	3.080,00	305,44	54,56	10.780,00	67,65	10.000,00	11.207,65	-0,45	19.110,00	112,18	22.000,00	19.582,19	-1,68
	122,00	2,00	0,20	2,39	2,51	3.249,00	507,08	87,73	10.725,00	111,29	10.000,00	11.431,10	-0,50	20.100,00	184,48	22.000,00	20.879,28	-1,34
	119,50	2,03	0,20	2,48	2,56	3.425,00	719,77	122,72	10.725,00	156,56	10.000,00	11.724,05	-0,53	21.090,00	259,34	22.000,00	22.191,83	-1,01
	117,00	2,07	0,20	2,57	2,60	3.588,00	943,99	156,13	10.725,00	203,47	10.000,00	12.028,59	-0,55	22.090,00	336,74	22.000,00	23.526,85	-0,70
	114,50	2,11	0,20	2,67	2,65	3.770,00	1.178,88	191,13	10.710,00	251,82	10.000,00	12.331,83	-0,58	23.090,00	416,26	22.000,00	24.876,26	-0,41
	112,00	2,14	0,20	2,76	2,69	3.939,00	1.425,68	224,21	10.716,00	301,78	10.000,00	12.667,67	-0,59	24.100,00	498,11	22.000,00	26.248,00	-0,13
	109,50	2,18	0,20	2,86	2,74	4.127,00	1.683,54	258,78	10.854,00	353,15	20.000,00	13.149,47	-4,21	25.300,00	581,91	36.000,00	27.824,24	-4,92
	107,00	2,21	0,20	2,95	2,78	4.301,00	1.953,72	291,09	11.430,00	406,06	20.000,00	14.080,87	-3,97	27.340,00	667,83	36.000,00	30.252,63	-4,24
	104,50	2,25	0,20	3,05	2,83	4.495,00	2.235,28	324,76	12.740,00	460,28	20.000,00	15.760,32	-3,50	29.400,00	755,42	36.000,00	32.715,45	-3,60
	102,00	2,29	0,20	3,15	2,87	4.675,00	2.529,54	355,83	14.440,00	515,89	20.000,00	17.841,26	-2,93	31.500,00	844,78	36.000,00	35.230,15	-2,98
	99,50	2,32	0,20	3,26	2,92	4.876,00	2.835,59	388,14	16.218,00	572,59	20.000,00	20.014,32	-2,38	33.630,00	935,47	36.000,00	37.789,21	-2,40
	97,00	2,36	0,20	3,36	2,96	5.061,00	3.154,80	417,51	17.880,00	630,42	20.000,00	22.082,73	-1,88	35.790,00	1.027,59	36.000,00	40.389,90	-1,83
	94,50	2,39	0,20	3,47	3,01	5.285,00	3.486,12	447,99	19.584,00	689,06	20.000,00	24.207,17	-1,42	37.980,00	1.120,68	36.000,00	43.034,79	-1,30
	92,00	2,43	0,20	3,57	3,05	5.476,00	3.832,10	475,28	21.406,00	748,73	20.000,00	26.462,10	-0,93	40.210,00	1.215,09	36.000,00	45.732,46	-0,78
	89,50	2,47	0,20	3,68	3,10	5.689,00	4.190,58	503,55	23.100,00	808,92	20.000,00	28.603,05	-0,52	42.460,00	1.310,08	36.000,00	48.464,21	-0,28
	87,00	2,50	0,20	3,79	3,15	5.885,00	4.563,01	528,16	24.955,00	869,62	20.000,00	30.915,79	-0,08	44.730,00	1.405,69	36.000,00	51.226,86	0,20
	84,50	2,54	0,20	3,90	3,19	6.104,00	4.948,27	553,62	28.728,00	930,47	45.000,00	35.160,36	-7,01	47.030,00	1.501,46	55.000,00	54.033,35	-5,31
	82,00	2,58	0,20	4,02	3,24	6.306,00	5.347,87	575,06	40.363,00	991,36	45.000,00	47.277,29	-4,09	49.940,00	1.597,41	55.000,00	57.460,35	-4,64
	79,50	2,61	0,20	4,13	3,28	6.531,00	5.760,69	597,22	42.624,00	1.051,72	45.000,00	50.033,63	-3,60	52.880,00	1.693,10	55.000,00	60.931,01	-4,01
	77,00	2,65	0,20	4,25	3,33	6.739,00	6.188,24	615,01	45.248,00	1.111,20	45.000,00	53.162,46	-3,04	55.830,00	1.788,45	55.000,00	64.421,70	-3,40
	74,50	2,68	0,20	4,37	3,37	6.970,00	6.629,41	633,37	47.712,00	1.169,46	45.000,00	56.144,24	-2,56	58.780,00	1.883,05	55.000,00	67.925,82	-2,83
	72,00	2,72	0,20	4,49	3,42	7.230,00	7.085,70	646,99	50.398,00	1.226,32	45.000,00	59.357,01	-2,06	61.740,00	1.976,78	55.000,00	71.449,47	-2,29
	69,50	2,76	0,20	4,61	3,46	7.608,00	7.559,01	661,13	52.640,00	1.281,86	45.000,00	62.142,00	-1,71	64.700,00	2.069,85	55.000,00	74.989,99	-1,81
	67,00	2,79	0,20	4,73	3,51	7.913,00	8.057,07	670,31	54.880,00	1.336,52	45.000,00	64.943,89	-1,36	67.660,00	2.163,23	55.000,00	78.550,60	-1,34
	64,50	2,83	0,20	4,86	3,55	8.176,00	8.575,09	679,86	57.375,00	1.389,54	45.000,00	68.019,49	-0,97	70.620,00	2.255,72	55.000,00	82.130,67	-0,88
	62,00	2,86	0,20	4,99	3,60	8.788,00	9.110,33	683,76	59.890,00	1.440,21	45.000,00	71.124,30	-0,68	73.620,00	2.346,32	55.000,00	85.760,41	-0,52
	59,50	2,90	0,20	5,11	3,64	9.089,00	9.685,63	687,95	62.700,00	1.490,36	45.000,00	74.563,94	-0,26	76.670,00	2.438,51	55.000,00	89.482,10	-0,09

B.1.2.2 Begrenzung der Klaffung der Fuge

Höhenkote	Radius	Wandstärke																							
			Teilsicherheitsbeiwert->			1,35	1,00	1,00	maximale Momenteneinwirkung und minimale Normalkraft aller Lastfälle							1,35	1,00	1,00	maximale Momenteneinwirkung und maximale Normalkraft aller Lastfälle					
	rm	b	W	A	M_{max}	M_{imp}	M_{temp}		N_{min}	$N_{p,c}$	ΔM_{theo2}	M_{ed}	Klaffung	Randspannung		N_{max}	$N_{p,c}$	ΔM_{theo2}	M_{ed}	Klaffung	Randspannung			
[m]	[m]	[m]	[m³]	[m²]	[kNm]	[kNm]	[kNm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[rad]	[MPa]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[rad]	[MPa]			
	128,57	1,90	0,20	2,17	2,39	17.820,00	0,00	0,00	2.803,00	31.000,00	0,00	24.057,00	0,00	25,12		3.837,00	27.000,00	0,00	24.057,00	0,00	24,55			
	127,00	1,93	0,20	2,22	2,42	18.130,00	115,53	26,81	2.901,00	31.000,00	129,70	24.747,54	0,00	25,03		3.935,00	27.000,00	185,27	24.803,12	0,00	24,54			
	124,50	1,96	0,20	2,31	2,47	19.110,00	305,44	54,56	3.080,00	31.000,00	340,77	26.499,27	0,00	25,19		4.114,00	27.000,00	484,16	26.642,67	0,00	24,81			
	122,00	2,00	0,20	2,39	2,51	20.100,00	507,08	87,73	3.249,00	31.000,00	561,99	28.291,80	0,00	25,33		4.283,00	27.000,00	792,76	28.522,57	0,00	25,06			
	119,50	2,03	0,20	2,48	2,56	21.090,00	719,77	122,72	3.425,00	31.000,00	792,40	30.106,39	0,00	25,46		4.459,00	27.000,00	1.110,09	30.424,08	0,00	25,28			
	117,00	2,07	0,20	2,57	2,60	22.090,00	943,99	156,13	3.588,00	31.000,00	1.032,04	31.953,65	0,00	25,57		4.622,00	27.000,00	1.435,98	32.357,59	0,00	25,49			
	114,50	2,11	0,20	2,67	2,65	23.090,00	1.178,88	191,13	3.770,00	31.000,00	1.279,77	33.821,28	0,00	25,68		4.804,00	27.000,00	1.768,31	34.309,82	0,57	36,00			
	112,00	2,14	0,20	2,76	2,69	24.100,00	1.425,68	224,21	3.939,00	31.000,00	1.536,46	35.721,35	0,00	25,77		4.973,00	27.000,00	2.107,00	36.291,89	0,00	25,86			
	109,50	2,18	0,20	2,86	2,74	25.300,00	1.683,54	258,78	4.127,00	42.000,00	1.800,98	37.898,30	0,00	29,97		5.161,00	40.000,00	2.451,65	38.548,97	0,00	30,86			
	107,00	2,21	0,20	2,95	2,78	27.340,00	1.953,72	291,09	4.301,00	42.000,00	2.074,10	41.227,91	0,00	30,44		5.335,00	40.000,00	2.803,94	41.957,74	0,00	31,39			
	104,50	2,25	0,20	3,05	2,83	29.400,00	2.235,28	324,76	4.495,00	42.000,00	2.354,58	44.604,62	0,00	30,89		5.530,00	40.000,00	3.162,77	45.412,81	0,00	31,90			
	102,00	2,29	0,20	3,15	2,87	31.500,00	2.529,54	355,83	4.675,00	42.000,00	2.643,06	48.053,43	0,00	31,32		5.709,00	40.000,00	3.528,80	48.939,17	0,00	32,38			
	99,50	2,32	0,20	3,26	2,92	33.630,00	2.835,59	388,14	4.876,00	42.000,00	2.938,31	51.562,54	0,00	31,73		5.910,00	40.000,00	3.900,63	52.524,86	0,00	32,84			
	97,00	2,36	0,20	3,36	2,96	35.790,00	3.154,80	417,51	5.061,00	42.000,00	3.240,69	55.129,50	0,00	32,12		6.095,00	40.000,00	4.278,54	56.167,35	0,00	33,28			
	94,50	2,39	0,20	3,47	3,01	37.980,00	3.486,12	447,99	5.285,00	42.000,00	3.547,35	58.754,46	0,72	48,49		6.319,00	40.000,00	4.659,27	59.866,38	0,74	50,84			
	92,00	2,43	0,20	3,57	3,05	41.260,00	3.832,10	475,28	5.476,00	42.000,00	3.857,69	63.866,07	0,00	33,24		6.510,00	40.000,00	5.041,60	65.049,97	0,00	34,49			
	89,50	2,47	0,20	3,68	3,10	44.800,00	4.190,58	503,55	5.689,00	42.000,00	4.166,76	69.340,89	1,15	62,24		6.723,00	40.000,00	5.420,01	70.594,14	1,15	64,98			
	87,00	2,50	0,20	3,79	3,15	48.410,00	4.563,01	528,16	5.885,00	42.000,00	4.472,66	74.917,33	0,00	34,80		6.919,00	40.000,00	5.792,16	76.236,83	0,00	36,12			
	84,50	2,54	0,20	3,90	3,19	52.080,00	4.948,27	553,62	6.104,00	75.000,00	4.777,27	80.587,16	0,00	45,87		7.138,00	74.000,00	6.160,72	81.970,61	0,00	47,55			
	82,00	2,58	0,20	4,02	3,24	55.800,00	5.347,87	575,06	6.306,00	75.000,00	5.084,53	86.337,47	0,00	46,42		7.340,00	74.000,00	6.530,45	87.783,38	0,00	48,13			
	79,50	2,61	0,20	4,13	3,28	59.580,00	5.760,69	597,22	6.531,00	75.000,00	5.393,88	92.184,79	0,00	46,95		7.565,00	74.000,00	6.900,91	93.691,82	0,00	48,69			
	77,00	2,65	0,20	4,25	3,33	63.410,00	6.188,24	615,01	6.739,00	75.000,00	5.705,37	98.112,12	0,00	47,45		7.773,00	74.000,00	7.272,11	99.678,86	0,00	49,22			
	74,50	2,68	0,20	4,37	3,37	67.290,00	6.629,41	633,37	6.970,00	75.000,00	6.017,76	104.122,03	0,00	47,94		8.004,00	74.000,00	7.642,77	105.747,05	0,00	49,72			
	72,00	2,72	0,20	4,49	3,42	71.230,00	7.085,70	646,99	7.230,00	75.000,00	6.330,51	110.223,71	0,00	48,41		8.264,00	74.000,00	8.012,23	111.905,42	0,00	50,22			
	69,50	2,76	0,20	4,61	3,46	75.210,00	7.559,01	661,13	7.608,00	75.000,00	6.641,82	116.395,46	0,67	71,72		8.642,00	74.000,00	8.378,39	118.132,03	0,65	73,89			
	67,00	2,79	0,20	4,73	3,51	79.250,00	8.057,07	670,31	7.913,00	75.000,00	6.951,86	122.666,74	0,00	49,32		8.947,00	74.000,00	8.741,11	124.455,98	0,00	51,21			
	64,50	2,83	0,20	4,86	3,55	83.340,00	8.575,09	679,86	8.176,00	75.000,00	7.254,74	129.018,69	0,89	80,21		9.210,00	74.000,00	9.094,39	130.858,33	0,84	81,98			
	62,00	2,86	0,20	4,99	3,60	87.500,00	9.110,33	683,76	8.788,00	75.000,00	7.544,78	135.463,86	0,00	50,21		9.822,00	74.000,00	9.432,40	137.351,49	0,00	52,19			
	59,50	2,90	0,20	5,11	3,64	91.700,00	9.685,63	687,95	9.089,00	75.000,00	7.830,11	141.998,69	1,10	90,53		10.120,00	74.000,00	9.764,03	143.932,62	1,03	91,25			

Druckspannungen positiv angegeben

Druckspannungen positiv angegeben

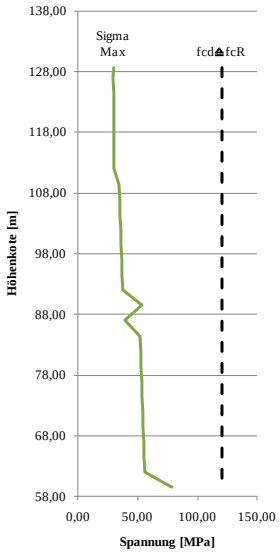
B.1.2.3 Anzahl der Spannglieder

Höhenkote	SLS						ULS						Anzahl der Spannbänder mit	
			Aus LDD 99%		Aus PowerProduction				Aus Nmin		Aus Nmax			
[m]	r_{inf}	Verlust Vorspannung	$N_{p\infty}$ [kN]	N_{p0} [kN]	$N_{p\infty}$ [kN]	N_{p0} [kN]	r_{inf}	Verlust Vorspannung	$N_{p\infty}$ [kN]	N_{p0} [kN]	$N_{p\infty}$ [kN]	N_{p0} [kN]	$P_{m0,max}$=	3523 kN je Spannband
128,57	0,95	12,50%	10.000,00	12.030,08	22.000,00	26.466,17	1	12,50%	31.000,00	35.428,57	27.000,00	30.857,14		11
127,00	0,95	12,50%	10.000,00	12.030,08	22.000,00	26.466,17	1	12,50%	31.000,00	35.428,57	27.000,00	30.857,14		11
124,50	0,95	12,50%	10.000,00	12.030,08	22.000,00	26.466,17	1	12,50%	31.000,00	35.428,57	27.000,00	30.857,14		11
122,00	0,95	12,50%	10.000,00	12.030,08	22.000,00	26.466,17	1	12,50%	31.000,00	35.428,57	27.000,00	30.857,14		11
119,50	0,95	12,50%	10.000,00	12.030,08	22.000,00	26.466,17	1	12,50%	31.000,00	35.428,57	27.000,00	30.857,14		11
117,00	0,95	12,50%	10.000,00	12.030,08	22.000,00	26.466,17	1	12,50%	31.000,00	35.428,57	27.000,00	30.857,14		11
114,50	0,95	12,50%	10.000,00	12.030,08	22.000,00	26.466,17	1	12,50%	31.000,00	35.428,57	27.000,00	30.857,14		11
112,00	0,95	12,50%	10.000,00	12.030,08	22.000,00	26.466,17	1	12,50%	31.000,00	35.428,57	27.000,00	30.857,14		11
109,50	0,95	12,50%	20.000,00	24.060,15	36.000,00	43.308,27	1	12,50%	42.000,00	48.000,00	40.000,00	45.714,29		14
107,00	0,95	12,50%	20.000,00	24.060,15	36.000,00	43.308,27	1	12,50%	42.000,00	48.000,00	40.000,00	45.714,29		14
104,50	0,95	12,50%	20.000,00	24.060,15	36.000,00	43.308,27	1	12,50%	42.000,00	48.000,00	40.000,00	45.714,29		14
102,00	0,95	12,50%	20.000,00	24.060,15	36.000,00	43.308,27	1	12,50%	42.000,00	48.000,00	40.000,00	45.714,29		14
99,50	0,95	12,50%	20.000,00	24.060,15	36.000,00	43.308,27	1	12,50%	42.000,00	48.000,00	40.000,00	45.714,29		14
97,00	0,95	12,50%	20.000,00	24.060,15	36.000,00	43.308,27	1	12,50%	42.000,00	48.000,00	40.000,00	45.714,29		14
94,50	0,95	12,50%	20.000,00	24.060,15	36.000,00	43.308,27	1	12,50%	42.000,00	48.000,00	40.000,00	45.714,29		14
92,00	0,95	12,50%	20.000,00	24.060,15	36.000,00	43.308,27	1	12,50%	42.000,00	48.000,00	40.000,00	45.714,29		14
89,50	0,95	12,50%	20.000,00	24.060,15	36.000,00	43.308,27	1	12,50%	42.000,00	48.000,00	40.000,00	45.714,29		14
87,00	0,95	12,50%	20.000,00	24.060,15	36.000,00	43.308,27	1	12,50%	42.000,00	48.000,00	40.000,00	45.714,29		14
84,50	0,95	12,50%	45.000,00	54.135,34	55.000,00	66.165,41	1	12,50%	75.000,00	85.714,29	74.000,00	84.571,43		25
82,00	0,95	12,50%	45.000,00	54.135,34	55.000,00	66.165,41	1	12,50%	75.000,00	85.714,29	74.000,00	84.571,43		25
79,50	0,95	12,50%	45.000,00	54.135,34	55.000,00	66.165,41	1	12,50%	75.000,00	85.714,29	74.000,00	84.571,43		25
77,00	0,95	12,50%	45.000,00	54.135,34	55.000,00	66.165,41	1	12,50%	75.000,00	85.714,29	74.000,00	84.571,43		25
74,50	0,95	12,50%	45.000,00	54.135,34	55.000,00	66.165,41	1	12,50%	75.000,00	85.714,29	74.000,00	84.571,43		25
72,00	0,95	12,50%	45.000,00	54.135,34	55.000,00	66.165,41	1	12,50%	75.000,00	85.714,29	74.000,00	84.571,43		25
69,50	0,95	12,50%	45.000,00	54.135,34	55.000,00	66.165,41	1	12,50%	75.000,00	85.714,29	74.000,00	84.571,43		25
67,00	0,95	12,50%	45.000,00	54.135,34	55.000,00	66.165,41	1	12,50%	75.000,00	85.714,29	74.000,00	84.571,43		25
64,50	0,95	12,50%	45.000,00	54.135,34	55.000,00	66.165,41	1	12,50%	75.000,00	85.714,29	74.000,00	84.571,43		25
62,00	0,95	12,50%	45.000,00	54.135,34	55.000,00	66.165,41	1	12,50%	75.000,00	85.714,29	74.000,00	84.571,43		25
59,50	0,95	12,50%	45.000,00	54.135,34	55.000,00	66.165,41	1	12,50%	75.000,00	85.714,29	74.000,00	84.571,43		25

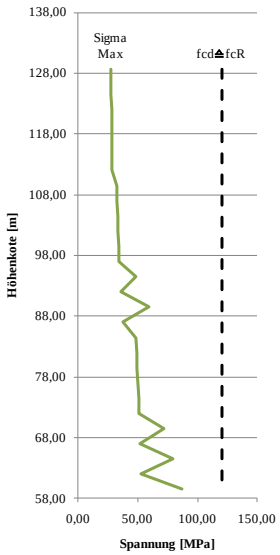
maßgebend

B.1.3 Nachweise

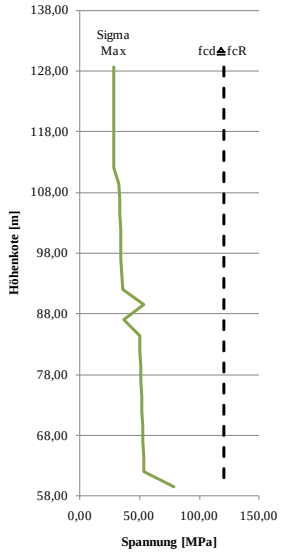
B.1.3.1 Normalspannungsnachweis (ULS)



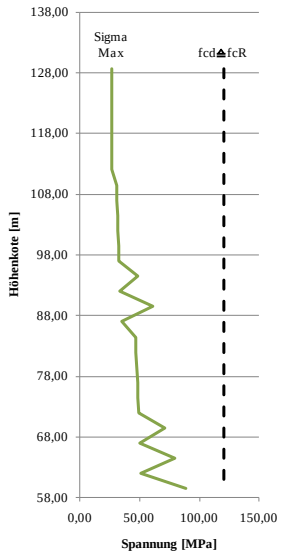
mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P0}$
M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle
$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle



mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P\infty}$
M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle
$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

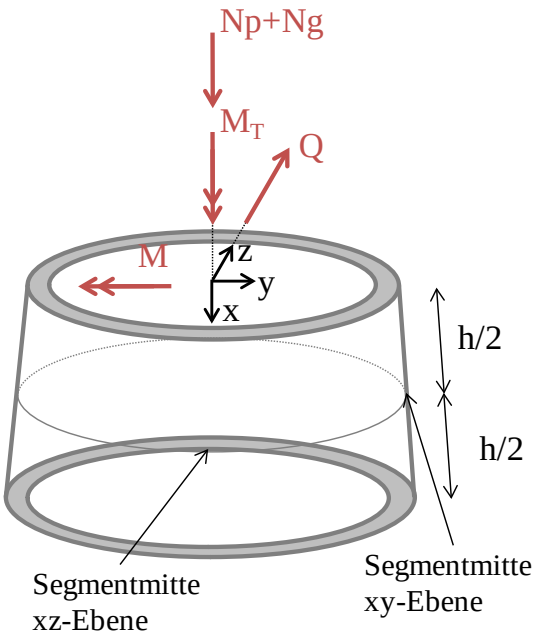


mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P0}$
M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle
$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle



mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P\infty}$
M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle
$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

B.1.3.2 Schubspannungsnachweis (ULS)



Maximalwert aus alle DLCs — ULS

UHFFB-Turm Höhenkote [m]	Querkraft V_k [kN]	Querkraft V_{ed} 1,35	Torsion M_k [kNm]	Torsion M_{ed} 1,35	$\tau_{Torsion}$ [kN/m²]	+	$\tau_{Querkraft}$ [kN/m²]	=	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]
128,57	1.130,00	1.525,50	10.060,00	13.581,00					
127,00	1.132,00	1.528,20	10.060,00	13.581,00	2.914,31	+	1.263,01	=	4.177,32
124,50	1.137,00	1.534,95	10.060,00	13.581,00					
122,00	1.140,00	1.539,00	10.060,00	13.581,00	2.707,57	+	1.225,99	=	3.933,56
119,50	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00					
117,00	1.148,00	1.549,80	10.060,00	13.581,00	2.522,07	+	1.191,55	=	3.713,62
114,50	1.152,00	1.555,20	10.060,00	13.581,00					
112,00	1.172,00	1.582,20	10.060,00	13.581,00	2.355,00	+	1.175,48	=	3.530,49
109,50	1.205,00	1.626,75	10.060,00	13.581,00					
107,00	1.236,00	1.668,60	10.060,00	13.581,00	2.204,00	+	1.199,27	=	3.403,27
104,50	1.268,00	1.711,80	10.060,00	13.581,00					
102,00	1.296,00	1.749,60	10.060,00	13.581,00	2.067,07	+	1.217,80	=	3.284,87
99,50	1.326,00	1.790,10	10.060,00	13.581,00					
97,00	1.353,00	1.826,55	10.060,00	13.581,00	1.942,52	+	1.232,46	=	3.174,98
94,50	1.383,00	1.867,05	10.060,00	13.581,00					
92,00	1.408,00	1.900,80	10.060,00	13.581,00	1.828,89	+	1.244,48	=	3.073,37
89,50	1.434,00	1.935,90	10.060,00	13.581,00					
87,00	1.458,00	1.968,30	10.060,00	13.581,00	1.724,95	+	1.251,52	=	2.976,47
84,50	1.482,00	2.000,70	10.060,00	13.581,00					
82,00	1.503,00	2.029,05	10.060,00	13.581,00	1.629,62	+	1.253,99	=	2.883,61
79,50	1.525,00	2.058,75	10.060,00	13.581,00					
77,00	1.545,00	2.085,75	10.060,00	13.581,00	1.541,98	+	1.253,90	=	2.795,88
74,50	1.565,00	2.112,75	10.060,00	13.581,00					
72,00	1.585,00	2.139,75	10.060,00	13.581,00	1.461,23	+	1.252,22	=	2.713,45
69,50	1.610,00	2.173,50	10.060,00	13.581,00					
67,00	1.630,00	2.200,50	10.060,00	13.581,00	1.386,66	+	1.254,49	=	2.641,14
64,50	1.647,00	2.223,45	10.060,00	13.581,00					
62,00	1.676,00	2.262,60	10.060,00	13.581,00	1.317,65	+	1.257,38	=	2.575,04
59,50	1.692,00	2.284,20	10.060,00	13.581,00					

Segmentmitte x-y-Ebene σ= N/A

σx [kN/m²]	σy [kN/m²]	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]	DRUCK positiv ZUG negativ σ1 [Mpa]	σ2 [Mpa]	
17.640,18	0,00	4.177,32	18,58	-0,94	
17.141,58	0,00	3.933,56	18,00	-0,86	
16.674,29	0,00	3.713,62	17,46	-0,79	
16.242,94	0,00	3.530,49	16,98	-0,73	
19.641,78	0,00	3.403,27	20,21	-0,57	
19.152,00	0,00	3.284,87	19,70	-0,55	
18.696,25	0,00	3.174,98	19,22	-0,52	
18.277,04	0,00	3.073,37	18,78	-0,50	
17.880,11	0,00	2.976,47	18,36	-0,48	
29.484,19	0,00	2.883,61	29,76	-0,28	
28.810,59	0,00	2.795,88	29,08	-0,27	
28.189,72	0,00	2.713,45	28,45	-0,26	
27.655,68	0,00	2.641,14	27,91	-0,25	
27.201,90	0,00	2.575,04	27,44	-0,24	

Segmentmitte x-z-Ebene σ = M/W +N/A

σx [kN/m²]	σy [kN/m²]	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]	DRUCK positiv ZUG negativ σ1 [Mpa]	σ2 [Mpa]	
7.030,50	0,00	2.914,31	8,08	-1,05	
5.788,94	0,00	2.707,57	6,86	-1,07	
4.669,71	0,00	2.522,07	5,77	-1,10	
3.672,01	0,00	2.355,00	4,82	-1,15	
6.024,95	0,00	2.204,00	6,75	-0,72	
4.237,77	0,00	2.067,07	5,08	-0,84	
2.603,82	0,00	1.942,52	3,64	-1,04	
716,95	0,00	1.828,89	2,22	-1,51	
-1.559,54	0,00	1.724,95	1,11	-2,67	
8.317,39	0,00	1.629,62	8,63	-0,31	
6.058,53	0,00	1.541,98	6,43	-0,37	
3.987,98	0,00	1.461,23	4,47	-0,48	
2.137,97	0,00	1.386,66	2,82	-0,68	
480,15	0,00	1.317,65	1,58	-1,10	

mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P0}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

UHFFB-Turm

Höhenkote	Querkraft	Querkraft	Torsion	Torsion					
	Maximalwert aus alle DLCs		ULS						
	V_k	V_{ed}	M_k	M_{ed}	$\tau_{Torsion}$	+	$\tau_{Querkraft}$	=	$\tau_{max,Ed}$
[m]	[kN]	1,35	[kNm]	1,35	[kN/m²]		[kN/m²]		[kN/m²]
128,57	1.130,00	1.525,50	10.060,00	13.581,00					
127,00	1.132,00	1.528,20	10.060,00	13.581,00	2.914,31	+	1.263,01	=	4.177,32
124,50	1.137,00	1.534,95	10.060,00	13.581,00					
122,00	1.140,00	1.539,00	10.060,00	13.581,00	2.707,57	+	1.225,99	=	3.933,56
119,50	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00					
117,00	1.148,00	1.549,80	10.060,00	13.581,00	2.522,07	+	1.191,55	=	3.713,62
114,50	1.152,00	1.555,20	10.060,00	13.581,00					
112,00	1.172,00	1.582,20	10.060,00	13.581,00	2.355,00	+	1.175,48	=	3.530,49
109,50	1.205,00	1.626,75	10.060,00	13.581,00					
107,00	1.236,00	1.668,60	10.060,00	13.581,00	2.204,00	+	1.199,27	=	3.403,27
104,50	1.268,00	1.711,80	10.060,00	13.581,00					
102,00	1.296,00	1.749,60	10.060,00	13.581,00	2.067,07	+	1.217,80	=	3.284,87
99,50	1.326,00	1.790,10	10.060,00	13.581,00					
97,00	1.353,00	1.826,55	10.060,00	13.581,00	1.942,52	+	1.232,46	=	3.174,98
94,50	1.383,00	1.867,05	10.060,00	13.581,00					
92,00	1.408,00	1.900,80	10.060,00	13.581,00	1.828,89	+	1.244,48	=	3.073,37
89,50	1.434,00	1.935,90	10.060,00	13.581,00					
87,00	1.458,00	1.968,30	10.060,00	13.581,00	1.724,95	+	1.251,52	=	2.976,47
84,50	1.482,00	2.000,70	10.060,00	13.581,00					
82,00	1.503,00	2.029,05	10.060,00	13.581,00	1.629,62	+	1.253,99	=	2.883,61
79,50	1.525,00	2.058,75	10.060,00	13.581,00					
77,00	1.545,00	2.085,75	10.060,00	13.581,00	1.541,98	+	1.253,90	=	2.795,88
74,50	1.565,00	2.112,75	10.060,00	13.581,00					
72,00	1.585,00	2.139,75	10.060,00	13.581,00	1.461,23	+	1.252,22	=	2.713,45
69,50	1.610,00	2.173,50	10.060,00	13.581,00					
67,00	1.630,00	2.200,50	10.060,00	13.581,00	1.386,66	+	1.254,49	=	2.641,14
64,50	1.647,00	2.223,45	10.060,00	13.581,00					
62,00	1.676,00	2.262,60	10.060,00	13.581,00	1.317,65	+	1.257,38	=	2.575,04
59,50	1.692,00	2.284,20	10.060,00	13.581,00					

Höhenkote	Segmentmitte x-y-Ebene σ= N/A				
				DRUCK posit ZUG negativ	
	σx	σy	$\tau_{max,Ed}$	σ1	σ2
[m]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[Mpa]	[Mpa]
127,00	15.638,42	0,00	4.177,32	16,68	-1,05
122,00	15.212,13	0,00	3.933,56	16,17	-0,96
117,00	14.812,11	0,00	3.713,62	15,69	-0,88
112,00	14.443,49	0,00	3.530,49	15,26	-0,82
107,00	17.426,21	0,00	3.403,27	18,07	-0,64
102,00	17.006,36	0,00	3.284,87	17,62	-0,61
97,00	16.616,25	0,00	3.174,98	17,20	-0,59
92,00	16.258,80	0,00	3.073,37	16,82	-0,56
87,00	15.920,05	0,00	2.976,47	16,46	-0,54
82,00	26.082,18	0,00	2.883,61	26,40	-0,32
77,00	25.501,33	0,00	2.795,88	25,80	-0,30
72,00	24.968,28	0,00	2.713,45	25,26	-0,29
67,00	24.517,51	0,00	2.641,14	24,80	-0,28
62,00	24.142,81	0,00	2.575,04	24,41	-0,27

Höhenkote	Segmentmitte x-z-Ebene σ = M/W +N/A				
				DRUCK positiv ZUG negativ	
	σx	σy	$\tau_{max,Ed}$	σ1	σ2
[m]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[Mpa]	[Mpa]
127,00	5.021,88	0,00	2.914,31	6,36	-1,34
122,00	3.831,93	0,00	2.707,57	5,23	-1,40
117,00	2.760,50	0,00	2.522,07	4,26	-1,49
112,00	1.807,24	0,00	2.355,00	3,43	-1,62
107,00	3.726,76	0,00	2.204,00	4,75	-1,02
102,00	1.993,13	0,00	2.067,07	3,29	-1,30
97,00	409,35	0,00	1.942,52	2,16	-1,75
92,00	-1.428,60	0,00	1.828,89	1,25	-2,68
87,00	-3.655,73	0,00	1.724,95	0,69	-4,34
82,00	4.772,39	0,00	1.629,62	5,28	-0,50
77,00	2.599,67	0,00	1.541,98	3,32	-0,72
72,00	610,63	0,00	1.461,23	1,80	-1,19
67,00	-1.159,79	0,00	1.386,66	0,92	-2,08
62,00	-2.736,28	0,00	1.317,65	0,53	-3,27

mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P\infty}$
M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle
$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

Maximalwert aus alle DLCs **ULS**

UHFFB-Turm	Höhenkote	Querkraft	Querkraft	Torsion	Torsion	$\tau_{Torsion}$	+	$\tau_{Querkraft}$	=	$\tau_{max,Ed}$
		V_k	V_{ed}	M_k	M_{ed}					
	[m]	[kN]	**1,35**	[kNm]	**1,35**	[kN/m²]		[kN/m²]		[kN/m²]
	128,57	1.130,00	1.525,50	10.060,00	13.581,00					
	127,00	1.132,00	1.528,20	10.060,00	13.581,00	**2.914,31**	+	**1.263,01**	=	**4.177,32**
	124,50	1.137,00	1.534,95	10.060,00	13.581,00					
	122,00	1.140,00	1.539,00	10.060,00	13.581,00	**2.707,57**	+	**1.225,99**	=	**3.933,56**
	119,50	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00					
	117,00	1.148,00	1.549,80	10.060,00	13.581,00	**2.522,07**	+	**1.191,55**	=	**3.713,62**
	114,50	1.152,00	1.555,20	10.060,00	13.581,00					
	112,00	1.172,00	1.582,20	10.060,00	13.581,00	**2.355,00**	+	**1.175,48**	=	**3.530,49**
	109,50	1.205,00	1.626,75	10.060,00	13.581,00					
	107,00	1.236,00	1.668,60	10.060,00	13.581,00	**2.204,00**	+	**1.199,27**	=	**3.403,27**
	104,50	1.268,00	1.711,80	10.060,00	13.581,00					
	102,00	1.296,00	1.749,60	10.060,00	13.581,00	**2.067,07**	+	**1.217,80**	=	**3.284,87**
	99,50	1.326,00	1.790,10	10.060,00	13.581,00					
	97,00	1.353,00	1.826,55	10.060,00	13.581,00	**1.942,52**	+	**1.232,46**	=	**3.174,98**
	94,50	1.383,00	1.867,05	10.060,00	13.581,00					
	92,00	1.408,00	1.900,80	10.060,00	13.581,00	**1.828,89**	+	**1.244,48**	=	**3.073,37**
	89,50	1.434,00	1.935,90	10.060,00	13.581,00					
	87,00	1.458,00	1.968,30	10.060,00	13.581,00	**1.724,95**	+	**1.251,52**	=	**2.976,47**
	84,50	1.482,00	2.000,70	10.060,00	13.581,00					
	82,00	1.503,00	2.029,05	10.060,00	13.581,00	**1.629,62**	+	**1.253,99**	=	**2.883,61**
	79,50	1.525,00	2.058,75	10.060,00	13.581,00					
	77,00	1.545,00	2.085,75	10.060,00	13.581,00	**1.541,98**	+	**1.253,90**	=	**2.795,88**
	74,50	1.565,00	2.112,75	10.060,00	13.581,00					
	72,00	1.585,00	2.139,75	10.060,00	13.581,00	**1.461,23**	+	**1.252,22**	=	**2.713,45**
	69,50	1.610,00	2.173,50	10.060,00	13.581,00					
	67,00	1.630,00	2.200,50	10.060,00	13.581,00	**1.386,66**	+	**1.254,49**	=	**2.641,14**
	64,50	1.647,00	2.223,45	10.060,00	13.581,00					
	62,00	1.676,00	2.262,60	10.060,00	13.581,00	**1.317,65**	+	**1.257,38**	=	**2.575,04**
	59,50	1.692,00	2.284,20	10.060,00	13.581,00					

Segmentmitte x-y-Ebene σ= N/A

σx	σy	$\tau_{max,Ed}$	DRUCK positiv	ZUG negativ
			σ1	σ2
[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[Mpa]	[Mpa]
17.212,90	**0,00**	**4.177,32**	18,17	-0,96
16.729,73	**0,00**	**3.933,56**	17,61	-0,88
16.276,80	**0,00**	**3.713,62**	17,08	-0,81
15.858,84	**0,00**	**3.530,49**	16,61	-0,75
19.273,79	**0,00**	**3.403,27**	19,86	-0,58
18.795,63	**0,00**	**3.284,87**	19,35	-0,56
18.350,78	**0,00**	**3.174,98**	18,88	-0,53
17.941,83	**0,00**	**3.073,37**	18,45	-0,51
17.554,56	**0,00**	**2.976,47**	18,05	-0,49
27.887,17	**0,00**	**2.713,45**	28,15	-0,26
29.164,67	**0,00**	**2.883,61**	29,45	-0,28
28.499,79	**0,00**	**2.795,88**	28,77	-0,27
27.360,95	**0,00**	**2.641,14**	27,61	-0,25
26.914,60	**0,00**	**2.575,04**	27,16	-0,24

Segmentmitte x-z-Ebene σ = M/W +N/A

σx	σy	$\tau_{max,Ed}$	DRUCK positiv	ZUG negativ
			σ1	σ2
[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[Mpa]	[Mpa]
5.951,41	**0,00**	**2.914,31**	7,14	-1,19
4.788,21	**0,00**	**2.707,57**	6,01	-1,22
3.732,93	**0,00**	**2.522,07**	5,00	-1,27
2.782,92	**0,00**	**2.355,00**	4,13	-1,34
5.173,50	**0,00**	**2.204,00**	5,99	-0,81
3.408,51	**0,00**	**2.067,07**	4,38	-0,97
1.786,66	**0,00**	**1.942,52**	3,03	-1,24
-97,45	**0,00**	**1.828,89**	1,78	-1,88
-2.372,32	**0,00**	**1.724,95**	0,91	-3,28
3.139,88	**0,00**	**1.461,23**	3,71	-0,57
7.498,41	**0,00**	**1.629,62**	7,84	-0,34
5.230,60	**0,00**	**1.541,98**	5,65	-0,42
1.244,65	**0,00**	**1.386,66**	2,14	-0,90
-477,71	**0,00**	**1.317,65**	1,10	-1,58

mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P0}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

Maximalwert aus alle DLCs **ULS**

UHFFB-Turm Höhenkote [m]	Querkraft V_k [kN]	Querkraft V_{ed} 1.35 [kN]	Torsion M_k [kNm]	Torsion M_{ed} 1.35	$\tau_{Torsion}$ [kN/m²]	+	$\tau_{Querkraft}$ [kN/m²]	=	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]
128,57	1.130,00	1.525,50	10.060,00	13.581,00					
127,00	1.132,00	1.528,20	10.060,00	13.581,00	**2.914,31**	+	**1.263,01**	=	**4.177,32**
124,50	1.137,00	1.534,95	10.060,00	13.581,00					
122,00	1.140,00	1.539,00	10.060,00	13.581,00	**2.707,57**	+	**1.225,99**	=	**3.933,56**
119,50	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00					
117,00	1.148,00	1.549,80	10.060,00	13.581,00	**2.522,07**	+	**1.191,55**	=	**3.713,62**
114,50	1.152,00	1.555,20	10.060,00	13.581,00					
112,00	1.172,00	1.582,20	10.060,00	13.581,00	**2.355,00**	+	**1.175,48**	=	**3.530,49**
109,50	1.205,00	1.626,75	10.060,00	13.581,00					
107,00	1.236,00	1.668,60	10.060,00	13.581,00	**2.204,00**	+	**1.199,27**	=	**3.403,27**
104,50	1.268,00	1.711,80	10.060,00	13.581,00					
102,00	1.296,00	1.749,60	10.060,00	13.581,00	**2.067,07**	+	**1.217,80**	=	**3.284,87**
99,50	1.326,00	1.790,10	10.060,00	13.581,00					
97,00	1.353,00	1.826,55	10.060,00	13.581,00	**1.942,52**	+	**1.232,46**	=	**3.174,98**
94,50	1.383,00	1.867,05	10.060,00	13.581,00					
92,00	1.408,00	1.900,80	10.060,00	13.581,00	**1.828,89**	+	**1.244,48**	=	**3.073,37**
89,50	1.434,00	1.935,90	10.060,00	13.581,00					
87,00	1.458,00	1.968,30	10.060,00	13.581,00	**1.724,95**	+	**1.251,52**	=	**2.976,47**
84,50	1.482,00	2.000,70	10.060,00	13.581,00					
82,00	1.503,00	2.029,05	10.060,00	13.581,00	**1.629,62**	+	**1.253,99**	=	**2.883,61**
79,50	1.525,00	2.058,75	10.060,00	13.581,00					
77,00	1.545,00	2.085,75	10.060,00	13.581,00	**1.541,98**	+	**1.253,90**	=	**2.795,88**
74,50	1.565,00	2.112,75	10.060,00	13.581,00					
72,00	1.585,00	2.139,75	10.060,00	13.581,00	**1.461,23**	+	**1.252,22**	=	**2.713,45**
69,50	1.610,00	2.173,50	10.060,00	13.581,00					
67,00	1.630,00	2.200,50	10.060,00	13.581,00	**1.386,66**	+	**1.254,49**	=	**2.641,14**
64,50	1.647,00	2.223,45	10.060,00	13.581,00					
62,00	1.676,00	2.262,60	10.060,00	13.581,00	**1.317,65**	+	**1.257,38**	=	**2.575,04**
59,50	1.692,00	2.284,20	10.060,00	13.581,00					

Segmentmitte x-y-Ebene σ= N/A

σx [kN/m²]	σy [kN/m²]	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]	DRUCK positiv σ1 [Mpa]	ZUG negativ σ2 [Mpa]
	15.211,14	**0,00**	**4.177,32**	16,28	-1,07
	14.800,28	**0,00**	**3.933,56**	15,78	-0,98
	14.414,61	**0,00**	**3.713,62**	15,32	-0,90
	14.059,39	**0,00**	**3.530,49**	14,90	-0,84
	17.054,63	**0,00**	**3.403,27**	17,71	-0,65
	16.646,51	**0,00**	**3.284,87**	17,27	-0,62
	16.267,41	**0,00**	**3.174,98**	16,87	-0,60
	15.920,31	**0,00**	**3.073,37**	16,49	-0,57
	15.591,32	**0,00**	**2.976,47**	16,14	-0,55
	25.762,67	**0,00**	**2.883,61**	26,08	-0,32
	25.190,52	**0,00**	**2.795,88**	25,50	-0,31
	24.665,72	**0,00**	**2.713,45**	24,96	-0,29
	24.222,77	**0,00**	**2.641,14**	24,51	-0,28
	23.855,50	**0,00**	**2.575,04**	24,13	-0,27

Segmentmitte x-z-Ebene σ = M/W +N/A

σx [kN/m²]	σy [kN/m²]	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]	DRUCK positiv σ1 [Mpa]	ZUG negativ σ2 [Mpa]
3.949,65	**0,00**	**2.914,31**	5,50	-1,55
2.858,76	**0,00**	**2.707,57**	4,49	-1,63
1.870,75	**0,00**	**2.522,07**	3,63	-1,75
983,47	**0,00**	**2.355,00**	2,90	-1,91
2.954,34	**0,00**	**2.204,00**	4,13	-1,18
1.259,39	**0,00**	**2.067,07**	2,79	-1,53
-296,70	**0,00**	**1.942,52**	1,80	-2,10
-2.118,97	**0,00**	**1.828,89**	1,05	-3,17
-4.335,55	**0,00**	**1.724,95**	0,60	-4,94
4.096,41	**0,00**	**1.629,62**	4,67	-0,57
1.921,33	**0,00**	**1.541,98**	2,78	-0,86
-81,57	**0,00**	**1.461,23**	1,42	-1,50
-1.893,52	**0,00**	**1.386,66**	0,73	-2,63
-3.536,81	**0,00**	**1.317,65**	0,44	-3,97

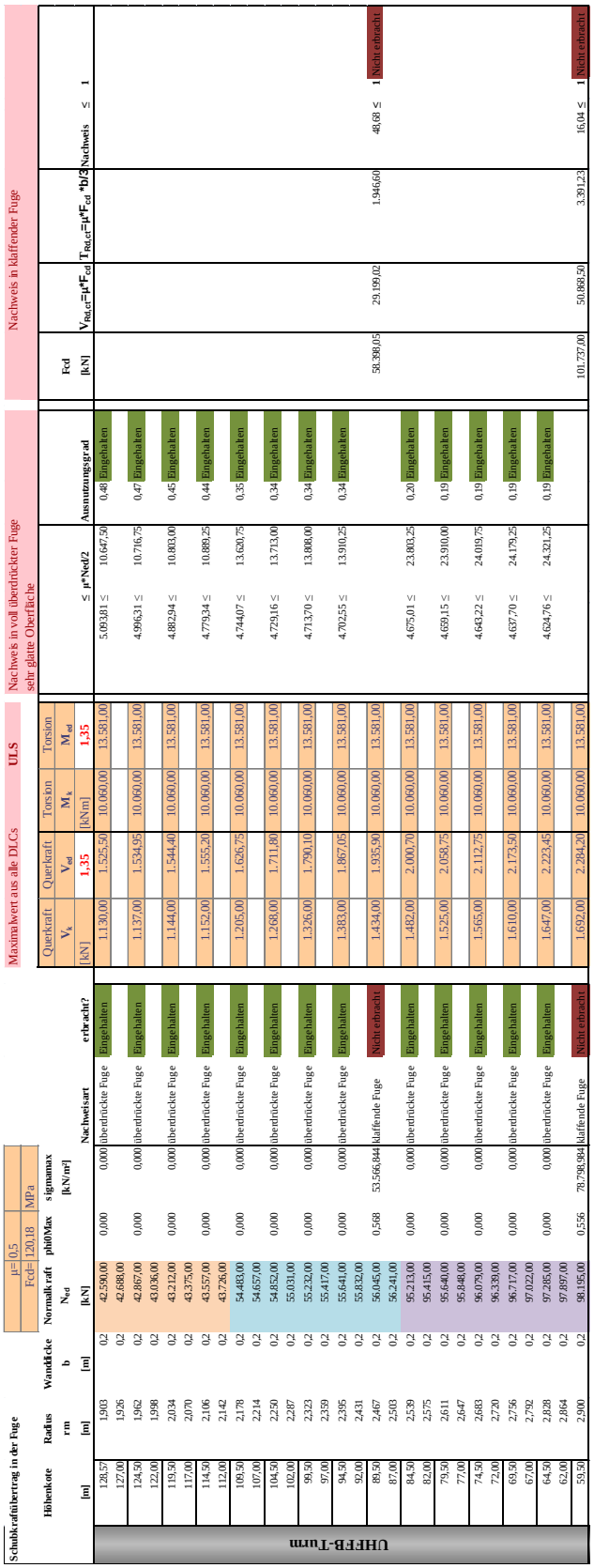
mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P\infty}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

B.1.3.3 Kraftübertragung in der Fuge (ULS)



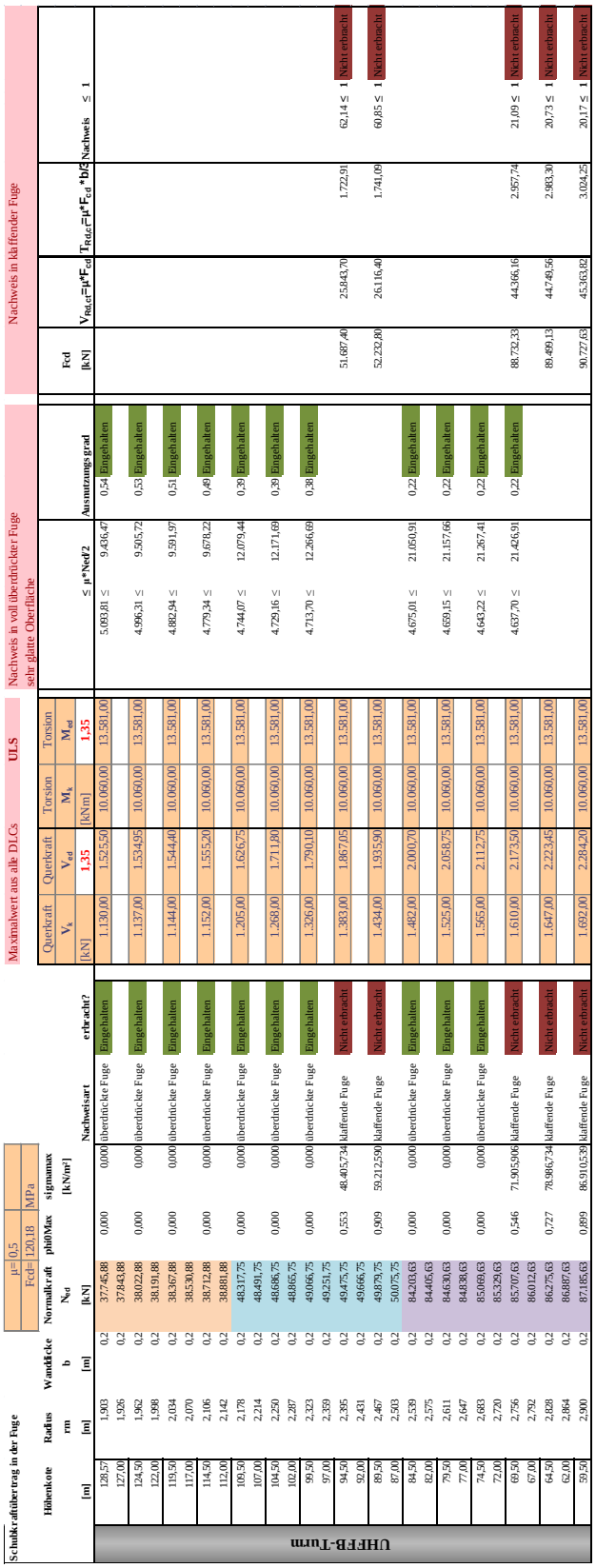
Schubkraftübertrag in der Fuge							μ= 0,5					Maximalwert aus alle DLCs		ULS	Nachweis in voll überdrückter Fuge sehr glatte Oberfläche				Nachweis in klaffender Fuge			
							Fcd= 120,18	MPa														
UHFFB-Turm	Höhenkote [m]	Radius rm [m]	Wanddicke b [m]		Normalkraft N_{ed} [kN]	phi0Max	sigmamax [kN/m²]	Nachweisart	erbracht?		Querkraft V_k [kN]	Querkraft V_{ed} 1,35	Torsion M_k [kNm]	Torsion M_{ed} 1,35		μ*Ned/2	Ausnutzungsgrad	Fcd [kN]	$V_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}$	$T_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}*b/3$	Nachweis	≤ 1
	128,57	1,903	0,2		42.590,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.130,00	1.525,50	10.060,00	13.581,00	≤	5.093,81	0,40	Eingehalten				
	127,00	1,926	0,2		42.688,00																	
	124,50	1,962	0,2		42.867,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.137,00	1.534,95	10.060,00	13.581,00	≤	4.996,31	0,47	Eingehalten				
	122,00	1,998	0,2		43.036,00																	
	119,50	2,034	0,2		43.212,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00	≤	4.882,94	0,45	Eingehalten				
	117,00	2,070	0,2		43.375,00																	
	114,50	2,106	0,2		43.557,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.152,00	1.555,20	10.060,00	13.581,00	≤	4.779,34	0,44	Eingehalten				
	112,00	2,142	0,2		43.726,00																	
	109,50	2,178	0,2		54.483,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.205,00	1.626,75	10.060,00	13.581,00	≤	4.744,07	0,35	Eingehalten				
	107,00	2,214	0,2		54.657,00																	
	104,50	2,250	0,2		54.852,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.268,00	1.711,80	10.060,00	13.581,00	≤	4.729,16	0,34	Eingehalten				
	102,00	2,287	0,2		55.031,00																	
	99,50	2,323	0,2		55.232,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.326,00	1.790,10	10.060,00	13.581,00	≤	4.713,70	0,34	Eingehalten				
	97,00	2,359	0,2		55.417,00																	
	94,50	2,395	0,2		55.641,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.383,00	1.867,05	10.060,00	13.581,00	≤	4.702,55	0,34	Eingehalten				
	92,00	2,431	0,2		55.832,00																	
	89,50	2,467	0,2		56.045,00	0,568	53.566,844	klaffende Fuge	Nicht erbracht		1.434,00	1.935,90	10.060,00	13.581,00					58.398,05	29.199,02	1.946,60	48,68 ≤ 1	Nicht erbracht
	87,00	2,503	0,2		56.241,00																	
	84,50	2,539	0,2		95.213,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.482,00	2.000,70	10.060,00	13.581,00	≤	4.675,01	0,20	Eingehalten				
	82,00	2,575	0,2		95.415,00																	
	79,50	2,611	0,2		95.640,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.525,00	2.058,75	10.060,00	13.581,00	≤	4.659,15	0,19	Eingehalten				
	77,00	2,647	0,2		95.848,00																	
	74,50	2,683	0,2		96.079,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.565,00	2.112,75	10.060,00	13.581,00	≤	4.643,22	0,19	Eingehalten				
	72,00	2,720	0,2		96.339,00																	
	69,50	2,756	0,2		96.717,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.610,00	2.173,50	10.060,00	13.581,00	≤	4.637,70	0,19	Eingehalten				
	67,00	2,792	0,2		97.022,00																	
	64,50	2,828	0,2		97.285,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.647,00	2.223,45	10.060,00	13.581,00	≤	4.624,76	0,19	Eingehalten				
	62,00	2,864	0,2		97.897,00																	
	59,50	2,900	0,2		98.195,00	0,556	78.798,904	klaffende Fuge	Nicht erbracht		1.693,00	2.284,28	10.060,00	13.581,00					101.737,00	50.868,50	3.391,23	16,04 ≤ 1	Nicht erbracht

mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P0}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle



Schubkraftübertrag in der Fuge: μ= 0,5; Fcd= 120,18 MPa

UHFFB-Turm	Höhenkote [m]	Radius rm [m]	Wandstärke b [m]	Normalkraft N_{Ed} [kN]	phi0Max	sigmamax [kN/m²]	Nachweisart	erbracht?	Querkraft V_x [kN]	Querkraft V_{ed} 1,35	Torsion M_x [kNm]	Torsion M_{ed} 1,35	≤ μ*Ned/2	Ausnutzungsgrad	Fcd [kN]	$V_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}$	$T_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}*bi/3$	Nachweis ≤ 1	
	128,57	1,903	0,2	37745,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.130,00	1.525,50	10.060,00	13.581,00	≤ 5.693,81	0,54	Eingehalten				
	127,00	1,926	0,2	37843,88															
	124,50	1,962	0,2	38022,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.137,00	1.534,95	10.060,00	13.581,00	≤ 4.996,31	0,53	Eingehalten				
	122,00	1,998	0,2	38191,88															
	119,50	2,034	0,2	38367,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00	≤ 4.882,94	0,51	Eingehalten				
	117,00	2,070	0,2	38530,88															
	114,50	2,106	0,2	38712,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.152,00	1.555,20	10.060,00	13.581,00	≤ 4.779,34	0,49	Eingehalten				
	112,00	2,142	0,2	38881,88															
	109,50	2,178	0,2	48317,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.205,00	1.626,75	10.060,00	13.581,00	≤ 4.744,07	0,39	Eingehalten				
	107,00	2,214	0,2	48491,75															
	104,50	2,250	0,2	48686,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.268,00	1.711,80	10.060,00	13.581,00	≤ 4.729,16	0,39	Eingehalten				
	102,00	2,287	0,2	48865,75															
	99,50	2,323	0,2	49066,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.326,00	1.790,10	10.060,00	13.581,00	≤ 4.713,70	0,38	Eingehalten				
	97,00	2,359	0,2	49251,75															
	94,50	2,395	0,2	49475,75	0,553	48.405,734	klaffende Fuge	Nicht erbracht	1.383,00	1.867,05	10.060,00	13.581,00			51.687,40	25.843,70	1.722,91	62,14 ≤ 1	Nicht erbracht
	92,00	2,431	0,2	49666,75															
	89,50	2,467	0,2	49879,75	0,909	59.212,590	klaffende Fuge	Nicht erbracht	1.434,00	1.935,90	10.060,00	13.581,00			52.232,80	26.116,40	1.741,09	60,85 ≤ 1	Nicht erbracht
	87,00	2,503	0,2	50075,75															
	84,50	2,539	0,2	84203,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.482,00	2.000,70	10.060,00	13.581,00	≤ 4.675,01	0,22	Eingehalten				
	82,00	2,575	0,2	84405,63															
	79,50	2,611	0,2	84630,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.525,00	2.058,75	10.060,00	13.581,00	≤ 4.659,15	0,22	Eingehalten				
	77,00	2,647	0,2	84838,63															
	74,50	2,683	0,2	85069,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.565,00	2.112,75	10.060,00	13.581,00	≤ 4.643,22	0,22	Eingehalten				
	72,00	2,720	0,2	85329,63															
	69,50	2,756	0,2	85707,63	0,546	71.905,906	klaffende Fuge	Nicht erbracht	1.610,00	2.173,50	10.060,00	13.581,00	≤ 4.637,70	0,22	Eingehalten	88.732,33	44.366,16	2.957,74	21,09 ≤ 1	Nicht erbracht
	67,00	2,792	0,2	86012,63															
	64,50	2,828	0,2	86275,63	0,727	78.986,734	klaffende Fuge	Nicht erbracht	1.647,00	2.223,45	10.060,00	13.581,00			89.499,13	44.749,56	2.983,30	20,73 ≤ 1	Nicht erbracht
	62,00	2,864	0,2	86687,63															
	59,50	2,900	0,2	87185,63	0,899	86.910,539	klaffende Fuge	Nicht erbracht	1.692,00	2.284,20	10.060,00	13.581,00			90.727,65	45.363,82	3.024,25	20,17 ≤ 1	Nicht erbracht

Maximalwert aus alle D.LCs — ULS — Nachweis in voll überdrückter Fuge sehr glatte Oberfläche — Nachweis in klaffender Fuge

mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P\infty}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

Schubkraftübertrag in der Fuge — UHFFB-Turm; μ= 0,5; Fcd= 120,18 MPa

Maximalwert aus alle DLCs — ULS; Nachweis in voll überdrückter Fuge (sehr glatte Oberfläche); Nachweis in klaffender Fuge

Höhenkote [m]	Radius rm [m]	Wanddicke b [m]	Normalkraft N_{ed} [kN]	phi0Max	sigmamax [kN/m²]	Nachweisart	erbracht?	Querkraft V_k [kN]	Querkraft V_{ed} (1,35)	Torsion M_k [kNm]	Torsion M_{ed} (1,35)		≤ μ*Ned/2	Ausnutzungsgrad		Fcd [kN]	$V_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}$	$T_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}*b/3$	Nachweis ≤ 1	
128,57	1,903	0,2	41.556,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.130,00	1.525,50	10.060,00	13.581,00	5.093,81 ≤	10.389,00	0,49	Eingehalten					
127,00	1,926	0,2	41.654,00																	
124,50	1,962	0,2	41.833,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.137,00	1.534,95	10.060,00	13.581,00	4.996,31 ≤	10.458,25	0,48	Eingehalten					
122,00	1,998	0,2	42.002,00																	
119,50	2,034	0,2	42.178,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00	4.882,94 ≤	10.544,50	0,46	Eingehalten					
117,00	2,070	0,2	42.341,00																	
114,50	2,106	0,2	42.523,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.152,00	1.555,20	10.060,00	13.581,00	4.779,34 ≤	10.630,75	0,45	Eingehalten					
112,00	2,142	0,2	42.692,00																	
109,50	2,178	0,2	53.459,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.205,00	1.626,75	10.060,00	13.581,00	4.744,07 ≤	13.364,75	0,35	Eingehalten					
107,00	2,214	0,2	53.633,00																	
104,50	2,250	0,2	53.827,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.268,00	1.711,80	10.060,00	13.581,00	4.729,16 ≤	13.456,75	0,35	Eingehalten					
102,00	2,287	0,2	54.007,00																	
99,50	2,323	0,2	54.208,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.326,00	1.790,10	10.060,00	13.581,00	4.713,70 ≤	13.552,00	0,35	Eingehalten					
97,00	2,359	0,2	54.393,00																	
94,50	2,395	0,2	54.617,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.383,00	1.867,05	10.060,00	13.581,00	4.702,55 ≤	13.654,25	0,34	Eingehalten					
92,00	2,431	0,2	54.808,00																	
89,50	2,467	0,2	55.021,00	0,671	53.218,918	klaffende Fuge	Nicht erbracht	1.434,00	1.935,90	10.060,00	13.581,00					54.452,10	27.226,05	1.815,07	55,99 ≤ 1	Nicht erbracht
87,00	2,503	0,2	55.217,00																	
84,50	2,539	0,2	94.179,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.482,00	2.000,70	10.060,00	13.581,00	4.675,01 ≤	23.544,75	0,20	Eingehalten					
82,00	2,575	0,2	94.381,00																	
79,50	2,611	0,2	94.606,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.525,00	2.058,75	10.060,00	13.581,00	4.659,15 ≤	23.651,50	0,20	Eingehalten					
77,00	2,647	0,2	94.814,00																	
74,50	2,683	0,2	95.045,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.565,00	2.112,75	10.060,00	13.581,00	4.643,22 ≤	23.761,25	0,20	Eingehalten					
72,00	2,720	0,2	95.305,00																	
69,50	2,756	0,2	95.683,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.610,00	2.173,50	10.060,00	13.581,00	4.637,70 ≤	23.920,75	0,19	Eingehalten					
67,00	2,792	0,2	95.988,00																	
64,50	2,828	0,2	96.251,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.647,00	2.223,45	10.060,00	13.581,00	4.624,76 ≤	24.062,75	0,19	Eingehalten					
62,00	2,864	0,2	96.863,00																	
59,50	2,900	0,2	97.164,00	0,635	78.302,438	klaffende Fuge	Nicht erbracht	1.692,00	2.284,20	10.060,00	13.581,00					96.255,10	48.127,55	3.208,50	17,92 ≤ 1	Nicht erbracht

mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P0}$
M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle
$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

Schalkraftübertrag in der Fuge					μ= 0,5				Maximalwert aus alle DLCs			ULS	Nachweis in voll überdrückter Fuge sehr glatte Oberfläche				Nachweis in klaffender Fuge			
					Fcd= 120,18	MPa			Querkraft	Querkraft	Torsion	Torsion				Fcd				
UHFFB-Turm	Höhenkote	Radius rm	Wanddicke b	Normalkraft N_{ed}	phi0Max	sigmamax	Nachweisart	erbracht?	V_k	V_{ed}	M_k	M_{ed}	Ved+Mt/2*rm	≤	μ*Ned/2	Ausnutzungsgrad	[kN]	$V_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}$	$T_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}*b/3$	Nachweis	≤ 1
	[m]	[m]	[m]	[kN]		[kN/m²]			[kN]	1,35	[kNm]	1,35									
	128,57	1,903	0,2	36.711,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.130,00	1.525,50	10.060,00	13.581,00	5.093,81	≤	9.177,97	0,56	Eingehalten				
	127,00	1,926	0,2	36.809,88																	
	124,50	1,962	0,2	36.988,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.137,00	1.534,95	10.060,00	13.581,00	4.996,31	≤	9.247,22	0,54	Eingehalten				
	122,00	1,998	0,2	37.157,88																	
	119,50	2,034	0,2	37.333,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00	4.882,94	≤	9.333,47	0,52	Eingehalten				
	117,00	2,070	0,2	37.496,88																	
	114,50	2,106	0,2	37.678,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.152,00	1.555,20	10.060,00	13.581,00	4.779,34	≤	9.419,72	0,51	Eingehalten				
	112,00	2,142	0,2	37.847,88																	
	109,50	2,178	0,2	47.283,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.205,00	1.626,75	10.060,00	13.581,00	4.744,07	≤	11.820,94	0,40	Eingehalten				
	107,00	2,214	0,2	47.457,75																	
	104,50	2,250	0,2	47.651,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.268,00	1.711,80	10.060,00	13.581,00	4.729,16	≤	11.912,94	0,40	Eingehalten				
	102,00	2,287	0,2	47.831,75																	
	99,50	2,323	0,2	48.032,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.326,00	1.790,10	10.060,00	13.581,00	4.713,70	≤	12.008,19	0,39	Eingehalten				
	97,00	2,359	0,2	48.217,75																	
	94,50	2,395	0,2	48.441,75	0,667	48.137,242	klaffende Fuge	Nicht erbracht	1.383,00	1.867,05	10.060,00	13.581,00					47.913,25	23.956,63	1.597,11	72,32 ≤	1 Nicht erbracht
	92,00	2,431	0,2	48.632,75																	
	89,50	2,467	0,2	48.845,75	1,078	60.926,715	klaffende Fuge	Nicht erbracht	1.434,00	1.935,90	10.060,00	13.581,00					48.276,85	24.138,42	1.609,23	71,23 ≤	1 Nicht erbracht
	87,00	2,503	0,2	49.041,75																	
	84,50	2,539	0,2	83.169,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.482,00	2.000,70	10.060,00	13.581,00	4.675,01	≤	20.792,41	0,22	Eingehalten				
	82,00	2,575	0,2	83.371,63																	
	79,50	2,611	0,2	83.596,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.525,00	2.058,75	10.060,00	13.581,00	4.659,15	≤	20.899,16	0,22	Eingehalten				
	77,00	2,647	0,2	83.804,63																	
	74,50	2,683	0,2	84.035,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.565,00	2.112,75	10.060,00	13.581,00	4.643,22	≤	21.008,91	0,22	Eingehalten				
	72,00	2,720	0,2	84.295,63																	
	69,50	2,756	0,2	84.673,63	0,622	71.234,484	klaffende Fuge	Nicht erbracht	1.610,00	2.173,50	10.060,00	13.581,00					83.912,03	41.956,42	2.797,09	23,58 ≤	1 Nicht erbracht
	67,00	2,792	0,2	84.978,63																	
	64,50	2,828	0,2	85.241,63	0,825	79.187,922	klaffende Fuge	Nicht erbracht	1.647,00	2.223,45	10.060,00	13.581,00					84.424,03	42.212,02	2.814,13	23,29 ≤	1 Nicht erbracht
	62,00	2,864	0,2	85.853,63																	
	59,50	2,900	0,2	86.154,63	1,029	88.679,594	klaffende Fuge	Nicht erbracht	1.692,00	2.284,20	10.060,00	13.581,00					85.245,73	42.622,87	2.841,52	22,85 ≤	1 Nicht erbracht

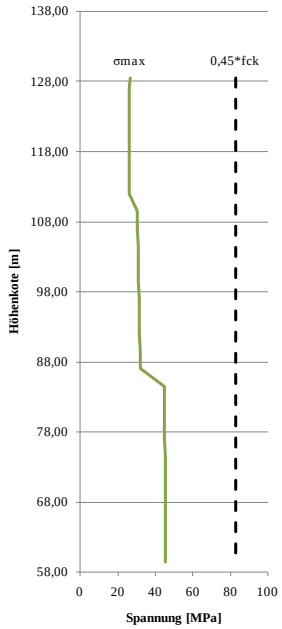
mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P\infty}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

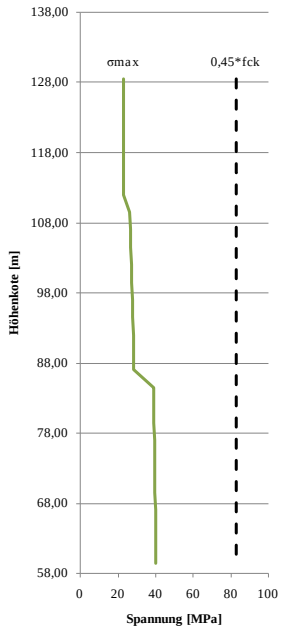
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

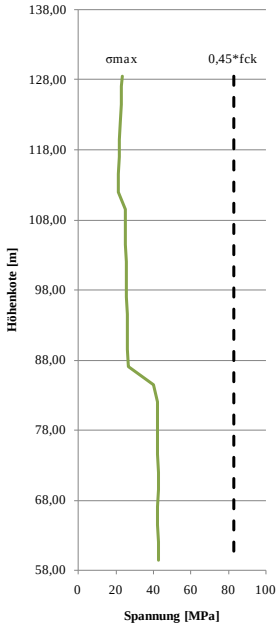
B.1.3.4 Spannungsbegrenzung (SLS)



$N_{Ed} = N_{min} + N_{P0}$
M_{Ed} = maximales Moment aus Power Production Lastfällen (DLC 1.1, DLC 1.3, DLC 1.5 - 1.9) und den Ermüdungslastfällen DLC 3.1 und DLC 4.1 $(M_{PP}) + M_{temp} + M_{imp}$

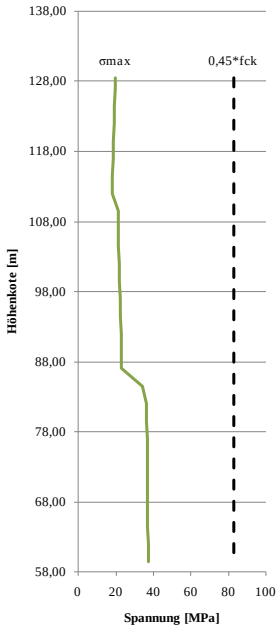


$N_{Ed} = N_{min} + N_{P\infty}$
M_{Ed} = maximales Moment aus Power Production Lastfällen (DLC 1.1, DLC 1.3, DLC 1.5 - 1.9) und den Ermüdungslastfällen DLC 3.1 und DLC 4.1 $(M_{PP}) + M_{temp} + M_{imp}$



$N_{Ed} = N_{min} + N_{P0}$

M_{Ed} = Moment aus der 99%-Fraktile $(M_{LDD99\%}) + M_{temp} + M_{imp}$



$N_{Ed} = N_{min} + N_{P\,\infty}$

M_{Ed} = Moment aus der 99%-Fraktile $(M_{LDD99\%}) + M_{temp} + M_{imp}$

B.2 Schnittgrößen und Ergebnisse der Turmvariante 3

B.2.1 Schnittgrößen

B.2.1.1 Schnittgrößen aus der Simulation mit Flex 5 (charakteristische Schnittgrößen)

Maximallasten DLC 1.1					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.843,00	16.600,00	910,10	10.060,00
127,00	427X	3.900,00	16.240,00	912,60	10.060,00
124,50	426X	4.014,00	15.690,00	916,90	10.060,00
122,00	425X	4.116,00	15.160,00	920,30	10.060,00
119,50	424X	4.224,00	14.870,00	923,30	10.060,00
117,00	423X	4.318,00	14.710,00	925,50	10.060,00
114,50	422X	4.429,00	14.550,00	927,60	10.060,00
112,00	421X	4.526,00	14.720,00	929,20	10.060,00
109,50	420X	4.648,00	15.750,00	931,30	10.060,00
107,00	419X	4.760,00	18.010,00	934,00	10.060,00
104,50	418X	4.892,00	20.280,00	938,80	10.060,00
102,00	417X	5.008,00	22.570,00	943,70	10.060,00
99,50	416X	5.144,00	24.850,00	949,40	10.060,00
97,00	415X	5.263,00	27.150,00	954,10	10.060,00
94,50	414X	5.420,00	29.440,00	960,30	10.060,00
92,00	413X	5.543,00	31.740,00	964,60	10.060,00
89,50	412X	5.687,00	34.040,00	969,40	10.060,00
87,00	411X	5.813,00	36.340,00	973,10	10.060,00
84,50	410X	5.976,00	38.640,00	977,60	10.060,00
82,00	409X	6.135,00	40.940,00	981,80	10.060,00
79,50	408X	6.316,00	43.250,00	986,10	10.060,00
77,00	407X	6.480,00	45.560,00	989,30	10.060,00
74,50	406X	6.666,00	47.890,00	992,60	10.060,00
72,00	405X	6.880,00	50.260,00	995,80	10.060,00
69,50	404X	7.212,00	52.670,00	1.000,00	10.060,00
67,00	403X	7.471,00	55.120,00	1.003,00	10.060,00
64,50	402X	7.687,00	57.580,00	1.004,00	10.060,00
62,00	401X	8.250,00	60.060,00	1.009,00	10.060,00
59,50	400X	8.503,00	62.550,00	1.010,00	10.060,00

Maximallasten DLC 1.2					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.780,00	17.840,00	971,10	8.477,00
127,00	427X	3.837,00	17.450,00	973,90	8.477,00
124,50	426X	3.951,00	16.820,00	978,50	8.477,00
122,00	425X	4.054,00	16.190,00	981,70	8.477,00
119,50	424X	4.161,00	15.550,00	984,10	8.477,00
117,00	423X	4.255,00	14.910,00	985,60	8.477,00
114,50	422X	4.367,00	14.270,00	986,60	8.477,00
112,00	421X	4.464,00	13.750,00	986,80	8.477,00
109,50	420X	4.585,00	14.320,00	986,70	8.477,00
107,00	419X	4.698,00	16.490,00	986,30	8.477,00
104,50	418X	4.829,00	18.680,00	986,20	8.477,00
102,00	417X	4.945,00	21.020,00	986,60	8.477,00
99,50	416X	5.081,00	23.410,00	988,20	8.477,00
97,00	415X	5.200,00	25.810,00	990,40	8.477,00
94,50	414X	5.357,00	28.190,00	993,90	8.477,00
92,00	413X	5.480,00	30.580,00	996,40	8.477,00
89,50	412X	5.624,00	32.960,00	999,40	8.477,00
87,00	411X	5.751,00	35.340,00	1.001,00	8.477,00
84,50	410X	5.913,00	37.710,00	1.004,00	8.477,00
82,00	409X	6.072,00	40.070,00	1.006,00	8.477,00
79,50	408X	6.254,00	42.440,00	1.007,00	8.477,00
77,00	407X	6.417,00	44.810,00	1.007,00	8.477,00
74,50	406X	6.604,00	47.180,00	1.007,00	8.477,00
72,00	405X	6.818,00	49.570,00	1.007,00	8.477,00
69,50	404X	7.150,00	51.970,00	1.009,00	8.477,00
67,00	403X	7.408,00	54.390,00	1.012,00	8.477,00
64,50	402X	7.624,00	56.820,00	1.014,00	8.477,00
62,00	401X	8.188,00	59.240,00	1.022,00	8.477,00
59,50	400X	8.440,00	61.670,00	1.026,00	8.477,00

Maximallasten DLC 1.3					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.578,00	17.960,00	886,80	6.593,00
127,00	427X	3.635,00	18.230,00	887,90	6.593,00
124,50	426X	3.749,00	19.240,00	889,70	6.594,00
122,00	425X	3.851,00	20.250,00	891,20	6.594,00
119,50	424X	3.959,00	21.270,00	892,70	6.594,00
117,00	423X	4.053,00	22.290,00	893,90	6.594,00
114,50	422X	4.165,00	23.310,00	895,50	6.595,00
112,00	421X	4.261,00	24.330,00	897,10	6.595,00
109,50	420X	4.383,00	25.360,00	899,10	6.595,00
107,00	419X	4.495,00	26.390,00	900,80	6.594,00
104,50	418X	4.627,00	27.420,00	902,60	6.594,00
102,00	417X	4.743,00	29.040,00	904,10	6.594,00
99,50	416X	4.879,00	31.250,00	905,70	6.594,00
97,00	415X	4.998,00	33.460,00	907,00	6.594,00
94,50	414X	5.155,00	35.680,00	908,80	6.593,00
92,00	413X	5.278,00	37.890,00	910,10	6.593,00
89,50	412X	5.422,00	40.100,00	911,70	6.593,00
87,00	411X	5.548,00	42.310,00	913,00	6.593,00
84,50	410X	5.711,00	44.520,00	914,80	6.592,00
82,00	409X	5.870,00	46.720,00	916,60	6.592,00
79,50	408X	6.052,00	48.910,00	918,50	6.592,00
77,00	407X	6.215,00	51.100,00	920,00	6.592,00
74,50	406X	6.401,00	53.290,00	921,80	6.592,00
72,00	405X	6.615,00	55.460,00	929,10	6.592,00
69,50	404X	6.948,00	57.620,00	940,10	6.592,00
67,00	403X	7.206,00	59.780,00	948,10	6.592,00
64,50	402X	7.422,00	61.910,00	954,20	6.593,00
62,00	401X	7.986,00	64.030,00	971,10	6.593,00
59,50	400X	8.238,00	66.140,00	977,50	6.593,00

Maximallasten DLC 1.5					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.463,00	14.710,00	595,90	2.325,00
127,00	427X	3.520,00	15.520,00	599,80	2.325,00
124,50	426X	3.634,00	16.870,00	607,60	2.325,00
122,00	425X	3.736,00	18.320,00	613,90	2.325,00
119,50	424X	3.844,00	19.820,00	620,20	2.324,00
117,00	423X	3.938,00	21.340,00	624,90	2.324,00
114,50	422X	4.049,00	22.870,00	630,50	2.324,00
112,00	421X	4.146,00	24.430,00	634,80	2.324,00
109,50	420X	4.268,00	26.000,00	640,40	2.324,00
107,00	419X	4.380,00	27.590,00	645,40	2.324,00
104,50	418X	4.512,00	29.190,00	651,50	2.324,00
102,00	417X	4.628,00	30.810,00	656,50	2.324,00
99,50	416X	4.764,00	32.440,00	662,40	2.324,00
97,00	415X	4.883,00	34.080,00	667,00	2.324,00
94,50	414X	5.040,00	35.740,00	673,40	2.324,00
92,00	413X	5.163,00	37.400,00	677,50	2.324,00
89,50	412X	5.307,00	39.080,00	682,30	2.324,00
87,00	411X	5.433,00	40.760,00	685,70	2.325,00
84,50	410X	5.596,00	42.460,00	690,60	2.325,00
82,00	409X	5.755,00	44.160,00	695,00	2.325,00
79,50	408X	5.936,00	45.880,00	699,80	2.325,00
77,00	407X	6.100,00	47.610,00	703,50	2.325,00
74,50	406X	6.286,00	49.350,00	707,60	2.325,00
72,00	405X	6.500,00	51.110,00	712,10	2.325,00
69,50	404X	6.832,00	52.880,00	719,40	2.325,00
67,00	403X	7.091,00	54.670,00	724,00	2.325,00
64,50	402X	7.307,00	56.480,00	726,90	2.325,00
62,00	401X	7.870,00	58.300,00	737,60	2.325,00
59,50	400X	8.123,00	60.150,00	740,40	2.325,00

Maximallasten DLC 1.6					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.523,00	12.150,00	1.027,00	2.260,00
127,00	427X	3.580,00	12.970,00	1.032,00	2.260,00
124,50	426X	3.694,00	14.580,00	1.040,00	2.260,00
122,00	425X	3.796,00	16.440,00	1.047,00	2.260,00
119,50	424X	3.904,00	18.430,00	1.054,00	2.260,00
117,00	423X	3.998,00	20.440,00	1.060,00	2.260,00
114,50	422X	4.110,00	22.470,00	1.067,00	2.260,00
112,00	421X	4.206,00	24.530,00	1.072,00	2.260,00
109,50	420X	4.328,00	26.610,00	1.078,00	2.260,00
107,00	419X	4.440,00	28.710,00	1.084,00	2.260,00
104,50	418X	4.572,00	30.840,00	1.090,00	2.259,00
102,00	417X	4.688,00	32.990,00	1.095,00	2.259,00
99,50	416X	4.824,00	35.150,00	1.101,00	2.259,00
97,00	415X	4.943,00	37.350,00	1.106,00	2.259,00
94,50	414X	5.100,00	39.570,00	1.111,00	2.259,00
92,00	413X	5.223,00	41.810,00	1.115,00	2.259,00
89,50	412X	5.367,00	44.060,00	1.120,00	2.259,00
87,00	411X	5.494,00	46.340,00	1.124,00	2.259,00
84,50	410X	5.656,00	48.620,00	1.128,00	2.259,00
82,00	409X	5.815,00	50.920,00	1.132,00	2.259,00
79,50	408X	5.997,00	53.240,00	1.137,00	2.259,00
77,00	407X	6.160,00	55.570,00	1.142,00	2.259,00
74,50	406X	6.346,00	57.900,00	1.147,00	2.259,00
72,00	405X	6.560,00	60.250,00	1.152,00	2.259,00
69,50	404X	6.893,00	62.650,00	1.159,00	2.259,00
67,00	403X	7.151,00	65.490,00	1.164,00	2.259,00
64,50	402X	7.367,00	68.330,00	1.169,00	2.259,00
62,00	401X	7.931,00	71.240,00	1.178,00	2.259,00
59,50	400X	8.183,00	74.170,00	1.182,00	2.259,00

Maximallasten DLC 1.7					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.581,00	15.720,00	573,70	8.814,00
127,00	427X	3.638,00	15.300,00	574,30	8.814,00
124,50	426X	3.752,00	14.620,00	575,30	8.814,00
122,00	425X	3.854,00	13.950,00	576,20	8.814,00
119,50	424X	3.962,00	13.300,00	577,10	8.814,00
117,00	423X	4.056,00	12.660,00	577,90	8.814,00
114,50	422X	4.168,00	12.010,00	578,70	8.814,00
112,00	421X	4.264,00	11.370,00	579,30	8.814,00
109,50	420X	4.386,00	10.820,00	580,10	8.814,00
107,00	419X	4.498,00	12.040,00	580,80	8.814,00
104,50	418X	4.630,00	13.290,00	581,50	8.814,00
102,00	417X	4.746,00	14.550,00	582,10	8.814,00
99,50	416X	4.882,00	15.830,00	582,80	8.814,00
97,00	415X	5.001,00	17.120,00	583,40	8.814,00
94,50	414X	5.158,00	18.420,00	584,00	8.814,00
92,00	413X	5.281,00	19.720,00	584,50	8.814,00
89,50	412X	5.425,00	21.030,00	584,90	8.814,00
87,00	411X	5.552,00	22.340,00	585,20	8.814,00
84,50	410X	5.714,00	23.660,00	585,60	8.814,00
82,00	409X	5.873,00	24.980,00	586,00	8.814,00
79,50	408X	6.055,00	26.310,00	586,30	8.814,00
77,00	407X	6.218,00	27.630,00	586,50	8.814,00
74,50	406X	6.404,00	28.960,00	586,70	8.814,00
72,00	405X	6.618,00	30.290,00	586,80	8.814,00
69,50	404X	6.951,00	31.630,00	587,10	8.814,00
67,00	403X	7.209,00	32.960,00	587,10	8.814,00
64,50	402X	7.425,00	34.290,00	586,90	8.814,00
62,00	401X	7.989,00	35.620,00	587,20	8.814,00
59,50	400X	8.241,00	36.960,00	587,50	8.814,00

Maximallasten DLC 1.8					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.528,00	15.010,00	709,30	3.673,00
127,00	427X	3.585,00	14.750,00	711,70	3.673,00
124,50	426X	3.699,00	14.320,00	716,00	3.673,00
122,00	425X	3.801,00	13.900,00	719,60	3.673,00
119,50	424X	3.909,00	13.480,00	723,10	3.672,00
117,00	423X	4.003,00	13.070,00	725,90	3.672,00
114,50	422X	4.114,00	12.660,00	728,80	3.672,00
112,00	421X	4.211,00	12.260,00	731,10	3.672,00
109,50	420X	4.333,00	11.850,00	733,80	3.672,00
107,00	419X	4.445,00	12.210,00	736,00	3.672,00
104,50	418X	4.577,00	13.960,00	738,30	3.672,00
102,00	417X	4.693,00	15.740,00	740,10	3.672,00
99,50	416X	4.829,00	17.530,00	742,00	3.672,00
97,00	415X	4.948,00	19.340,00	743,50	3.672,00
94,50	414X	5.105,00	21.160,00	745,30	3.672,00
92,00	413X	5.228,00	22.990,00	746,40	3.672,00
89,50	412X	5.372,00	24.820,00	747,70	3.673,00
87,00	411X	5.498,00	26.660,00	748,60	3.673,00
84,50	410X	5.661,00	28.510,00	749,80	3.673,00
82,00	409X	5.820,00	30.360,00	751,00	3.673,00
79,50	408X	6.001,00	32.210,00	752,30	3.673,00
77,00	407X	6.165,00	34.070,00	753,40	3.673,00
74,50	406X	6.351,00	35.920,00	754,50	3.673,00
72,00	405X	6.565,00	37.780,00	755,90	3.673,00
69,50	404X	6.897,00	39.640,00	758,40	3.673,00
67,00	403X	7.155,00	41.500,00	760,20	3.673,00
64,50	402X	7.372,00	43.360,00	761,50	3.672,00
62,00	401X	7.935,00	45.230,00	767,00	3.672,00
59,50	400X	8.188,00	47.090,00	768,90	3.672,00

Maximallasten DLC 1.9					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.548,00	12.720,00	1.139,00	1.542,00
127,00	427X	3.605,00	13.480,00	1.141,00	1.542,00
124,50	426X	3.719,00	14.730,00	1.144,00	1.542,00
122,00	425X	3.821,00	16.020,00	1.147,00	1.542,00
119,50	424X	3.929,00	17.330,00	1.150,00	1.542,00
117,00	423X	4.023,00	18.670,00	1.153,00	1.542,00
114,50	422X	4.134,00	20.040,00	1.155,00	1.543,00
112,00	421X	4.231,00	21.430,00	1.157,00	1.543,00
109,50	420X	4.353,00	22.840,00	1.159,00	1.543,00
107,00	419X	4.465,00	24.270,00	1.161,00	1.543,00
104,50	418X	4.597,00	25.740,00	1.164,00	1.543,00
102,00	417X	4.713,00	27.260,00	1.166,00	1.543,00
99,50	416X	4.848,00	29.740,00	1.168,00	1.542,00
97,00	415X	4.968,00	32.620,00	1.170,00	1.542,00
94,50	414X	5.125,00	35.500,00	1.172,00	1.542,00
92,00	413X	5.248,00	38.390,00	1.173,00	1.542,00
89,50	412X	5.392,00	41.290,00	1.177,00	1.542,00
87,00	411X	5.518,00	44.200,00	1.179,00	1.542,00
84,50	410X	5.681,00	47.120,00	1.183,00	1.542,00
82,00	409X	5.840,00	50.040,00	1.186,00	1.542,00
79,50	408X	6.021,00	52.970,00	1.190,00	1.542,00
77,00	407X	6.185,00	55.910,00	1.193,00	1.542,00
74,50	406X	6.371,00	58.840,00	1.196,00	1.542,00
72,00	405X	6.585,00	61.790,00	1.199,00	1.542,00
69,50	404X	6.917,00	64.730,00	1.203,00	1.542,00
67,00	403X	7.176,00	67.670,00	1.206,00	1.542,00
64,50	402X	7.392,00	70.660,00	1.208,00	1.542,00
62,00	401X	7.955,00	73.690,00	1.214,00	1.542,00
59,50	400X	8.208,00	76.720,00	1.215,00	1.542,00

Maximallasten DLC 3.1					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.807,00	12.960,00	836,20	6.677,00
127,00	427X	3.864,00	12.790,00	838,20	6.677,00
124,50	426X	3.978,00	13.130,00	841,50	6.677,00
122,00	425X	4.081,00	13.490,00	844,10	6.677,00
119,50	424X	4.188,00	13.860,00	846,20	6.677,00
117,00	423X	4.282,00	14.310,00	847,70	6.677,00
114,50	422X	4.394,00	14.810,00	848,90	6.678,00
112,00	421X	4.491,00	15.320,00	849,50	6.678,00
109,50	420X	4.612,00	15.840,00	849,90	6.678,00
107,00	419X	4.725,00	16.360,00	850,00	6.677,00
104,50	418X	4.856,00	16.890,00	849,80	6.677,00
102,00	417X	4.972,00	18.480,00	849,30	6.677,00
99,50	416X	5.108,00	20.530,00	848,60	6.677,00
97,00	415X	5.227,00	22.600,00	847,90	6.677,00
94,50	414X	5.384,00	24.660,00	847,20	6.677,00
92,00	413X	5.507,00	26.730,00	846,80	6.677,00
89,50	412X	5.651,00	28.790,00	849,60	6.677,00
87,00	411X	5.778,00	30.850,00	853,10	6.677,00
84,50	410X	5.940,00	32.910,00	857,60	6.676,00
82,00	409X	6.099,00	34.960,00	861,80	6.676,00
79,50	408X	6.281,00	37.010,00	866,30	6.676,00
77,00	407X	6.444,00	39.050,00	870,00	6.676,00
74,50	406X	6.630,00	41.080,00	873,80	6.676,00
72,00	405X	6.845,00	43.110,00	877,80	6.676,00
69,50	404X	7.177,00	45.120,00	883,70	6.676,00
67,00	403X	7.435,00	47.140,00	887,70	6.676,00
64,50	402X	7.651,00	49.170,00	890,40	6.676,00
62,00	401X	8.215,00	51.300,00	898,40	6.676,00
59,50	400X	8.467,00	53.490,00	901,40	6.676,00

Maximallasten DLC 4.1					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.749,00	14.100,00	808,30	6.477,00
127,00	427X	3.806,00	14.170,00	809,70	6.477,00
124,50	426X	3.920,00	14.290,00	813,60	6.477,00
122,00	425X	4.022,00	14.460,00	816,50	6.477,00
119,50	424X	4.130,00	14.630,00	819,00	6.477,00
117,00	423X	4.224,00	14.800,00	820,70	6.478,00
114,50	422X	4.335,00	14.980,00	822,20	6.477,00
112,00	421X	4.432,00	15.160,00	823,20	6.478,00
109,50	420X	4.554,00	15.620,00	823,80	6.478,00
107,00	419X	4.666,00	16.160,00	826,10	6.478,00
104,50	418X	4.798,00	16.690,00	829,70	6.477,00
102,00	417X	4.914,00	17.890,00	832,70	6.477,00
99,50	416X	5.050,00	19.770,00	835,90	6.477,00
97,00	415X	5.169,00	21.670,00	838,40	6.477,00
94,50	414X	5.326,00	23.560,00	841,30	6.477,00
92,00	413X	5.449,00	25.460,00	843,10	6.477,00
89,50	412X	5.593,00	27.350,00	844,90	6.477,00
87,00	411X	5.719,00	29.240,00	848,10	6.477,00
84,50	410X	5.882,00	31.130,00	853,30	6.477,00
82,00	409X	6.041,00	33.020,00	857,90	6.477,00
79,50	408X	6.222,00	34.900,00	862,50	6.477,00
77,00	407X	6.386,00	36.910,00	866,10	6.477,00
74,50	406X	6.572,00	39.010,00	869,70	6.477,00
72,00	405X	6.786,00	41.110,00	873,20	6.477,00
69,50	404X	7.118,00	43.210,00	877,60	6.477,00
67,00	403X	7.377,00	45.300,00	880,00	6.477,00
64,50	402X	7.593,00	47.380,00	881,20	6.477,00
62,00	401X	8.156,00	49.450,00	884,40	6.477,00
59,50	400X	8.409,00	51.510,00	884,60	6.477,00

Maximallasten DLC 6.1 a S					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.300,00	12.150,00	636,50	599,00
127,00	427X	3.357,00	12.700,00	647,20	599,00
124,50	426X	3.471,00	13.580,00	666,70	598,90
122,00	425X	3.573,00	14.490,00	684,30	598,80
119,50	424X	3.681,00	15.400,00	702,00	598,80
117,00	423X	3.775,00	16.330,00	717,50	598,70
114,50	422X	3.886,00	17.270,00	734,40	598,70
112,00	421X	3.983,00	18.220,00	749,20	598,60
109,50	420X	4.105,00	19.180,00	765,90	598,60
107,00	419X	4.217,00	20.140,00	781,20	598,60
104,50	418X	4.349,00	21.120,00	797,50	598,60
102,00	417X	4.465,00	22.100,00	812,00	598,60
99,50	416X	4.600,00	23.080,00	827,30	598,50
97,00	415X	4.720,00	24.070,00	841,00	598,50
94,50	414X	4.877,00	25.070,00	856,50	598,50
92,00	413X	5.000,00	26.070,00	869,20	598,50
89,50	412X	5.144,00	27.060,00	882,60	598,60
87,00	411X	5.270,00	28.060,00	894,50	598,60
84,50	410X	5.433,00	29.340,00	907,60	598,60
82,00	409X	5.592,00	31.620,00	920,20	598,50
79,50	408X	5.773,00	33.930,00	933,00	598,50
77,00	407X	5.936,00	36.270,00	944,50	598,50
74,50	406X	6.123,00	38.640,00	956,30	598,50
72,00	405X	6.337,00	41.040,00	968,40	598,50
69,50	404X	6.669,00	43.480,00	983,40	598,40
67,00	403X	6.927,00	45.940,00	995,30	598,40
64,50	402X	7.143,00	48.440,00	1.005,00	598,30
62,00	401X	7.707,00	50.980,00	1.023,00	598,30
59,50	400X	7.959,00	53.550,00	1.033,00	598,20

Maximallasten DLC 6.1a T					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.755,00	13.830,00	736,20	4.818,00
127,00	427X	3.812,00	14.210,00	743,90	4.818,00
124,50	426X	3.925,00	14.840,00	761,00	4.818,00
122,00	425X	4.028,00	15.830,00	778,00	4.817,00
119,50	424X	4.136,00	16.890,00	795,00	4.817,00
117,00	423X	4.229,00	18.000,00	809,80	4.817,00
114,50	422X	4.341,00	19.160,00	826,00	4.816,00
112,00	421X	4.438,00	20.560,00	840,00	4.816,00
109,50	420X	4.559,00	22.100,00	856,00	4.816,00
107,00	419X	4.672,00	23.670,00	870,60	4.815,00
104,50	418X	4.803,00	25.270,00	886,40	4.815,00
102,00	417X	4.919,00	26.910,00	900,30	4.815,00
99,50	416X	5.055,00	28.570,00	915,30	4.815,00
97,00	415X	5.175,00	30.260,00	928,60	4.815,00
94,50	414X	5.332,00	31.960,00	944,40	4.814,00
92,00	413X	5.455,00	33.810,00	957,20	4.814,00
89,50	412X	5.598,00	35.870,00	970,90	4.814,00
87,00	411X	5.725,00	37.960,00	982,90	4.814,00
84,50	410X	5.887,00	40.080,00	996,50	4.814,00
82,00	409X	6.046,00	42.220,00	1.009,00	4.814,00
79,50	408X	6.228,00	44.390,00	1.023,00	4.813,00
77,00	407X	6.391,00	46.590,00	1.035,00	4.813,00
74,50	406X	6.578,00	48.810,00	1.047,00	4.813,00
72,00	405X	6.792,00	51.050,00	1.060,00	4.812,00
69,50	404X	7.124,00	53.310,00	1.076,00	4.812,00
67,00	403X	7.382,00	55.590,00	1.089,00	4.812,00
64,50	402X	7.598,00	57.900,00	1.099,00	4.811,00
62,00	401X	8.162,00	60.230,00	1.120,00	4.811,00
59,50	400X	8.414,00	62.570,00	1.130,00	4.811,00

Maximallasten DLC 6.1b					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.256,00	12.940,00	964,20	75,15
127,00	427X	3.314,00	13.690,00	980,50	75,16
124,50	426X	3.427,00	14.900,00	1.010,00	75,19
122,00	425X	3.530,00	16.130,00	1.037,00	75,19
119,50	424X	3.638,00	17.380,00	1.063,00	75,20
117,00	423X	3.731,00	18.640,00	1.086,00	75,20
114,50	422X	3.843,00	19.920,00	1.112,00	75,21
112,00	421X	3.940,00	21.210,00	1.134,00	75,23
109,50	420X	4.061,00	22.510,00	1.159,00	75,22
107,00	419X	4.174,00	23.820,00	1.182,00	75,22
104,50	418X	4.305,00	25.140,00	1.206,00	75,20
102,00	417X	4.421,00	27.450,00	1.228,00	75,18
99,50	416X	4.557,00	30.530,00	1.251,00	75,16
97,00	415X	4.676,00	33.670,00	1.271,00	75,16
94,50	414X	4.833,00	36.870,00	1.294,00	75,14
92,00	413X	4.956,00	40.120,00	1.313,00	75,11
89,50	412X	5.100,00	43.410,00	1.333,00	75,10
87,00	411X	5.227,00	46.760,00	1.350,00	75,07
84,50	410X	5.389,00	50.150,00	1.370,00	75,06
82,00	409X	5.548,00	53.590,00	1.388,00	75,04
79,50	408X	5.730,00	57.080,00	1.407,00	75,04
77,00	407X	5.893,00	60.620,00	1.424,00	75,02
74,50	406X	6.079,00	64.190,00	1.442,00	75,02
72,00	405X	6.294,00	67.820,00	1.460,00	75,01
69,50	404X	6.626,00	71.480,00	1.481,00	75,00
67,00	403X	6.884,00	75.200,00	1.499,00	75,02
64,50	402X	7.100,00	78.960,00	1.514,00	75,01
62,00	401X	7.663,00	82.780,00	1.540,00	75,04
59,50	400X	7.916,00	86.650,00	1.553,00	75,05

Maximallasten DLC 6.1c					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.329,00	12.590,00	723,60	417,10
127,00	427X	3.386,00	13.200,00	735,90	417,10
124,50	426X	3.500,00	14.210,00	758,00	417,00
122,00	425X	3.603,00	15.240,00	777,90	417,00
119,50	424X	3.710,00	16.280,00	797,70	417,00
117,00	423X	3.804,00	17.350,00	815,30	416,90
114,50	422X	3.916,00	18.420,00	834,40	416,90
112,00	421X	4.013,00	19.500,00	851,40	416,90
109,50	420X	4.134,00	20.600,00	870,80	416,90
107,00	419X	4.246,00	21.700,00	889,20	416,80
104,50	418X	4.378,00	22.820,00	909,60	416,80
102,00	417X	4.494,00	23.940,00	927,90	416,80
99,50	416X	4.630,00	25.080,00	947,70	416,80
97,00	415X	4.749,00	26.220,00	965,30	416,80
94,50	414X	4.906,00	27.360,00	985,60	416,80
92,00	413X	5.029,00	28.520,00	1.002,00	416,80
89,50	412X	5.173,00	29.850,00	1.020,00	416,80
87,00	411X	5.300,00	32.400,00	1.035,00	416,80
84,50	410X	5.462,00	34.990,00	1.052,00	416,80
82,00	409X	5.621,00	37.630,00	1.069,00	416,80
79,50	408X	5.803,00	40.310,00	1.085,00	416,80
77,00	407X	5.966,00	43.040,00	1.100,00	416,80
74,50	406X	6.152,00	45.800,00	1.115,00	416,80
72,00	405X	6.366,00	48.600,00	1.130,00	416,70
69,50	404X	6.699,00	51.440,00	1.149,00	416,70
67,00	403X	6.957,00	54.320,00	1.164,00	416,70
64,50	402X	7.173,00	57.240,00	1.176,00	416,70
62,00	401X	7.736,00	60.210,00	1.198,00	416,60
59,50	400X	7.989,00	63.220,00	1.209,00	416,60

B.2.1.2 Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen)

		Maximum aller Lastfälle				Minimum aller Lastfälle			
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.843,00	17.960,00	1.139,00	10.060,00	2.806,00	2.951,00	0,01	-8.306,00
127,00	427X	3.900,00	18.230,00	1.141,00	10.060,00	2.863,00	2.571,00	0,03	-8.306,00
124,50	426X	4.014,00	19.240,00	1.144,00	10.060,00	2.977,00	2.501,00	0,02	-8.306,00
122,00	425X	4.116,00	20.250,00	1.147,00	10.060,00	3.080,00	1.312,00	0,00	-8.306,00
119,50	424X	4.224,00	21.270,00	1.150,00	10.060,00	3.187,00	419,90	0,02	-8.305,00
117,00	423X	4.318,00	22.290,00	1.153,00	10.060,00	3.281,00	30,94	0,00	-8.305,00
114,50	422X	4.429,00	23.310,00	1.155,00	10.060,00	3.393,00	54,64	0,02	-8.305,00
112,00	421X	4.526,00	24.530,00	1.157,00	10.060,00	3.490,00	10,28	0,01	-8.305,00
109,50	420X	4.648,00	26.610,00	1.159,00	10.060,00	3.611,00	5,40	0,02	-8.305,00
107,00	419X	4.760,00	28.710,00	1.182,00	10.060,00	3.723,00	5,23	0,01	-8.305,00
104,50	418X	4.892,00	30.840,00	1.206,00	10.060,00	3.855,00	13,73	0,02	-8.305,00
102,00	417X	5.008,00	32.990,00	1.228,00	10.060,00	3.971,00	2,52	0,01	-8.305,00
99,50	416X	5.144,00	35.150,00	1.251,00	10.060,00	4.107,00	3,43	0,00	-8.305,00
97,00	415X	5.263,00	37.350,00	1.271,00	10.060,00	4.226,00	6,23	0,01	-8.305,00
94,50	414X	5.420,00	39.570,00	1.294,00	10.060,00	4.383,00	0,60	0,04	-8.305,00
92,00	413X	5.543,00	41.810,00	1.313,00	10.060,00	4.506,00	4,58	0,03	-8.305,00
89,50	412X	5.687,00	44.060,00	1.333,00	10.060,00	4.650,00	1,20	0,00	-8.305,00
87,00	411X	5.813,00	46.760,00	1.350,00	10.060,00	4.777,00	2,86	0,00	-8.305,00
84,50	410X	5.976,00	50.150,00	1.370,00	10.060,00	4.939,00	1,33	0,02	-8.305,00
82,00	409X	6.135,00	53.590,00	1.388,00	10.060,00	5.098,00	3,04	0,03	-8.305,00
79,50	408X	6.316,00	57.080,00	1.407,00	10.060,00	5.280,00	3,01	0,02	-8.305,00
77,00	407X	6.480,00	60.620,00	1.424,00	10.060,00	5.443,00	1,76	0,01	-8.305,00
74,50	406X	6.666,00	64.190,00	1.442,00	10.060,00	5.629,00	0,72	0,03	-8.305,00
72,00	405X	6.880,00	67.820,00	1.460,00	10.060,00	5.843,00	1,15	0,01	-8.305,00
69,50	404X	7.212,00	71.480,00	1.481,00	10.060,00	6.176,00	5,03	0,02	-8.305,00
67,00	403X	7.471,00	75.200,00	1.499,00	10.060,00	6.434,00	2,08	0,01	-8.305,00
64,50	402X	7.687,00	78.960,00	1.514,00	10.060,00	6.650,00	2,36	0,02	-8.304,00
62,00	401X	8.250,00	82.780,00	1.540,00	10.060,00	7.214,00	4,00	0,02	-8.304,00
59,50	400X	8.503,00	86.650,00	1.553,00	10.060,00	7.466,00	2,31	0,02	-8.304,00

B.2.1.3 Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Power Production Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen)

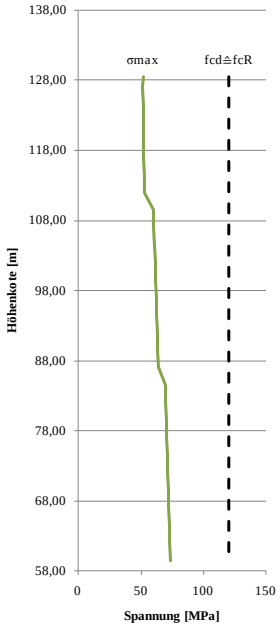
		Maximum der Power Production Lastfälle				Minimum der Power Production Lastfälle			
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.843,00	17.960,00	1.139,00	10.060,00	2.987,00	2.951,00	0,01	-8.306,00
127,00	427X	3.900,00	18.230,00	1.141,00	10.060,00	3.044,00	2.618,00	0,03	-8.306,00
124,50	426X	4.014,00	19.240,00	1.144,00	10.060,00	3.158,00	2.947,00	0,02	-8.306,00
122,00	425X	4.116,00	20.250,00	1.147,00	10.060,00	3.260,00	2.376,00	0,03	-8.306,00
119,50	424X	4.224,00	21.270,00	1.150,00	10.060,00	3.368,00	1.676,00	0,03	-8.305,00
117,00	423X	4.318,00	22.290,00	1.153,00	10.060,00	3.462,00	1.141,00	0,00	-8.305,00
114,50	422X	4.429,00	23.310,00	1.155,00	10.060,00	3.573,00	923,00	0,03	-8.305,00
112,00	421X	4.526,00	24.530,00	1.157,00	10.060,00	3.670,00	527,20	0,03	-8.305,00
109,50	420X	4.648,00	26.610,00	1.159,00	10.060,00	3.792,00	107,40	0,03	-8.305,00
107,00	419X	4.760,00	28.710,00	1.161,00	10.060,00	3.904,00	5,23	0,01	-8.305,00
104,50	418X	4.892,00	30.840,00	1.164,00	10.060,00	4.036,00	58,29	0,02	-8.305,00
102,00	417X	5.008,00	32.990,00	1.166,00	10.060,00	4.152,00	16,01	0,02	-8.305,00
99,50	416X	5.144,00	35.150,00	1.168,00	10.060,00	4.287,00	3,43	0,00	-8.305,00
97,00	415X	5.263,00	37.350,00	1.170,00	10.060,00	4.407,00	31,06	0,05	-8.305,00
94,50	414X	5.420,00	39.570,00	1.172,00	10.060,00	4.564,00	0,60	0,05	-8.305,00
92,00	413X	5.543,00	41.810,00	1.173,00	10.060,00	4.687,00	8,19	0,06	-8.305,00
89,50	412X	5.687,00	44.060,00	1.177,00	10.060,00	4.831,00	8,30	0,00	-8.305,00
87,00	411X	5.813,00	46.340,00	1.179,00	10.060,00	4.957,00	3,39	0,00	-8.305,00
84,50	410X	5.976,00	48.620,00	1.183,00	10.060,00	5.120,00	1,33	0,03	-8.305,00
82,00	409X	6.135,00	50.920,00	1.186,00	10.060,00	5.279,00	4,19	0,04	-8.305,00
79,50	408X	6.316,00	53.240,00	1.190,00	10.060,00	5.460,00	3,01	0,05	-8.305,00
77,00	407X	6.480,00	55.910,00	1.193,00	10.060,00	5.624,00	3,39	0,02	-8.305,00
74,50	406X	6.666,00	58.840,00	1.196,00	10.060,00	5.810,00	3,87	0,05	-8.305,00
72,00	405X	6.880,00	61.790,00	1.199,00	10.060,00	6.024,00	1,15	0,01	-8.305,00
69,50	404X	7.212,00	64.730,00	1.203,00	10.060,00	6.356,00	6,34	0,03	-8.305,00
67,00	403X	7.471,00	67.670,00	1.206,00	10.060,00	6.615,00	6,10	0,01	-8.305,00
64,50	402X	7.687,00	70.660,00	1.208,00	10.060,00	6.831,00	7,71	0,03	-8.304,00
62,00	401X	8.250,00	73.690,00	1.214,00	10.060,00	7.394,00	5,04	0,08	-8.304,00
59,50	400X	8.503,00	76.720,00	1.215,00	10.060,00	7.646,00	2,47	0,02	-8.304,00

B.2.1.4 Sonstige Schnittgrößen: $M_{LDD99\%}$, M_{temp}, M_{imp} (charakteristische Schnittgrößen)

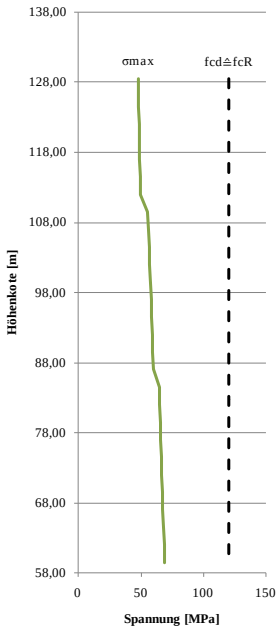
		LDD 99%	Mtemp	Mimp
Höhenkote [m]	Sensor	Myz [kNm]	Myz [kNm]	Myz [kNm]
128,57	428X	10.990,00	438,08	9.233,24
127,00	427X	10.850,00	446,44	9.418,45
124,50	426X	10.780,00	462,09	9.781,41
122,00	425X	10.725,00	475,13	10.102,61
119,50	424X	10.725,00	487,55	10.429,27
117,00	423X	10.721,00	497,55	10.710,09
114,50	422X	10.792,00	508,39	11.037,36
112,00	421X	10.800,00	516,94	11.314,44
109,50	420X	10.935,00	526,56	11.652,16
107,00	419X	11.430,00	534,59	11.957,43
104,50	418X	12.831,00	543,04	12.308,56
102,00	417X	14.440,00	549,66	12.609,55
99,50	416X	16.092,00	556,51	12.953,52
97,00	415X	17.880,00	561,79	13.246,70
94,50	414X	19.630,00	567,81	13.623,23
92,00	413X	21.280,00	571,91	13.910,17
89,50	412X	23.100,00	575,97	14.236,67
87,00	411X	24.794,00	579,00	14.516,31
84,50	410X	26.676,00	582,17	14.862,40
82,00	409X	28.417,00	584,73	15.191,69
79,50	408X	30.144,00	587,03	15.556,69
77,00	407X	31.916,00	588,65	15.872,91
74,50	406X	33.654,00	589,99	16.221,58
72,00	405X	35.457,00	591,12	16.608,72
69,50	404X	37.365,00	592,23	17.189,35
67,00	403X	41.405,00	592,79	17.622,32
64,50	402X	56.610,00	592,99	17.970,66
62,00	401X	59.095,00	593,26	18.843,30
59,50	400X	61.325,00	593,26	19.216,71

B.2.2 Nachweise

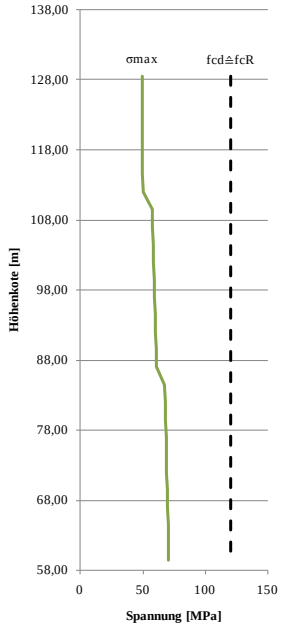
B.2.2.1 Normalspannungsnachweis (ULS)



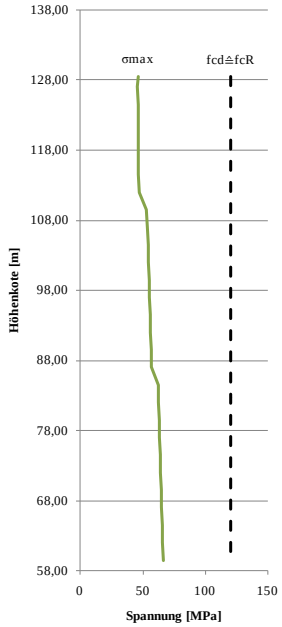
mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P0}$
M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle
$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle



mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P\infty}$
M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle
$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

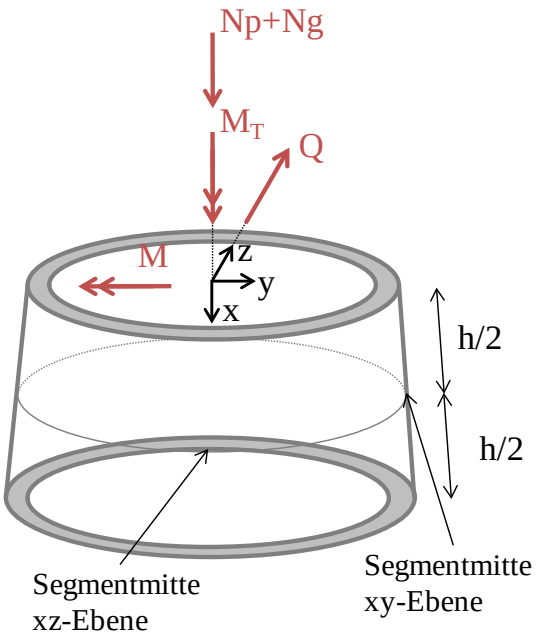


mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P0}$
M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle
$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle



mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P\infty}$
M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle
$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

B.2.2.2 Schubspannungsnachweis (ULS)



Maximalwert aus alle DLCs **ULS**

UHFFB-Turm	Höhenkote	Querkraft	Querkraft	Torsion	Torsion					Segmentmitte x-y-Ebene σ= N/A					Segmentmitte x-z-Ebene σ = M/W +N/A				
		V_k	V_{Ed}	M_k	M_{Ed}	$\tau_{torsion}$	+	$\tau_{Querkraft}$	=	σx	σy	$\tau_{max,Ed}$	DRUCK positiv σ1	ZUG negativ σ2	σx	σy	$\tau_{max,Ed}$	DRUCK positiv σ1	ZUG negativ σ2
	[m]	[kN]	1,35	[kNm]	1,35	[kN/m²]		[kN/m²]		[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[Mpa]	[Mpa]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[Mpa]	[Mpa]
	128,57																		
	127,00	1.139,00	1.537,65	10.060,00	13.581,00	**5.059,53**	+	**2.261,79**	=	**7.321,32**	**31.315,00**	**0,00**	**7.321,32**	32,94 -1,63	**13.200,74**	**0,00**	**5.059,53**	14,92	-1,72
	124,50	1.141,00	1.540,35	10.060,00	13.581,00														
	122,00	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00	**4.708,37**	+	**2.193,36**	=	**6.901,73**	**30.361,71**	**0,00**	**6.901,73**	31,86 -1,50	**10.848,87**	**0,00**	**4.708,37**	12,61	-1,76
	119,50	1.147,00	1.548,45	10.060,00	13.581,00														
	117,00	1.150,00	1.552,50	10.060,00	13.581,00	**4.392,53**	+	**2.129,60**	=	**6.522,14**	**29.463,91**	**0,00**	**6.522,14**	30,84 -1,38	**8.743,73**	**0,00**	**4.392,53**	10,57	-1,83
	114,50	1.153,00	1.556,55	10.060,00	13.581,00														
	112,00	1.155,00	1.559,25	10.060,00	13.581,00	**4.107,45**	+	**2.066,48**	=	**6.173,93**	**28.629,32**	**0,00**	**6.173,93**	29,90 -1,27	**6.727,84**	**0,00**	**4.107,45**	8,67	-1,95
	109,50	1.157,00	1.561,95	10.060,00	13.581,00														
	107,00	1.159,00	1.564,65	10.060,00	13.581,00	**3.409,93**	+	**1.804,44**	=	**5.214,38**	**36.554,20**	**0,00**	**5.214,38**	37,28 -0,73	**14.853,34**	**0,00**	**3.409,93**	15,60	-0,75
	104,50	1.182,00	1.595,70	10.060,00	13.581,00														
	102,00	1.206,00	1.628,10	10.060,00	13.581,00	**3.201,44**	+	**1.816,45**	=	**5.017,90**	**35.554,95**	**0,00**	**5.017,90**	36,25 -0,69	**11.870,85**	**0,00**	**3.201,44**	12,68	-0,81
	99,50	1.228,00	1.657,80	10.060,00	13.581,00														
	97,00	1.251,00	1.688,85	10.060,00	13.581,00	**3.011,51**	+	**1.823,44**	=	**4.834,94**	**34.619,61**	**0,00**	**4.834,94**	35,28 -0,66	**9.175,60**	**0,00**	**3.011,51**	10,08	-0,90
	94,50	1.271,00	1.715,85	10.060,00	13.581,00														
	92,00	1.294,00	1.746,90	10.060,00	13.581,00	**2.837,99**	+	**1.828,62**	=	**4.666,60**	**33.751,86**	**0,00**	**4.666,60**	34,39 -0,63	**6.735,12**	**0,00**	**2.837,99**	7,77	-1,04
	89,50	1.313,00	1.772,55	10.060,00	13.581,00														
	87,00	1.333,00	1.799,55	10.060,00	13.581,00	**2.679,04**	+	**1.826,74**	=	**4.505,78**	**32.928,40**	**0,00**	**4.505,78**	33,53 -0,61	**4.285,95**	**0,00**	**2.679,04**	5,57	-1,29
	84,50	1.350,00	1.822,50	10.060,00	13.581,00														
	82,00	1.370,00	1.849,50	10.060,00	13.581,00	**2.066,47**	+	**1.481,31**	=	**3.547,78**	**42.808,43**	**0,00**	**3.547,78**	43,10 -0,29	**17.362,71**	**0,00**	**2.066,47**	17,61	-0,24
	79,50	1.388,00	1.873,80	10.060,00	13.581,00														
	77,00	1.407,00	1.899,45	10.060,00	13.581,00	**1.956,26**	+	**1.478,65**	=	**3.434,92**	**41.783,98**	**0,00**	**3.434,92**	42,06 -0,28	**14.569,01**	**0,00**	**1.956,26**	14,83	-0,26
	74,50	1.424,00	1.922,40	10.060,00	13.581,00														
	72,00	1.442,00	1.946,70	10.060,00	13.581,00	**1.854,64**	+	**1.476,13**	=	**3.330,78**	**40.834,05**	**0,00**	**3.330,78**	41,10 -0,27	**12.011,15**	**0,00**	**1.854,64**	12,29	-0,28
	69,50	1.460,00	1.971,00	10.060,00	13.581,00														
	67,00	1.481,00	1.999,35	10.060,00	13.581,00	**1.760,74**	+	**1.476,70**	=	**3.237,44**	**40.002,52**	**0,00**	**3.237,44**	40,26 -0,26	**9.724,84**	**0,00**	**1.760,74**	10,03	-0,31
	64,50	1.499,00	2.023,65	10.060,00	13.581,00														
	62,00	1.514,00	2.043,90	10.060,00	13.581,00	**1.673,80**	+	**1.479,16**	=	**3.152,95**	**39.279,46**	**0,00**	**3.152,95**	39,53 -0,25	**7.677,16**	**0,00**	**1.673,80**	8,03	-0,35
	59,50	1.540,00	2.079,00	10.060,00	13.581,00														
		1.553,00	2.096,55	10.060,00	13.581,00														

mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P0}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

Maximalwert aus alle DLCs — ULS — UHFFB-Turm

Höhenkote	Querkraft V_k	Querkraft V_{ed}	Torsion M_k	Torsion M_{ed}	$\tau_{Torsion}$	+	$\tau_{Querkraft}$	=	$\tau_{max,Ed}$
[m]	[kN]	1,35	[kNm]	1,35	[kN/m²]		[kN/m²]		[kN/m²]
128,57	1.139,00	1.537,65	10.060,00	13.581,00					
127,00	1.141,00	1.540,35	10.060,00	13.581,00	5.059,53	+	2.261,79	=	7.321,32
124,50	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00					
122,00	1.147,00	1.548,45	10.060,00	13.581,00	4.708,37	+	2.193,36	=	6.901,73
119,50	1.150,00	1.552,50	10.060,00	13.581,00					
117,00	1.153,00	1.556,55	10.060,00	13.581,00	4.392,53	+	2.129,60	=	6.522,14
114,50	1.155,00	1.559,25	10.060,00	13.581,00					
112,00	1.157,00	1.561,95	10.060,00	13.581,00	4.107,45	+	2.066,48	=	6.173,93
109,50	1.159,00	1.564,65	10.060,00	13.581,00					
107,00	1.182,00	1.595,70	10.060,00	13.581,00	3.409,93	+	1.804,44	=	5.214,38
104,50	1.206,00	1.628,10	10.060,00	13.581,00					
102,00	1.228,00	1.657,80	10.060,00	13.581,00	3.201,44	+	1.816,45	=	5.017,90
99,50	1.251,00	1.688,85	10.060,00	13.581,00					
97,00	1.271,00	1.715,85	10.060,00	13.581,00	3.011,51	+	1.823,44	=	4.834,94
94,50	1.294,00	1.746,90	10.060,00	13.581,00					
92,00	1.313,00	1.772,55	10.060,00	13.581,00	2.837,99	+	1.828,62	=	4.666,60
89,50	1.333,00	1.799,55	10.060,00	13.581,00					
87,00	1.350,00	1.822,50	10.060,00	13.581,00	2.679,04	+	1.826,74	=	4.505,78
84,50	1.370,00	1.849,50	10.060,00	13.581,00					
82,00	1.388,00	1.873,80	10.060,00	13.581,00	2.066,47	+	1.481,31	=	3.547,78
79,50	1.407,00	1.899,45	10.060,00	13.581,00					
77,00	1.424,00	1.922,40	10.060,00	13.581,00	1.956,26	+	1.478,65	=	3.434,92
74,50	1.442,00	1.946,70	10.060,00	13.581,00					
72,00	1.460,00	1.971,00	10.060,00	13.581,00	1.854,64	+	1.476,13	=	3.330,78
69,50	1.481,00	1.999,35	10.060,00	13.581,00					
67,00	1.499,00	2.023,65	10.060,00	13.581,00	1.760,74	+	1.476,70	=	3.237,44
64,50	1.514,00	2.043,90	10.060,00	13.581,00					
62,00	1.540,00	2.079,00	10.060,00	13.581,00	1.673,80	+	1.479,16	=	3.152,95
59,50	1.553,00	2.096,55	10.060,00	13.581,00					

Segmentmitte x-y-Ebene σ= N/A

σx	σy	$\tau_{max,Ed}$	DRUCK positiv σ1	ZUG negativ σ2
[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[Mpa]	[Mpa]
27.758,54	0,00	7.321,32	29,57	-1,81
26.930,90	0,00	6.901,73	28,60	-1,67
26.150,16	0,00	6.522,14	27,69	-1,54
25.424,91	0,00	6.173,93	26,84	-1,42
27.092,52	0,00	5.214,38	28,06	-0,97
26.387,08	0,00	5.017,90	27,31	-0,92
25.727,86	0,00	4.834,94	26,61	-0,88
25.120,08	0,00	4.666,60	25,96	-0,84
24.541,82	0,00	4.505,78	25,34	-0,80
32.886,63	0,00	3.547,78	33,27	-0,38
32.130,37	0,00	3.434,92	32,49	-0,36
31.434,52	0,00	3.330,78	31,78	-0,35
30.844,04	0,00	3.237,44	31,18	-0,34
30.349,96	0,00	3.152,95	30,67	-0,32

Segmentmitte x-z-Ebene σ = M/W +N/A

σx	σy	$\tau_{max,Ed}$	DRUCK positiv σ1	ZUG negativ σ2
[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[Mpa]	[Mpa]
9.628,23	0,00	5.059,53	11,80	-2,17
7.354,33	0,00	4.708,37	9,65	-2,30
5.322,70	0,00	4.392,53	7,80	-2,47
3.376,36	0,00	4.107,45	6,13	-2,75
5.228,49	0,00	3.409,93	6,91	-1,68
2.509,76	0,00	3.201,44	4,69	-2,18
62,84	0,00	3.011,51	3,04	-2,98
-2.138,75	0,00	2.837,99	1,96	-4,10
-4.351,21	0,00	2.679,04	1,28	-5,63
7.234,36	0,00	2.066,47	7,78	-0,55
4.707,99	0,00	1.956,26	5,41	-0,71
2.403,20	0,00	1.854,64	3,41	-1,01
356,72	0,00	1.760,74	1,95	-1,59
-1.459,80	0,00	1.673,80	1,10	-2,56

mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P\infty}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

Maximalwert aus alle DLCs — ULS

UHFFB-Turm	Höhenkote	Querkraft	Querkraft	Torsion	Torsion					Segmentmitte x-y-Ebene σ= N/A					Segmentmitte x-z-Ebene σ = M/W +N/A				
		V_k	V_{ed}	M_k	M_{ed}	$\tau_{Torsion}$	+	$\tau_{Querkraft}$	= $\tau_{max,Ed}$	σx	σy	$\tau_{max,Ed}$	DRUCK positiv ZUG negativ σ1	σ2	σx	σy	$\tau_{max,Ed}$	DRUCK positiv ZUG negativ σ1	σ2
	[m]	[kN]	1,35	[kNm]	1,35	[kN/m²]		[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[Mpa]	[Mpa]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[Mpa]	[Mpa]
	128,57	1.139,00	1.537,65	10.060,00	13.581,00														
	127,00	1.141,00	1.540,35	10.060,00	13.581,00	5.059,53	+	2.261,79	= 7.321,32		30.553,65	0,00	7.321,32	32,22	-1,66	11.291,50	0,00	5.059,53	13,23	-1,94
	124,50	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00														
	122,00	1.147,00	1.548,45	10.060,00	13.581,00	4.708,37	+	2.193,36	= 6.901,73		29.627,97	0,00	6.901,73	31,16	-1,53	9.115,33	0,00	4.708,37	11,11	-2,00
	119,50	1.150,00	1.552,50	10.060,00	13.581,00														
	117,00	1.153,00	1.556,55	10.060,00	13.581,00	4.392,53	+	2.129,60	= 6.522,14		28.754,52	0,00	6.522,14	30,16	-1,41	7.158,37	0,00	4.392,53	9,25	-2,09
	114,50	1.155,00	1.559,25	10.060,00	13.581,00														
	112,00	1.157,00	1.561,95	10.060,00	13.581,00	4.107,45	+	2.066,48	= 6.173,93		27.944,00	0,00	6.173,93	29,25	-1,30	5.262,87	0,00	4.107,45	7,51	-2,25
	109,50	1.159,00	1.564,65	10.060,00	13.581,00														
	107,00	1.182,00	1.595,70	10.060,00	13.581,00	3.409,93	+	1.804,44	= 5.214,38		35.967,87	0,00	5.214,38	36,71	-0,74	13.641,76	0,00	3.409,93	14,45	-0,80
	104,50	1.206,00	1.628,10	10.060,00	13.581,00														
	102,00	1.228,00	1.657,80	10.060,00	13.581,00	3.201,44	+	1.816,45	= 5.017,90		34.986,83	0,00	5.017,90	35,69	-0,71	10.718,52	0,00	3.201,44	11,60	-0,88
	99,50	1.251,00	1.688,85	10.060,00	13.581,00														
	97,00	1.271,00	1.715,85	10.060,00	13.581,00	3.011,51	+	1.823,44	= 4.834,94		34.068,60	0,00	4.834,94	34,74	-0,67	8.066,66	0,00	3.011,51	9,07	-1,00
	94,50	1.294,00	1.746,90	10.060,00	13.581,00														
	92,00	1.313,00	1.772,55	10.060,00	13.581,00	2.837,99	+	1.828,62	= 4.666,60		33.216,96	0,00	4.666,60	33,86	-0,64	5.655,50	0,00	2.837,99	6,83	-1,18
	89,50	1.333,00	1.799,55	10.060,00	13.581,00														
	87,00	1.350,00	1.822,50	10.060,00	13.581,00	2.679,04	+	1.826,74	= 4.505,78		32.409,20	0,00	4.505,78	33,02	-0,61	3.237,25	0,00	2.679,04	4,75	-1,51
	84,50	1.370,00	1.849,50	10.060,00	13.581,00														
	82,00	1.388,00	1.873,80	10.060,00	13.581,00	2.066,47	+	1.481,31	= 3.547,78		42.398,54	0,00	3.547,78	42,69	-0,29	16.531,24	0,00	2.066,47	16,79	-0,25
	79,50	1.407,00	1.899,45	10.060,00	13.581,00														
	77,00	1.424,00	1.922,40	10.060,00	13.581,00	1.956,26	+	1.478,65	= 3.434,92		41.385,16	0,00	3.434,92	41,67	-0,28	13.740,30	0,00	1.956,26	14,01	-0,27
	74,50	1.442,00	1.946,70	10.060,00	13.581,00														
	72,00	1.460,00	1.971,00	10.060,00	13.581,00	1.854,64	+	1.476,13	= 3.330,78		40.445,73	0,00	3.330,78	40,72	-0,27	11.170,81	0,00	1.854,64	11,47	-0,30
	69,50	1.481,00	1.999,35	10.060,00	13.581,00														
	67,00	1.499,00	2.023,65	10.060,00	13.581,00	1.760,74	+	1.476,70	= 3.237,44		39.624,16	0,00	3.237,44	39,89	-0,26	8.837,42	0,00	1.760,74	9,18	-0,34
	64,50	1.514,00	2.043,90	10.060,00	13.581,00														
	62,00	1.540,00	2.079,00	10.060,00	13.581,00	1.673,80	+	1.479,16	= 3.152,95		38.910,92	0,00	3.152,95	39,16	-0,25	6.714,11	0,00	1.673,80	7,11	-0,39
	59,50	1.553,00	2.096,55	10.060,00	13.581,00														

mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P0}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

UHFFB-Turm

Maximalwert aus alle DLCs — ULS

Höhenkote [m]	Querkraft V_k [kN]	Querkraft V_{ed} (1,35)	Torsion M_k [kNm]	Torsion M_{ed} (1,35)	$\tau_{Torsion}$ [kN/m²]	+	$\tau_{Querkraft}$ [kN/m²]	=	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]
128,57	1.139,00	1.537,65	10.060,00	13.581,00					
127,00	1.141,00	1.540,35	10.060,00	13.581,00	5.059,53	+	2.261,79	=	7.321,32
124,50	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00					
122,00	1.147,00	1.548,45	10.060,00	13.581,00	4.708,37	+	2.193,36	=	6.901,73
119,50	1.150,00	1.552,50	10.060,00	13.581,00					
117,00	1.153,00	1.556,55	10.060,00	13.581,00	4.392,53	+	2.129,60	=	6.522,14
114,50	1.155,00	1.559,25	10.060,00	13.581,00					
112,00	1.157,00	1.561,95	10.060,00	13.581,00	4.107,45	+	2.066,48	=	6.173,93
109,50	1.159,00	1.564,65	10.060,00	13.581,00					
107,00	1.182,00	1.595,70	10.060,00	13.581,00	3.409,93	+	1.804,44	=	5.214,38
104,50	1.206,00	1.628,10	10.060,00	13.581,00					
102,00	1.228,00	1.657,80	10.060,00	13.581,00	3.201,44	+	1.816,45	=	5.017,90
99,50	1.251,00	1.688,85	10.060,00	13.581,00					
97,00	1.271,00	1.715,85	10.060,00	13.581,00	3.011,51	+	1.823,44	=	4.834,94
94,50	1.294,00	1.746,90	10.060,00	13.581,00					
92,00	1.313,00	1.772,55	10.060,00	13.581,00	2.837,99	+	1.828,62	=	4.666,60
89,50	1.333,00	1.799,55	10.060,00	13.581,00					
87,00	1.350,00	1.822,50	10.060,00	13.581,00	2.679,04	+	1.826,74	=	4.505,78
84,50	1.370,00	1.849,50	10.060,00	13.581,00					
82,00	1.388,00	1.873,80	10.060,00	13.581,00	2.066,47	+	1.481,31	=	3.547,78
79,50	1.407,00	1.899,45	10.060,00	13.581,00					
77,00	1.424,00	1.922,40	10.060,00	13.581,00	1.956,26	+	1.478,65	=	3.434,92
74,50	1.442,00	1.946,70	10.060,00	13.581,00					
72,00	1.460,00	1.971,00	10.060,00	13.581,00	1.854,64	+	1.476,13	=	3.330,78
69,50	1.481,00	1.999,35	10.060,00	13.581,00					
67,00	1.499,00	2.023,65	10.060,00	13.581,00	1.760,74	+	1.476,70	=	3.237,44
64,50	1.514,00	2.043,90	10.060,00	13.581,00					
62,00	1.540,00	2.079,00	10.060,00	13.581,00	1.673,80	+	1.479,16	=	3.152,95
59,50	1.553,00	2.096,55	10.060,00	13.581,00					

Höhenkote [m]	Segmentmitte x-y-Ebene σ= N/A: σx [kN/m²]	σy [kN/m²]	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]	DRUCK positiv σ1 [Mpa]	ZUG negativ σ2 [Mpa]	Segmentmitte x-z-Ebene σ = M/W +N/A: σx [kN/m²]	σy [kN/m²]	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]	DRUCK positiv σ1 [Mpa]	ZUG negativ σ2 [Mpa]
127,00	26.997,19	0,00	7.321,32	28,85	-1,86	7.750,03	0,00	5.059,53	10,25	-2,50
122,00	26.197,15	0,00	6.901,73	27,90	-1,71	5.744,43	0,00	4.708,37	8,39	-2,64
117,00	25.440,77	0,00	6.522,14	27,02	-1,57	3.946,24	0,00	4.392,53	6,79	-2,84
112,00	24.739,59	0,00	6.173,93	26,19	-1,46	2.198,60	0,00	4.107,45	5,35	-3,15
107,00	31.735,02	0,00	5.214,38	32,57	-0,83	9.565,16	0,00	3.409,93	10,66	-1,09
102,00	30.885,42	0,00	5.017,90	31,68	-0,79	6.802,94	0,00	3.201,44	8,07	-1,27
97,00	30.090,72	0,00	4.834,94	30,85	-0,76	4.302,13	0,00	3.011,51	5,85	-1,55
92,00	29.355,38	0,00	4.666,60	30,08	-0,72	2.029,17	0,00	2.837,99	4,03	-2,00
87,00	28.657,31	0,00	4.505,78	29,35	-0,69	-268,05	0,00	2.679,04	2,55	-2,82
82,00	37.350,61	0,00	3.547,78	37,68	-0,33	11.689,66	0,00	2.066,47	12,04	-0,35
77,00	36.473,68	0,00	3.434,92	36,79	-0,32	9.038,83	0,00	1.956,26	9,44	-0,41
72,00	35.663,51	0,00	3.330,78	35,97	-0,31	6.602,14	0,00	1.854,64	7,09	-0,49
67,00	34.964,58	0,00	3.237,44	35,26	-0,30	4.394,94	0,00	1.760,74	5,01	-0,62
62,00	34.367,84	0,00	3.152,95	34,65	-0,29	2.388,63	0,00	1.673,80	3,25	-0,86

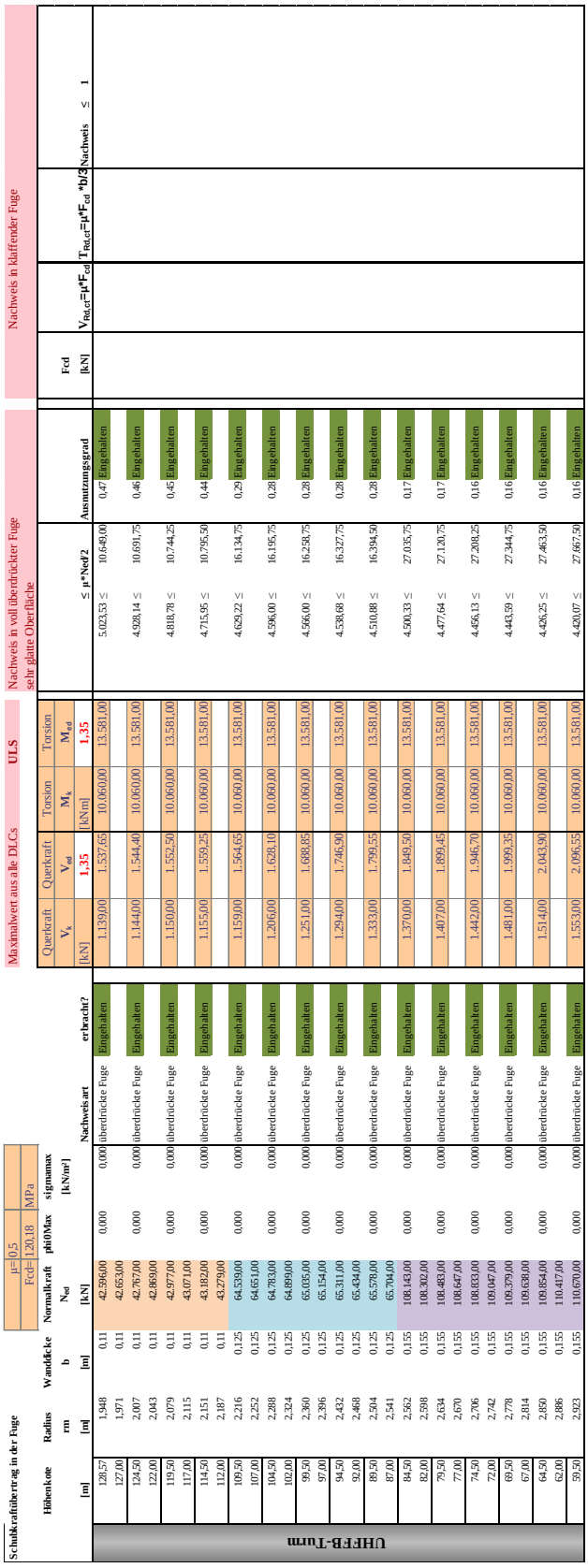
mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P\infty}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

B.2.2.3 Kraftübertrag in der Fuge (ULS)



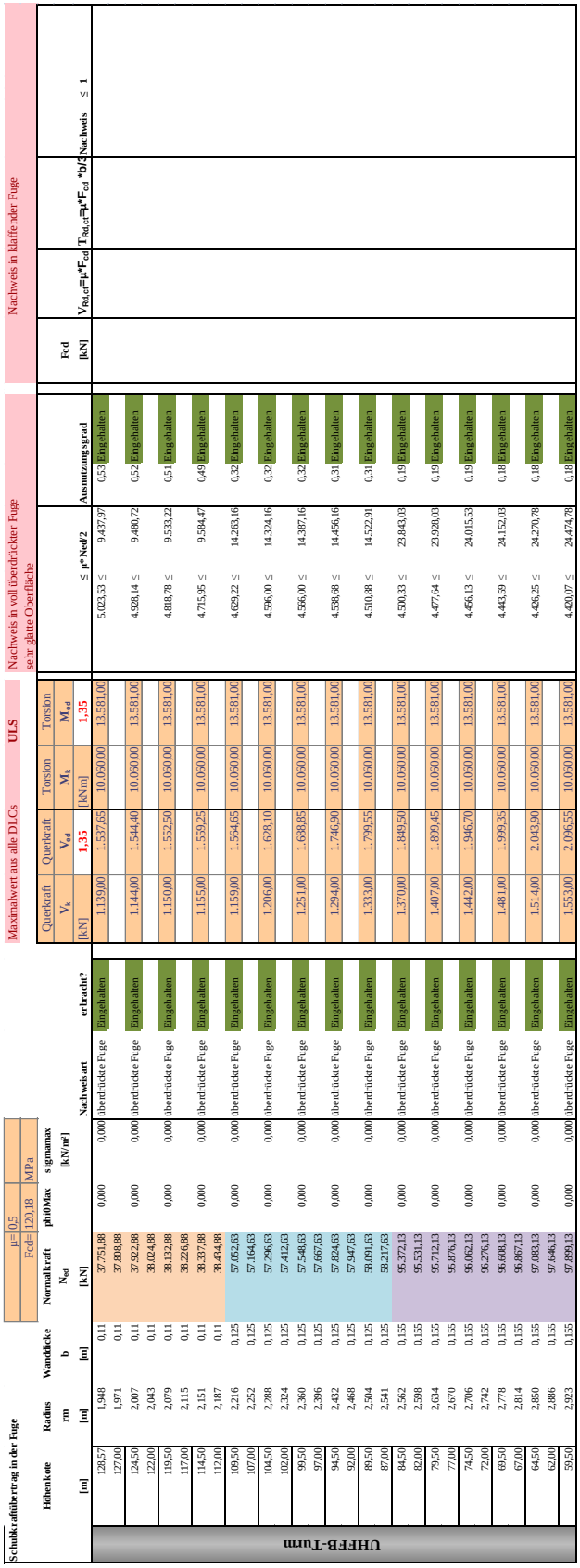
Schubkraftübertrag in der Fuge						μ= 0,5				Maximalwert aus alle DLCs		ULS	Nachweis in voll überdrückter Fuge sehr glatte Oberfläche					Nachweis in klaffender Fuge			
						Fcd= 120,18	MPa														
	Höhenkote	Radius rm	Wanddicke b	Normalkraft N_{ed}	phi0Max	signamax				Querkraft V_k	Querkraft V_{ed}	Torsion M_k	Torsion M_{ed}			Ausnutzungsgrad	Fcd	$V_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}$	$T_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}*b/3$	Nachweis	
	[m]	[m]	[m]	[kN]		[kN/m²]	Nachweisart	erbracht?		[kN]	1,35	[kNm]	1,35		≤	$\mu*N_{ed}/2$	[kN]				≤ 1
UHFFB-Turm	129,57	1.948	0,11	42.596,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.139,00	1.537,65	10.060,00	13.581,00			5.023,53	≤	10.649,00	0,47	Eingehalten	
	127,00	1.971	0,11	42.653,00																	
	124,50	2.007	0,11	42.767,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00			4.928,14	≤	10.691,75	0,46	Eingehalten	
	122,00	2.043	0,11	42.869,00																	
	119,50	2.079	0,11	42.977,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.150,00	1.552,50	10.060,00	13.581,00			4.818,78	≤	10.744,25	0,45	Eingehalten	
	117,00	2.115	0,11	43.077,00																	
	114,50	2.151	0,11	43.182,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.155,00	1.559,25	10.060,00	13.581,00			4.715,95	≤	10.795,50	0,44	Eingehalten	
	112,00	2.187	0,11	43.279,00																	
	109,50	2.216	0,125	64.539,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.159,00	1.564,65	10.060,00	13.581,00			4.629,22	≤	16.134,75	0,29	Eingehalten	
	107,00	2.252	0,125	64.651,00																	
	104,50	2.288	0,125	64.783,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.206,00	1.628,10	10.060,00	13.581,00			4.396,00	≤	16.195,75	0,28	Eingehalten	
	102,00	2.324	0,125	64.899,00																	
	99,50	2.360	0,125	65.035,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.251,00	1.688,85	10.060,00	13.581,00			4.566,00	≤	16.238,75	0,28	Eingehalten	
	97,00	2.396	0,125	65.154,00																	
	94,50	2.432	0,125	65.311,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.294,00	1.746,90	10.060,00	13.581,00			4.538,68	≤	16.327,75	0,28	Eingehalten	
	92,00	2.468	0,125	65.434,00																	
	89,50	2.504	0,125	65.578,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.333,00	1.799,55	10.060,00	13.581,00			4.510,88	≤	16.394,50	0,28	Eingehalten	
	87,00	2.541	0,125	65.704,00																	
	84,50	2.562	0,155	108.143,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.370,00	1.849,50	10.060,00	13.581,00			4.500,33	≤	27.035,75	0,17	Eingehalten	
	82,00	2.598	0,155	108.302,00																	
	79,50	2.634	0,155	108.483,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.407,00	1.899,45	10.060,00	13.581,00			4.477,64	≤	27.120,75	0,17	Eingehalten	
	77,00	2.670	0,155	108.647,00																	
	74,50	2.706	0,155	108.833,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.442,00	1.946,70	10.060,00	13.581,00			4.456,13	≤	27.208,25	0,16	Eingehalten	
	72,00	2.742	0,155	109.047,00																	
	69,50	2.778	0,155	109.379,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.481,00	1.999,35	10.060,00	13.581,00			4.443,59	≤	27.344,75	0,16	Eingehalten	
	67,00	2.814	0,155	109.638,00																	
	64,50	2.850	0,155	109.854,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.514,00	2.043,90	10.060,00	13.581,00			4.426,25	≤	27.463,50	0,16	Eingehalten	
	62,00	2.886	0,155	110.417,00																	
	59,50	2.923	0,155	110.670,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.553,00	2.096,55	10.060,00	13.581,00			4.420,07	≤	27.667,50	0,16	Eingehalten	

mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P0}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle



Schubkraftübertrag in der Fuge						μ= 0,5			Maximalwert aus alle DLCs				ULS		Nachweis in voll überdrückter Fuge sehr glatte Oberfläche			Nachweis in klaffender Fuge			
						fcd= 120,18	MPa														
	Höhenkote	Radius rm	Wanddicke b	Normalkraft N_{ed}	ph100Max	sigmamax			Querkraft V_k	Querkraft V_{ed}	Torsion M_k	Torsion M_{ed}					Fcd	$V_{Rd,ct}=\mu^*F_{cd}$	$T_{Rd,ct}=\mu^*F_{cd}$	$^*b/3$	Nachweis ≤ 1
UHFFB-Turm	[m]	[m]	[m]	[kN]		[kN/m²]	Nachweis art	erbracht?	[kN]	1,35	[kNm]	1,35			≤ $\mu^*Ned/2$	Ausnutzungsgrad	[kN]				
	128,57	1,948	0,11	37.751,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.139,00	1.537,65	10.060,00	13.581,00			5.023,53 ≤	9.437,97	0,53	Eingehalten			
	127,00	1,971	0,11	37.808,88																	
	124,50	2,007	0,11	37.922,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00			4.928,14 ≤	9.480,72	0,52	Eingehalten			
	122,00	2,043	0,11	38.024,88																	
	119,50	2,079	0,11	38.132,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.150,00	1.552,50	10.060,00	13.581,00			4.818,78 ≤	9.533,22	0,51	Eingehalten			
	117,00	2,115	0,11	38.226,88																	
	114,50	2,151	0,11	38.337,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.155,00	1.559,25	10.060,00	13.581,00			4.715,95 ≤	9.584,47	0,49	Eingehalten			
	112,00	2,187	0,11	38.434,88																	
	109,50	2,216	0,125	57.052,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.159,00	1.564,65	10.060,00	13.581,00			4.629,22 ≤	14.263,16	0,32	Eingehalten			
	107,00	2,252	0,125	57.164,63																	
	104,50	2,288	0,125	57.296,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.206,00	1.628,10	10.060,00	13.581,00			4.596,00 ≤	14.324,16	0,32	Eingehalten			
	102,00	2,324	0,125	57.412,63																	
	99,50	2,360	0,125	57.548,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.251,00	1.688,85	10.060,00	13.581,00			4.566,00 ≤	14.387,16	0,32	Eingehalten			
	97,00	2,396	0,125	57.667,63																	
	94,50	2,432	0,125	57.824,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.294,00	1.746,90	10.060,00	13.581,00			4.538,68 ≤	14.456,16	0,31	Eingehalten			
	92,00	2,468	0,125	57.947,63																	
	89,50	2,504	0,125	58.091,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.333,00	1.799,55	10.060,00	13.581,00			4.510,88 ≤	14.522,91	0,31	Eingehalten			
	87,00	2,541	0,125	58.217,63																	
	84,50	2,562	0,155	95.372,13	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.370,00	1.849,50	10.060,00	13.581,00			4.500,33 ≤	23.843,03	0,19	Eingehalten			
	82,00	2,598	0,155	95.531,13																	
	79,50	2,634	0,155	95.712,13	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.407,00	1.899,45	10.060,00	13.581,00			4.477,64 ≤	23.928,03	0,19	Eingehalten			
	77,00	2,670	0,155	95.876,13																	
	74,50	2,706	0,155	96.062,13	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.442,00	1.946,70	10.060,00	13.581,00			4.456,13 ≤	24.015,53	0,19	Eingehalten			
	72,00	2,742	0,155	96.276,13																	
	69,50	2,778	0,155	96.608,13	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.481,00	1.999,35	10.060,00	13.581,00			4.443,59 ≤	24.152,03	0,18	Eingehalten			
	67,00	2,814	0,155	96.867,13																	
	64,50	2,850	0,155	97.083,13	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.514,00	2.043,90	10.060,00	13.581,00			4.426,25 ≤	24.270,78	0,18	Eingehalten			
	62,00	2,886	0,155	97.646,13																	
	59,50	2,923	0,155	97.899,13	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.553,00	2.096,55	10.060,00	13.581,00			4.420,07 ≤	24.474,78	0,18	Eingehalten			

mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P\,\infty}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

Schubkraftübertrag in der Fuge					μ= 0,5					Maximalwert aus alle DLCs		ULS	Nachweis in voll überdrückter Fuge sehr glatte Oberfläche					Nachweis in klaffender Fuge		
					fcd= 120,18		MPa													
UHFFB-Turm	Höhenkote	Radius rm	Wanddicke b	Normalkraft N_{ed}	phi0Max	signumax	Nachweisart	erbracht?		Querkraft V_k	Querkraft V_{ed}	Torsion M_k	Torsion M_{ed}		≤	μ*Ned/2	Ausnutzungsgrad	Fcd	$V_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}$	$T_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}$ *b/3	Nachweis ≤ 1
	[m]	[m]	[m]	[kN]		[kN/m²]				[kN]	1,35	[kNm]	1,35					[kN]			
	128,57	1,948	0,11	41.559,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.139,00	1.537,65	10.060,00	13.581,00		≤	5.023,53	0,48	Eingehalten			
	127,00	1,971	0,11	41.616,00																	
	124,50	2,007	0,11	41.730,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00		≤	4.928,14	0,47	Eingehalten			
	122,00	2,043	0,11	41.833,00																	
	119,50	2,079	0,11	41.940,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.150,00	1.552,50	10.060,00	13.581,00		≤	4.818,78	0,46	Eingehalten			
	117,00	2,115	0,11	42.034,00																	
	114,50	2,151	0,11	42.146,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.155,00	1.559,25	10.060,00	13.581,00		≤	4.715,95	0,45	Eingehalten			
	112,00	2,187	0,11	42.243,00																	
	109,50	2,216	0,125	63.502,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.159,00	1.564,65	10.060,00	13.581,00		≤	4.629,22	0,29	Eingehalten			
	107,00	2,252	0,125	63.614,00																	
	104,50	2,288	0,125	63.746,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.206,00	1.628,10	10.060,00	13.581,00		≤	4.596,00	0,29	Eingehalten			
	102,00	2,324	0,125	63.862,00																	
	99,50	2,360	0,125	63.998,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.251,00	1.688,85	10.060,00	13.581,00		≤	4.566,00	0,29	Eingehalten			
	97,00	2,396	0,125	64.117,00																	
	94,50	2,432	0,125	64.274,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.294,00	1.746,90	10.060,00	13.581,00		≤	4.538,68	0,28	Eingehalten			
	92,00	2,468	0,125	64.397,00																	
	89,50	2,504	0,125	64.541,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.333,00	1.799,55	10.060,00	13.581,00		≤	4.510,88	0,28	Eingehalten			
	87,00	2,541	0,125	64.668,00																	
	84,50	2,562	0,155	107.106,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.370,00	1.849,50	10.060,00	13.581,00		≤	4.500,33	0,17	Eingehalten			
	82,00	2,598	0,155	107.265,00																	
	79,50	2,634	0,155	107.447,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.407,00	1.899,45	10.060,00	13.581,00		≤	4.477,64	0,17	Eingehalten			
	77,00	2,670	0,155	107.610,00																	
	74,50	2,706	0,155	107.796,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.442,00	1.946,70	10.060,00	13.581,00		≤	4.456,13	0,17	Eingehalten			
	72,00	2,742	0,155	108.010,00																	
	69,50	2,778	0,155	108.343,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.481,00	1.999,35	10.060,00	13.581,00		≤	4.443,59	0,16	Eingehalten			
	67,00	2,814	0,155	108.601,00																	
	64,50	2,850	0,155	108.817,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.514,00	2.043,90	10.060,00	13.581,00		≤	4.426,25	0,16	Eingehalten			
	62,00	2,886	0,155	109.381,00																	
	59,50	2,923	0,155	109.633,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.553,00	2.096,55	10.060,00	13.581,00		≤	4.420,07	0,16	Eingehalten			

mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P0}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

Schubkraftübertrag in der Fuge — UHFFB-Turm; μ= 0,5; Fcd= 120,18 MPa

Höhenkote [m]	Sensor Myz	Radius rm [m]	Wanddicke b [m]	Normalkraft N_{ed} [kN]	phi0Max	sigmamax [kN/m²]	Nachweisart	erbracht?	Maximalwert aus alle DLCs: Querkraft V_k [kN]	Querkraft V_{ed} 1,35	Torsion M_k [kNm]	ULS: Torsion M_{ed} 1,35	Nachweis in voll überdrückter Fuge, sehr glatte Oberfläche: ≤	µ*Ned/2	≤1		Nachweis in klaffender Fuge: Fcd [kN]	$V_{Rd,ct}=\mu^*F_{cd}$	$T_{Rd,ct}=\mu^*F_{cd}*b/3$	Nachweis ≤ 1
128,57	4288	1,948	0,11	36.714,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.130,00	1.525,50	10.060,00	13.581,00	5.011,38 ≤	9.178,72	0,55	Eingehalten				
127,00	4278	1,971	0,11	36.771,88																
124,50	4268	2,007	0,11	36.885,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.137,00	1.534,95	10.060,00	13.581,00	4.918,69 ≤	9.221,47	0,53	Eingehalten				
122,00	4258	2,043	0,11	36.988,88																
119,50	4248	2,079	0,11	37.095,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00	4.810,68 ≤	9.273,97	0,52	Eingehalten				
117,00	4238	2,115	0,11	37.189,88																
114,50	4228	2,151	0,11	37.301,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.152,00	1.555,20	10.060,00	13.581,00	4.711,90 ≤	9.325,47	0,51	Eingehalten				
112,00	4218	2,187	0,11	37.398,88																
109,50	4208	2,216	0,125	56.015,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.205,00	1.626,75	10.060,00	13.581,00	4.691,32 ≤	14.003,91	0,34	Eingehalten				
107,00	4198	2,252	0,125	56.127,63																
104,50	4188	2,288	0,125	56.259,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.268,00	1.711,80	10.060,00	13.581,00	4.679,70 ≤	14.064,91	0,33	Eingehalten				
102,00	4178	2,324	0,125	56.375,63																
99,50	4168	2,360	0,125	56.511,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.326,00	1.790,10	10.060,00	13.581,00	4.667,25 ≤	14.127,91	0,33	Eingehalten				
97,00	4158	2,396	0,125	56.630,63																
94,50	4148	2,432	0,125	56.787,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.383,00	1.867,05	10.060,00	13.581,00	4.658,83 ≤	14.196,91	0,33	Eingehalten				
92,00	4138	2,468	0,125	56.910,63																
89,50	4128	2,504	0,125	57.054,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.434,00	1.935,90	10.060,00	13.581,00	4.647,23 ≤	14.263,66	0,33	Eingehalten				
87,00	4118	2,541	0,125	57.181,63																
84,50	4108	2,562	0,155	94.335,13	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.482,00	2.000,70	10.060,00	13.581,00	4.651,53 ≤	23.583,78	0,20	Eingehalten				
82,00	4098	2,598	0,155	94.494,13																
79,50	4088	2,634	0,155	94.676,13	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.525,00	2.058,75	10.060,00	13.581,00	4.636,94 ≤	23.669,03	0,20	Eingehalten				
77,00	4078	2,670	0,155	94.839,13																
74,50	4068	2,706	0,155	95.025,13	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.565,00	2.112,75	10.060,00	13.581,00	4.622,18 ≤	23.756,28	0,19	Eingehalten				
72,00	4058	2,742	0,155	95.239,13																
69,50	4048	2,778	0,155	95.572,13	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.610,00	2.173,50	10.060,00	13.581,00	4.617,74 ≤	23.893,03	0,19	Eingehalten				
67,00	4038	2,814	0,155	95.830,13																
64,50	4028	2,850	0,155	96.046,13	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.647,00	2.223,45	10.060,00	13.581,00	4.605,80 ≤	24.011,53	0,19	Eingehalten				
62,00	4018	2,886	0,155	96.610,13																
59,50	4008	2,923	0,155	96.862,13	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.692,00	2.284,20	10.060,00	13.581,00	4.607,72 ≤	24.215,53	0,19	Eingehalten				

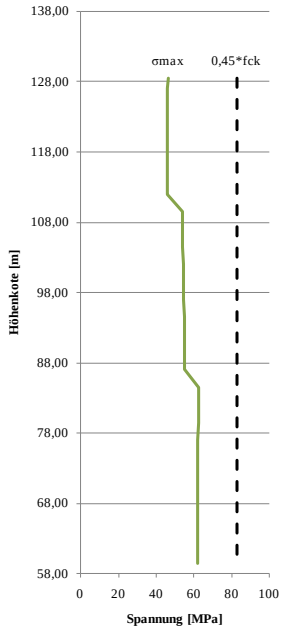
mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P\,\infty}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

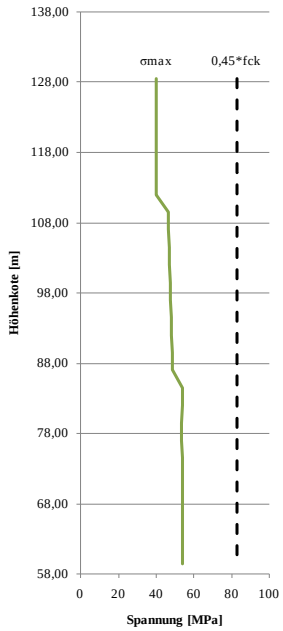
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

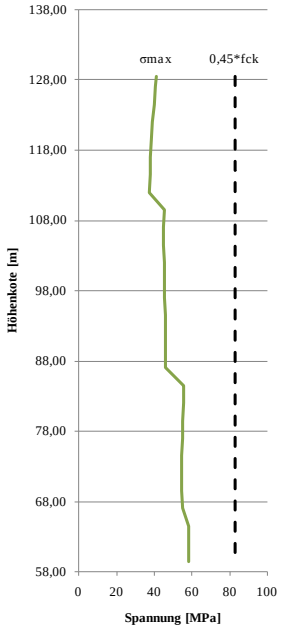
B.2.2.4 Spannungsbegrenzung (SLS)



$N_{Ed} = N_{min} + N_{P0}$
M_{Ed} = maximales Moment aus Power Production Lastfällen (DLC 1.1, DLC 1.3, DLC 1.5 - 1.9) und den Ermüdungslastfällen DLC 3.1 und DLC 4.1 $(M_{PP}) + M_{temp} + M_{imp}$

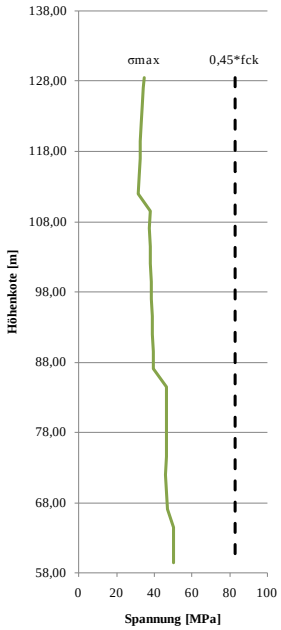


$N_{Ed} = N_{min} + N_{P\infty}$
M_{Ed} = maximales Moment aus Power Production Lastfällen (DLC 1.1, DLC 1.3, DLC 1.5 - 1.9) und den Ermüdungslastfällen DLC 3.1 und DLC 4.1 $(M_{PP}) + M_{temp} + M_{imp}$



$N_{Ed} = N_{min} + N_{P0}$

M_{Ed} = Moment aus der 99%-Fraktile $(M_{LDD99\%}) + M_{temp} + M_{imp}$



$N_{Ed} = N_{min} + N_{P\infty}$

M_{Ed} = Moment aus der 99%-Fraktile $(M_{LDD99\%}) + M_{temp} + M_{imp}$

B.3 Schnittgrößen und Ergebnisse der Turmvariante 5

B.3.1 Schnittgrößen

B.3.1.1 Schnittgrößen aus der Simulation mit Flex 5 (charakteristische Schnittgrößen)

Maximallasten DLC 1.1					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.841,00	16.570,00	904,60	10.220,00
127,00	427X	3.898,00	16.190,00	907,00	10.220,00
124,50	426X	4.012,00	15.610,00	911,10	10.220,00
122,00	425X	4.114,00	15.050,00	914,30	10.220,00
119,50	424X	4.222,00	14.790,00	917,10	10.220,00
117,00	423X	4.316,00	14.630,00	919,10	10.220,00
114,50	422X	4.428,00	14.460,00	920,90	10.220,00
112,00	421X	4.524,00	14.300,00	922,20	10.220,00
109,50	420X	4.652,00	15.670,00	923,50	10.220,00
107,00	419X	4.777,00	17.920,00	924,70	10.220,00
104,50	418X	4.921,00	20.180,00	926,40	10.220,00
102,00	417X	5.050,00	22.450,00	929,30	10.220,00
99,50	416X	5.199,00	24.730,00	933,90	10.220,00
97,00	415X	5.332,00	27.010,00	938,30	10.220,00
94,50	414X	5.503,00	29.300,00	944,00	10.220,00
92,00	413X	5.639,00	31.590,00	948,40	10.220,00
89,50	412X	5.797,00	33.880,00	953,10	10.220,00
87,00	411X	5.938,00	36.170,00	956,90	10.220,00
84,50	410X	6.124,00	38.470,00	961,90	10.220,00
82,00	409X	6.316,00	40.770,00	966,70	10.220,00
79,50	408X	6.532,00	43.070,00	971,60	10.220,00
77,00	407X	6.730,00	45.380,00	975,50	10.220,00
74,50	406X	6.951,00	47.700,00	979,20	10.220,00
72,00	405X	7.201,00	50.040,00	983,10	10.220,00
69,50	404X	7.569,00	52.390,00	988,10	10.220,00
67,00	403X	7.863,00	54.750,00	991,20	10.220,00
64,50	402X	8.116,00	57.110,00	993,20	10.220,00
62,00	401X	8.718,00	59.480,00	998,30	10.220,00
59,50	400X	9.008,00	61.840,00	999,60	10.220,00

Maximallasten DLC 1.2					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.784,00	17.660,00	953,00	8.421,00
127,00	427X	3.841,00	17.230,00	955,60	8.421,00
124,50	426X	3.954,00	16.540,00	959,70	8.421,00
122,00	425X	4.057,00	15.850,00	962,50	8.421,00
119,50	424X	4.165,00	15.150,00	964,60	8.422,00
117,00	423X	4.258,00	14.450,00	965,90	8.422,00
114,50	422X	4.370,00	14.410,00	966,70	8.422,00
112,00	421X	4.467,00	14.360,00	966,80	8.422,00
109,50	420X	4.594,00	14.290,00	966,40	8.422,00
107,00	419X	4.719,00	16.380,00	966,00	8.422,00
104,50	418X	4.864,00	18.550,00	965,50	8.422,00
102,00	417X	4.993,00	20.740,00	965,30	8.422,00
99,50	416X	5.142,00	22.980,00	966,20	8.422,00
97,00	415X	5.274,00	25.320,00	967,70	8.422,00
94,50	414X	5.445,00	27.660,00	970,40	8.422,00
92,00	413X	5.582,00	29.990,00	972,70	8.422,00
89,50	412X	5.740,00	32.320,00	974,90	8.422,00
87,00	411X	5.880,00	34.640,00	976,70	8.422,00
84,50	410X	6.066,00	36.970,00	978,60	8.422,00
82,00	409X	6.259,00	39.280,00	980,30	8.422,00
79,50	408X	6.474,00	41.590,00	982,50	8.422,00
77,00	407X	6.672,00	43.890,00	987,40	8.421,00
74,50	406X	6.894,00	46.200,00	992,20	8.421,00
72,00	405X	7.143,00	48.510,00	997,40	8.422,00
69,50	404X	7.511,00	50.830,00	1.006,00	8.422,00
67,00	403X	7.806,00	53.160,00	1.013,00	8.422,00
64,50	402X	8.059,00	55.500,00	1.017,00	8.422,00
62,00	401X	8.660,00	57.850,00	1.029,00	8.422,00
59,50	400X	8.950,00	60.350,00	1.034,00	8.422,00

Maximallasten DLC 1.3					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.580,00	17.890,00	881,70	6.588,00
127,00	427X	3.637,00	18.170,00	882,60	6.589,00
124,50	426X	3.751,00	19.160,00	884,20	6.589,00
122,00	425X	3.853,00	20.160,00	885,60	6.589,00
119,50	424X	3.961,00	21.150,00	886,90	6.589,00
117,00	423X	4.055,00	22.150,00	888,00	6.590,00
114,50	422X	4.166,00	23.160,00	889,10	6.590,00
112,00	421X	4.263,00	24.160,00	890,10	6.590,00
109,50	420X	4.391,00	25.320,00	891,80	6.590,00
107,00	419X	4.516,00	26.610,00	893,60	6.590,00
104,50	418X	4.660,00	27.900,00	895,40	6.589,00
102,00	417X	4.789,00	29.200,00	897,00	6.589,00
99,50	416X	4.938,00	31.090,00	898,60	6.589,00
97,00	415X	5.071,00	33.280,00	900,00	6.589,00
94,50	414X	5.241,00	35.480,00	901,70	6.589,00
92,00	413X	5.378,00	37.680,00	903,00	6.588,00
89,50	412X	5.536,00	39.880,00	904,60	6.588,00
87,00	411X	5.677,00	42.080,00	905,90	6.588,00
84,50	410X	5.863,00	44.270,00	908,00	6.588,00
82,00	409X	6.055,00	46.460,00	910,20	6.588,00
79,50	408X	6.271,00	48.640,00	912,70	6.587,00
77,00	407X	6.469,00	50.810,00	916,80	6.587,00
74,50	406X	6.690,00	52.980,00	924,80	6.587,00
72,00	405X	6.940,00	55.140,00	933,60	6.587,00
69,50	404X	7.308,00	57.290,00	946,10	6.587,00
67,00	403X	7.602,00	59.420,00	955,50	6.588,00
64,50	402X	7.855,00	61.540,00	963,10	6.588,00
62,00	401X	8.456,00	63.650,00	981,30	6.588,00
59,50	400X	8.747,00	65.740,00	989,20	6.588,00

Maximallasten DLC 1.5					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.463,00	14.460,00	582,80	2.325,00
127,00	427X	3.520,00	15.230,00	586,60	2.325,00
124,50	426X	3.633,00	16.560,00	594,00	2.325,00
122,00	425X	3.736,00	17.950,00	600,00	2.325,00
119,50	424X	3.844,00	19.370,00	605,80	2.325,00
117,00	423X	3.938,00	20.820,00	610,30	2.325,00
114,50	422X	4.049,00	22.280,00	615,40	2.325,00
112,00	421X	4.146,00	23.760,00	619,20	2.325,00
109,50	420X	4.274,00	25.260,00	624,50	2.325,00
107,00	419X	4.399,00	26.770,00	629,40	2.325,00
104,50	418X	4.543,00	28.300,00	635,00	2.325,00
102,00	417X	4.672,00	29.850,00	639,60	2.325,00
99,50	416X	4.821,00	31.410,00	645,20	2.325,00
97,00	415X	4.954,00	32.990,00	649,80	2.325,00
94,50	414X	5.124,00	34.580,00	656,30	2.325,00
92,00	413X	5.261,00	36.190,00	660,80	2.325,00
89,50	412X	5.419,00	37.820,00	666,00	2.325,00
87,00	411X	5.559,00	39.460,00	670,10	2.325,00
84,50	410X	5.746,00	41.120,00	675,90	2.325,00
82,00	409X	5.938,00	42.800,00	681,70	2.325,00
79,50	408X	6.154,00	44.510,00	688,10	2.325,00
77,00	407X	6.351,00	46.230,00	693,20	2.325,00
74,50	406X	6.573,00	47.960,00	698,60	2.325,00
72,00	405X	6.822,00	49.700,00	704,40	2.326,00
69,50	404X	7.191,00	51.470,00	713,10	2.326,00
67,00	403X	7.485,00	53.250,00	719,00	2.326,00
64,50	402X	7.738,00	55.050,00	723,20	2.326,00
62,00	401X	8.339,00	56.870,00	735,20	2.325,00
59,50	400X	8.629,00	58.710,00	739,10	2.325,00

Maximallasten DLC 1.6					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.523,00	11.680,00	1.006,00	2.182,00
127,00	427X	3.580,00	12.420,00	1.011,00	2.182,00
124,50	426X	3.694,00	14.110,00	1.018,00	2.182,00
122,00	425X	3.796,00	15.940,00	1.025,00	2.182,00
119,50	424X	3.904,00	17.790,00	1.032,00	2.182,00
117,00	423X	3.998,00	19.680,00	1.037,00	2.182,00
114,50	422X	4.109,00	21.580,00	1.044,00	2.182,00
112,00	421X	4.206,00	23.500,00	1.049,00	2.182,00
109,50	420X	4.334,00	25.440,00	1.055,00	2.182,00
107,00	419X	4.459,00	27.410,00	1.060,00	2.182,00
104,50	418X	4.603,00	29.390,00	1.066,00	2.182,00
102,00	417X	4.732,00	31.390,00	1.072,00	2.182,00
99,50	416X	4.881,00	33.410,00	1.079,00	2.182,00
97,00	415X	5.014,00	35.460,00	1.085,00	2.182,00
94,50	414X	5.184,00	37.520,00	1.092,00	2.182,00
92,00	413X	5.321,00	39.600,00	1.097,00	2.182,00
89,50	412X	5.479,00	41.700,00	1.103,00	2.182,00
87,00	411X	5.620,00	43.820,00	1.108,00	2.182,00
84,50	410X	5.806,00	45.950,00	1.114,00	2.182,00
82,00	409X	5.998,00	48.110,00	1.120,00	2.182,00
79,50	408X	6.214,00	50.280,00	1.126,00	2.182,00
77,00	407X	6.412,00	52.900,00	1.132,00	2.182,00
74,50	406X	6.633,00	55.660,00	1.138,00	2.182,00
72,00	405X	6.883,00	58.450,00	1.143,00	2.182,00
69,50	404X	7.251,00	61.290,00	1.151,00	2.182,00
67,00	403X	7.545,00	64.160,00	1.157,00	2.182,00
64,50	402X	7.798,00	67.040,00	1.162,00	2.182,00
62,00	401X	8.399,00	69.940,00	1.172,00	2.182,00
59,50	400X	8.690,00	72.860,00	1.176,00	2.182,00

Maximallasten DLC 1.7					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.581,00	15.790,00	577,70	8.805,00
127,00	427X	3.638,00	15.380,00	578,30	8.805,00
124,50	426X	3.752,00	14.730,00	579,50	8.805,00
122,00	425X	3.854,00	14.070,00	580,50	8.805,00
119,50	424X	3.962,00	13.400,00	581,40	8.805,00
117,00	423X	4.056,00	12.750,00	582,30	8.805,00
114,50	422X	4.167,00	12.110,00	583,20	8.805,00
112,00	421X	4.264,00	11.470,00	583,90	8.805,00
109,50	420X	4.392,00	10.870,00	584,80	8.805,00
107,00	419X	4.517,00	11.980,00	585,60	8.805,00
104,50	418X	4.661,00	13.110,00	586,50	8.805,00
102,00	417X	4.790,00	14.320,00	587,30	8.805,00
99,50	416X	4.939,00	15.600,00	588,20	8.805,00
97,00	415X	5.072,00	16.890,00	588,90	8.805,00
94,50	414X	5.242,00	18.190,00	589,70	8.805,00
92,00	413X	5.379,00	19.500,00	590,30	8.805,00
89,50	412X	5.537,00	20.810,00	590,90	8.805,00
87,00	411X	5.678,00	22.120,00	591,40	8.805,00
84,50	410X	5.864,00	23.440,00	592,00	8.805,00
82,00	409X	6.056,00	24.760,00	592,60	8.805,00
79,50	408X	6.272,00	26.090,00	593,10	8.805,00
77,00	407X	6.470,00	27.430,00	593,60	8.805,00
74,50	406X	6.691,00	28.790,00	594,00	8.805,00
72,00	405X	6.941,00	30.150,00	594,40	8.805,00
69,50	404X	7.309,00	31.520,00	594,90	8.805,00
67,00	403X	7.603,00	32.900,00	595,10	8.805,00
64,50	402X	7.856,00	34.280,00	595,20	8.805,00
62,00	401X	8.457,00	35.660,00	595,80	8.805,00
59,50	400X	8.748,00	37.060,00	596,10	8.805,00

Maximallasten DLC 1.8					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.527,00	14.870,00	705,10	3.565,00
127,00	427X	3.584,00	14.570,00	707,40	3.565,00
124,50	426X	3.698,00	14.100,00	711,60	3.565,00
122,00	425X	3.801,00	13.630,00	715,10	3.565,00
119,50	424X	3.908,00	13.180,00	718,40	3.565,00
117,00	423X	4.002,00	12.730,00	721,00	3.565,00
114,50	422X	4.114,00	12.290,00	723,90	3.565,00
112,00	421X	4.211,00	11.850,00	726,10	3.565,00
109,50	420X	4.338,00	11.410,00	728,70	3.565,00
107,00	419X	4.463,00	12.240,00	731,20	3.565,00
104,50	418X	4.608,00	13.970,00	733,60	3.565,00
102,00	417X	4.736,00	15.730,00	735,60	3.565,00
99,50	416X	4.885,00	17.510,00	737,60	3.565,00
97,00	415X	5.018,00	19.300,00	739,30	3.565,00
94,50	414X	5.189,00	21.110,00	741,20	3.565,00
92,00	413X	5.325,00	22.930,00	742,50	3.565,00
89,50	412X	5.483,00	24.750,00	743,80	3.565,00
87,00	411X	5.624,00	26.580,00	744,90	3.565,00
84,50	410X	5.810,00	28.420,00	746,40	3.565,00
82,00	409X	6.002,00	30.260,00	747,90	3.565,00
79,50	408X	6.218,00	32.100,00	749,60	3.565,00
77,00	407X	6.416,00	33.950,00	751,00	3.565,00
74,50	406X	6.637,00	35.800,00	752,60	3.565,00
72,00	405X	6.887,00	37.660,00	754,30	3.565,00
69,50	404X	7.255,00	39.510,00	757,20	3.565,00
67,00	403X	7.550,00	41.370,00	759,50	3.565,00
64,50	402X	7.803,00	43.230,00	761,30	3.565,00
62,00	401X	8.404,00	45.090,00	767,20	3.565,00
59,50	400X	8.694,00	46.950,00	769,70	3.565,00

Maximallasten DLC 1.9					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.547,00	12.560,00	1.135,00	1.552,00
127,00	427X	3.605,00	13.280,00	1.137,00	1.552,00
124,50	426X	3.718,00	14.450,00	1.140,00	1.552,00
122,00	425X	3.821,00	15.660,00	1.142,00	1.552,00
119,50	424X	3.929,00	16.900,00	1.145,00	1.552,00
117,00	423X	4.022,00	18.160,00	1.147,00	1.552,00
114,50	422X	4.134,00	19.480,00	1.149,00	1.552,00
112,00	421X	4.231,00	20.880,00	1.151,00	1.552,00
109,50	420X	4.358,00	22.300,00	1.153,00	1.552,00
107,00	419X	4.483,00	23.730,00	1.156,00	1.552,00
104,50	418X	4.628,00	25.180,00	1.158,00	1.552,00
102,00	417X	4.757,00	26.910,00	1.160,00	1.552,00
99,50	416X	4.906,00	29.750,00	1.162,00	1.552,00
97,00	415X	5.038,00	32.610,00	1.164,00	1.552,00
94,50	414X	5.209,00	35.470,00	1.168,00	1.552,00
92,00	413X	5.346,00	38.350,00	1.171,00	1.552,00
89,50	412X	5.504,00	41.230,00	1.175,00	1.552,00
87,00	411X	5.644,00	44.130,00	1.178,00	1.552,00
84,50	410X	5.830,00	47.020,00	1.183,00	1.552,00
82,00	409X	6.023,00	49.930,00	1.187,00	1.552,00
79,50	408X	6.238,00	52.840,00	1.191,00	1.552,00
77,00	407X	6.436,00	55.760,00	1.195,00	1.552,00
74,50	406X	6.658,00	58.690,00	1.198,00	1.552,00
72,00	405X	6.907,00	61.630,00	1.202,00	1.552,00
69,50	404X	7.275,00	64.610,00	1.207,00	1.552,00
67,00	403X	7.570,00	67.620,00	1.211,00	1.552,00
64,50	402X	7.823,00	70.640,00	1.214,00	1.552,00
62,00	401X	8.424,00	73.680,00	1.220,00	1.552,00
59,50	400X	8.714,00	76.730,00	1.222,00	1.552,00

Maximallasten DLC 3.1					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.820,00	12.800,00	837,40	6.994,00
127,00	427X	3.877,00	12.680,00	839,20	6.994,00
124,50	426X	3.991,00	13.120,00	842,20	6.994,00
122,00	425X	4.093,00	13.590,00	844,70	6.994,00
119,50	424X	4.201,00	14.070,00	846,80	6.994,00
117,00	423X	4.295,00	14.570,00	848,30	6.994,00
114,50	422X	4.406,00	15.080,00	849,80	6.994,00
112,00	421X	4.503,00	15.600,00	850,70	6.994,00
109,50	420X	4.631,00	16.130,00	851,60	6.994,00
107,00	419X	4.756,00	16.670,00	852,20	6.994,00
104,50	418X	4.900,00	17.220,00	852,50	6.994,00
102,00	417X	5.029,00	18.910,00	852,40	6.994,00
99,50	416X	5.178,00	20.990,00	852,00	6.994,00
97,00	415X	5.311,00	23.070,00	851,30	6.994,00
94,50	414X	5.481,00	25.170,00	850,10	6.994,00
92,00	413X	5.618,00	27.260,00	848,70	6.994,00
89,50	412X	5.776,00	29.360,00	847,10	6.994,00
87,00	411X	5.916,00	31.450,00	847,10	6.993,00
84,50	410X	6.103,00	33.540,00	847,30	6.993,00
82,00	409X	6.295,00	35.630,00	847,50	6.993,00
79,50	408X	6.511,00	37.710,00	850,30	6.993,00
77,00	407X	6.709,00	39.780,00	854,70	6.993,00
74,50	406X	6.930,00	41.850,00	859,40	6.993,00
72,00	405X	7.180,00	43.900,00	864,30	6.993,00
69,50	404X	7.548,00	45.950,00	872,00	6.993,00
67,00	403X	7.842,00	47.980,00	878,70	6.993,00
64,50	402X	8.095,00	50.000,00	884,30	6.993,00
62,00	401X	8.696,00	51.990,00	898,00	6.993,00
59,50	400X	8.987,00	53.970,00	903,70	6.993,00

Maximallasten DLC 4.1					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.748,00	14.370,00	817,00	6.537,00
127,00	427X	3.805,00	14.510,00	818,00	6.537,00
124,50	426X	3.919,00	14.740,00	819,60	6.538,00
122,00	425X	4.021,00	14.970,00	820,80	6.537,00
119,50	424X	4.129,00	15.210,00	821,80	6.538,00
117,00	423X	4.223,00	15.460,00	822,60	6.538,00
114,50	422X	4.334,00	15.720,00	823,70	6.538,00
112,00	421X	4.431,00	16.330,00	825,50	6.538,00
109,50	420X	4.559,00	17.010,00	828,90	6.538,00
107,00	419X	4.684,00	17.700,00	832,40	6.538,00
104,50	418X	4.828,00	18.420,00	836,20	6.538,00
102,00	417X	4.957,00	19.140,00	839,40	6.538,00
99,50	416X	5.106,00	19.890,00	842,80	6.538,00
97,00	415X	5.239,00	21.240,00	845,50	6.537,00
94,50	414X	5.409,00	23.100,00	848,50	6.537,00
92,00	413X	5.546,00	24.970,00	850,50	6.537,00
89,50	412X	5.704,00	27.010,00	852,30	6.537,00
87,00	411X	5.844,00	29.100,00	853,50	6.537,00
84,50	410X	6.031,00	31.210,00	854,80	6.537,00
82,00	409X	6.223,00	33.320,00	855,70	6.537,00
79,50	408X	6.439,00	35.440,00	860,10	6.537,00
77,00	407X	6.636,00	37.560,00	864,20	6.537,00
74,50	406X	6.858,00	39.690,00	868,20	6.537,00
72,00	405X	7.107,00	41.810,00	872,30	6.537,00
69,50	404X	7.476,00	43.930,00	877,20	6.537,00
67,00	403X	7.770,00	46.040,00	880,10	6.537,00
64,50	402X	8.023,00	48.150,00	881,80	6.537,00
62,00	401X	8.624,00	50.240,00	885,40	6.537,00
59,50	400X	8.914,00	52.320,00	886,00	6.537,00

Maximallasten DLC 6.1 a S					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.290,00	11.700,00	600,20	610,00
127,00	427X	3.347,00	12.190,00	610,40	609,90
124,50	426X	3.461,00	12.990,00	629,00	609,90
122,00	425X	3.563,00	13.800,00	645,90	609,80
119,50	424X	3.671,00	14.620,00	662,90	609,70
117,00	423X	3.765,00	15.460,00	677,90	609,60
114,50	422X	3.876,00	16.300,00	694,20	609,50
112,00	421X	3.973,00	17.160,00	708,70	609,50
109,50	420X	4.101,00	18.010,00	725,40	609,40
107,00	419X	4.226,00	18.890,00	741,50	609,40
104,50	418X	4.370,00	19.770,00	758,50	609,40
102,00	417X	4.499,00	20.650,00	773,80	609,30
99,50	416X	4.648,00	21.550,00	789,90	609,30
97,00	415X	4.781,00	22.450,00	804,30	609,30
94,50	414X	4.951,00	23.360,00	820,60	609,30
92,00	413X	5.088,00	24.280,00	834,20	609,30
89,50	412X	5.246,00	25.190,00	848,40	609,30
87,00	411X	5.387,00	26.110,00	861,20	609,30
84,50	410X	5.573,00	27.120,00	875,60	609,30
82,00	409X	5.765,00	29.320,00	889,90	609,20
79,50	408X	5.981,00	31.560,00	904,50	609,20
77,00	407X	6.179,00	33.830,00	917,70	609,20
74,50	406X	6.400,00	36.130,00	931,10	609,10
72,00	405X	6.650,00	38.470,00	944,80	609,10
69,50	404X	7.018,00	40.850,00	961,50	609,00
67,00	403X	7.312,00	43.260,00	975,00	609,00
64,50	402X	7.565,00	45.700,00	986,40	608,90
62,00	401X	8.166,00	48.200,00	1.006,00	608,80
59,50	400X	8.457,00	50.720,00	1.017,00	608,80

Maximallasten DLC 6.1a T					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.760,00	13.430,00	778,80	4.972,00
127,00	427X	3.817,00	13.910,00	787,50	4.972,00
124,50	426X	3.930,00	14.730,00	803,80	4.972,00
122,00	425X	4.033,00	16.010,00	818,30	4.971,00
119,50	424X	4.141,00	17.400,00	832,70	4.971,00
117,00	423X	4.235,00	18.840,00	845,20	4.970,00
114,50	422X	4.346,00	20.320,00	858,90	4.970,00
112,00	421X	4.443,00	21.840,00	870,70	4.970,00
109,50	420X	4.571,00	23.390,00	885,00	4.969,00
107,00	419X	4.696,00	24.980,00	898,60	4.969,00
104,50	418X	4.840,00	26.600,00	913,30	4.969,00
102,00	417X	4.969,00	28.250,00	926,40	4.969,00
99,50	416X	5.118,00	29.930,00	940,50	4.968,00
97,00	415X	5.251,00	31.630,00	953,10	4.968,00
94,50	414X	5.421,00	33.360,00	968,00	4.968,00
92,00	413X	5.558,00	35.100,00	980,20	4.968,00
89,50	412X	5.716,00	37.020,00	993,60	4.968,00
87,00	411X	5.856,00	39.170,00	1.006,00	4.968,00
84,50	410X	6.043,00	41.340,00	1.020,00	4.967,00
82,00	409X	6.235,00	43.540,00	1.035,00	4.967,00
79,50	408X	6.451,00	45.780,00	1.051,00	4.967,00
77,00	407X	6.648,00	48.070,00	1.065,00	4.967,00
74,50	406X	6.870,00	50.610,00	1.079,00	4.966,00
72,00	405X	7.119,00	53.190,00	1.094,00	4.966,00
69,50	404X	7.488,00	55.820,00	1.114,00	4.966,00
67,00	403X	7.782,00	58.480,00	1.129,00	4.965,00
64,50	402X	8.035,00	61.200,00	1.141,00	4.965,00
62,00	401X	8.636,00	63.970,00	1.166,00	4.965,00
59,50	400X	8.926,00	66.800,00	1.178,00	4.964,00

Maximallasten DLC 6.1b					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.248,00	12.340,00	996,20	31,99
127,00	427X	3.305,00	13.130,00	1.013,00	31,99
124,50	426X	3.418,00	14.420,00	1.044,00	32,03
122,00	425X	3.521,00	15.750,00	1.072,00	32,06
119,50	424X	3.629,00	17.100,00	1.099,00	32,10
117,00	423X	3.722,00	18.470,00	1.124,00	32,11
114,50	422X	3.834,00	19.860,00	1.150,00	32,12
112,00	421X	3.931,00	21.260,00	1.174,00	32,13
109,50	420X	4.058,00	22.680,00	1.201,00	32,13
107,00	419X	4.183,00	24.120,00	1.227,00	32,11
104,50	418X	4.328,00	25.580,00	1.255,00	32,09
102,00	417X	4.457,00	27.700,00	1.280,00	32,07
99,50	416X	4.606,00	30.920,00	1.306,00	32,04
97,00	415X	4.738,00	34.200,00	1.329,00	32,02
94,50	414X	4.909,00	37.550,00	1.356,00	31,97
92,00	413X	5.046,00	40.960,00	1.378,00	31,94
89,50	412X	5.204,00	44.420,00	1.400,00	31,89
87,00	411X	5.344,00	47.940,00	1.421,00	31,86
84,50	410X	5.530,00	51.520,00	1.444,00	31,81
82,00	409X	5.723,00	55.150,00	1.467,00	31,78
79,50	408X	5.938,00	58.840,00	1.491,00	31,76
77,00	407X	6.136,00	62.590,00	1.512,00	31,73
74,50	406X	6.358,00	66.390,00	1.533,00	31,74
72,00	405X	6.607,00	70.250,00	1.555,00	31,72
69,50	404X	6.975,00	74.160,00	1.582,00	31,72
67,00	403X	7.270,00	78.140,00	1.604,00	31,73
64,50	402X	7.523,00	82.170,00	1.622,00	31,73
62,00	401X	8.124,00	86.270,00	1.654,00	31,74
59,50	400X	8.414,00	90.420,00	1.671,00	31,78

Maximallasten DLC 6.1c					
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.317,00	12.790,00	853,50	426,30
127,00	427X	3.374,00	13.560,00	867,80	426,20
124,50	426X	3.488,00	14.800,00	893,90	426,00
122,00	425X	3.590,00	16.080,00	917,40	425,80
119,50	424X	3.698,00	17.370,00	940,90	425,60
117,00	423X	3.792,00	18.700,00	961,60	425,40
114,50	422X	3.903,00	20.030,00	984,20	425,20
112,00	421X	4.000,00	21.390,00	1.004,00	425,10
109,50	420X	4.128,00	22.770,00	1.027,00	424,90
107,00	419X	4.253,00	24.170,00	1.049,00	424,80
104,50	418X	4.397,00	25.580,00	1.073,00	424,70
102,00	417X	4.526,00	27.020,00	1.094,00	424,70
99,50	416X	4.675,00	28.480,00	1.116,00	424,60
97,00	415X	4.808,00	29.950,00	1.136,00	424,60
94,50	414X	4.978,00	31.440,00	1.159,00	424,50
92,00	413X	5.115,00	33.610,00	1.177,00	424,50
89,50	412X	5.273,00	36.560,00	1.197,00	424,50
87,00	411X	5.413,00	39.570,00	1.214,00	424,50
84,50	410X	5.600,00	42.620,00	1.234,00	424,50
82,00	409X	5.792,00	45.720,00	1.254,00	424,40
79,50	408X	6.008,00	48.870,00	1.274,00	424,30
77,00	407X	6.205,00	52.070,00	1.292,00	424,30
74,50	406X	6.427,00	55.320,00	1.311,00	424,20
72,00	405X	6.676,00	58.620,00	1.330,00	424,10
69,50	404X	7.045,00	61.960,00	1.354,00	424,00
67,00	403X	7.339,00	65.360,00	1.373,00	423,80
64,50	402X	7.592,00	68.810,00	1.389,00	423,70
62,00	401X	8.193,00	72.320,00	1.418,00	423,50
59,50	400X	8.483,00	75.880,00	1.433,00	423,30

B.3.1.2 Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen)

		Maximum aller Lastfälle				Minimum aller Lastfälle			
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.841,00	17.890,00	1.135,00	10.220,00	2.794,00	2.901,00	0,01	-8.423,00
127,00	427X	3.898,00	18.170,00	1.137,00	10.220,00	2.851,00	2.565,00	0,02	-8.423,00
124,50	426X	4.012,00	19.160,00	1.140,00	10.220,00	2.965,00	2.012,00	0,01	-8.423,00
122,00	425X	4.114,00	20.160,00	1.142,00	10.220,00	3.068,00	776,60	0,03	-8.422,00
119,50	424X	4.222,00	21.150,00	1.145,00	10.220,00	3.175,00	535,30	0,01	-8.422,00
117,00	423X	4.316,00	22.150,00	1.147,00	10.220,00	3.269,00	18,41	0,01	-8.422,00
114,50	422X	4.428,00	23.160,00	1.150,00	10.220,00	3.381,00	31,00	0,00	-8.422,00
112,00	421X	4.524,00	24.160,00	1.174,00	10.220,00	3.478,00	46,41	0,01	-8.422,00
109,50	420X	4.652,00	25.440,00	1.201,00	10.220,00	3.605,00	19,22	0,02	-8.422,00
107,00	419X	4.777,00	27.410,00	1.227,00	10.220,00	3.730,00	19,30	0,04	-8.422,00
104,50	418X	4.921,00	29.390,00	1.255,00	10.220,00	3.875,00	8,02	0,04	-8.422,00
102,00	417X	5.050,00	31.390,00	1.280,00	10.220,00	4.003,00	4,79	0,02	-8.422,00
99,50	416X	5.199,00	33.410,00	1.306,00	10.220,00	4.152,00	8,93	0,01	-8.422,00
97,00	415X	5.332,00	35.460,00	1.329,00	10.220,00	4.285,00	4,27	0,01	-8.422,00
94,50	414X	5.503,00	37.550,00	1.356,00	10.220,00	4.456,00	5,20	0,03	-8.422,00
92,00	413X	5.639,00	40.960,00	1.378,00	10.220,00	4.592,00	2,83	0,02	-8.422,00
89,50	412X	5.797,00	44.420,00	1.400,00	10.220,00	4.750,00	2,47	0,01	-8.422,00
87,00	411X	5.938,00	47.940,00	1.421,00	10.220,00	4.891,00	2,55	0,03	-8.422,00
84,50	410X	6.124,00	51.520,00	1.444,00	10.220,00	5.077,00	1,84	0,04	-8.422,00
82,00	409X	6.316,00	55.150,00	1.467,00	10.220,00	5.269,00	2,26	0,00	-8.423,00
79,50	408X	6.532,00	58.840,00	1.491,00	10.220,00	5.485,00	5,02	0,03	-8.423,00
77,00	407X	6.730,00	62.590,00	1.512,00	10.220,00	5.683,00	1,54	0,04	-8.423,00
74,50	406X	6.951,00	66.390,00	1.533,00	10.220,00	5.904,00	3,22	0,01	-8.423,00
72,00	405X	7.201,00	70.250,00	1.555,00	10.220,00	6.154,00	2,56	0,01	-8.422,00
69,50	404X	7.569,00	74.160,00	1.582,00	10.220,00	6.522,00	0,77	0,02	-8.422,00
67,00	403X	7.863,00	78.140,00	1.604,00	10.220,00	6.817,00	0,46	0,04	-8.422,00
64,50	402X	8.116,00	82.170,00	1.622,00	10.220,00	7.070,00	4,00	0,06	-8.422,00
62,00	401X	8.718,00	86.270,00	1.654,00	10.220,00	7.670,00	0,68	0,04	-8.422,00
59,50	400X	9.008,00	90.420,00	1.671,00	10.220,00	7.961,00	3,62	0,02	-8.422,00

B.3.1.3 Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Power Production Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen)

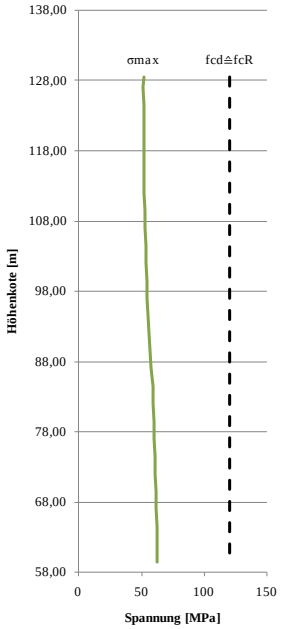
		Maximum der Power Production Lastfälle				Minimum der Power Production Lastfälle			
Höhenkote [m]	Sensor	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]	N [kN]	Myz [kNm]	Fyz [kN]	Mx [kNm]
128,57	428X	3.841,00	17.890,00	1.135,00	10.220,00	2.989,00	2.901,00	0,01	-8.423,00
127,00	427X	3.898,00	18.170,00	1.137,00	10.220,00	3.046,00	2.565,00	0,02	-8.423,00
124,50	426X	4.012,00	19.160,00	1.140,00	10.220,00	3.160,00	2.912,00	0,04	-8.423,00
122,00	425X	4.114,00	20.160,00	1.142,00	10.220,00	3.262,00	2.411,00	0,03	-8.422,00
119,50	424X	4.222,00	21.150,00	1.145,00	10.220,00	3.370,00	1.720,00	0,03	-8.422,00
117,00	423X	4.316,00	22.150,00	1.147,00	10.220,00	3.464,00	1.109,00	0,02	-8.422,00
114,50	422X	4.428,00	23.160,00	1.149,00	10.220,00	3.575,00	806,60	0,02	-8.422,00
112,00	421X	4.524,00	24.160,00	1.151,00	10.220,00	3.672,00	606,30	0,06	-8.422,00
109,50	420X	4.652,00	25.440,00	1.153,00	10.220,00	3.800,00	69,54	0,02	-8.422,00
107,00	419X	4.777,00	27.410,00	1.156,00	10.220,00	3.925,00	57,20	0,06	-8.422,00
104,50	418X	4.921,00	29.390,00	1.158,00	10.220,00	4.069,00	30,69	0,07	-8.422,00
102,00	417X	5.050,00	31.390,00	1.160,00	10.220,00	4.198,00	4,79	0,02	-8.422,00
99,50	416X	5.199,00	33.410,00	1.162,00	10.220,00	4.347,00	8,93	0,02	-8.422,00
97,00	415X	5.332,00	35.460,00	1.164,00	10.220,00	4.480,00	9,40	0,01	-8.422,00
94,50	414X	5.503,00	37.520,00	1.168,00	10.220,00	4.650,00	7,61	0,03	-8.422,00
92,00	413X	5.639,00	39.600,00	1.171,00	10.220,00	4.787,00	3,65	0,03	-8.422,00
89,50	412X	5.797,00	41.700,00	1.175,00	10.220,00	4.945,00	3,84	0,02	-8.422,00
87,00	411X	5.938,00	44.130,00	1.178,00	10.220,00	5.086,00	10,08	0,03	-8.422,00
84,50	410X	6.124,00	47.020,00	1.183,00	10.220,00	5.272,00	3,54	0,04	-8.422,00
82,00	409X	6.316,00	49.930,00	1.187,00	10.220,00	5.464,00	5,78	0,00	-8.423,00
79,50	408X	6.532,00	52.840,00	1.191,00	10.220,00	5.680,00	8,39	0,04	-8.423,00
77,00	407X	6.730,00	55.760,00	1.195,00	10.220,00	5.878,00	3,32	0,04	-8.423,00
74,50	406X	6.951,00	58.690,00	1.198,00	10.220,00	6.099,00	7,17	0,01	-8.423,00
72,00	405X	7.201,00	61.630,00	1.202,00	10.220,00	6.349,00	8,70	0,01	-8.422,00
69,50	404X	7.569,00	64.610,00	1.207,00	10.220,00	6.717,00	0,77	0,03	-8.422,00
67,00	403X	7.863,00	67.620,00	1.211,00	10.220,00	7.011,00	0,46	0,04	-8.422,00
64,50	402X	8.116,00	70.640,00	1.214,00	10.220,00	7.264,00	4,00	0,06	-8.422,00
62,00	401X	8.718,00	73.680,00	1.220,00	10.220,00	7.865,00	2,31	0,04	-8.422,00
59,50	400X	9.008,00	76.730,00	1.222,00	10.220,00	8.156,00	3,62	0,02	-8.422,00

B.3.1.4 Sonstige Schnittgrößen: $M_{LDD99\%}$, M_{temp}, M_{imp} (charakteristische Schnittgrößen)

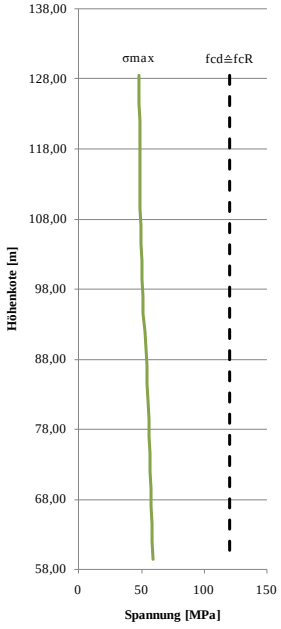
		LDD 99%	Mtemp	Mimp
Höhenkote [m]	Sensor	Myz [kNm]	Myz [kNm]	Myz [kNm]
128,57	428X	10.990,00	219,14	9.193,76
127,00	427X	10.850,00	223,34	9.378,97
124,50	426X	10.780,00	231,21	9.741,93
122,00	425X	10.758,00	237,76	10.063,12
119,50	424X	10.758,00	244,00	10.389,78
117,00	423X	10.792,00	249,03	10.670,61
114,50	422X	10.792,00	254,48	10.997,87
112,00	421X	10.880,00	258,78	11.274,95
109,50	420X	10.956,00	263,85	11.629,42
107,00	419X	11.430,00	268,36	11.970,12
104,50	418X	12.740,00	273,03	12.355,84
102,00	417X	14.440,00	276,70	12.687,96
99,50	416X	16.092,00	280,48	13.064,81
97,00	415X	17.880,00	283,44	13.392,49
94,50	414X	19.500,00	286,75	13.802,59
92,00	413X	21.280,00	289,02	14.119,85
89,50	412X	23.100,00	291,26	14.478,09
87,00	411X	24.794,00	292,96	14.788,56
84,50	410X	26.676,00	294,79	15.185,93
82,00	409X	28.417,00	296,35	15.583,56
79,50	408X	30.144,00	297,72	16.016,74
77,00	407X	32.118,00	298,71	16.400,87
74,50	406X	33.654,00	299,51	16.815,14
72,00	405X	35.457,00	300,17	17.267,42
69,50	404X	37.365,00	300,79	17.909,07
67,00	403X	39.200,00	301,11	18.404,13
64,50	402X	41.055,00	301,23	18.812,14
62,00	401X	42.930,00	301,37	19.740,48
59,50	400X	47.300,00	301,37	20.171,68

B.3.2 Nachweise

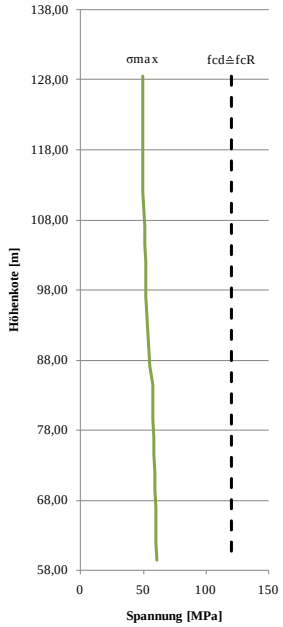
B.3.2.1 Normalspannungsnachweis (ULS)



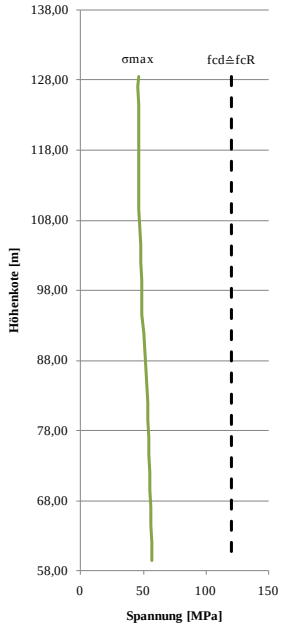
mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P0}$
M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle
$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle



mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P\infty}$
M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle
$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

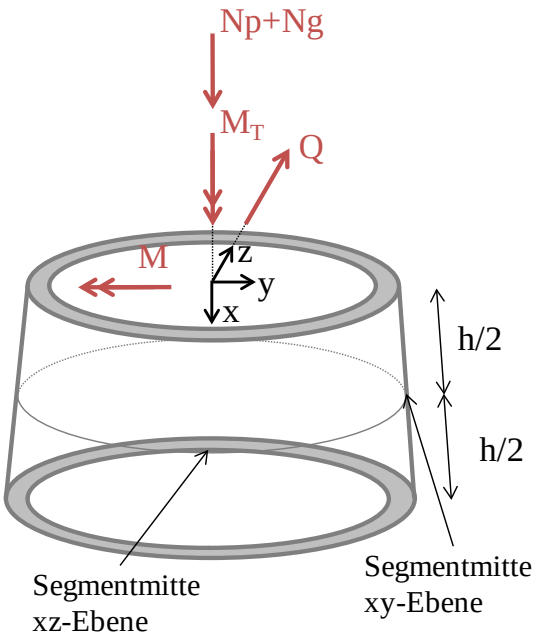


mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P0}$
M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle
$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle



mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P\infty}$
M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle
$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

B.3.2.2 Schubspannungsnachweis (ULS)



Maximalwert aus alle DLCs **ULS**

UHFFB-Turm	Höhenkote [m]	Querkraft V_k [kN]	Querkraft V_{ed} 1,35	Torsion M_k [kNm]	Torsion M_{ed} 1,35	$\tau_{Torsion}$ [kN/m²]	+	$\tau_{Querkraft}$ [kN/m²]	=	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]
	128,57	1.139,00	1.537,65	10.060,00	13.581,00					
	127,00	1.141,00	1.540,35	10.060,00	13.581,00	**5.059,53**	+	**2.261,79**	=	**7.321,32**
	124,50	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00					
	122,00	1.147,00	1.548,45	10.060,00	13.581,00	**4.708,37**	+	**2.193,36**	=	**6.901,73**
	119,50	1.150,00	1.552,50	10.060,00	13.581,00					
	117,00	1.153,00	1.556,55	10.060,00	13.581,00	**4.392,53**	+	**2.129,60**	=	**6.522,14**
	114,50	1.155,00	1.559,25	10.060,00	13.581,00					
	112,00	1.157,00	1.561,95	10.060,00	13.581,00	**4.107,45**	+	**2.066,48**	=	**6.173,93**
	109,50	1.159,00	1.564,65	10.060,00	13.581,00					
	107,00	1.182,00	1.595,70	10.060,00	13.581,00	**3.064,96**	+	**1.616,49**	=	**4.681,46**
	104,50	1.206,00	1.628,10	10.060,00	13.581,00					
	102,00	1.228,00	1.657,80	10.060,00	13.581,00	**2.876,97**	+	**1.627,08**	=	**4.504,05**
	99,50	1.251,00	1.688,85	10.060,00	13.581,00					
	97,00	1.271,00	1.715,85	10.060,00	13.581,00	**2.705,76**	+	**1.633,18**	=	**4.338,94**
	94,50	1.294,00	1.746,90	10.060,00	13.581,00					
	92,00	1.313,00	1.772,55	10.060,00	13.581,00	**2.549,38**	+	**1.637,67**	=	**4.187,05**
	89,50	1.333,00	1.799,55	10.060,00	13.581,00					
	87,00	1.350,00	1.822,50	10.060,00	13.581,00	**2.406,19**	+	**1.635,85**	=	**4.042,03**
	84,50	1.370,00	1.849,50	10.060,00	13.581,00					
	82,00	1.388,00	1.873,80	10.060,00	13.581,00	**1.708,75**	+	**1.216,63**	=	**2.925,38**
	79,50	1.407,00	1.899,45	10.060,00	13.581,00					
	77,00	1.424,00	1.922,40	10.060,00	13.581,00	**1.617,03**	+	**1.214,23**	=	**2.831,25**
	74,50	1.442,00	1.946,70	10.060,00	13.581,00					
	72,00	1.460,00	1.971,00	10.060,00	13.581,00	**1.532,50**	+	**1.211,95**	=	**2.744,45**
	69,50	1.481,00	1.999,35	10.060,00	13.581,00					
	67,00	1.499,00	2.023,65	10.060,00	13.581,00	**1.454,43**	+	**1.212,21**	=	**2.666,64**
	64,50	1.514,00	2.043,90	10.060,00	13.581,00					
	62,00	1.540,00	2.079,00	10.060,00	13.581,00	**1.382,17**	+	**1.214,04**	=	**2.596,21**
	59,50	1.553,00	2.096,55	10.060,00	13.581,00					

Segmentmitte x-y-Ebene σ= N/A

σx [kN/m²]	σy [kN/m²]	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]	DRUCK positiv σ1 [Mpa]	ZUG negativ σ2 [Mpa]
31.313,53	**0,00**	**7.321,32**	32,94	-1,63
30.360,30	**0,00**	**6.901,73**	31,86	-1,50
29.462,54	**0,00**	**6.522,14**	30,84	-1,38
28.628,00	**0,00**	**6.173,93**	29,90	-1,27
32.755,35	**0,00**	**4.681,46**	33,41	-0,66
31.868,88	**0,00**	**4.504,05**	32,49	-0,62
31.040,26	**0,00**	**4.338,94**	31,64	-0,60
30.271,78	**0,00**	**4.187,05**	30,84	-0,57
29.543,51	**0,00**	**4.042,03**	30,09	-0,54
34.707,77	**0,00**	**2.744,45**	34,92	-0,22
34.010,42	**0,00**	**2.666,64**	34,22	-0,21
33.404,51	**0,00**	**2.596,21**	33,61	-0,20

Segmentmitte x-z-Ebene σ = M/W +N/A

σx [kN/m²]	σy [kN/m²]	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]	DRUCK positiv σ1 [Mpa]	ZUG negativ σ2 [Mpa]
13.282,95	**0,00**	**5.059,53**	14,99	-1,71
11.007,58	**0,00**	**4.708,37**	12,75	-1,74
8.988,77	**0,00**	**4.392,53**	10,78	-1,79
7.197,18	**0,00**	**4.107,45**	9,06	-1,86
14.157,67	**0,00**	**3.064,96**	14,79	-0,64
11.637,19	**0,00**	**2.876,97**	12,31	-0,67
9.346,74	**0,00**	**2.705,76**	10,07	-0,73
6.572,05	**0,00**	**2.549,38**	7,45	-0,87
12.356,15	**0,00**	**1.617,03**	12,56	-0,21
10.116,69	**0,00**	**1.532,50**	10,34	-0,23
8.096,18	**0,00**	**1.454,43**	8,35	-0,25
6.273,30	**0,00**	**1.382,17**	6,56	-0,29

mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{p0}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

UHFFB-Turm	Höhenkote	Querkraft	Querkraft	Torsion	Torsion								Segmentmitte x-y-Ebene σ= N/A						Segmentmitte x-z-Ebene σ = M/W +N/A					
		V_k	V_{ed}	M_k	M_{ed}	$\tau_{Torsion}$	+	$\tau_{Querkraft}$	=	$\tau_{max,Ed}$			σx	σy	$\tau_{max,Ed}$	DRUCK positiv	ZUG negativ		σx	σy	$\tau_{max,Ed}$	DRUCK positiv	ZUG negativ	
	[m]	[kN]	1,35	[kNm]	1,35	[kN/m²]		[kN/m²]		[kN/m²]			[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	σ1 [Mpa]	σ2 [Mpa]		[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	σ1 [Mpa]	σ2 [Mpa]	
	128,57	1.139,00	1.537,65	10.060,00	13.581,00																			
	127,00	1.141,00	1.540,35	10.060,00	13.581,00	5.059,53	+	2.261,79	=	7.321,32			27.757,07	0,00	7.321,32		29,57	-1,81	9.726,49	0,00	5.059,53		11,88	-2,15
	124,50	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00																			
	122,00	1.147,00	1.548,45	10.060,00	13.581,00	4.708,37	+	2.193,36	=	6.901,73			26.929,48	0,00	6.901,73		28,60	-1,67	7.576,76	0,00	4.708,37		9,83	-2,25
	119,50	1.150,00	1.552,50	10.060,00	13.581,00																			
	117,00	1.153,00	1.556,55	10.060,00	13.581,00	4.392,53	+	2.129,60	=	6.522,14			26.148,79	0,00	6.522,14		27,69	-1,54	5.675,02	0,00	4.392,53		8,07	-2,39
	114,50	1.155,00	1.559,25	10.060,00	13.581,00																			
	112,00	1.157,00	1.561,95	10.060,00	13.581,00	4.107,45	+	2.066,48	=	6.173,93			25.423,58	0,00	6.173,93		26,84	-1,42	3.992,76	0,00	4.107,45		6,56	-2,57
	109,50	1.159,00	1.564,65	10.060,00	13.581,00																			
	107,00	1.182,00	1.595,70	10.060,00	13.581,00	3.064,96	+	1.616,49	=	4.681,46			28.963,39	0,00	4.681,46		29,70	-0,74	10.365,70	0,00	3.064,96		11,20	-0,84
	104,50	1.206,00	1.628,10	10.060,00	13.581,00																			
	102,00	1.228,00	1.657,80	10.060,00	13.581,00	2.876,97	+	1.627,08	=	4.504,05			28.195,05	0,00	4.504,05		28,90	-0,70	7.963,35	0,00	2.876,97		8,89	-0,93
	99,50	1.251,00	1.688,85	10.060,00	13.581,00																			
	97,00	1.271,00	1.715,85	10.060,00	13.581,00	2.705,76	+	1.633,18	=	4.338,94			27.477,42	0,00	4.338,94		28,15	-0,67	5.783,90	0,00	2.705,76		6,85	-1,07
	94,50	1.294,00	1.746,90	10.060,00	13.581,00																			
	92,00	1.313,00	1.772,55	10.060,00	13.581,00	2.549,38	+	1.637,67	=	4.187,05			26.813,43	0,00	4.187,05		27,45	-0,64	3.113,70	0,00	2.549,38		4,54	-1,43
	89,50	1.333,00	1.799,55	10.060,00	13.581,00																			
	87,00	1.350,00	1.822,50	10.060,00	13.581,00	2.406,19	+	1.635,85	=	4.042,03			26.183,69	0,00	4.042,03		26,79	-0,61	5,48	0,00	2.406,19		2,41	-2,40
	84,50	1.370,00	1.849,50	10.060,00	13.581,00																			
	82,00	1.388,00	1.873,80	10.060,00	13.581,00	1.708,75	+	1.216,63	=	2.925,38			32.073,06	0,00	2.925,38		32,34	-0,26	10.496,21	0,00	1.708,75		10,77	-0,27
	79,50	1.407,00	1.899,45	10.060,00	13.581,00																			
	77,00	1.424,00	1.922,40	10.060,00	13.581,00	1.617,03	+	1.214,23	=	2.831,25			31.331,13	0,00	2.831,25		31,58	-0,25	8.183,90	0,00	1.617,03		8,49	-0,31
	74,50	1.442,00	1.946,70	10.060,00	13.581,00																			
	72,00	1.460,00	1.971,00	10.060,00	13.581,00	1.532,50	+	1.211,95	=	2.744,45			30.646,04	0,00	2.744,45		30,89	-0,24	6.054,95	0,00	1.532,50		6,42	-0,37
	69,50	1.481,00	1.999,35	10.060,00	13.581,00																			
	67,00	1.499,00	2.023,65	10.060,00	13.581,00	1.454,43	+	1.212,21	=	2.666,64			30.053,50	0,00	2.666,64		30,29	-0,23	4.139,26	0,00	1.454,43		4,60	-0,46
	64,50	1.514,00	2.043,90	10.060,00	13.581,00																			
	62,00	1.540,00	2.079,00	10.060,00	13.581,00	1.382,17	+	1.214,04	=	2.596,21			29.547,13	0,00	2.596,21		29,77	-0,23	2.415,91	0,00	1.382,17		3,04	-0,63
	59,50	1.553,00	2.096,55	10.060,00	13.581,00																			

Maximalwert aus alle DLCs **ULS**

mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P\infty}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

Maximalwert aus alle DLCs **ULS**

UHFFB-Turm	Höhenkote	Querkraft	Querkraft	Torsion	Torsion					Segmentmitte x-y-Ebene σ= N/A					Segmentmitte x-z-Ebene σ = M/W +N/A				
		V_k	V_{ed}	M_k	M_{ed}	$\tau_{Torsion}$	+	$\tau_{Querkraft}$	= $\tau_{max,Ed}$	σx	σy	$\tau_{max,Ed}$	DRUCK positiv ZUG negativ σ1	σ2	σx	σy	$\tau_{max,Ed}$	DRUCK positiv σ1	ZUG negativ σ2
	[m]	[kN]	1,35	[kNm]	1,35	[kN/m²]		[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[Mpa]	[Mpa]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[Mpa]	[Mpa]
	128,57	1.139,00	1.537,65	10.060,00	13.581,00														
	127,00	1.141,00	1.540,35	10.060,00	13.581,00	5.059,53	+	2.261,79	= 7.321,32	**30.544,84**	**0,00**	**7.321,32**	32,21	-1,66	**11.374,21**	**0,00**	**5.059,53**	13,30	-1,92
	124,50	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00														
	122,00	1.147,00	1.548,45	10.060,00	13.581,00	4.708,37	+	2.193,36	= 6.901,73	**29.619,47**	**0,00**	**6.901,73**	31,15	-1,53	**9.298,31**	**0,00**	**4.708,37**	11,27	-1,97
	119,50	1.150,00	1.552,50	10.060,00	13.581,00														
	117,00	1.153,00	1.556,55	10.060,00	13.581,00	4.392,53	+	2.129,60	= 6.522,14	**28.746,31**	**0,00**	**6.522,14**	30,16	-1,41	**7.450,65**	**0,00**	**4.392,53**	9,48	-2,03
	114,50	1.155,00	1.559,25	10.060,00	13.581,00														
	112,00	1.157,00	1.561,95	10.060,00	13.581,00	4.107,45	+	2.066,48	= 6.173,93	**27.936,06**	**0,00**	**6.173,93**	29,24	-1,30	**5.802,26**	**0,00**	**4.107,45**	7,93	-2,13
	109,50	1.159,00	1.564,65	10.060,00	13.581,00														
	107,00	1.182,00	1.595,70	10.060,00	13.581,00	3.064,96	+	1.616,49	= 4.681,46	**32.225,03**	**0,00**	**4.681,46**	32,89	-0,67	**13.145,38**	**0,00**	**3.064,96**	13,82	-0,68
	104,50	1.206,00	1.628,10	10.060,00	13.581,00														
	102,00	1.228,00	1.657,80	10.060,00	13.581,00	2.876,97	+	1.627,08	= 4.504,05	**31.355,08**	**0,00**	**4.504,05**	31,99	-0,63	**10.691,26**	**0,00**	**2.876,97**	11,42	-0,73
	99,50	1.251,00	1.688,85	10.060,00	13.581,00														
	97,00	1.271,00	1.715,85	10.060,00	13.581,00	2.705,76	+	1.633,18	= 4.338,94	**30.541,98**	**0,00**	**4.338,94**	31,15	-0,60	**8.452,81**	**0,00**	**2.705,76**	9,24	-0,79
	94,50	1.294,00	1.746,90	10.060,00	13.581,00														
	92,00	1.313,00	1.772,55	10.060,00	13.581,00	2.549,38	+	1.637,67	= 4.187,05	**29.788,12**	**0,00**	**4.187,05**	30,37	-0,58	**5.714,30**	**0,00**	**2.549,38**	6,69	-0,97
	89,50	1.333,00	1.799,55	10.060,00	13.581,00														
	87,00	1.350,00	1.822,50	10.060,00	13.581,00	2.406,19	+	1.635,85	= 4.042,03	**29.073,62**	**0,00**	**4.042,03**	29,63	-0,55	**2.536,49**	**0,00**	**2.406,19**	3,99	-1,45
	84,50	1.370,00	1.849,50	10.060,00	13.581,00														
	82,00	1.388,00	1.873,80	10.060,00	13.581,00	1.708,75	+	1.216,63	= 2.925,38	**36.022,10**	**0,00**	**2.925,38**	36,26	-0,24	**14.184,52**	**0,00**	**1.708,75**	14,39	-0,20
	79,50	1.407,00	1.899,45	10.060,00	13.581,00														
	77,00	1.424,00	1.922,40	10.060,00	13.581,00	1.617,03	+	1.214,23	= 2.831,25	**35.172,73**	**0,00**	**2.831,25**	35,40	-0,23	**11.750,95**	**0,00**	**1.617,03**	11,97	-0,22
	74,50	1.442,00	1.946,70	10.060,00	13.581,00														
	72,00	1.460,00	1.971,00	10.060,00	13.581,00	1.532,50	+	1.211,95	= 2.744,45	**34.385,87**	**0,00**	**2.744,45**	34,60	-0,22	**9.495,73**	**0,00**	**1.532,50**	9,74	-0,24
	69,50	1.481,00	1.999,35	10.060,00	13.581,00														
	67,00	1.499,00	2.023,65	10.060,00	13.581,00	1.454,43	+	1.212,21	= 2.666,64	**33.697,13**	**0,00**	**2.666,64**	33,91	-0,21	**7.431,58**	**0,00**	**1.454,43**	7,71	-0,27
	64,50	1.514,00	2.043,90	10.060,00	13.581,00														
	62,00	1.540,00	2.079,00	10.060,00	13.581,00	1.382,17	+	1.214,04	= 2.596,21	**33.098,52**	**0,00**	**2.596,21**	33,30	-0,20	**5.538,14**	**0,00**	**1.382,17**	5,86	-0,33
	59,50	1.553,00	2.096,55	10.060,00	13.581,00														

mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{p0}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

Maximalwert aus alle DLCs **ULS**

UHFFB-Turm Höhenkote [m]	Querkraft V_k [kN]	Querkraft V_{ed} 1,35 [kN]	Torsion M_k [kNm]	Torsion M_{ed} 1,35	$\tau_{Torsion}$ [kN/m²]	+	$\tau_{Querkraft}$ [kN/m²]	=	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]
128,57	1.139,00	1.537,65	10.060,00	13.581,00					
127,00	1.141,00	1.540,35	10.060,00	13.581,00	5.059,53	+	2.261,79	=	7.321,32
124,50	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00					
122,00	1.147,00	1.548,45	10.060,00	13.581,00	4.708,37	+	2.193,36	=	6.901,73
119,50	1.150,00	1.552,50	10.060,00	13.581,00					
117,00	1.153,00	1.556,55	10.060,00	13.581,00	4.392,53	+	2.129,60	=	6.522,14
114,50	1.155,00	1.559,25	10.060,00	13.581,00					
112,00	1.157,00	1.561,95	10.060,00	13.581,00	4.107,45	+	2.066,48	=	6.173,93
109,50	1.159,00	1.564,65	10.060,00	13.581,00					
107,00	1.182,00	1.595,70	10.060,00	13.581,00	3.064,96	+	1.616,49	=	4.681,46
104,50	1.206,00	1.628,10	10.060,00	13.581,00					
102,00	1.228,00	1.657,80	10.060,00	13.581,00	2.876,97	+	1.627,08	=	4.504,05
99,50	1.251,00	1.688,85	10.060,00	13.581,00					
97,00	1.271,00	1.715,85	10.060,00	13.581,00	2.705,76	+	1.633,18	=	4.338,94
94,50	1.294,00	1.746,90	10.060,00	13.581,00					
92,00	1.313,00	1.772,55	10.060,00	13.581,00	2.549,38	+	1.637,67	=	4.187,05
89,50	1.333,00	1.799,55	10.060,00	13.581,00					
87,00	1.350,00	1.822,50	10.060,00	13.581,00	2.406,19	+	1.635,85	=	4.042,03
84,50	1.370,00	1.849,50	10.060,00	13.581,00					
82,00	1.388,00	1.873,80	10.060,00	13.581,00	1.708,75	+	1.216,63	=	2.925,38
79,50	1.407,00	1.899,45	10.060,00	13.581,00					
77,00	1.424,00	1.922,40	10.060,00	13.581,00	1.617,03	+	1.214,23	=	2.831,25
74,50	1.442,00	1.946,70	10.060,00	13.581,00					
72,00	1.460,00	1.971,00	10.060,00	13.581,00	1.532,50	+	1.211,95	=	2.744,45
69,50	1.481,00	1.999,35	10.060,00	13.581,00					
67,00	1.499,00	2.023,65	10.060,00	13.581,00	1.454,43	+	1.212,21	=	2.666,64
64,50	1.514,00	2.043,90	10.060,00	13.581,00					
62,00	1.540,00	2.079,00	10.060,00	13.581,00	1.382,17	+	1.214,04	=	2.596,21
59,50	1.553,00	2.096,55	10.060,00	13.581,00					

Segmentmitte x-y-Ebene σ= N/A

σx [kN/m²]	σy [kN/m²]	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]	DRUCK positiv σ1 [Mpa]	ZUG negativ σ2 [Mpa]
26.988,38	**0,00**	**7.321,32**	28,85	-1,86
26.188,66	**0,00**	**6.901,73**	27,90	-1,71
25.432,56	**0,00**	**6.522,14**	27,01	-1,58
24.731,65	**0,00**	**6.173,93**	26,19	-1,46
28.433,07	**0,00**	**4.681,46**	29,18	-0,75
27.681,25	**0,00**	**4.504,05**	28,40	-0,71
26.979,14	**0,00**	**4.338,94**	27,66	-0,68
26.329,77	**0,00**	**4.187,05**	26,98	-0,65
25.713,80	**0,00**	**4.042,03**	26,33	-0,62
31.733,16	**0,00**	**2.925,38**	32,00	-0,27
31.000,48	**0,00**	**2.831,25**	31,26	-0,26
30.324,14	**0,00**	**2.744,45**	30,57	-0,25
29.740,21	**0,00**	**2.666,64**	29,98	-0,24
29.241,14	**0,00**	**2.596,21**	29,47	-0,23

Segmentmitte x-z-Ebene σ = M/W +N/A

σx [kN/m²]	σy [kN/m²]	$\tau_{max,Ed}$ [kN/m²]	DRUCK positiv σ1 [Mpa]	ZUG negativ σ2 [Mpa]
7.817,75	**0,00**	**5.059,53**	10,30	-2,48
5.867,49	**0,00**	**4.708,37**	8,48	-2,61
4.136,89	**0,00**	**4.392,53**	6,92	-2,79
2.597,84	**0,00**	**4.107,45**	5,61	-3,01
9.353,41	**0,00**	**3.064,96**	10,27	-0,91
7.017,43	**0,00**	**2.876,97**	8,05	-1,03
4.889,97	**0,00**	**2.705,76**	6,09	-1,20
2.255,95	**0,00**	**2.549,38**	3,92	-1,66
-823,34	**0,00**	**2.406,19**	2,03	-2,85
9.895,57	**0,00**	**1.708,75**	10,18	-0,29
7.578,70	**0,00**	**1.617,03**	7,91	-0,33
5.433,99	**0,00**	**1.532,50**	5,84	-0,40
3.474,66	**0,00**	**1.454,43**	4,00	-0,53
1.680,76	**0,00**	**1.382,17**	2,46	-0,78

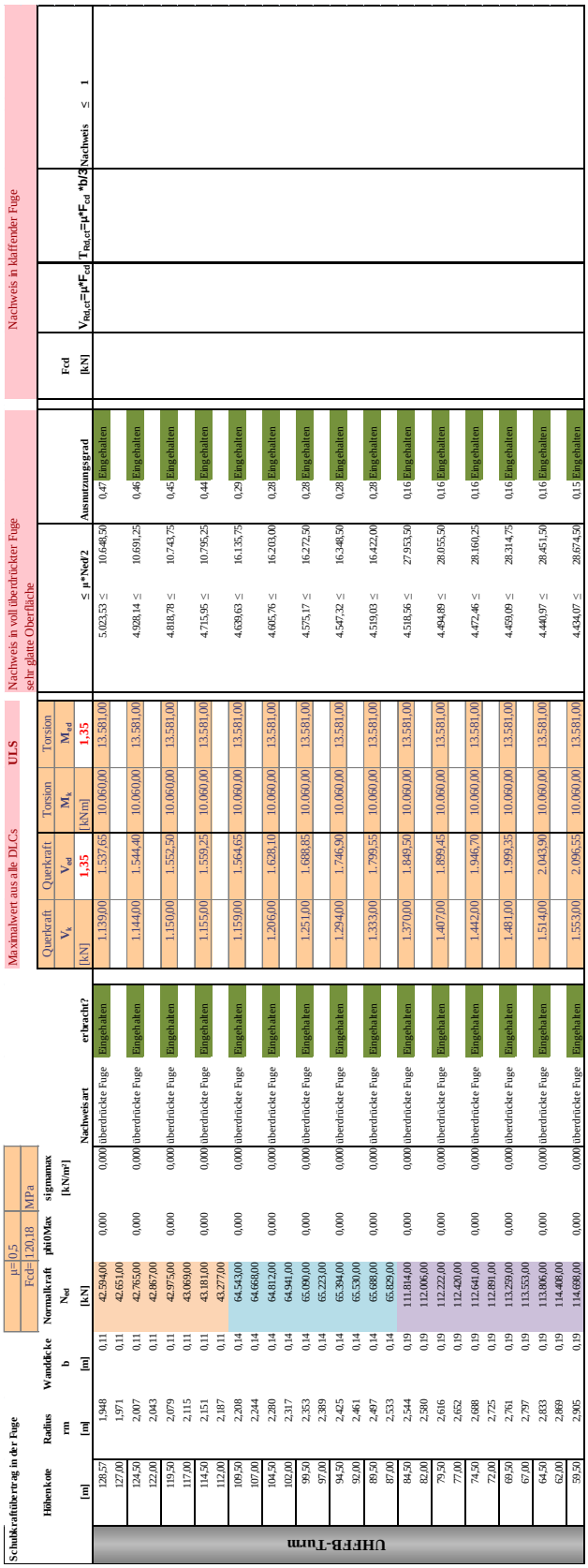
mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P\infty}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

B.3.2.3 Kraftübertragung in der Fuge (ULS)



Schubkraftübertrag in der Fuge					μ= 0,5			Maximalwert aus alle DLCs		ULS		Nachweis in voll überdrückter Fuge sehr glatte Oberfläche					Nachweis in klaffender Fuge			
					Fcd= 120,18		MPa													
	Höhenkote	Radius rm	Wanddicke b	Normalkraft N_{ed}	phi0Max	signamax		Querkraft V_k	Querkraft V_{ed}	Torsion M_k	Torsion M_{ed}				Ausnutzungsgrad	Fcd	$V_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}$	$T_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}*b/3$	Nachweis	
	[m]	[m]	[m]	[kN]		[kN/m²]	Nachweisart	[kN]	1,35	[kNm]	1,35		≤	μ*Ned*2		[kN]				≤ 1
UHFFB-Turm	128,57	1,948	0,11	42.594,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.139,00	1.537,65	10.060,00	13.581,00			5.023,53	≤	10.648,50	0,47	Eingehalten		
	127,00	1,971	0,11	42.651,00																
	124,50	2,007	0,11	42.765,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00			4.928,14	≤	10.691,25	0,46	Eingehalten		
	122,00	2,043	0,11	42.867,00																
	119,50	2,079	0,11	42.975,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.150,00	1.552,50	10.060,00	13.581,00			4.818,78	≤	10.743,75	0,45	Eingehalten		
	117,00	2,115	0,11	43.069,00																
	114,50	2,151	0,11	43.181,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.155,00	1.559,25	10.060,00	13.581,00			4.715,95	≤	10.795,25	0,44	Eingehalten		
	112,00	2,187	0,11	43.277,00																
	109,50	2,208	0,14	64.543,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.159,00	1.564,65	10.060,00	13.581,00			4.639,63	≤	16.135,75	0,29	Eingehalten		
	107,00	2,244	0,14	64.668,00																
	104,50	2,280	0,14	64.812,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.206,00	1.628,10	10.060,00	13.581,00			4.605,76	≤	16.203,00	0,28	Eingehalten		
	102,00	2,317	0,14	64.941,00																
	99,50	2,353	0,14	65.090,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.251,00	1.688,85	10.060,00	13.581,00			4.575,17	≤	16.272,50	0,28	Eingehalten		
	97,00	2,389	0,14	65.223,00																
	94,50	2,425	0,14	65.394,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.294,00	1.746,90	10.060,00	13.581,00			4.547,32	≤	16.348,50	0,28	Eingehalten		
	92,00	2,461	0,14	65.530,00																
	89,50	2,497	0,14	65.688,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.333,00	1.799,55	10.060,00	13.581,00			4.519,03	≤	16.422,00	0,28	Eingehalten		
	87,00	2,533	0,14	65.829,00																
	84,50	2,544	0,19	111.814,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.370,00	1.849,50	10.060,00	13.581,00			4.518,56	≤	27.953,50	0,16	Eingehalten		
	82,00	2,580	0,19	112.006,00																
	79,50	2,616	0,19	112.222,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.407,00	1.899,45	10.060,00	13.581,00			4.494,89	≤	28.055,50	0,16	Eingehalten		
	77,00	2,652	0,19	112.420,00																
	74,50	2,688	0,19	112.641,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.442,00	1.946,70	10.060,00	13.581,00			4.472,46	≤	28.160,25	0,16	Eingehalten		
	72,00	2,725	0,19	112.891,00																
	69,50	2,761	0,19	113.259,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.481,00	1.999,35	10.060,00	13.581,00			4.459,09	≤	28.314,75	0,16	Eingehalten		
	67,00	2,797	0,19	113.553,00																
	64,50	2,833	0,19	113.806,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.514,00	2.043,90	10.060,00	13.581,00			4.440,97	≤	28.451,50	0,16	Eingehalten		
	62,00	2,869	0,19	114.408,00																
	59,50	2,905	0,19	114.698,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	1.553,00	2.096,55	10.060,00	13.581,00			4.434,07	≤	28.674,50	0,15	Eingehalten		

mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P0}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

Schnittkraftübertrag in der Fuge: μ= 0,5; Fcd= 120,18 MPa

UHFFB-Turm	Höhenkote [m]	Radius rm [m]	Wanddicke b [m]	Normalkraft N_{Ed} [kN]	phi0Max	sigmamax [kN/m²]	Nachweis art	erbracht?	Maximalwert aus alle DLCs ULS: Querkraft V_k [kN]	Querkraft V_{Ed} 1,35	Torsion M_k [kNm]	Torsion M_{Ed} 1,35	Nachweis in voll überdrückter Fuge sehr glatte Oberfläche: ≤ μ*Ned/2	Ausnutzungsgrad	Fcd [kN]	Nachweis in klaffender Fuge: $V_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}$	$T_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}*b/3$	Nachweis ≤ 1
	128,57	1,948	0,11	37.749,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.139,00	1.537,65	10.060,00	13.581,00	5.023,53 ≤	9,47	0,53	Eingehalten		
	127,00	1,971	0,11	37.806,88														
	124,50	2,007	0,11	37.920,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00	4.928,14 ≤	9,48	0,52	Eingehalten		
	122,00	2,043	0,11	38.022,88														
	119,50	2,079	0,11	38.130,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.150,00	1.552,50	10.060,00	13.581,00	4.818,78 ≤	9,532,72	0,51	Eingehalten		
	117,00	2,115	0,11	38.224,88														
	114,50	2,151	0,11	38.336,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.155,00	1.559,25	10.060,00	13.581,00	4.715,95 ≤	9,584,22	0,49	Eingehalten		
	112,00	2,187	0,11	38.432,88														
	109,50	2,208	0,14	57.056,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.159,00	1.564,65	10.060,00	13.581,00	4.639,63 ≤	14.264,16	0,33	Eingehalten		
	107,00	2,244	0,14	57.181,63														
	104,50	2,280	0,14	57.325,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.206,00	1.628,10	10.060,00	13.581,00	4.605,76 ≤	14.331,41	0,32	Eingehalten		
	102,00	2,317	0,14	57.454,63														
	99,50	2,353	0,14	57.603,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.251,00	1.688,85	10.060,00	13.581,00	4.575,17 ≤	14.400,91	0,32	Eingehalten		
	97,00	2,389	0,14	57.736,63														
	94,50	2,425	0,14	57.907,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.294,00	1.746,90	10.060,00	13.581,00	4.547,32 ≤	14.476,91	0,31	Eingehalten		
	92,00	2,461	0,14	58.043,63														
	89,50	2,497	0,14	58.201,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.333,00	1.799,55	10.060,00	13.581,00	4.519,03 ≤	14.550,41	0,31	Eingehalten		
	87,00	2,533	0,14	58.342,63														
	84,50	2,544	0,19	98.602,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.370,00	1.849,50	10.060,00	13.581,00	4.518,56 ≤	24.650,69	0,18	Eingehalten		
	82,00	2,580	0,19	98.794,75														
	79,50	2,616	0,19	99.010,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.407,00	1.899,45	10.060,00	13.581,00	4.494,89 ≤	24.752,69	0,18	Eingehalten		
	77,00	2,652	0,19	99.208,75														
	74,50	2,688	0,19	99.429,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.442,00	1.946,70	10.060,00	13.581,00	4.472,46 ≤	24.857,44	0,18	Eingehalten		
	72,00	2,725	0,19	99.679,75														
	69,50	2,761	0,19	100.047,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.481,00	1.999,35	10.060,00	13.581,00	4.459,09 ≤	25.011,94	0,18	Eingehalten		
	67,00	2,797	0,19	100.341,75														
	64,50	2,833	0,19	100.594,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.514,00	2.043,90	10.060,00	13.581,00	4.440,97 ≤	25.148,69	0,18	Eingehalten		
	62,00	2,869	0,19	101.196,75														
	59,50	2,905	0,19	101.486,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.553,00	2.096,55	10.060,00	13.581,00	4.434,07 ≤	25.371,69	0,17	Eingehalten		

mit $N_{Ed} = N_{max} + N_{P\infty}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

Schalenrafftübertrag in der Fuge					μ= 0,5					Maximalwert aus alle DLCs			ULS	Nachweis in voll überdrückter Fuge sehr glatte Oberfläche				Nachweis in klaffender Fuge			
					Fcd= 120,18		MPa														
	Sensor Myz	Radius rm [m]	Wanddicke b [m]	Normalkraft N_{ed} [kN]	phi0Max	signumax [kN/m²]	Nachweisart	erbracht?		Querkraft V_k [kN]	Querkraft V_{ed} 1,35	Torsion M_k [kNm]	Torsion M_{ed} 1,35		≤ μ*Ned/2	Ausnutzungsgrad	Fcd [kN]	$V_{Rdc}=\mu*F_{cd}$	$T_{Rd,c}=\mu*F_{cd}$ *b/3	Nachweis ≤ 1
UHFFB-Turm	4288	1,948	0,11	41.547,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.139,00	1.537,65	10.060,00	13.581,00	≤	5.023,53	0,48 Eingehalten				
	4278	1,971	0,11	41.604,00																
	4268	2,007	0,11	41.738,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00	≤	4.928,14	0,47 Eingehalten				
	4258	2,043	0,11	41.821,00																
	4248	2,079	0,11	41.928,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.150,00	1.552,50	10.060,00	13.581,00	≤	4.818,78	0,46 Eingehalten				
	4238	2,115	0,11	42.022,00																
	4228	2,151	0,11	42.134,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.155,00	1.559,25	10.060,00	13.581,00	≤	4.715,95	0,45 Eingehalten				
	4218	2,187	0,11	42.231,00																
	4208	2,208	0,14	63.486,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.159,00	1.564,65	10.060,00	13.581,00	≤	4.639,63	0,29 Eingehalten				
	4198	2,244	0,14	63.621,00																
	4188	2,280	0,14	63.766,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.206,00	1.628,10	10.060,00	13.581,00	≤	4.605,76	0,29 Eingehalten				
	4178	2,317	0,14	63.894,00																
	4168	2,353	0,14	64.043,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.251,00	1.688,85	10.060,00	13.581,00	≤	4.575,17	0,29 Eingehalten				
	4158	2,389	0,14	64.176,00																
	4148	2,425	0,14	64.347,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.294,00	1.746,90	10.060,00	13.581,00	≤	4.547,32	0,28 Eingehalten				
	4138	2,461	0,14	64.483,00																
	4128	2,497	0,14	64.641,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.333,00	1.799,55	10.060,00	13.581,00	≤	4.519,03	0,28 Eingehalten				
	4118	2,533	0,14	64.782,00																
	4108	2,544	0,19	110.767,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.370,00	1.849,50	10.060,00	13.581,00	≤	4.518,56	0,16 Eingehalten				
	4098	2,580	0,19	110.959,00																
	4088	2,616	0,19	111.175,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.407,00	1.899,45	10.060,00	13.581,00	≤	4.484,89	0,16 Eingehalten				
	4078	2,652	0,19	111.373,00																
	4068	2,688	0,19	111.594,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.442,00	1.946,70	10.060,00	13.581,00	≤	4.472,46	0,16 Eingehalten				
	4058	2,725	0,19	111.844,00																
	4048	2,761	0,19	112.212,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.481,00	1.999,35	10.060,00	13.581,00	≤	4.459,09	0,16 Eingehalten				
	4038	2,797	0,19	112.507,00																
	4028	2,833	0,19	112.760,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.514,00	2.043,90	10.060,00	13.581,00	≤	4.440,97	0,16 Eingehalten				
	4018	2,869	0,19	113.360,00																
	4008	2,905	0,19	113.651,00	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten		1.553,00	2.096,55	10.060,00	13.581,00	≤	4.434,07	0,16 Eingehalten				

mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P0}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

Schubkraftübertrag in der Fuge — UHFFB-Turm

μ= 0,5; Fcd= 120,18 MPa

Maximalwert aus alle DLCs — ULS | Nachweis in voll überdrückter Fuge, sehr glatte Oberfläche | Nachweis in klaffender Fuge

Höhenkote [m]	Radius rm [m]	Wanddicke b [m]	Normalkraft N_{ed} [kN]	phi0Max	sigmamax [kN/m²]	Nachweisart	erbracht?	Querkraft V_k [kN]	Querkraft V_{ed} 1,35	Torsion M_k [kNm]	Torsion M_{ed} 1,35		≤ μ*Ned/2	≤1		Fcd [kN]	$V_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}$	$T_{Rd,ct}=\mu*F_{cd}*b/3$	Nachweis ≤ 1
128,57	1,948	0,11	36.702,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.130,00	1.525,50	10.060,00	13.581,00	5.011,38 ≤	9.175,72	0,55	Eingehalten				
127,00	1,971	0,11	36.759,88																
124,50	2,007	0,11	36.873,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.137,00	1.534,95	10.060,00	13.581,00	4.918,69 ≤	9.218,47	0,53	Eingehalten				
122,00	2,043	0,11	36.976,88																
119,50	2,079	0,11	37.083,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.144,00	1.544,40	10.060,00	13.581,00	4.810,68 ≤	9.270,97	0,52	Eingehalten				
117,00	2,115	0,11	37.177,88																
114,50	2,151	0,11	37.289,88	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.152,00	1.555,20	10.060,00	13.581,00	4.711,90 ≤	9.322,47	0,51	Eingehalten				
112,00	2,187	0,11	37.386,88																
109,50	2,208	0,14	56.009,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.205,00	1.626,75	10.060,00	13.581,00	4.701,73 ≤	14.002,41	0,34	Eingehalten				
107,00	2,244	0,14	56.134,63																
104,50	2,280	0,14	56.279,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.268,00	1.711,80	10.060,00	13.581,00	4.689,46 ≤	14.069,91	0,33	Eingehalten				
102,00	2,317	0,14	56.407,63																
99,50	2,353	0,14	56.556,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.326,00	1.790,10	10.060,00	13.581,00	4.676,42 ≤	14.139,16	0,33	Eingehalten				
97,00	2,389	0,14	56.689,63																
94,50	2,425	0,14	56.860,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.383,00	1.867,05	10.060,00	13.581,00	4.667,47 ≤	14.215,16	0,33	Eingehalten				
92,00	2,461	0,14	56.996,63																
89,50	2,497	0,14	57.154,63	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.434,00	1.935,90	10.060,00	13.581,00	4.655,38 ≤	14.288,66	0,33	Eingehalten				
87,00	2,533	0,14	57.295,63																
84,50	2,544	0,19	97.555,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.482,00	2.000,70	10.060,00	13.581,00	4.669,76 ≤	24.388,94	0,19	Eingehalten				
82,00	2,580	0,19	97.747,75																
79,50	2,616	0,19	97.963,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.525,00	2.058,75	10.060,00	13.581,00	4.654,19 ≤	24.490,94	0,19	Eingehalten				
77,00	2,652	0,19	98.161,75																
74,50	2,688	0,19	98.382,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.565,00	2.112,75	10.060,00	13.581,00	4.638,51 ≤	24.595,69	0,19	Eingehalten				
72,00	2,725	0,19	98.632,75																
69,50	2,761	0,19	99.000,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.610,00	2.173,50	10.060,00	13.581,00	4.633,24 ≤	24.750,19	0,19	Eingehalten				
67,00	2,797	0,19	99.295,75																
64,50	2,833	0,19	99.548,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.647,00	2.223,45	10.060,00	13.581,00	4.620,52 ≤	24.887,19	0,19	Eingehalten				
62,00	2,869	0,19	100.148,75																
59,50	2,905	0,19	100.439,75	0,000	0,000	überdrückte Fuge	Eingehalten	1.692,00	2.284,20	10.060,00	13.581,00	4.621,72 ≤	25.109,94	0,18	Eingehalten				

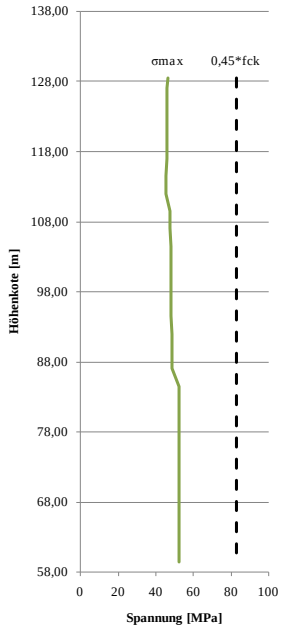
mit $N_{Ed} = N_{min} + N_{P\,\infty}$

M_{Ed} = maximales Moment aller Lastfälle + M_{temp} + M_{imp}

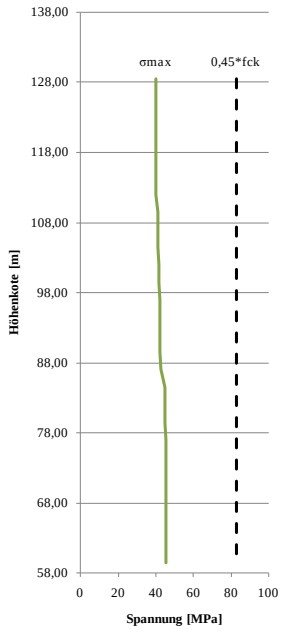
V_{Ed} = maximale Querkraft aller Lastfälle

$M_{T,Ed}$ = maximales Torsionsmoment aller Lastfälle

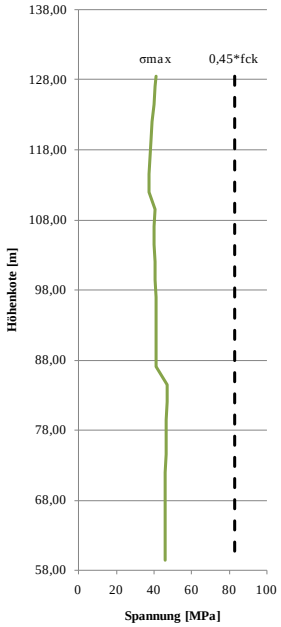
B.3.2.4 Spannungsbegrenzung (SLS)



$N_{Ed} = N_{min} + N_{P0}$
M_{Ed} = maximales Moment aus Power Production Lastfällen (DLC 1.1, DLC 1.3, DLC 1.5 - 1.9) und den Ermüdungslastfällen DLC 3.1 und DLC 4.1 $(M_{PP}) + M_{temp} + M_{imp}$

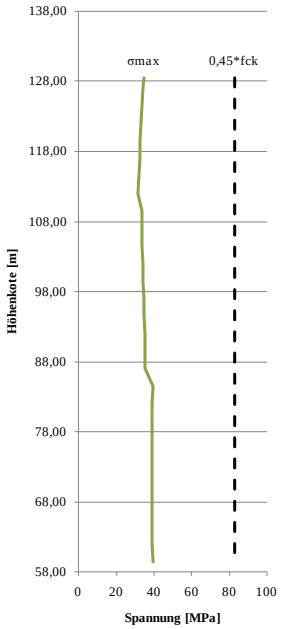


$N_{Ed} = N_{min} + N_{P\infty}$
M_{Ed} = maximales Moment aus Power Production Lastfällen (DLC 1.1, DLC 1.3, DLC 1.5 - 1.9) und den Ermüdungslastfällen DLC 3.1 und DLC 4.1 $(M_{PP}) + M_{temp} + M_{imp}$



$N_{Ed} = N_{min} + N_{P0}$

M_{Ed} = Moment aus der 99%-Fraktile $(M_{LDD99\%}) + M_{temp} + M_{imp}$



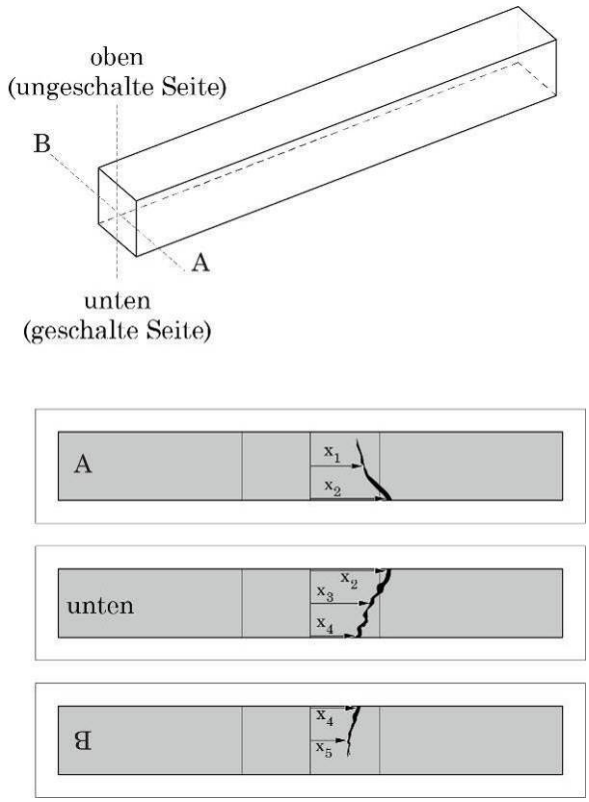
$N_{Ed} = N_{min} + N_{P\,\infty}$

M_{Ed} = Moment aus der 99%-Fraktile $(M_{LDD99\%}) + M_{temp} + M_{imp}$

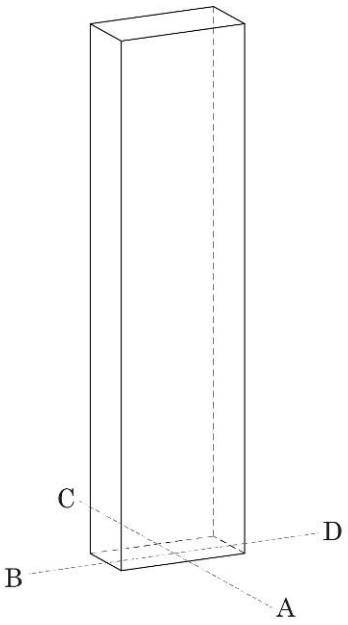
Anhang C Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung

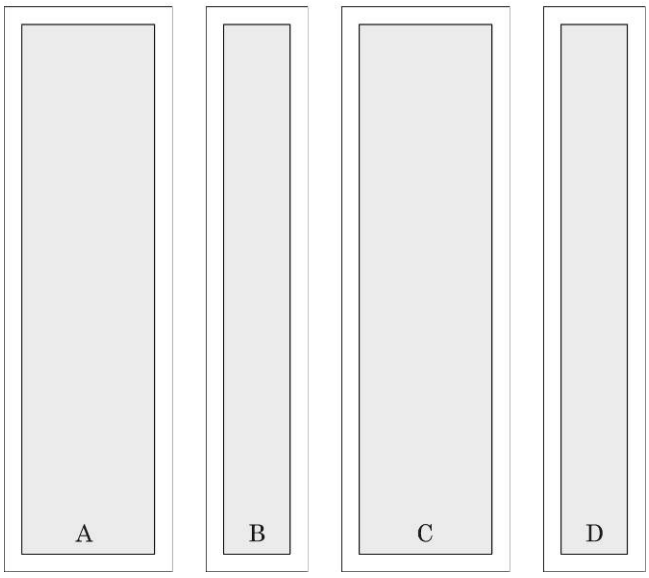
In Anhang C.1 sind die Ergebnisse der kraftgeregelten Druckversuche der Chargen C4 bis C11 dargestellt. Je Charge ist eine Tabelle mit den wesentlichen Daten zur Versuchsdurchführung, den Probekörpern und den Prüfkräften bzw. -spannungen angegeben. Zusätzlich sind für die Chargen C4 und C5 die Ergebnisse der E-Modul-Prüfung und der kraftgeregelten Druckversuche mit Verformungsmessung dargestellt. Für die Probekörper, an denen kraftgeregelte Druckversuche mit Verformungsmessung durchgeführt wurden, ist jeweils die Kraft-Längenänderungs-Kurve angegeben.

In Anhang C.2 sind die Ergebnisse der Biegezugversuche der Chargen C4 bis C11 dargestellt. Je Charge ist eine Tabelle mit den wesentlichen Daten zur Versuchsdurchführung, den Probekörpern und den Prüfkräften bzw. -spannungen angegeben. Des Weiteren ist für jeden Probekörper die Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve angegeben sowie eine photographische Dokumentation der Risslokalisierung. Dabei wurde auch die Entfernung von der Mitte der Prismen zum Riss gemessen und protokolliert. Im nachfolgenden Bild ist die Anordnung der Fotos in Bezug auf die für die Prismen ohne Kerbe festgelegten Bezeichnungen sowie die gemessenen Entfernungen von der Mitte der Prismen zum Riss schematisch dargestellt.



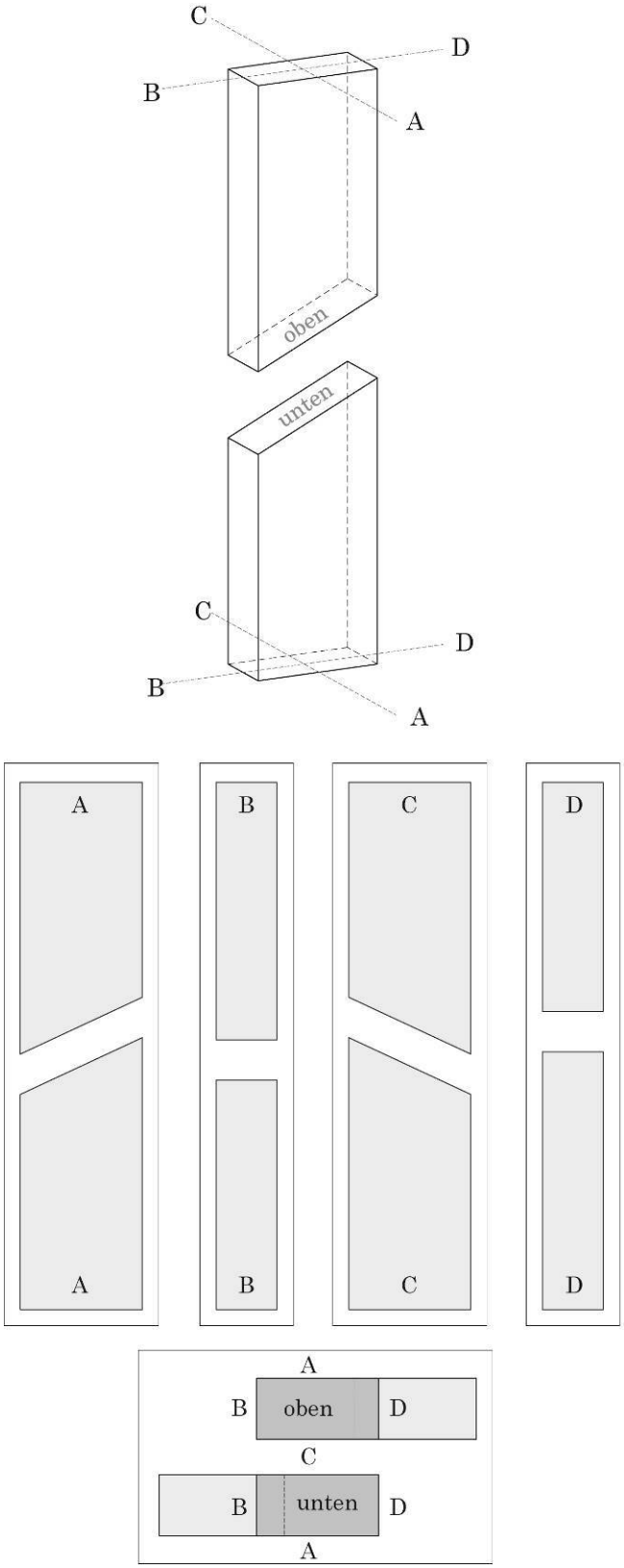
In Anhang C.3 sind die Ergebnisse der Druck- und Schub-Druck-Versuche unter statischer Belastung dargestellt. Für die Versuchskörper ohne Fuge (Referenzprismen) ist eine Tabelle mit den wesentlichen Daten zur Versuchsdurchführung, den Probekörpern und den Prüfkräften bzw. -spannungen angegeben. Des Weiteren sind für jeden Versuchskörper die Kraft-Längenänderungs-Kurve sowie eine photographische Dokumentation der Bruchbilder angegeben. Im nachfolgenden Bild ist die Anordnung der Fotos in Bezug auf die für die Versuchskörper ohne Fuge (Referenzprismen) festgelegten Bezeichnungen schematisch dargestellt.





Für die Versuchskörper mit sehr glatter, gestrahlter, rauer und verzahnter Fuge ist eine Tabelle mit den wesentlichen Daten zur Versuchsdurchführung, den Probekörpern und den Prüfkräften bzw. -spannungen angegeben. Des Weiteren ist für jeden Versuchskörper eine photographische Dokumenta-

tion der Bruchbilder angegeben. Im nachfolgenden Bild ist die Anordnung der Fotos in Bezug auf die für die Versuchskörper mit Fuge festgelegten Bezeichnungen schematisch dargestellt.



C.1 Druckversuche und E-Modul-Prüfung

C.1.1 Charge C4

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

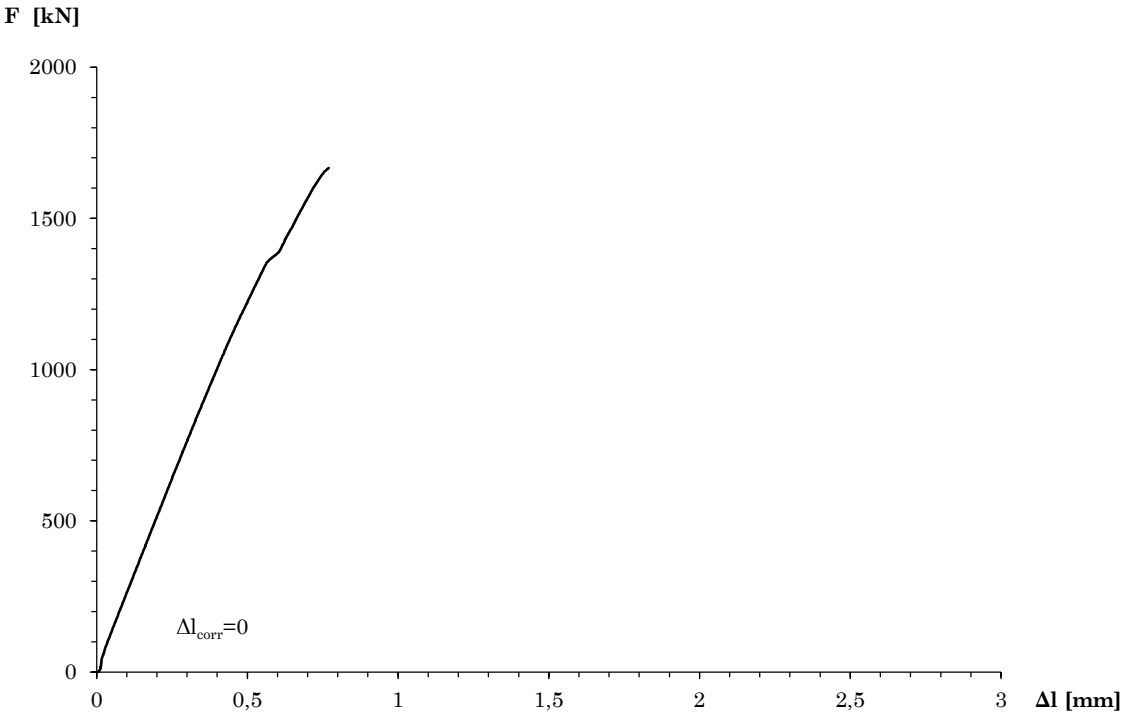
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C4-29_11_2011	26.01.2012	58	99,3	203,1	4,084	2,596	1661,6	-214,6
KZ-2-DFM2-C4-29_11_2011	26.01.2012	58	99,5	201,0	4,026	2,576	1737,7	-223,5
KZ-3-DFM2-C4-29_11_2011	26.01.2012	58	99,5	200,2	4,026	2,586	1683,9	-216,6
Mittelwert	m							-218,2
Standardabweichung	s							4,68
Variationskoeffizient	v							2,15 %

E-Modul-Prüfung (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

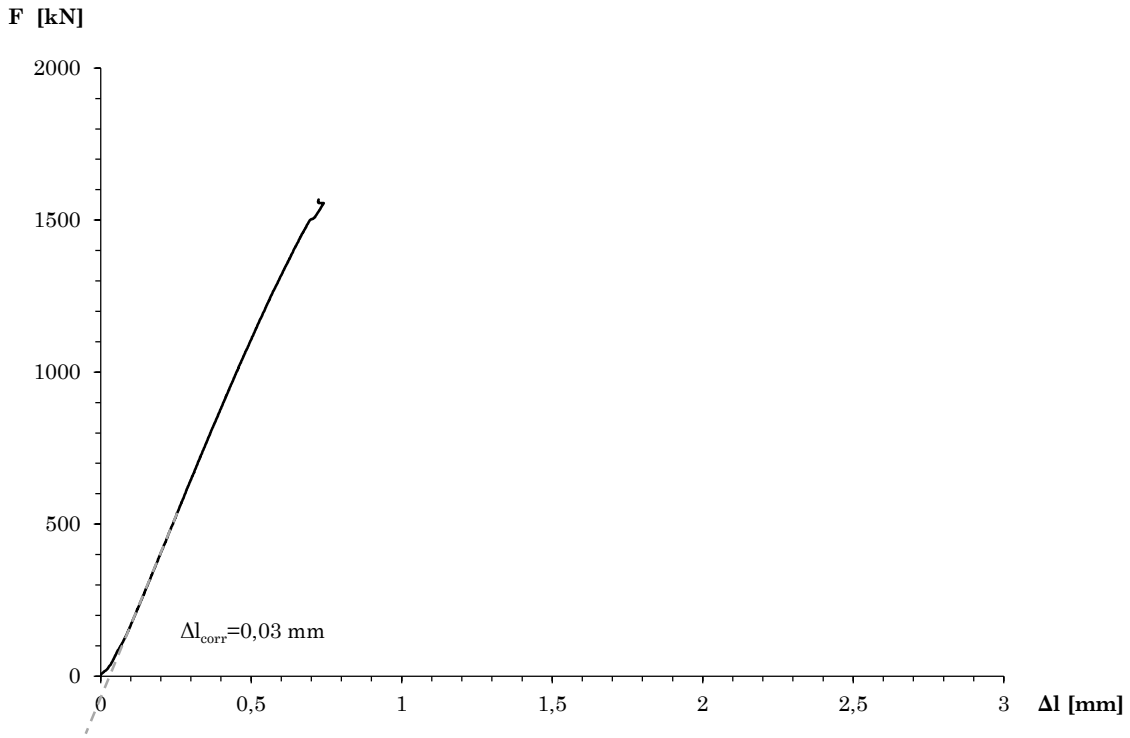
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Prüfspannung bei der dritten Belastung		Dehnung bei der dritten Belastung		E_c
			d	h	σ_u	σ_o	ε_u	ε_o	
		[Tage]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[‰]	[‰]	[MPa]
KZ-4-DFM2-C4-29_11_2011	30.01.2012	62	99,3	198,8	-0,495	-72,727	-0,063	-1,280	59369
KZ-5-DFM2-C4-29_11_2011	30.01.2012	62	99,3	200,0	-0,503	-72,725	-0,043	-1,273	58717
KZ-6-DFM2-C4-29_11_2011	30.01.2012	62	99,3	196,5	-0,476	-72,729	-0,030	-1,240	59714
Mittelwert	m								59267
Standardabweichung	s								506
Variationskoeffizient	v								0,85 %

Kraftgeregelte Druckversuche mit Verformungsmessung (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

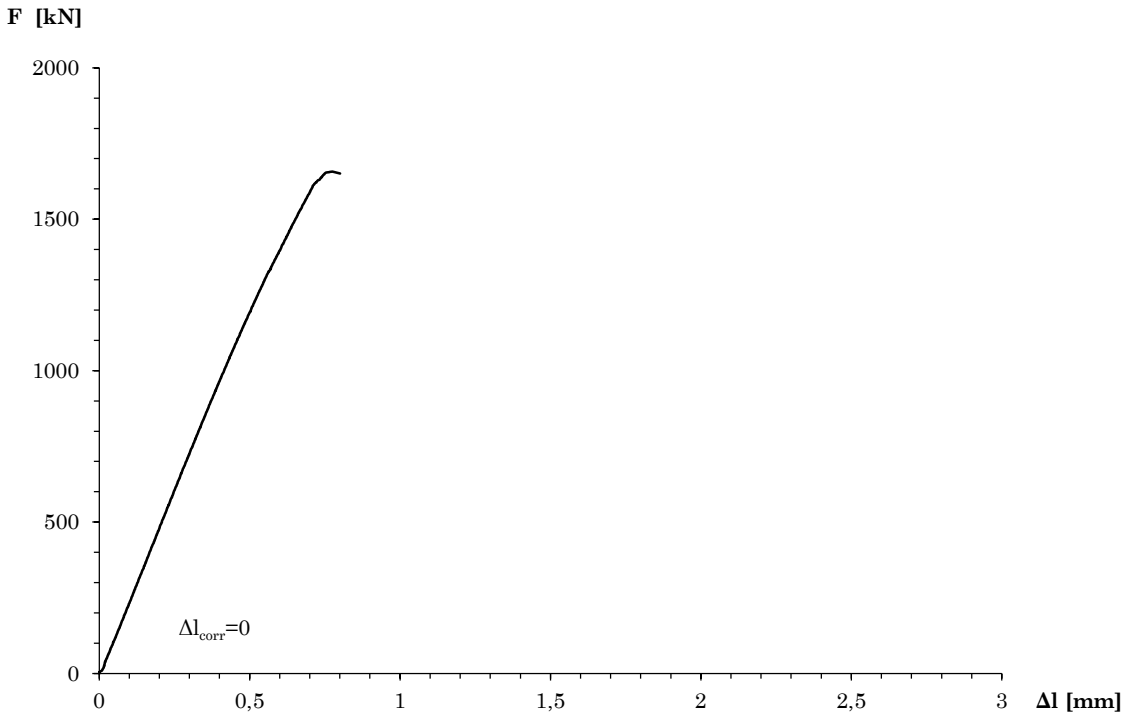
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c	ε_{c1}
			d	h	m	ρ			
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]	[‰]
KZ-4-DFM2-C4-29_11_2011	03.02.2012	66	99,3	198,8	4,023	2,613	1675,2	-216,3	-3,91
KZ-5-DFM2-C4-29_11_2011	03.02.2012	66	99,3	200,0	4,049	2,614	1573,6	-203,2	-3,53
KZ-6-DFM2-C4-29_11_2011	03.02.2012	66	99,3	196,5	3,970	2,609	1656,8	-213,9	-4,04
Mittelwert	m							-211,2	-3,8
Standardabweichung	s							6,99	0,27
Variationskoeffizient	v							3,31 %	6,93 %



KZ-4-DFM2-C4-29_11_2011 (Messlänge: l=196,4 mm)



KZ-5-DFM2- C4-29_11_2011 (Messlänge: l=196,8 mm)



KZ-6-DFM2- C4-29_11_2011 (Messlänge: l=191,8 mm)

C.1.2 Charge C5

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

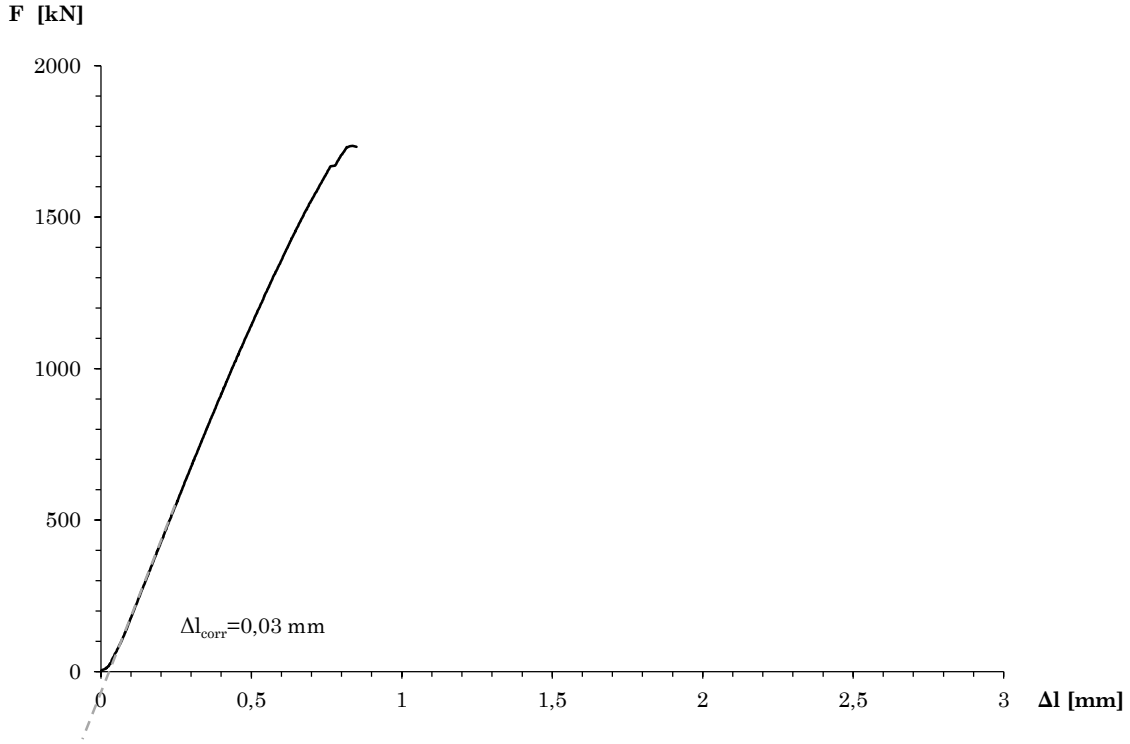
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C5-30_11_2011	26.01.2012	57	99,5	199,0	3,961	2,560	1809,4	-232,7
KZ-2-DFM2-C5-30_11_2011	26.01.2012	57	99,5	198,5	4,031	2,612	1777,9	-228,7
KZ-3-DFM2-C5-30_11_2011	26.01.2012	57	99,5	200,8	4,031	2,582	1792,4	-230,5
Mittelwert	m							-230,62
Standardabweichung	s							2,03
Variationskoeffizient	v							0,88 %

E-Modul-Prüfung (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

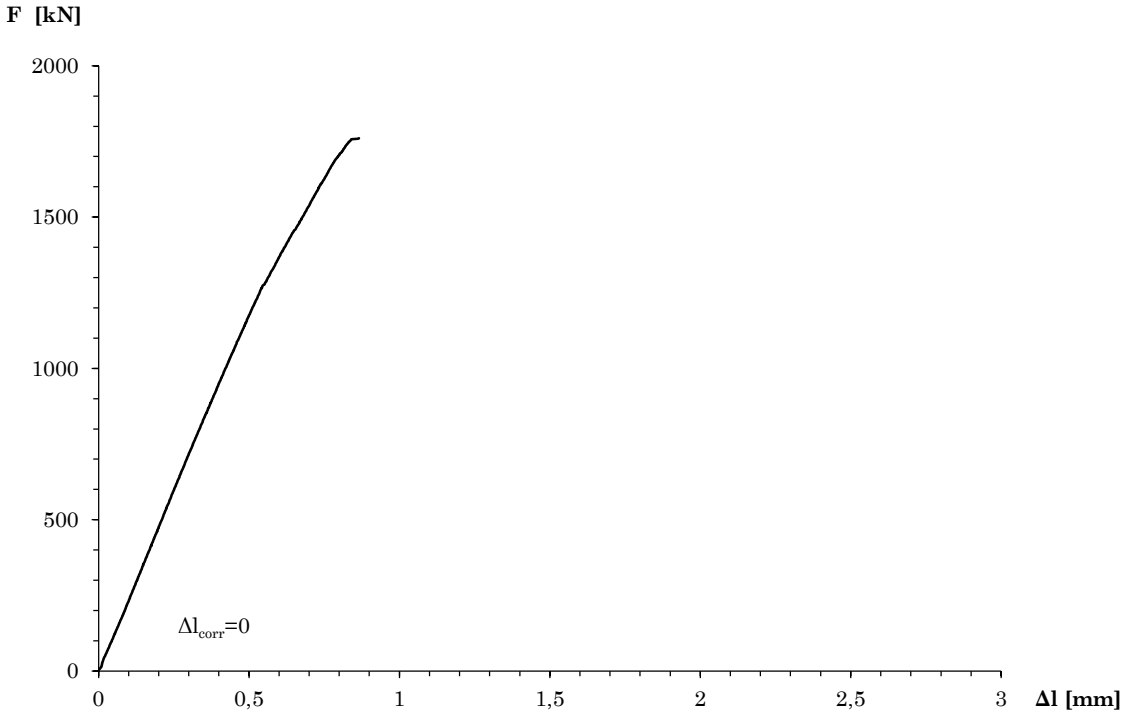
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Prüfspannung bei der dritten Belastung		Dehnung bei der dritten Belastung		E_c
			d	h	σ_u	σ_o	ε_u	ε_o	
		[Tage]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[‰]	[‰]	[MPa]
KZ-4-DFM2-C5-30-11-2011	02.02.2012	64	99,3	199,6	-0,477	-76,864	-0,013	-1,293	59677
KZ-5-DFM2-C5-30-11-2011	02.02.2012	64	99,3	200,8	-0,489	-76,867	-0,037	-1,317	59670
KZ-6-DFM2-C5-30-11-2011	02.02.2012	64	99,3	200,7	-0,499	-76,865	-0,010	-1,300	59198
Mittelwert	m								59515
Standardabweichung	s								274
Variationskoeffizient	v								0,46 %

Kraftgeregelte Druckversuche mit Verformungsmessung (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

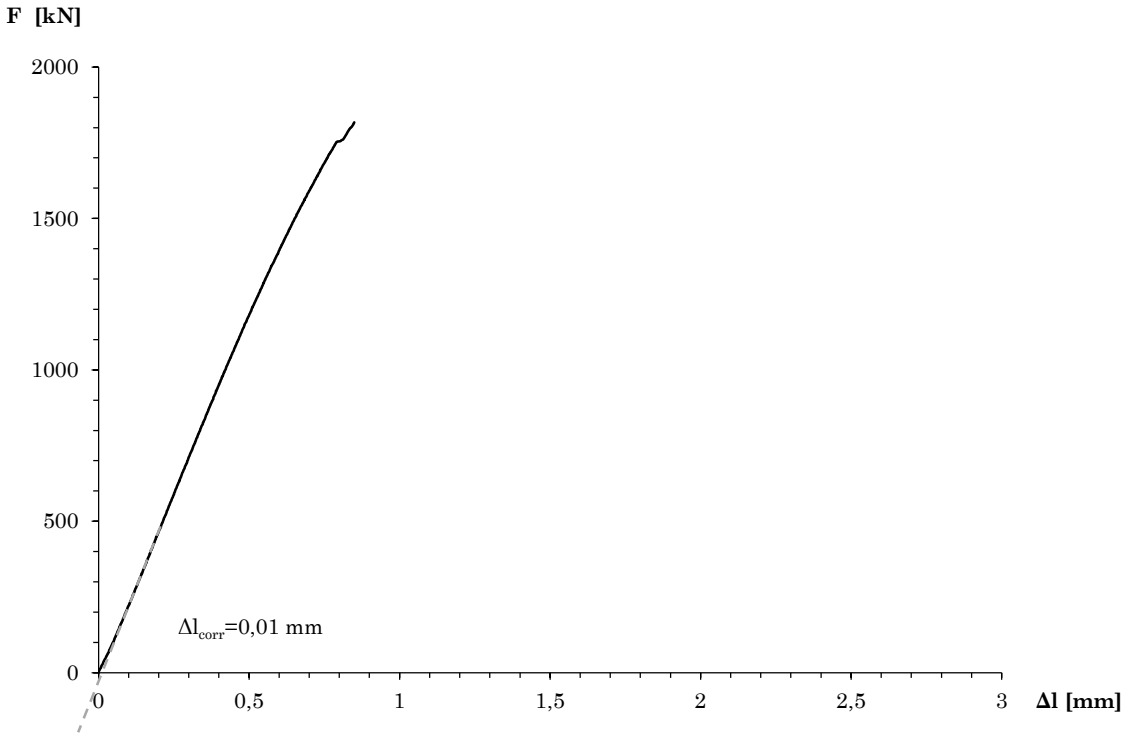
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c	ε_{c1}
			d	h	m	ρ			
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]	[‰]
KZ-4-DFM2-C5-30_11_2011	03.02.2012	65	99,3	199,6	4,024	2,603	1734,9	-224,0	-4,17
KZ-5-DFM2-C5-30_11_2011	03.02.2012	65	99,3	200,8	4,056	2,608	1760,0	-227,3	-4,42
KZ-6-DFM2-C5-30_11_2011	03.02.2012	65	99,3	200,7	4,052	2,607	1829,0	-236,2	-4,30
Mittelwert	m							-229,15	-4,30
Standardabweichung	s							6,29	0,13
Variationskoeffizient	v							2,75 %	2,91 %



KZ-4-DFM2-C5-30_11_2011 (Messlänge: l=193,7 mm)



KZ-5-DFM2- C5-30_11_2011 (Messlänge: l=196,1 mm)



KZ-6-DFM2- C5-30_11_2011 (Messlänge: l=195,4 mm)

C.1.3 Charge C6

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C6-05_12_2011	26.01.2012	52	99,5	202,2	4,047	2,574	1813,3	-233,2
KZ-2-DFM2-C6-05_12_2011	26.01.2012	52	99,4	201,0	4,032	2,585	1712,9	-220,7
KZ-3-DFM2-C6-05_12_2011	26.01.2012	52	99,5	202,3	4,054	2,577	1748,1	-224,8
Mittelwert	m							-226,3
Standardabweichung	s							6,36
Variationskoeffizient	v							2,81 %

C.1.4 Charge C7

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C7-06_12_2011	26.01.2012	51	99,5	201,9	4,059	2,586	1604,0	-206,3
KZ-2-DFM2-C7-06_12_2011	26.01.2012	51	99,5	200,7	4,008	2,568	1731,3	-222,7
KZ-3-DFM2-C7-06_12_2011	26.01.2012	51	99,5	198,4	3,985	2,583	1678,5	-215,9
Mittelwert	m							-214,9
Standardabweichung	s							8,23
Variationskoeffizient	v							3,83 %

C.1.5 Charge C8

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C8-09_01_2012	27.01.2012	18	99,5	200,1	4,040	2,597	1800,0	-231,5
KZ-2-DFM2-C8-09_01_2012	27.01.2012	18	99,3	201,4	4,041	2,591	1520,7	-196,4
KZ-3-DFM2-C8-09_01_2012	27.01.2012	18	99,4	200,3	4,028	2,591	1733,7	-223,4
Mittelwert	m							-217,1
Standardabweichung	s							18,40
Variationskoeffizient	v							8,48 %

C.1.6 Charge C9

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C9-10_01_2012	27.01.2012	17	99,5	196,0	3,926	2,576	1752,3	-225,4
KZ-2-DFM2-C9-10_01_2012	27.01.2012	17	99,5	200,8	4,025	2,578	1753,5	-225,5
KZ-3-DFM2-C9-10_01_2012	27.01.2012	17	99,5	200,7	4,000	2,563	1793,7	-230,7
Mittelwert	m							-227,2
Standardabweichung	s							3,03
Variationskoeffizient	v							1,33 %

C.1.7 Charge C10

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C10-16_01_2012	27.01.2012	11	99,5	201,2	4,035	2,579	1815,0	-233,4
KZ-2-DFM2-C10-16_01_2012	27.01.2012	11	99,5	202,0	4,012	2,554	1743,4	-224,2
KZ-3-DFM2-C10-16_01_2012	27.01.2012	11	99,4	200,8	4,019	2,579	1832,9	-236,2
Mittelwert	m							-231,3
Standardabweichung	s							6,27
Variationskoeffizient	v							2,71 %

C.1.8 Charge C11

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

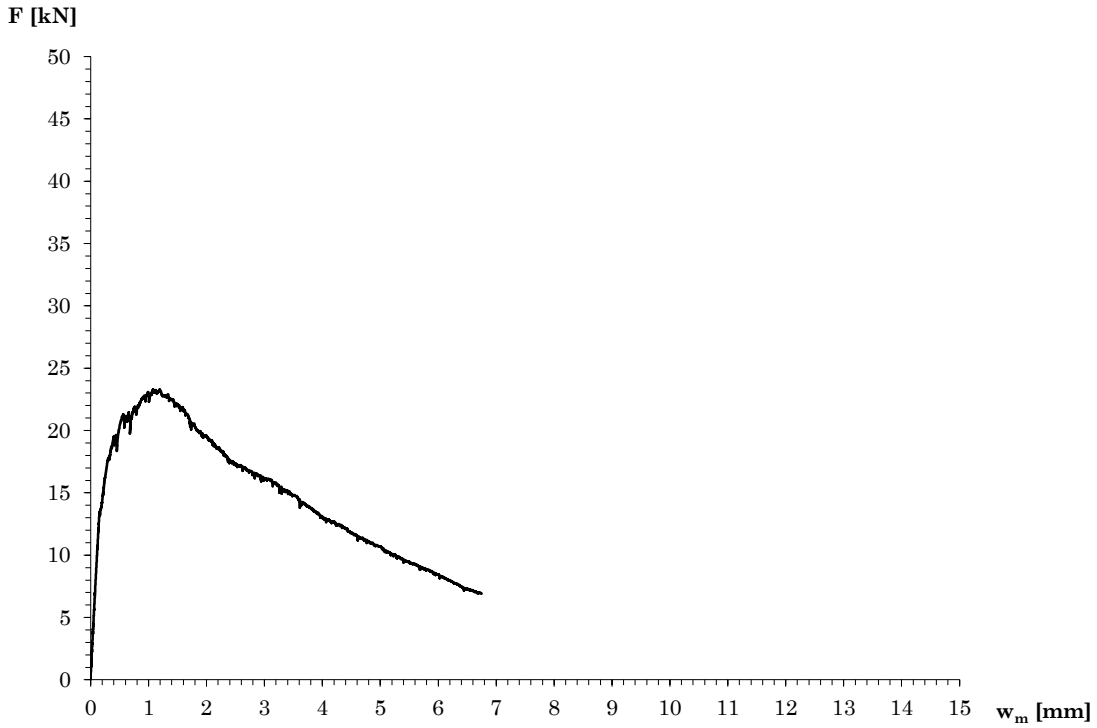
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C11-17_01_2012	27.01.2012	10	99,5	201,7	4,009	2,556	1832,0	-235,6
KZ-2-DFM2-C11-17_01_2012	27.01.2012	10	99,5	201,4	4,022	2,568	1736,4	-223,3
KZ-3-DFM2-C11-17_01_2012	27.01.2012	10	99,3	198,4	3,931	2,558	1784,7	-230,5
Mittelwert	m							-229,8
Standardabweichung	s							6,17
Variationskoeffizient	v							2,69 %

C.2 Biegezugversuche

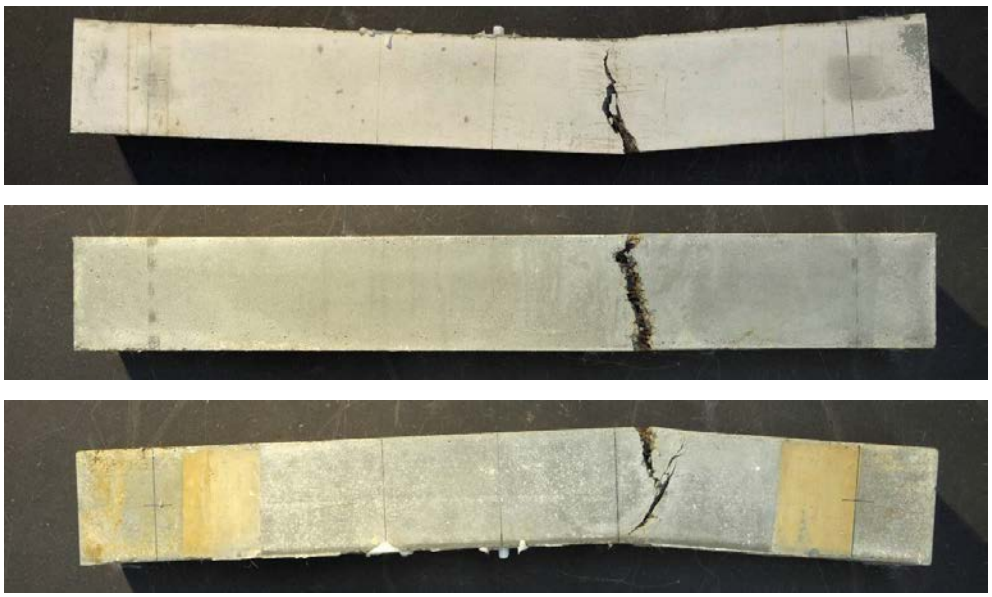
C.2.1 Charge C4

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C4-29_11_2011	08.02.2012	71	74,10	74,08	13,46	14,71	0,15	23,28	25,45	1,08
M1-2-DFM2-C4-29_11_2011	08.02.2012	71	75,25	73,17	13,80	15,04	0,15	22,22	24,22	1,20
M1-3-DFM2-C4-29_11_2011	08.02.2012	71	75,37	75,00	12,78	13,57	0,14	25,18	26,72	1,34
Mittelwert	m					14,44	0,15		25,46	1,21
Standardabweichung	s					0,77	0,01		1,25	0,13
Variationskoeffizient	v					5,35 %	3,91 %		4,92 %	11,00 %

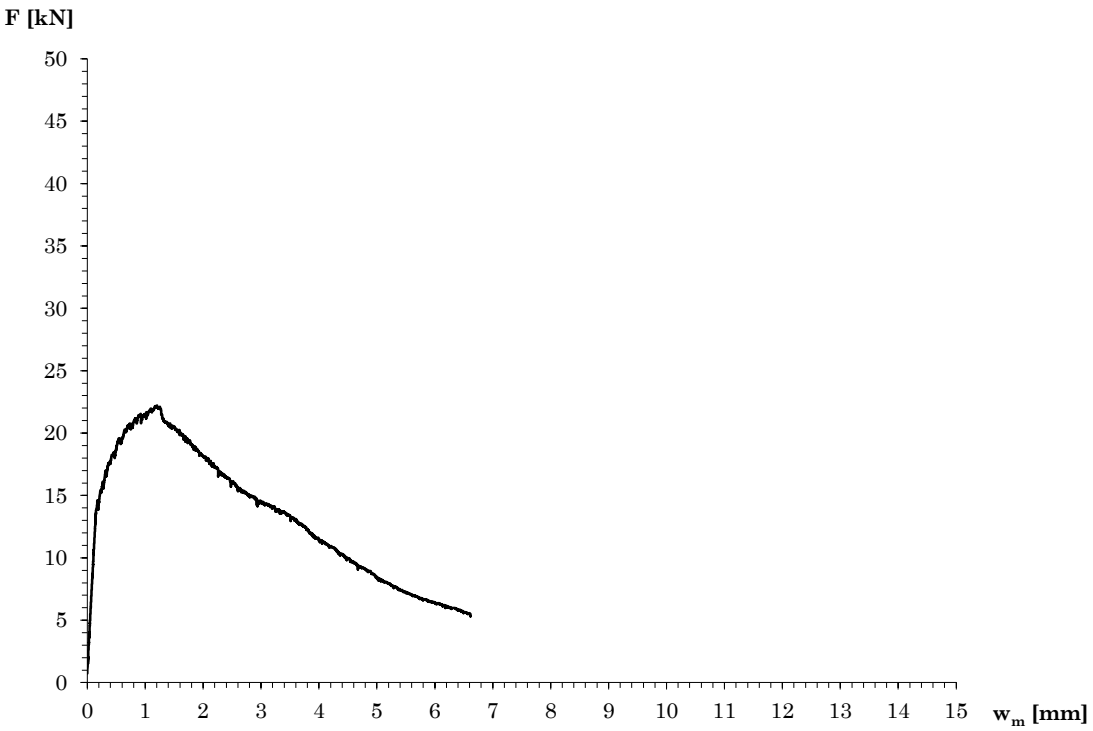


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

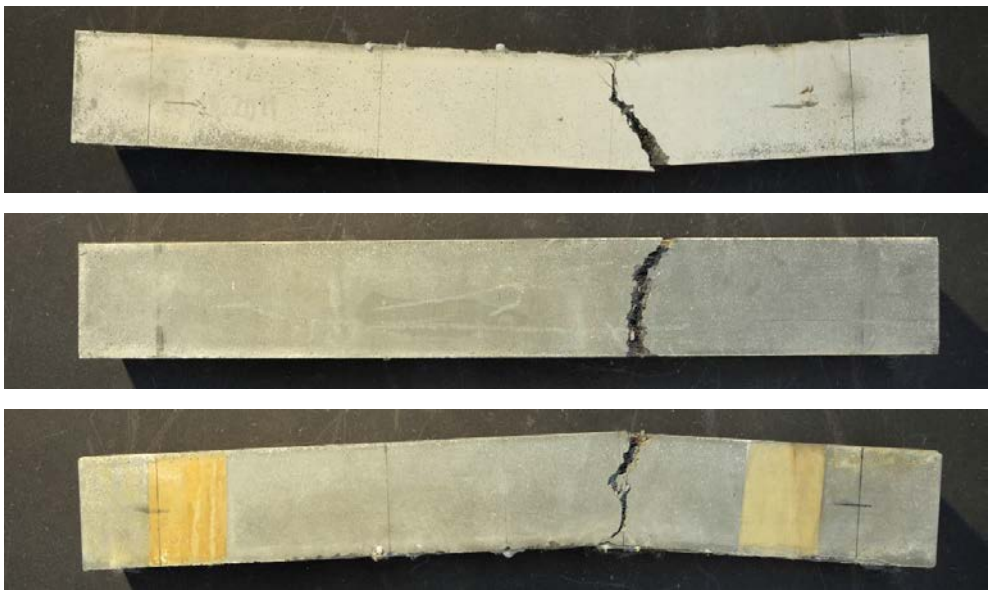


b) Risslokalisierung (x_1 = 72 mm, x_2 = 88 mm, x_3 = 85 mm, x_4 = 89 mm, x_5 = 100 mm)

M1-1-DFM2-C4-29_11_2011

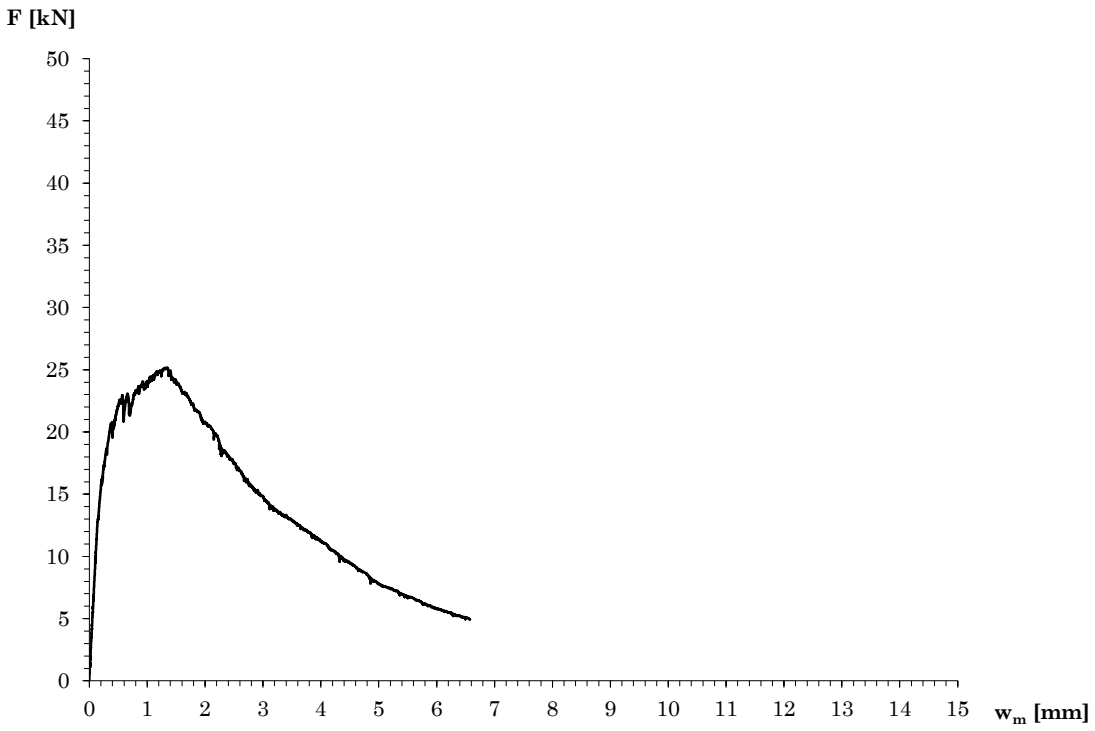


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

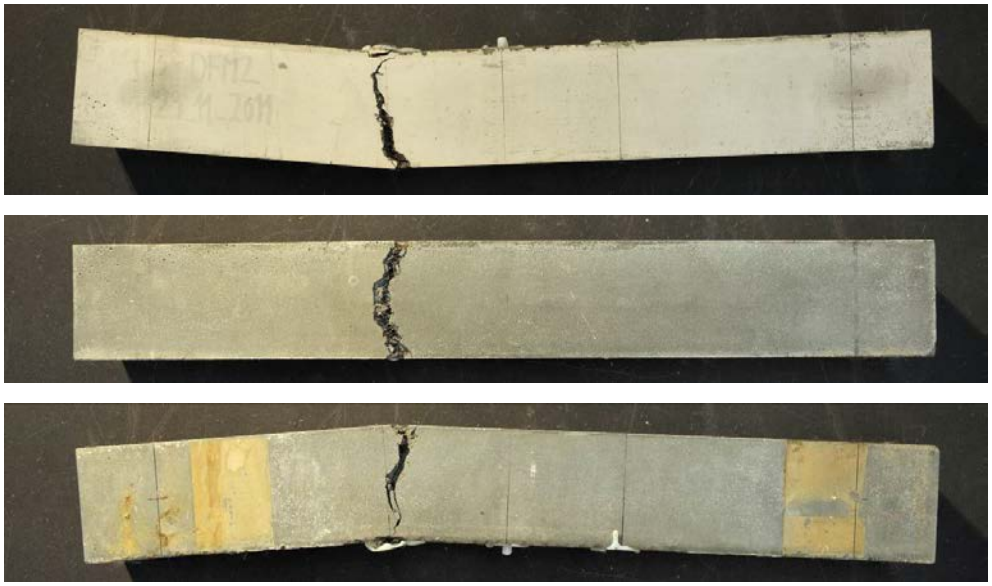


b) Risslokalisierung (x_1 = 85 mm, x_2 = 105 mm, x_3 = 84 mm, x_4 = 81 mm, x_5 = 70 mm)

M1-2-DFM2-C4-29_11_2011



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



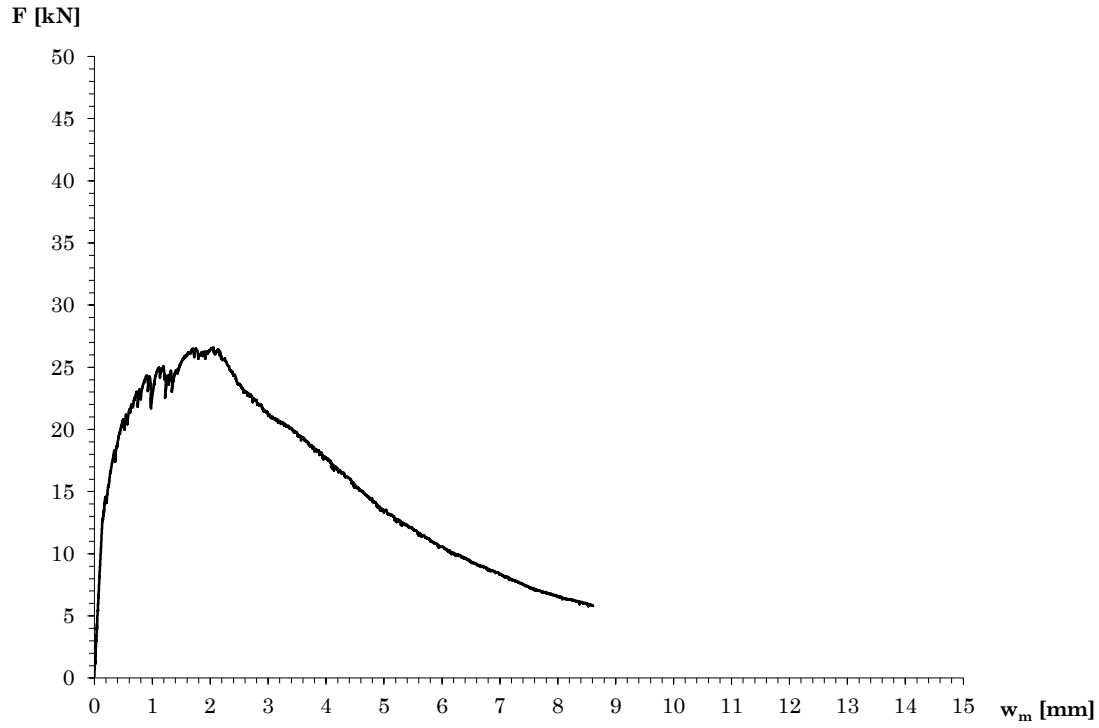
b) Risslokalisierung (x_1 = 75 mm, x_2 = 61 mm, x_3 = 75 mm, x_4 = 66 mm, x_5 = 72 mm)

M1-3-DFM2-C4-29_11_2011

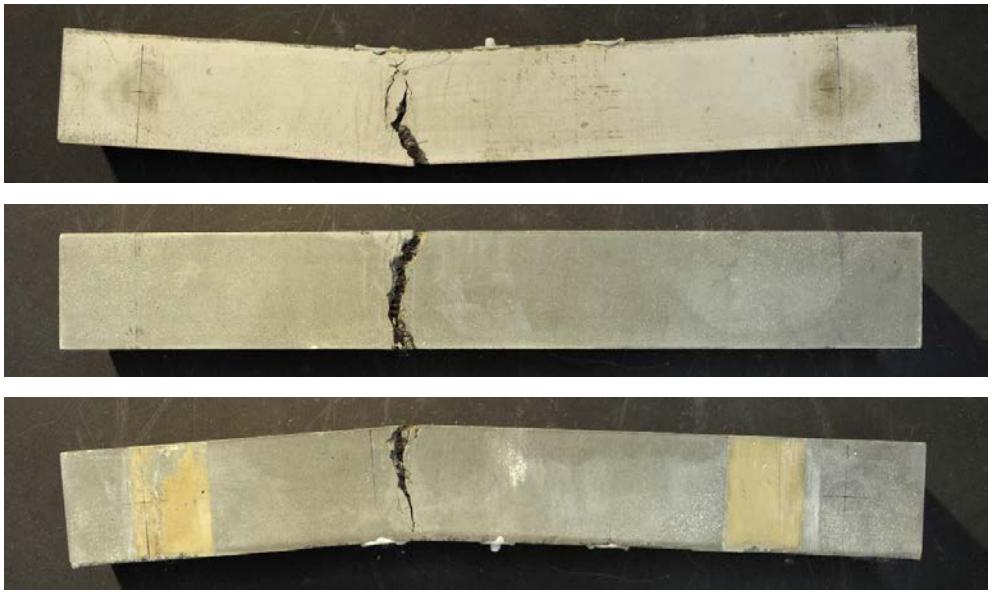
C.2.2 Charge C5

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C5-30_11_2011	09.02.2012	71	75,27	74,17	12,80	13,75	0,14	26,59	28,58	2,06
M1-2-DFM2-C5-30_11_2011	09.02.2012	71	75,28	74,32	12,28	13,17	0,13	28,84	30,93	1,71
M1-3-DFM2-C5-30_11_2011	09.02.2012	71	75,07	73,47	11,68	12,71	0,13	28,37	30,87	1,93
Mittelwert	m					13,23	0,14		30,13	1,90
Standardabweichung	s					0,74	0,00		1,34	0,18
Variationskoeffizient	v					5,58 %	3,10 %		4,45 %	9,25 %

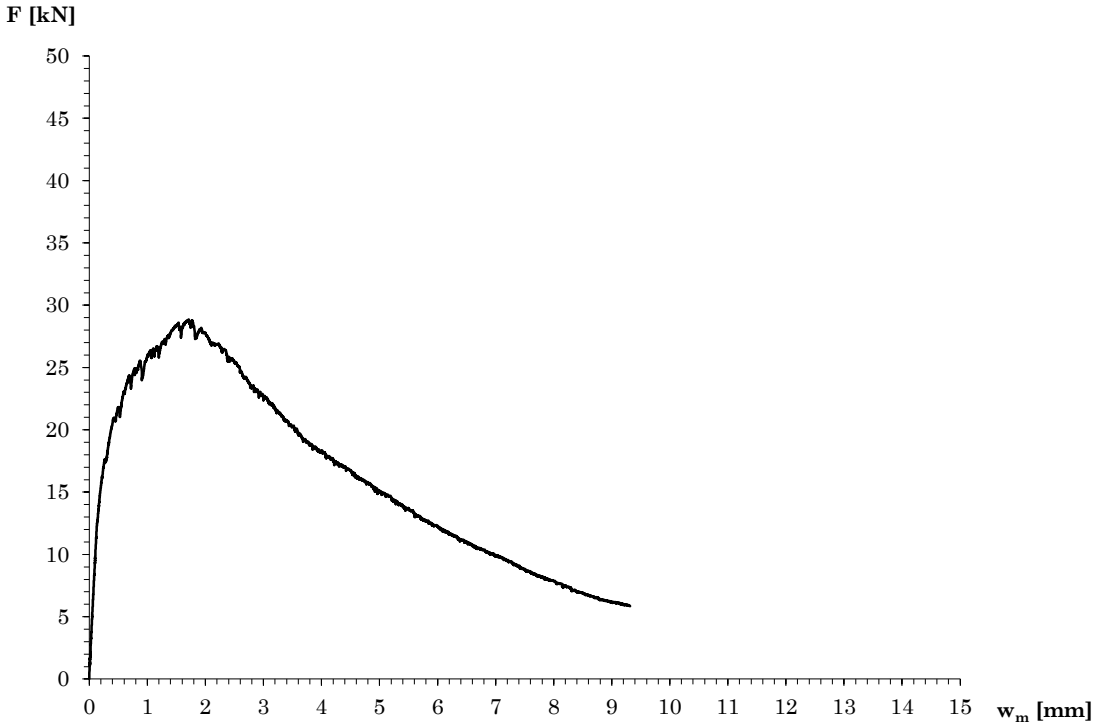


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

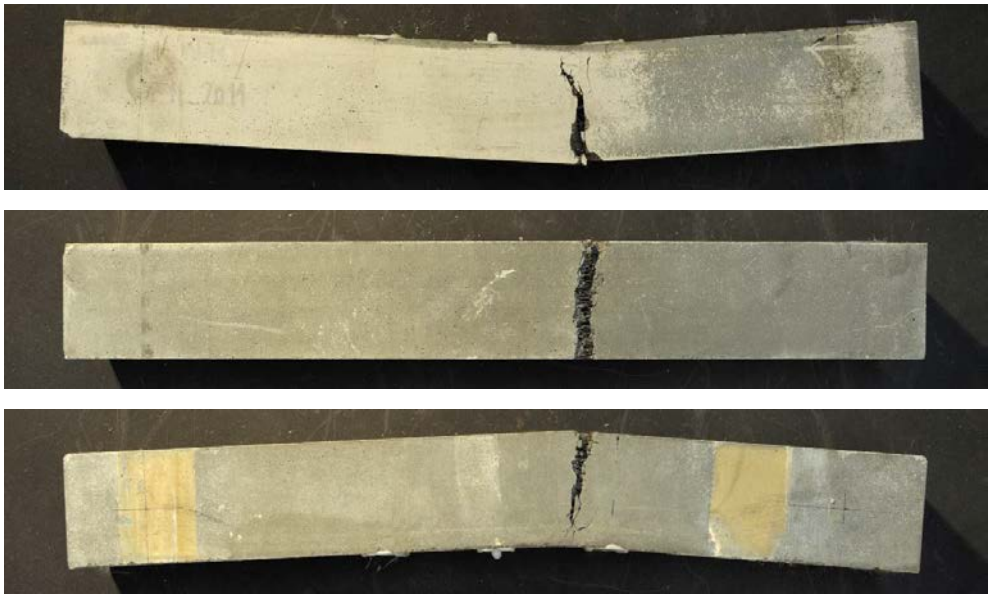


b) Risslokalisierung (x_1 = 55 mm, x_2 = 42 mm, x_3 = 58 mm, x_4 = 49 mm, x_5 = 56 mm)

M1-1-DFM2-C5-30_11_2011

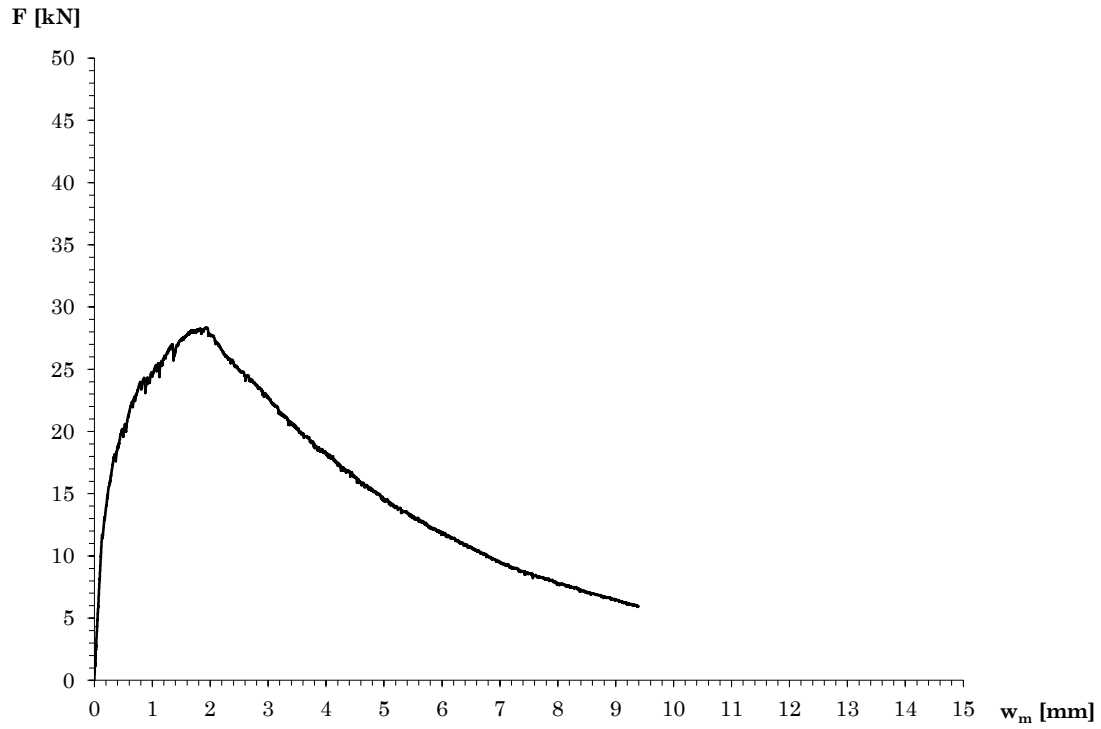


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

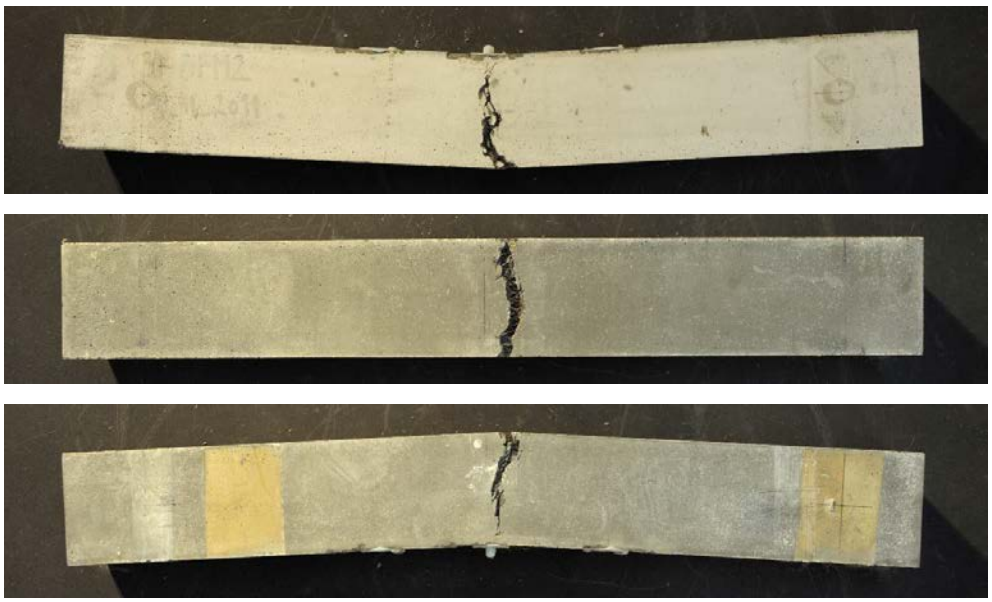


b) Risslokalisierung (x_1 = 59 mm, x_2 = 60 mm, x_3 = 56 mm, x_4 = 55 mm, x_5 = 52 mm)

M1-2-DFM2-C5-30_11_2011



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



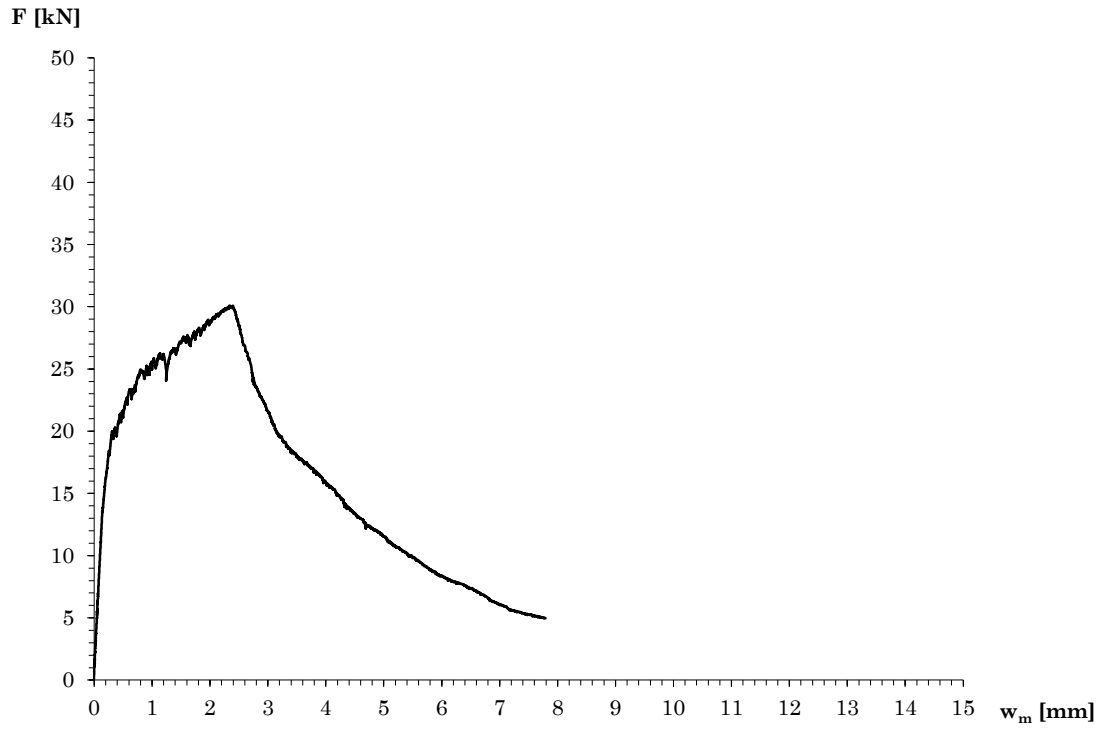
b) Risslokalisierung (x_1 = 0 mm, x_2 = 7 mm, x_3 = 15 mm, x_4 = 9 mm, x_5 = 4 mm)

M1-3-DFM2-C5-30_11_2011

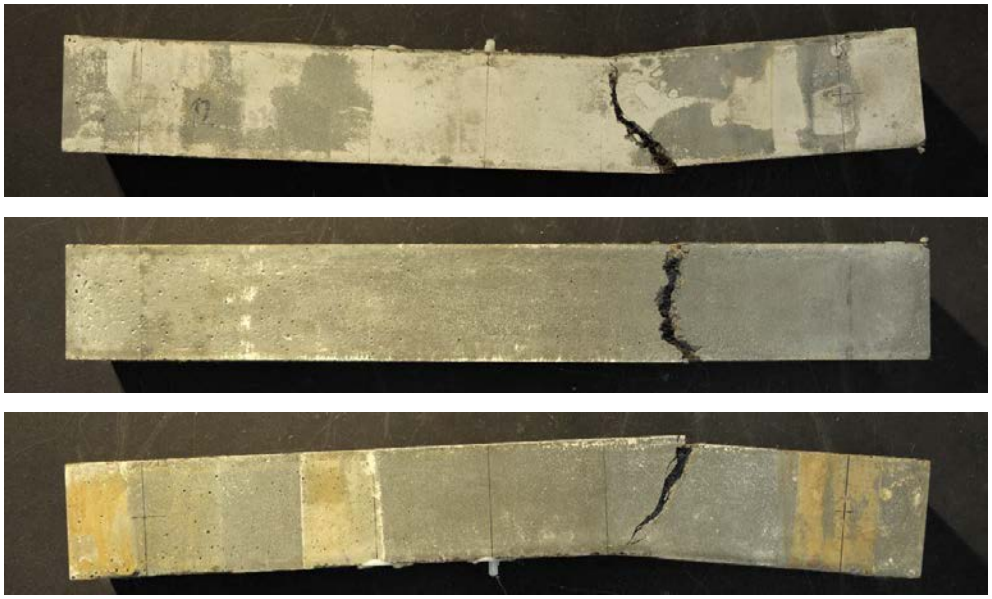
C.2.3 Charge C6

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C6-05_12_2011	08.02.2012	65	74,87	75,10	13,42	14,32	0,14	30,09	32,11	2,34
M1-2-DFM2-C6-05_12_2011	08.02.2012	65	76,00	74,23	14,56	15,49	0,16	33,03	35,13	2,10
M1-3-DFM2-C6-05_12_2011	08.02.2012	65	74,57	75,37	14,75	15,75	0,16	27,51	29,37	1,54
Mittelwert	m					15,19	0,15		32,20	1,99
Standardabweichung	s					0,76	0,01		2,88	0,41
Variationskoeffizient	v					5,00 %	7,12 %		8,94 %	20,68 %

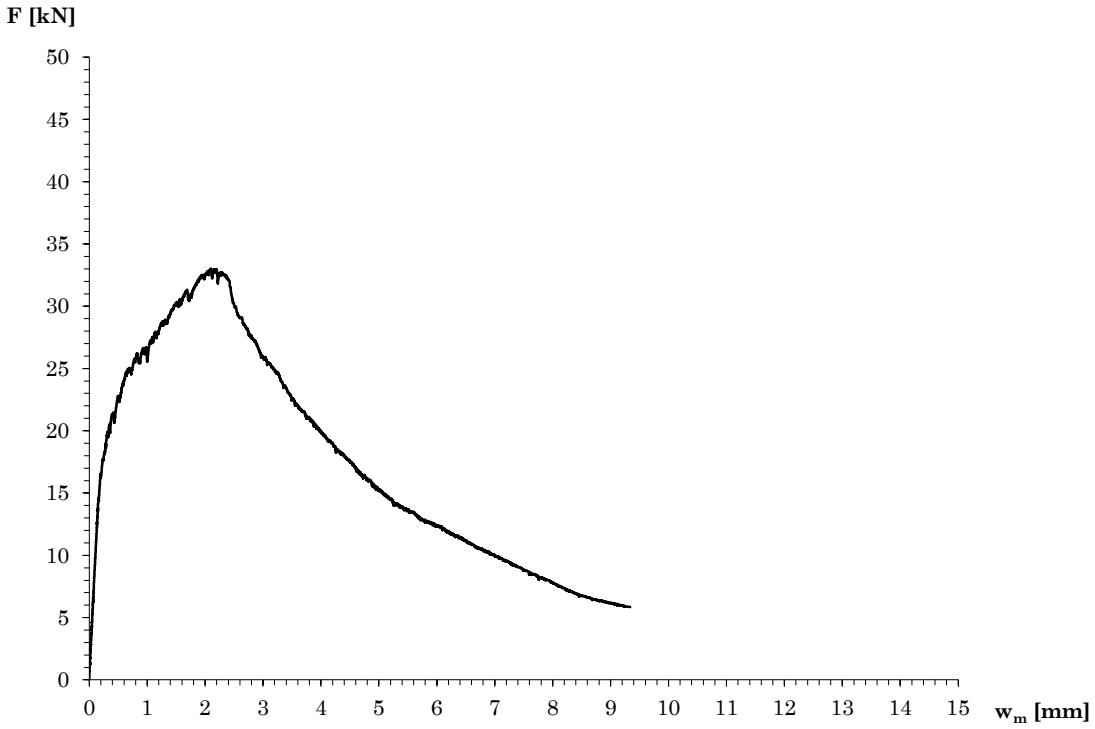


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

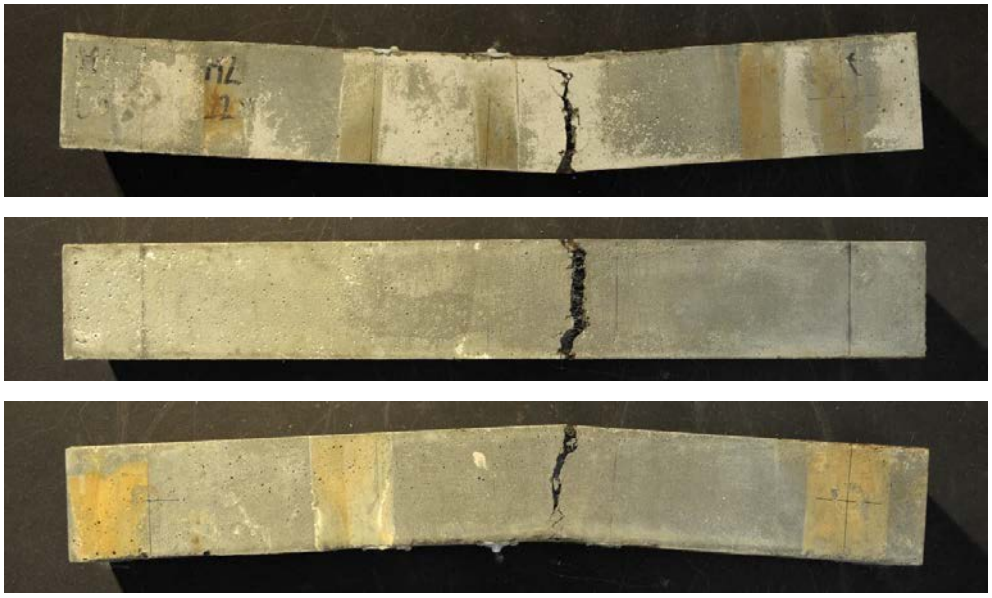


b) Risslokalisierung (x_1 = 85 mm, x_2 = 114 mm, x_3 = 108 mm, x_4 = 125 mm, x_5 = 110 mm)

M1-1-DFM2-C6-05_12_2011

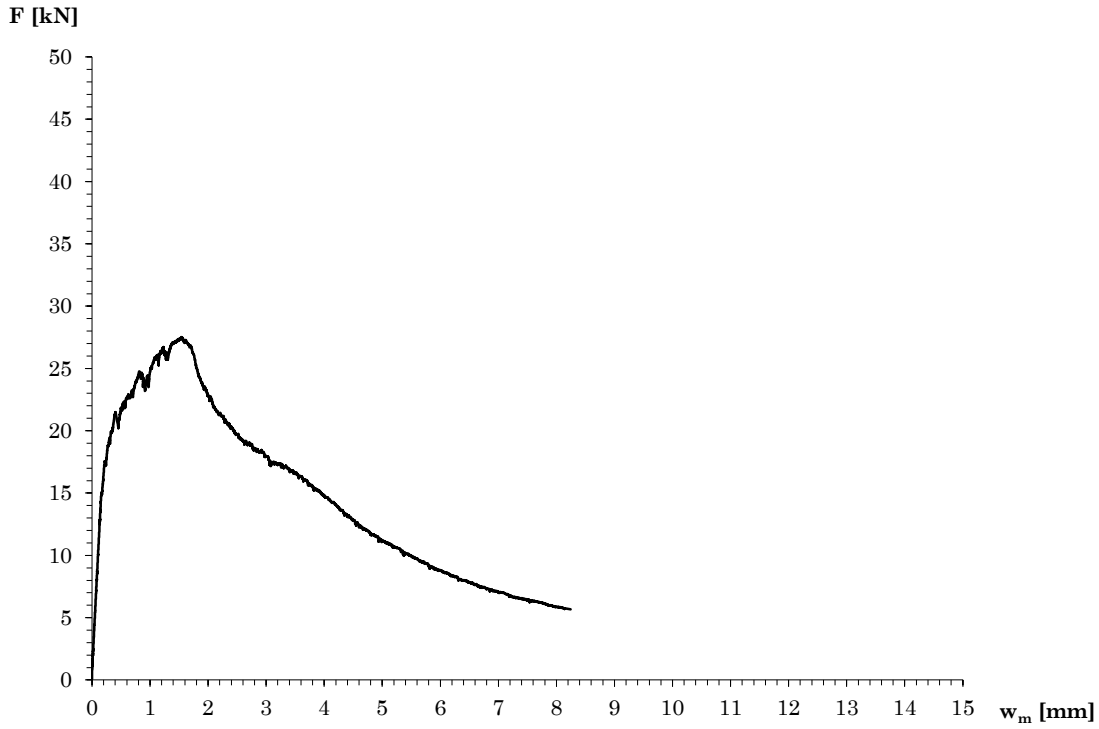


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

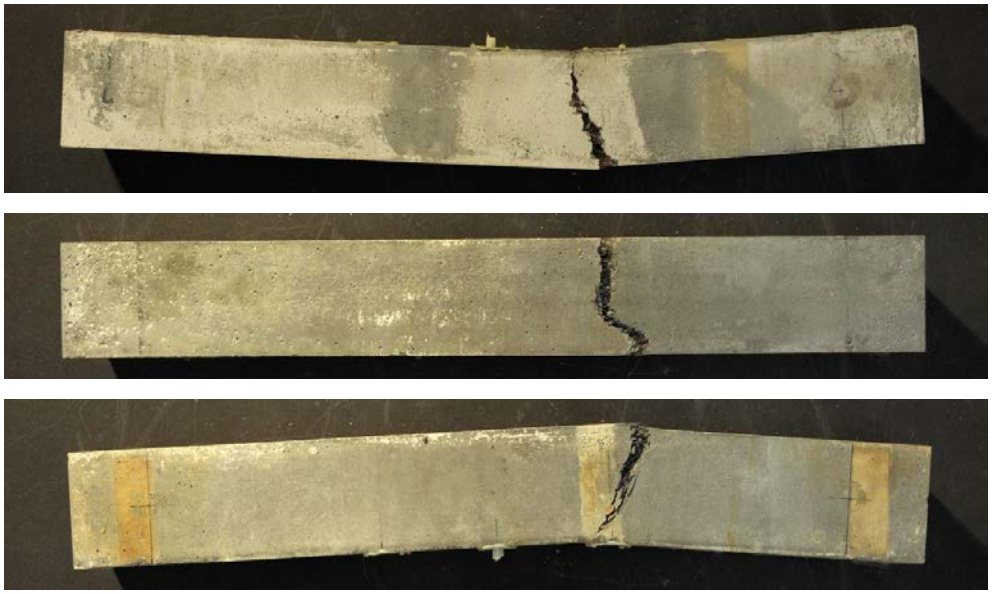


b) Risslokalisierung (x_1 = 49 mm, x_2 = 45 mm, x_3 = 53 mm, x_4 = 48 mm, x_5 = 38 mm)

M1-2-DFM2-C6-05_12_2011



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



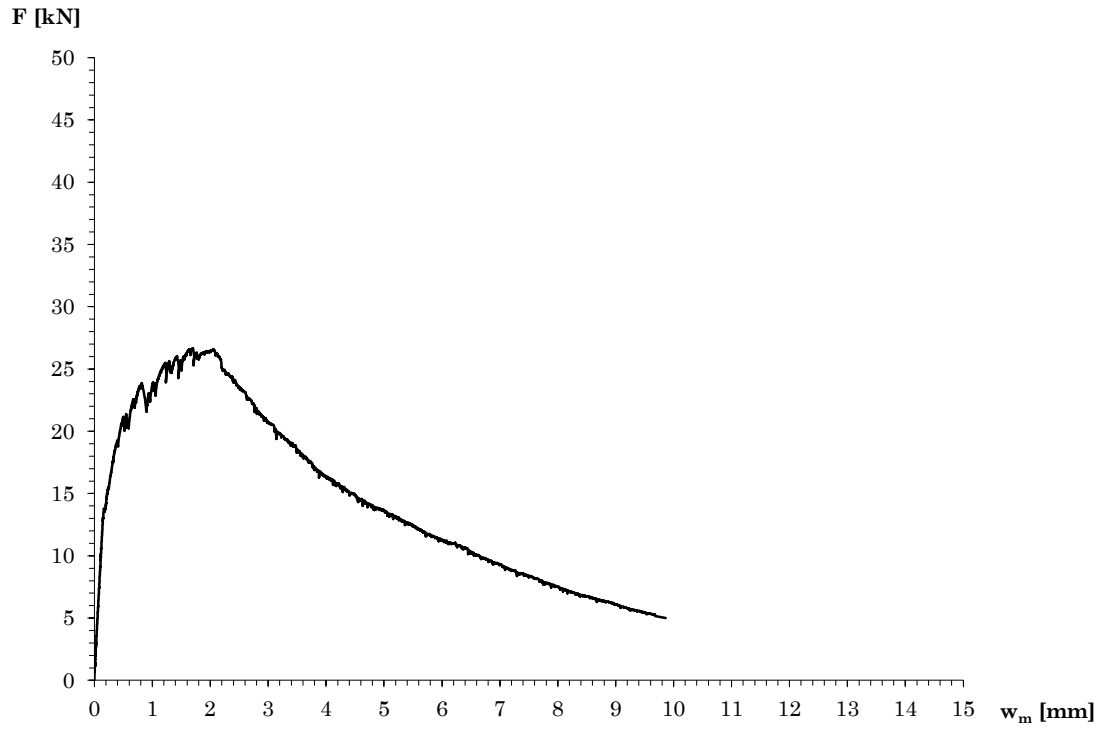
b) Risslokalisierung (x_1 = 57 mm, x_2 = 74 mm, x_3 = 70 mm, x_4 = 90 mm, x_5 = 80 mm)

M1-3-DFM2-C6-05_12_2011

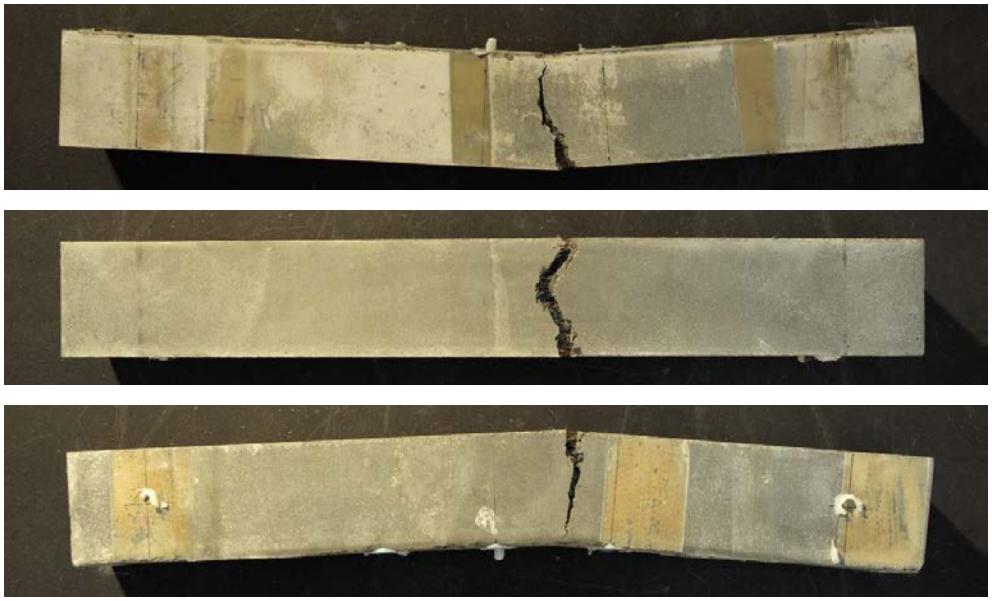
C.2.4 Charge C7

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C7-06_12_2011	09.02.2012	65	75,70	73,18	13,05	14,13	0,15	26,67	28,88	1,69
M1-2-DFM2-C7-06_12_2011	10.02.2012	66	74,70	72,40	11,73	13,01	0,13	29,10	32,28	2,19
M1-3-DFM2-C7-06_12_2011	10.02.2012	66	75,10	75,32	12,92	13,70	0,14	29,11	30,88	1,58
Mittelwert	m					13,61	0,14		30,68	1,82
Standardabweichung	s					0,56	0,01		1,71	0,33
Variationskoeffizient	v					4,14 %	6,24 %		5,57 %	17,90 %

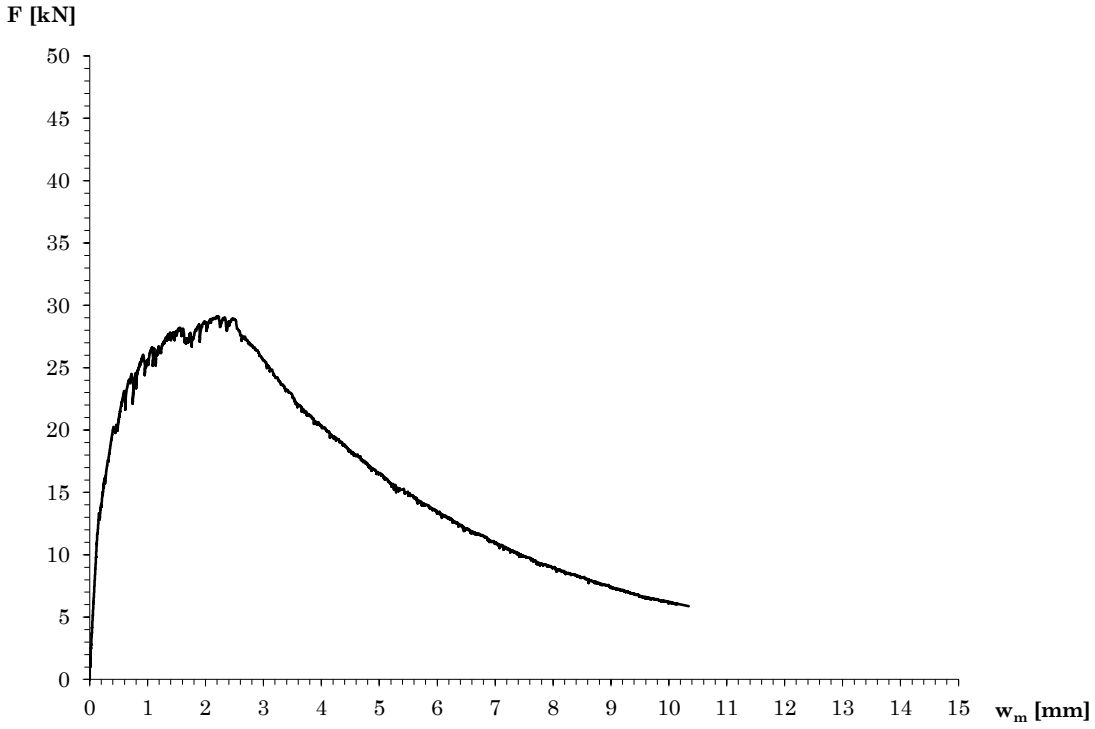


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

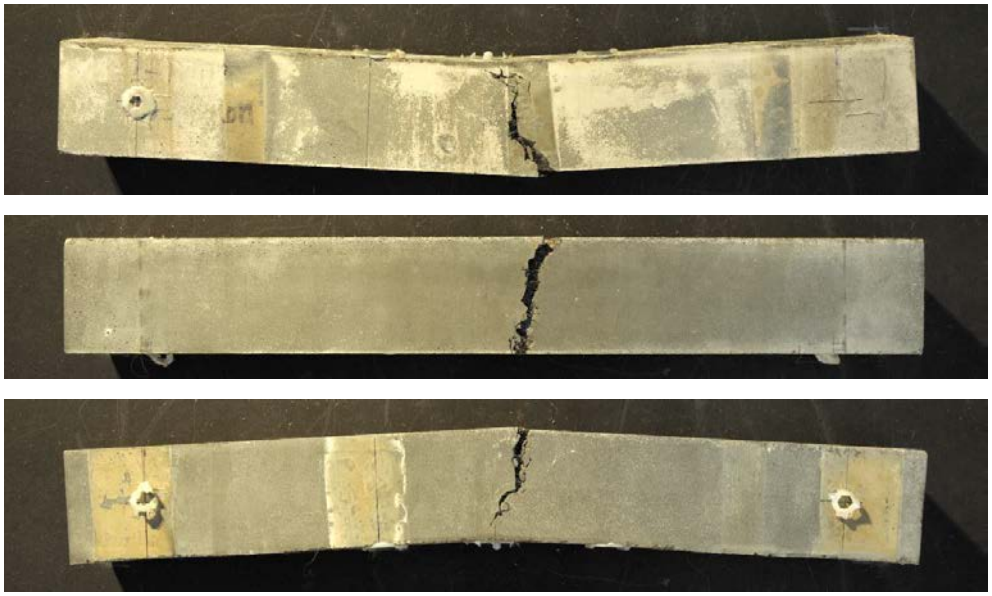


b) Risslokalisierung (x_1 = 38 mm, x_2 = 52 mm, x_3 = 33 mm, x_4 = 49 mm, x_5 = 47 mm)

M1-1-DFM2-C7-06_12_2011

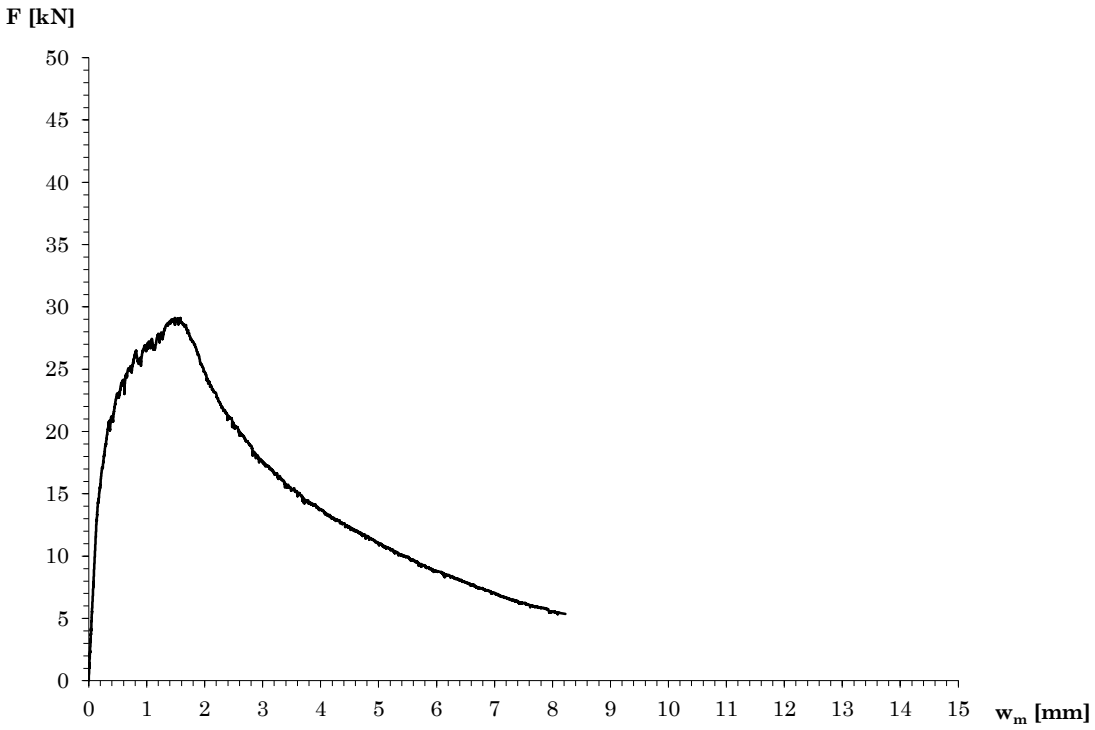


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

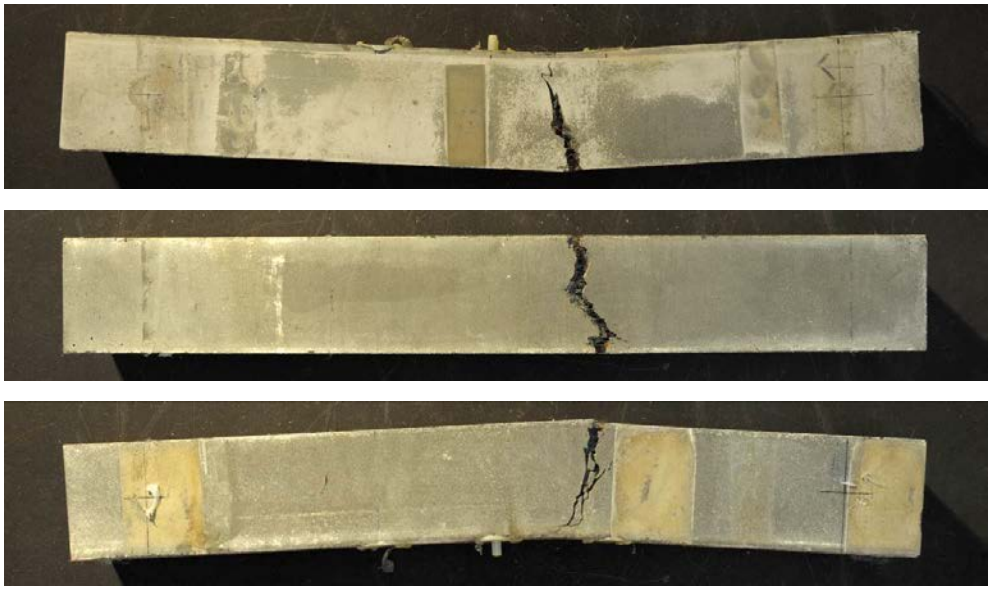


b) Risslokalisierung (x_1 = 16 mm, x_2 = 37 mm, x_3 = 23 mm, x_4 = 17 mm, x_5 = 16 mm)

M1-2-DFM2-C7-06_12_2011



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



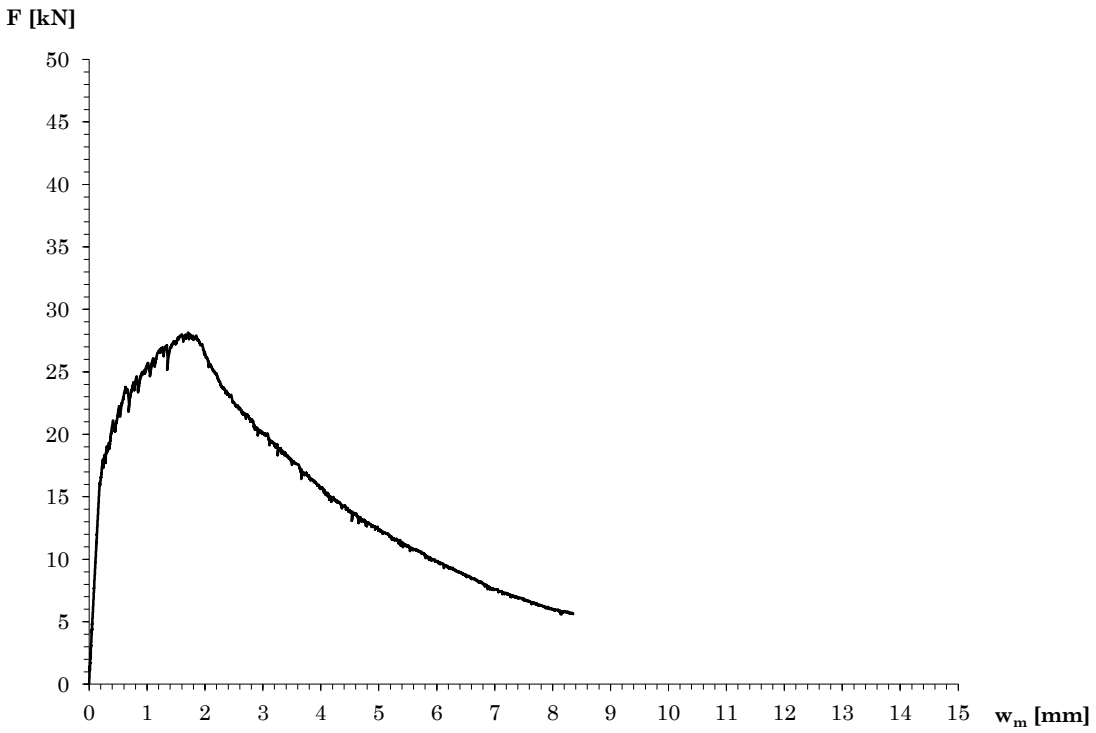
b) Risslokalisierung (x_1 = 43 mm, x_2 = 52 mm, x_3 = 51 mm, x_4 = 68 mm, x_5 = 60 mm)

M1-3-DFM2-C7-06_12_2011

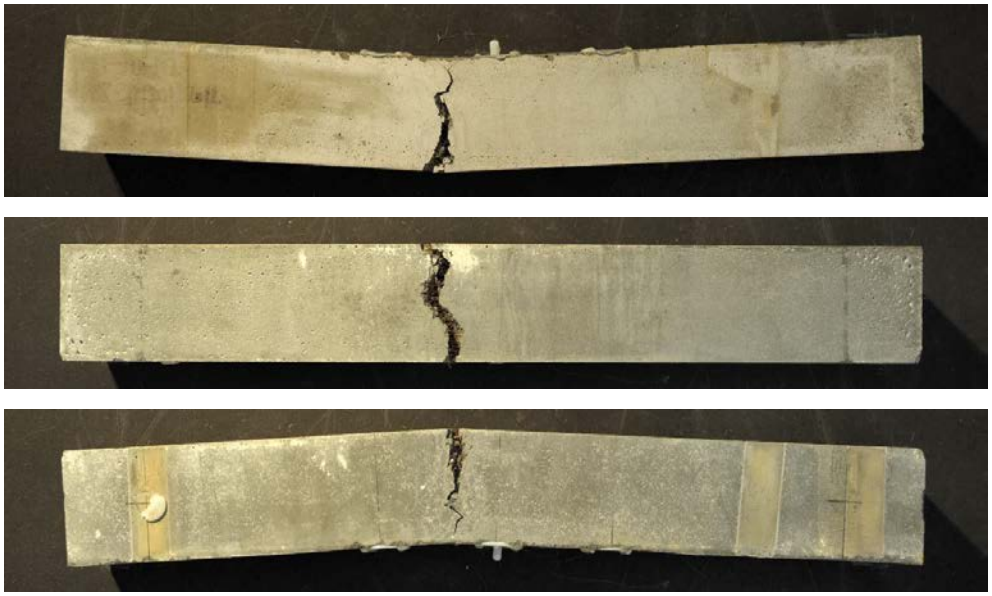
C.2.5 Charge C8

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C8-09_01_2012	10.02.2012	32	75,40	73,53	16,13	17,45	0,18	28,14	30,45	1,71
M1-2-DFM2-C8-09_01_2012	10.02.2012	32	74,87	75,13	16,33	17,42	0,17	19,45	20,74	0,74
M1-3-DFM2-C8-09_01_2012	10.02.2012	32	74,53	73,75	14,47	15,80	0,16	24,09	26,29	1,12
Mittelwert	m					16,89	0,17		25,83	1,19
Standardabweichung	s					0,94	0,01		4,87	0,49
Variationskoeffizient	v					5,59 %	6,33 %		18,85 %	41,16 %

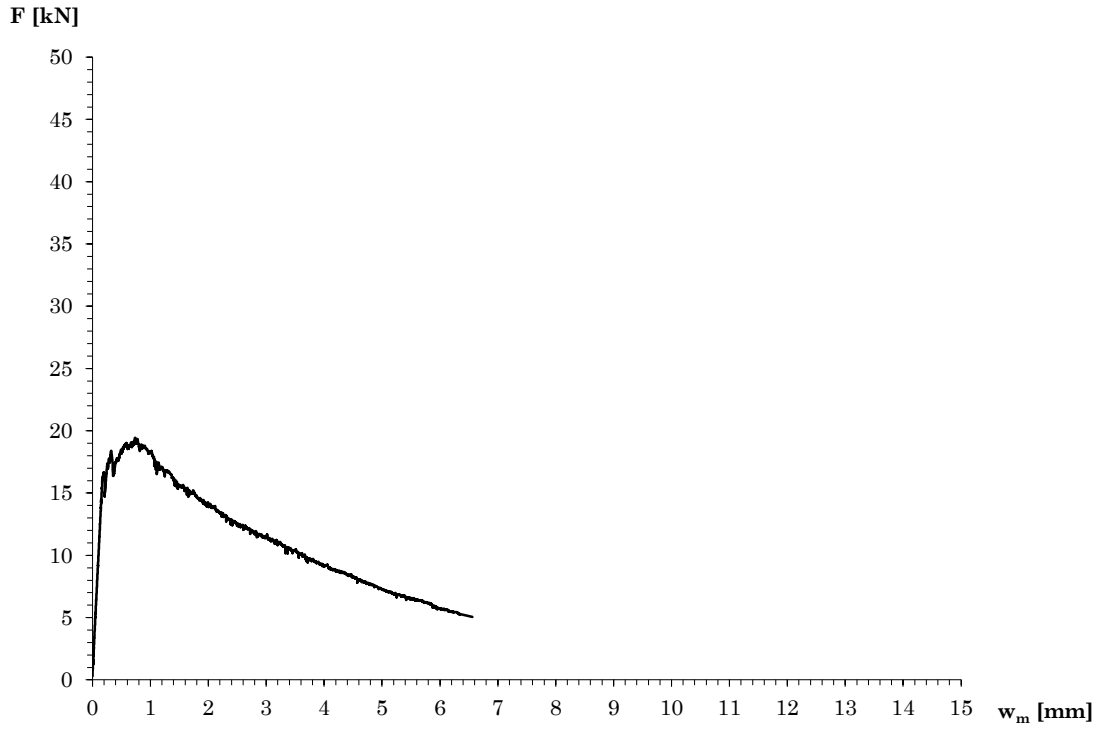


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

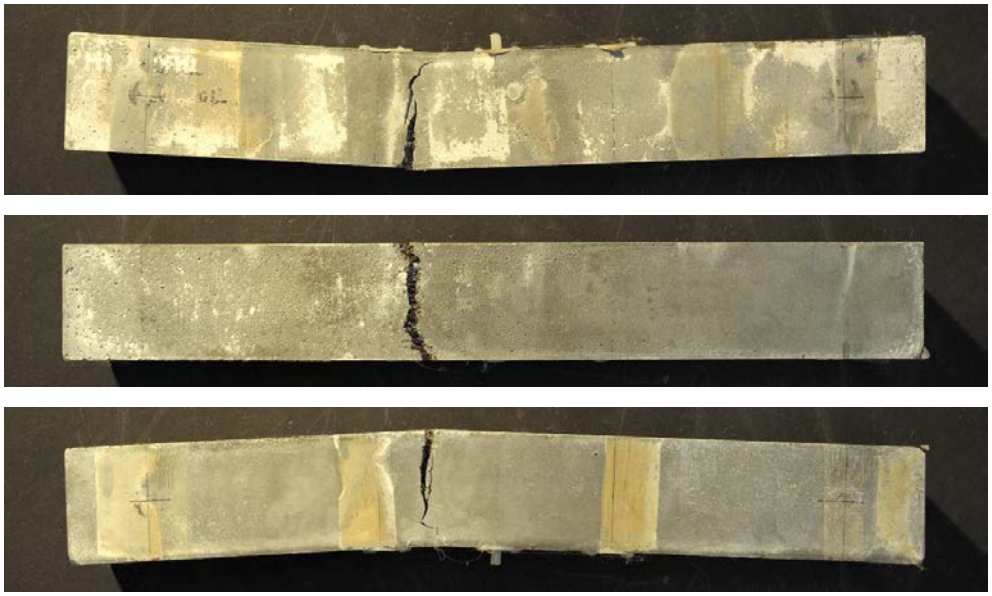


b) Risslokalisierung (x_1 = 29 mm, x_2 = 38 mm, x_3 = 37 mm, x_4 = 27 mm, x_5 = 25 mm)

M1-1-DFM2-C8-09_01_2012

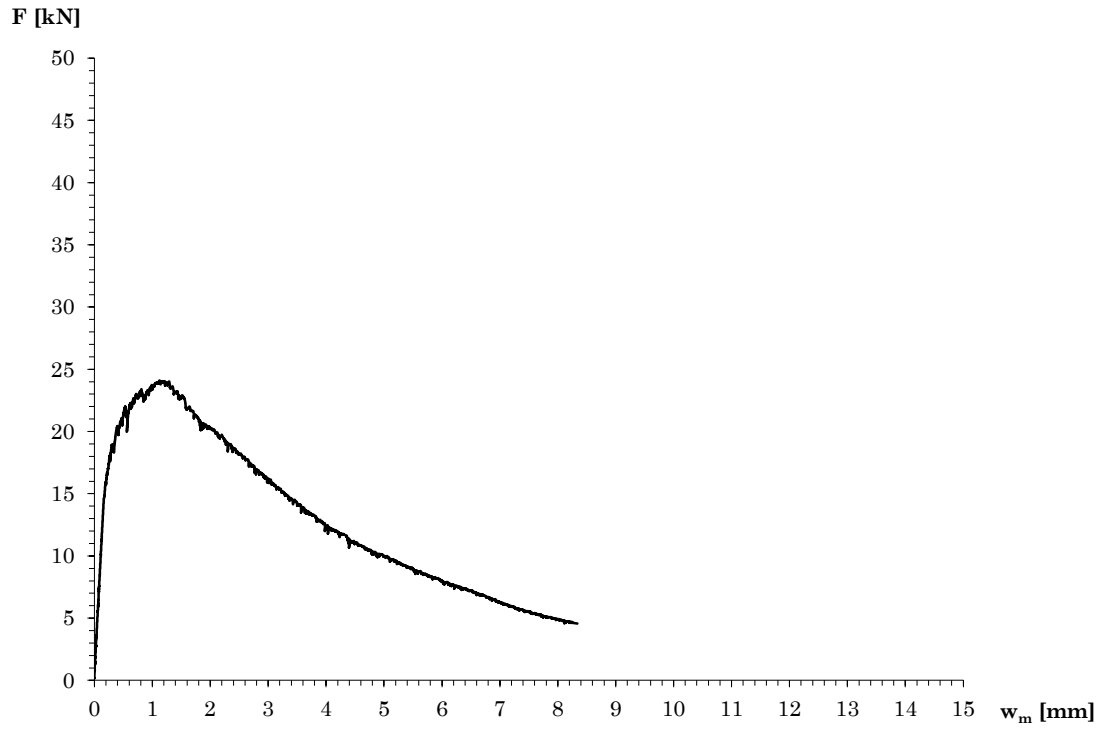


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

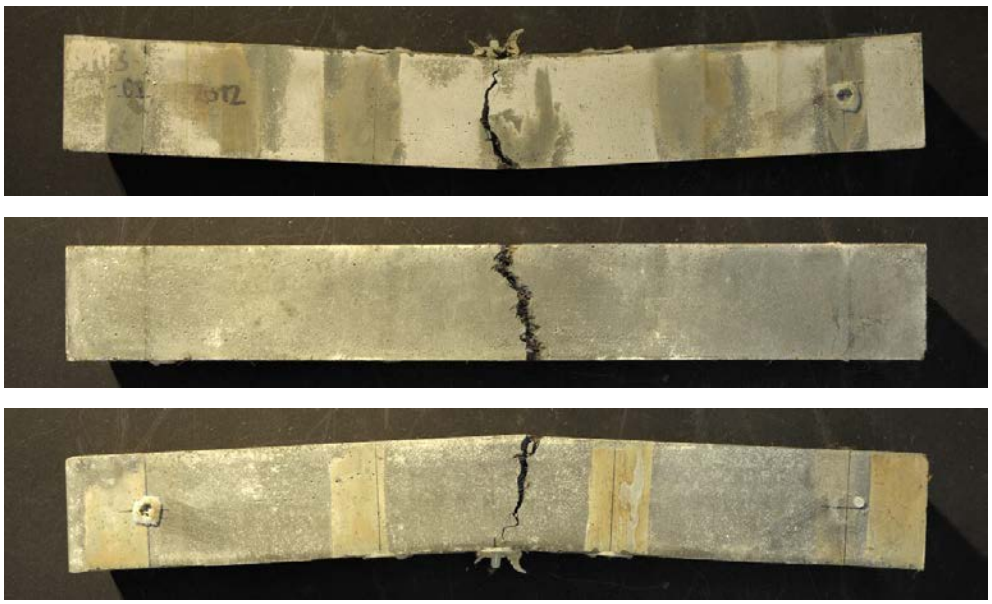


b) Risslokalisierung (x_1 = 52 mm, x_2 = 56 mm, x_3 = 50 mm, x_4 = 43 mm, x_5 = 46 mm)

M1-2-DFM2-C8-09_01_2012



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



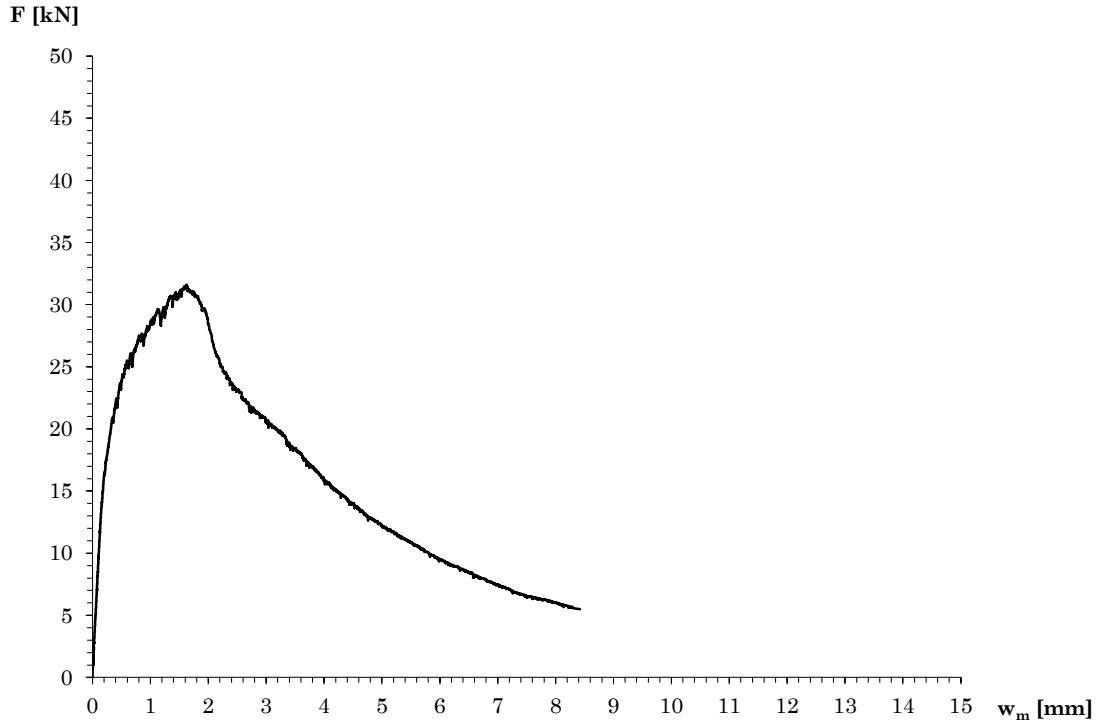
b) Risslokalisierung (x_1 = 5 mm, x_2 = 5 mm, x_3 = 17 mm, x_4 = 24 mm, x_5 = 17 mm)

M1-3-DFM2-C8-09_01_2012

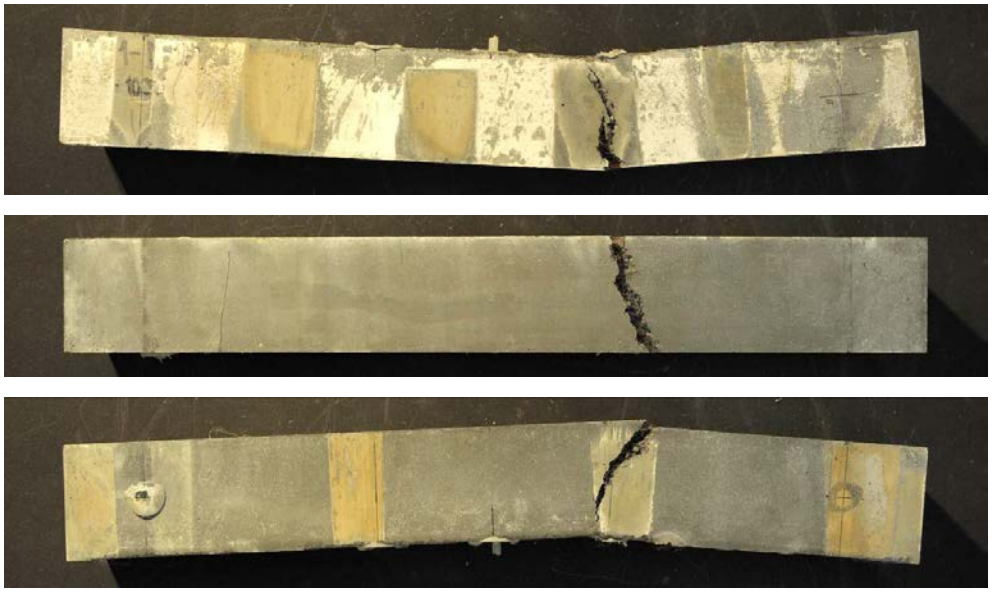
C.2.6 Charge C9

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C9-10_01_2012	13.02.2012	34	75,13	73,10	13,35	14,58	0,15	31,60	34,52	1,62
M1-2-DFM2-C9-10_01_2012	13.02.2012	34	75,77	76,40	14,24	14,76	0,14	34,19	35,44	1,40
M1-3-DFM2-C9-10_01_2012	13.02.2012	34	74,47	74,37	13,61	14,74	0,15	28,03	30,36	1,72
Mittelwert	m					14,70	0,15		33,44	1,58
Standardabweichung	s					0,10	0,01		2,71	0,16
Variationskoeffizient	v					0,66 %	3,69 %		8,09 %	10,40 %

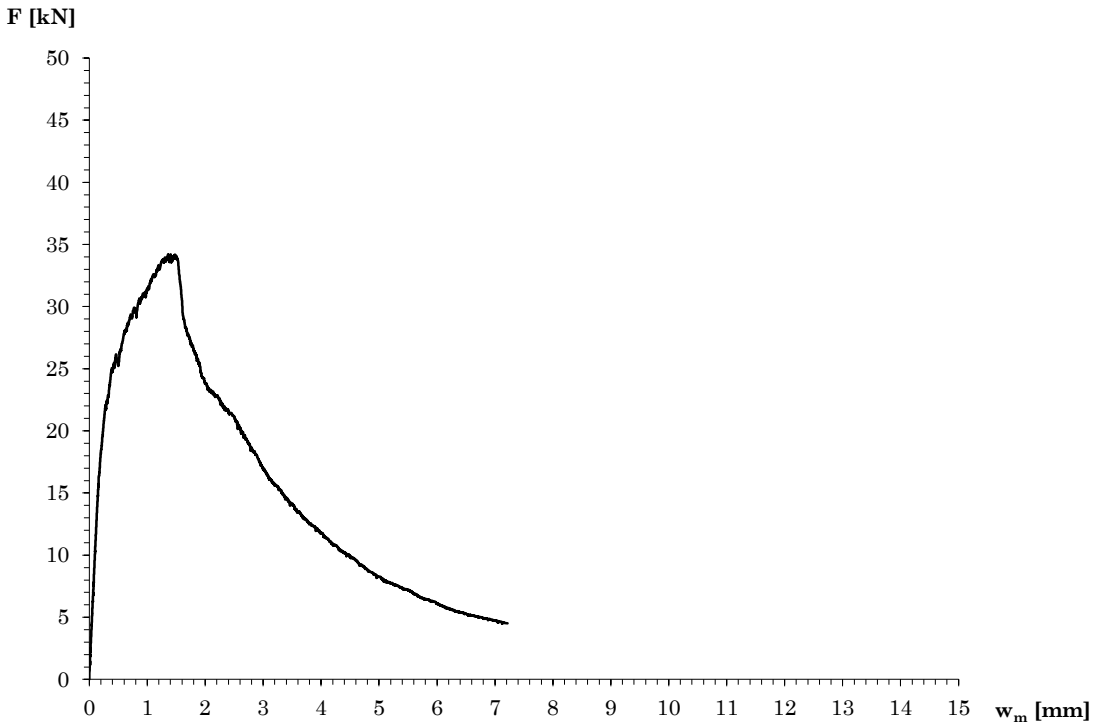


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

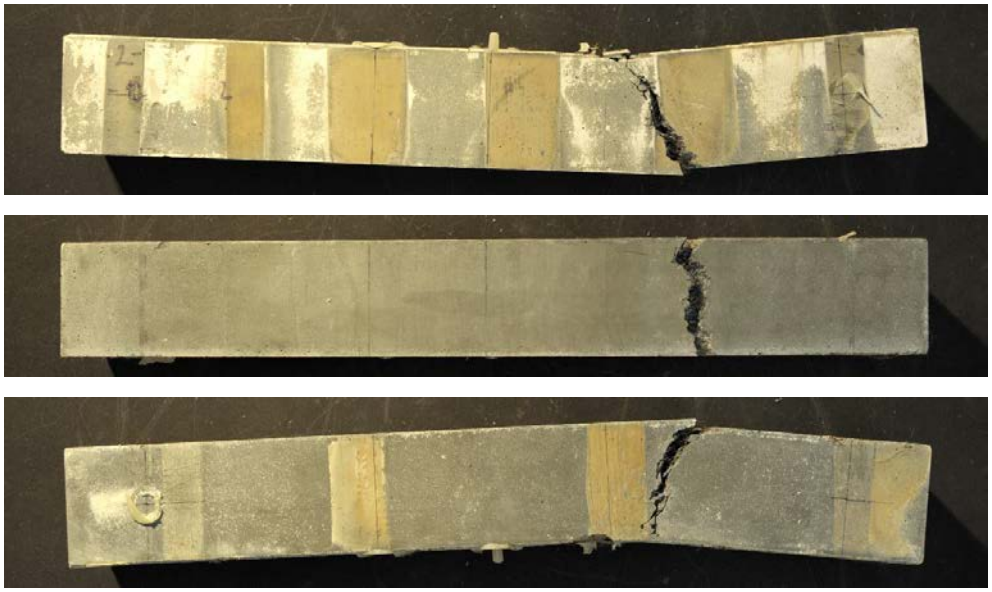


b) Risslokalisierung (x_1 = 74 mm, x_2 = 77 mm, x_3 = 85 mm, x_4 = 103 mm, x_5 = 73 mm)

M1-1-DFM2-C9-10_01_2012

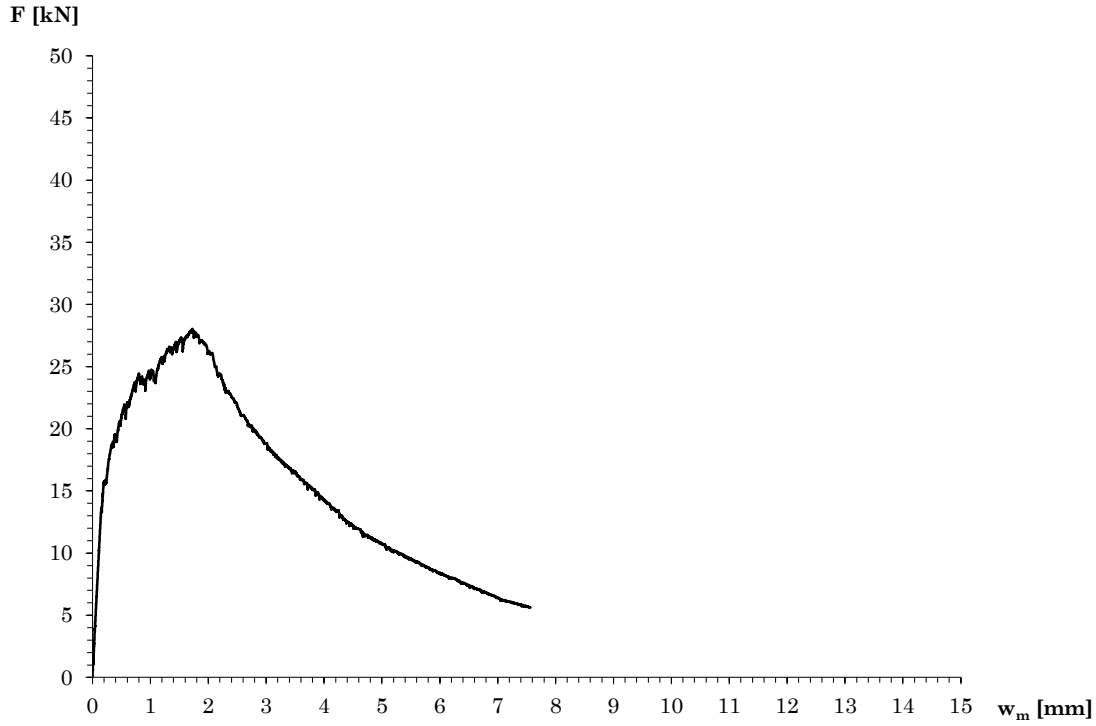


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

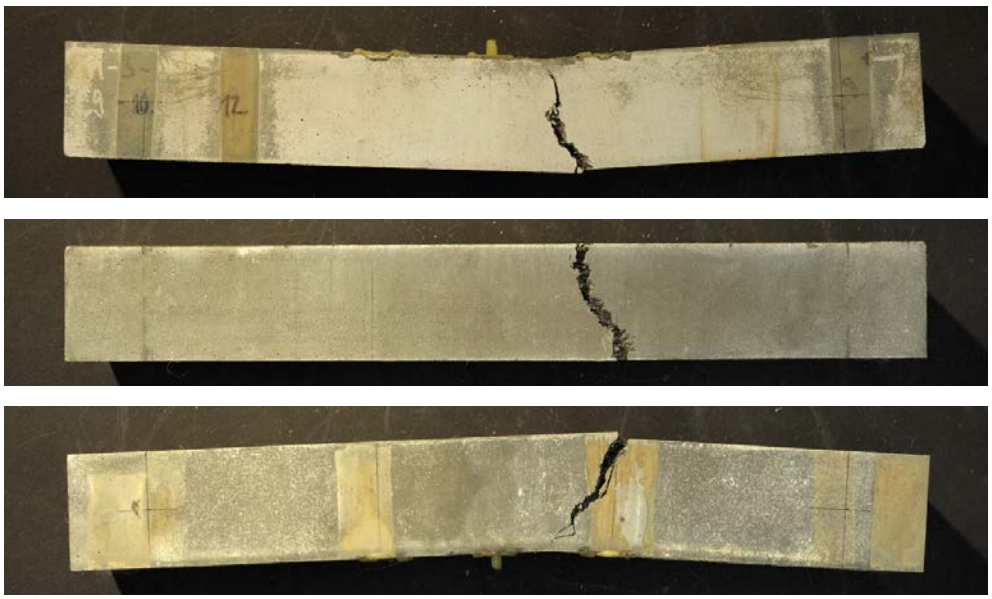


b) Risslokalisierung (x_1 = 105 mm, x_2 = 127 mm, x_3 = 130 mm, x_4 = 134 mm, x_5 = 110 mm)

M1-2-DFM2-C9-10_01_2012



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



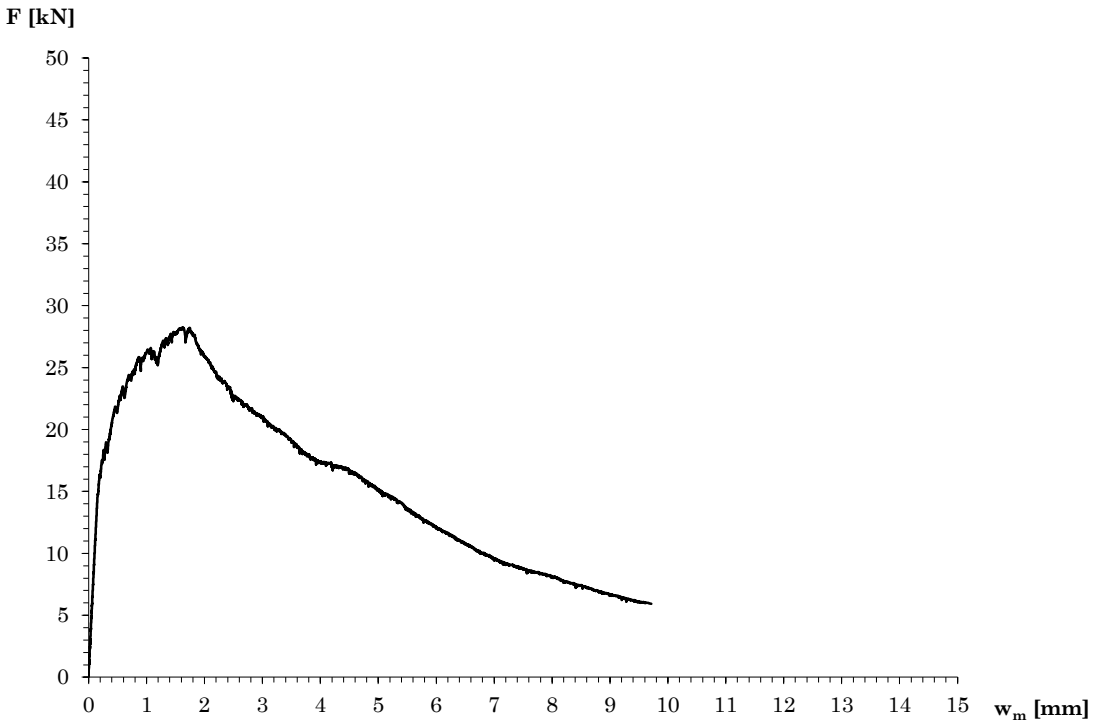
b) Risslokalisierung (x_1 = 40 mm, x_2 = 55 mm, x_3 = 65 mm, x_4 = 83 mm, x_5 = 67 mm)

M1-3-DFM2-C9-10_01_2012

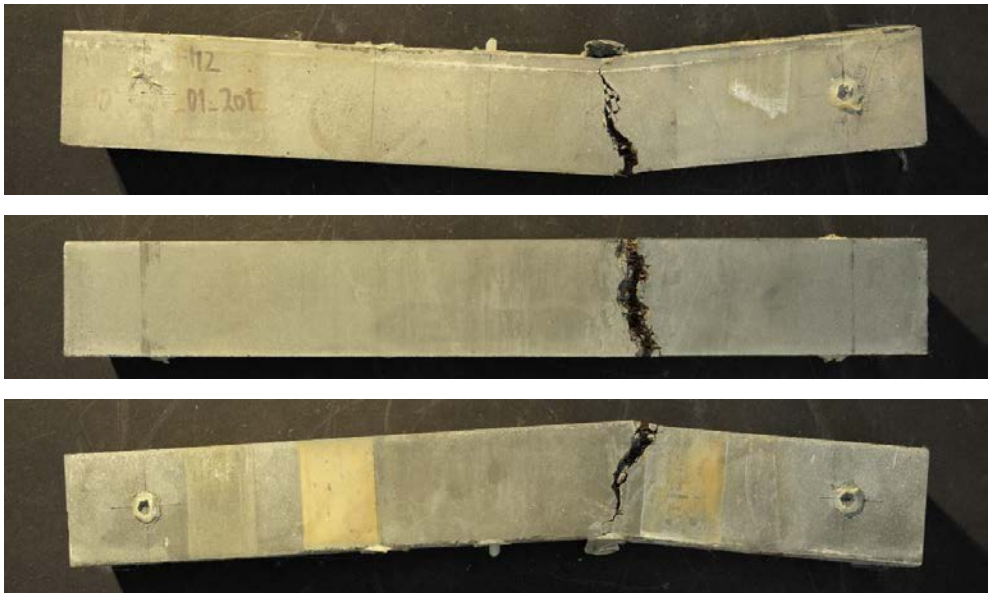
C.2.7 Charge C10

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C10-16_01_2012	13.02.2012	28	74,53	74,87	14,79	15,90	0,15	28,24	30,37	1,63
M1-2-DFM2-C10-16_01_2012	13.02.2012	28	74,97	76,30	14,26	14,96	0,14	32,12	33,69	1,95
M1-3-DFM2-C10-16_01_2012	13.02.2012	28	74,50	75,43	13,01	13,88	0,13	26,78	28,59	1,22
Mittelwert	m					14,91	0,14		30,88	1,60
Standardabweichung	s					1,01	0,01		2,59	0,36
Variationskoeffizient	v					6,76 %	9,20 %		8,38 %	22,73 %

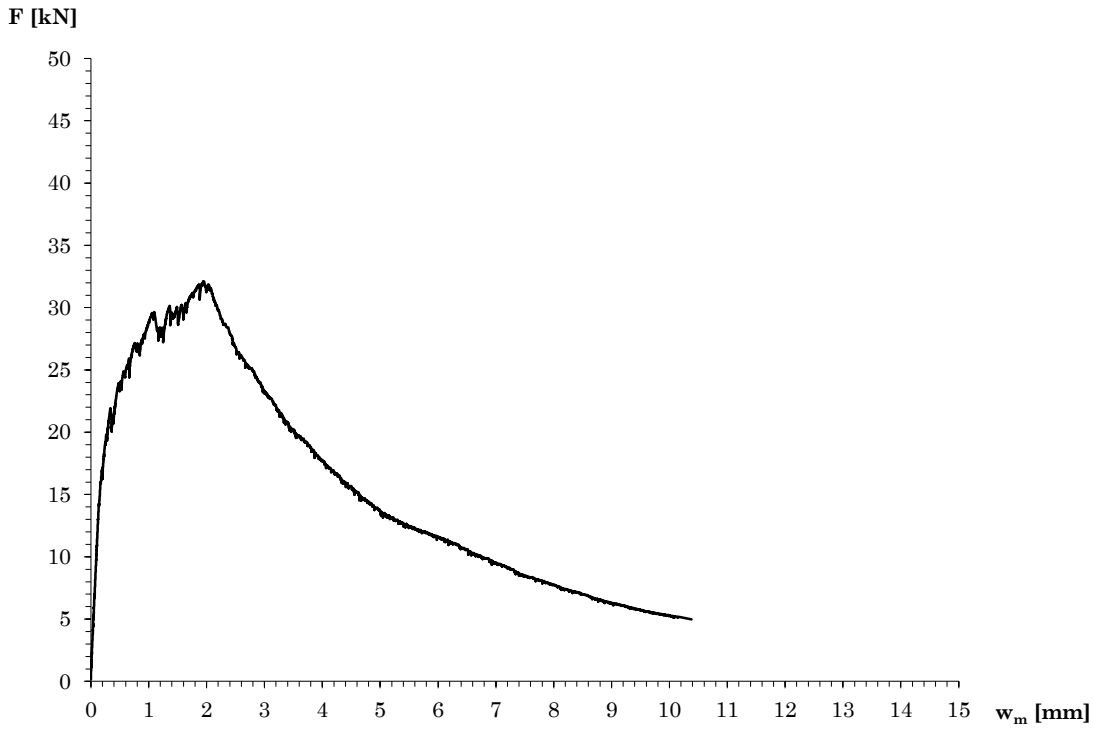


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

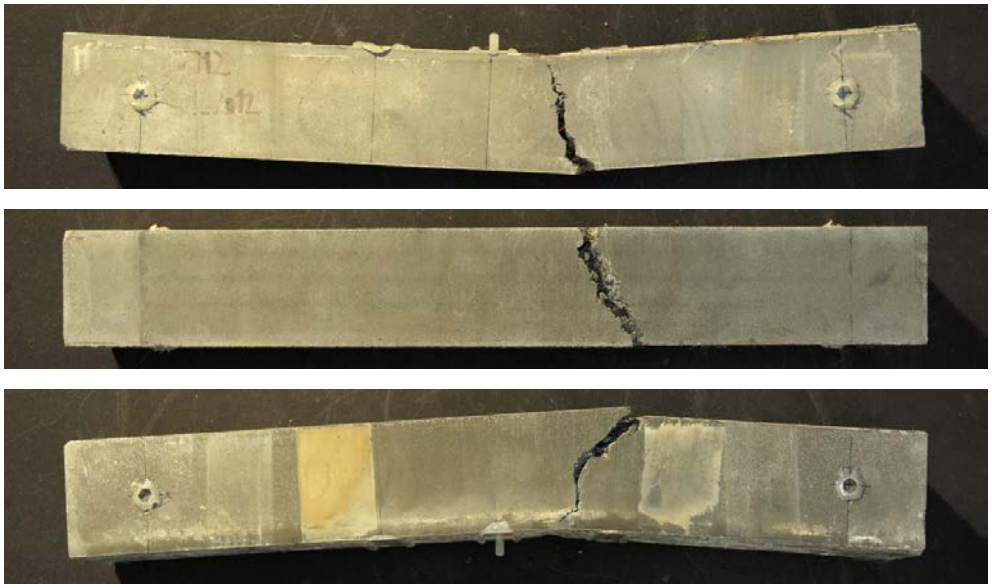


b) Risslokalisierung (x_1 = 75 mm, x_2 = 83 mm, x_3 = 85 mm, x_4 = 96 mm, x_5 = 80 mm)

M1-1-DFM2-C10-16_01_2012

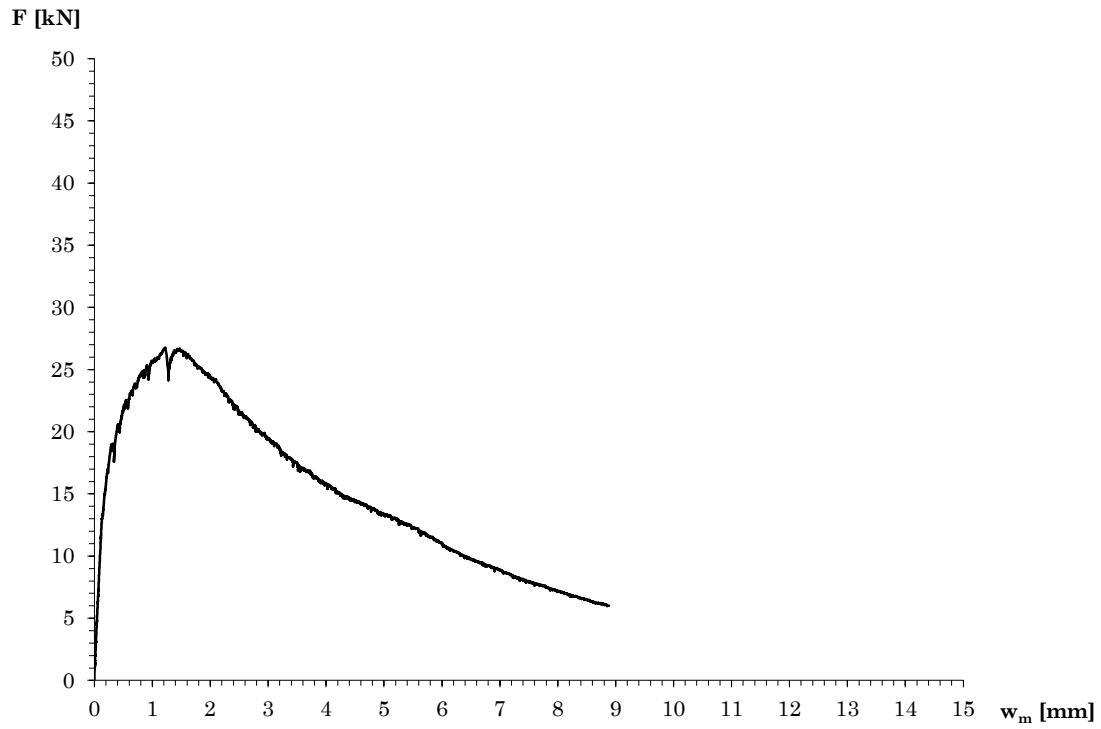


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



b) Risslokalisierung (x_1 = 45 mm, x_2 = 58 mm, x_3 = 68 mm, x_4 = 92 mm, x_5 = 53 mm)

M1-2-DFM2-C10-16_01_2012



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

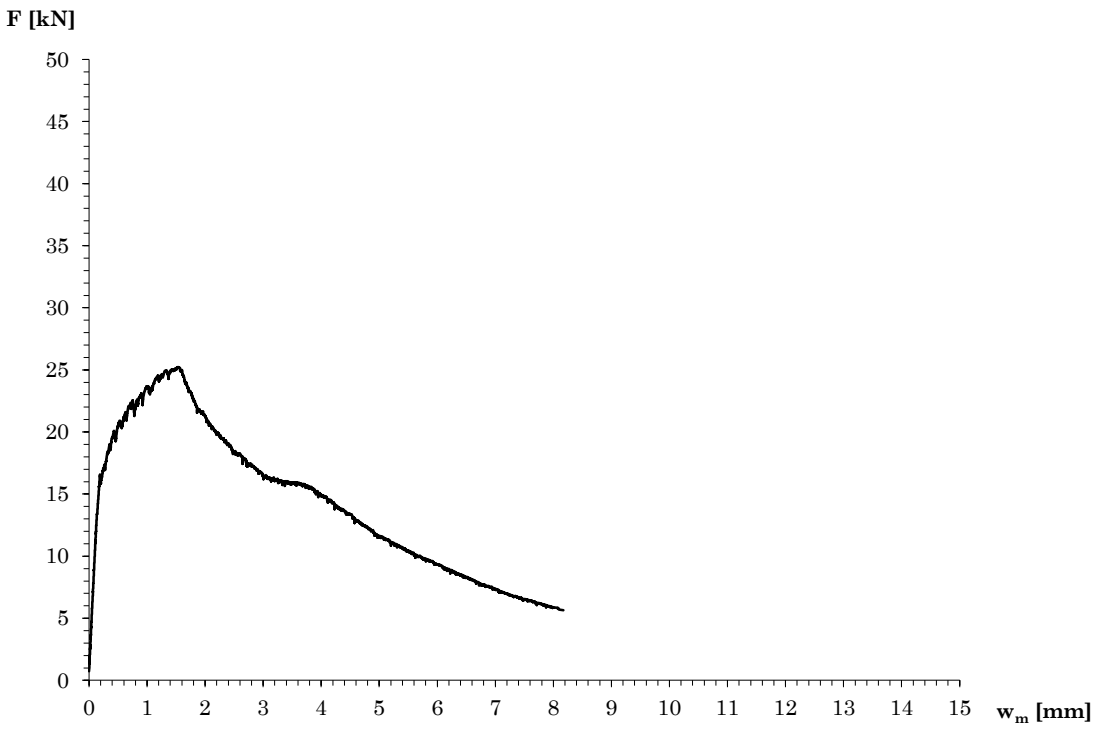
b) Risslokalisierung (x_1 = 55 mm, x_2 = 64 mm, x_3 = 60 mm, x_4 = 67 mm, x_5 = 60 mm)

M1-3-DFM2-C10-16_01_2012

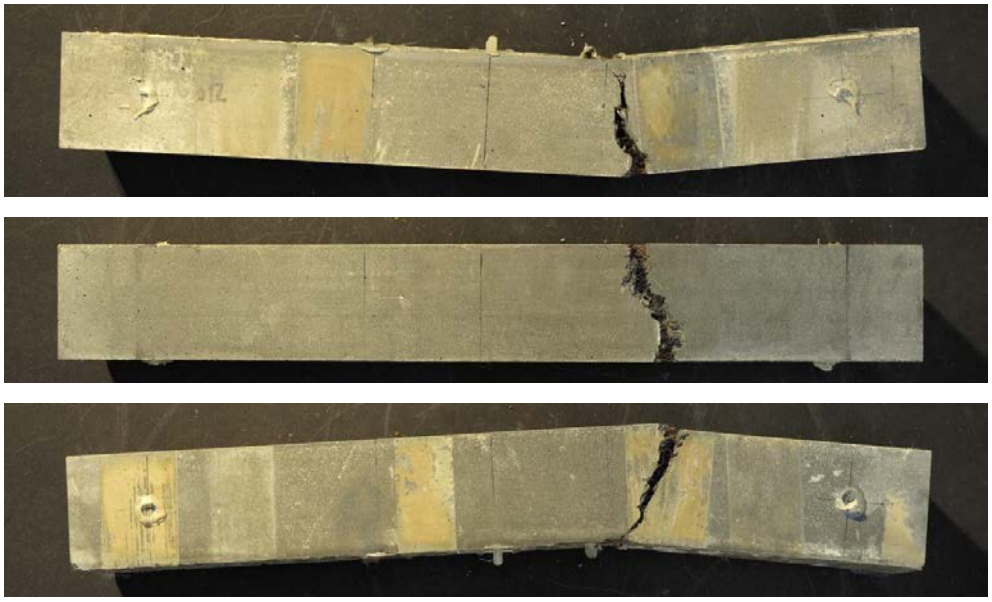
C.2.8 Charge C11

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C11-17_01_2012	13.02.2012	27	74,97	75,10	13,40	14,28	0,14	25,23	26,89	1,52
M1-2-DFM2-C11-17_01_2012	13.02.2012	27	75,40	74,93	12,73	13,52	0,13	20,72	22,00	0,93
M1-3-DFM2-C11-17_01_2012	13.02.2012	27	75,40	75,17	12,93	13,69	0,13	23,29	24,66	0,98
Mittelwert	m					13,83	0,13		24,52	1,14
Standardabweichung	s					0,40	0,00		2,45	0,33
Variationskoeffizient	v					2,88 %	2,72 %		9,99 %	28,82 %

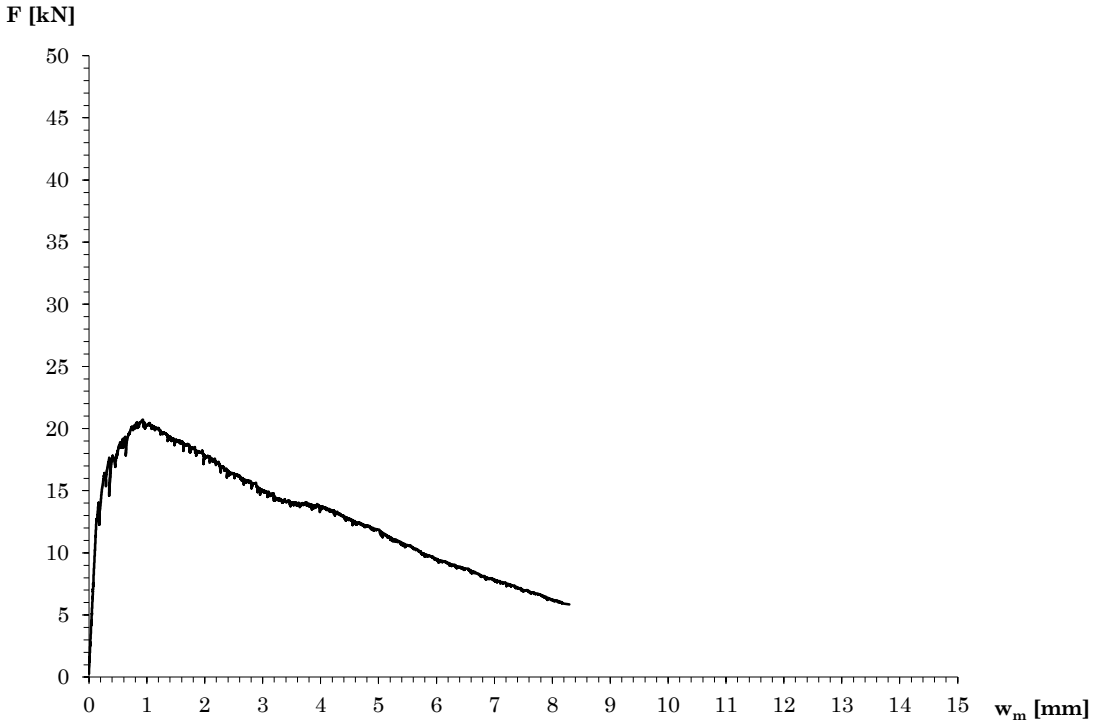


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

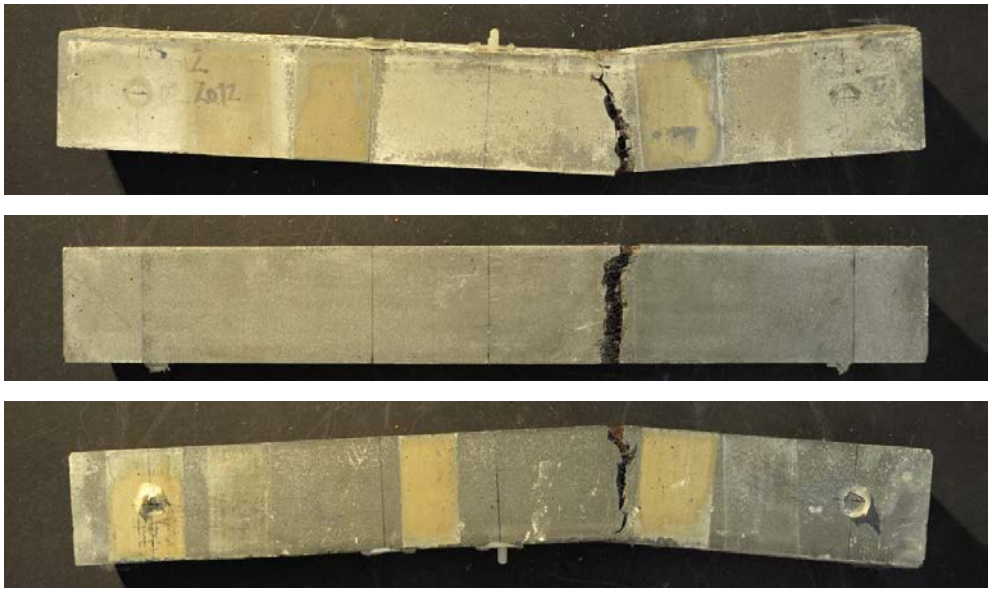


b) Risslokalisierung (x_1 = 84 mm, x_2 = 95 mm, x_3 = 105 mm, x_4 = 110 mm, x_5 = 100 mm)

M1-1-DFM2-C11-17_01_2012

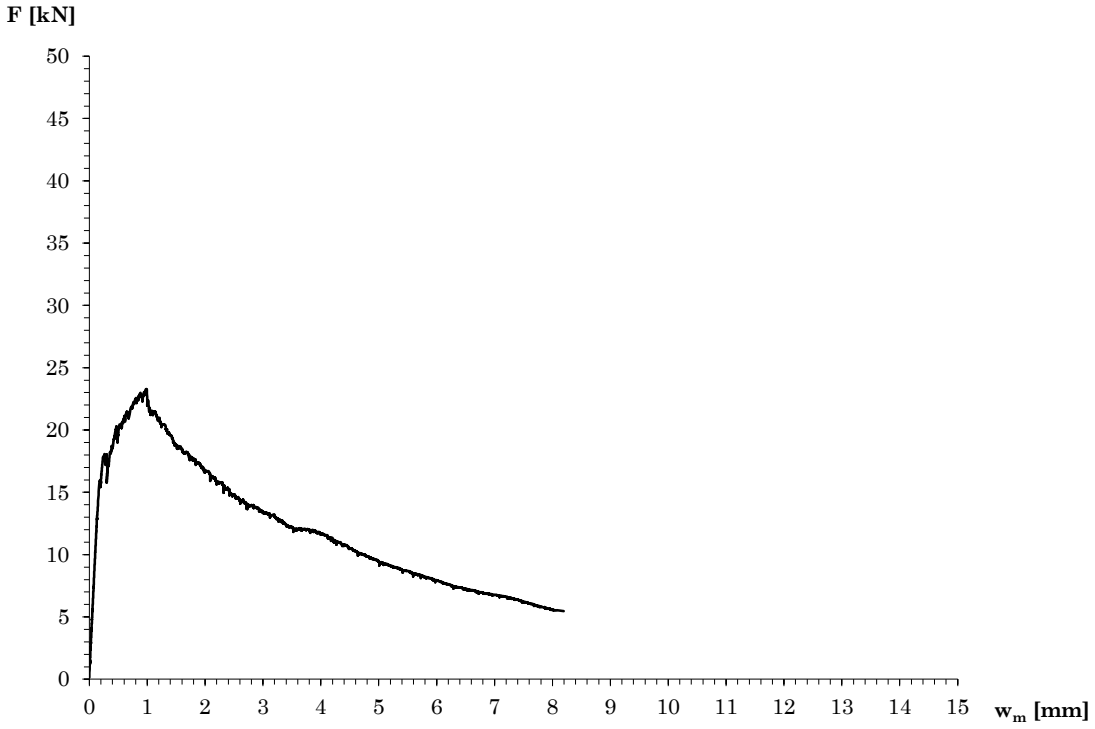


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

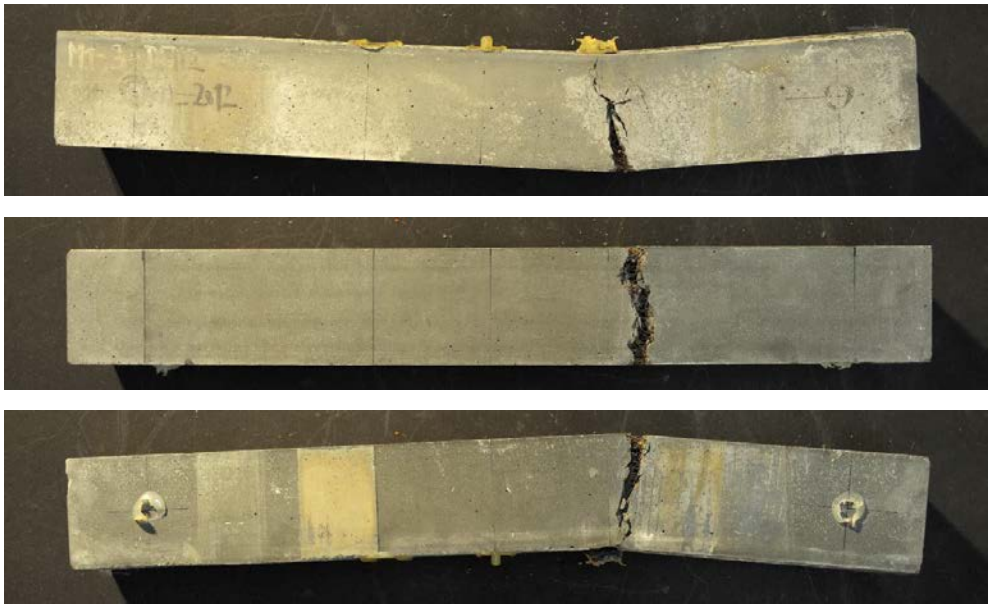


b) Risslokalisierung (x_1 = 80 mm, x_2 = 85 mm, x_3 = 76 mm, x_4 = 73 mm, x_5 = 78 mm)

M1-2-DFM2-C11-17_01_2012



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



b) Risslokalisierung (x_1 = 83 mm, x_2 = 90 mm, x_3 = 94 mm, x_4 = 92 mm, x_5 = 85 mm)

M1-3-DFM2-C11-17_01_2012

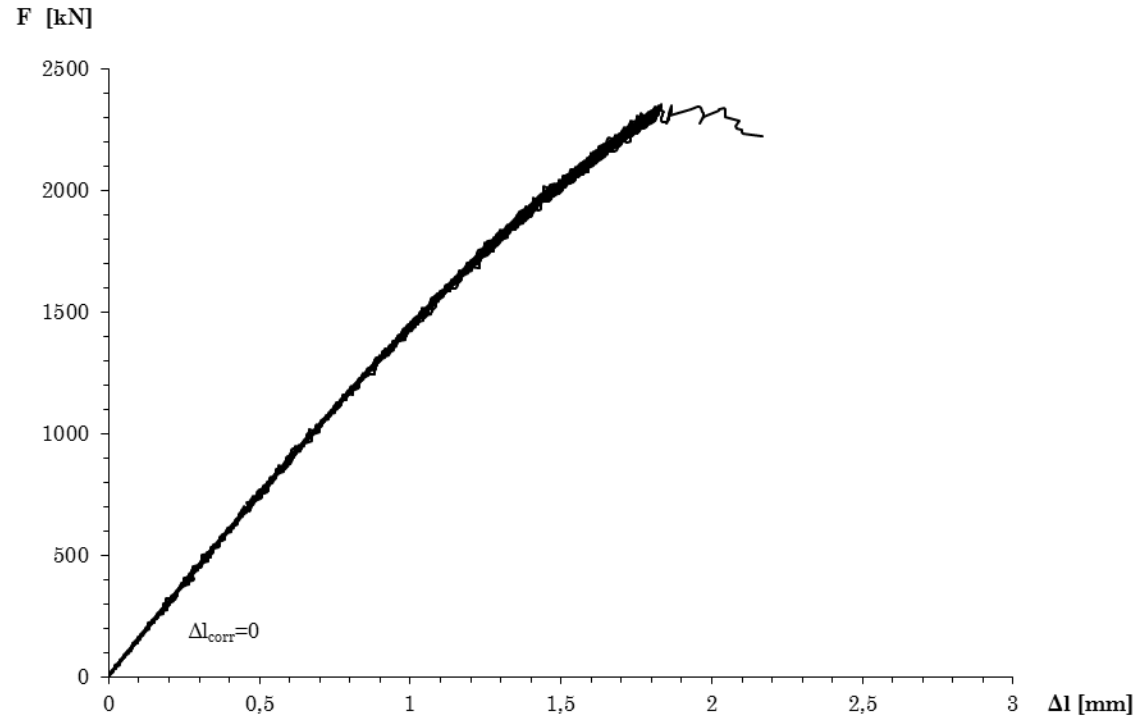
C.3 Schub-Druck-Versuche

C.3.1 Versuchskörper ohne Fuge (Referenzprismen)

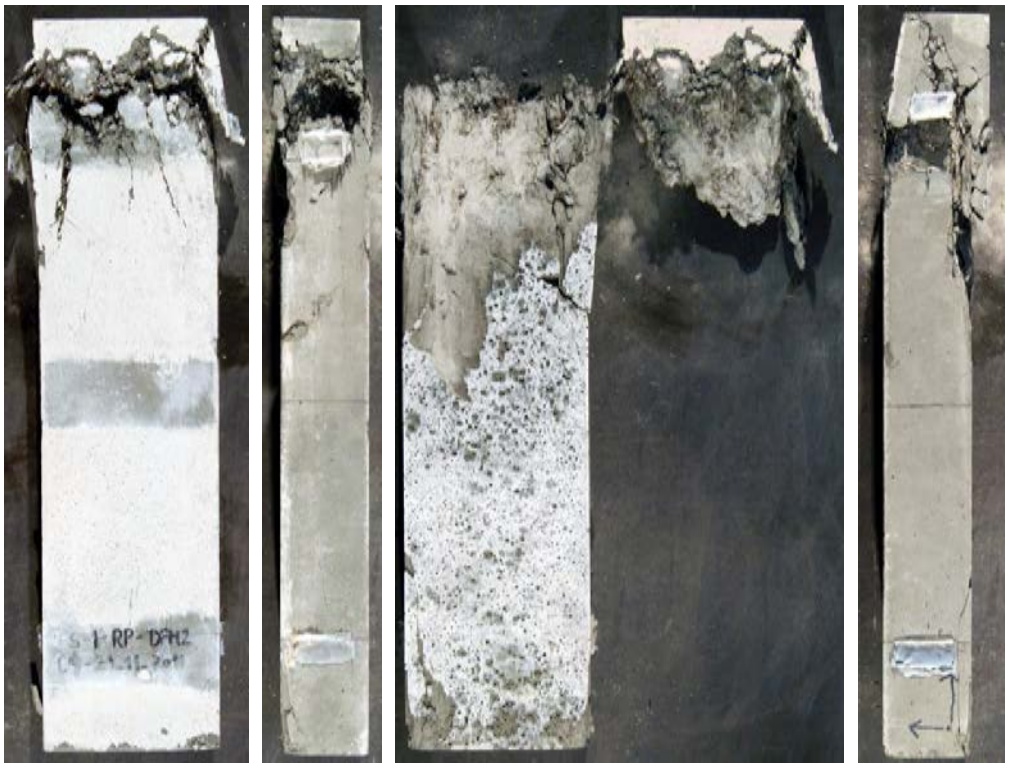
Verformungsgeregelte Druckversuche an Versuchskörpern ohne Fuge der Charge C4 (Belastungsgeschwindigkeit: [1] 0,1 mm/min oder [2] 0,5 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm, 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 3,5 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 3,5 mm)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der Querschnittsfläche		F_{max}	f_c	ε_{c1}
			b	h			
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[‰]
FS-1-RP-DFM2-C4-29_11_2011 [1]	07.02.2012	70	74,0	150,0	2354,8	-212,1	-4,58
FS-2-RP-DFM2-C4-29_11_2011 [3]							
FS-3-RP-DFM2-C4-29_11_2011 [2]	27.11.2012	364	74,8	150,2	2329,6	-207,6	-4,64
Mittelwert	m					-209,9	-4,61
Standardabweichung	s					3,24	0,04
Variationskoeffizient	v					1,54 %	0,92 %

[3] Der Probeköper wurde nicht geprüft, da er bereits vor der Prüfung eine Schädigung aufwies.

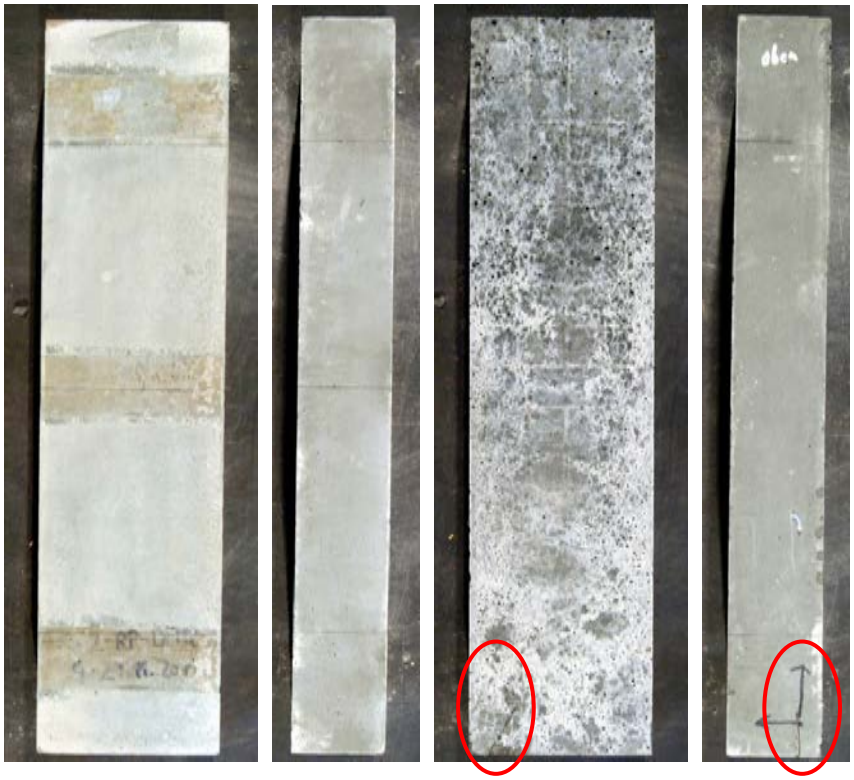


a) F-Δl-Kurve (Messlänge: l=400 mm)

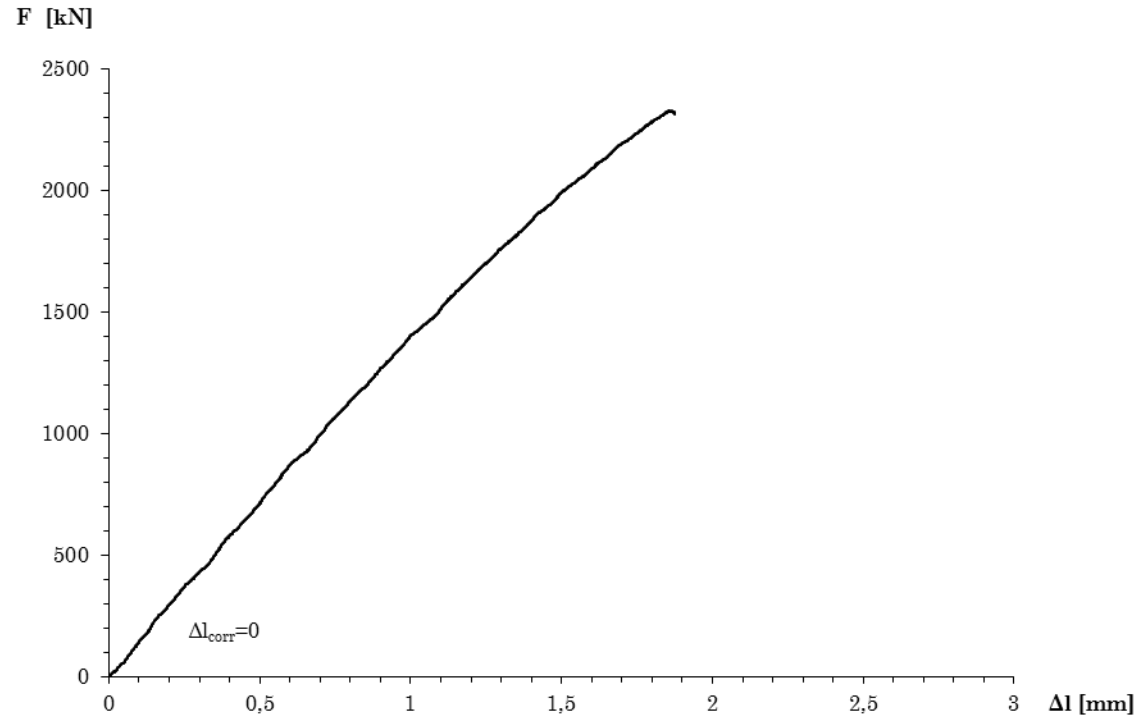


b) Bruchbild

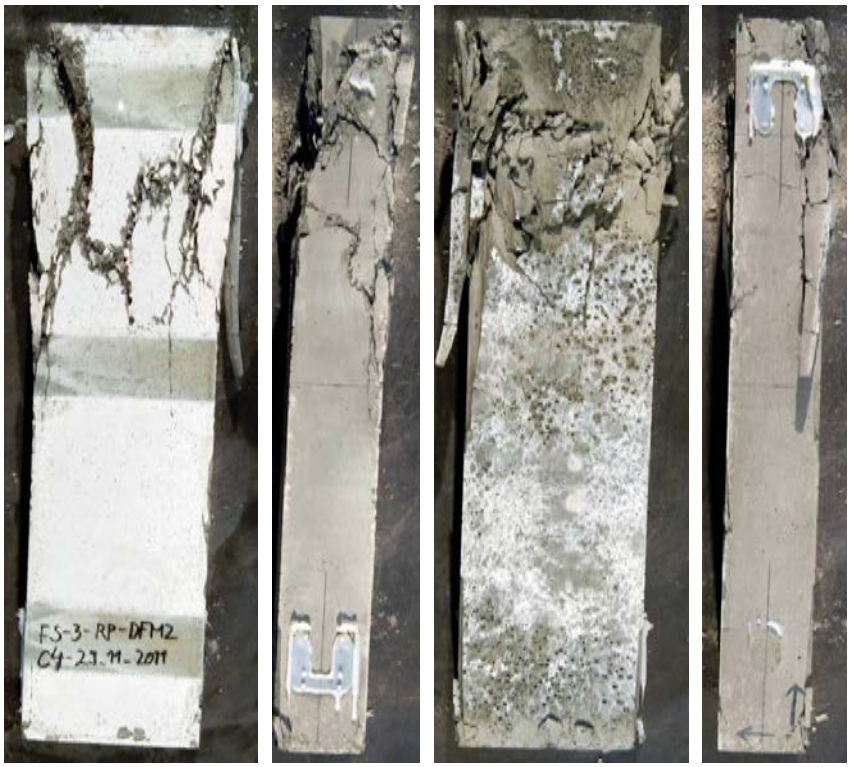
FS-1-RP-DFM2-C4-29_11_2011



FS-2-RP-DFM2-C4-29_11_2011 (Versuchskörper wurde nicht geprüft, da er bereits vor der Prüfung eine Schädigung aufwies)



a) F-Δl-Kurve (Messlänge: l=400 mm)



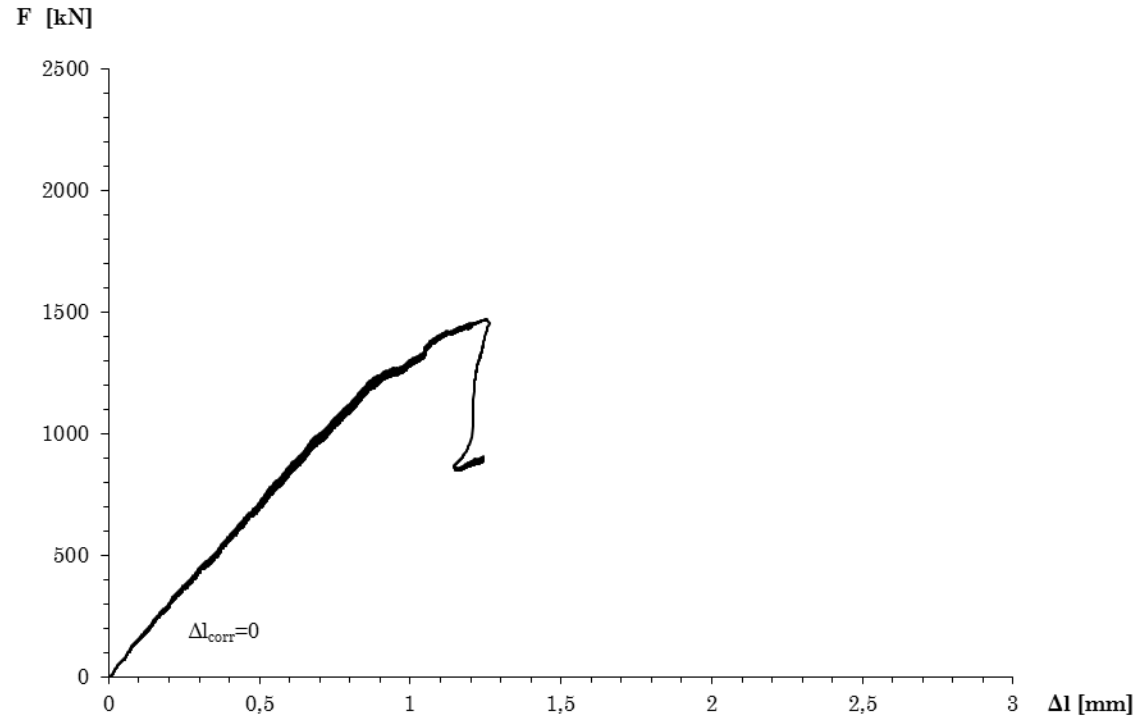
b) Bruchbild

FS-3-RP-DFM2-C4-29_11_2011

Verformungsgeregelte Druckversuche an Versuchskörpern ohne Fuge der Charge C5 (Belastungsgeschwindigkeit: [1] 0,5 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm, 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 3,5 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 3,5 mm oder [2] 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 2,75 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 2,75 mm)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der Querschnittsfläche		F_{max}	$f_{c,eff}$	ε_{c1}
			b	h			
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[‰]
FS-1-RP-DFM2-C5-30_11_2011 [1), 3)]	27.11.2012	363	73,6	150,1	1471,7	133,3	-3,13
FS-2-RP-DFM2-C5-30_11_2011 [1)]	26.11.2012	362	73,8	150,7	2296,8	206,6	-4,53
FS-3-RP-DFM2-C5-30_11_2011 [2)]	26.11.2012	362	74,2	150,5	2227,4	199,5	-4,29
Mittelwert	m					-203,0	-4,41
Standardabweichung	s					5,03	0,17
Variationskoeffizient	v					2,48 %	3,87

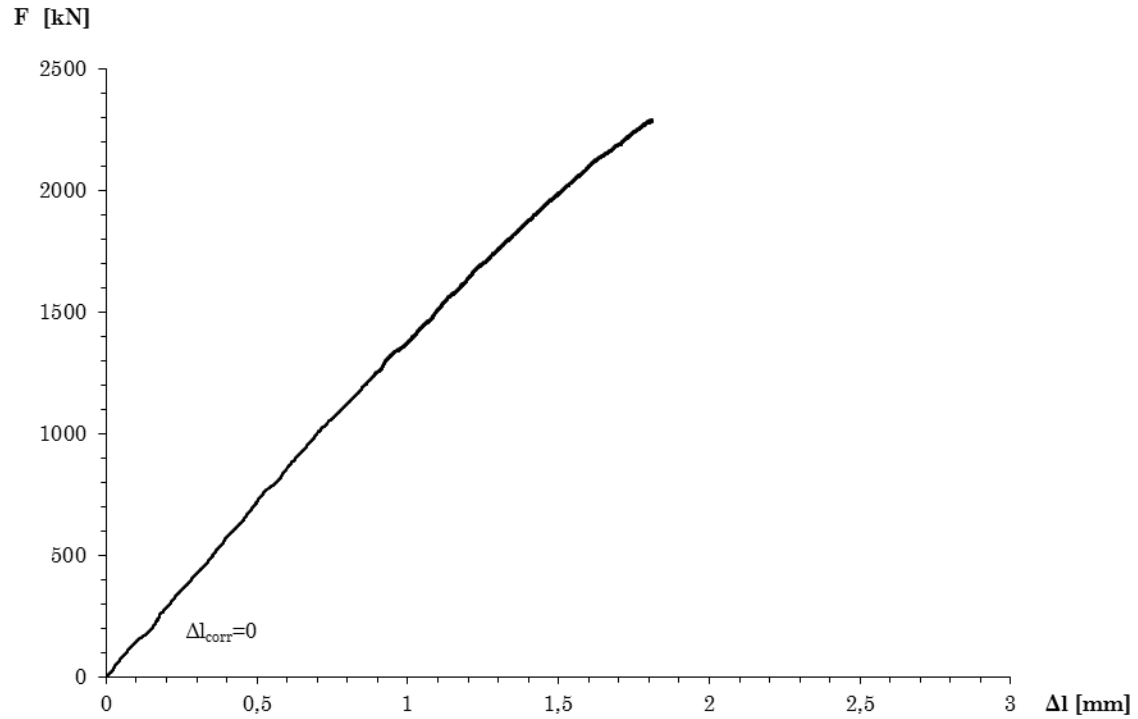
[3)] Der Versuchskörper wies eine schräge Lasteinleitungsfläche auf. Die Ergebnisse des Versuchskörpers wurden bei der Mittelwertbildung und der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.



a) F-Δl-Kurve (Messlänge: l=400 mm)

b) Bruchbild

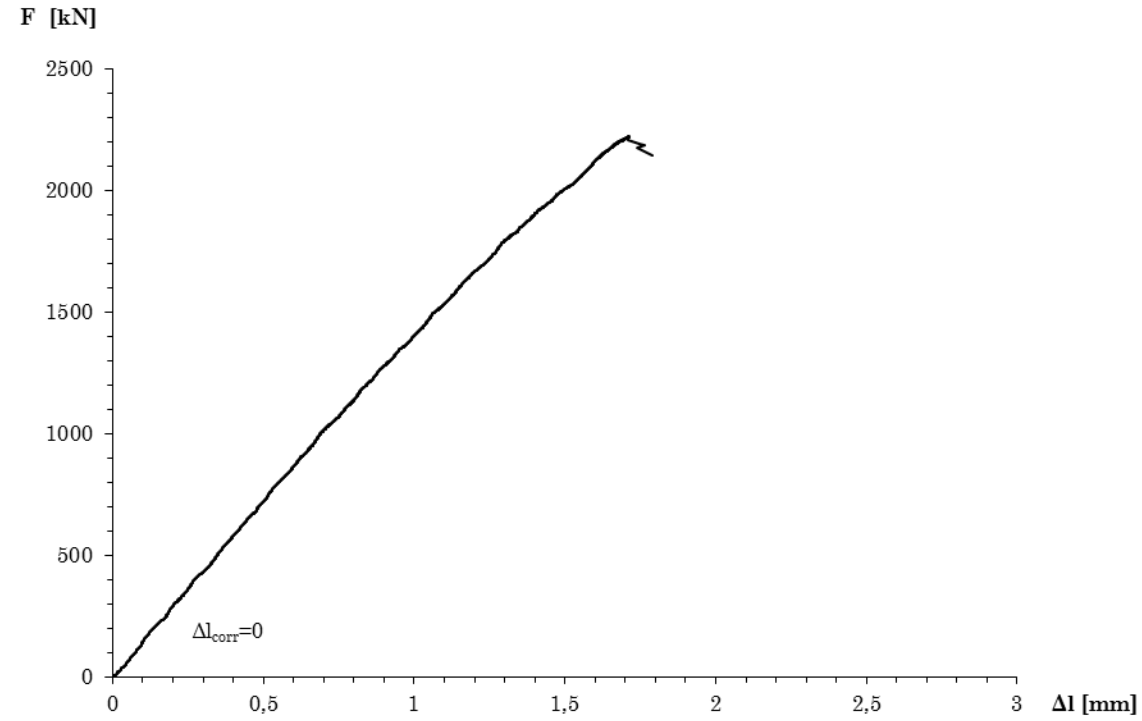
FS-1-RP-DFM2-C5-30_11_2011



a) F-Δl-Kurve (Messlänge: l=400 mm)

b) Bruchbild

FS-2-RP-DFM2-C5-30_11_2011



a) F-Δl-Kurve (Messlänge: l=400 mm)

b) Bruchbild

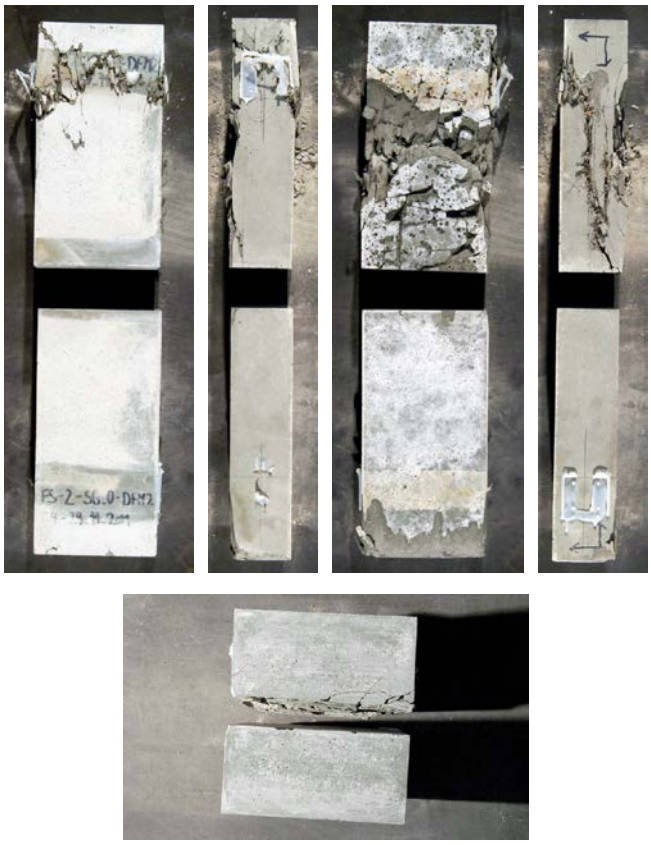
FS-3-RP-DFM2-C5-30_11_2011

C.3.2 Versuchskörper mit sehr glatter Fuge

Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge und einem Fugenneigungswinkel von $\alpha = 0°$ (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm, 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 3,5 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 3,5 mm)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-1-SG_0-DFM2 (C4 und C5)	27.11.2012	363	71,7	150,6	1718,3	-159,3
FS-2-SG_0-DFM2 (C4 und C5)	27.11.2012	363	72,9	149,8	2094,0	-191,8
FS-3-SG_0-DFM2 (C4 und C5)	28.11.2012	364	72,8	150,8	2118,6	-193,2
Mittelwert	m					-181,4
Standardabweichung	s					19,18
Variationskoeffizient	v					10,57 %

FS-1-SG_0-DFM2 (C4 und C5)



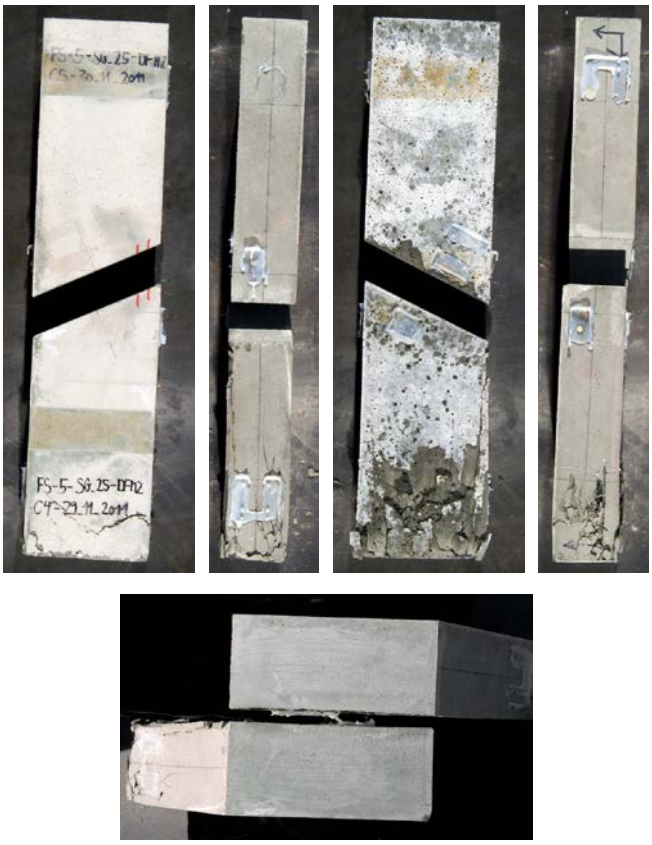
FS-2-SG_0-DFM2 (C4 und C5)

FS-3-SG_0-DFM2 (C4 und C5)

Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge und einem Fugenneigungswinkel von α = 25° (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm, 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 3,5 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 3,5 mm)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-4-SG_25-DFM2 (C4 und C5)	29.11.2012	365	72,6	150,0	1911,9	-175,7
FS-5-SG_25-DFM2 (C4 und C5)	29.11.2012	365	74,8	150,0	1915,1	-170,7
FS-6-SG_25-DFM2 (C4 und C5)	29.11.2012	365	73,8	150,2	2144,2	-193,4
Mittelwert	m					-180,0
Standardabweichung	s					11,92
Variationskoeffizient	v					6,62 %

FS-4-SG_25-DFM2 (C4 und C5)



FS-5-SG_25-DFM2 (C4 und C5)

FS-6-SG_25-DFM2 (C4 und C5)

Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge und einem Fugenneigungswinkel von α = 35° (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-7-SG_35-DFM2 (C4 und C5)	30.11.2012	366	74,0	150,3	123,4	-11,1
FS-8-SG_35-DFM2 (C4 und C5)	30.11.2012	366	75,0	150,2	131,4	-11,7
FS-9-SG_35-DFM2 (C4 und C5)	30.11.2012	366	73,3	150,2	80,8	-7,3
Mittelwert	m					-10,0
Standardabweichung	s					2,35
Variationskoeffizient	v					23,43 %

FS-7-SG_35-DFM2 (C4 und C5)

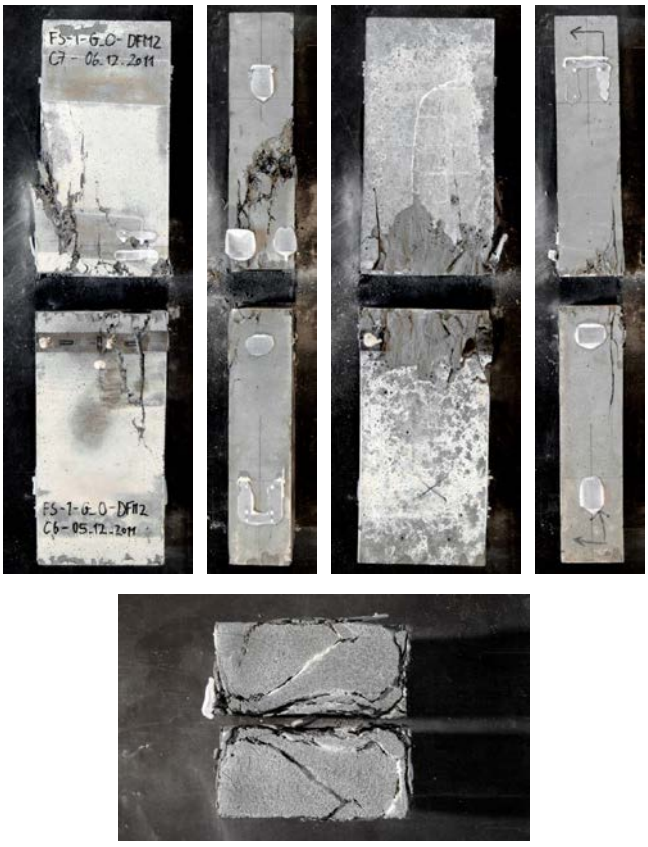
FS-8-SG_35-DFM2 (C4 und C5)

FS-9-SG_35-DFM2 (C4 und C5)

C.3.3 Versuchskörper mit gestrahlter Fuge

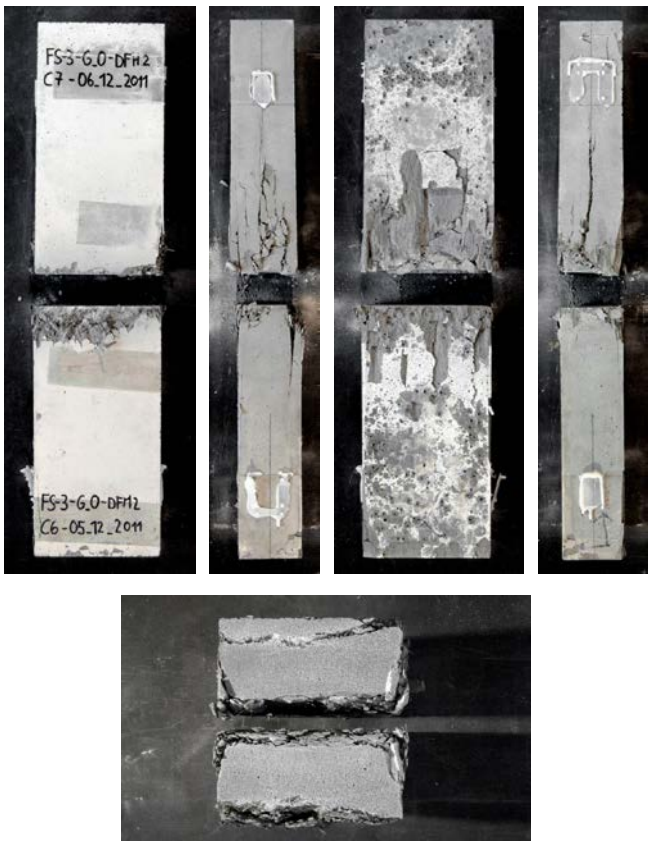
Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit gestrahlter Fuge und einem Fugenneigungswinkel von $\alpha = 0°$ (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm, 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 3,5 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 3,5 mm)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-1-G_0-DFM2 (C6 und C7)	14.02.2013	436	72,6	150,3	1510,0	-138,5
FS-2-G_0-DFM2 (C6 und C7)	15.02.2013	437	74,0	150,3	2072,4	-186,3
FS-3-G_0-DFM2 (C6 und C7)	13.02.2013	435	73,8	150,5	1886,8	-169,8
Mittelwert	m					-164,9
Standardabweichung	s					24,30
Variationskoeffizient	v					14,74 %



FS-1-G_0-DFM2 (C6 und C7)

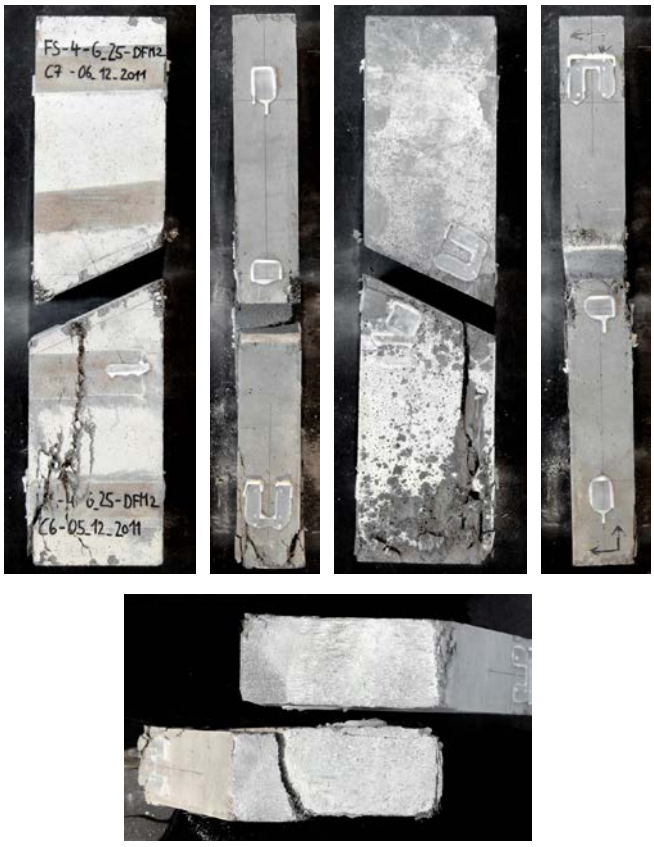
FS-2-G_0-DFM2 (C6 und C7)



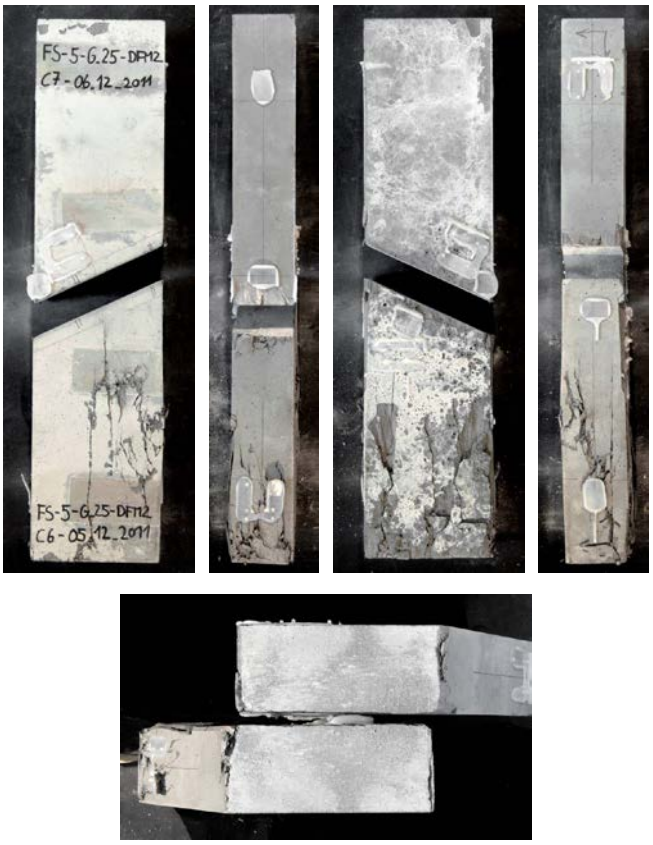
FS-3-G_0-DFM2 (C6 und C7)

Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit gestrahlter Fuge und einem Fugenneigungswinkel von $\alpha = 25°$ (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm, 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 3,5 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 3,5 mm)

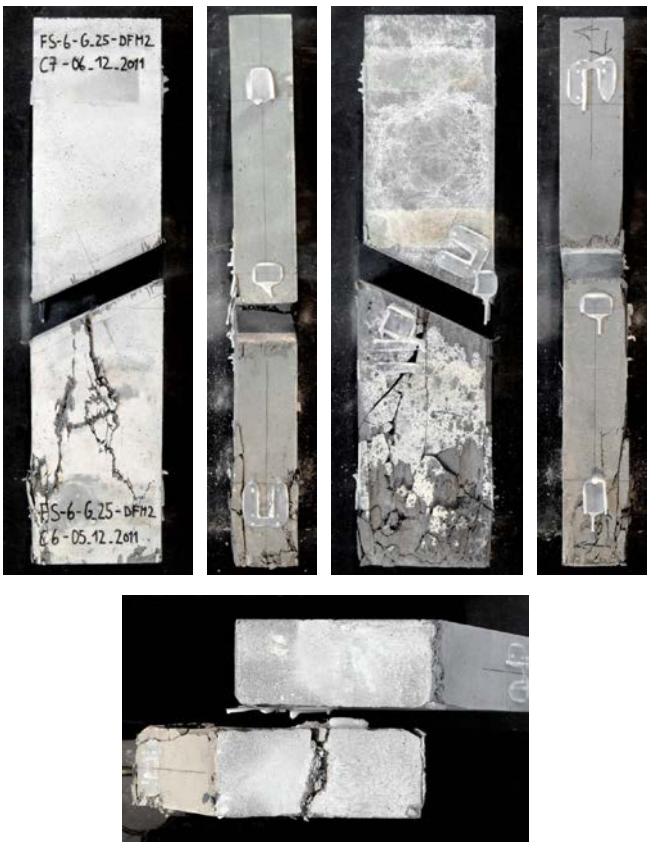
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-4-G_25-DFM2 (C6 und C7)	11.02.2013	433	72,8	150,2	2142,1	-196,1
FS-5-G_25-DFM2 (C6 und C7)	11.02.2013	433	71,9	150,0	1822,6	-169,0
FS-6-G_25-DFM2 (C6 und C7)	12.02.2013	434	73,0	150,3	2079,4	-189,6
Mittelwert	m					-184,9
Standardabweichung	s					14,14
Variationskoeffizient	v					7,65 %



FS-4-G_25-DFM2 (C6 und C7)



FS-5-G_25-DFM2 (C6 und C7)



FS-6-G_25-DFM2 (C6 und C7)

Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit gestrahlter Fuge und einem Fugenneigungswinkel von $\alpha = 35°$ (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-7-G_35-DFM2 (C6 und C7)	12.12.2012	372	74,5	150,4	30,4	2,7
FS-8-G_35-DFM2 (C6 und C7) [1)]	12.12.2012	372	73,8	150,5		
FS-9-G_35-DFM2 (C6 und C7)	13.12.2012	373	75,3	150,6	30,4	2,7
Mittelwert	m					-2,7
Standardabweichung	s					0,02
Variationskoeffizient	v					0,73 %

[1)] Der Probeköper war nicht prüfbar, da es bereits beim Aufbringen der Vorlast zum Abgleiten in der oberen Versuchskörperhälfte kam.

FS-7-G_35-DFM2 (C6 und C7)

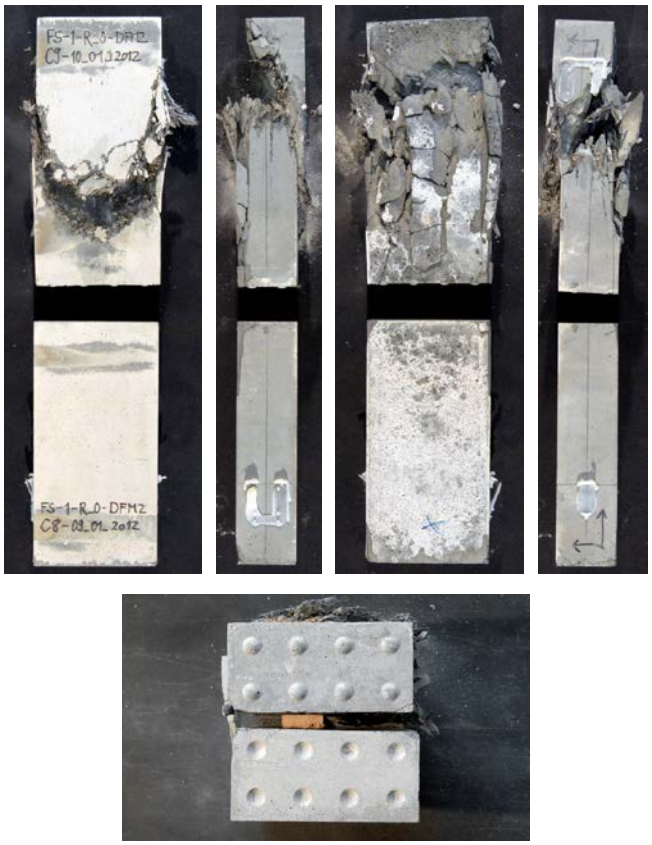
FS-8-G_35-DFM2 (C6 und C7)

FS-9-G_35-DFM2 (C6 und C7)

C.3.4 Versuchskörper mit rauer Fuge

Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit rauer Fuge und einem Fugenneigungswinkel von $\alpha = 0°$ (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm, 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 3,5 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 3,5 mm)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-1-R_0-DFM2 (C8 und C9)	07.12.2012	333	72,2	150,9	2170,2	-199,4
FS-2-R_0-DFM2 (C8 und C9)	14.02.2013	402	73,9	150,6	2064,0	-185,6
FS-3-R_0-DFM2 (C8 und C9)	14.02.2013	402	75,1	150,6	2124,2	-188,0
Mittelwert	m					-191,0
Standardabweichung	s					7,36
Variationskoeffizient	v					3,85 %



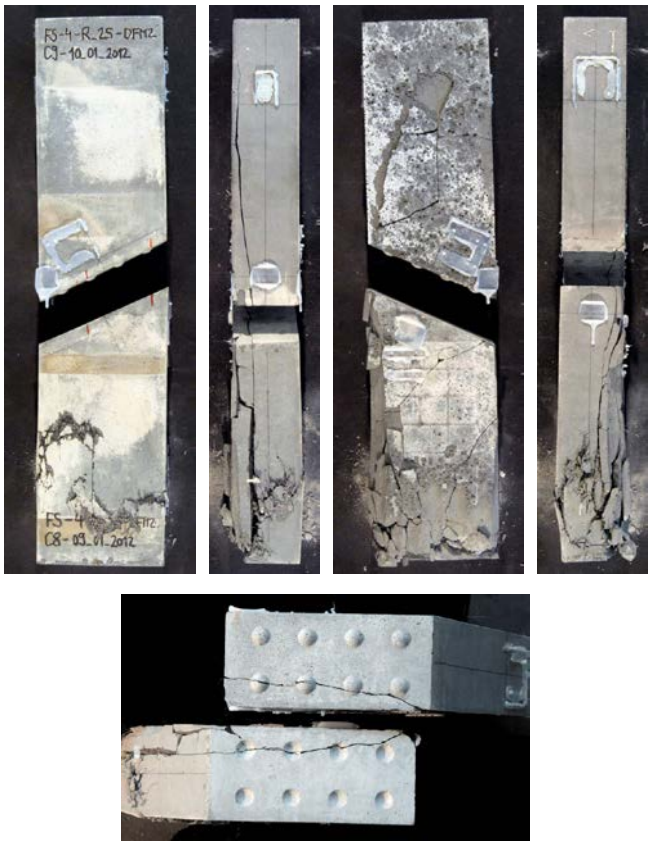
FS-1-R_0-DFM2 (C8 und C9)

FS-2-R_0-DFM2 (C8 und C9)

FS-3-R_0-DFM2 (C8 und C9)

Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit rauer Fuge und einem Fugenneigungswinkel von $\alpha = 25°$ (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm, 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 3,5 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 3,5 mm)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-4-R_25-DFM2 (C8 und C9)	13.02.2013	401	75,5	150,5	1941,1	-170,9
FS-5-R_25-DFM2 (C8 und C9)	13.02.2013	401	75,6	151,0	2238,6	-196,2
FS-6-R_25-DFM2 (C8 und C9)	13.02.2013	401	74,7	150,4	2325,3	-207,1
Mittelwert	m					-191,4
Standardabweichung	s					18,56
Variationskoeffizient	v					9,69 %



FS-4-R_25-DFM2 (C8 und C9)

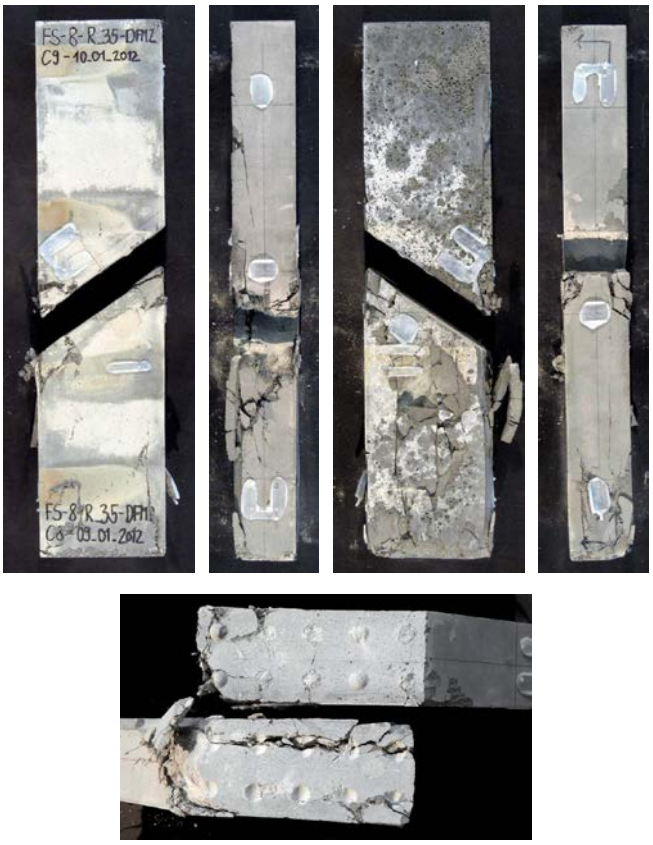
FS-5-R_25-DFM2 (C8 und C9)

FS-6-R_25-DFM2 (C8 und C9)

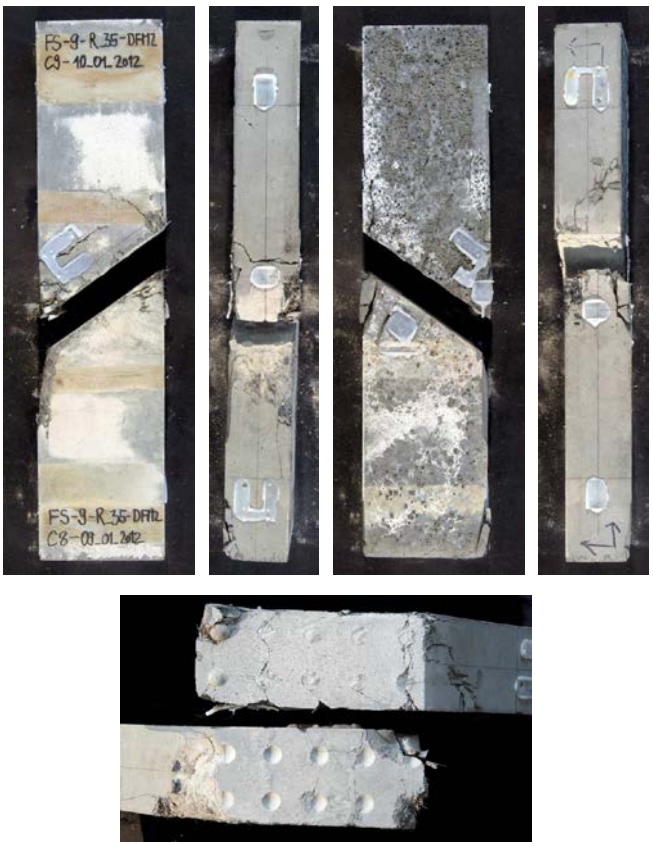
Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit rauer Fuge und einem Fugenneigungswinkel von $\alpha = 35°$ (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm, 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 2,5 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 2,5 mm)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-7-R_35-DFM2 (C8 und C9)	13.12.2012	339	74,2	150,6	1996,5	-178,8
FS-8-R_35-DFM2 (C8 und C9)	14.12.2012	340	74,6	150,4	2134,9	-190,3
FS-9-R_35-DFM2 (C8 und C9)	17.12.2012	343	77,6	150,5	2267,4	-194,3
Mittelwert	m					-187,8
Standardabweichung	s					8,01
Variationskoeffizient	v					4,26 %

FS-7-R_35-DFM2 (C8 und C9)



FS-8-R_35-DFM2 (C8 und C9)



FS-9-R_35-DFM2 (C8 und C9)

Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit rauer Fuge und einem Fugenneigungswinkel von $\alpha = 45°$ (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 1,0 mm)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-10-R_45-DFM2 (C8 und C9)	11.12.2012	337	75,3	150,1	334,0	-29,6
FS-11-R_45-DFM2 (C8 und C9)	12.12.2012	338	75,0	150,3	439,2	-39,0
FS-12-R_45-DFM2 (C8 und C9)	12.12.2012	338	75,6	154,9	365,5	-31,2
Mittelwert	m					-33,3
Standardabweichung	s					5,02
Variationskoeffizient	v					15,10 %

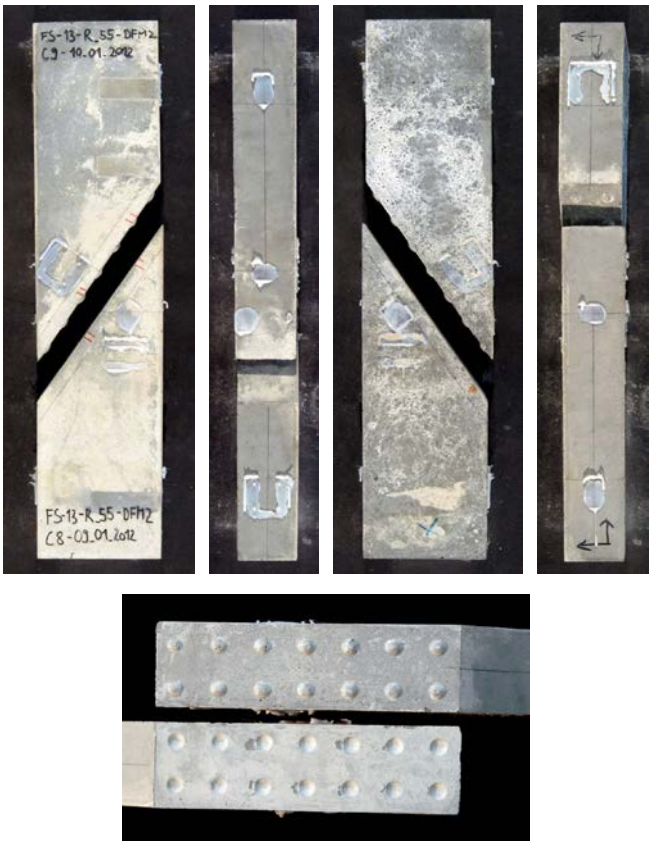
FS-10-R_45-DFM2 (C8 und C9)

FS-11-R_45-DFM2 (C8 und C9)

FS-12-R_45-DFM2 (C8 und C9)

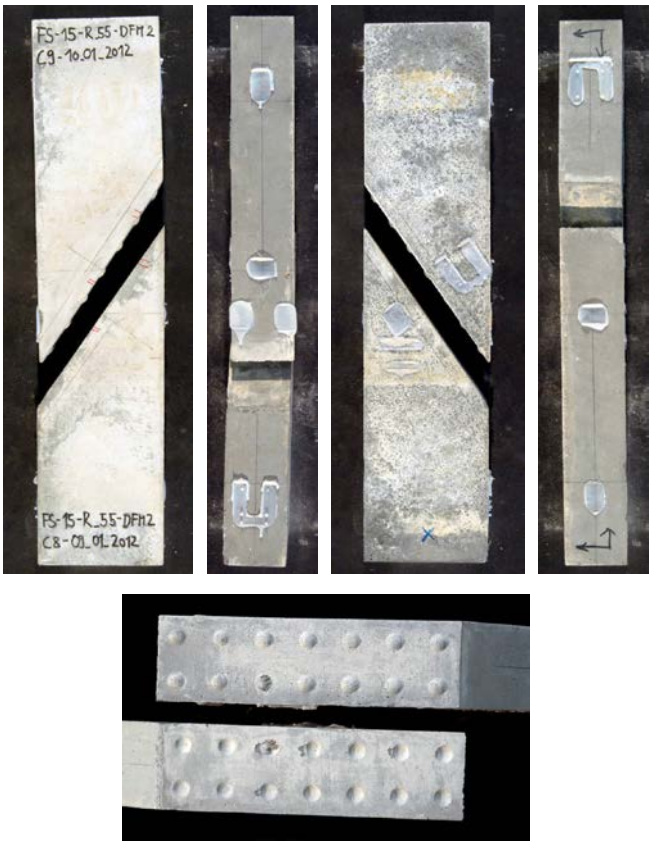
Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit rauer Fuge und einem Fugenneigungswinkel von $\alpha = 55°$ (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-13-R_55-DFM2 (C8 und C9[)]	11.12.2012	337	73,2	150,7	131,5	-11,9
FS-14-R_55-DFM2 (C8 und C9)	11.12.2012	337	73,0	150,1	162,2	-14,8
FS-15-R_55-DFM2 (C8 und C9)	11.12.2012	337	74,1	150,2	91,2	-8,2
Mittelwert	m					-11,6
Standardabweichung	s					3,32
Variationskoeffizient	v					28,49 %



FS-13-R_55-DFM2 (C8 und C9)

FS-14-R_55-DFM2 (C8 und C9)

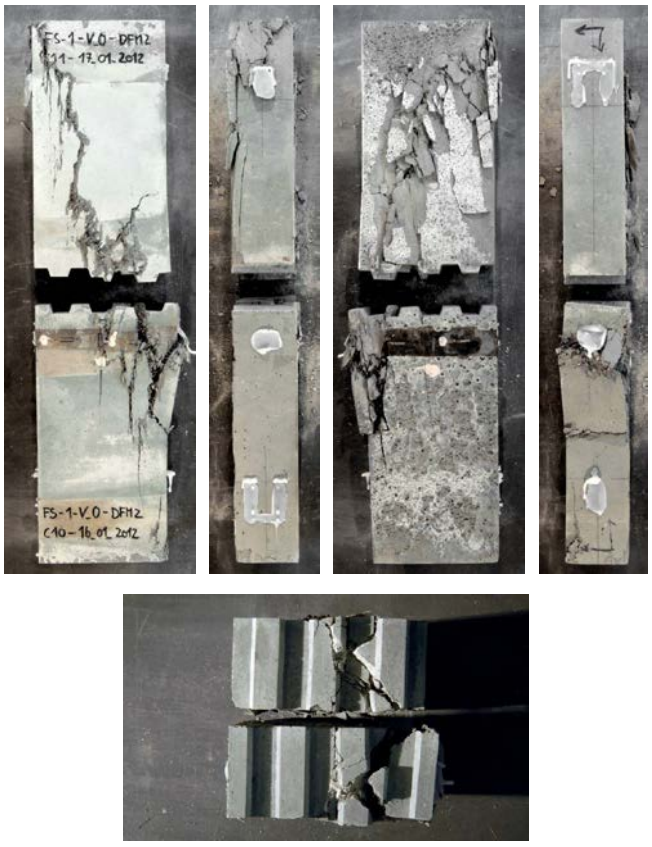


FS-15-R_55-DFM2 (C8 und C9)

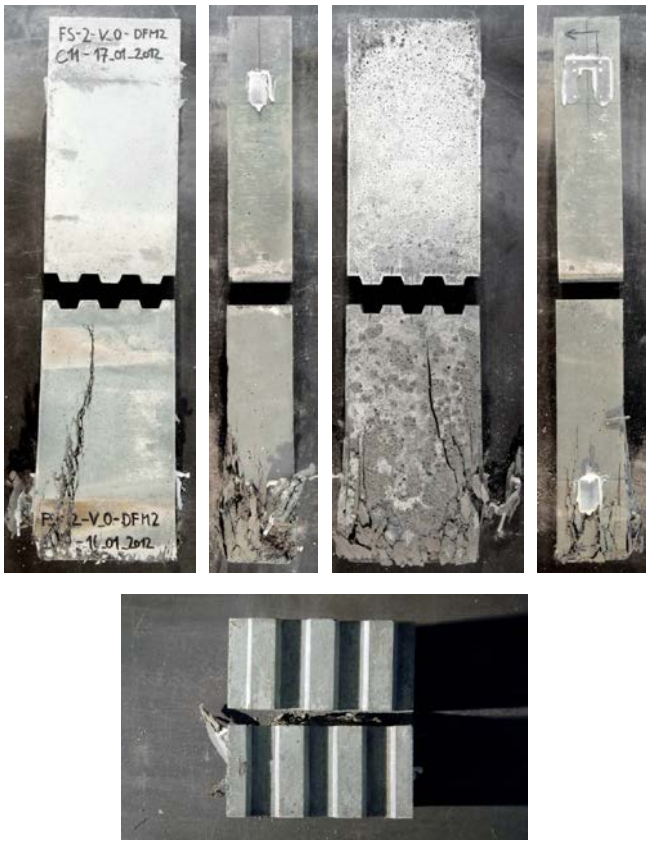
C.3.5 Versuchskörper mit verzahnter Fuge

Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge und einem Fugenneigungswinkel von $\alpha = 0°$ (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm, 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 3,5 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 3,5 mm)

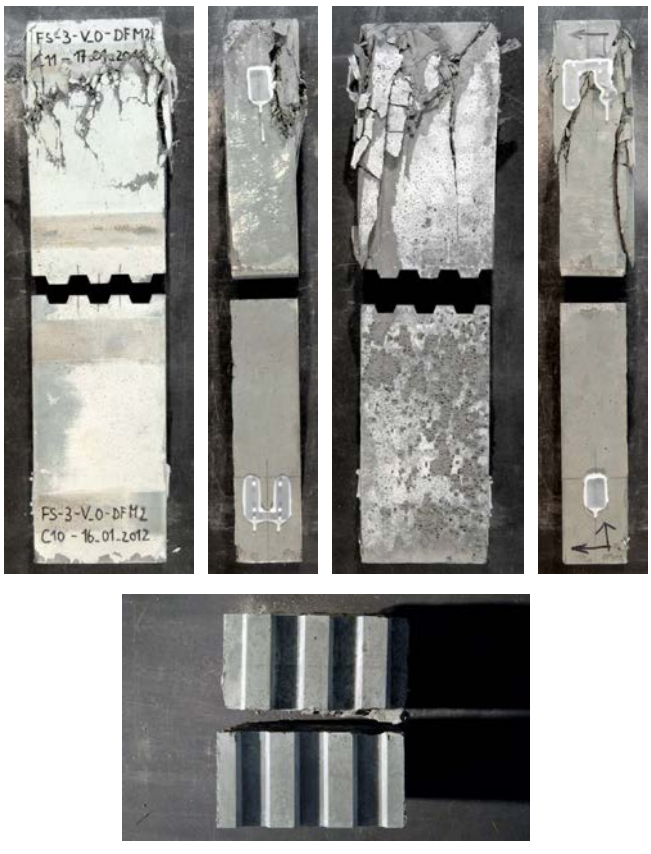
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-1-V_0-DFM2 (C10 und C11)	14.02.2013	394	73,2	151,0	2092,9	-189,4
FS-2-V_0-DFM2 (C10 und C11)	06.12.2012	324	73,2	151,1	2104,4	-190,3
FS-3-V_0-DFM2 (C10 und C11)	06.12.2012	324	76,5	150,6	2343,6	-203,6
Mittelwert	m					-194,4
Standardabweichung	s					7,97
Variationskoeffizient	v					4,10 %



FS-1-V_0-DFM2 (C10 und C11)



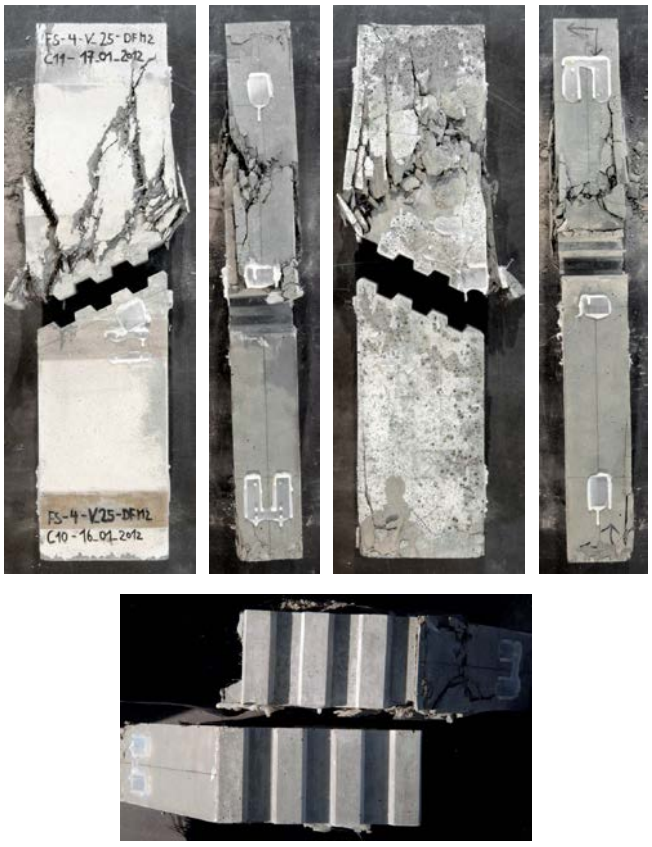
FS-2-V_0-DFM2 (C10 und C11)



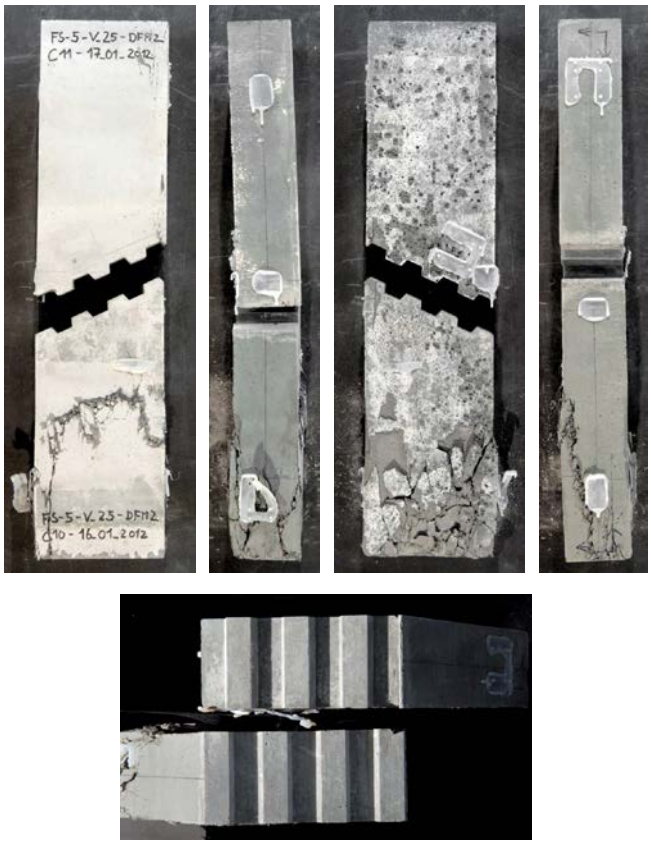
FS-3-V_0-DFM2 (C10 und C11)

Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge und einem Fugenneigungswinkel von $\alpha = 25°$ (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm, 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 3,5 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 3,5 mm)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-4-V_25-DFM2 (C10 und C11)	05.12.2012	323	75,3	151,0	2192,9	-192,8
FS-5-V_25-DFM2 (C10 und C11)	06.12.2012	324	73,6	151,3	2019,8	-181,3
FS-6-V_25-DFM2 (C10 und C11)	06.12.2012	324	77,1	150,6	2295,7	-197,7
Mittelwert	m					-190,6
Standardabweichung	s					8,42
Variationskoeffizient	v					4,42 %



FS-4-V_25-DFM2 (C10 und C11)



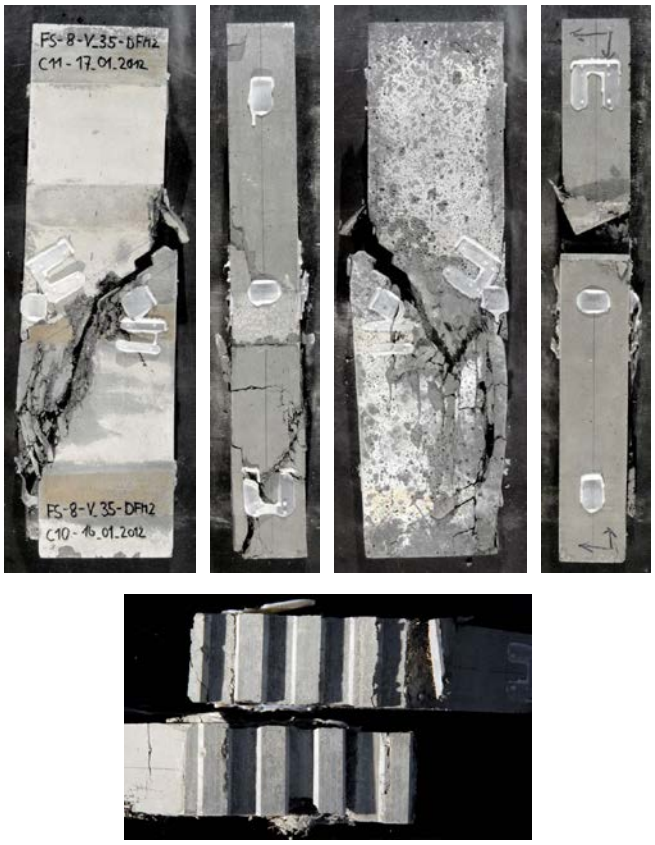
FS-5-V_25-DFM2 (C10 und C11)

FS-6-V_25-DFM2 (C10 und C11)

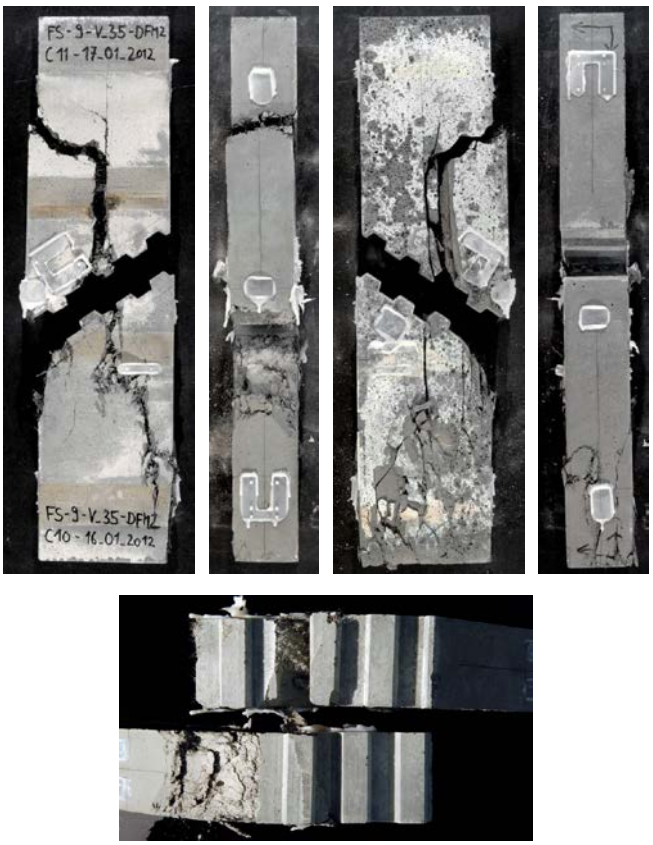
Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge und einem Fugenneigungswinkel von $\alpha = 35°$ (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm, 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 3,5 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 3,5 mm)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-7-V_35-DFM2 (C10 und C11)	19.12.2012	337	73,7	150,6	1809,1	-163,0
FS-8-V_35-DFM2 (C10 und C11)	19.12.2012	337	74,8	150,5	1761,6	-156,6
FS-9-V_35-DFM2 (C10 und C11)	07.12.2012	325	73,9	150,3	1969,3	-177,4
Mittelwert	m					-165,7
Standardabweichung	s					10,70
Variationskoeffizient	v					6,46 %

FS-7-V_35-DFM2 (C10 und C11)



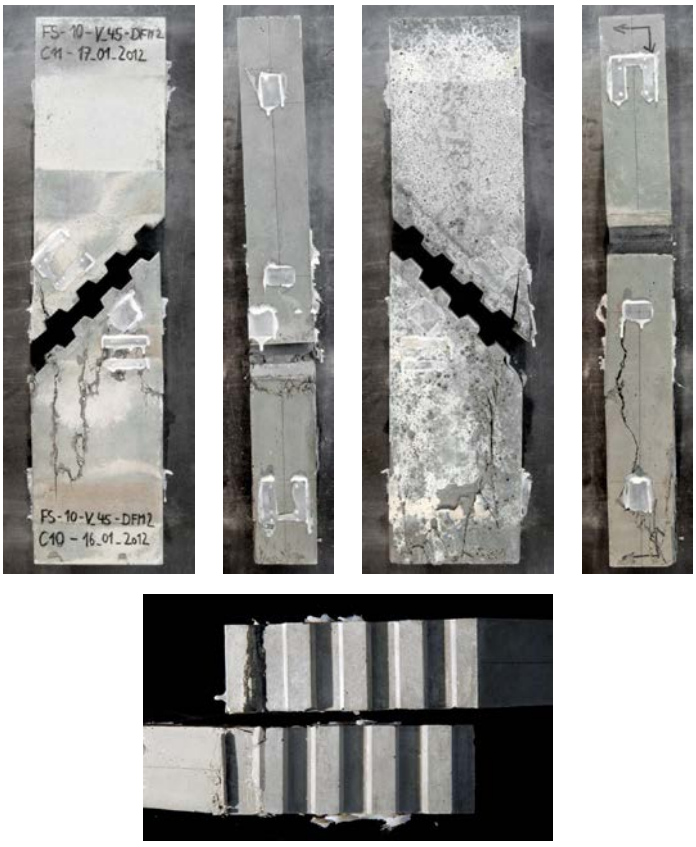
FS-8-V_35-DFM2 (C10 und C11)



FS-9-V_35-DFM2 (C10 und C11)

Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge und einem Fugenneigungswinkel von $\alpha = 45°$ (Belastungsgeschwindigkeit: 0,5 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm, 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 3,5 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 3,5 mm)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-10-V_45-DFM2 (C10 und C11)	04.12.2012	322	73,4	151,3	1520,2	-136,9
FS-11-V_45-DFM2 (C10 und C11)	05.12.2012	323	73,8	151,2	1664,5	-149,1
FS-12-V_45-DFM2 (C10 und C11)	05.12.2012	323	72,9	151,1	1603,8	-145,5
Mittelwert	m					-143,8
Standardabweichung	s					6,28
Variationskoeffizient	v					4,37 %



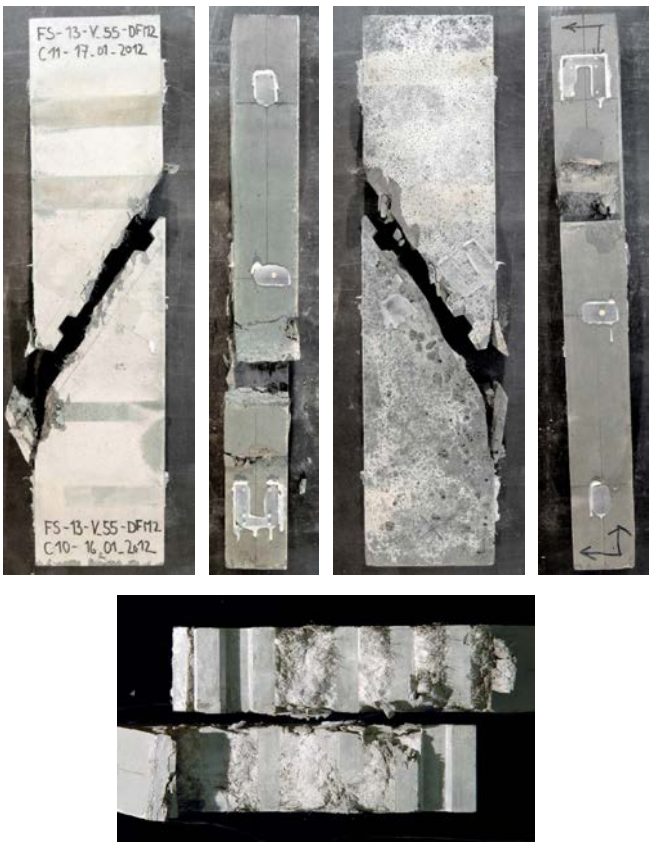
FS-10-V_45-DFM2 (C10 und C11)

FS-11-V_45-DFM2 (C10 und C11)

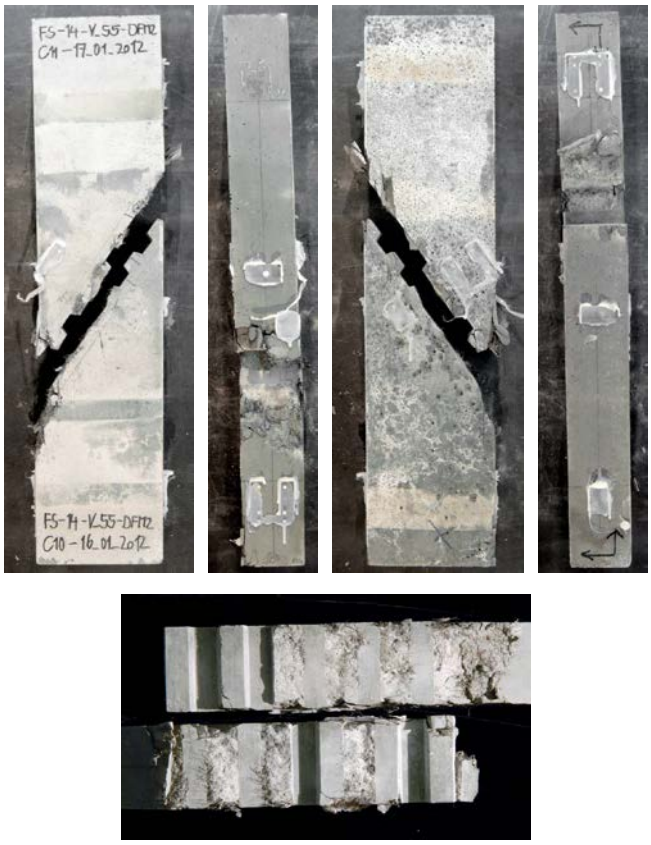
FS-12-V_45-DFM2 (C10 und C11)

Verformungsgeregelte Schub-Druck-Versuche an Versuchskörpern mit verzahnter Fuge und einem Fugenneigungswinkel von $\alpha = 45°$ (Belastungsgeschwindigkeit: [1] 0,5 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm, 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 2,5 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 2,5 mm oder [2] 0,1 mm/min bis zu einem Maschinenweg von 1,0 mm und 0,05 mm/min ab einem Maschinenweg von 1,0 mm)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Querschnittsflächen		F_{max}	$f_{c,eff}$
			b	h		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
FS-13-V_55-DFM2 (C10 und C11) [1]	03.12.2012	321	72,0	150,8	1298,1	-119,5
FS-14-V_55-DFM2 (C10 und C11) [1]	03.12.2012	321	72,1	150,3	1313,1	-121,1
FS-15-V_55-DFM2 (C10 und C11) [2]	03.12.2012	321	72,8	150,7	1339,9	-122,1
Mittelwert	m					-120,9
Standardabweichung	s					1,31
Variationskoeffizient	v					1,09 %



FS-13-V_55-DFM2 (C10 und C11)



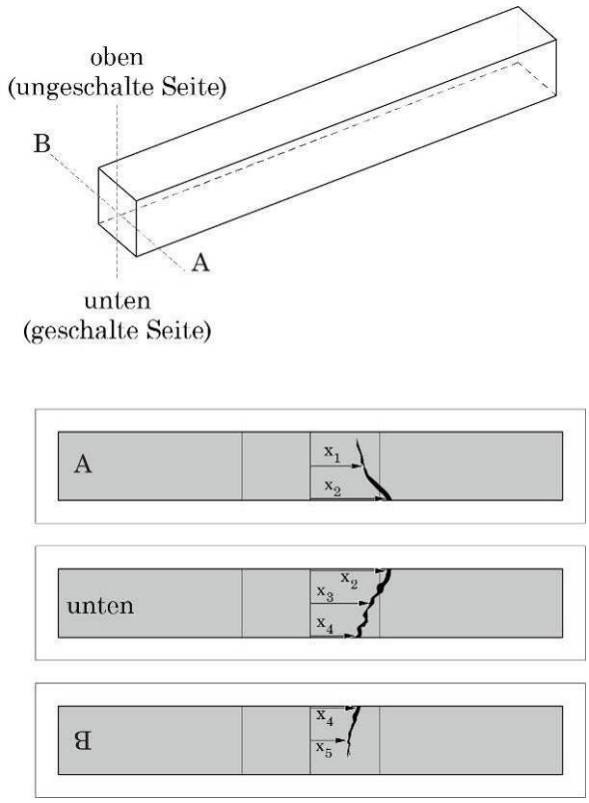
FS-14-V_55-DFM2 (C10 und C11)

FS-15-V_55-DFM2 (C10 und C11)

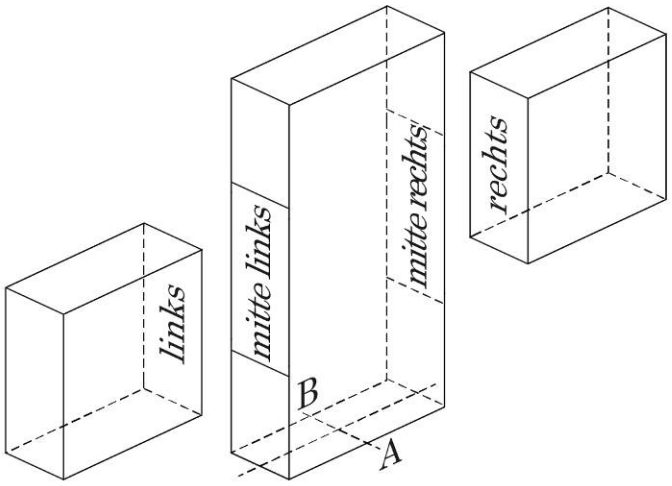
Anhang D Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung

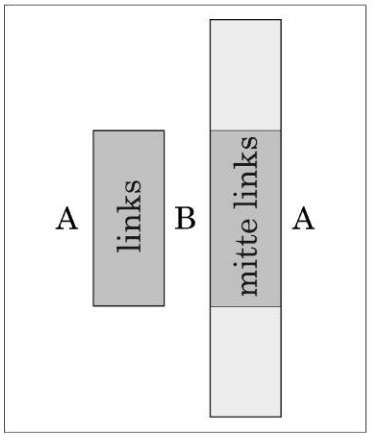
In Anhang D.1 sind die Ergebnisse der kraftgeregelten Druckversuche der Chargen C12 bis C19 dargestellt. Je Charge ist eine Tabelle mit den wesentlichen Daten zur Versuchsdurchführung, den Probekörpern und den Prüfkräften bzw. -spannungen angegeben.

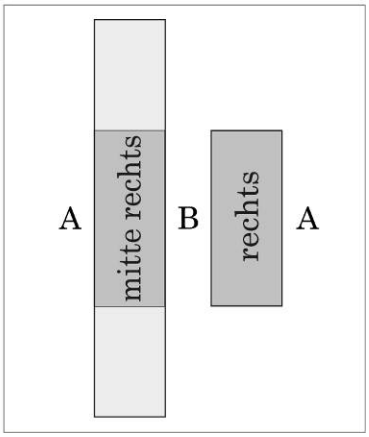
In Anhang D.2 sind die Ergebnisse der Biegezugversuche der Chargen C12 bis C19 dargestellt. Je Charge ist eine Tabelle mit den wesentlichen Daten zur Versuchsdurchführung, den Probekörpern und den Prüfkräften bzw. -spannungen angegeben. Des Weiteren ist für jeden Probekörper die Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve angegeben sowie eine photographische Dokumentation der Risslokalisierung. Dabei wurde auch die Entfernung von der Mitte der Prismen zum Riss gemessen und protokolliert. Im nachfolgenden Bild ist die Anordnung der Fotos in Bezug auf die für die Prismen ohne Kerbe festgelegten Bezeichnungen sowie die gemessenen Entfernungen von der Mitte der Prismen zum Riss schematisch dargestellt.

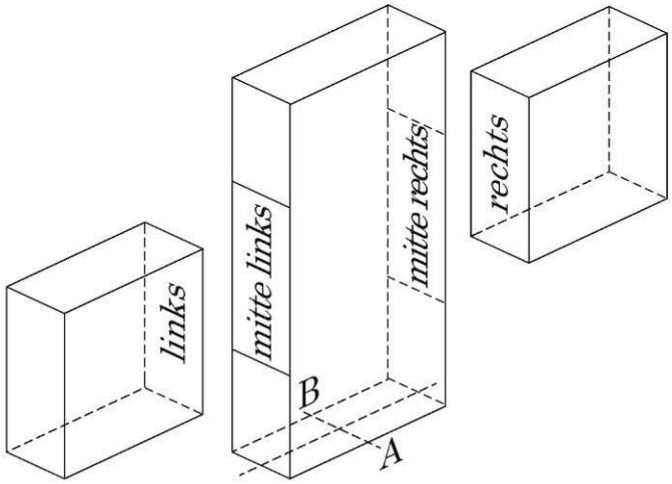


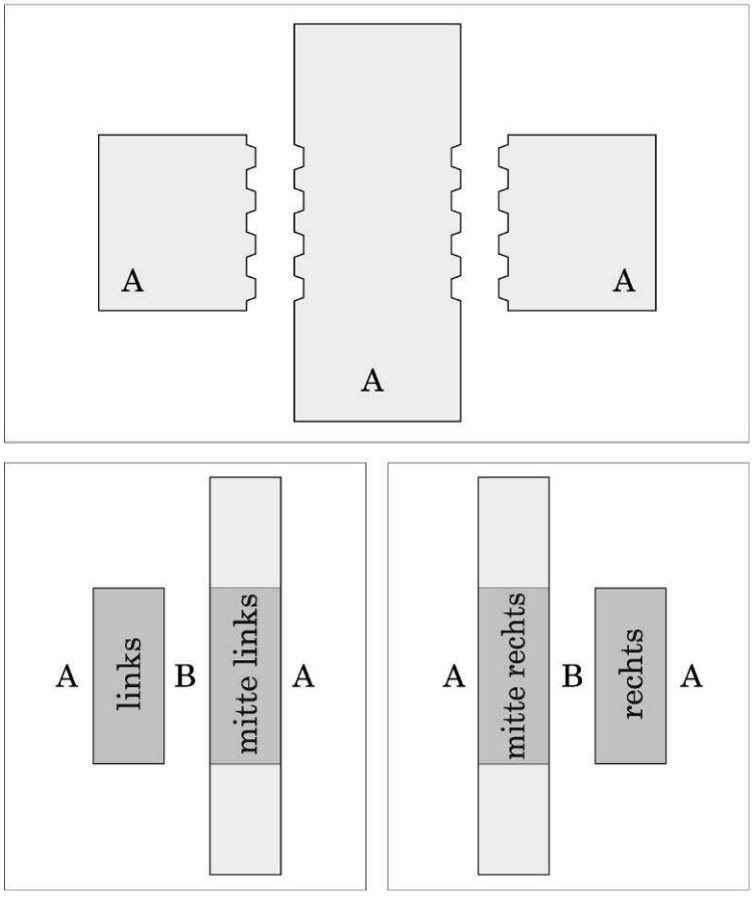
In Anhang D.3 sind die Ergebnisse der Abscherversuche unter statischer Belastung dargestellt. Für die Versuchskörper mit sehr glatter als auch mit verzahnter Fuge ist je Serie eine Tabelle mit den wesentlichen Daten zur Versuchsdurchführung, den Probekörpern und den Prüfkräften bzw. -spannungen angegeben. Des Weiteren sind für jeden Versuchskörper die Kraft-Verformungs-Beziehung sowohl der Verschiebung parallel zur Fuge als auch der Verformung normal zur Fuge und eine photographische Dokumentation der Bruchbilder angegeben. In den nachfolgenden Bildern ist die Anordnung der Fotos in Bezug auf die für die Versuchskörper mit sehr glatter Fuge sowie für die Versuchskörper mit verzahnter Fuge festgelegten Bezeichnungen schematisch dargestellt.








links
mitte links
mitte rechts
rechts
B
A


A
A
A
A
links
B
mitte links
A
A
mitte rechts
B
rechts
A

In Anhang D.4 sind die Ergebnisse der Abscherversuche unter zyklischer Belastung dargestellt. Für die Versuchskörper mit sehr glatter als auch mit verzahnter Fuge ist je Serie eine Tabelle mit den wesentlichen Daten zur Versuchsdurchführung, den Probekörpern, den Belastungshorizonten sowie der Anzahl der Lastwechsel angegeben. Für die Versuchskörper:

- die beim ersten Lastwechsel die Oberlast nicht erreicht hatten, ist die Kraft-Verformungs-Beziehung sowohl der Verschiebung parallel zur Fuge als auch der Verformung normal zur Fuge und eine photographische Dokumentation der Bruchbilder angegeben;
- bei denen bis zu $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln ein Versagen auftrat, ist die Kraft-Verformungs-Beziehung sowohl der Verschiebung parallel zur Fuge als auch der Verformung normal zur Fuge, die Verformungsentwicklung während der zyklischen Belastung sowohl der Verschiebung parallel zur Fuge als auch der Verformung normal zur Fuge und eine photographische Dokumentation der Bruchbilder angegeben;
- bei denen bis zu $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln kein Versagen auftrat, ist die Kraft-Verformungs-Beziehung sowohl der Verschiebung parallel zur Fuge als auch der Verformung normal zur Fuge und die Verformungsentwicklung während der zyklischen Belastung sowohl der Verschiebung parallel zur Fuge als auch der Verformung normal zur Fuge angegeben.

Des Weiteren sind für die Versuchskörper, bei denen bis zu $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln kein Versagen auftrat und die somit als Durchläufer gewertet wurden, die Ergebnisse der Abscherversuche unter statischer Belastung zur Prüfung der Resttragfähigkeit dargestellt. Für die Versuchskörper ist je Serie eine Tabelle mit den wesentlichen Daten zur Versuchsdurchführung, den Probekörpern und den Prüfkräften bzw. -spannungen angegeben. Zudem sind für jeden Versuchskörper die Kraft-Verformungs-Beziehung sowohl der Verschiebung parallel zur Fuge als auch der Verformung normal zur Fuge und eine photographische Dokumentation der Bruchbilder angegeben.

D.1 Druckversuche

D.1.1 Charge C12

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C12-08_10_2013	09.04.2014	183	99,5	203,8	4,070	2,568	1313,8	-169,0
KZ-2-DFM2-C12-08_10_2013	09.04.2014	183	99,4	203,7	4,047	2,560	1372,0	-176,8
KZ-3-DFM2-C12-08_10_2013	09.04.2014	183	99,5	204,6	4,078	2,563	1366,8	-175,8
Mittelwert	m							-173,8
Standardabweichung	s							4,26
Variationskoeffizient	v							2,45 %

D.1.2 Charge C13

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C13-09_10_2013	09.04.2014	182	99,2	205,3	4,096	2,581	1304,3	-168,8
KZ-2-DFM2-C13-09_10_2013	09.04.2014	182	99,3	205,0	4,094	2,579	1252,4	-161,7
KZ-3-DFM2-C13-09_10_2013	09.04.2014	182	99,3	205,3	4,094	2,575	1442,4	-186,3
Mittelwert	m							-172,2
Standardabweichung	s							12,63
Variationskoeffizient	v							7,33 %

D.1.3 Charge C14

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C14-14_10_2013	09.04.2014	177	99,4	205,5	4,111	2,578	1287,4	-165,9
KZ-2-DFM2-C14-14_10_2013	09.04.2014	177	99,5	205,5	4,097	2,564	1255,9	-161,5
KZ-3-DFM2-C14-14_10_2013	09.04.2014	177	99,2	205,5	4,110	2,588	1399,5	-181,1
Mittelwert	m							-169,5
Standardabweichung	s							10,26
Variationskoeffizient	v							6,06 %

D.1.4 Charge C15

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C15-15_10_2013	09.04.2014	176	99,5	203,3	4,053	2,564	1250,0	-160,8
KZ-2-DFM2-C15-15_10_2013	09.04.2014	176	99,5	206,3	4,125	2,572	1361,6	-175,1
KZ-3-DFM2-C15-15_10_2013	09.04.2014	176	99,3	205,9	4,113	2,579	1607,4	-207,6
Mittelwert	m							-181,1
Standardabweichung	s							23,97
Variationskoeffizient	v							13,24 %

D.1.5 Charge C16

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C16-21_10_2013	10.04.2014	171	99,5	206,3	4,121	2,569	1319,7	-169,7
KZ-2-DFM2-C16-21_10_2013	10.04.2014	171	99,3	206,0	4,117	2,581	1273,7	-164,5
KZ-3-DFM2-C16-21_10_2013	10.04.2014	171	99,6	206,2	4,110	2,558	1237,5	-158,8
Mittelwert	m							-164,3
Standardabweichung	s							5,45
Variationskoeffizient	v							3,31 %

D.1.6 Charge C17

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C17-22_10_2013	10.04.2014	170	99,4	205,6	4,108	2,575	1623,3	-209,2
KZ-2-DFM2-C17-22_10_2013	10.04.2014	170	99,4	205,6	4,102	2,571	1238,3	-159,6
KZ-3-DFM2-C17-22_10_2013	10.04.2014	170	99,7	205,4	4,104	2,559	1344,9	-172,3
Mittelwert	m							-180,3
Standardabweichung	s							25,77
Variationskoeffizient	v							14,29 %

D.1.7 Charge C18

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C18-04_11_2013	10.04.2014	157	99,4	206,2	4,111	2,569	1132,4	-145,9
KZ-2-DFM2-C18-04_11_2013	10.04.2014	157	99,3	204,6	4,082	2,576	1246,1	-160,9
KZ-3-DFM2-C18-04_11_2013	10.04.2014	157	99,3	205,8	4,104	2,575	1071,7	-138,4
Mittelwert	m							-148,4
Standardabweichung	s							11,46
Variationskoeffizient	v							7,72 %

D.1.8 Charge C19

Kraftgeregelte Druckversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,6 MPa/s)

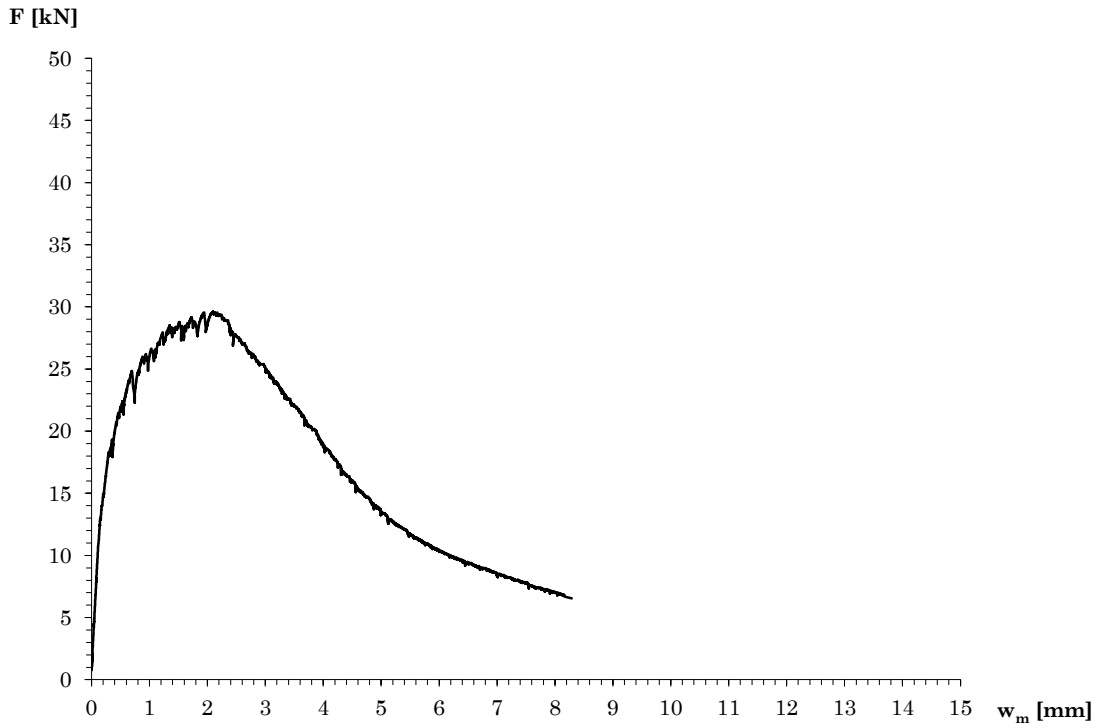
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		Masse	Rohdichte	F_{max}	f_c
			d	h	m	ρ		
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/dm³]	[kN]	[MPa]
KZ-1-DFM2-C19-05_11_2013	10.04.2014	156	99,5	205,4	4,090	2,561	1217,3	-156,6
KZ-2-DFM2-C19-05_11_2013	10.04.2014	156	99,3	205,2	4,085	2,571	1252,5	-161,7
KZ-3-DFM2-C19-05_11_2013	10.04.2014	156	99,3	206,7	4,107	2,566	1556,4	-201,0
Mittelwert	m						1342,1	-173,1
Standardabweichung	s						186,45	24,29
Variationskoeffizient	v						13,89%	14,03%

D.2 Biegezugversuche

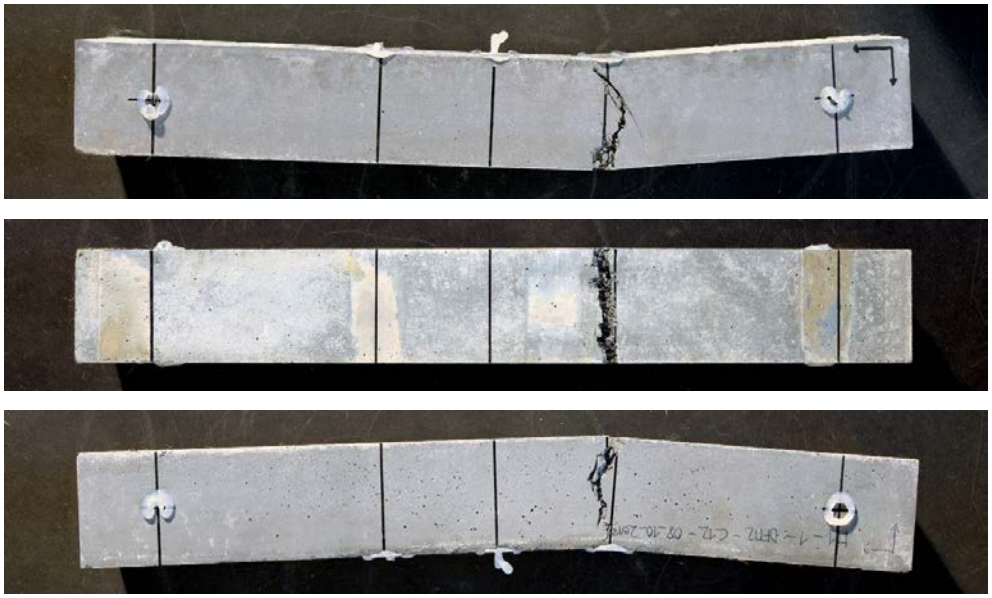
D.2.1 Charge C12

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C12-08_10_2013	10.04.2014	184	75,28	74,24	10,81	11,60	0,11	29,62	31,80	2,10
M1-2-DFM2-C12-08_10_2013	10.04.2014	184	75,43	74,73	13,31	14,17	0,14	28,69	30,54	2,56
M1-3-DFM2-C12-08_10_2013	10.04.2014	184	75,59	75,13	11,95	12,62	0,13	31,93	33,73	2,76
Mittelwert	m					12,80	0,13		32,03	2,47
Standardabweichung	s					1,29	0,01		1,61	0,34
Variationskoeffizient	v					10,10 %	10,41 %		5,02 %	13,75 %

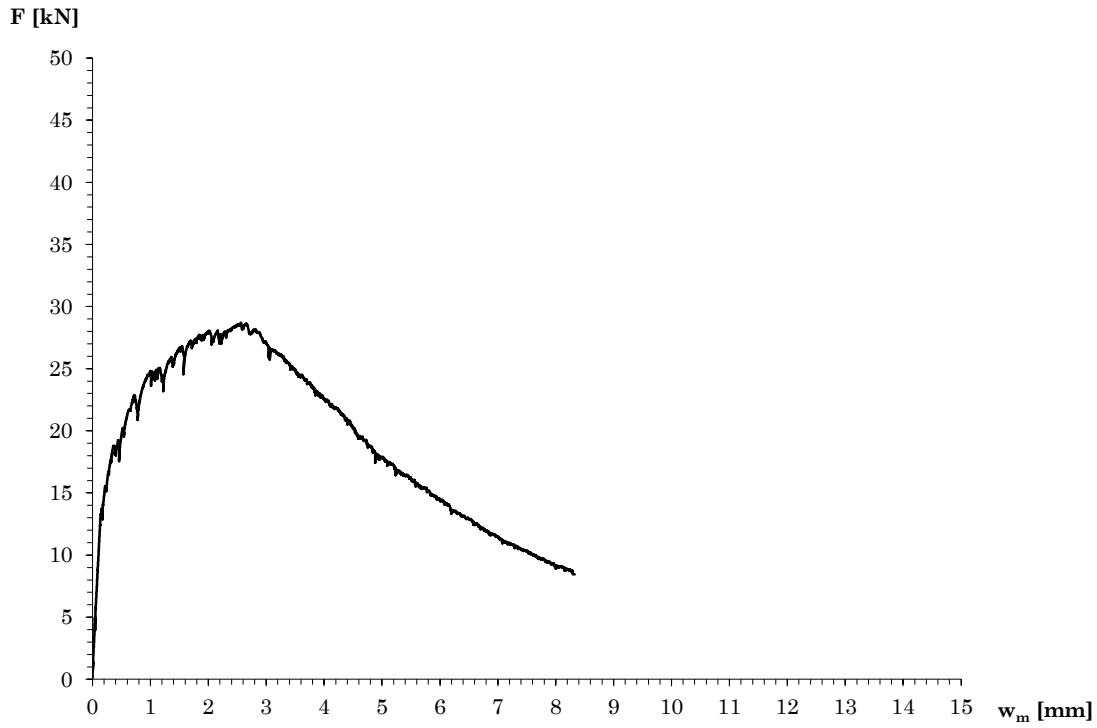


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

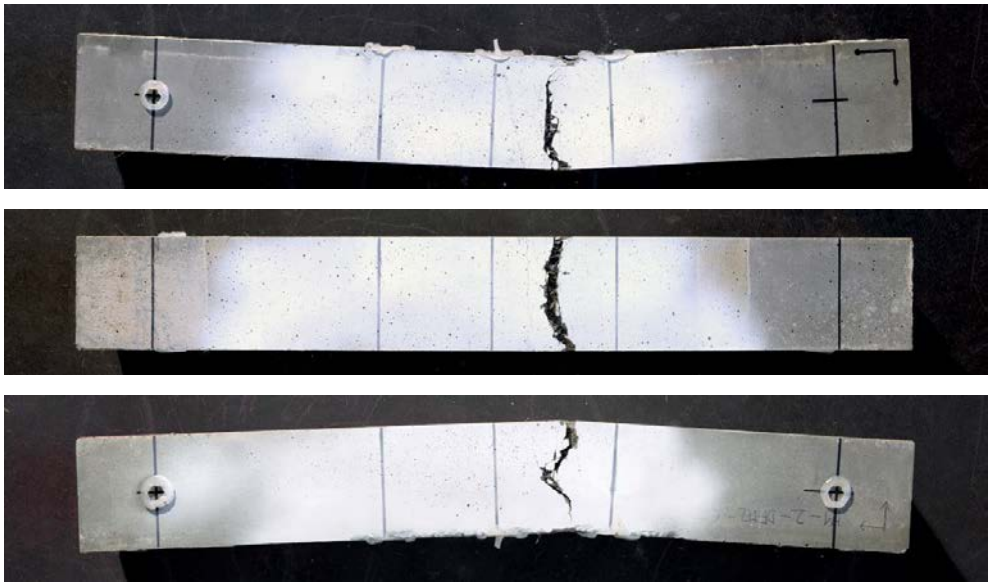


b) Risslokalisierung (x_1 = 86 mm, x_2 = 69 mm, x_3 = 73 mm, x_4 = 77 mm, x_5 = 68 mm)

M1-1-DFM2-C12-08_10_2013

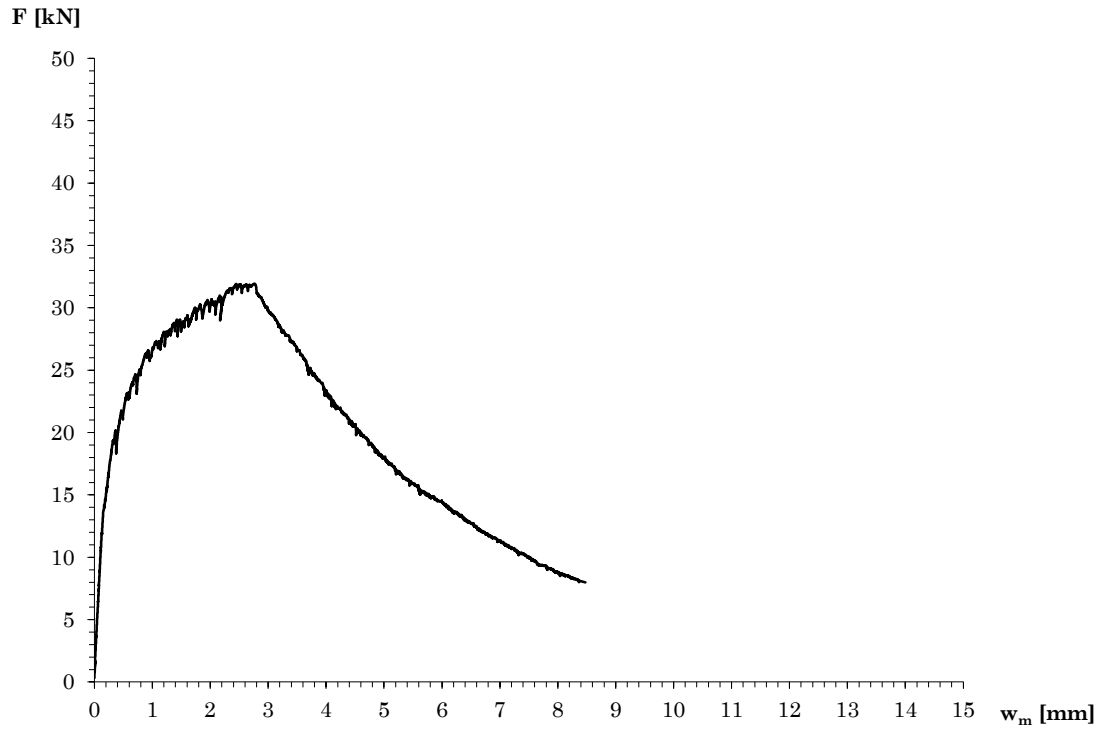


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

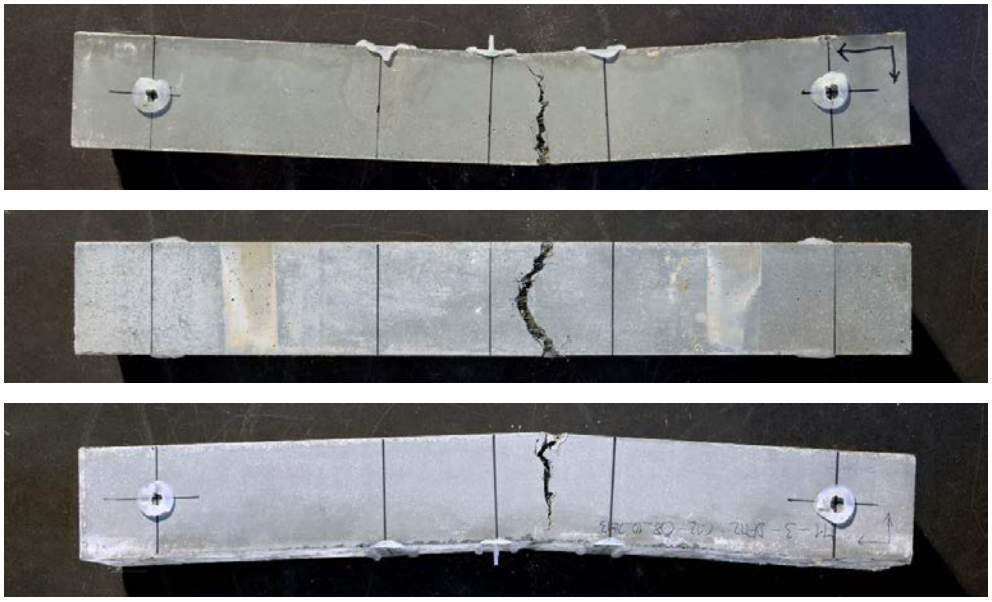


b) Risslokalisierung (x_1 = 35 mm, x_2 = 40 mm, x_3 = 35 mm, x_4 = 46 mm, x_5 = 31 mm)

M1-2-DFM2-C12-08_10_2013



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



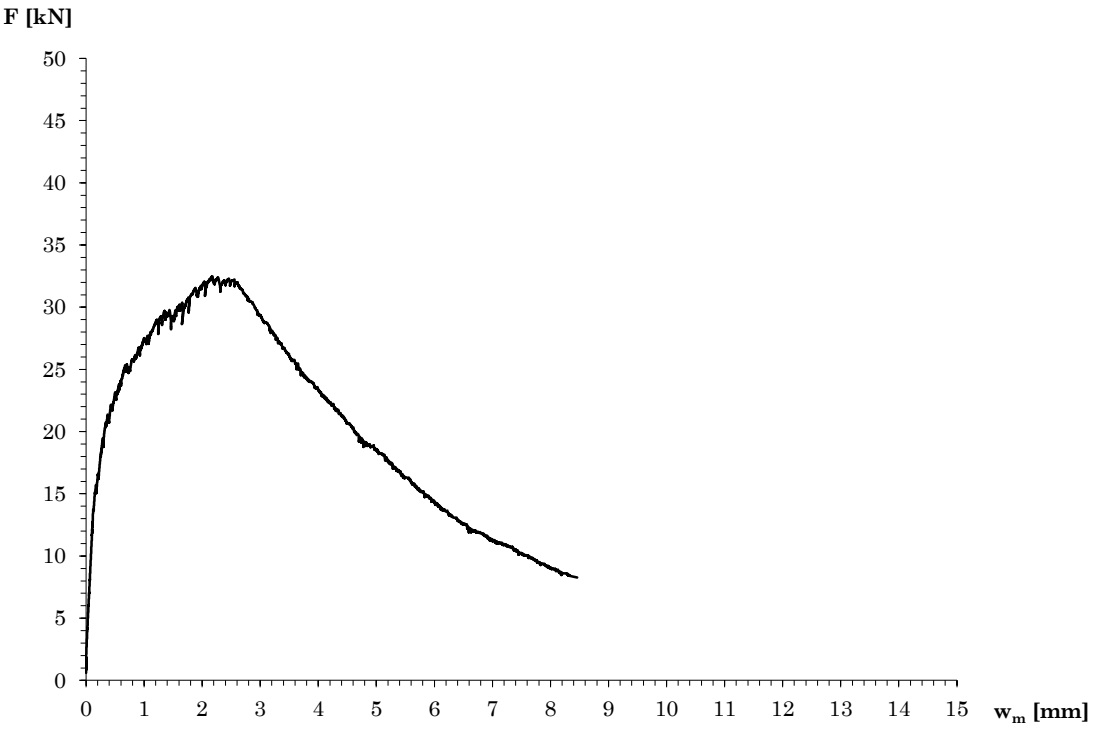
b) Risslokalisierung (x_1 = 33 mm, x_2 = 34 mm, x_3 = 18 mm, x_4 = 35 mm, x_5 = 32 mm)

M1-3-DFM2-C12-08_10_2013

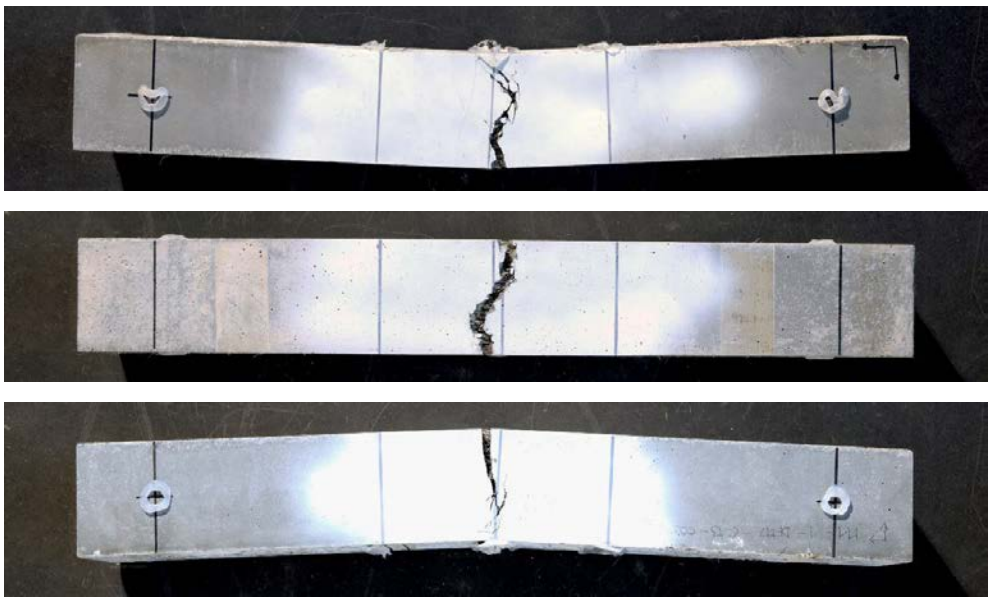
D.2.2 Charge C13

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C13-09_10_2013	10.04.2014	183	75,62	75,90	13,73	14,35	0,12	32,48	33,95	2,17
M1-2-DFM2-C13-09_10_2013	10.04.2014	183	74,84	73,90				31,88	34,58	1,98
M1-3-DFM2-C13-09_10_2013	10.04.2014	183	75,59	75,13	13,05	13,79	0,13	35,36	37,35	2,45
Mittelwert	m					14,07	0,13		35,30	2,20
Standardabweichung	s					0,40	0,00		1,81	0,24
Variationskoeffizient	v					2,82%	3,64%		5,13%	10,86%

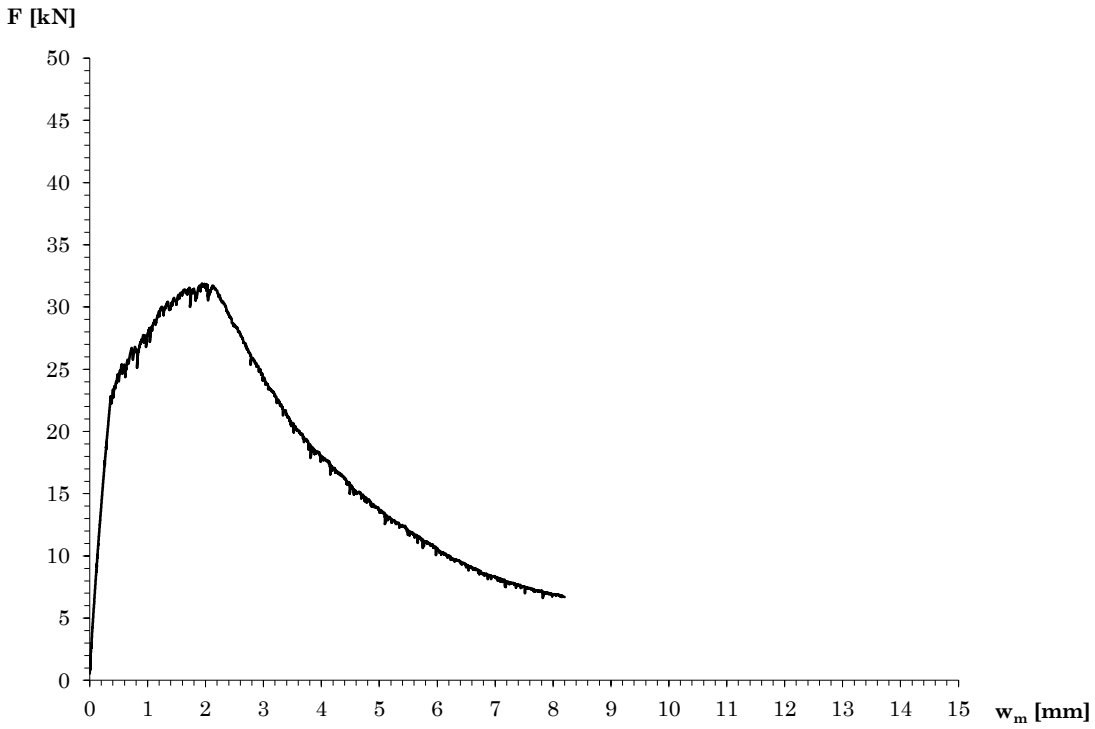


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

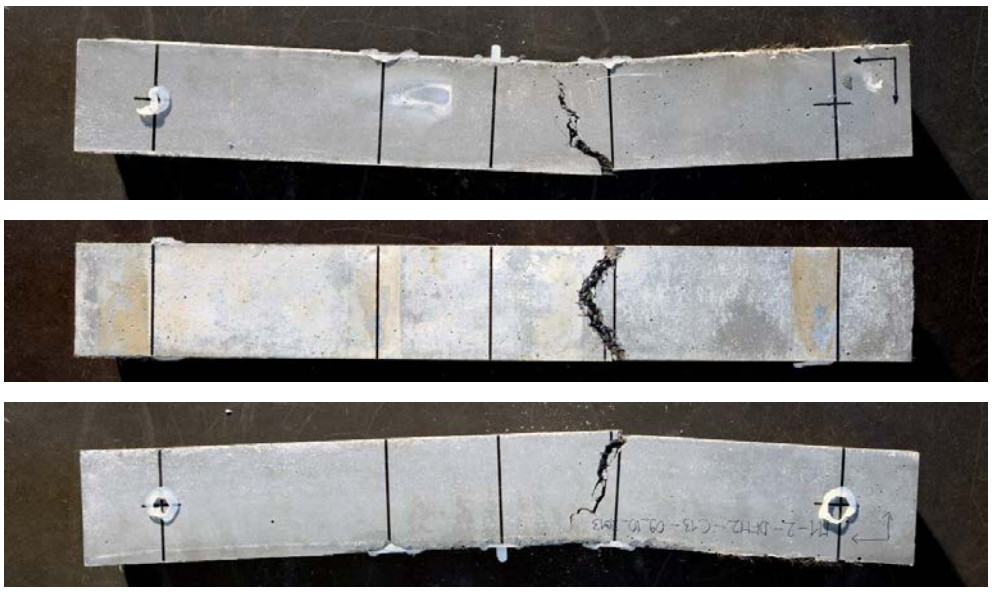


b) Risslokalisierung (x_1 = 8 mm, x_2 = 2 mm, x_3 = 0 mm, x_4 = 6 mm, x_5 = 1 mm)

M1-1-DFM2-C13-09_10_2013

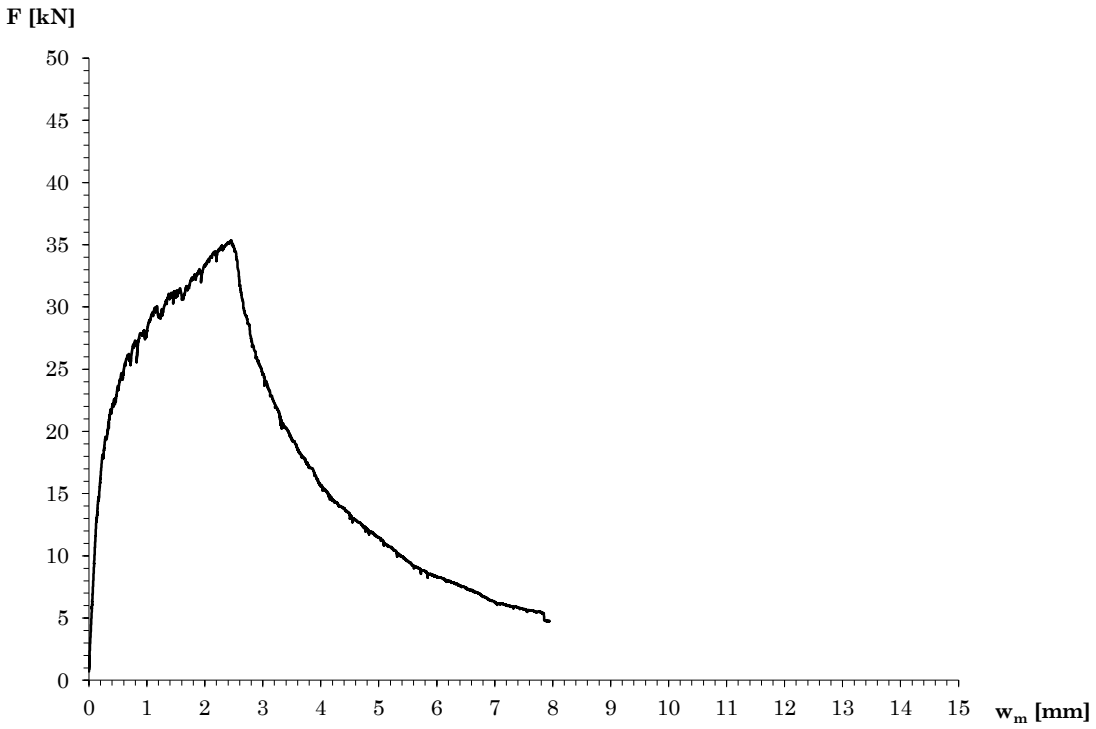


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

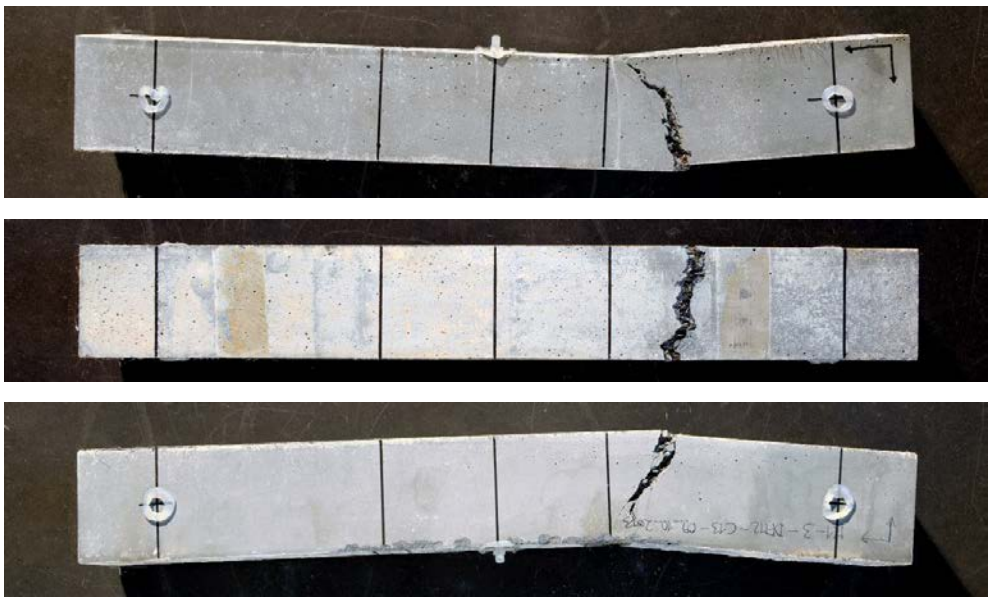


b) Risslokalisierung (x_1 = 51 mm, x_2 = 75 mm, x_3 = 59 mm, x_4 = 81 mm, x_5 = 66 mm)

M1-2-DFM2-C13-09_10_2013



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



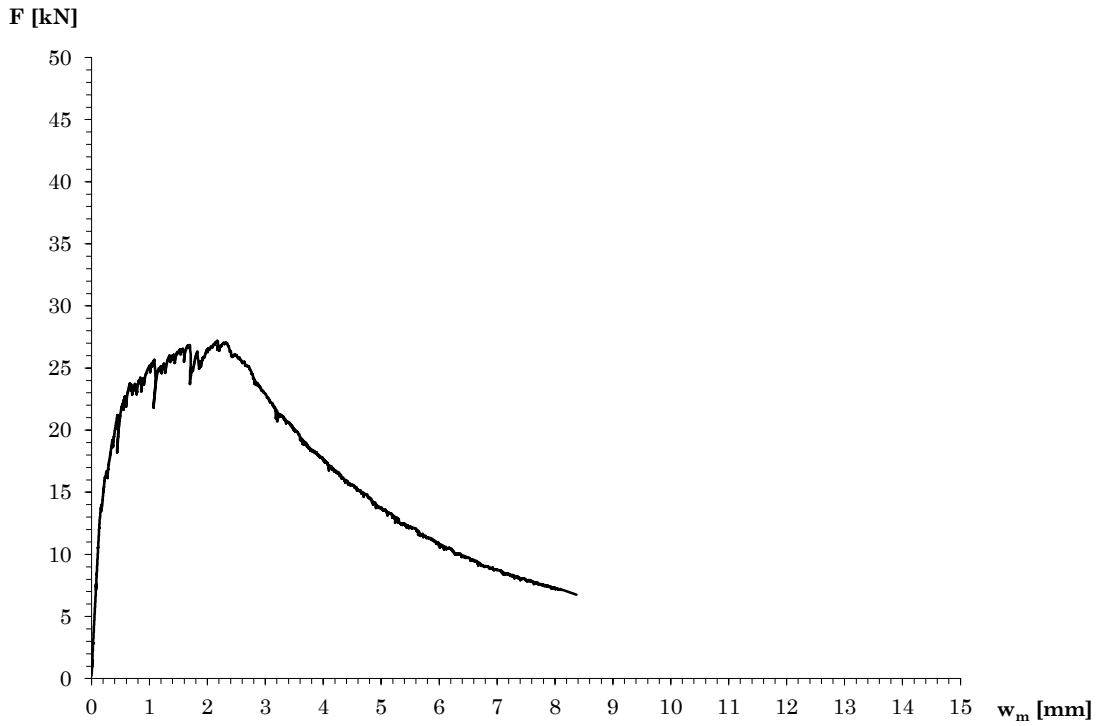
b) Risslokalisierung (x_1 = 113 mm, x_2 = 122 mm, x_3 = 117 mm, x_4 = 112 mm, x_5 = 95 mm)

M1-3-DFM2-C13-09_10_2013

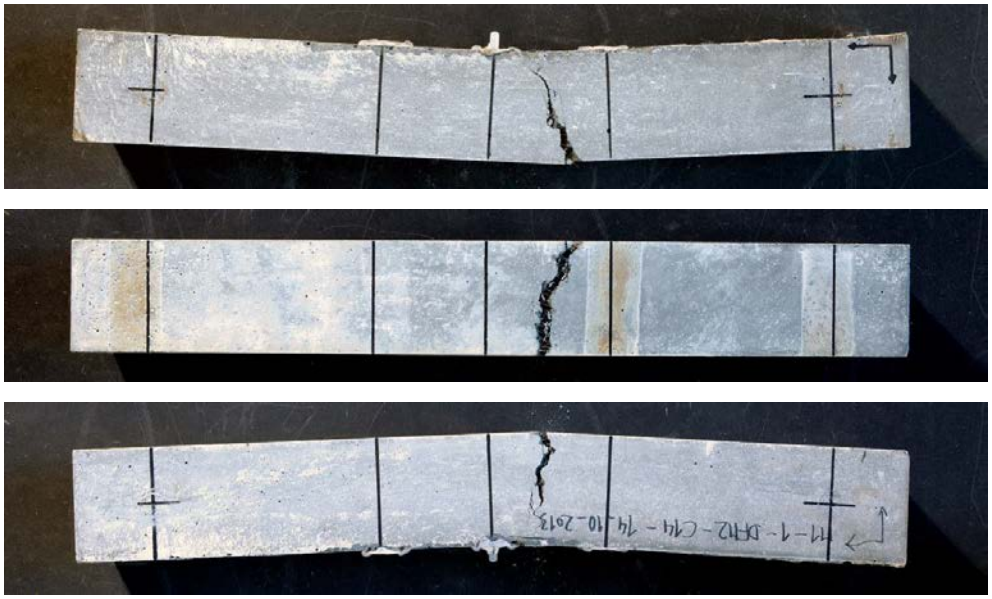
D.2.3 Charge C14

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C14-14_10_2013	11.04.2014	179	75,59	74,75	13,04	13,85	0,14	27,21	28,89	2,17
M1-2-DFM2-C14-14_10_2013	10.04.2014	178	76,13	73,64	11,96	12,80	0,13	27,91	29,87	2,34
M1-3-DFM2-C14-14_10_2013	11.04.2014	179	74,86	74,67	13,42	14,40	0,14	30,37	32,60	2,40
Mittelwert	m					13,68	0,14		30,45	2,30
Standardabweichung	s					0,81	0,01		1,92	0,12
Variationskoeffizient	v					5,93 %	4,74 %		6,30 %	5,04 %

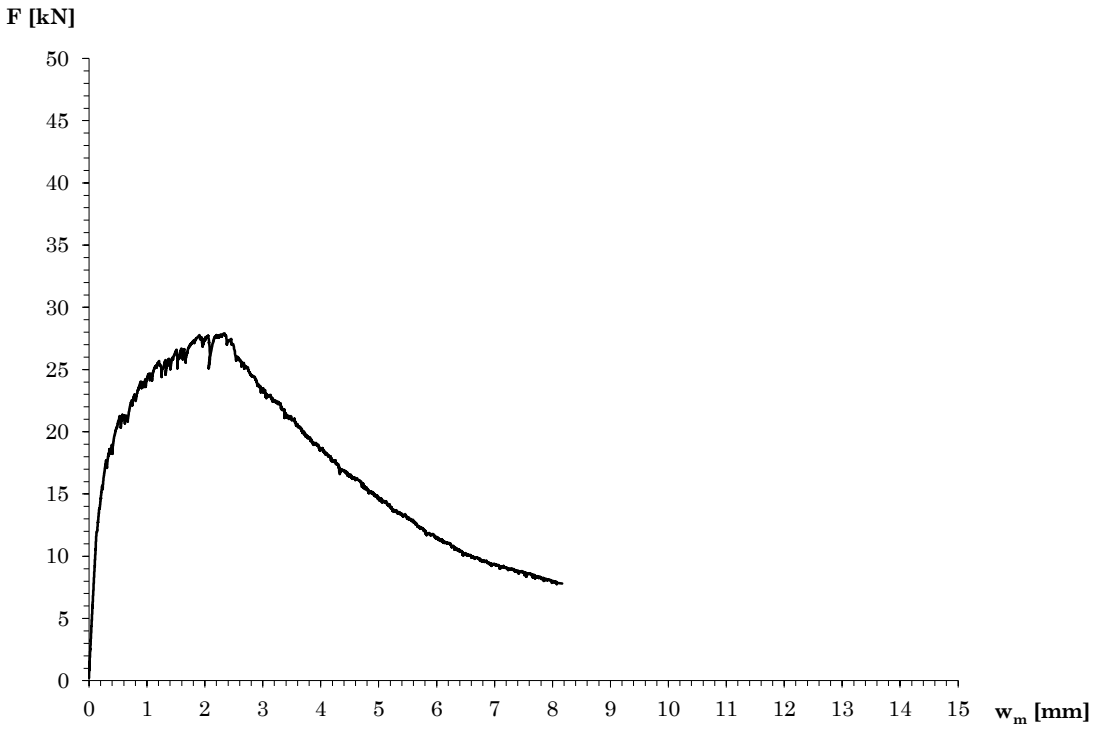


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



b) Risslokalisierung (x_1 = 39 mm, x_2 = 52 mm, x_3 = 36 mm, x_4 = 33 mm, x_5 = 30 mm)

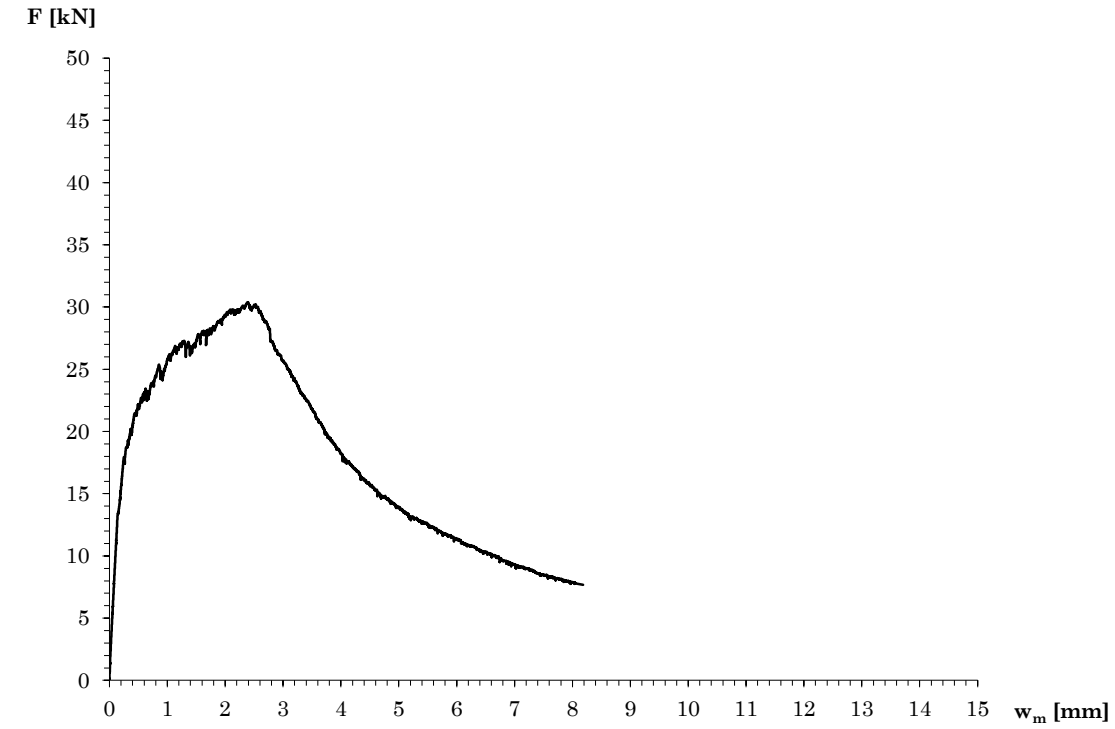
M1-1-DFM2-C14-14_10_2013



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

b) Risslokalisierung (x_1 = 42 mm, x_2 = 40 mm, x_3 = 55 mm, x_4 = 46 mm, x_5 = 46 mm)

M1-2-DFM2-C14-14_10_2013



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

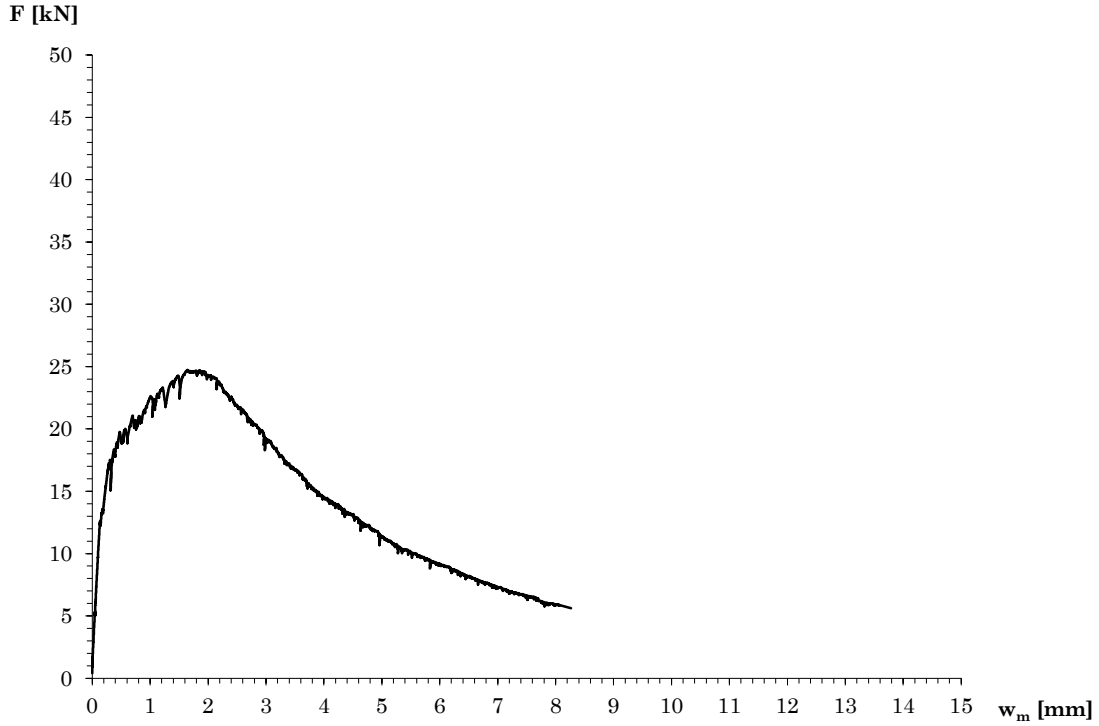
b) Risslokalisierung (x_1 = 70 mm, x_2 = 63 mm, x_3 = 68 mm, x_4 = 49 mm, x_5 = 67 mm)

M1-3-DFM2-C14-14_10_2013

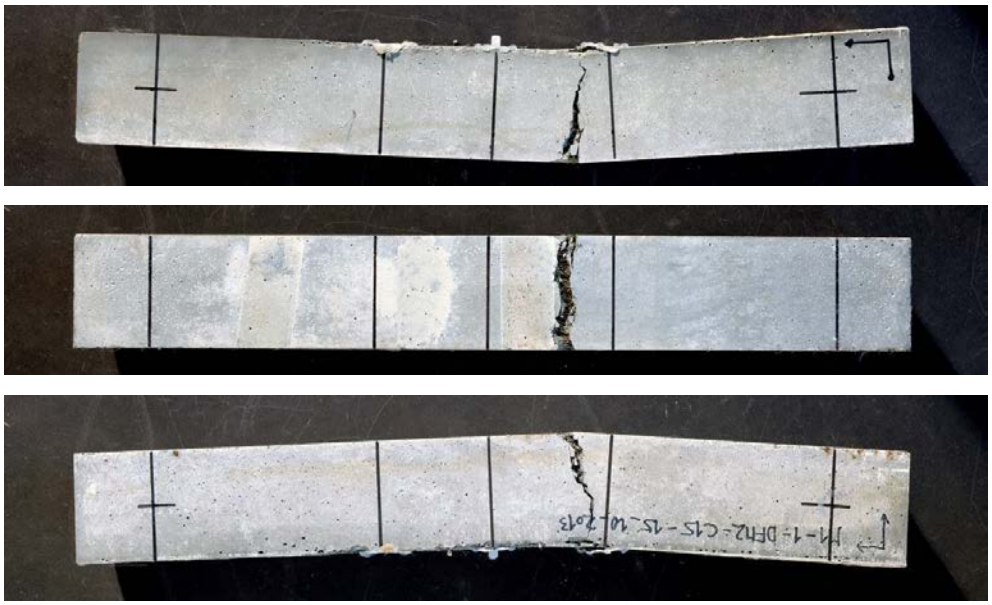
D.2.4 Charge C15

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C15-15_10_2013	11.04.2014	178	74,94	74,93	12,56	13,42	0,13	24,74	26,44	1,64
M1-2-DFM2-C15-15_10_2013	11.04.2014	178	76,08	73,44	13,01	13,97	0,14	24,53	26,34	2,16
M1-3-DFM2-C15-15_10_2013	10.04.2014	177	75,32	74,37	11,61	12,44	0,12	30,21	32,36	2,88
Mittelwert	m					13,28	0,13		28,38	2,23
Standardabweichung	s					0,78	0,01		3,45	0,62
Variationskoeffizient	v					5,87 %	7,98 %		12,15 %	27,94 %

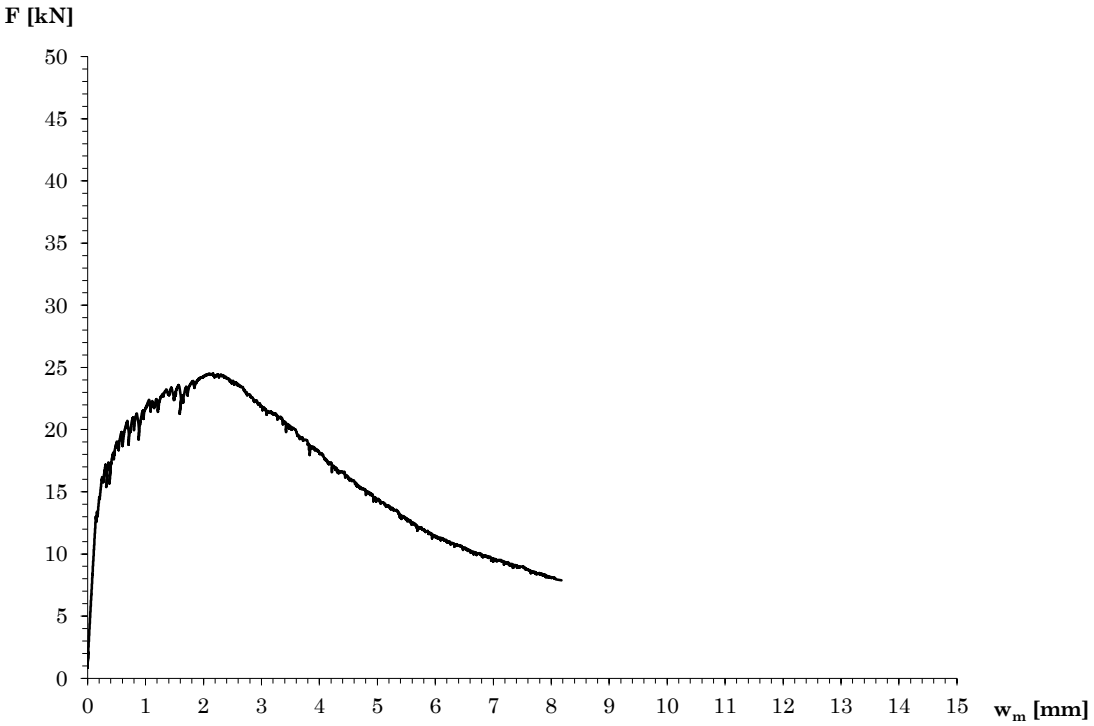


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

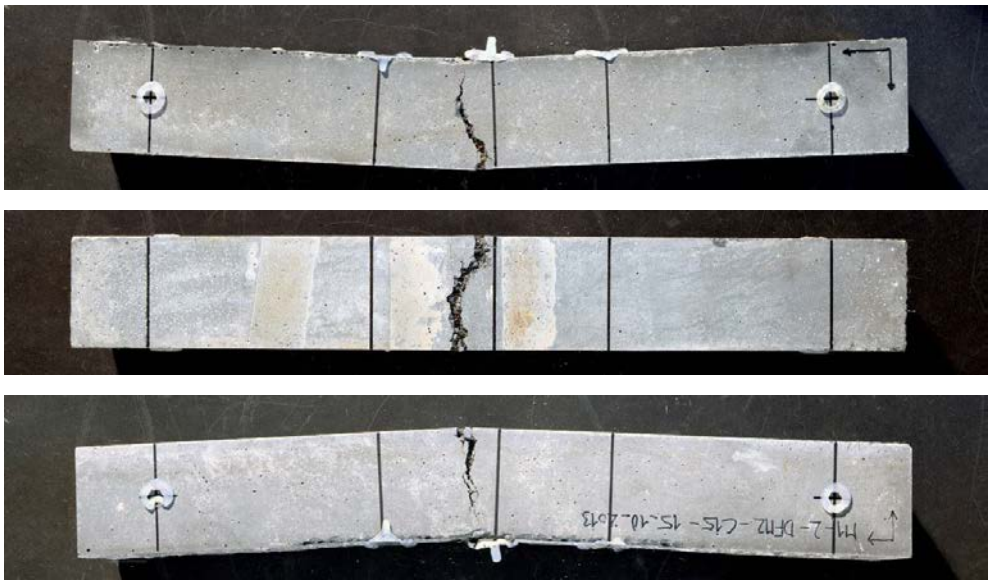


b) Risslokalisierung (x_1 = 52 mm, x_2 = 47 mm, x_3 = 48 mm, x_4 = 50 mm, x_5 = 62 mm)

M1-1-DFM2-C15-15_10_2013

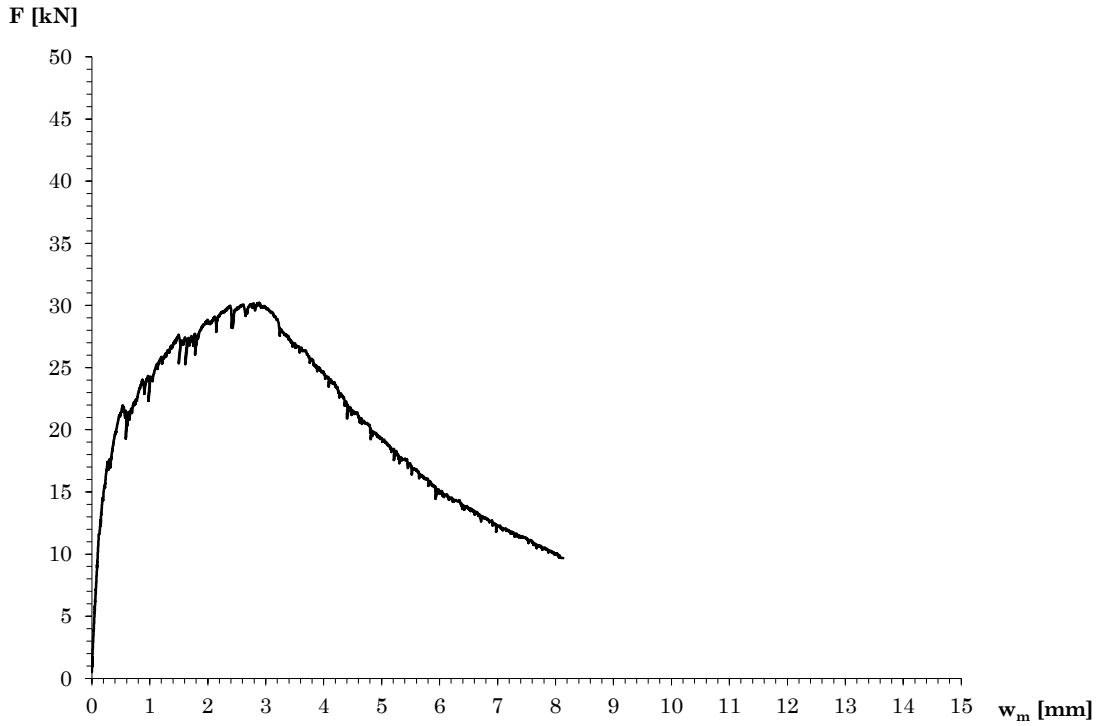


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

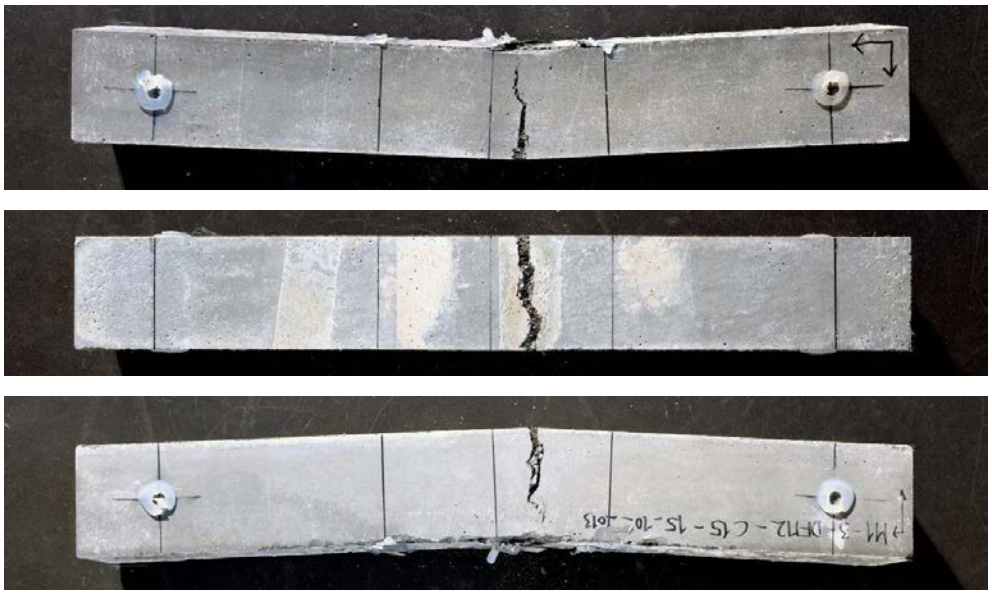


b) Risslokalisierung (x_1 = 17 mm, x_2 = 7 mm, x_3 = 22 mm, x_4 = 18 mm, x_5 = 18 mm)

M1-2-DFM2-C15-15_10_2013



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



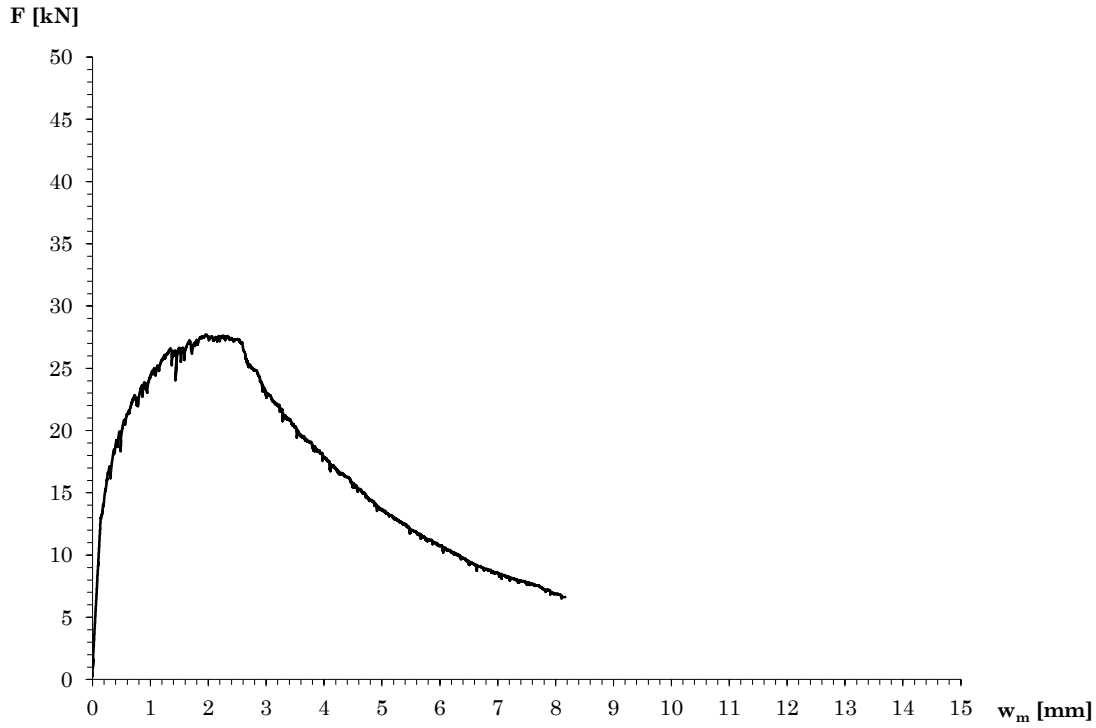
b) Risslokalisierung (x_1 = 21 mm, x_2 = 17 mm, x_3 = 18 mm, x_4 = 24 mm, x_5 = 24 mm)

M1-3-DFM2-C15-15_10_2013

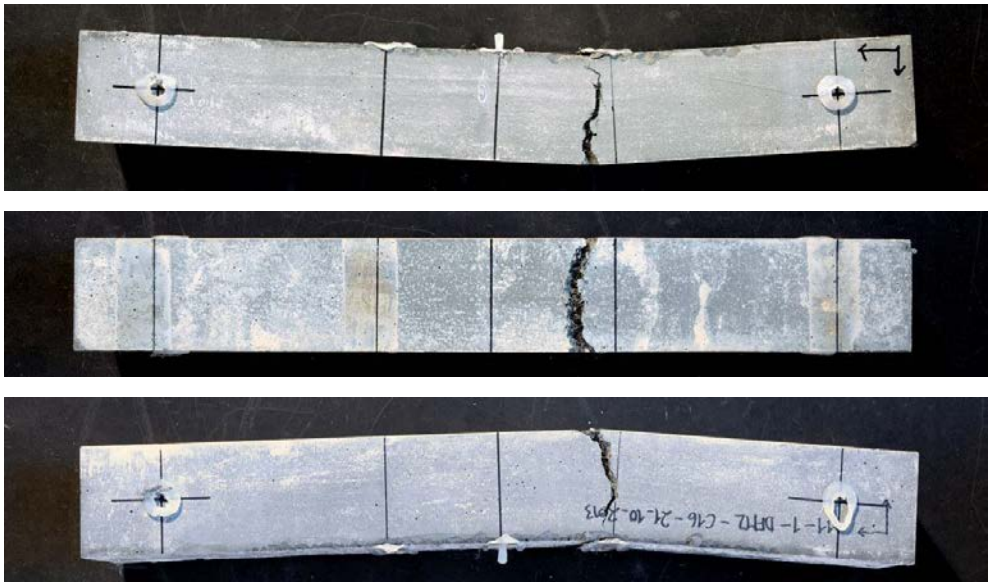
D.2.5 Charge C16

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C16-21_10_2013	09.04.2014	170	75,38	73,54	13,01	14,09	0,14	27,73	30,01	1,96
M1-2-DFM2-C16-21_10_2013	10.04.2014	171	74,99	75,97	13,68	14,41	0,14	34,48	36,32	2,27
M1-3-DFM2-C16-21_10_2013	10.04.2014	171	76,18	76,00	12,22	12,66	0,12	27,57	28,57	1,54
Mittelwert	m					13,72	0,13		31,63	1,92
Standardabweichung	s					0,93	0,01		4,12	0,36
Variationskoeffizient	v					6,76 %	11,03 %		13,02 %	18,96 %

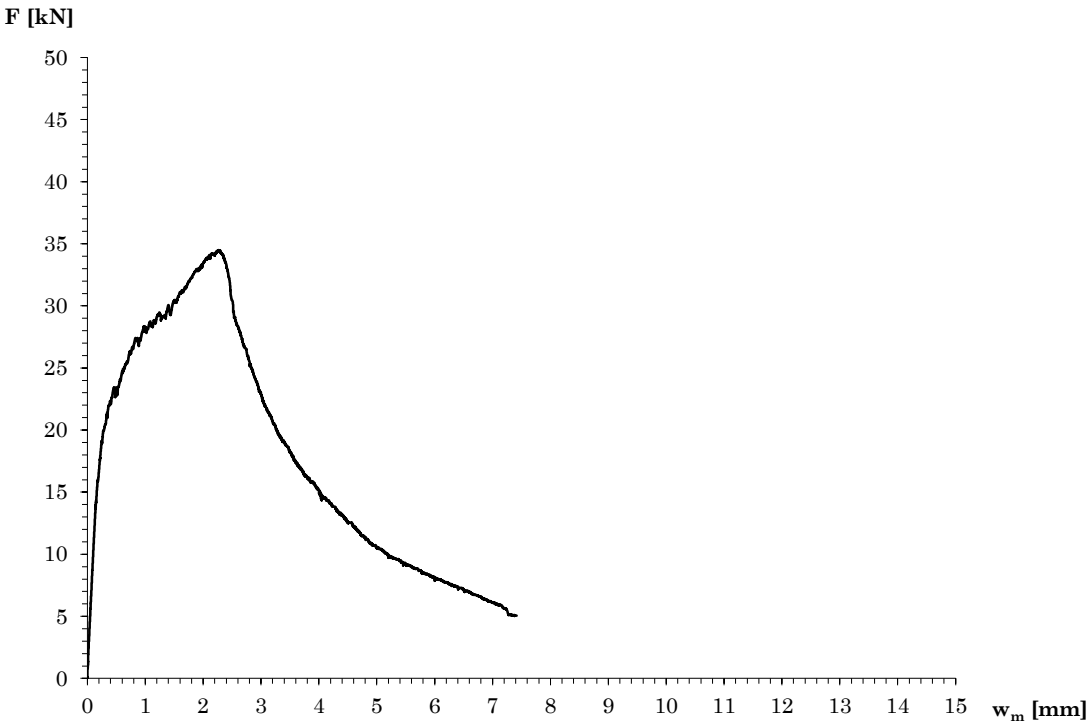


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

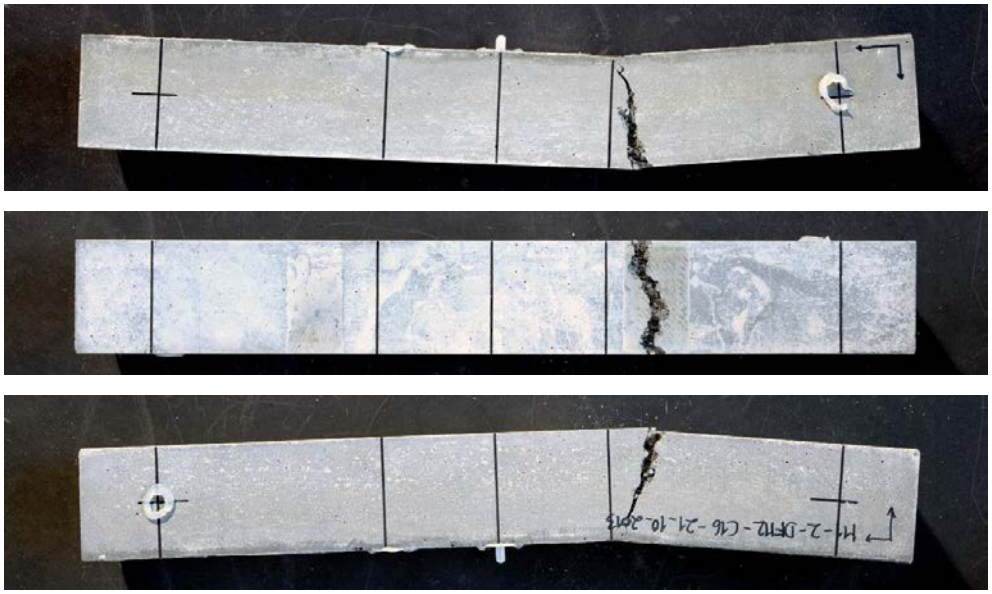


b) Risslokalisierung (x_1 = 65 mm, x_2 = 61 mm, x_3 = 50 mm, x_4 = 52 mm, x_5 = 74 mm)

M1-1-DFM2-C16-21_10_2013

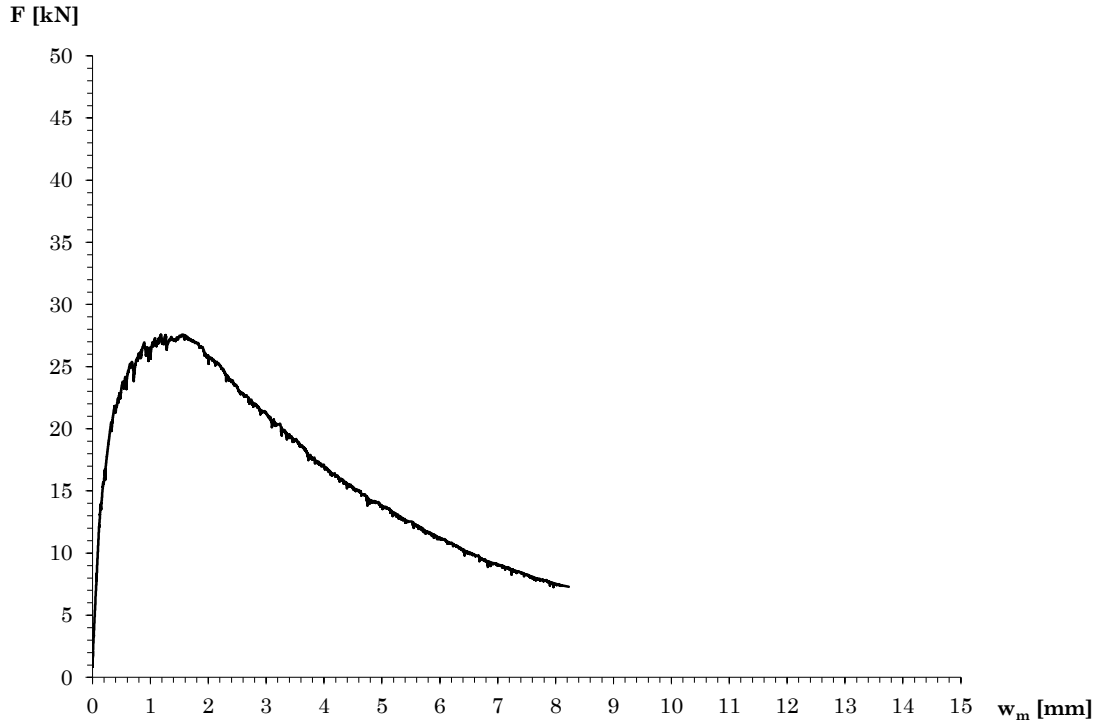


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



b) Risslokalisierung (x_1 = 82 mm, x_2 = 92 mm, x_3 = 104 mm, x_4 = 103 mm, x_5 = 96 mm)

M1-2-DFM2-C16-21_10_2013



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

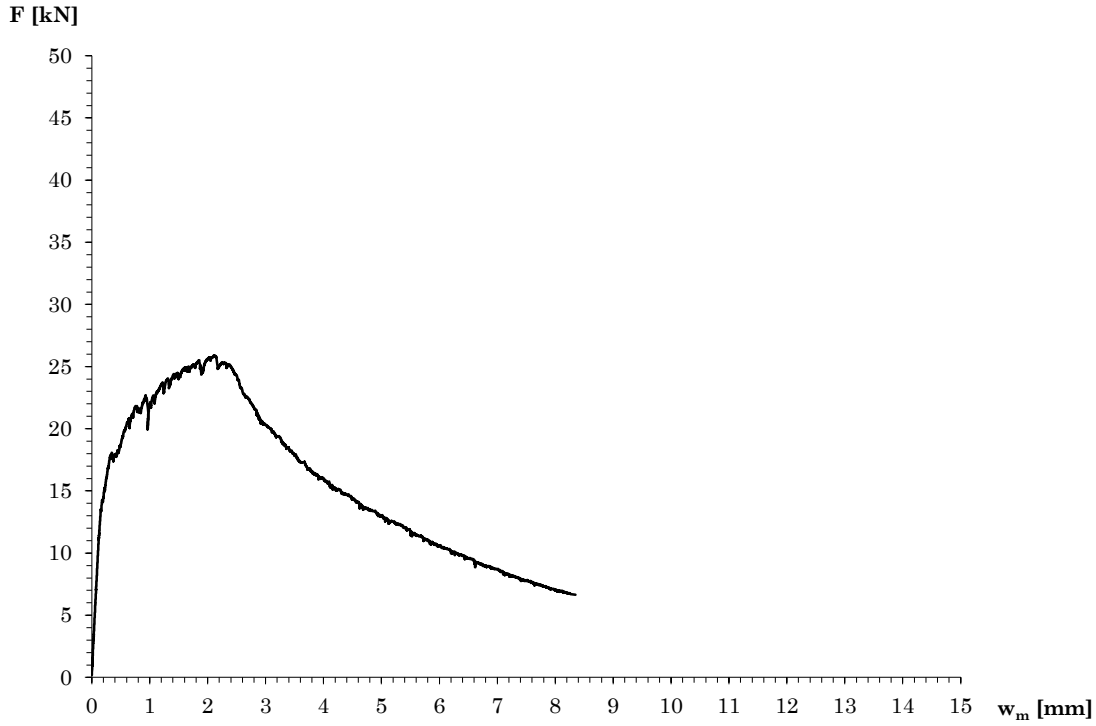
b) Risslokalisierung (x_1 = 23 mm, x_2 = 24 mm, x_3 = 20 mm, x_4 = 42 mm, x_5 = 34 mm)

M1-3-DFM2-C16-21_10_2013

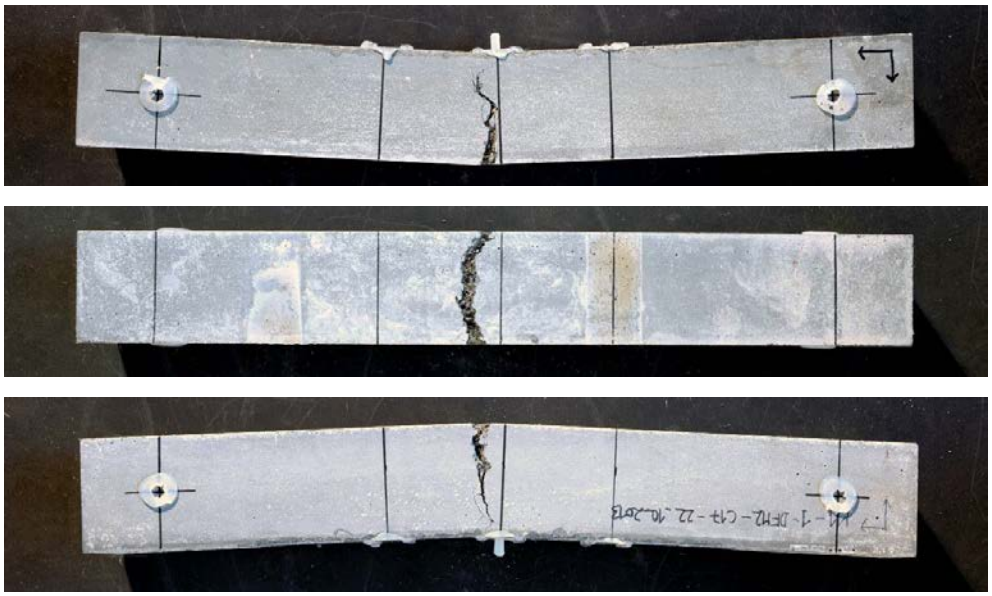
D.2.6 Charge C17

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C17-22_10_2013	09.04.2014	169	75,38	74,55	11,14	11,89	0,12	25,88	27,64	2,11
M1-2-DFM2-C17-22_10_2013	09.04.2014	169	75,68	74,40	13,03	13,89	0,13	29,95	31,92	1,93
M1-3-DFM2-C17-22_10_2013	09.04.2014	169	75,10	75,52	13,52	14,30	0,13	31,35	33,17	2,48
Mittelwert	m					13,36	0,13		30,91	2,17
Standardabweichung	s					1,29	0,01		2,90	0,28
Variationskoeffizient	v					9,65 %	6,95 %		9,38 %	12,96 %

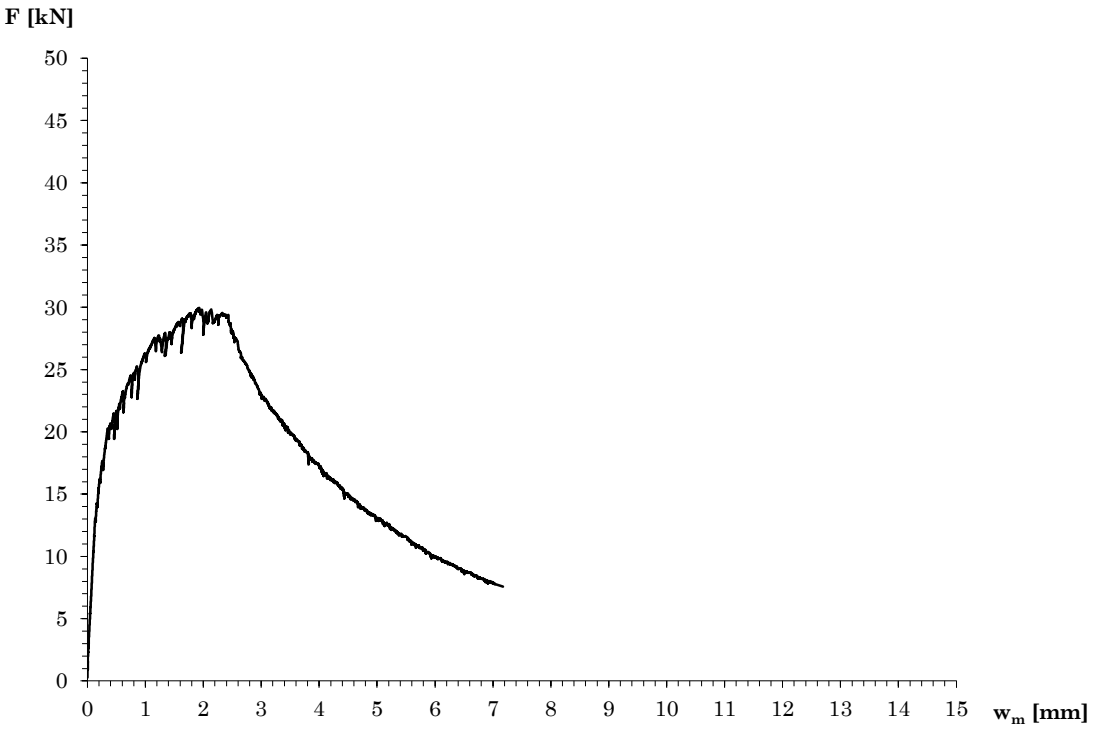


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

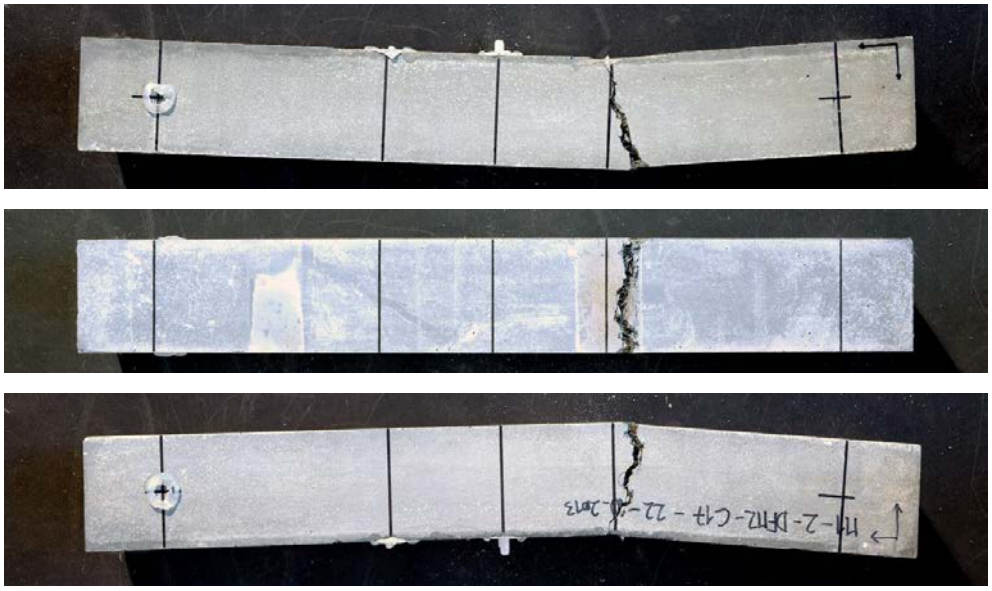


b) Risslokalisierung (x_1 = 4 mm, x_2 = 6 mm, x_3 = 18 mm, x_4 = 10 mm, x_5 = 14 mm)

M1-1-DFM2-C17-22_10_2013

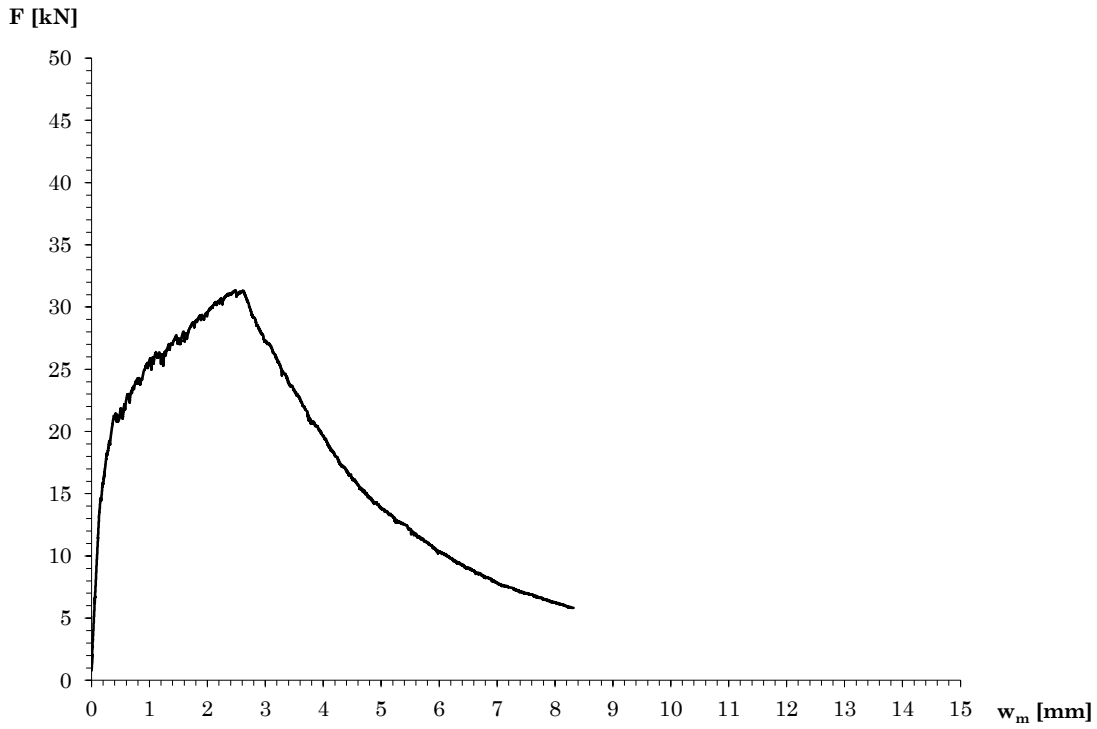


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

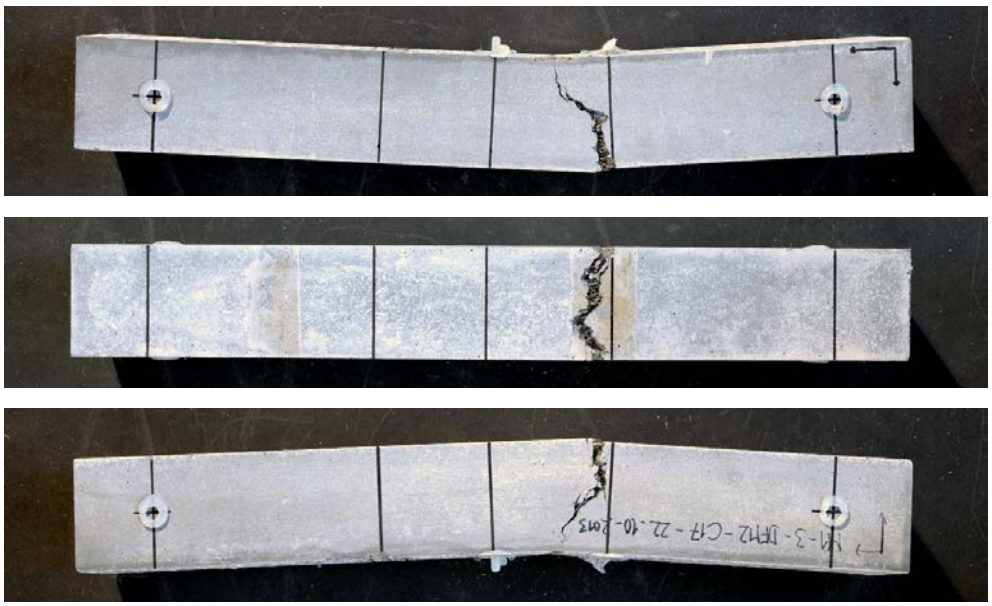


b) Risslokalisierung (x_1 = 83 mm, x_2 = 91 mm, x_3 = 81 mm, x_4 = 82 mm, x_5 = 83 mm)

M1-2-DFM2-C17-22_10_2013



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



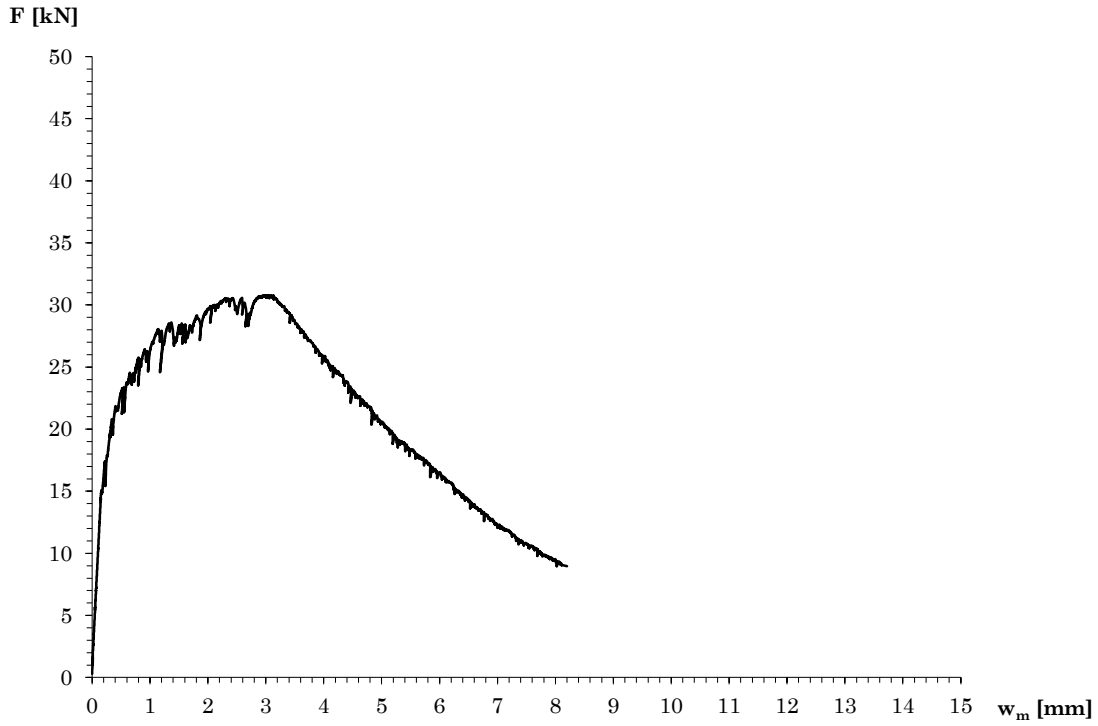
b) Risslokalisierung (x_1 = 70 mm, x_2 = 75 mm, x_3 = 68 mm, x_4 = 70 mm, x_5 = 72 mm)

M1-3-DFM2-C17-22_10_2013

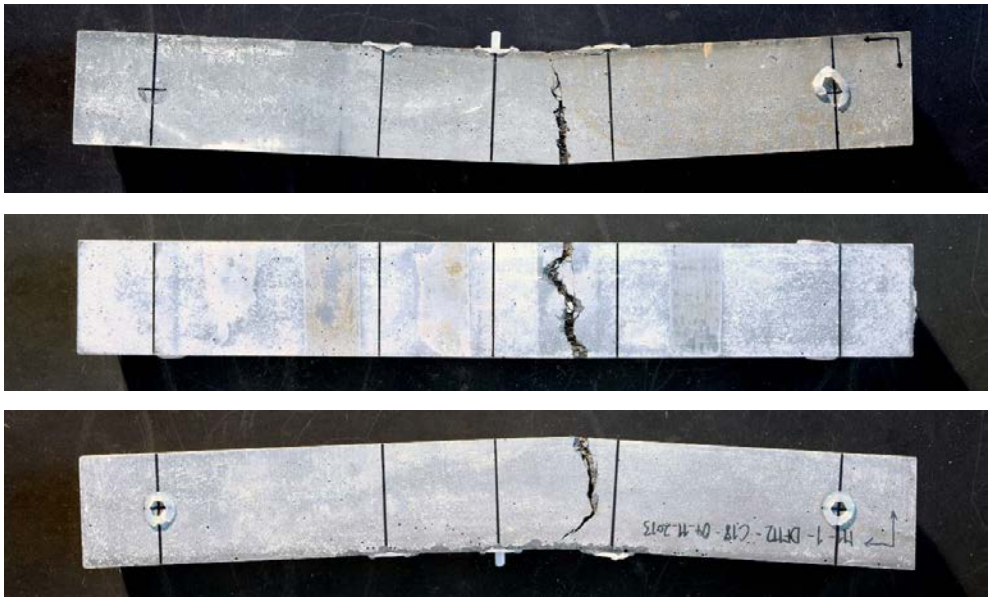
D.2.7 Charge C18

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C18-04_11_2013	09.04.2014	156	75,58	74,53	14,82	15,78	0,15	30,79	32,79	2,97
M1-2-DFM2-C18-04_11_2013	09.04.2014	156	74,36	74,93	14,56	15,68	0,15	29,51	31,78	1,48
M1-3-DFM2-C18-04_11_2013	09.04.2014	156	76,57	74,82	13,82	14,47	0,14	30,34	31,77	2,01
Mittelwert	m					15,31	0,15		32,11	2,16
Standardabweichung	s					0,73	0,01		0,59	0,75
Variationskoeffizient	v					4,77 %	4,97 %		1,82 %	34,98 %

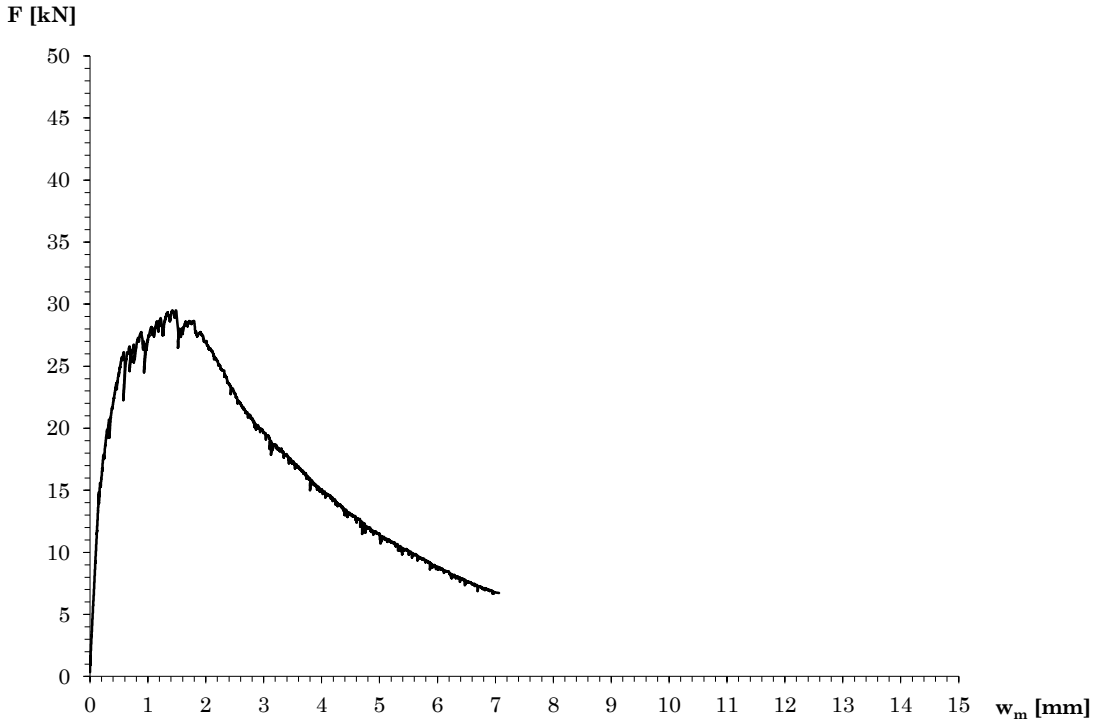


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

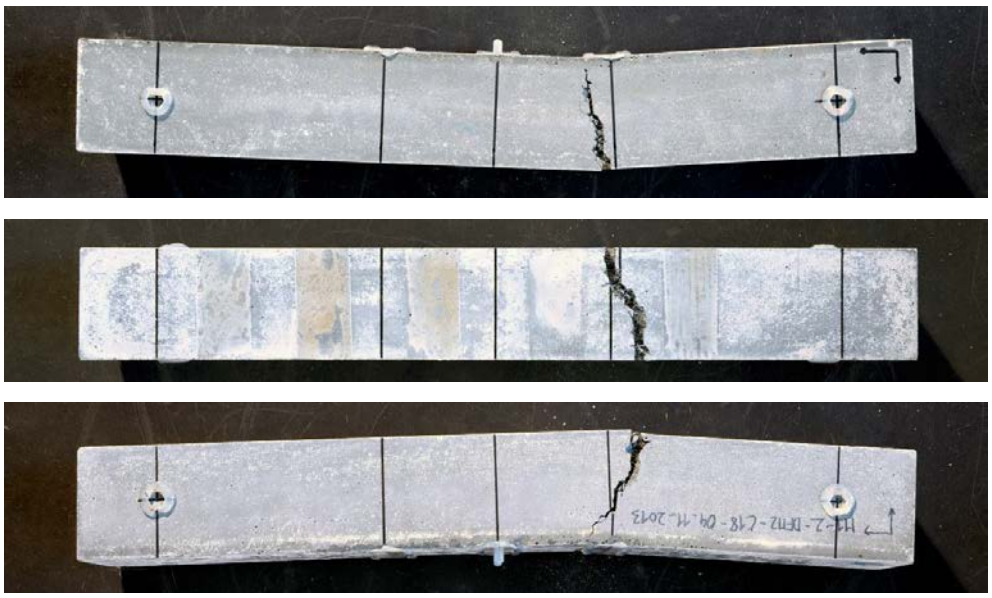


b) Risslokalisierung (x_1 = 40 mm, x_2 = 46 mm, x_3 = 47 mm, x_4 = 54 mm, x_5 = 61 mm)

M1-1-DFM2-C18-04_11_2013

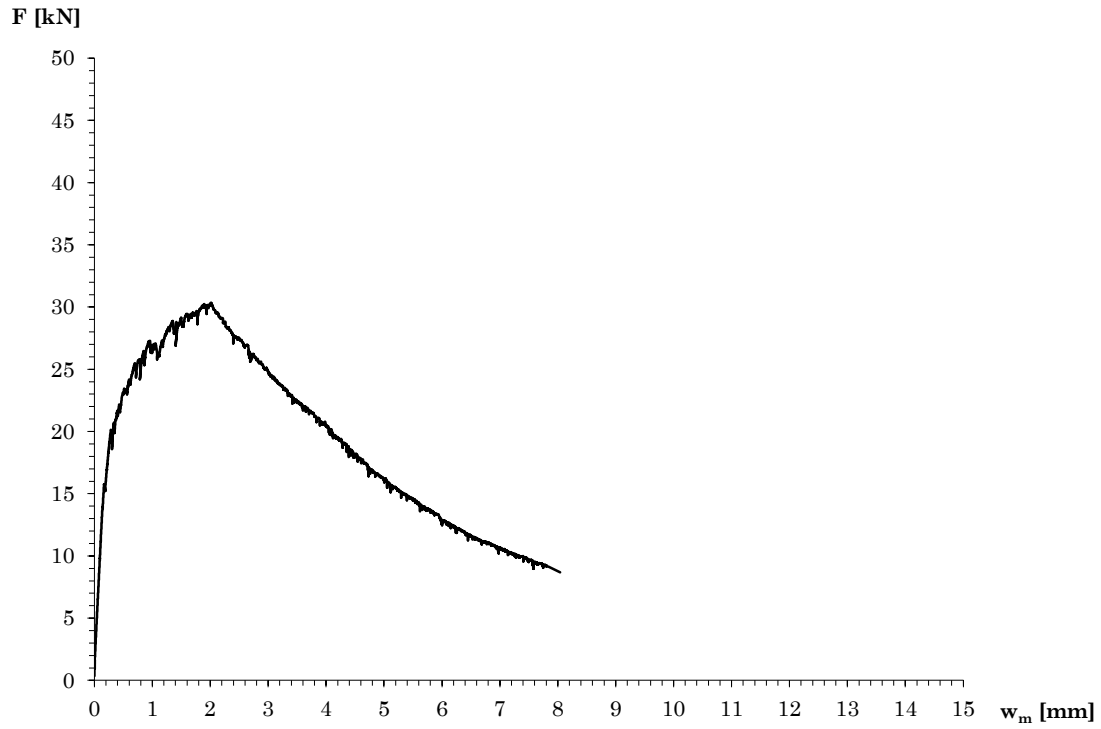


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

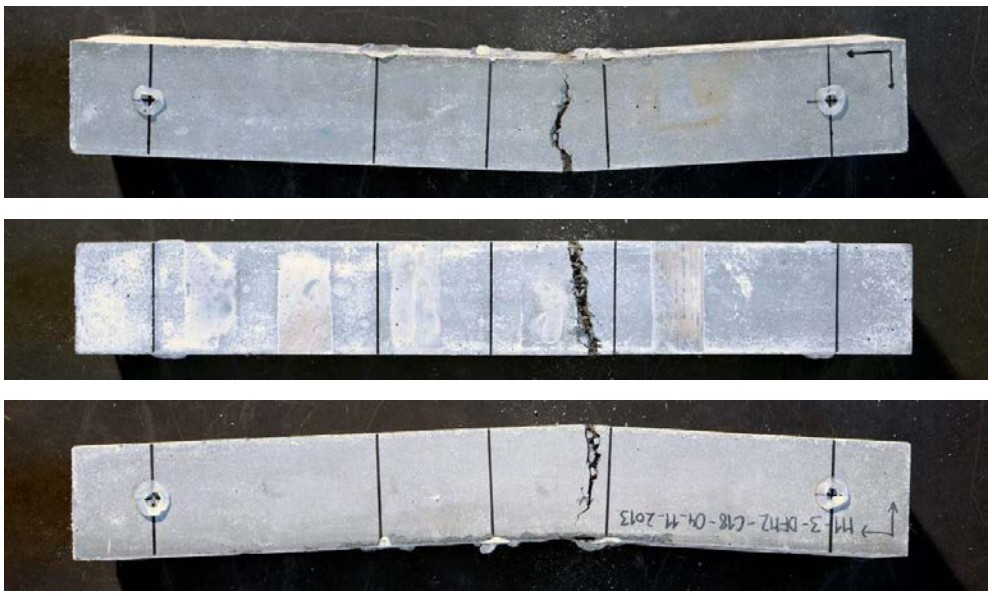


b) Risslokalisierung (x_1 = 63 mm, x_2 = 73 mm, x_3 = 85 mm, x_4 = 92 mm, x_5 = 79 mm)

M1-2-DFM2-C18-04_11_2013



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



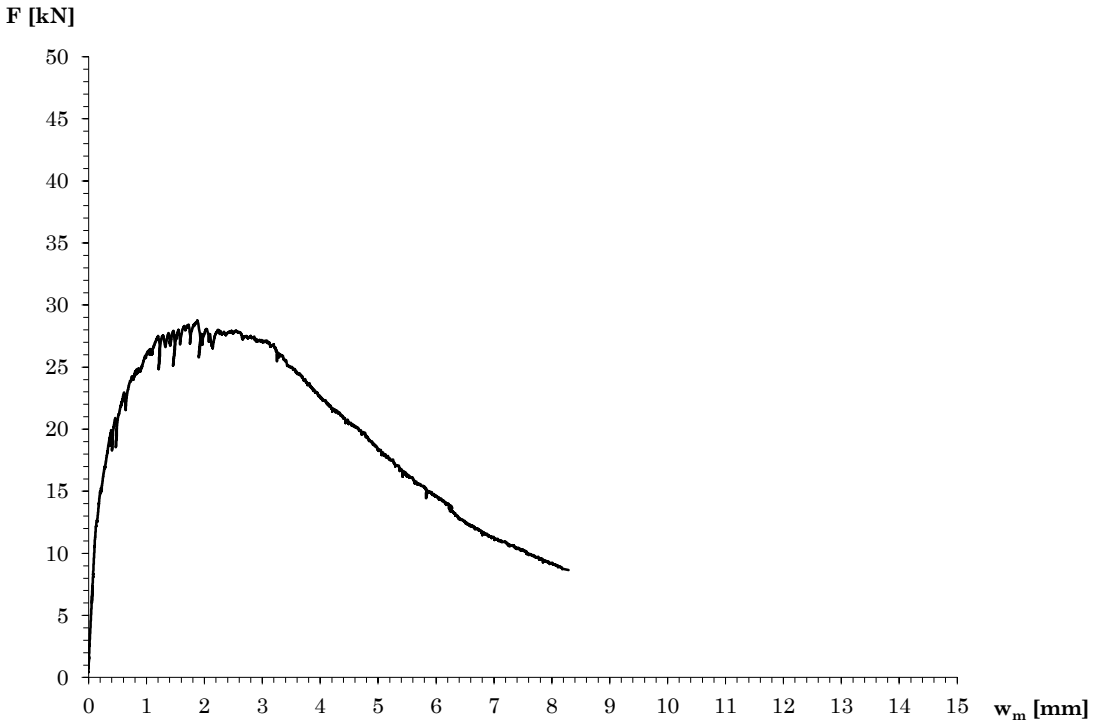
b) Risslokalisierung (x_1 = 45 mm, x_2 = 51 mm, x_3 = 56 mm, x_4 = 64 mm, x_5 = 65 mm)

M1-3-DFM2-C18-04_11_2013

D.2.8 Charge C19

Weggeregelte Biegezugversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,2 mm/min)

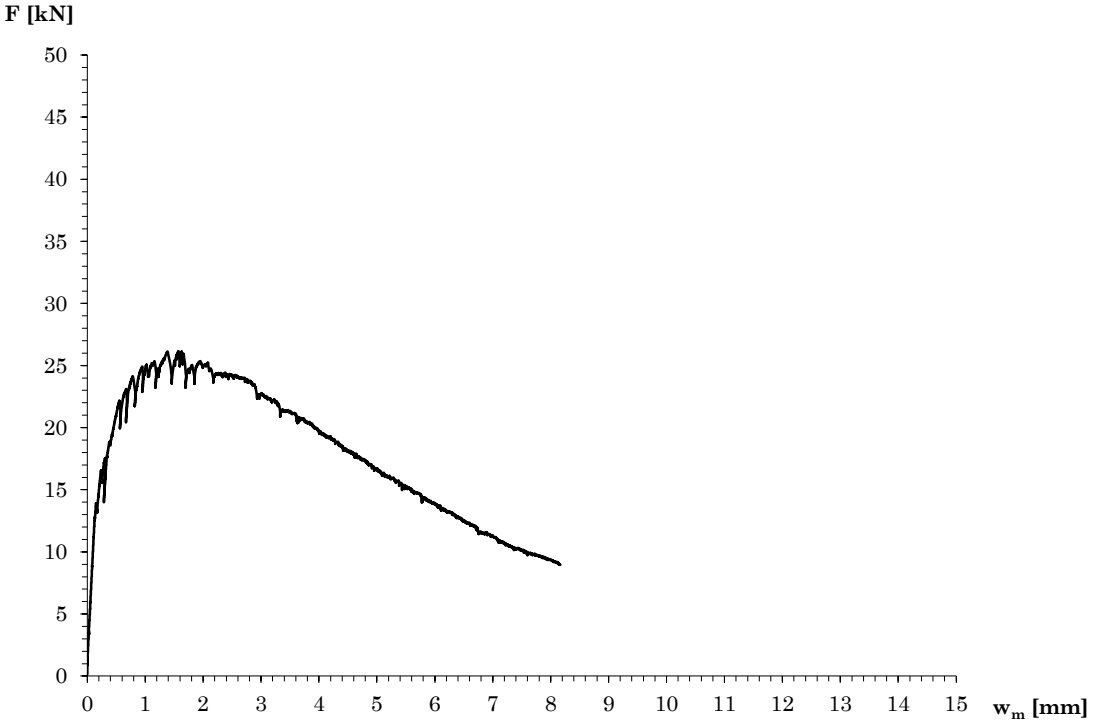
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen		$F_{ctfl,el}$	$f_{ctfl,el}$	$w_m(f_{ctfl,el})$	F_{max}	f_{ctfl}	$w_m(f_{ctfl})$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]
M1-1-DFM2-C19-05_11_2013	09.04.2014	155	75,44	74,80	11,34	12,05	0,11	28,74	30,56	1,88
M1-2-DFM2-C19-05_11_2013	09.04.2014	155	75,06	75,04	12,75	13,58	0,13	26,13	27,83	1,38
M1-3-DFM2-C19-05_11_2013	08.04.2014	154	76,35	74,52	11,67	12,31	0,12	27,82	29,34	2,58
Mittelwert	m					12,65	0,12		29,24	1,95
Standardabweichung	s					0,82	0,01		1,36	0,60
Variationskoeffizient	v					6,46 %	6,46 %		4,66 %	30,87 %



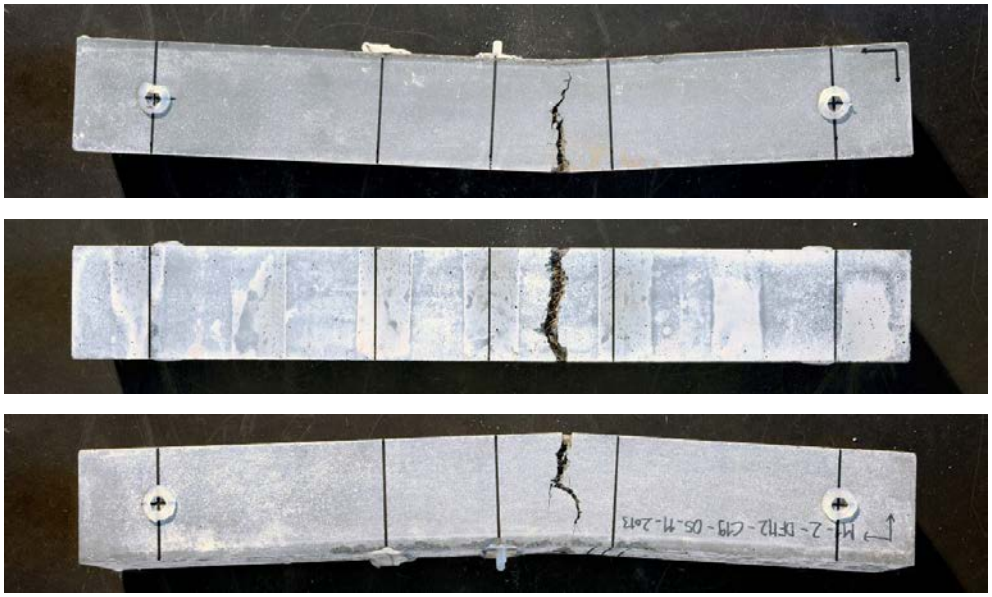
a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

b) Risslokalisierung (x_1 = 15 mm, x_2 = 20 mm, x_3 = 13 mm, x_4 = 12 mm, x_5 = 10 mm)

M1-1-DFM2-C19-05_11_2013

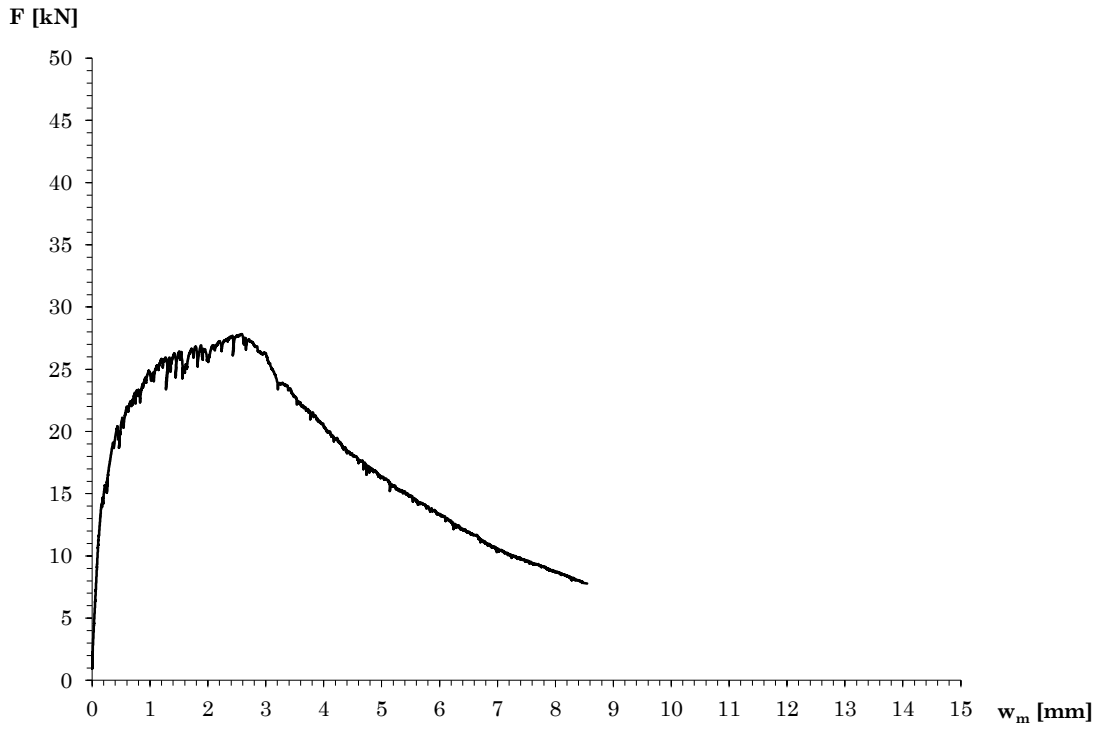


a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve

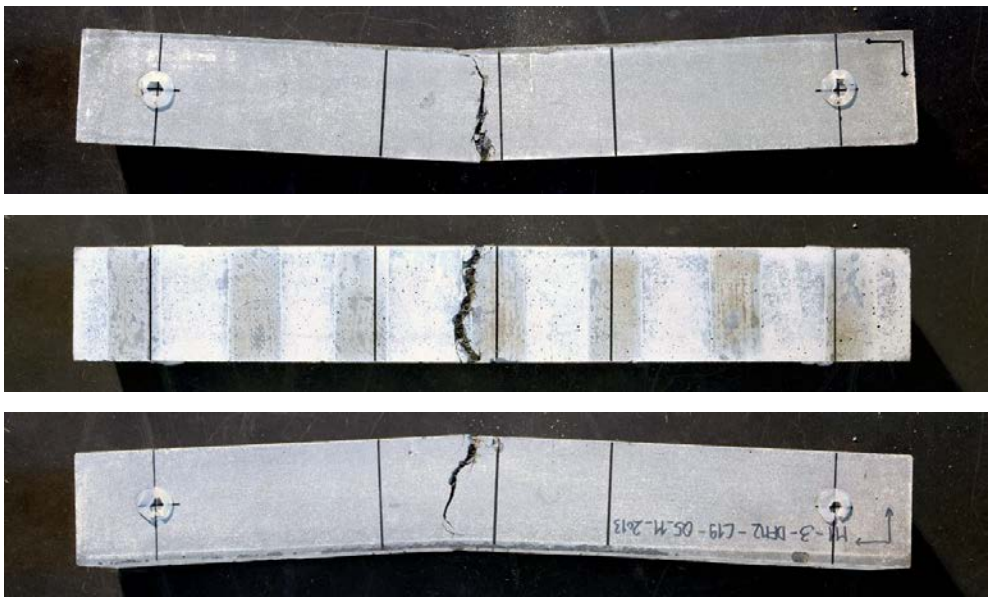


b) Risslokalisierung (x_1 = 40 mm, x_2 = 41 mm, x_3 = 38 mm, x_4 = 45 mm, x_5 = 35 mm)

M1-2-DFM2-C19-05_11_2013



a) Kraft-Mittendurchbiegungs-Kurve



b) Risslokalisierung (x_1 = 10 mm, x_2 = 8 mm, x_3 = 17 mm, x_4 = 13 mm, x_5 = 27 mm)

M1-3-DFM2-C19-05_11_2013

D.3 Abscherversuche unter statischer Belastung

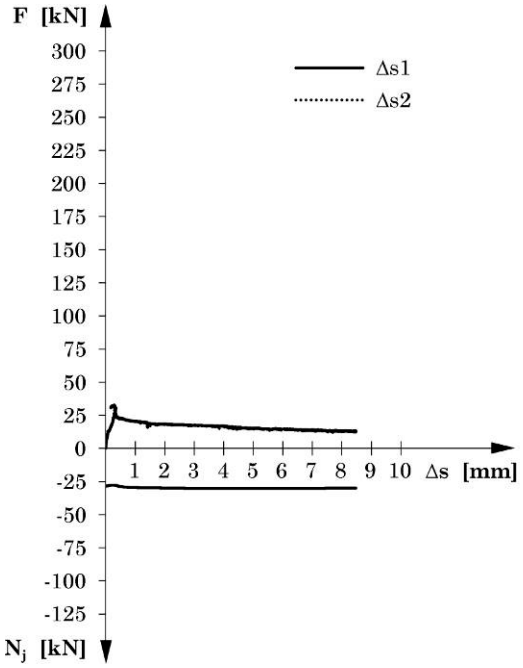
D.3.1 Versuchskörper mit sehr glatter Fuge

D.3.1.1 SG_S1 (C12 und C13)

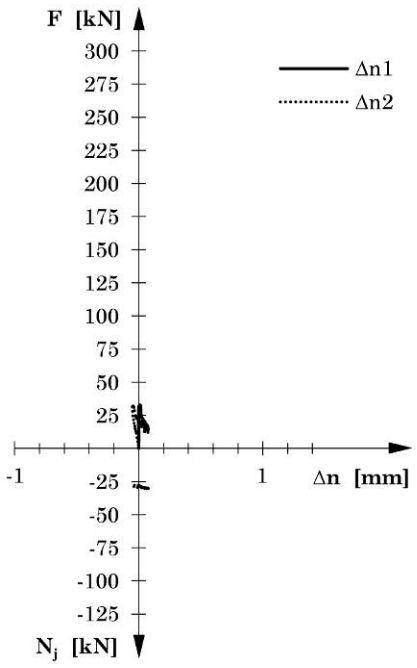
Weggeregelte Abscherversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Kontaktflächen		F_r	$N_{j,r}$	$\Delta s_{1,r}$	$\Delta s_{2,r}$	$\Delta n_{1,r}$	$\Delta n_{2,r}$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
FZ-1-SG_S1	05.02.2014	119	50,4	94,4	32,8	-28,7	0,463	0,423	0,012	-0,045
FZ-3-SG_S1	12.02.2014	126	50,0	95,1	34,7	-30,1	0,412	0,388	0,071	-0,004
FZ-4-SG_S1	04.03.2014	146	49,9	95,1	24,2	-28,2	0,394	0,391	0,022	-0,017
FZ-5-SG_S1	04.02.2014	118	51,3	95,0	25,6	-28,5	0,444	0,421	0,003	-0,055
FZ-10-SG_S1 [1)]	05.02.2014	119	50,3	95,4	17,0	-27,3	0,236	0,236	-0,018	-0,055
Mittelwert	m				29,3		0,428	0,406	0,027	-0,030
Standardabweichung	s				5,21		0,031	0,019	0,030	0,024
Variationskoeffizient	v				17,78 %		7,24 %	4,67 %	112,84 %	79,50 %

[1)] Die Ergebnisse des Versuchskörpers wurden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.



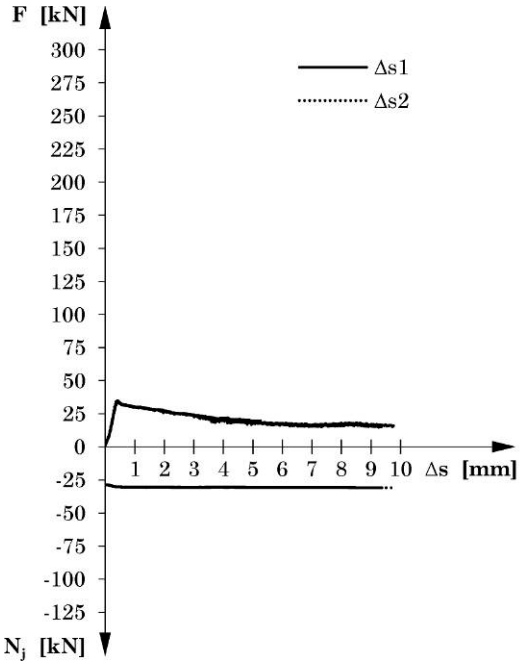
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



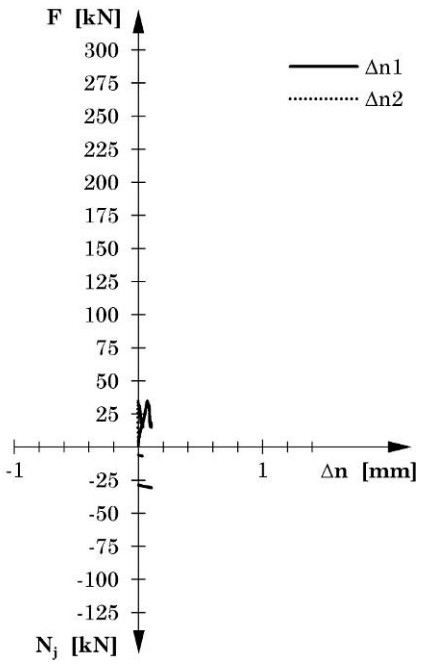
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

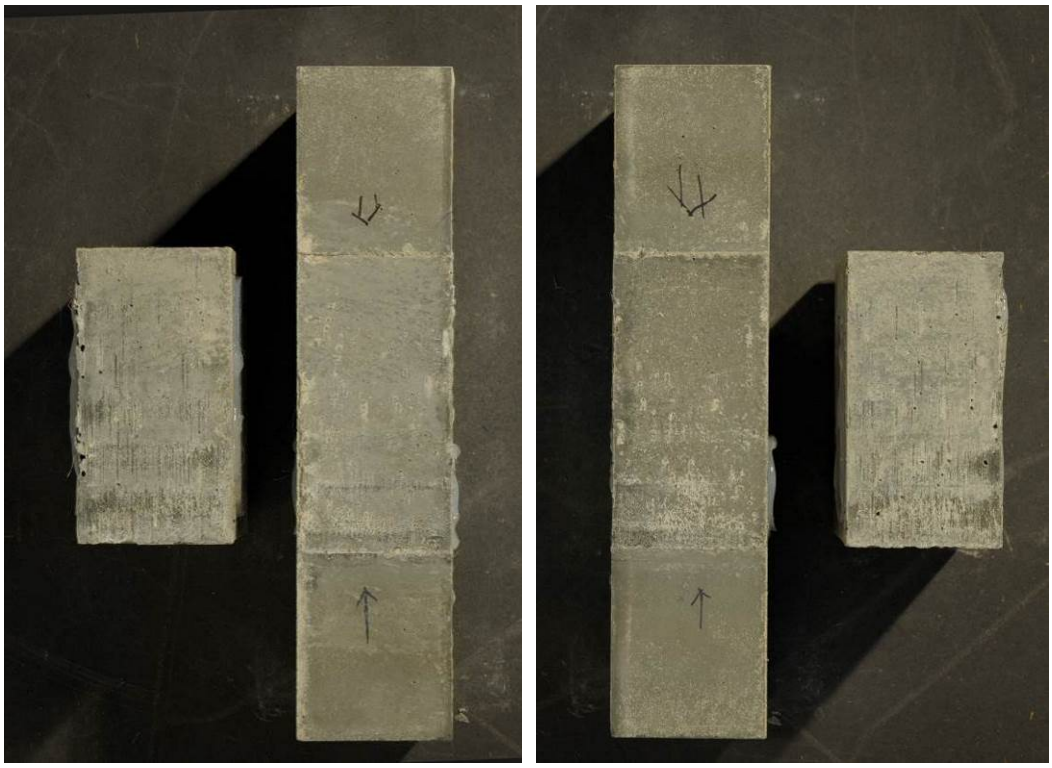
FZ-1-SG_S1



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

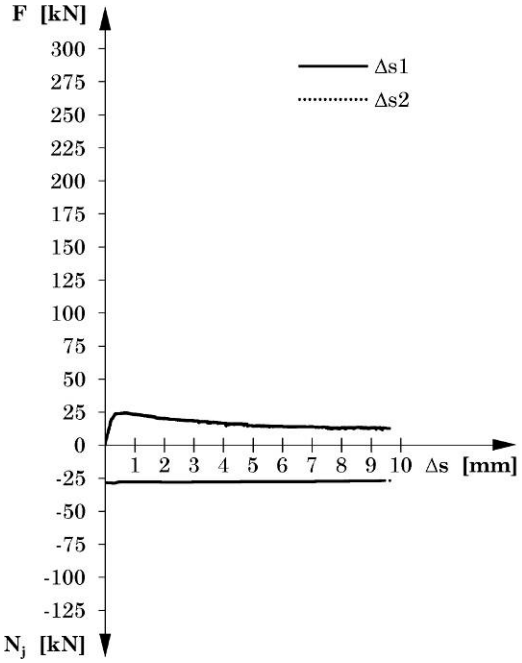


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

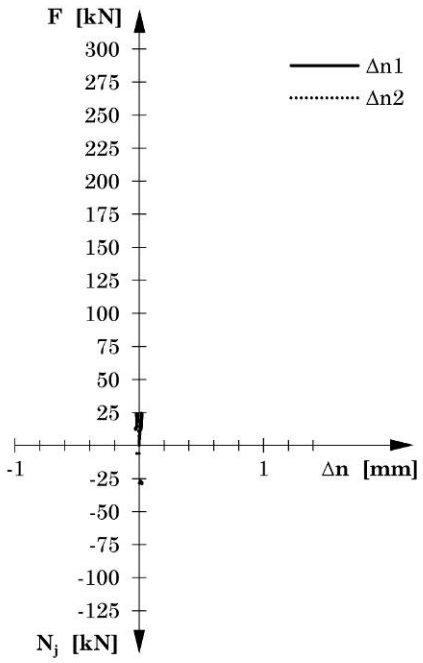


c) Bruchbild

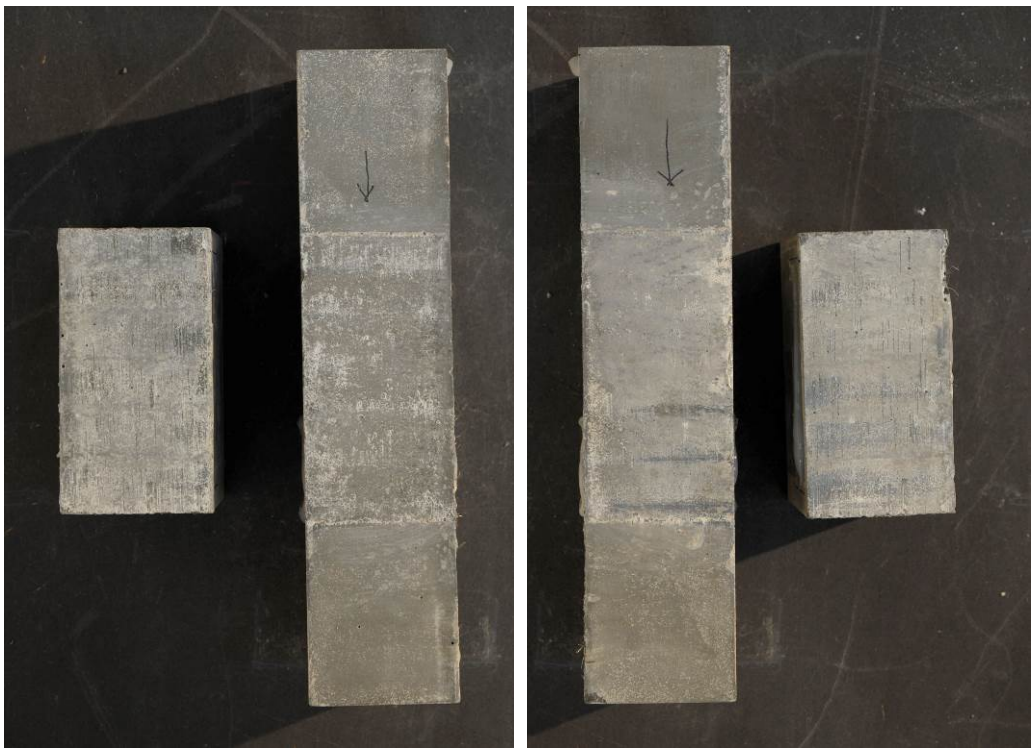
FZ-3-SG_S1



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

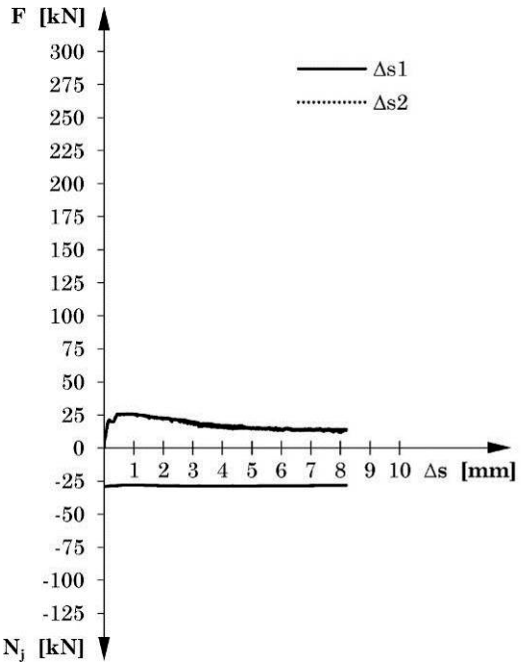


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

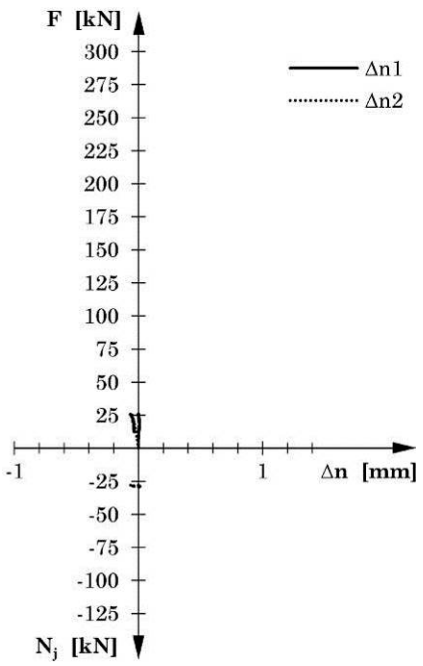


c) Bruchbild

FZ-4-SG_S1



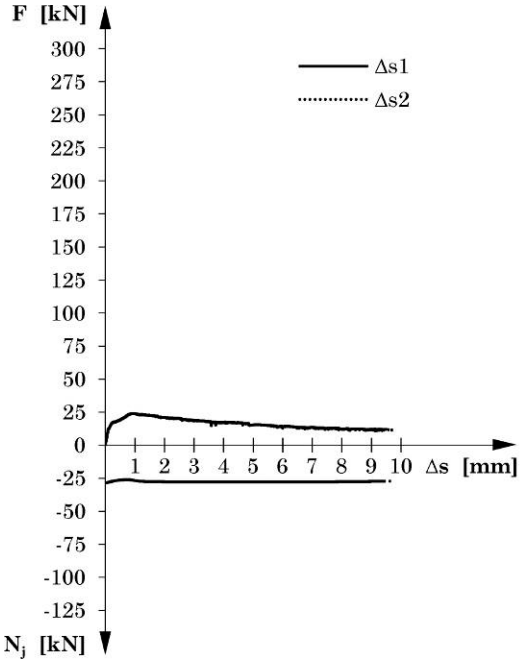
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



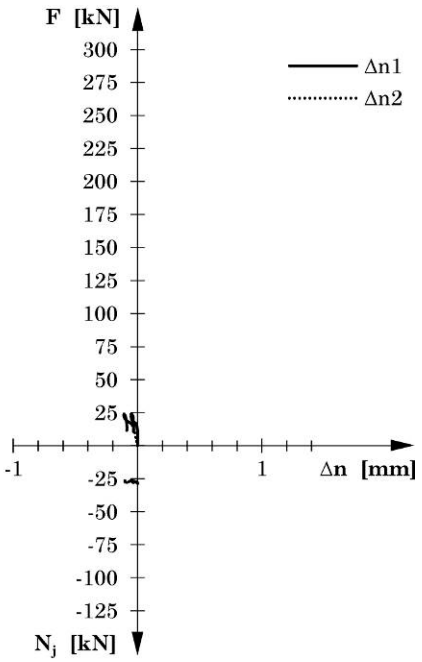
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

FZ-5-SG_S1



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

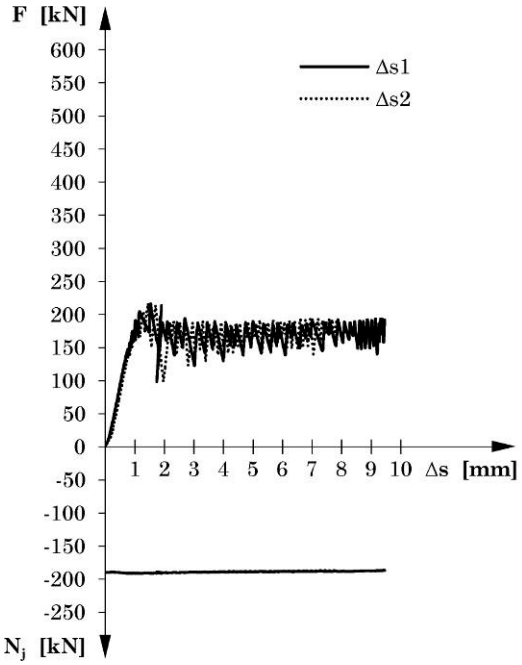
FZ-10-SG_S1

D.3.1.2 SG_S2 (C14 und C15)

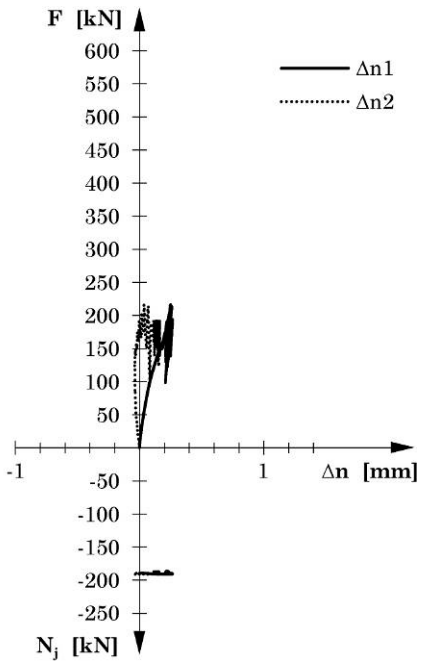
Weggeregelte Abscherversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Kontaktflächen b	h	F_r	$N_{j,r}$	$\Delta s_{1,r}$	$\Delta s_{2,r}$	$\Delta n_{1,r}$	$\Delta n_{2,r}$
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
FZ-1-SG_S2	11.02.2014	119	50,1	94,9	204,4	-191,0	1,155	1,285	0,240	0,018
FZ-2-SG_S2	06.02.2014	114	49,2	94,0	210,0	-190,3	0,923	0,974	0,108	-0,041
FZ-3-SG_S2 [1)]	06.02.2014	114	48,7	94,8	150,3	-188,3	0,558	0,552	0,044	-0,036
FZ-4-SG_S2	06.02.2014	114	49,4	94,8	219,8	-188,2	0,858	0,912	0,067	-0,042
FZ-7-SG_S2	04.03.2014	140	49,8	94,9	228,4	-189,5	0,962	0,997	0,109	-0,042
Mittelwert	m				215,6		0,974	1,042	0,131	-0,027
Standardabweichung	s				10,63		0,128	0,166	0,075	0,030
Variationskoeffizient	v				4,93 %		13,12 %	15,93 %	57,61 %	111,95 %

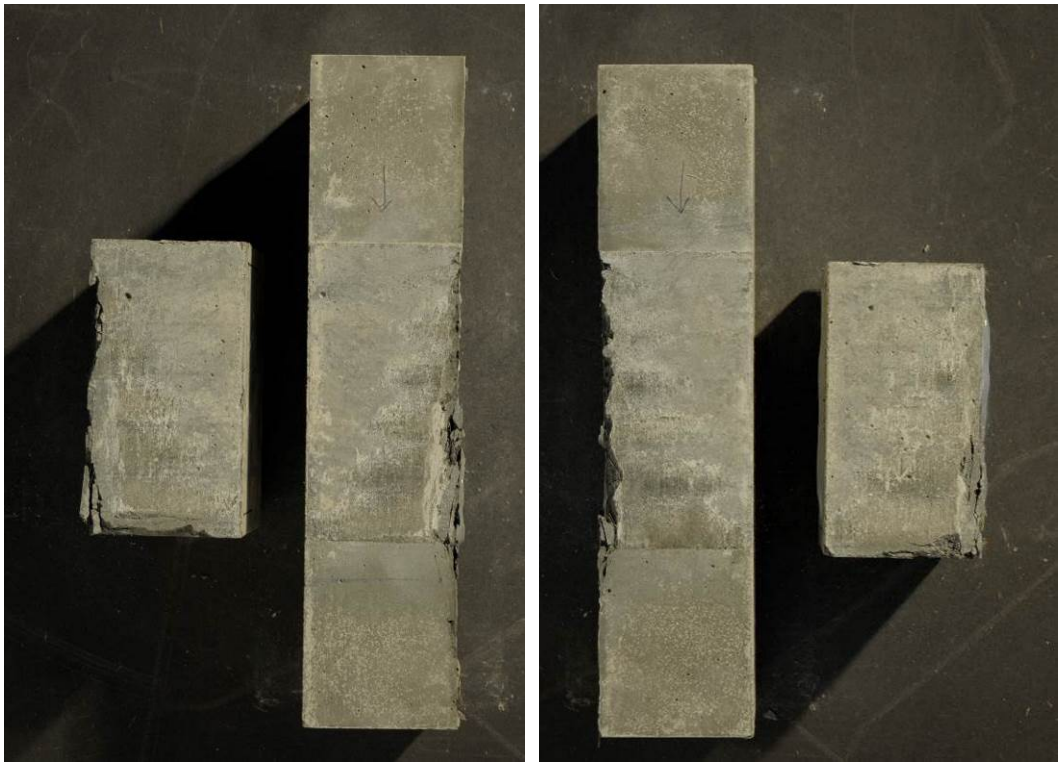
[1)] Die Ergebnisse des Versuchskörpers wurden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

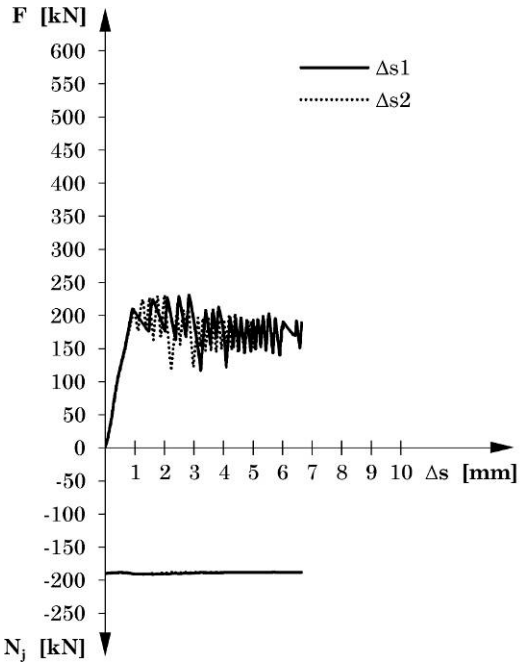


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

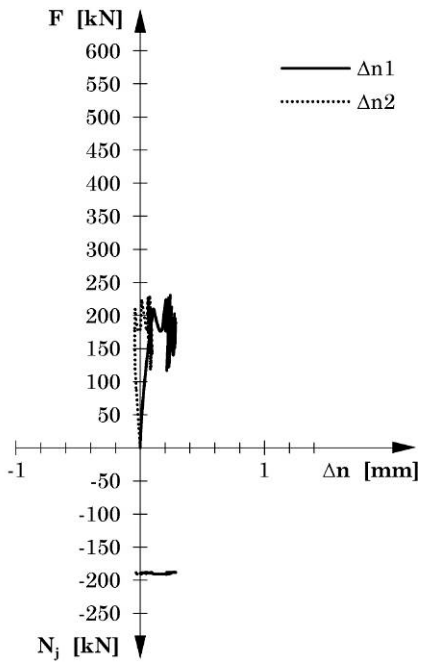


c) Bruchbild

FZ-1-SG_S2



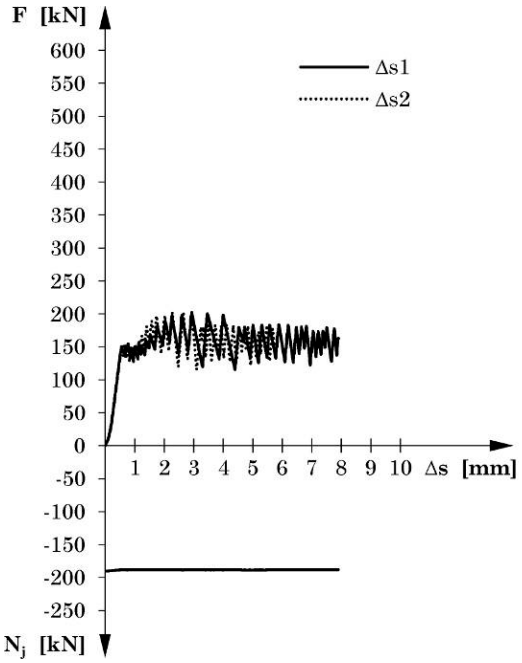
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



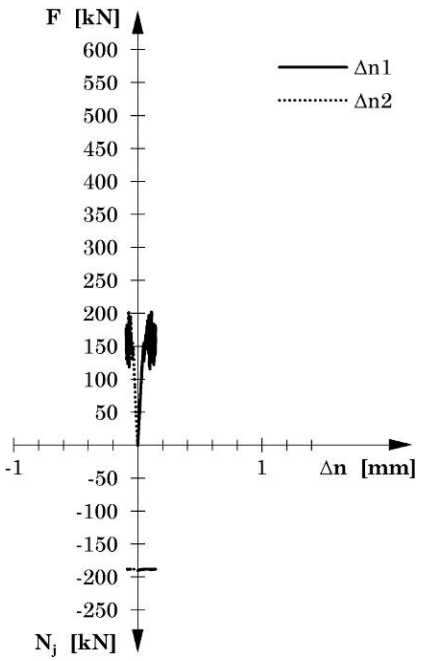
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

FZ-2-SG_S2



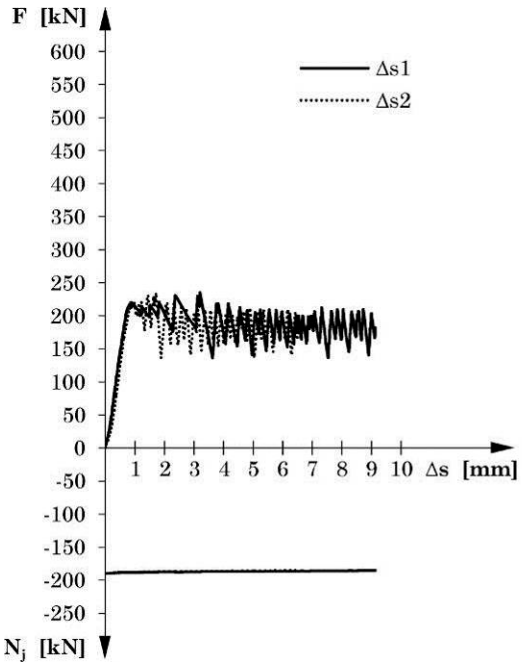
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



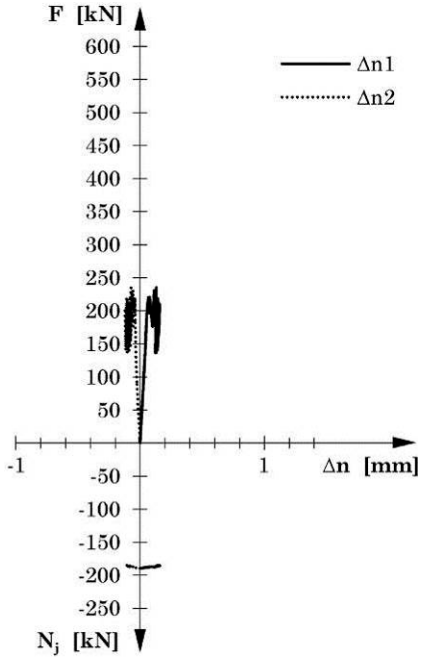
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

FZ-3-SG_S2



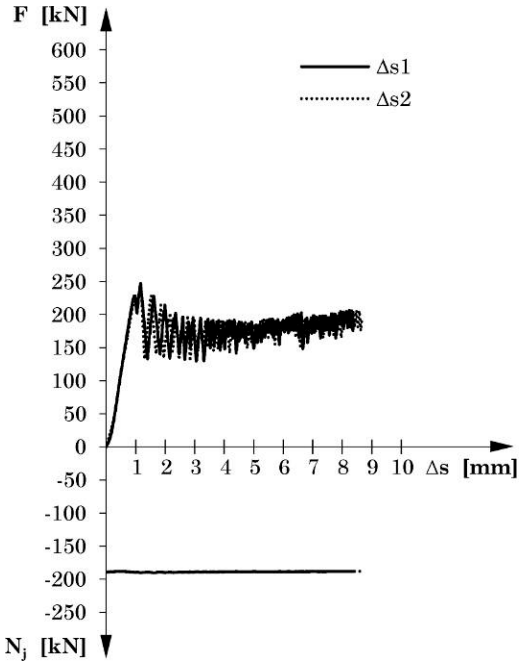
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



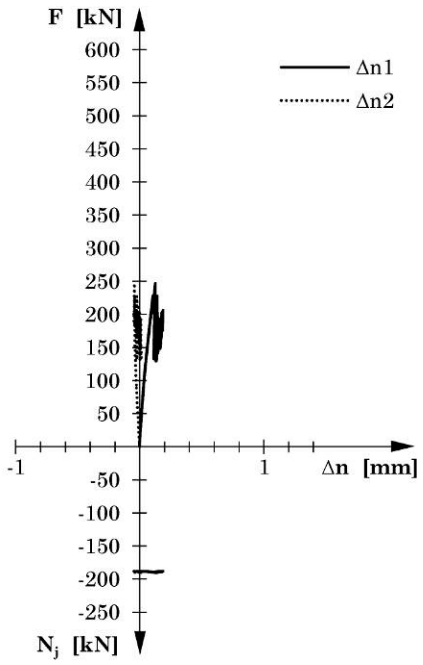
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

FZ-4-SG_S2



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

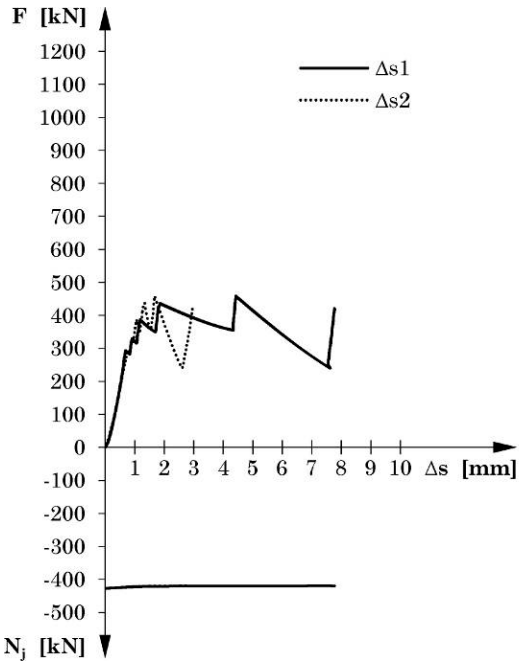
c) Bruchbild

FZ-7-SG_S2

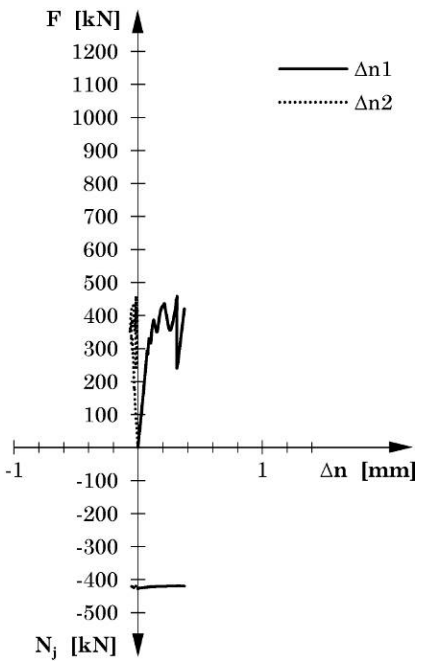
D.3.1.3 SG_S3 (C16 und C17)

Weggeregelte Abscherversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

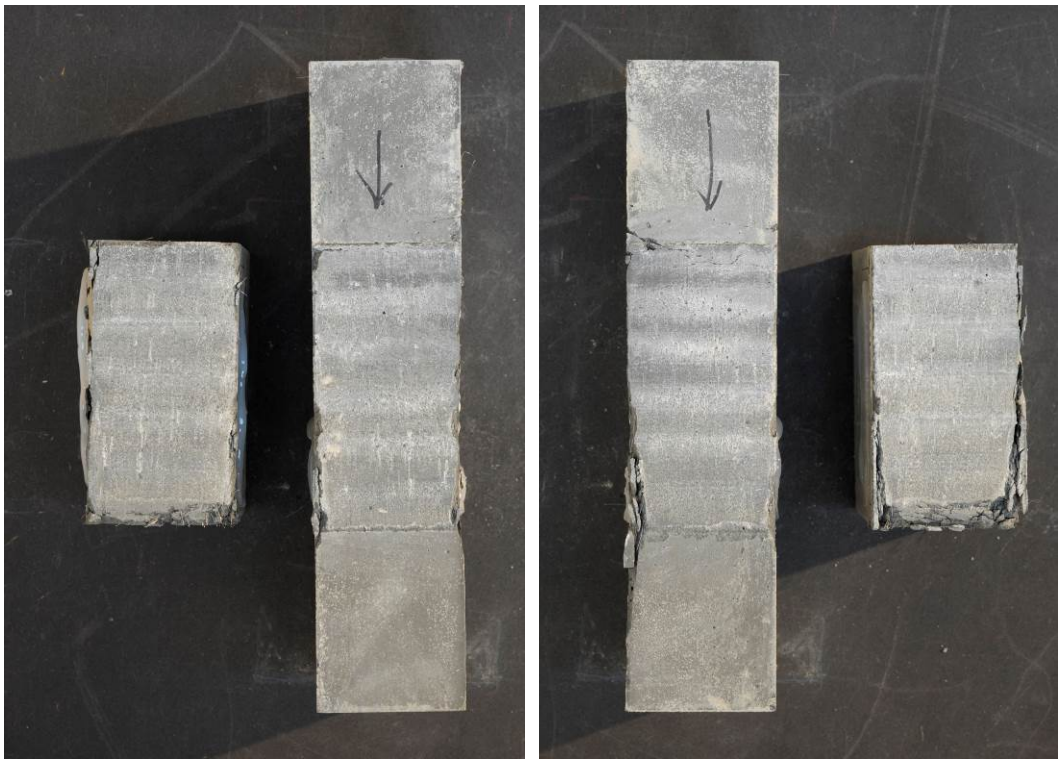
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Kontaktflächen		F_r	$N_{j,r}$	$\Delta s_{1,r}$	$\Delta s_{2,r}$	$\Delta n_{1,r}$	$\Delta n_{2,r}$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
FZ-1-SG_S3	10.02.2014	111	50,0	95,0	386,3	-421,6	1,187	1,079	0,126	-0,046
FZ-3-SG_S3	10.02.2014	111	50,0	94,7	414,8	-423,0	0,953	1,073	0,105	-0,067
FZ-4-SG_S3	04.03.2014	133	50,7	95,1	411,9	-424,0	1,018	1,084	0,089	-0,061
FZ-6-SG_S3	10.02.2014	111	51,0	95,6	402,9	-421,9	1,001	1,085	0,115	-0,088
FZ-7-SG_S3	11.02.2014	112	50,5	94,6	445,0	-420,7	1,375	1,482	0,181	-0,112
Mittelwert	m				412,2		1,106	1,160	0,123	-0,075
Standardabweichung	s				21,44		0,174	0,180	0,035	0,026
Variationskoeffizient	v				5,20 %		15,72 %	15,50 %	28,33 %	34,24 %



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

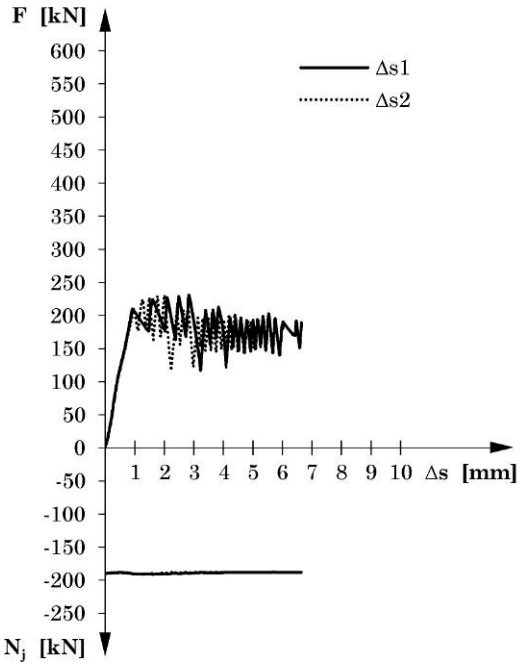


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

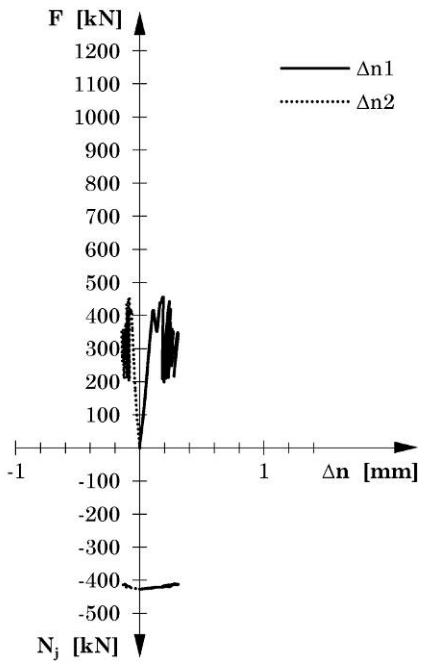


c) Bruchbild

FZ-1-SG_S3



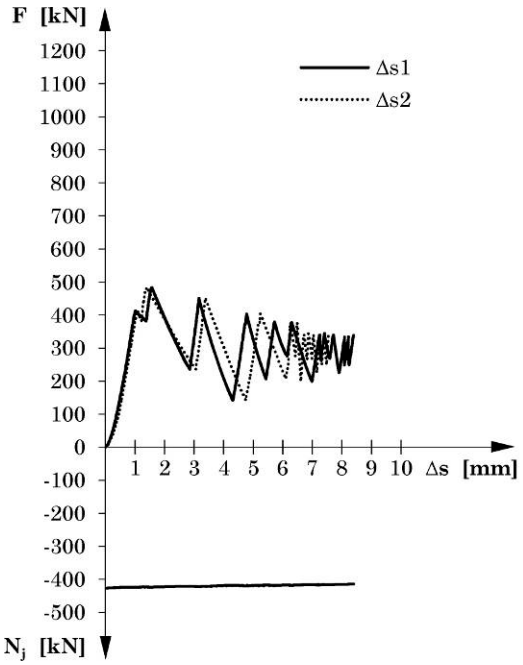
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



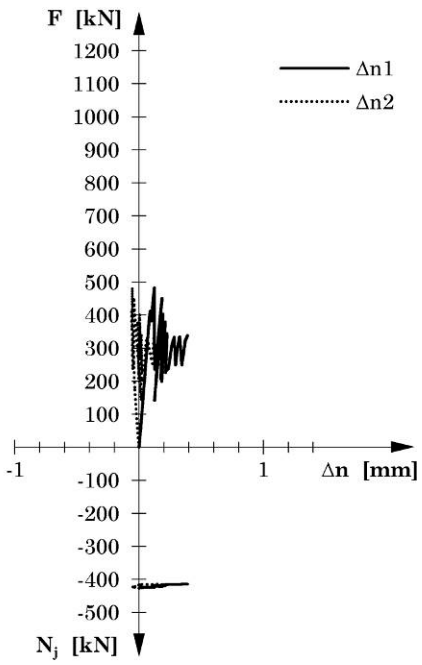
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

FZ-3-SG_S3



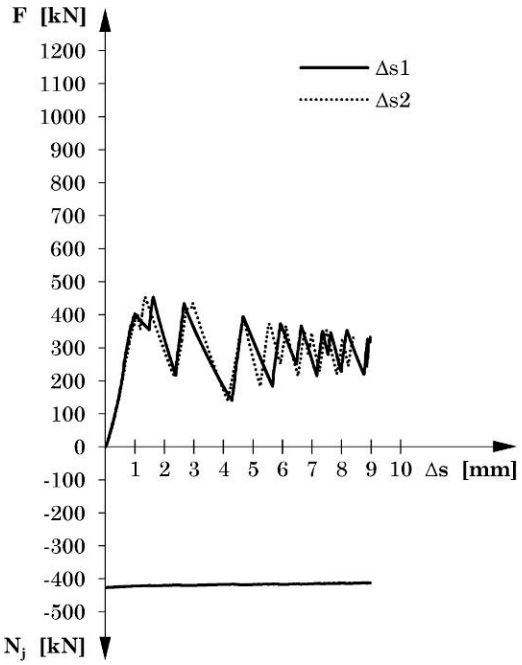
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



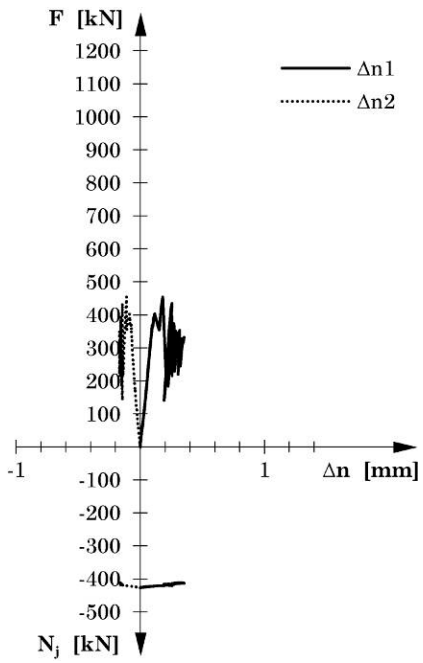
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

FZ-4-SG_S3



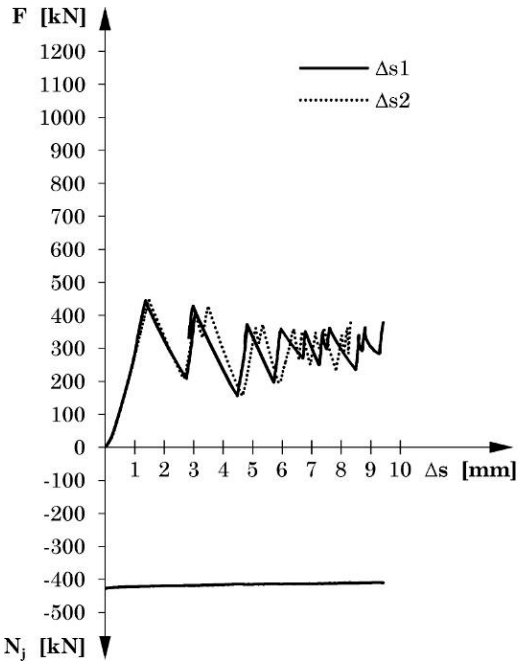
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



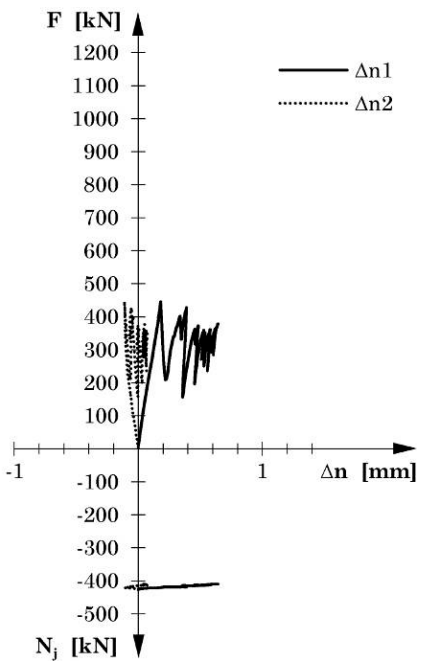
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

FZ-6-SG_S3



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

FZ-7-SG_S3

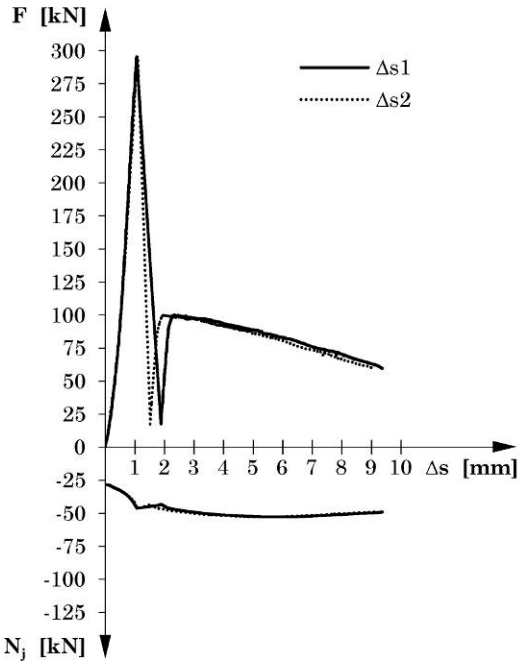
D.3.2 Versuchskörper mit verzahnter Fuge

D.3.2.1 V_S1 (C12 und C13)

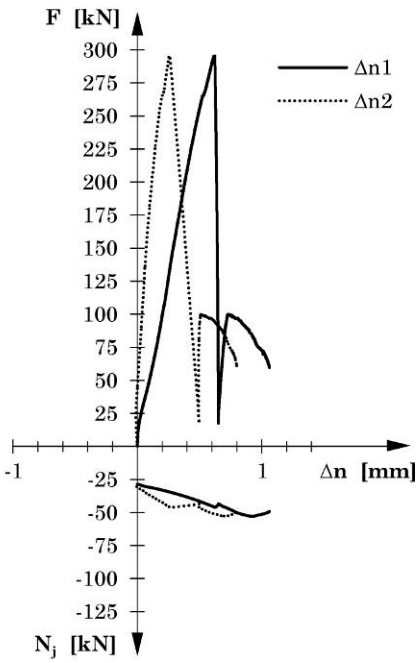
Weggeregelte Abscherversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Kontaktflächen		F_{ult}	$N_{j,ult}$	$\Delta s_{1,ult}$	$\Delta s_{2,ult}$	$\Delta n_{1,ult}$	$\Delta n_{2,ult}$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
FZ-1-V_S1	04.03.2014	146	49,8	94,9	295,4	-45,9	1,058	1,087	0,618	0,257
FZ-2-V_S1 [1)]	12.02.2014	126	49,2	94,9	134,2	-39,3	0,823	0,909	0,340	0,113
FZ-3-V_S1	06.02.2014	120	49,4	95,1	227,9	-45,3	0,949	1,005	0,575	0,172
FZ-5-V_S1	05.02.2014	119	49,1	95,1	271,6	-36,3	1,006	1,090	0,338	0,121
FZ-6-V_S1	05.02.2014	119	50,1	95,1	274,4	-38,5	0,997	1,130	0,457	0,191
Mittelwert	m				267,4		1,002	1,078	0,497	0,185
Standardabweichung	s				28,35		0,045	0,052	0,126	0,056
Variationskoeffizient	v				10,61 %		4,45 %	4,85 %	25,41 %	30,48 %

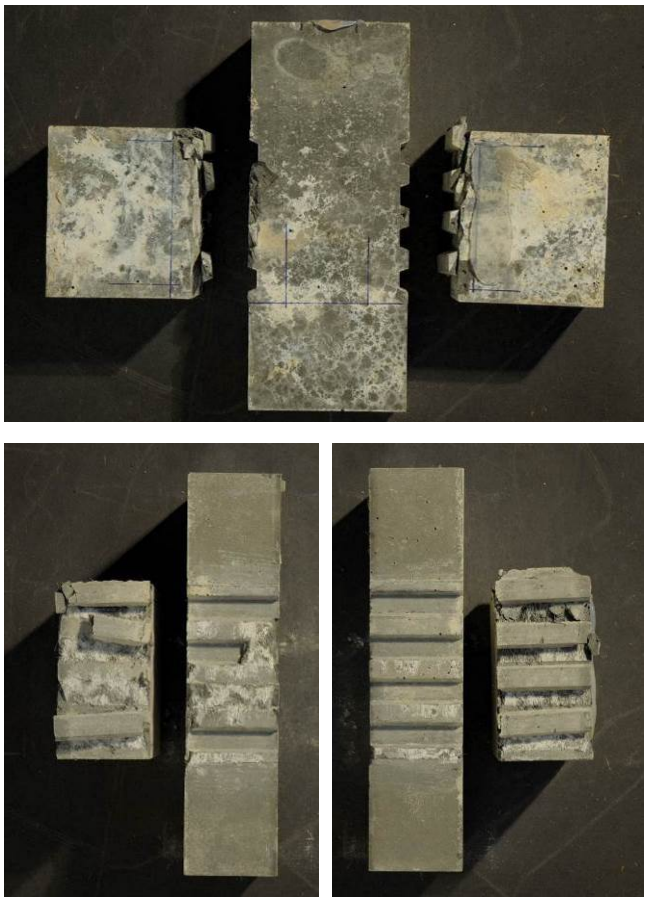
[1)] Die Ergebnisse des Versuchskörpers wurden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

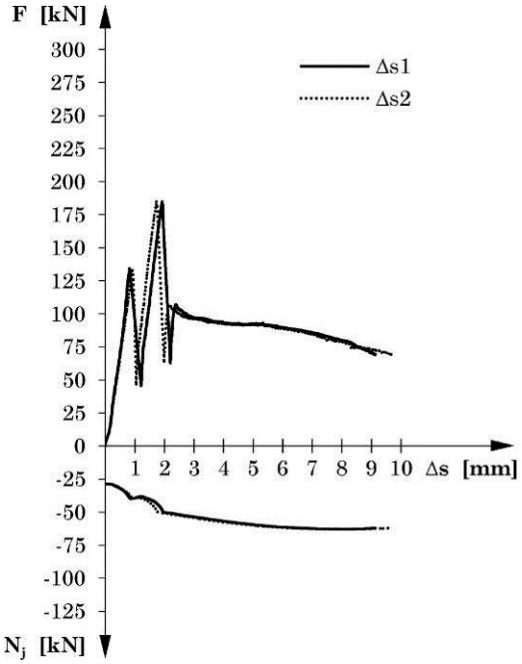


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

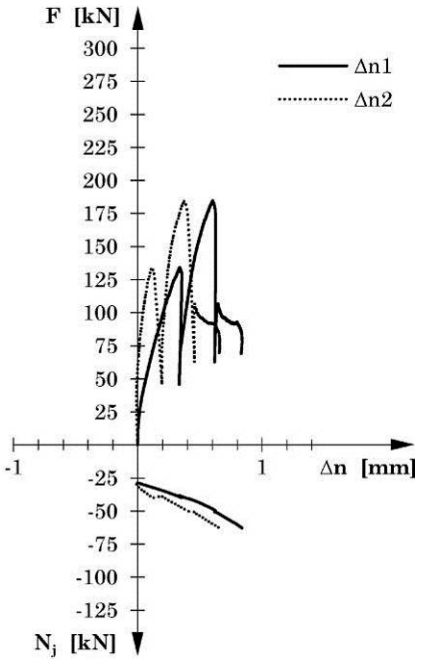


c) Bruchbild

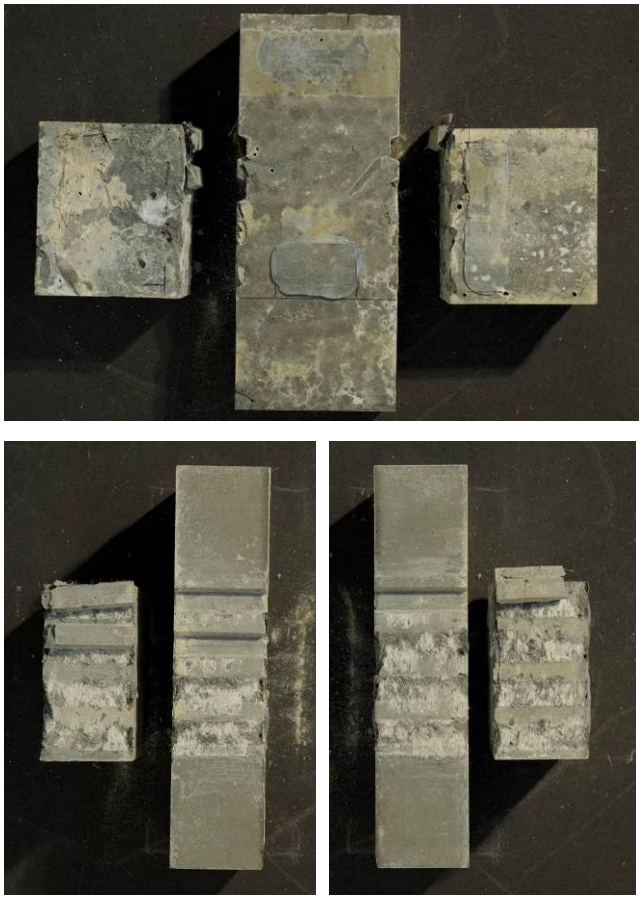
FZ-1-V_S1



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

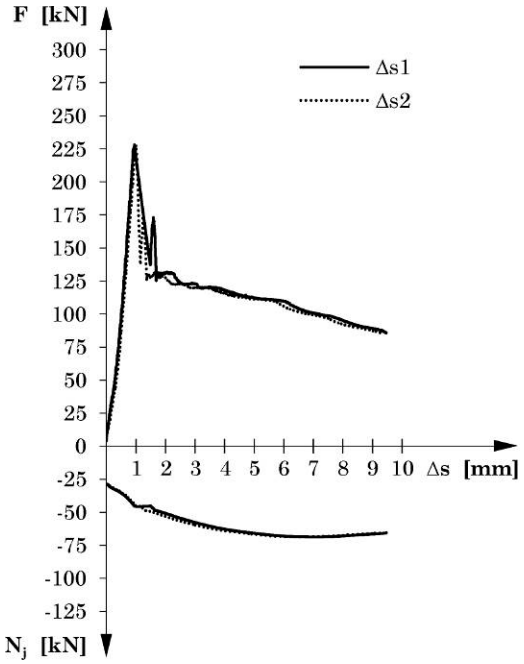


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

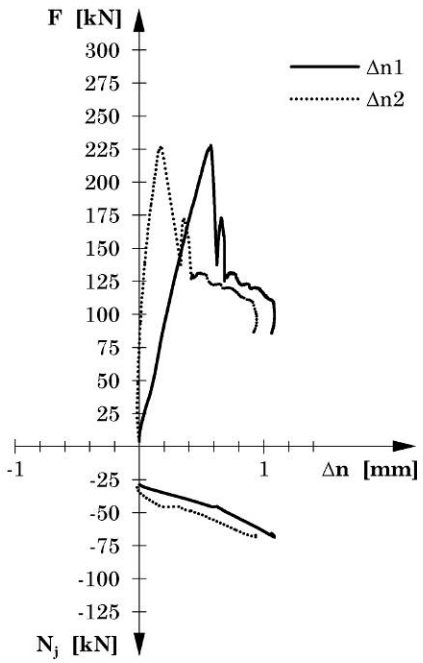


c) Bruchbild

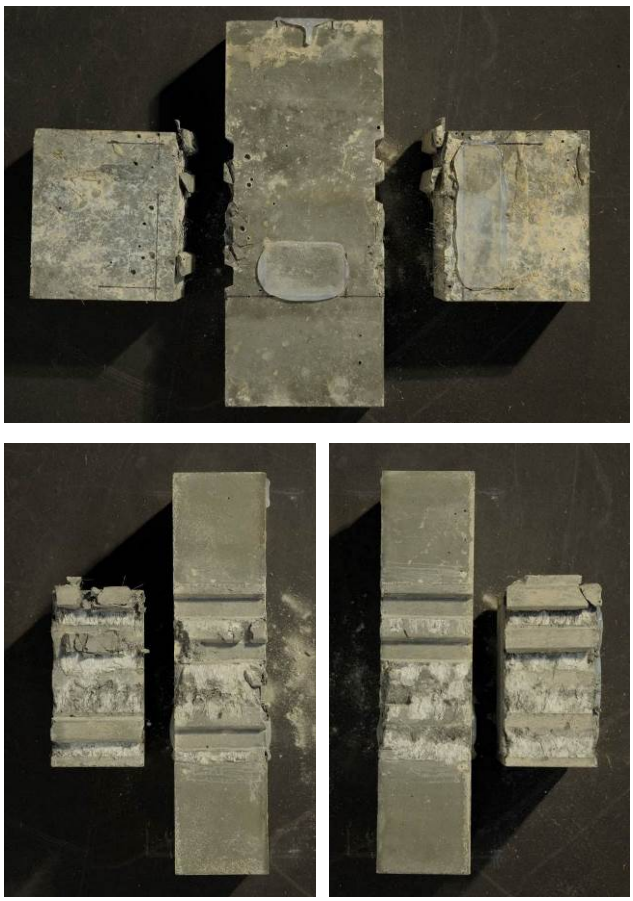
FZ-2-V_S1



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

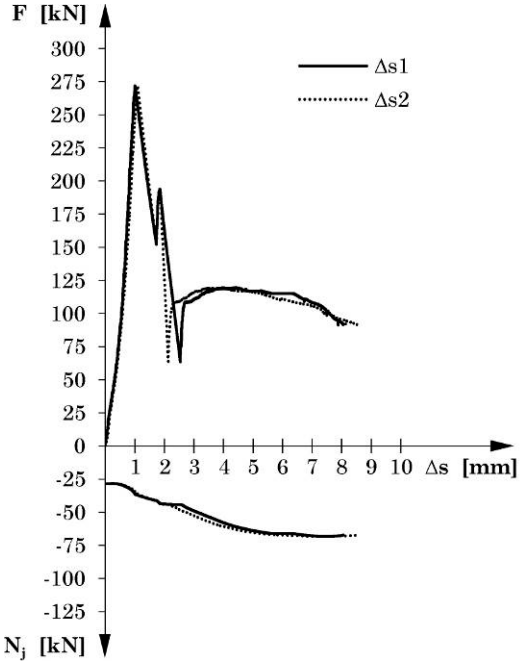


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

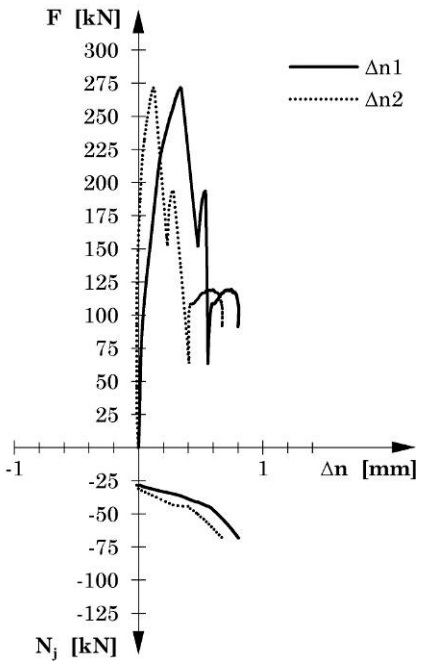


c) Bruchbild

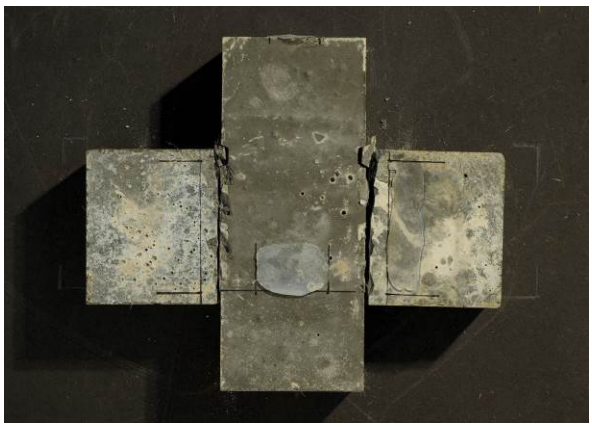
FZ-3-V_S1



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

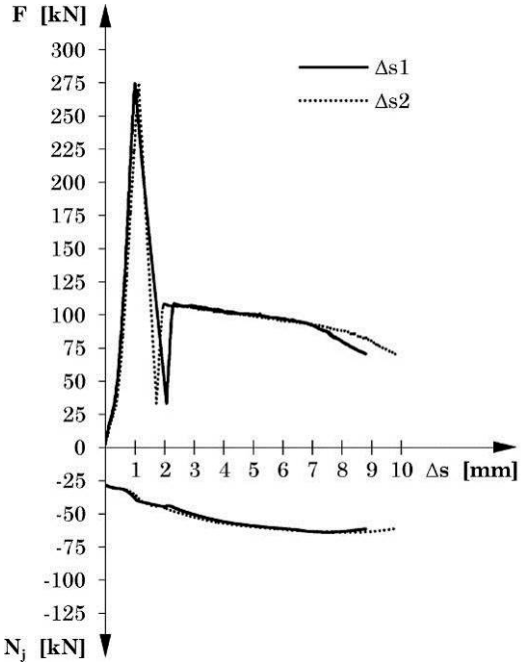


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

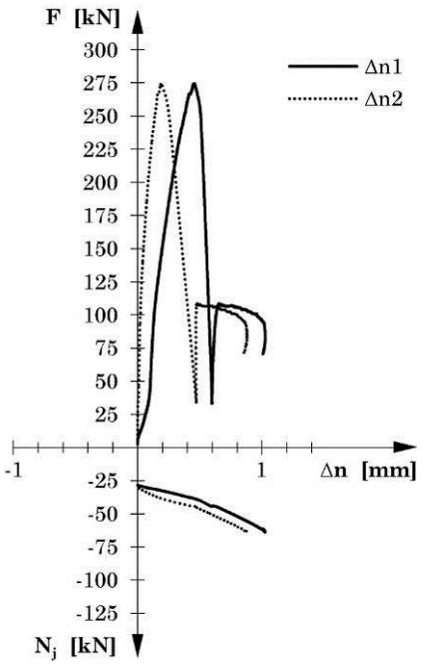


c) Bruchbild

FZ-5-V_S1



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

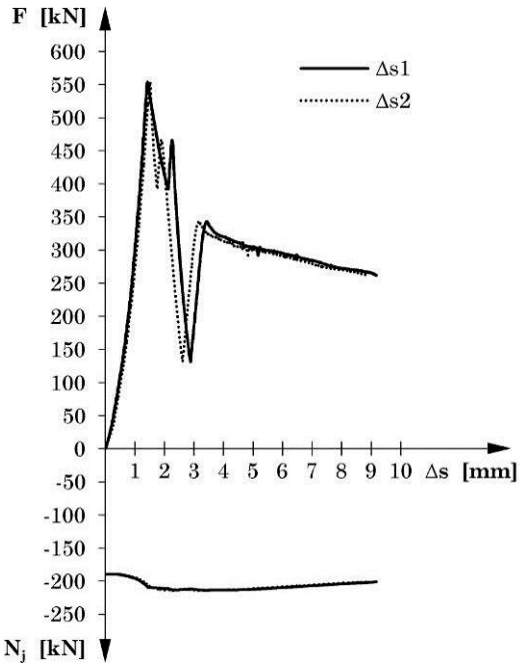
FZ-6-V_S1

D.3.2.2 V_S2 (C14 und C15)

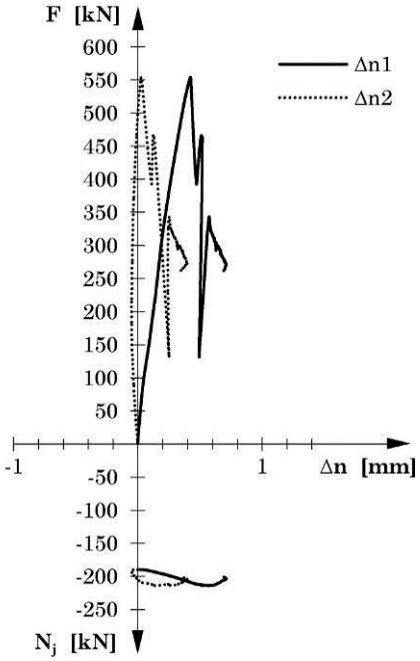
Weggeregelte Abscherversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Kontaktflächen		F_{ult}	$N_{j,ult}$	$\Delta s_{1,ult}$	$\Delta s_{2,ult}$	$\Delta n_{1,ult}$	$\Delta n_{2,ult}$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
FZ-2-V_S2	04.03.2014	140	49,7	95,2	554,1	-208,8	1,426	1,515	0,423	0,028
FZ-3-V_S2 [1)]	06.02.2014	114	50,2	95,0	394,8	-203,3	1,371	1,384	0,397	0,054
FZ-5-V_S2	12.02.2014	120	50,4	94,9	528,3	-218,4	1,628	1,780	0,614	0,069
FZ-6-V_S2	07.02.2014	115	50,0	95,0	564,3	-202,1	1,352	1,506	0,313	0,030
FZ-7-V_S2	07.02.2014	115	50,0	95,1	509,8	-203,4	1,251	1,432	0,347	0,026
Mittelwert	m				539,1		1,414	1,558	0,424	0,038
Standardabweichung	s				24,70		0,160	0,152	0,135	0,021
Variationskoeffizient	v				4,58 %		11,28 %	9,78 %	31,75 %	54,60 %

[1)] Die Ergebnisse des Versuchskörpers wurden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.



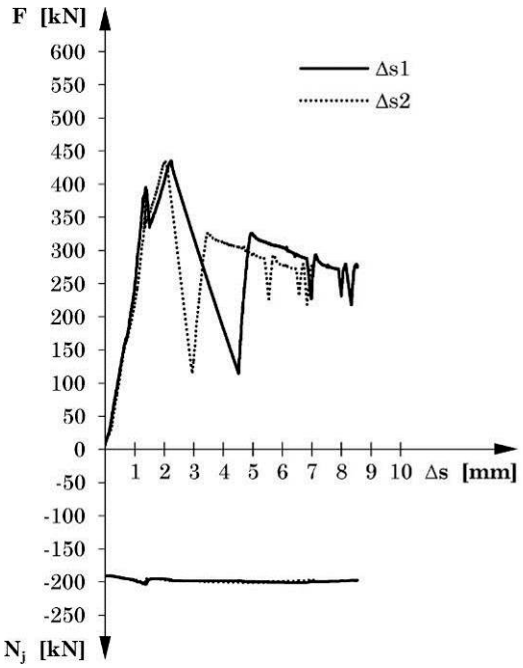
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



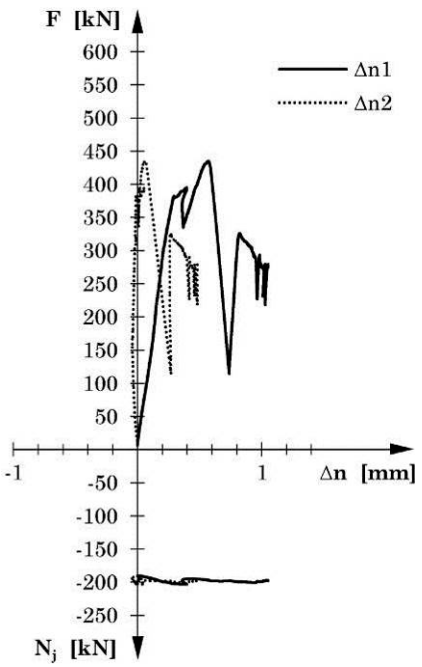
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

FZ-2-V_S2



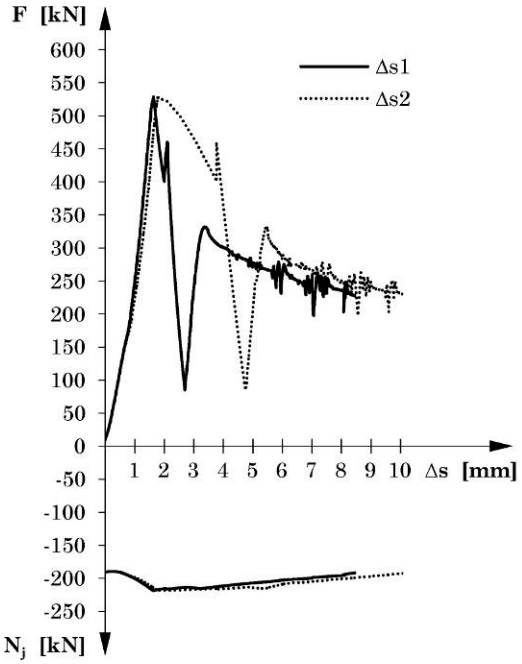
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



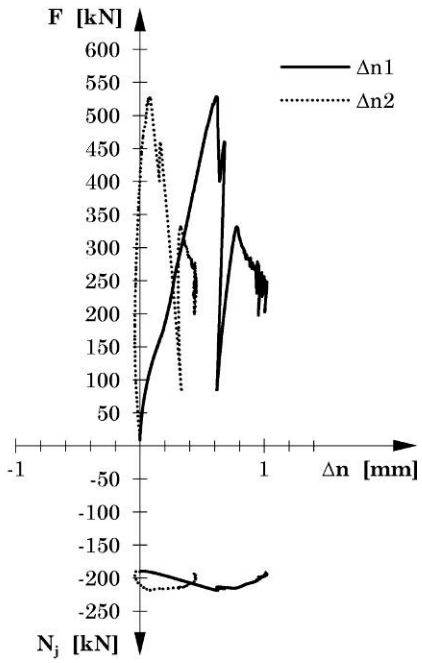
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

FZ-3-V_S2



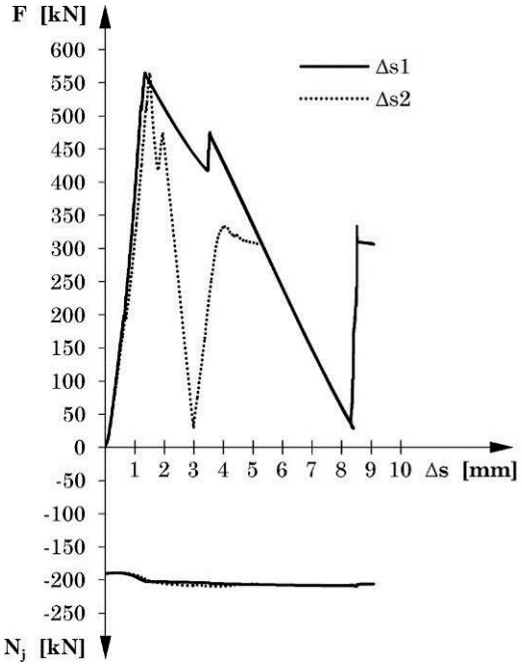
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



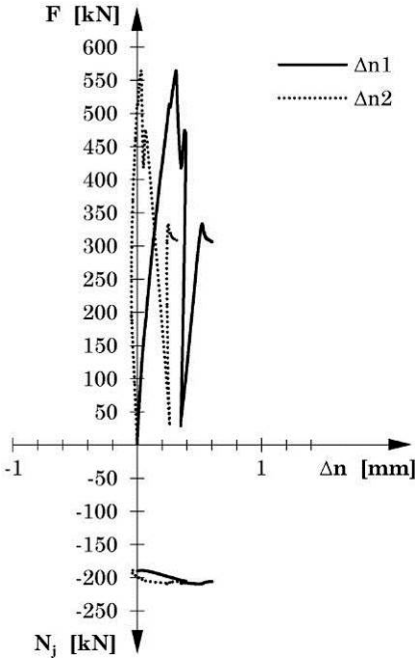
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

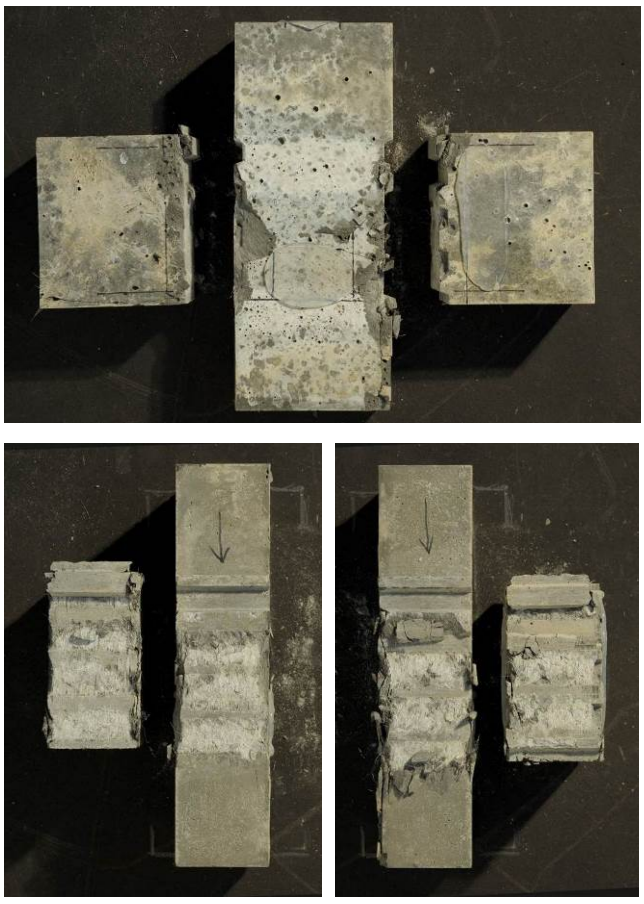
FZ-5-V_S2



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

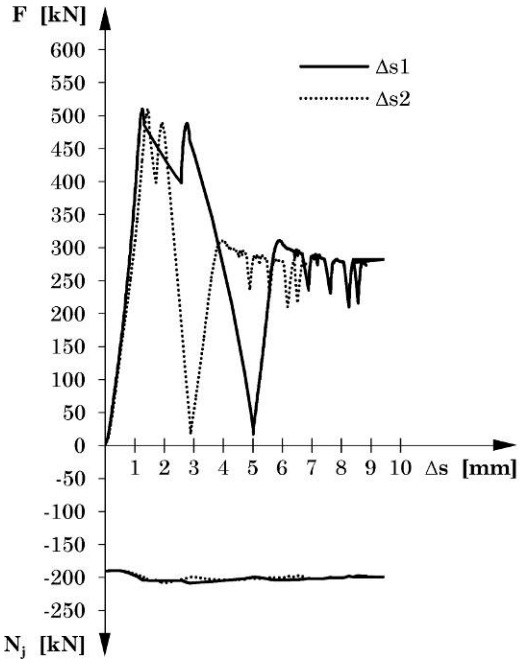


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

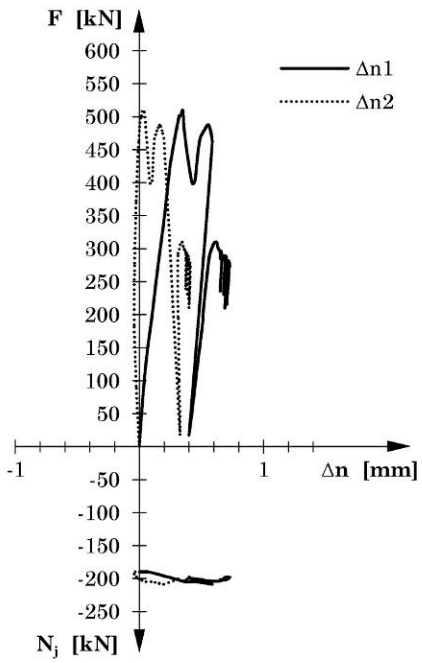


c) Bruchbild

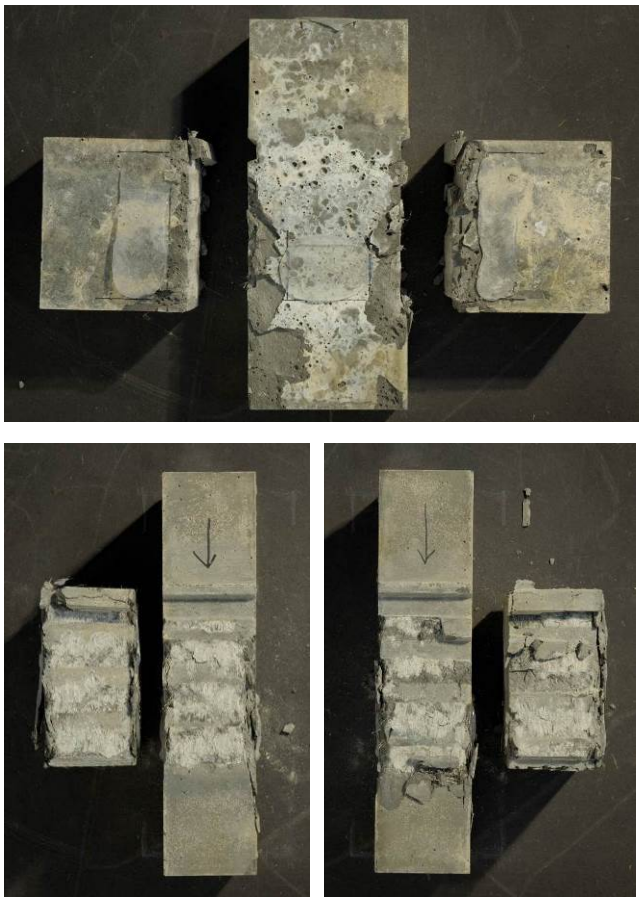
FZ-6-V_S2



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



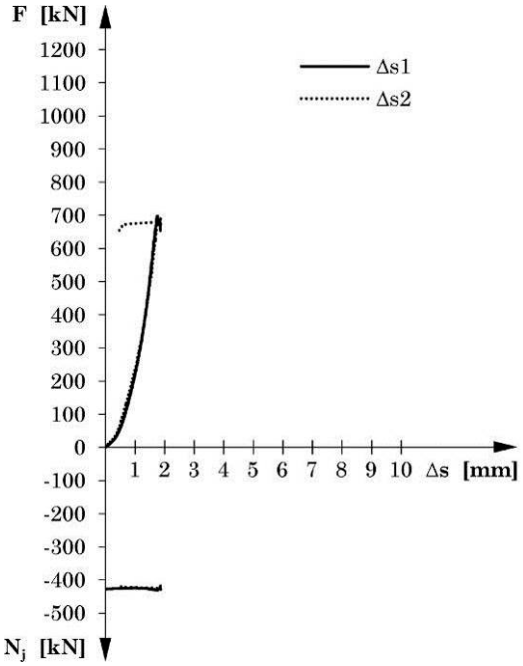
c) Bruchbild

FZ-7-V_S2

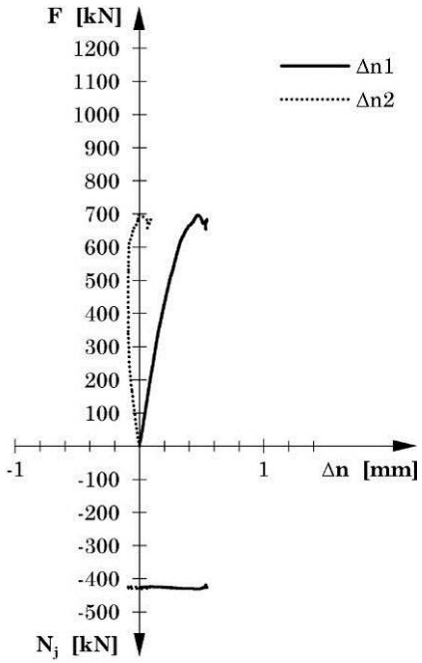
D.3.2.3 V_S3 (C16 und C17)

Weggeregelte Abscherversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

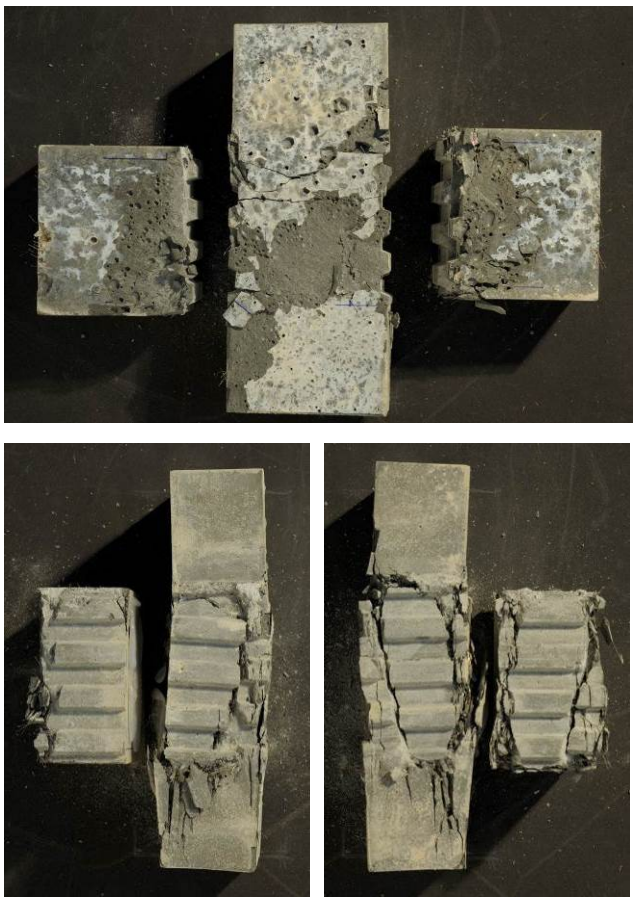
Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Kontaktflächen		F_{ult}	$N_{j,ult}$	$\Delta s_{1,ult}$	$\Delta s_{2,ult}$	$\Delta n_{1,ult}$	$\Delta n_{2,ult}$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
FZ-3-V_S3	04.03.2014	133	50,3	95,0	696,8	-430,6	1,753	1,773	0,468	-0,002
FZ-4-V_S3	11.02.2014	112	49,9	95,3	643,3	-387,7	1,682	3,030	0,511	-0,154
FZ-5-V_S3	10.02.2014	111	50,0	94,9	624,1	-396,7	1,782	1,963	0,475	-0,054
FZ-6-V_S3	11.02.2014	112	50,0	95,0	650,3	-428,3	1,384	1,300	0,550	0,143
FZ-7-V_S3	11.02.2014	112	50,4	95,0	672,0	-416,3	1,776	0,076	0,629	0,100
Mittelwert	m				657,3		1,675	1,628	0,526	0,007
Standardabweichung	s				27,95		0,167	1,074	0,066	0,119
Variationskoeffizient	v				4,25 %		10,00 %	65,97 %	12,53 %	1772 %



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

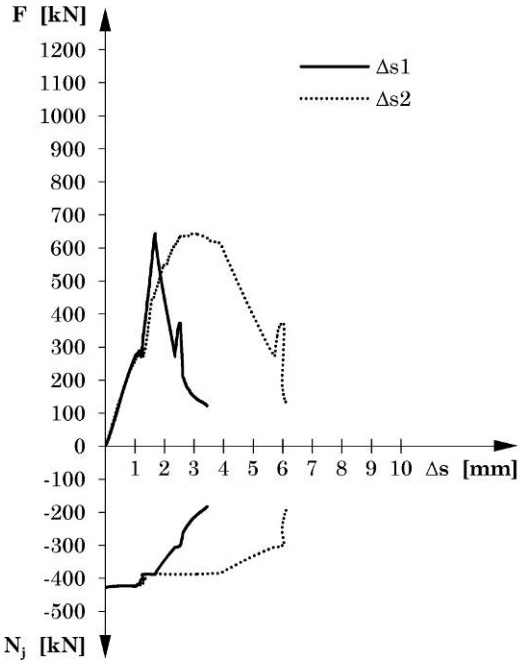


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

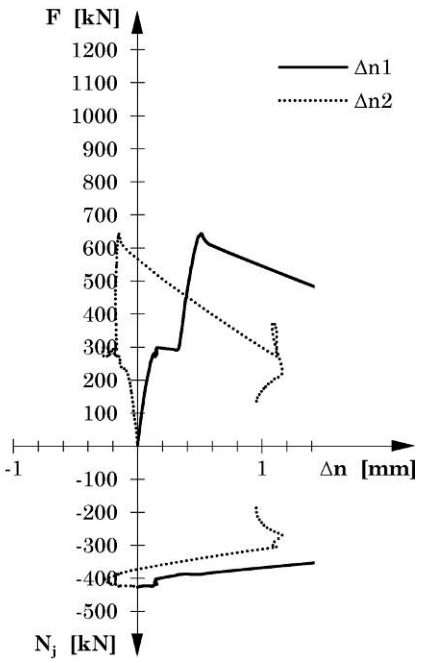


c) Bruchbild

FZ-3-V_S3



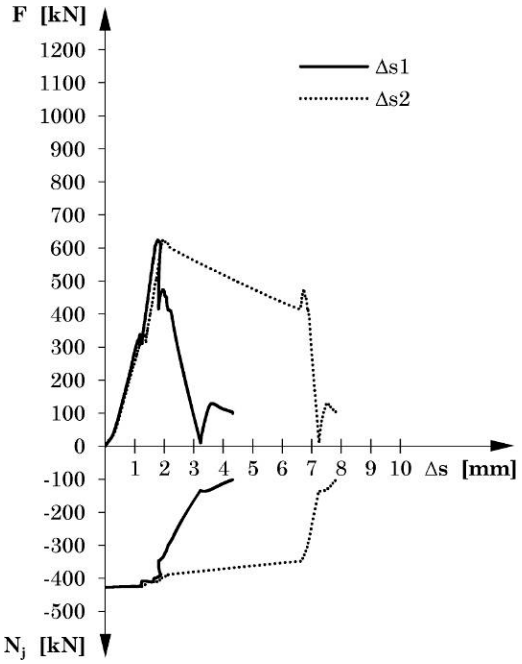
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



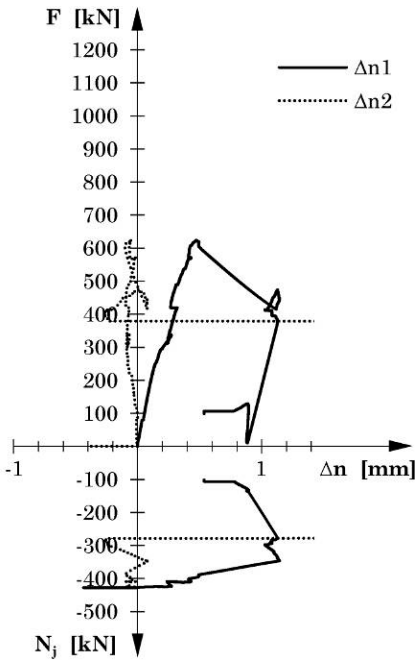
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

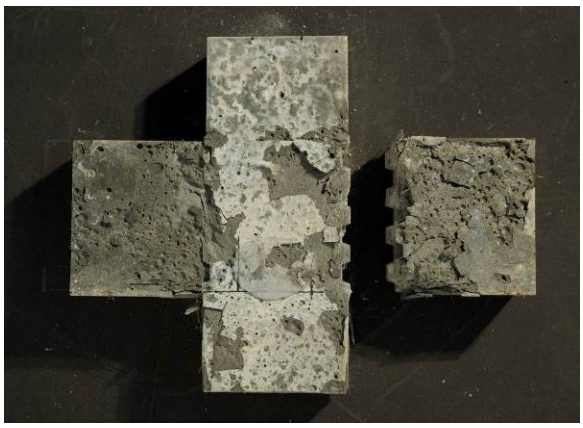
FZ-4-V_S3



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

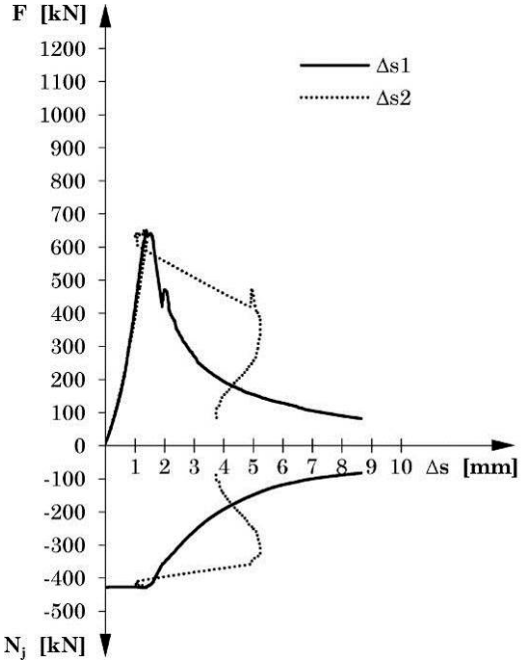


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

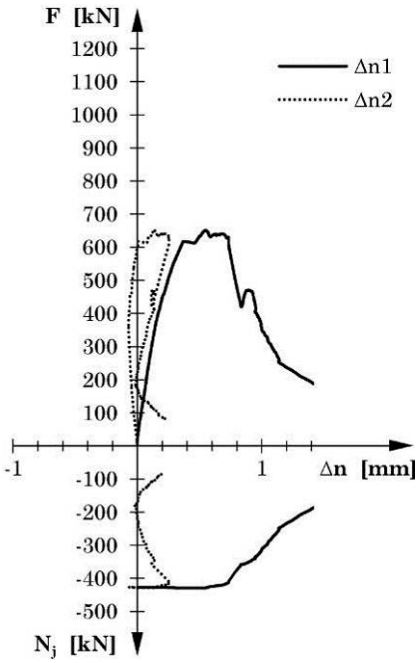


c) Bruchbild

FZ-5-V_S3



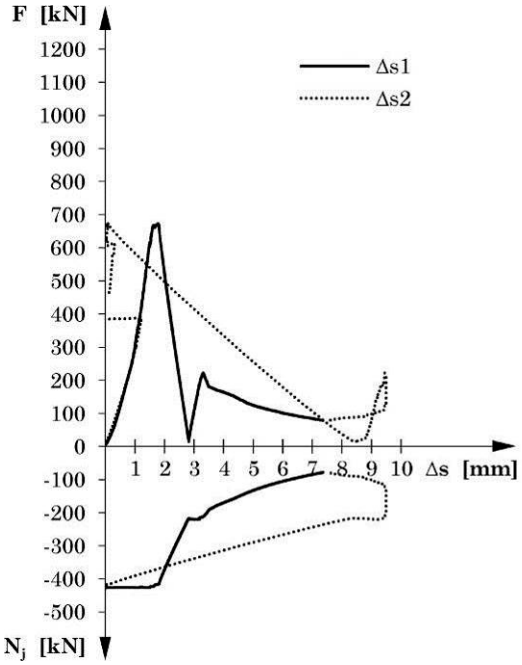
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



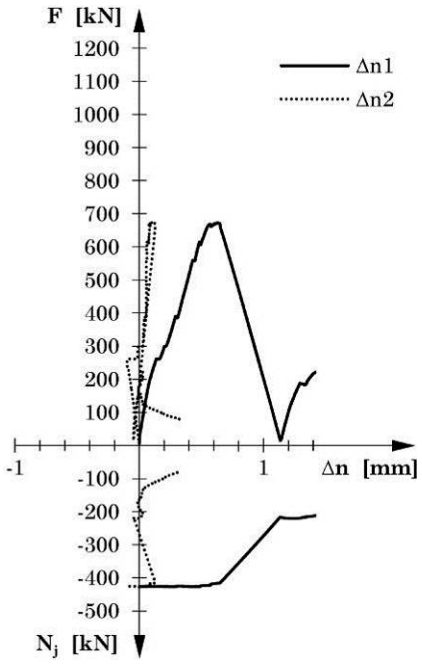
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

FZ-6-V_S3



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

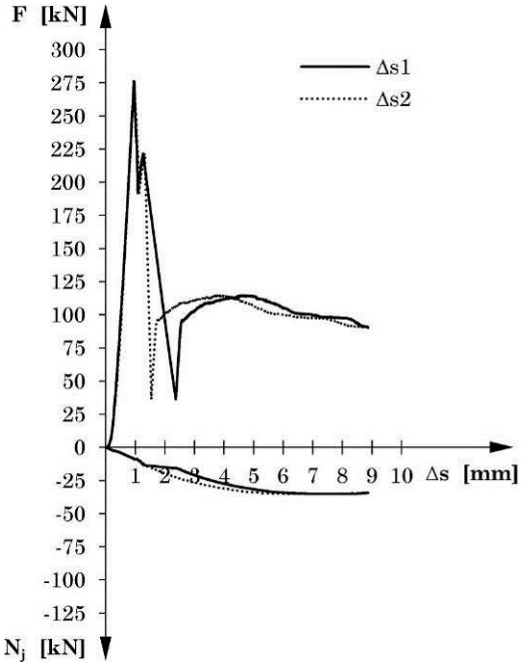
FZ-7-V_S3

D.3.2.4 V_S4 (C18 und C19)

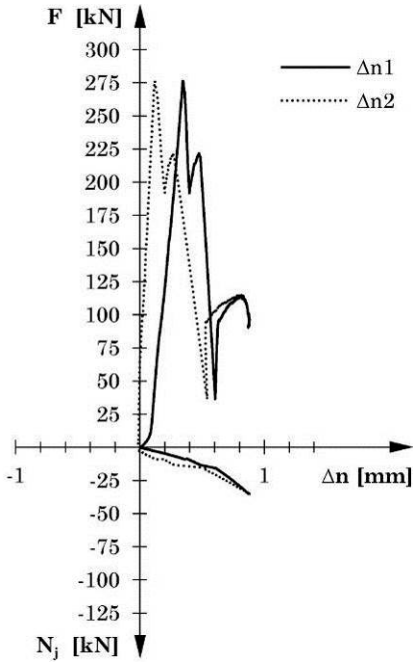
Weggeregelte Abscherversuche (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

Kennzeichnung	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Kontaktflächen		F_{ult}	$N_{j,ult}$	$\Delta s_{1,ult}$	$\Delta s_{2,ult}$	$\Delta n_{1,ult}$	$\Delta n_{2,ult}$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
FZ-4-V_S4	24.06.2014	231	50,9	95,1	276,4	-8,6	0,954	0,955	0,347	0,119
FZ-7-V_S4	24.06.2014	231	49,5	95,1	201,2	-4,2	1,077	1,093	0,511	0,244
FZ-8-V_S4	14.04.2014	160	49,8	94,7	268,4	-7,3	1,237	1,175	0,583	0,277
FZ-9-V_S4	14.04.2014	160	50,4	95,0	212,6	-2,7	1,073	1,024	0,453	0,143
FZ-10-V_S4 [1)]	14.04.2014	160	49,9	95,0	173,0	-22,2	1,581	1,470	0,813	0,494
FZ-12-V_S4	14.04.2014	160	49,9	94,7	226,2	-7,4	1,095	1,008	0,493	0,219
FZ-21-V_S4 [1)]	17.04.2014	163	50,5	95,0	218,3	-30,6	1,598	1,610	0,717	0,400
Mittelwert	m				237,0		1,087	1,051	0,477	0,200
Standardabweichung	s				33,66		0,101	0,085	0,087	0,067
Variationskoeffizient	v				14,20 %		9,25 %	8,10 %	18,22 %	33,62 %

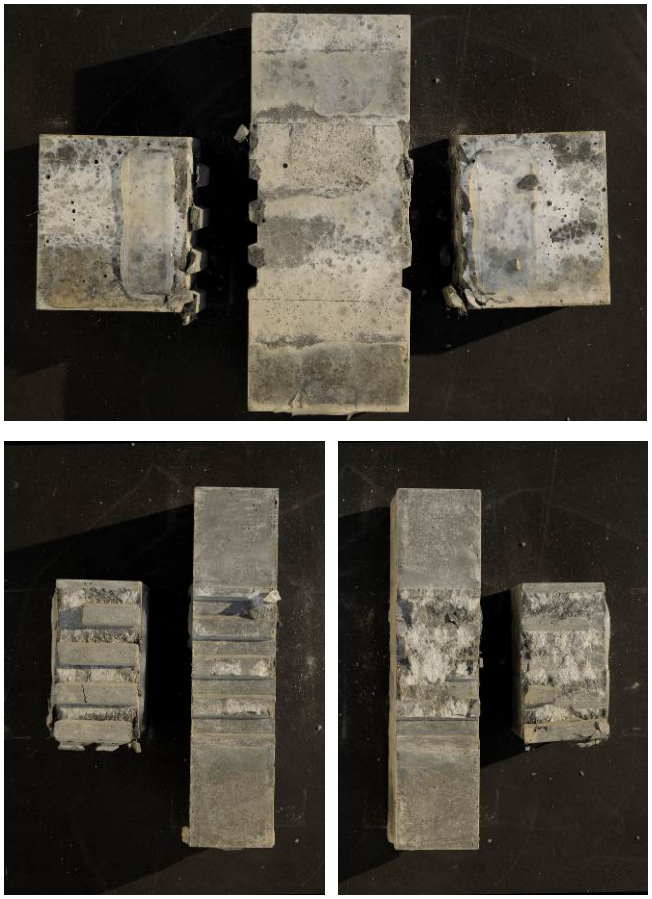
[1)] Die Ergebnisse des Versuchskörpers wurden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

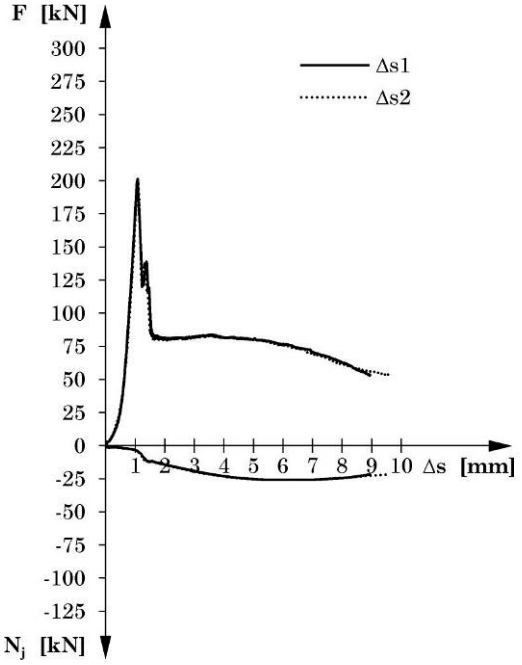


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

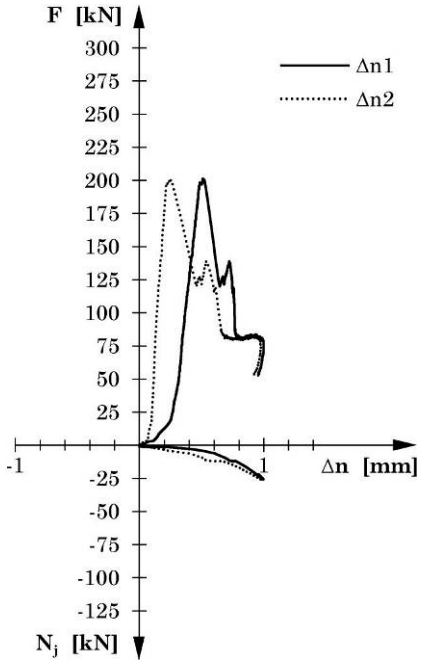


c) Bruchbild

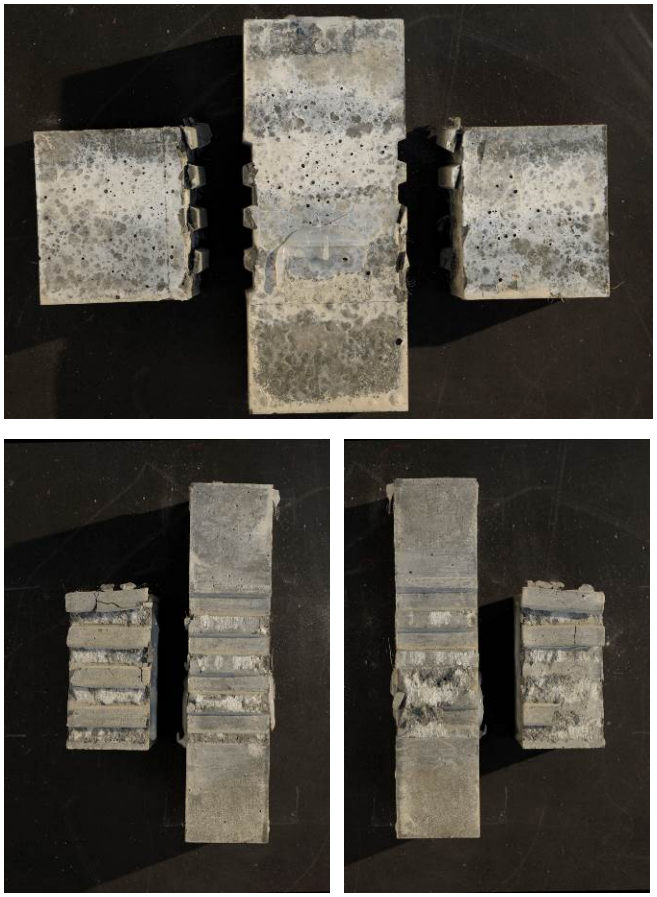
FZ-4-V_S4



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

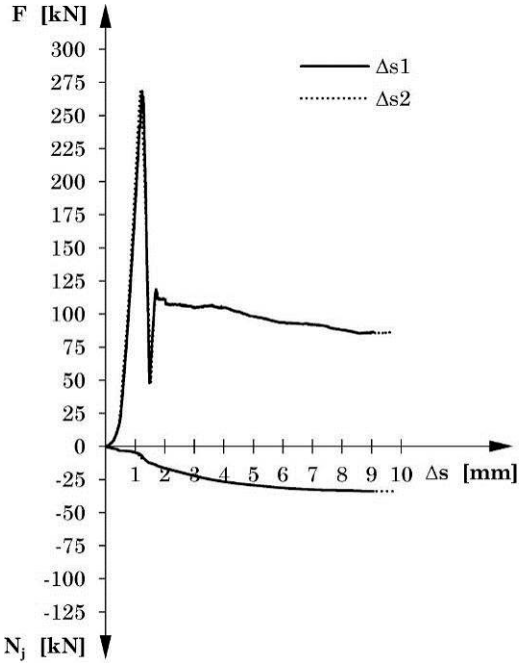


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

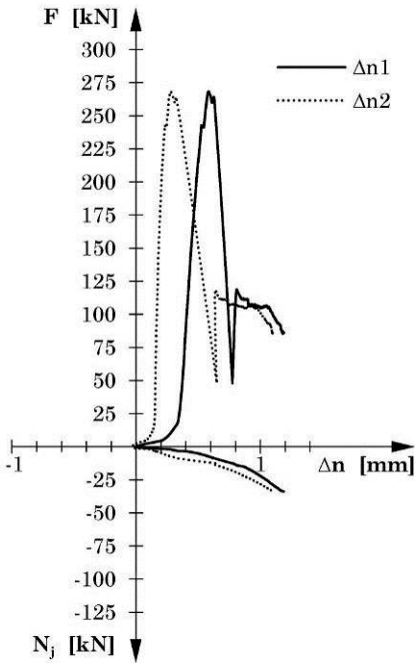


c) Bruchbild

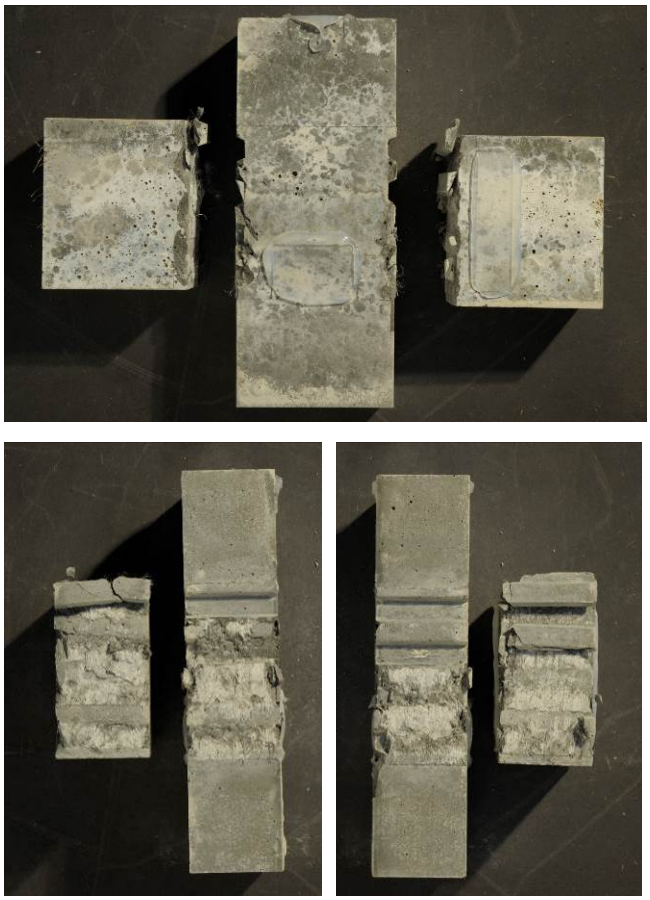
FZ-7-V_S4



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

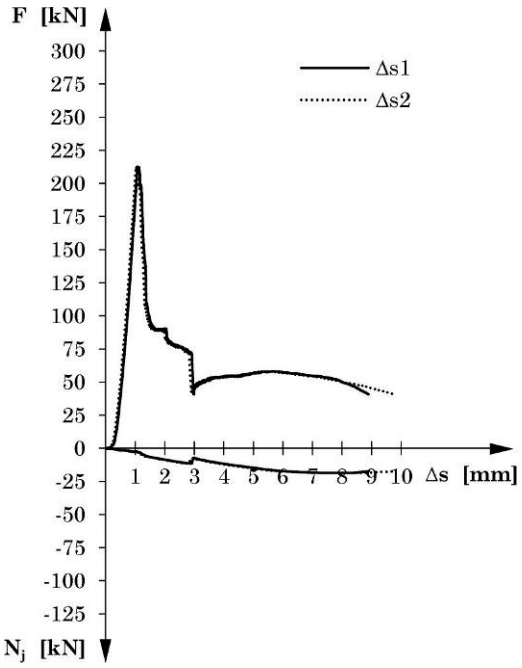


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

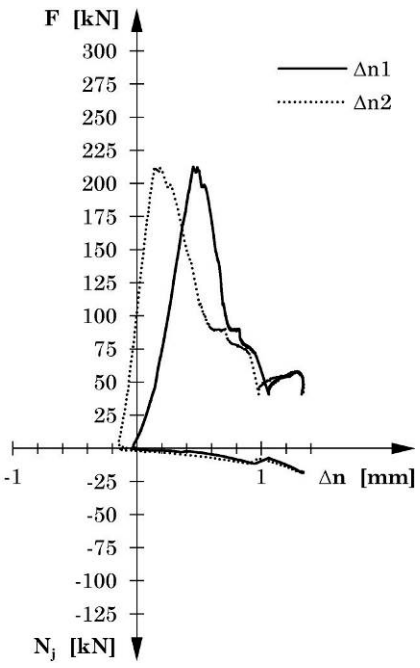


c) Bruchbild

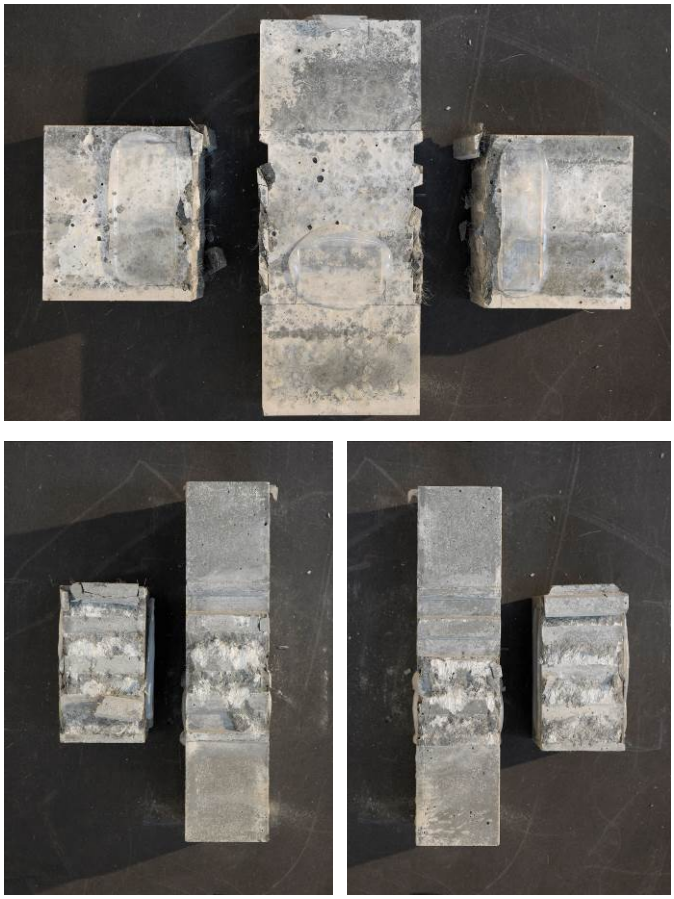
FZ-8-V_S4



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

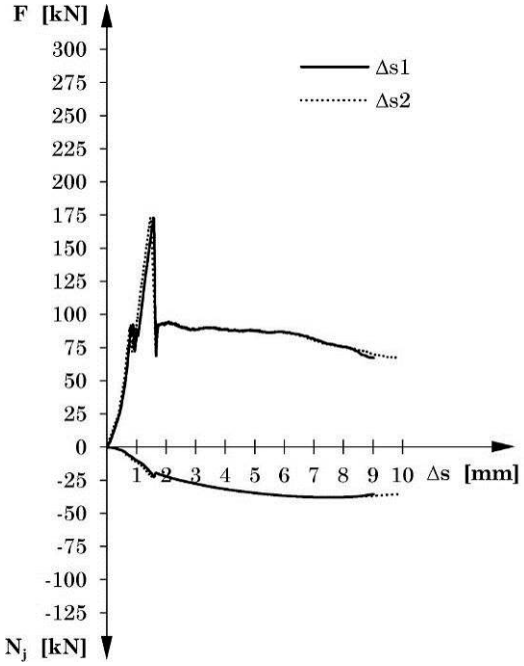


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

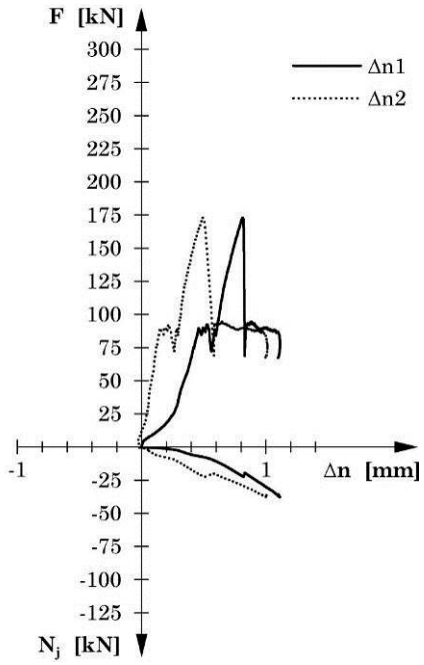


c) Bruchbild

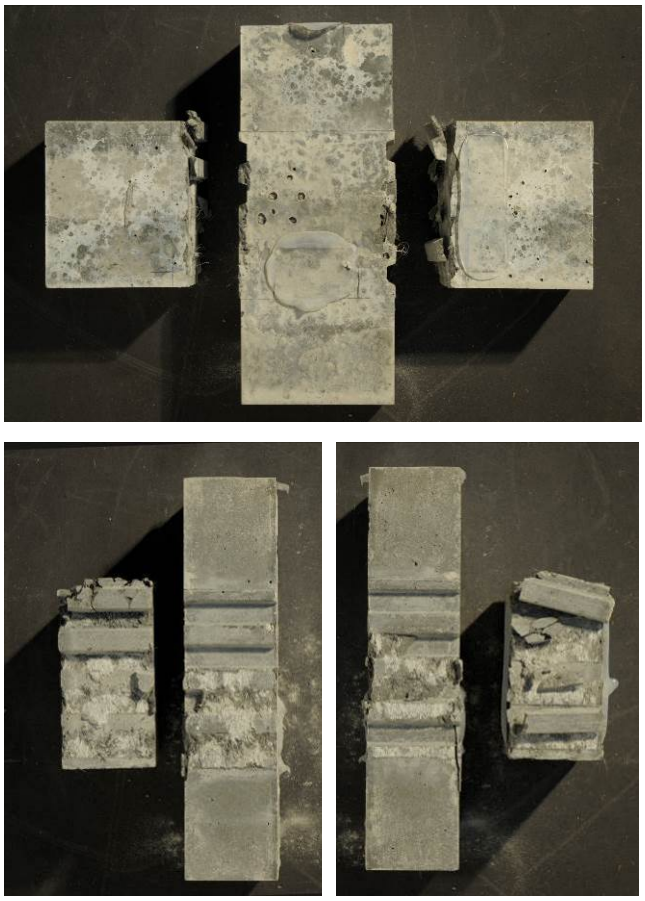
FZ-9-V_S4



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

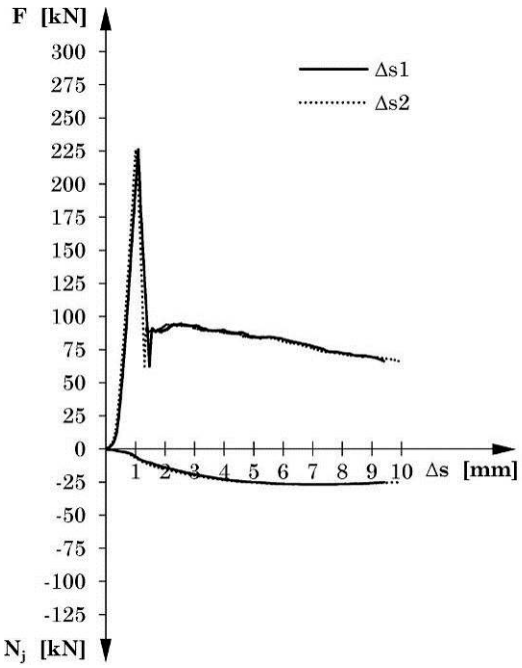


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

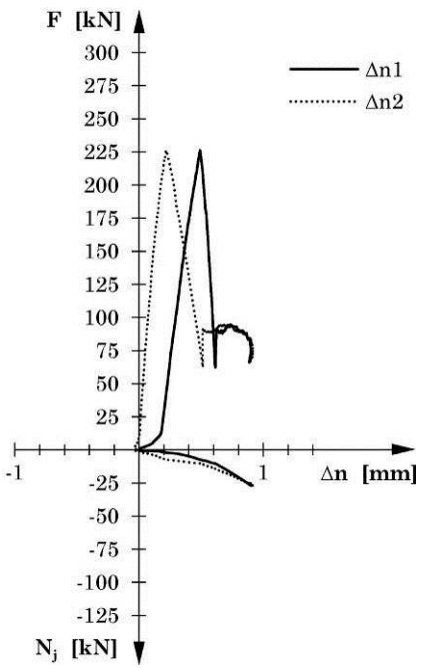


c) Bruchbild

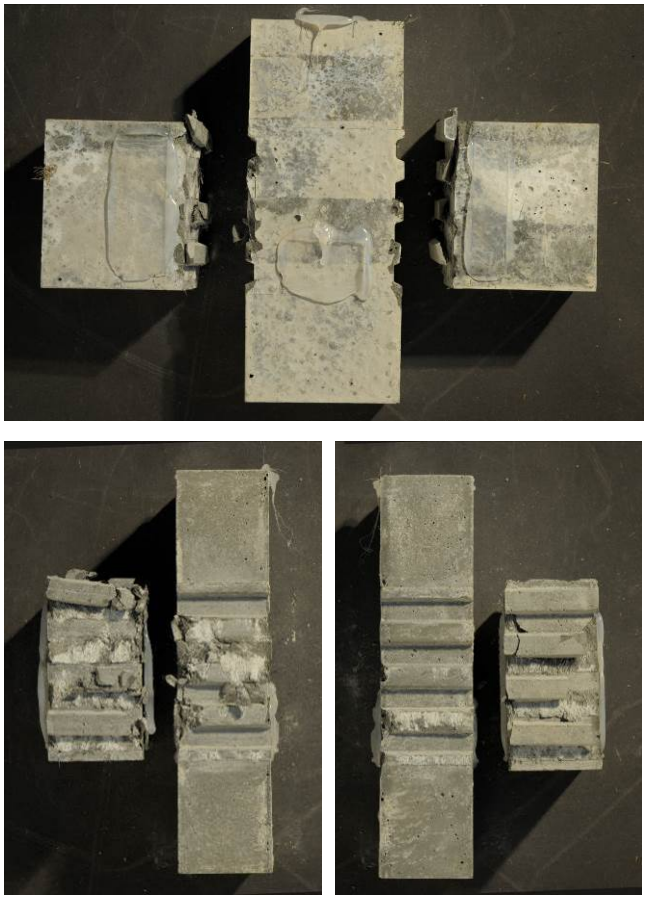
FZ-10-V_S4



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

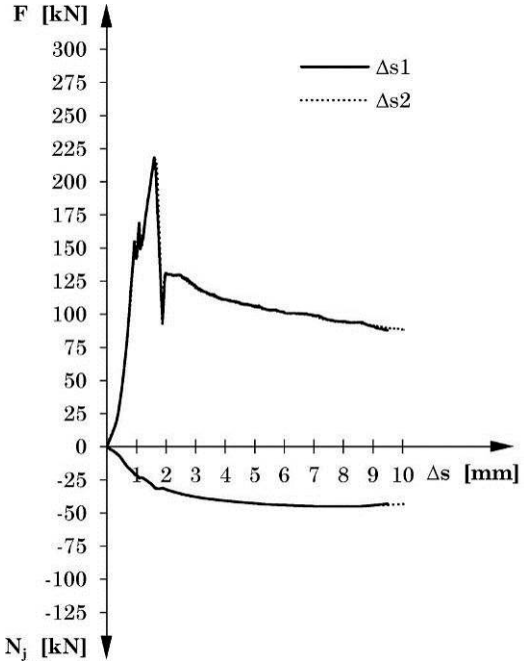


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

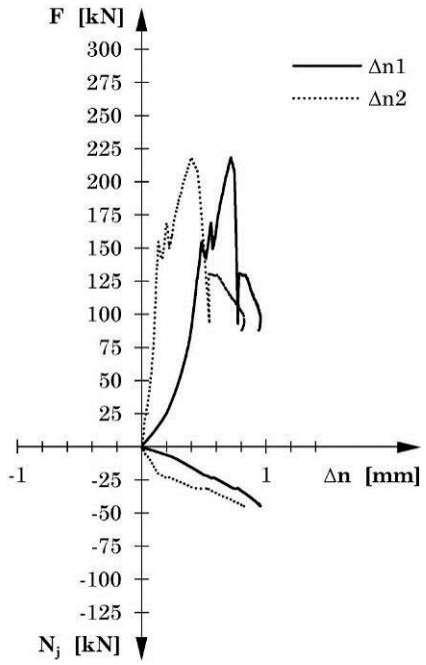


c) Bruchbild

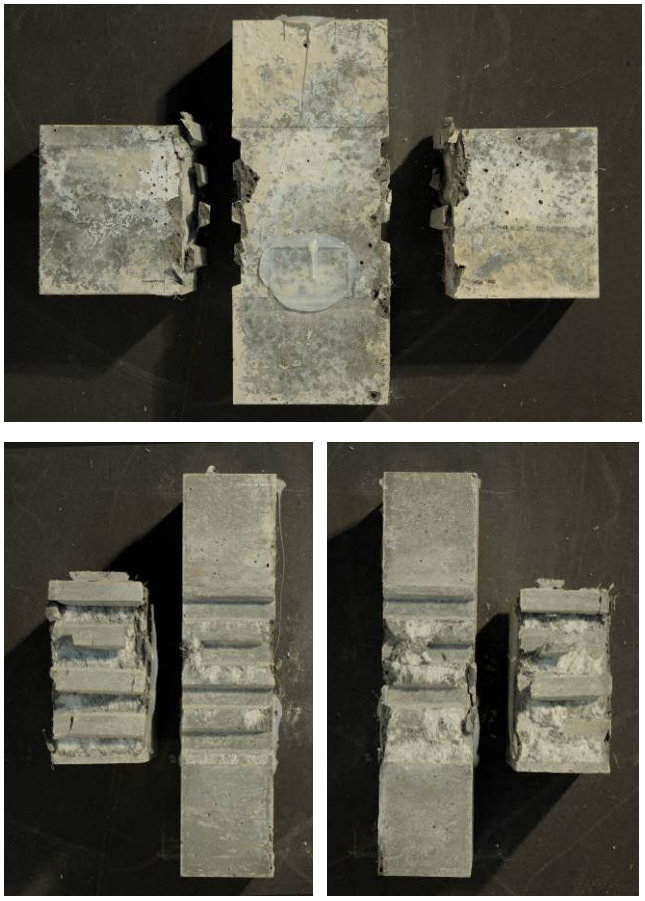
FZ-12-V_S4



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



c) Bruchbild

FZ-21-V_S4

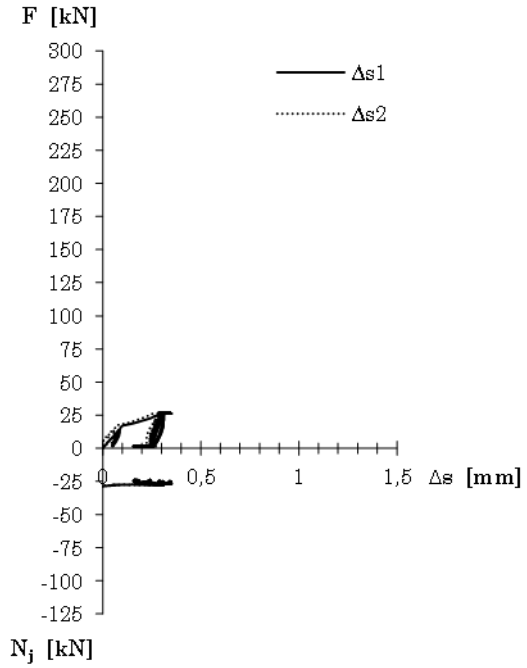
D.4 Abscherversuche unter zyklischer Belastung

D.4.1 Versuchskörper mit sehr glatter Fuge

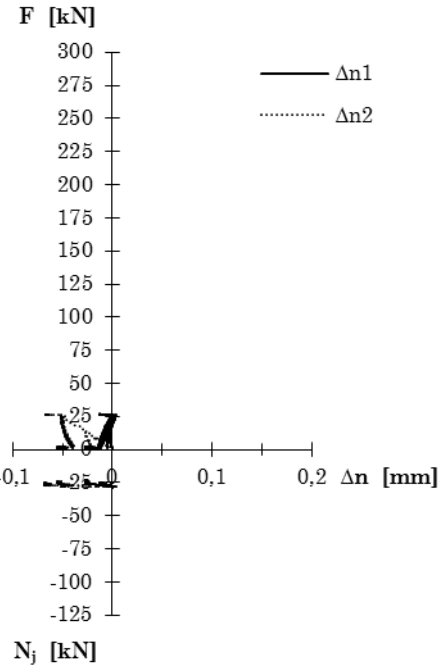
D.4.1.1 SG_S1 (C12 und C13)

Kraftgeregelte Abscherversuche unter zyklischer Belastung

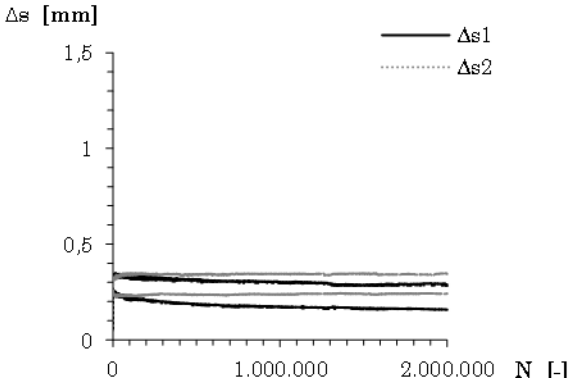
Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Prüfdatum	Alter	F_r	Belastungs-horizonte		f_p	N_f	Bemerkung
				F_o	F_u			
		[Tage]	[kN]	[kN]	[kN]	[Hz]	[-]	
FZ-7-SG_S1 (0,90 : 0,05)	18.07.2014	282	29,3	26,4	1,5	10	2.000.501	Durchläufer
FZ-21-SG_S1 (0,90 : 0,05)	19.05.2014	222	29,3	26,4	1,5	0,1	0	Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 22,9 kN)
FZ-13-SG_S1 (0,85 : 0,05)	15.05.2014	218	29,3	24,9	1,5	10	2.000.002	Durchläufer
FZ-17-SG_S1 (0,80 : 0,05)	12.05.2014	215	29,3	23,4	1,5	10	2.000.001	Durchläufer
FZ-9-SG_S1 (0,80 : 0,05)	05.05.2014	208	29,3	23,4	1,5	0,1	0	Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 22,9 kN)



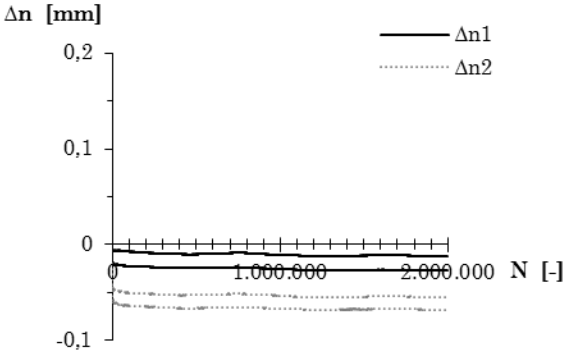
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

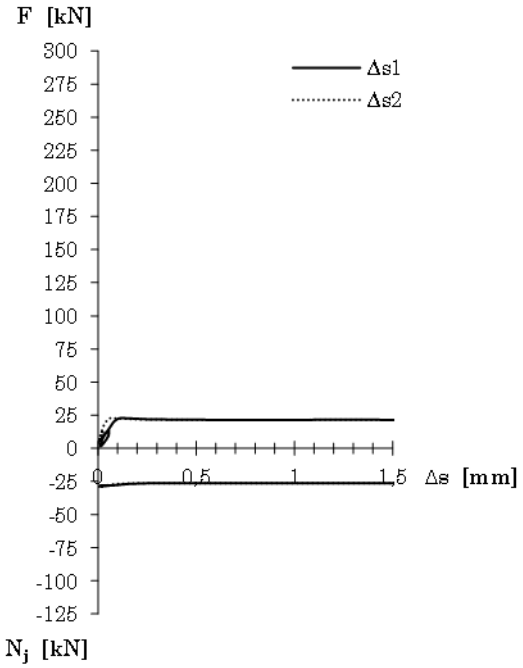


c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

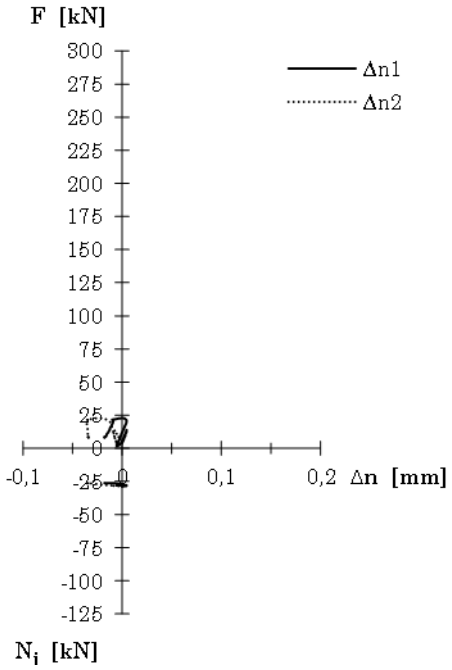


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

FZ-7-SG_S1 (0,90 : 0,05)



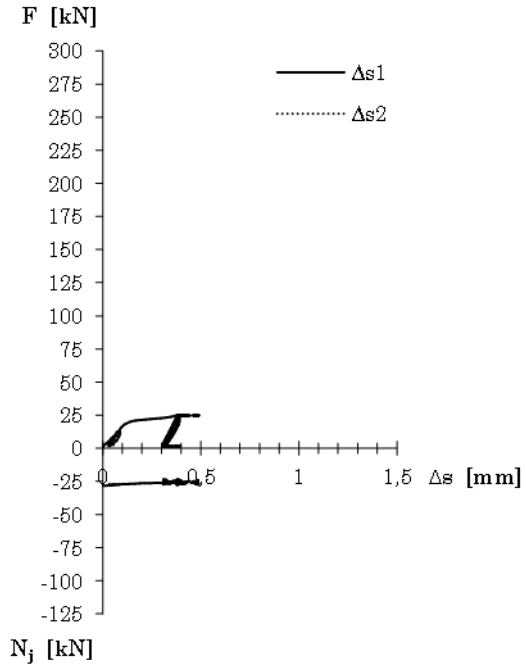
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



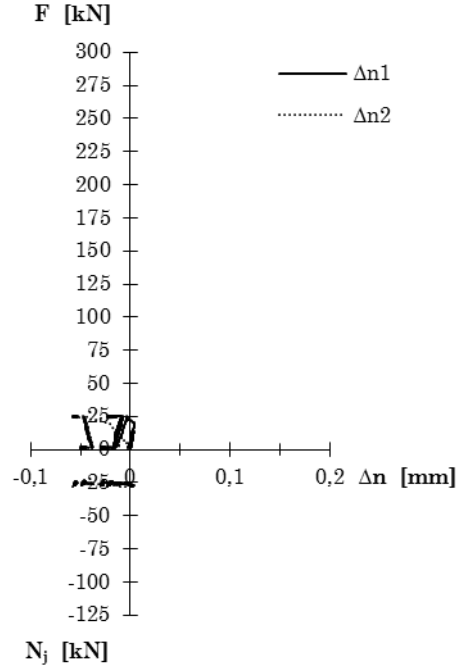
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

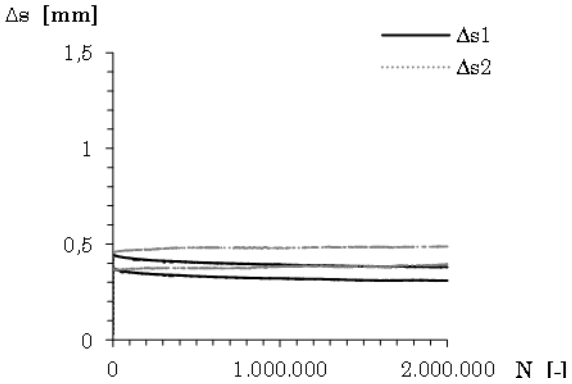
FZ-21-SG_S1 (0,90 : 0,05)



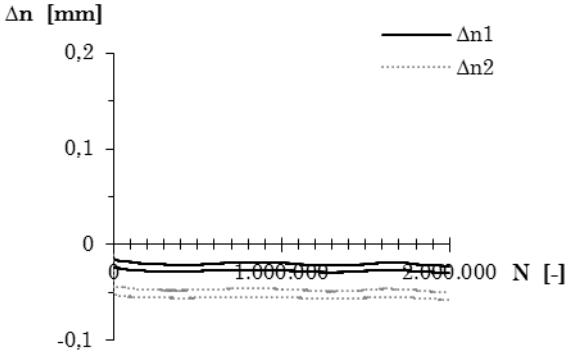
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

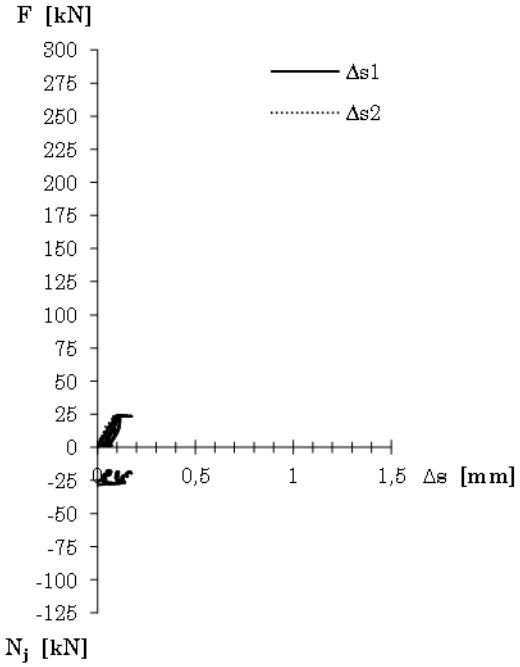


c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

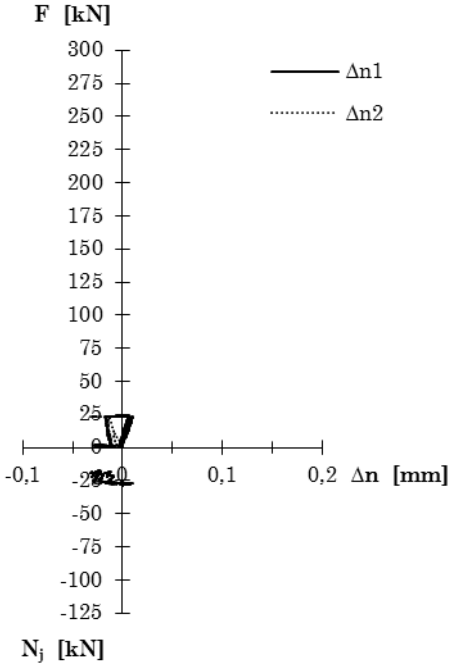


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

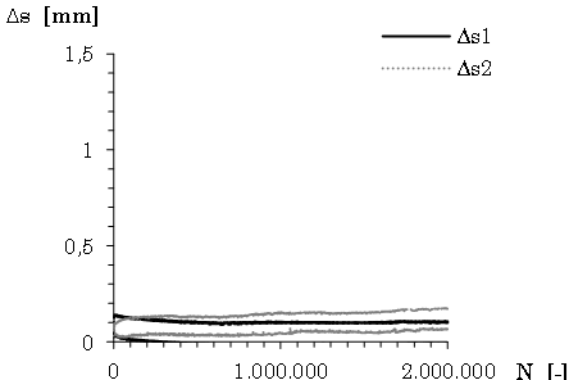
FZ-13-SG_S1 (0,85 : 0,05)



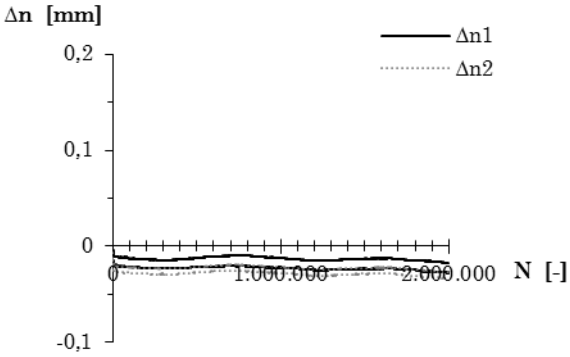
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

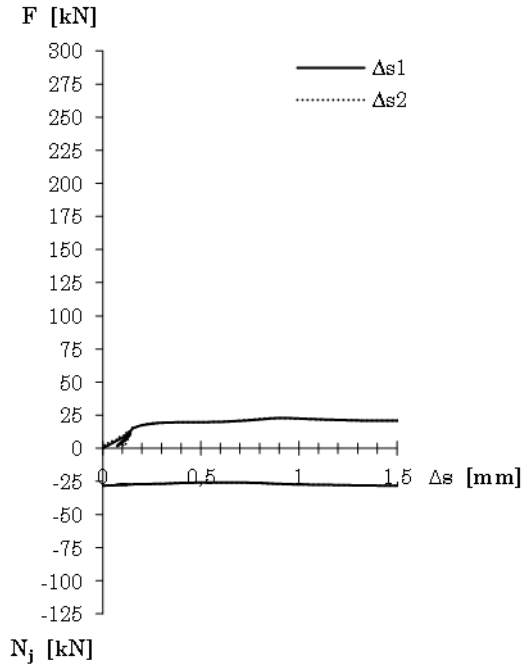


c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

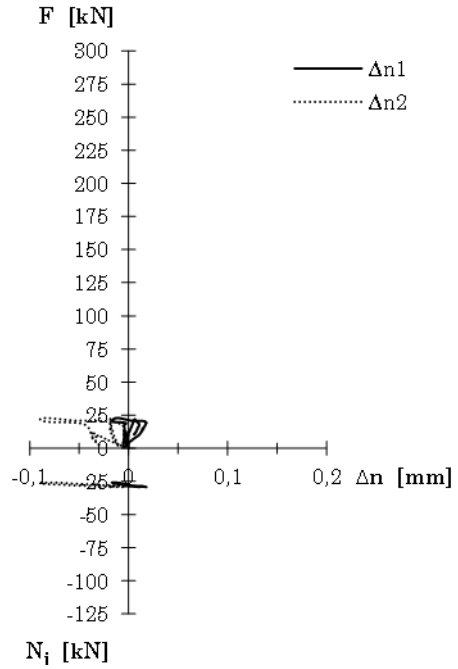


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

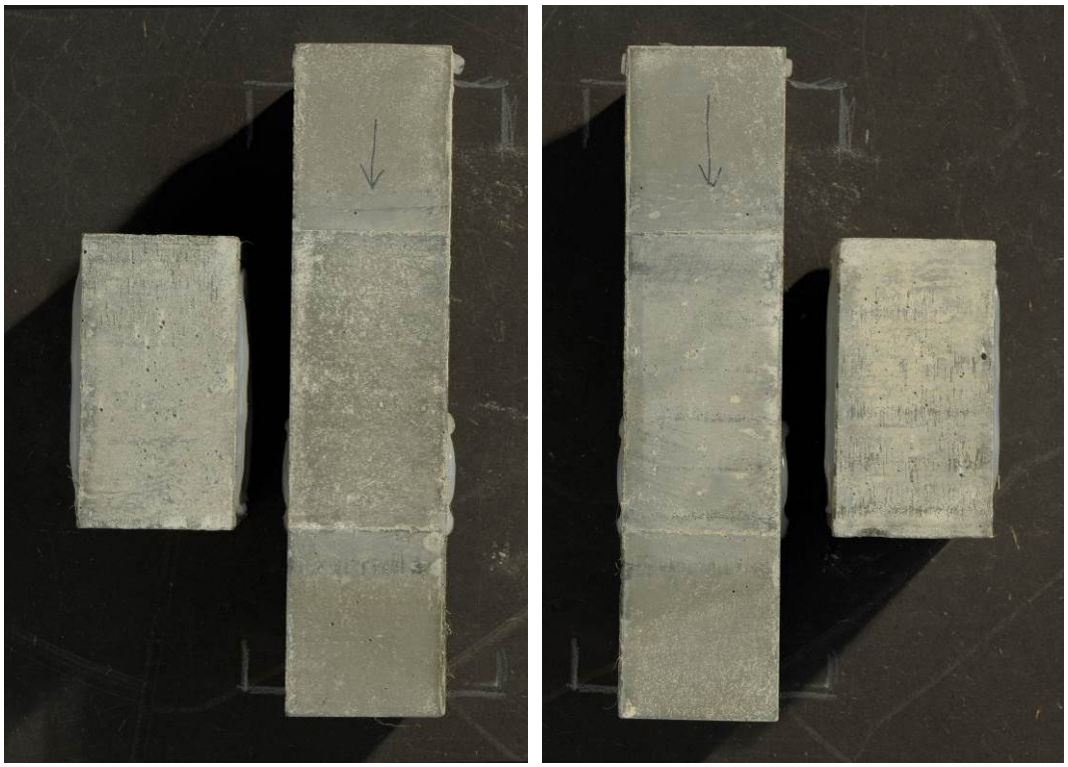
FZ-17-SG_S1 (0,80 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

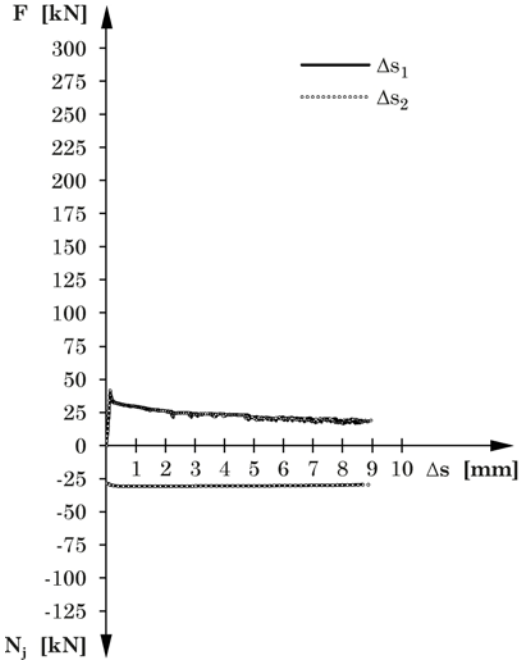


c) Bruchbild

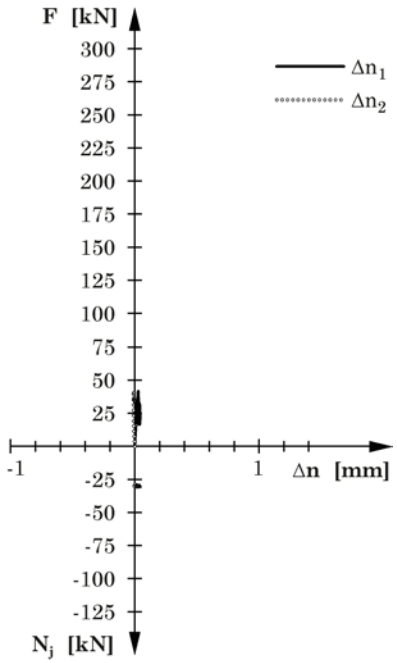
FZ-9-SG_S1 (0,80 : 0,05)

Weggeregelte Abscherversuche unter statischer Belastung zur Prüfung der Resttragfähigkeit (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Kontaktflächen		F_r	$N_{j,r}$	$\Delta s_{1,r}$	$\Delta s_{2,r}$	$\Delta n_{1,r}$	$\Delta n_{2,r}$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
FZ-7-SG_S1 (0,90 : 0,05)	21.07.2014	285	50,4	94,7	41,7	-29,7	0,127	0,130	0,027	-0,012
FZ-13-SG_S1 (0,85 : 0,05)	19.05.2014	222	50,0	95,1	46,8	-28,9	0,230	0,209	0,019	-0,015
FZ-17-SG_S1 (0,80 : 0,05)	15.05.2014	218	49,7	95,5	50,8	-29,4	0,234	0,173	0,024	-0,012



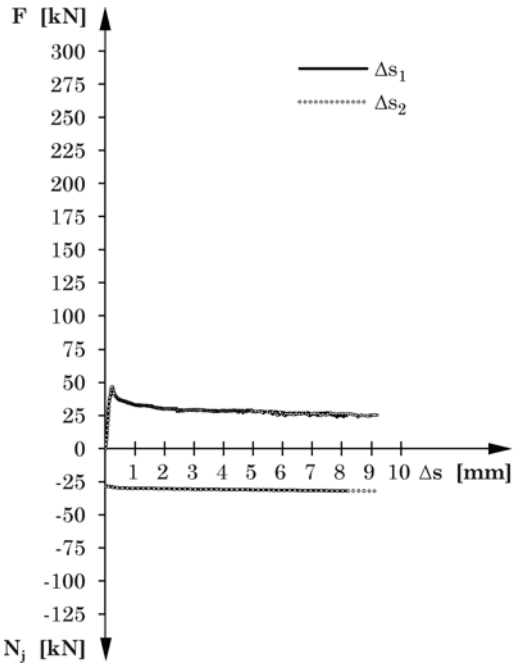
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



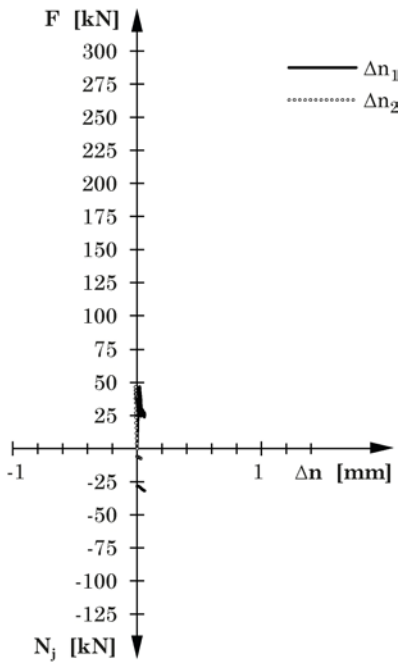
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

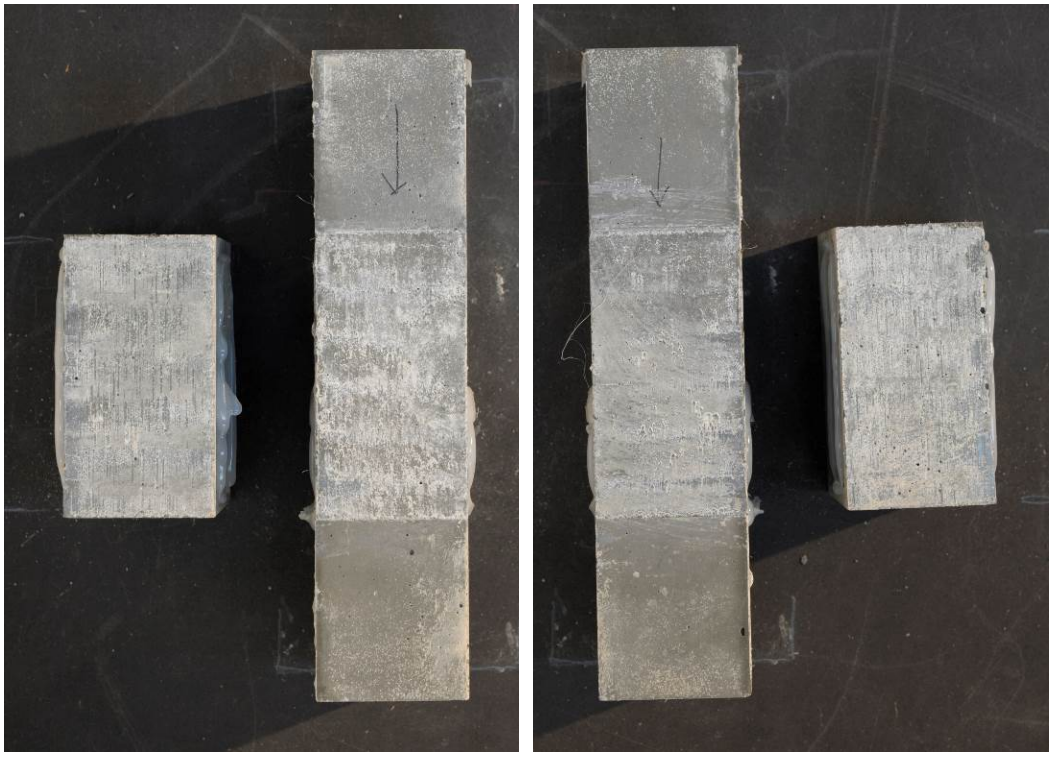
FZ-7-SG_S1 (0,90 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung (Verschiebung parallel zur Fuge)

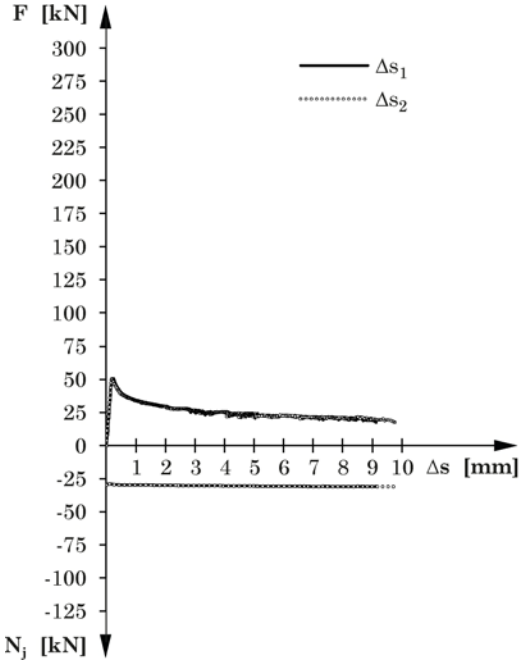


b) Kraft-Verformungs-Beziehung (Verformung normal zur Fuge)

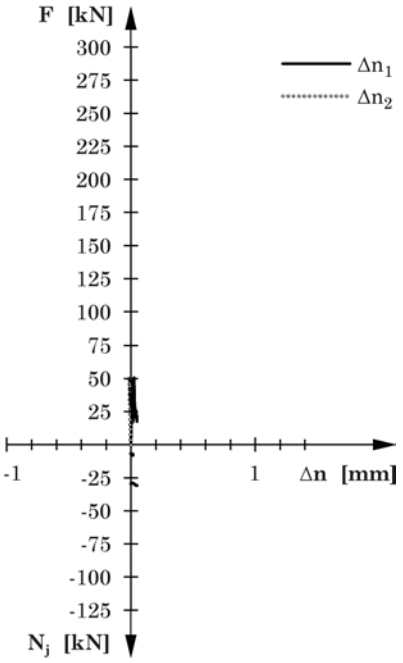


c) Bruchbild

FZ-13-SG_S1 (0,85 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

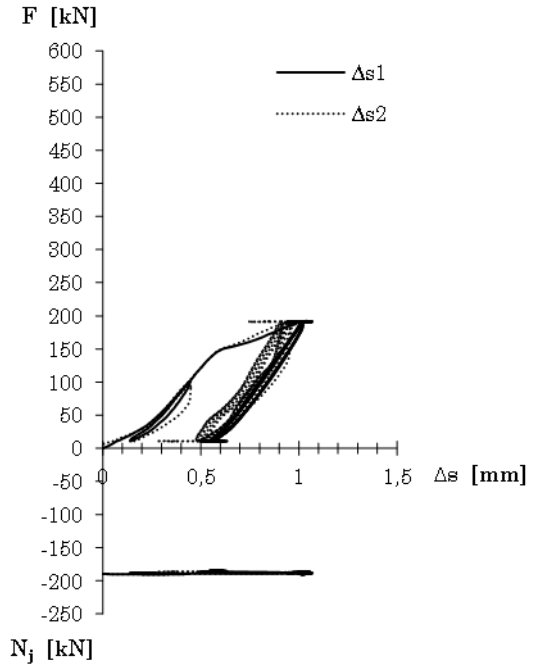
c) Bruchbild

FZ-17-SG_S1 (0,80 : 0,05)

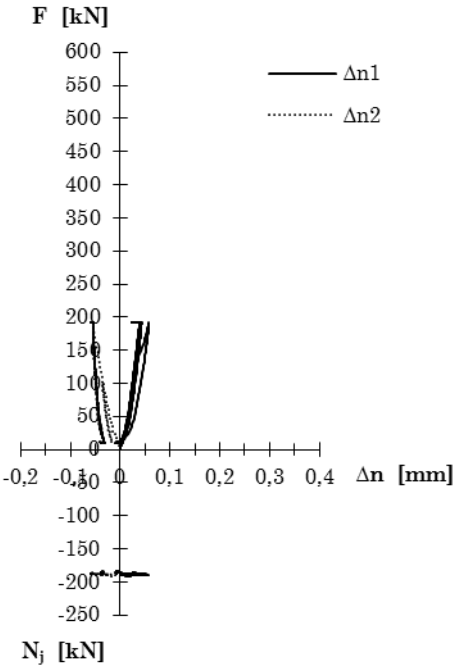
D.4.1.2 SG_S2 (C14 und C15)

Kraftgeregelte Abscherversuche unter zyklischer Belastung

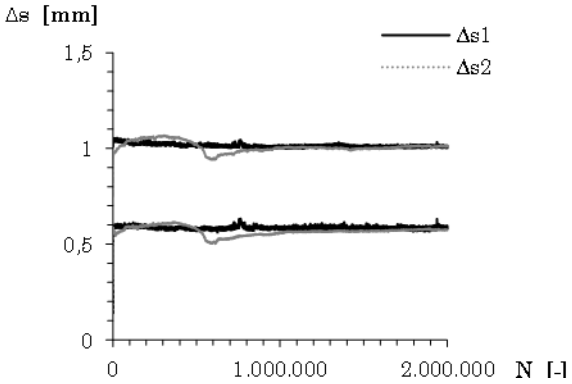
Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Prüfdatum	Alter	F_r	Belastungs-horizonte		f_p	N_f	Bemerkung
				F_o	F_u			
		[Tage]	[kN]	[kN]	[kN]	[Hz]	[-]	
FZ-23-SG_S2 (0,90 : 0,05)	10.04.2014	177	215,6	194,0	10,8	10	2.000.003	Durchläufer
FZ-14-SG_S2 (0,85 : 0,05)	07.04.2014	174	215,6	183,3	10,8	10	2.000.004	Durchläufer
FZ-5-SG_S2 (0,80 : 0,05)	02.04.2014	169	215,6	172,5	10,8	10	2.000.008	Durchläufer



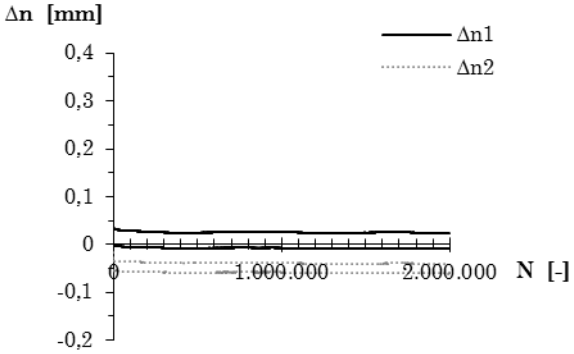
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

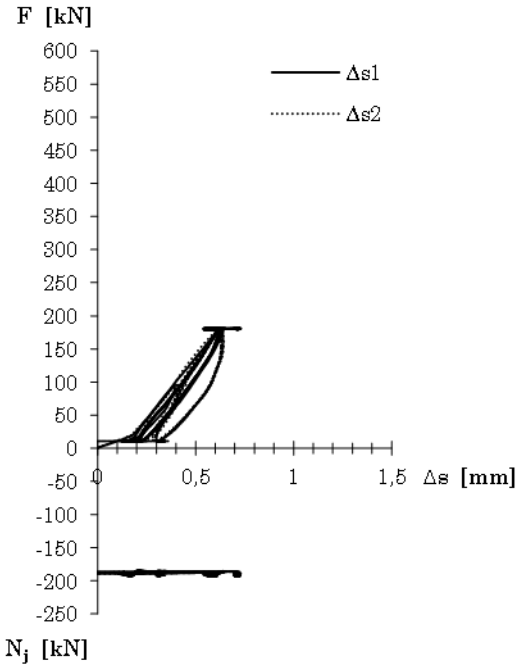


c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

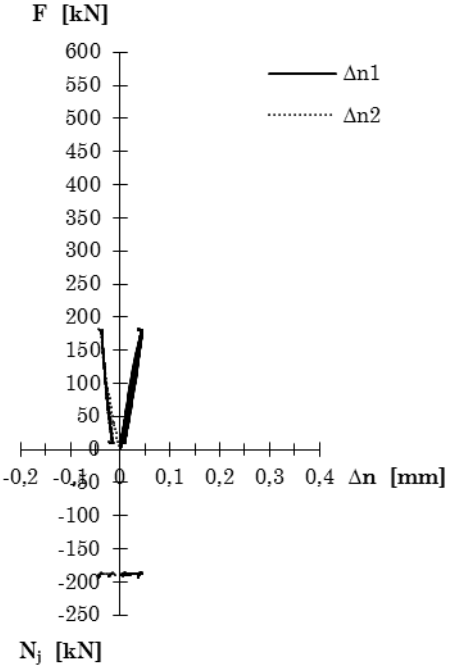


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

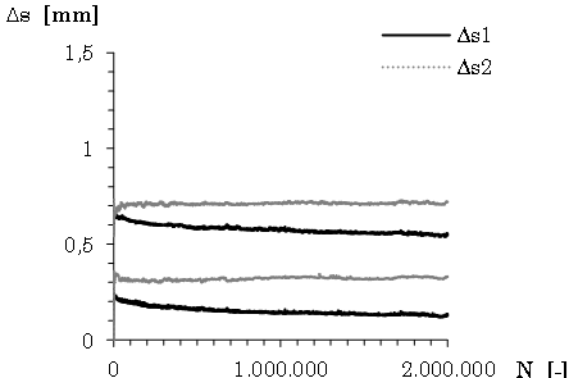
FZ-23-SG_S2 (0,90 : 0,05)



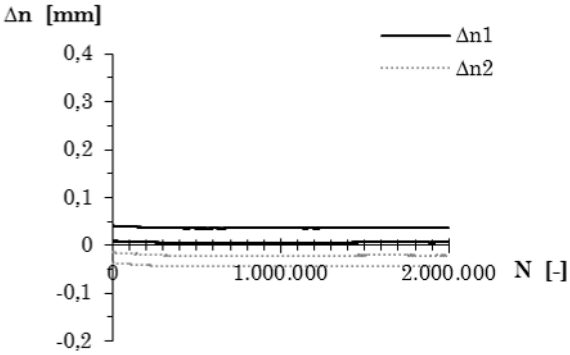
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

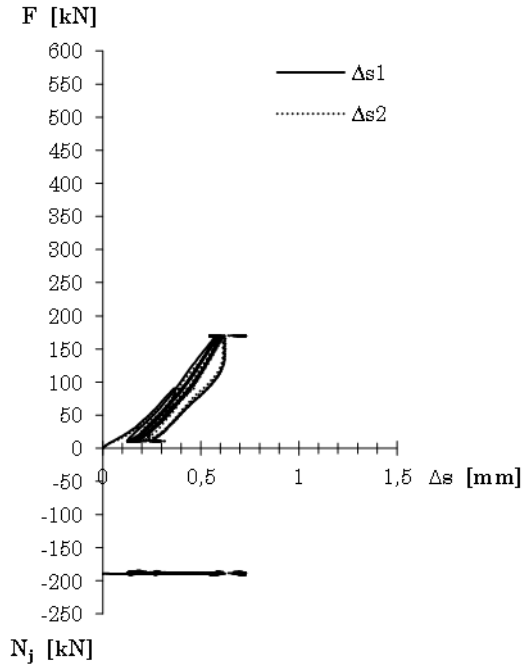


c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

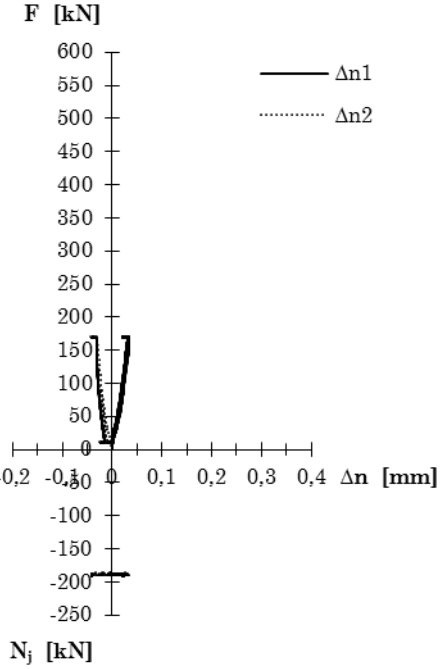


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

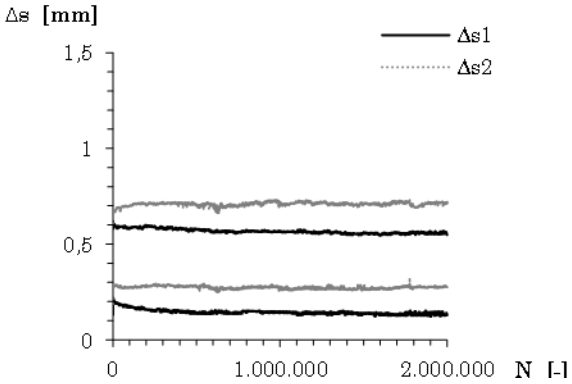
FZ-14-SG_S2 (0,85 : 0,05)



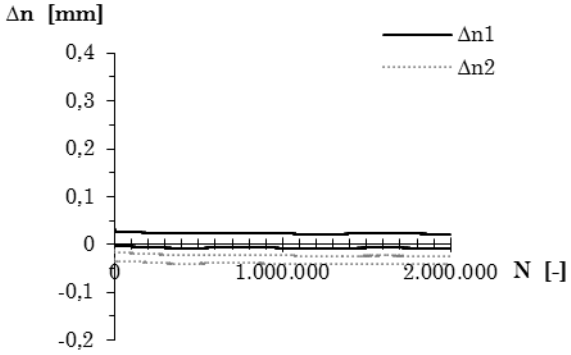
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

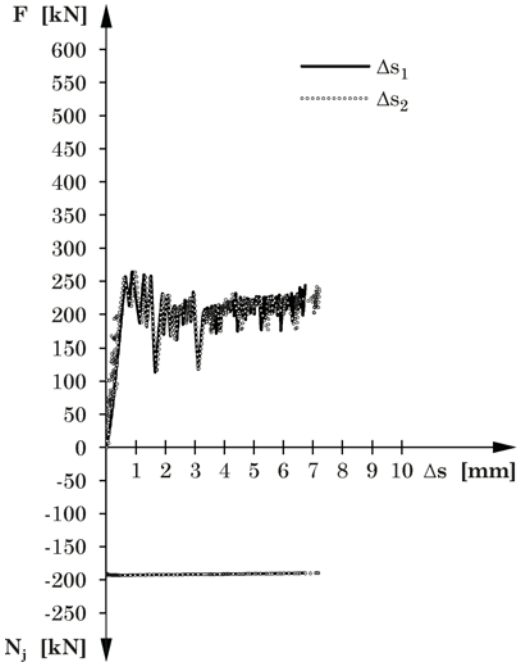


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

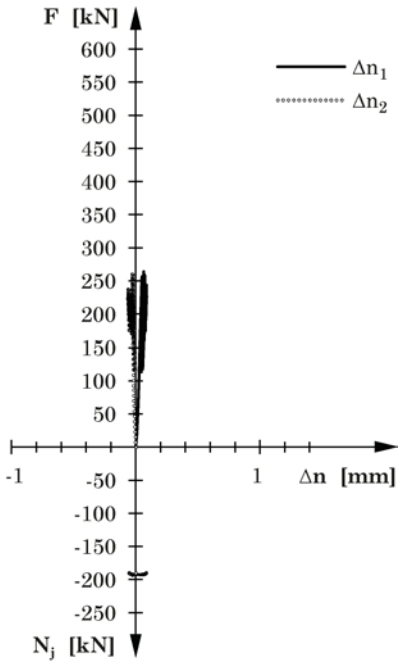
FZ-5-SG_S2 (0,80 : 0,05)

Weggeregelte Abscherversuche unter statischer Belastung zur Prüfung der Resttragfähigkeit (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Kontaktflächen		F_r	$N_{j,r}$	$\Delta s_{1,r}$	$\Delta s_{2,r}$	$\Delta n_{1,r}$	$\Delta n_{2,r}$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
FZ-23-SG_S2 (0,90 : 0,05)	14.04.2014	181	49,7	94,9	256,7	-193,2	0,648	0,601	0,051	-0,027
FZ-14-SG_S2 (0,85 : 0,05)	10.04.2014	177	49,2	94,6	275,7	-191,9	0,682	0,613	0,056	-0,032
FZ-5-SG_S2 (0,80 : 0,05)	07.04.2014	174	48,7	94,8	257,3	-191,6	0,716	0,732	0,051	-0,028



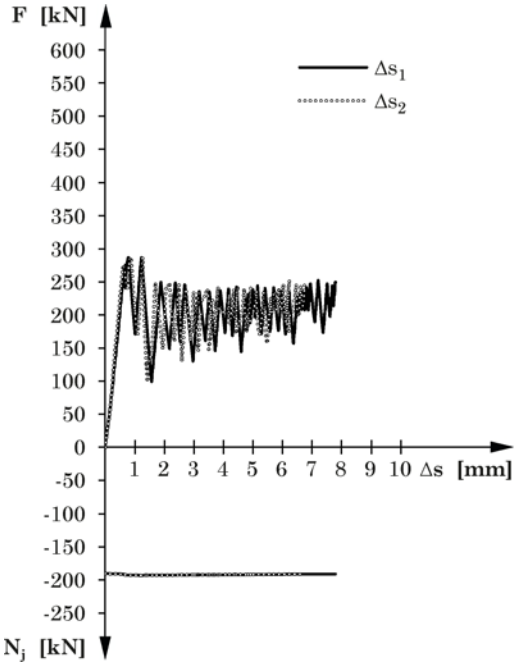
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



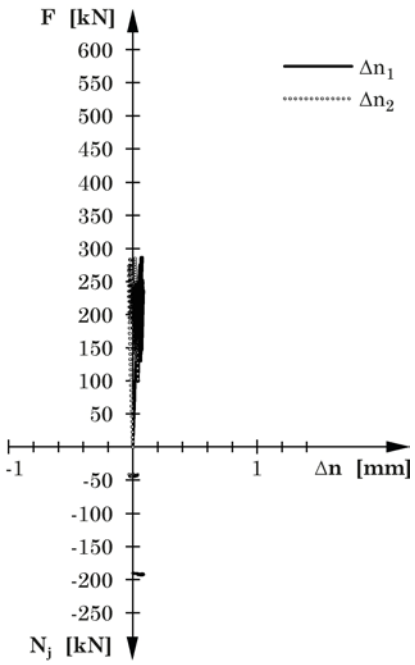
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

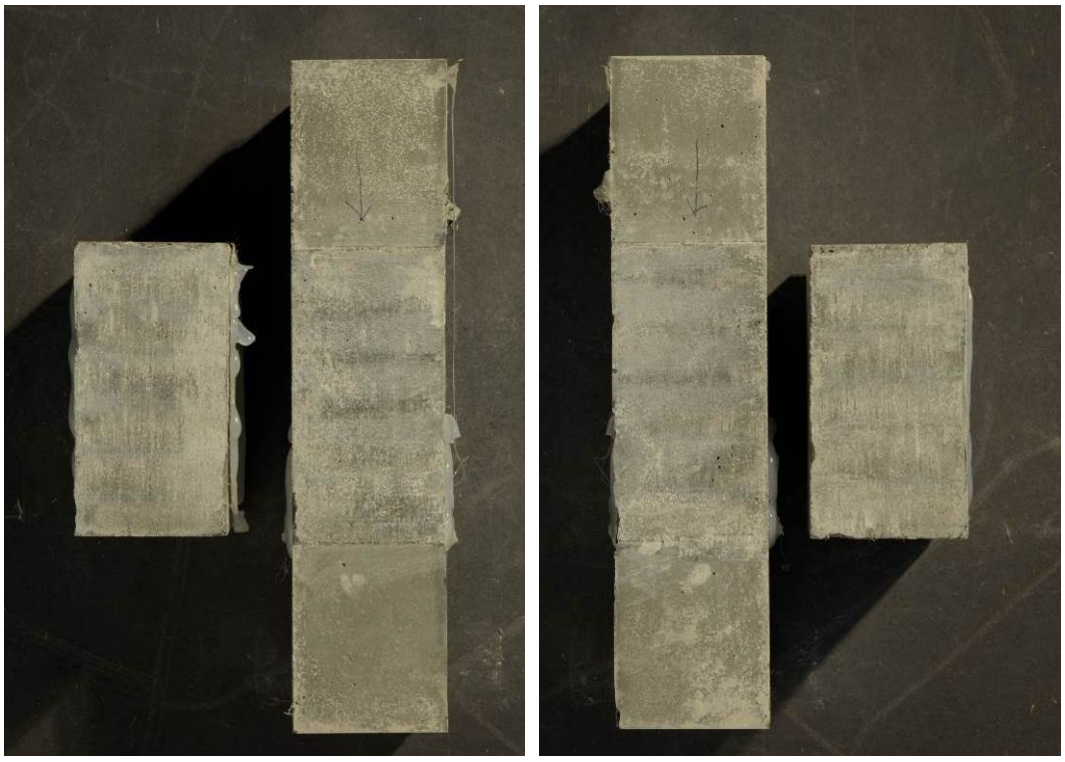
FZ-23-SG_S2 (0,90 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

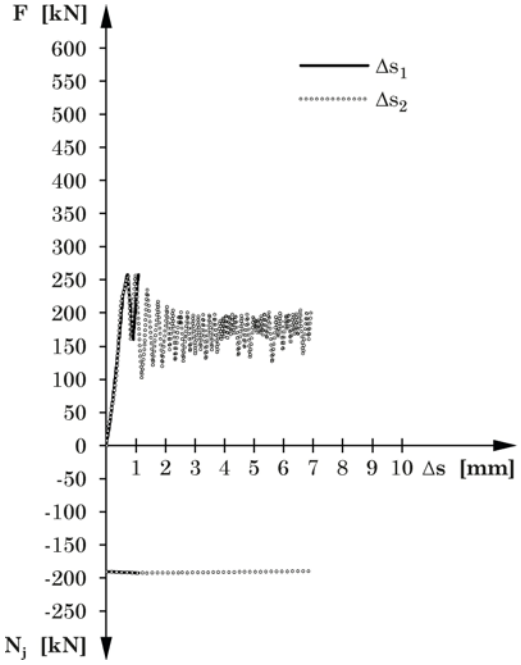


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

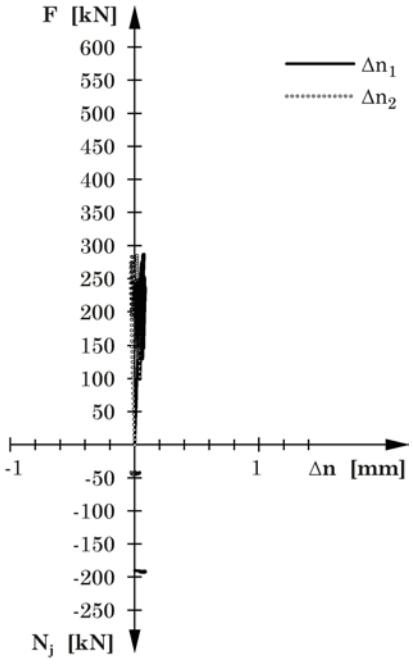


c) Bruchbild

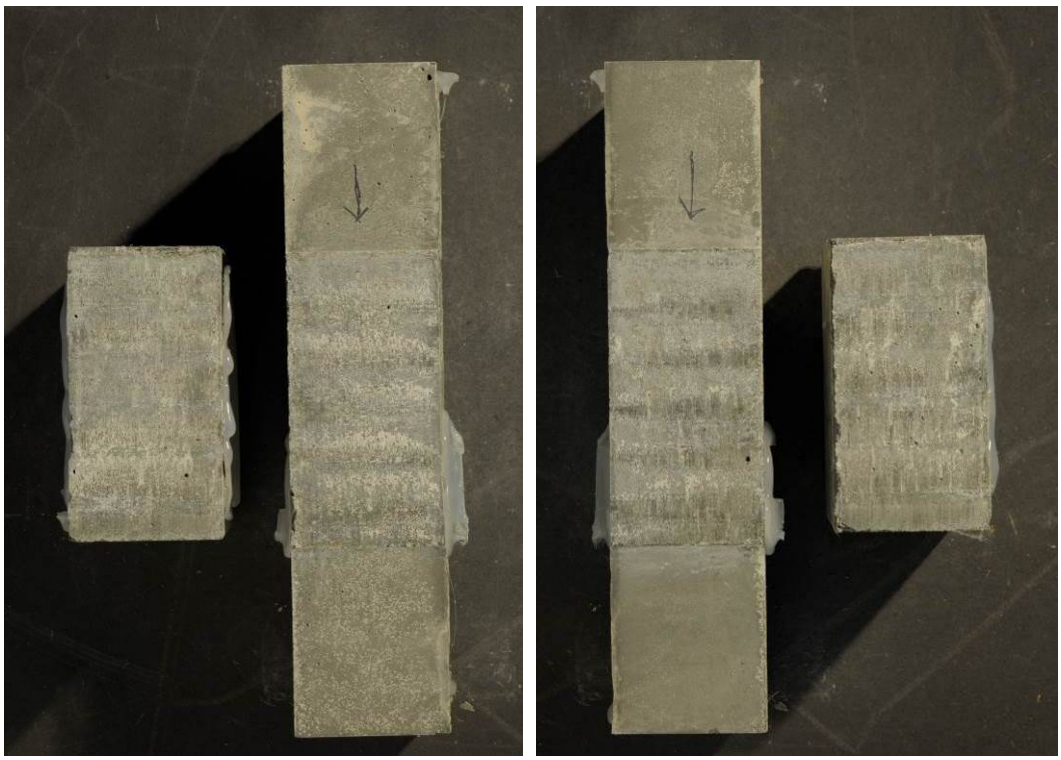
FZ-14-SG_S2 (0,85 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung (Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung (Verformung normal zur Fuge)



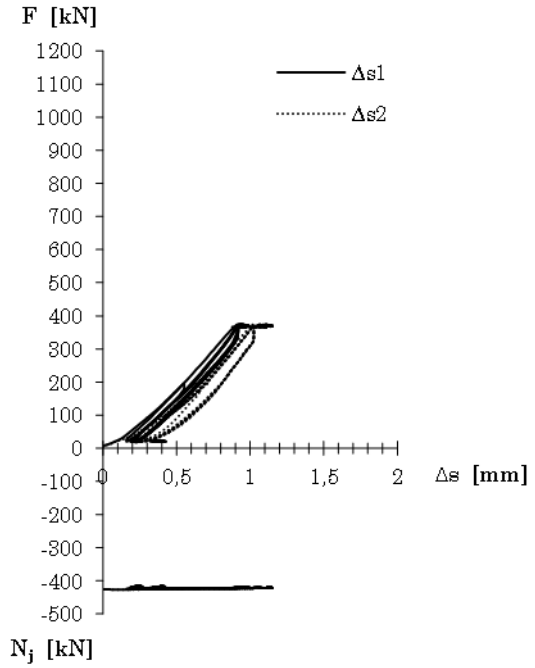
c) Bruchbild

FZ-5-SG_S2 (0,80 : 0,05)

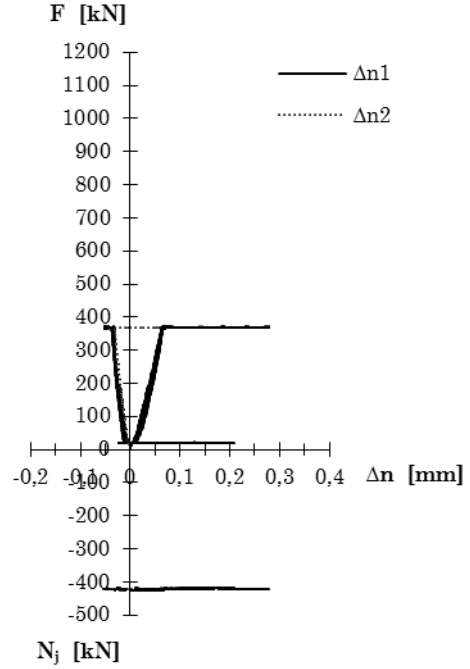
D.4.1.3 SG_S3 (C16 und C17)

Kraftgeregelte Abscherversuche unter zyklischer Belastung

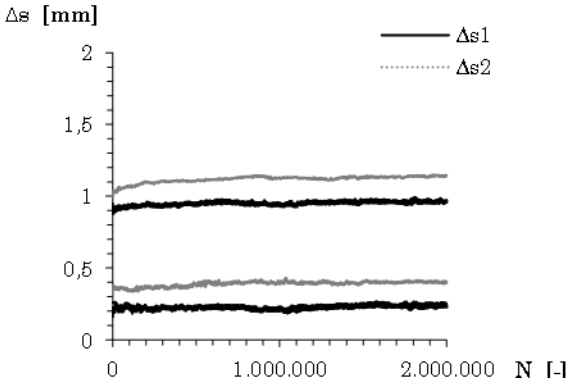
Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Prüfdatum	Alter	F_r	Belastungs-horizonte		f_p	N_f	Bemerkung
				F_o	F_u			
		[Tage]	[kN]	[kN]	[kN]	[Hz]	[-]	
FZ-18-SG_S3 (0,90 : 0,05)	10.06.2014	231	412,2	371,0	20,6	10	2.000.000	Durchläufer
FZ-12-SG_S3 (0,90 : 0,05)	10.06.2014	231	412,2	371,0	20,6	1 - 10	150	Versagen
FZ-11-SG_S3 (0,85 : 0,05)	05.06.2014	226	412,2	350,4	20,6	10	2.000.000	Durchläufer
FZ-14-SG_S3 (0,80 : 0,05)	02.06.2014	223	412,2	329,8	20,6	10	2.000.005	Durchläufer



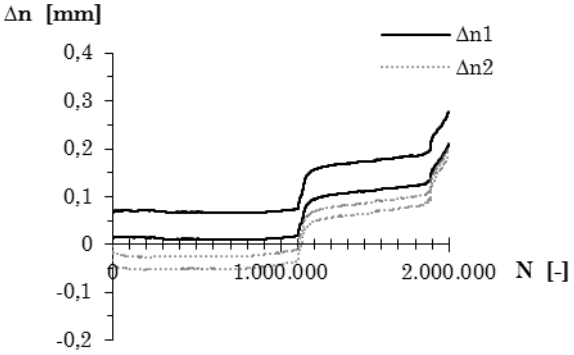
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

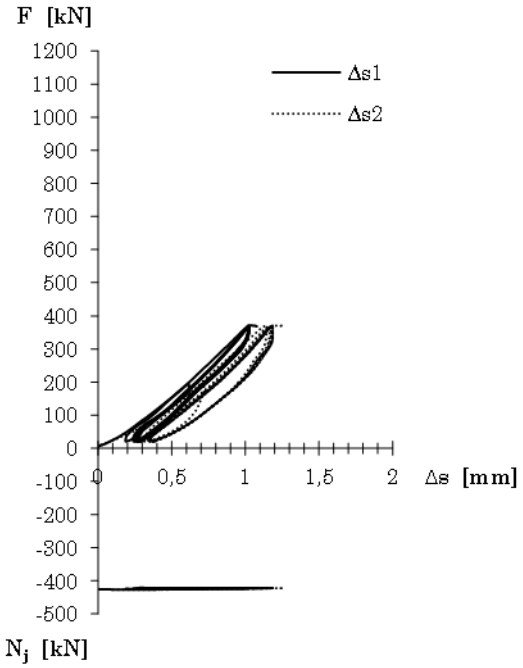


c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

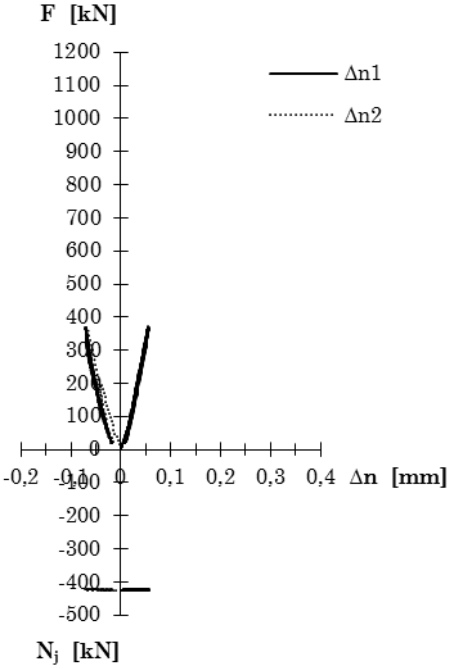


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

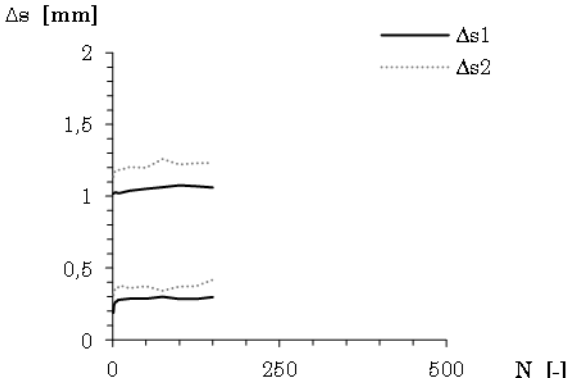
FZ-18-SG_S3 (0,90 : 0,05)



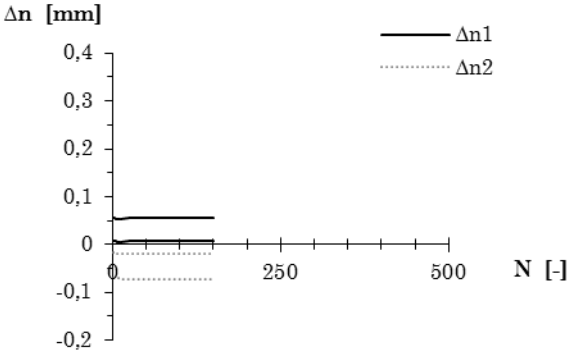
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



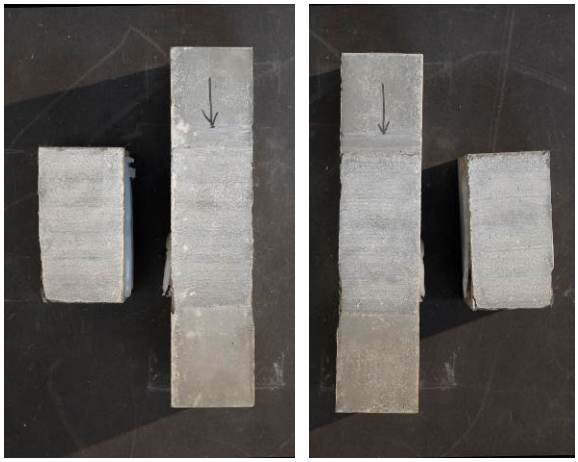
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

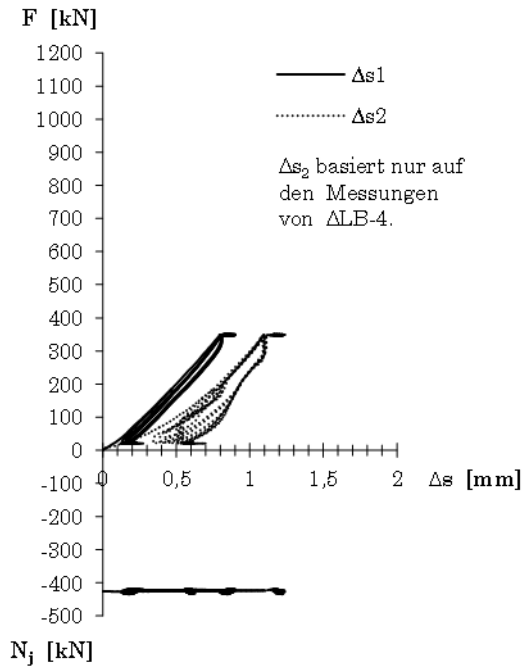


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

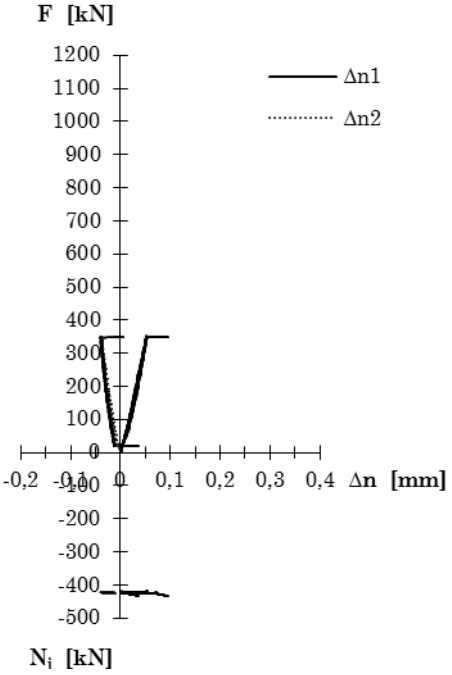


e) Bruchbild

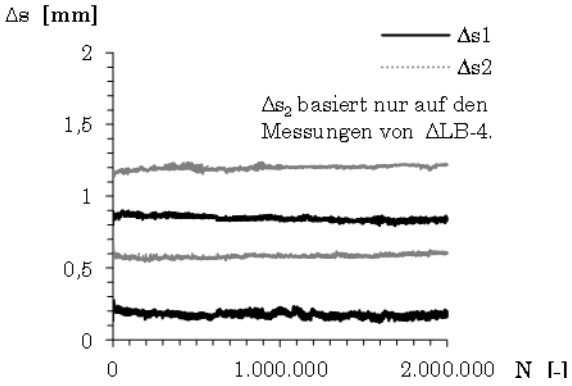
FZ-12-SG_S3 (0,90 : 0,05)



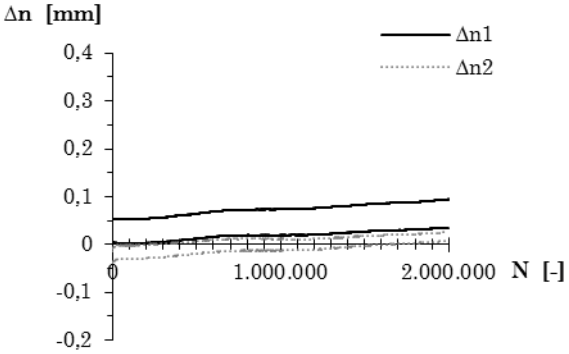
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

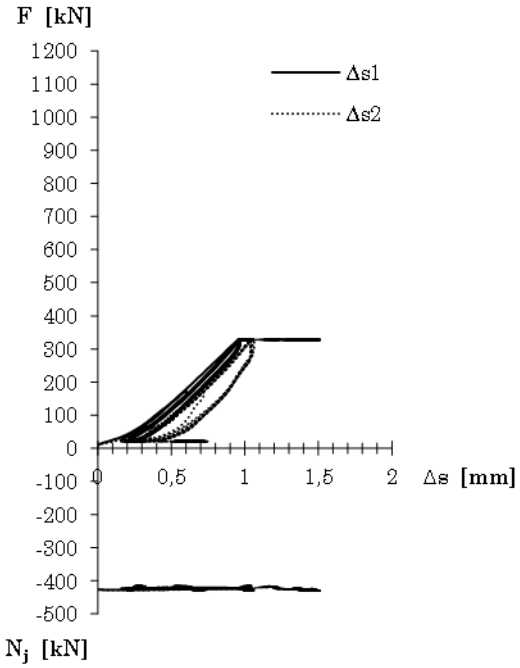


c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

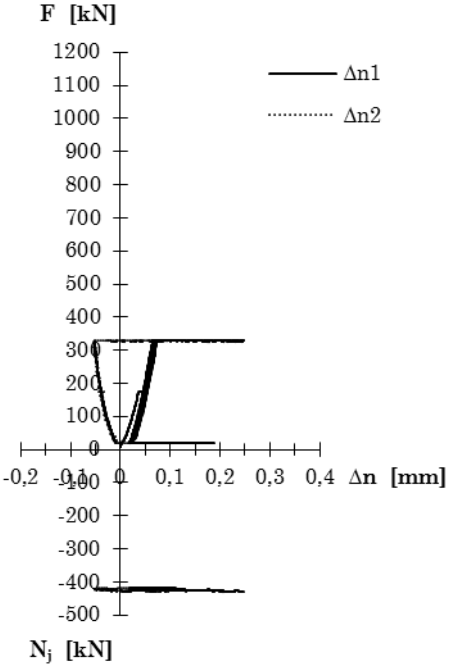


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

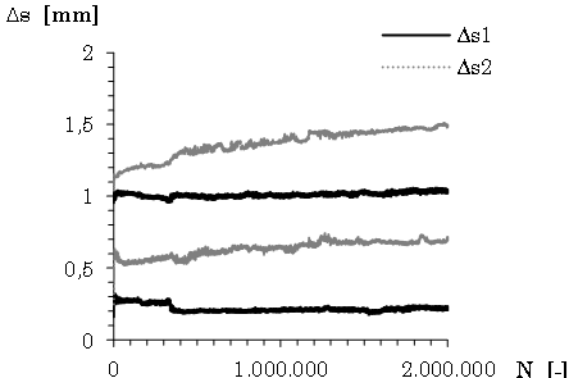
FZ-11-SG_S3 (0,85 : 0,05)



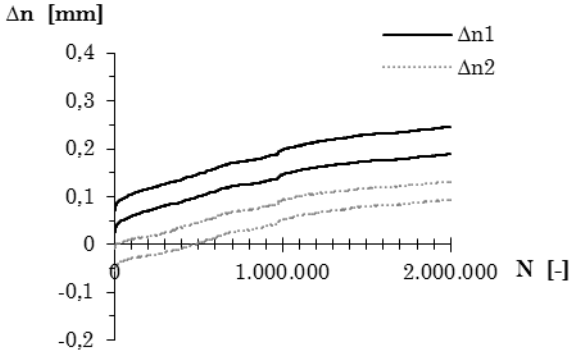
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

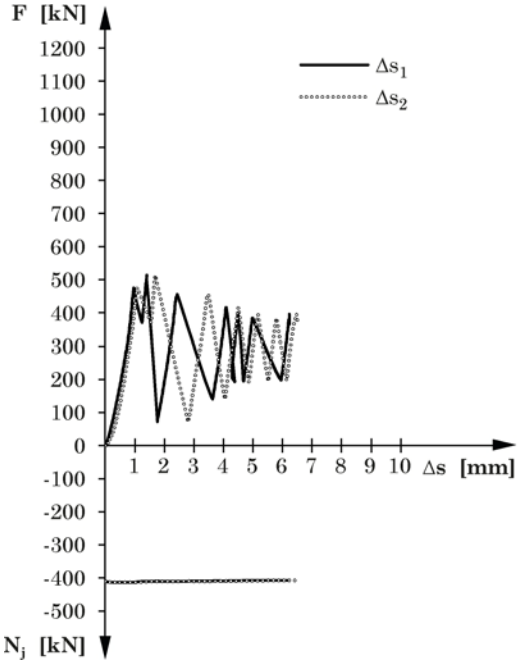


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

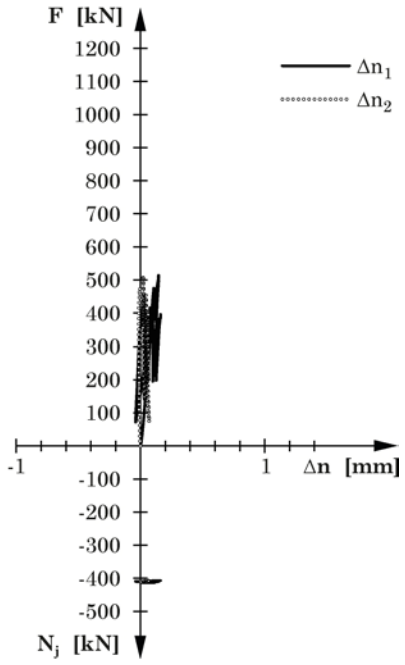
FZ-14-SG_S3 (0,80 : 0,05)

Weggeregelte Abscherversuche unter statischer Belastung zur Prüfung der Resttragfähigkeit (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

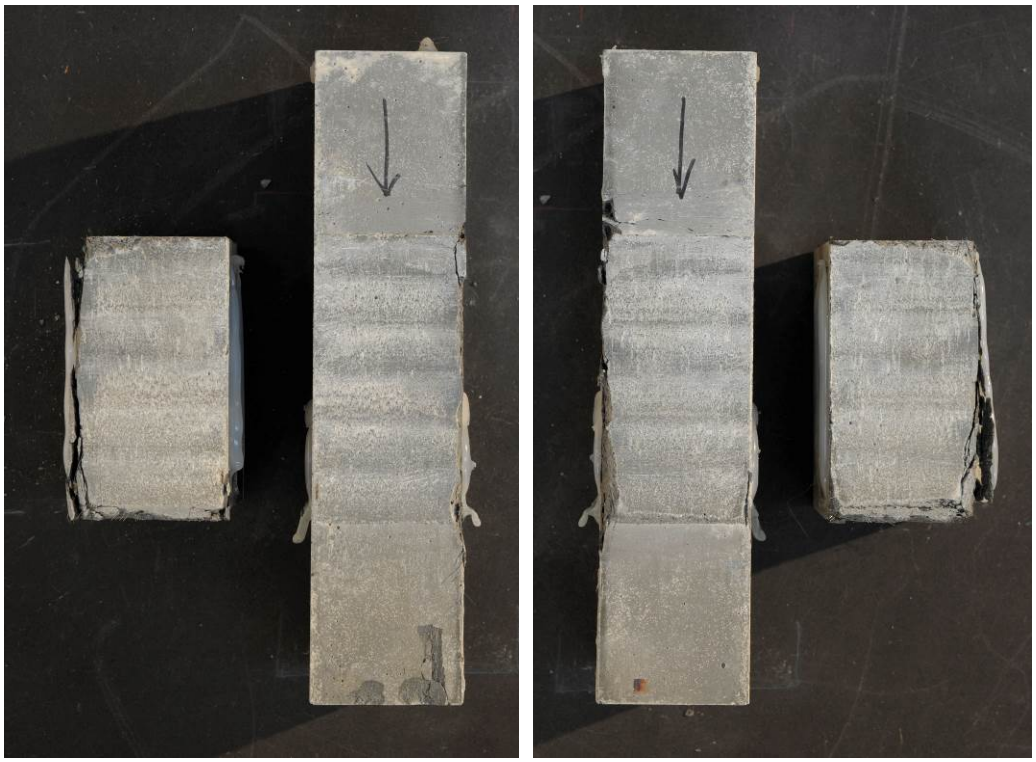
Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Kontaktflächen		F_r	$N_{j,r}$	$\Delta s_{1,r}$	$\Delta s_{2,r}$	$\Delta n_{1,r}$	$\Delta n_{2,r}$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
FZ-18-SG_S3 (0,90 : 0,05)	13.06.2014	234	50,3	94,9	475,2	-413,1	0,961	1,076	0,107	-0,007
FZ-11-SG_S3 (0,85 : 0,05)	10.06.2014	231	50,4	95,2	553,8	-429,1	1,017	0,681	0,114	-0,014
FZ-14-SG_S3 (0,80 : 0,05)	05.06.2014	226	50,0	95,0	562,1	-428,3	1,393	1,524	0,528	0,341



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

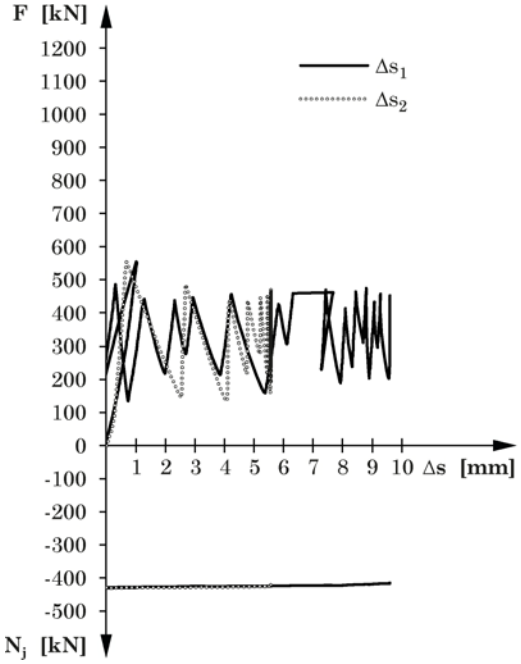


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

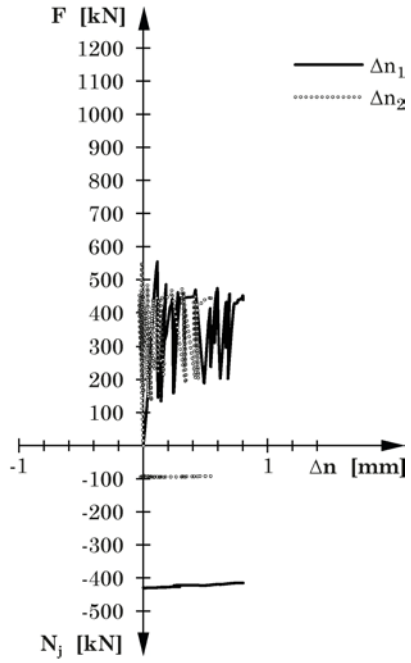


c) Bruchbild

FZ-18-SG_S3 (0,90 : 0,05)



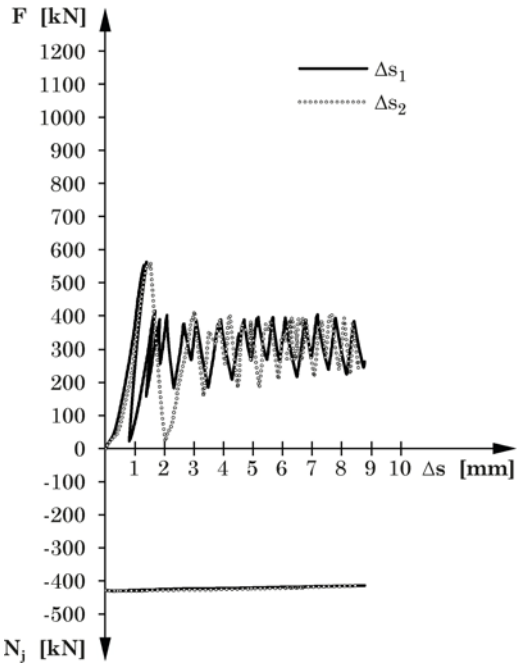
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



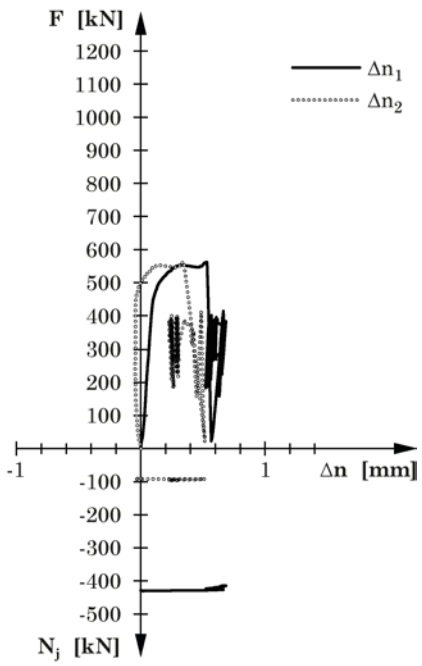
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

FZ-11-SG_S3 (0,85 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

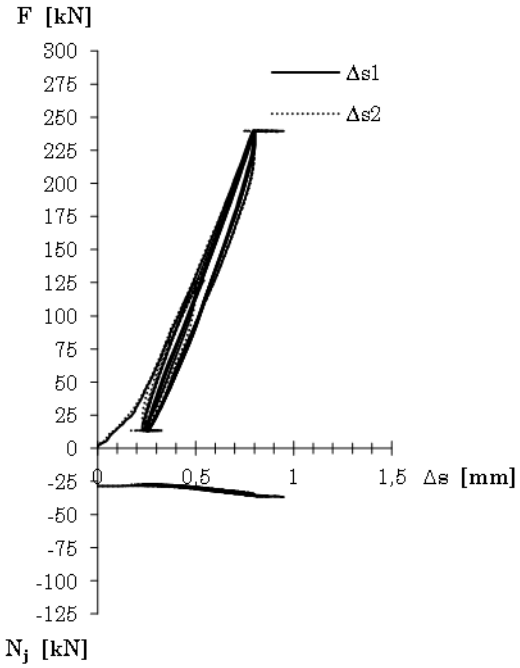
FZ-14-SG_S3 (0,80 : 0,05)

D.4.2 Versuchskörper mit verzahnter Fuge

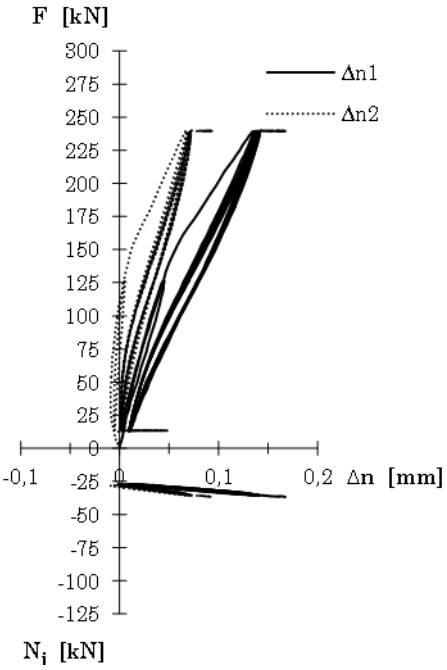
D.4.2.1 V_S1 (C12 und C13)

Kraftgeregelte Abscherversuche unter zyklischer Belastung

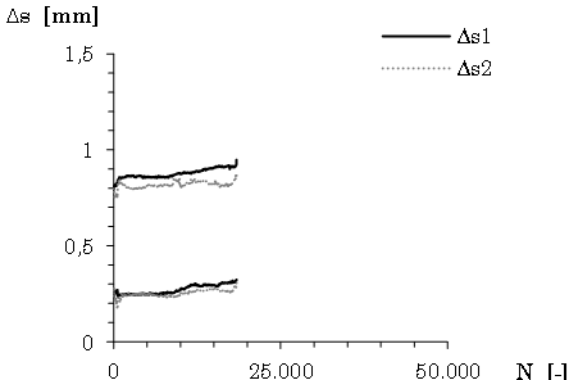
Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Prüfdatum	Alter	F_{ult}	Belastungs-horizonte		f_p	N_f	Bemerkung
				F_o	F_u			
		[Tage]	[kN]	[kN]	[kN]	[Hz]	[-]	
FZ-7-V_S1 (0,90 : 0,05)	09.05.2014	212	267,4	240,7	13,4	10	18.431	Versagen
FZ-9-V_S1 (0,85 : 0,05)	08.05.2014	211	267,4	227,3	13,4	10	815.172	Versagen
FZ-4-V_S1 (0,80 : 0,05)	05.05.2014	208	267,4	213,9	13,4	10	2.000.001	Durchläufer



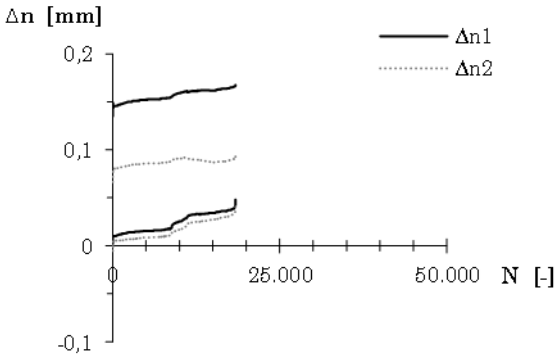
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



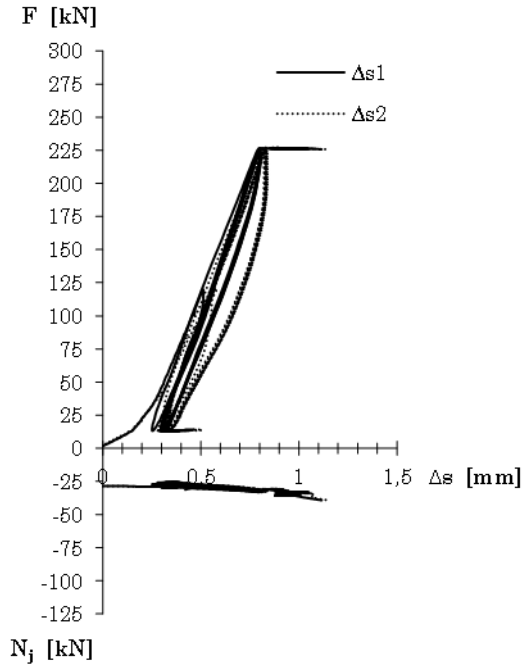
c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



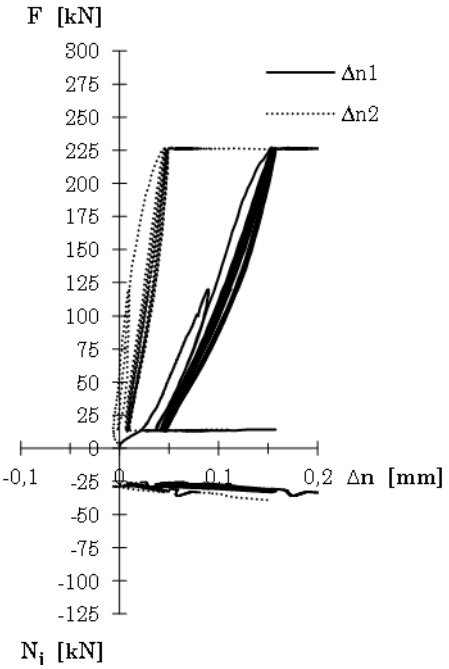
d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

e) Bruchbild

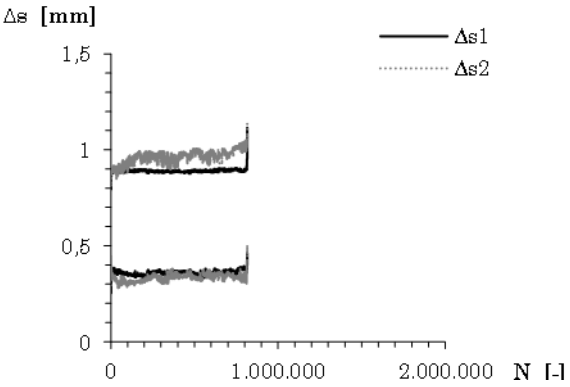
FZ-7-V_S1 (0,90 : 0,05)



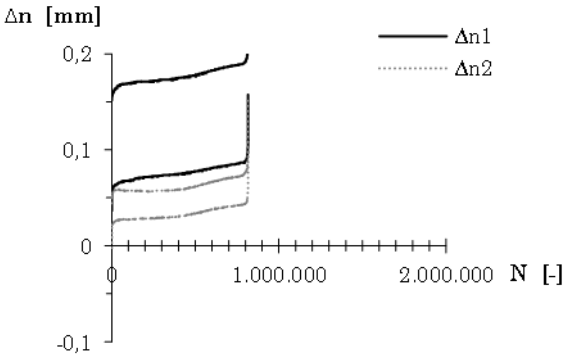
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



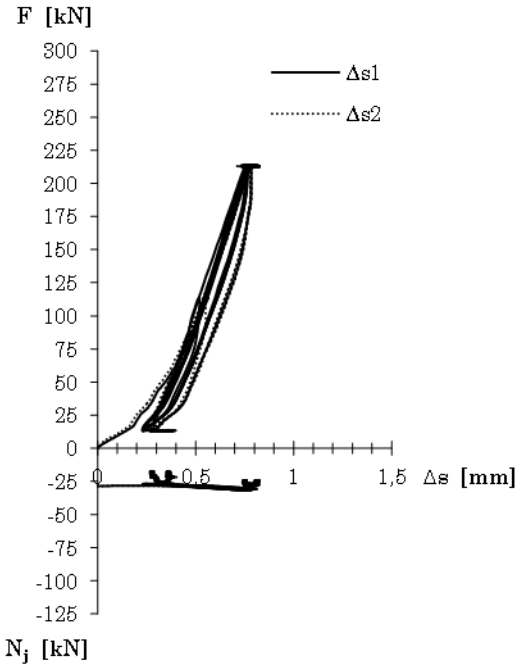
c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



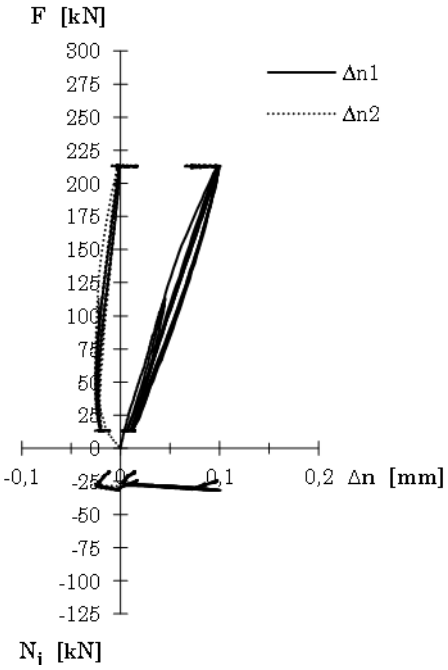
d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

e) Bruchbild

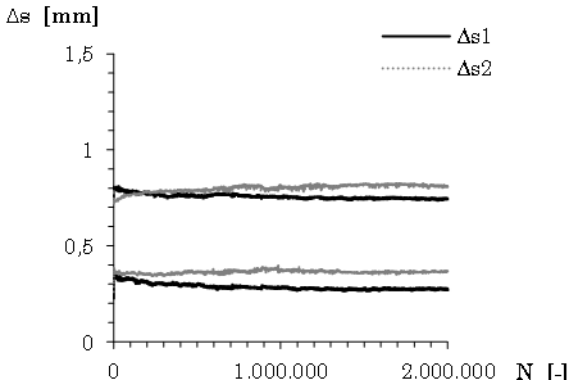
FZ-9-V_S1 (0,85 : 0,05)



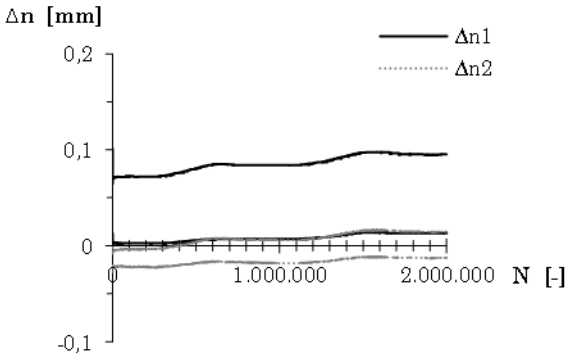
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

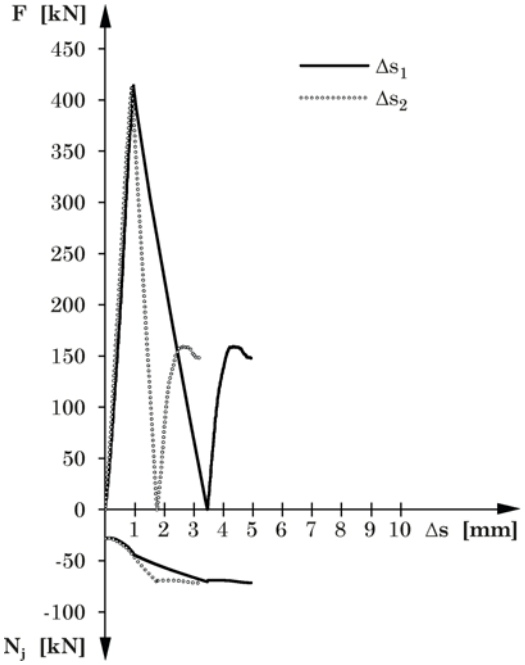


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

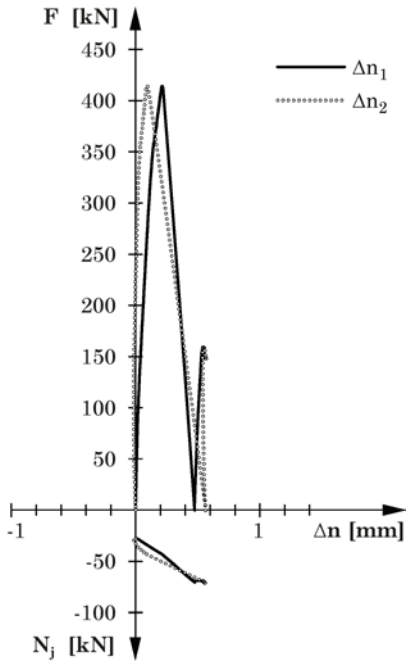
FZ-4-V_S1 (0,80 : 0,05)

Weggeregelte Abscherversuche unter statischer Belastung zur Prüfung der Resttragfähigkeit (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Kontaktflächen		F_{ult}	$N_{j,ult}$	$\Delta s_{1,ult}$	$\Delta s_{2,ult}$	$\Delta n_{1,ult}$	$\Delta n_{2,ult}$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
FZ-4-V_S1 (0,80 : 0,05)	08.05.2014	211	48,9	94,7	413,9	-43,2	0,953	0,891	0,212	0,089



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

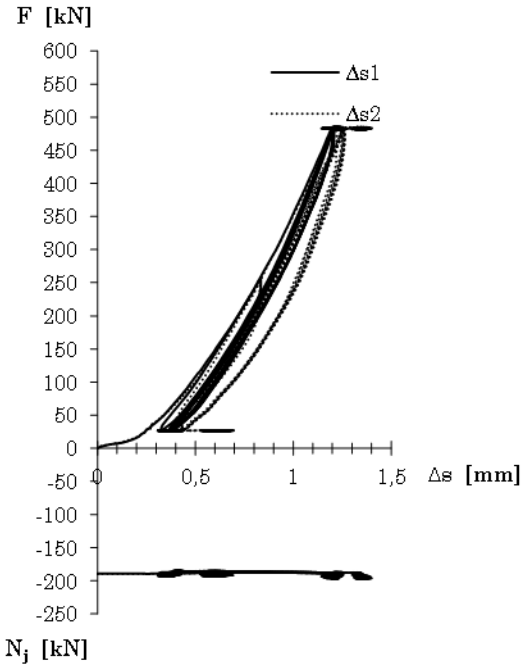
c) Bruchbild

FZ-4-V_S1 (0,80 : 0,05)

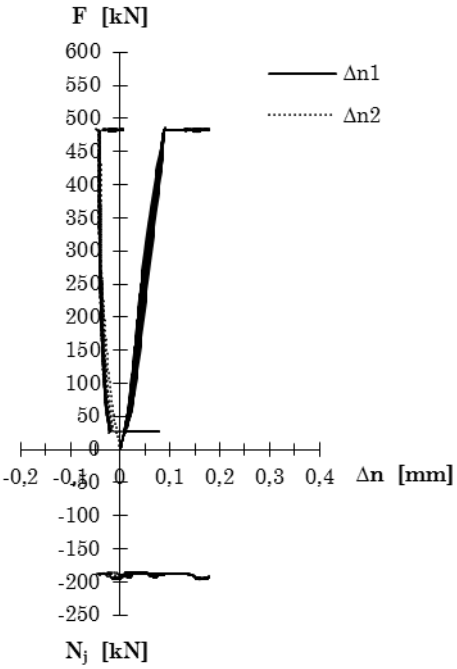
D.4.2.2 V_S2 (C14 und C15)

Kraftgeregelte Abscherversuche unter zyklischer Belastung

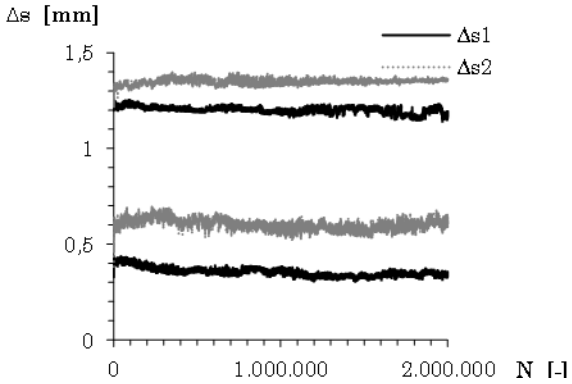
Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Prüfdatum	Alter	F_{ult}	Belastungs-horizonte		f_p	N_f	Bemerkung
				F_o	F_u			
		[Tage]	[kN]	[kN]	[kN]	[Hz]	[-]	
FZ-23-V_S2 (0,90 : 0,05)	14.04.2014	181	539,1	485,2	27,0	10	2.000.003	Durchläufer
FZ-22-V_S2 (0,85 : 0,05)	24.03.2014	160	539,1	458,2	27,0	10	2.000.010	Durchläufer
FZ-8-V_S2 (0,85 : 0,05)	24.03.2014	160	539,1	458,2	27,0	1 - 10	303	Versagen (bereits während der ersten zehn Lastwechsel kam es zur Schädigung des Versuchskörpers)
FZ-1-V_S2 (0,80 : 0,05)	19.03.2014	155	539,1	431,3	27,0	10	2.000.011	Durchläufer



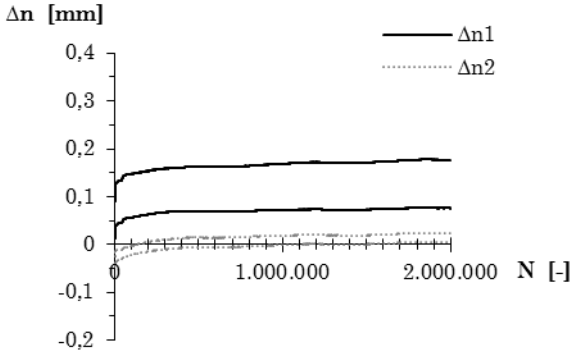
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

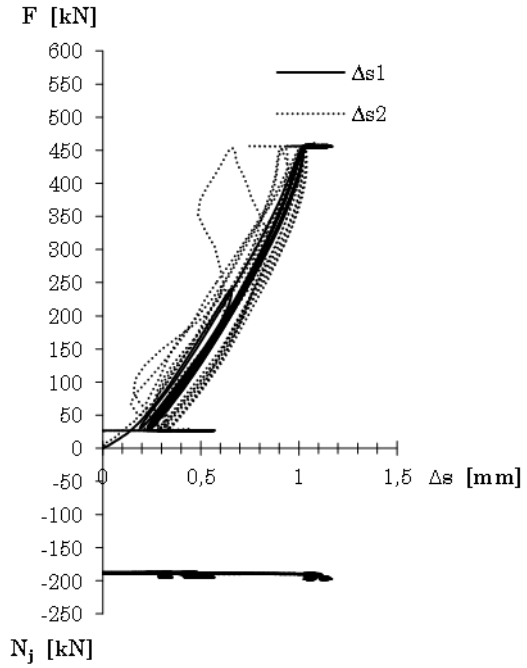


c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

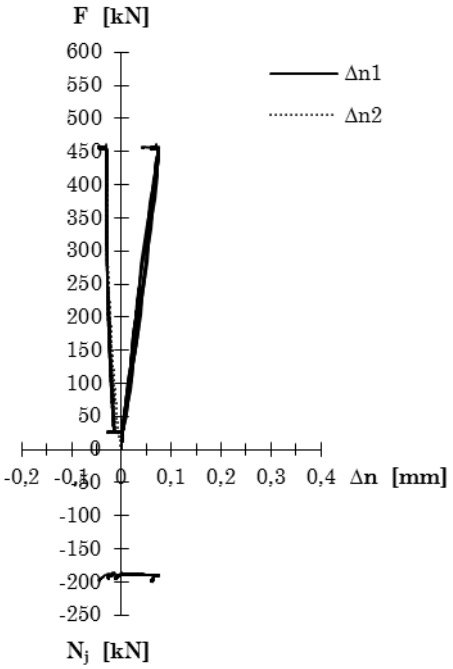


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

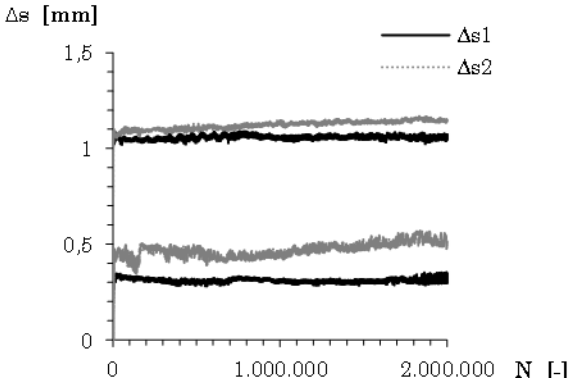
FZ-23-V_S2 (0,90 : 0,05)



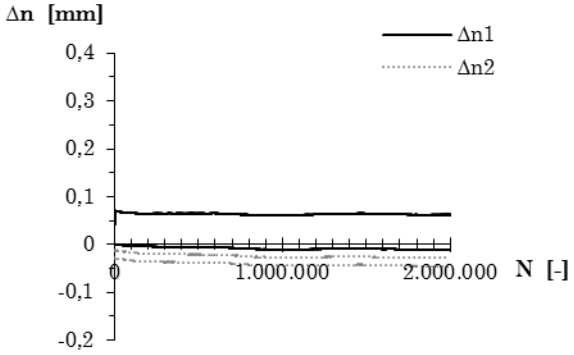
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

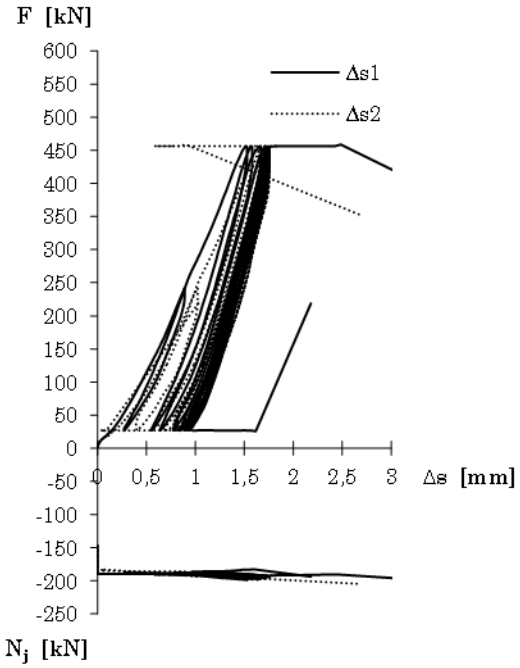


c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

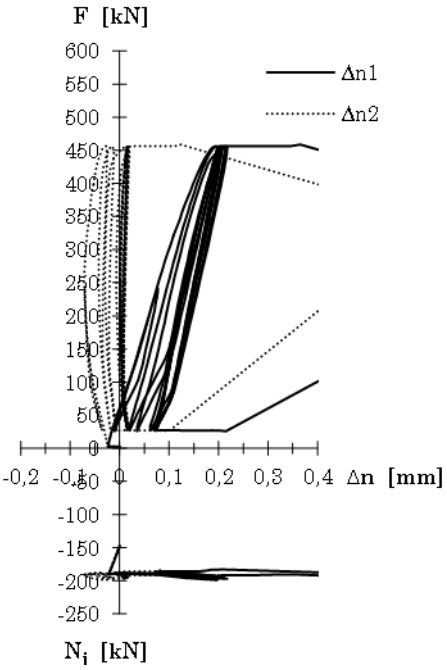


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

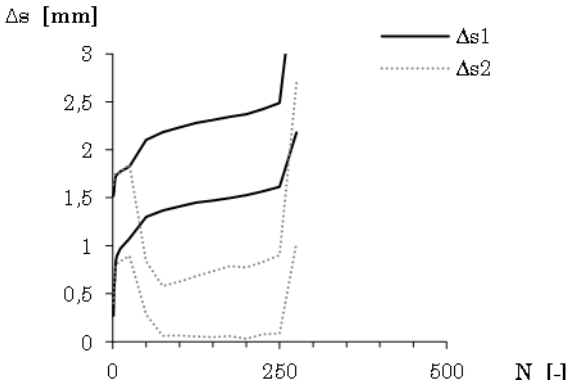
FZ-22-V_S2 (0,85 : 0,05)



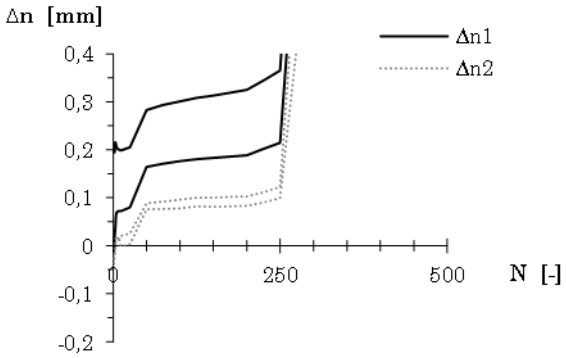
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



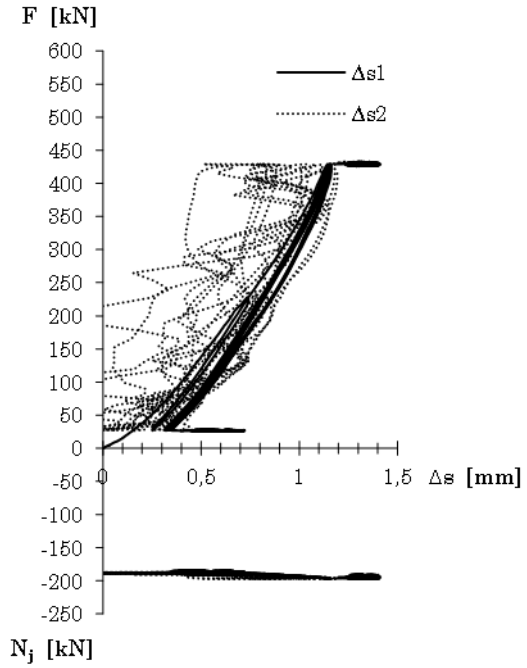
c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



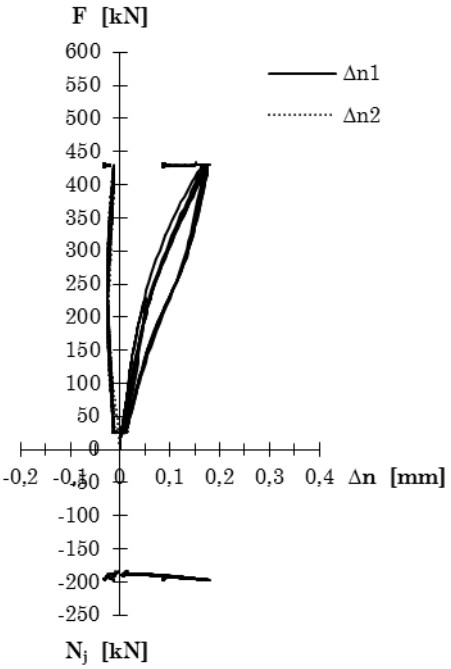
d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

e) Bruchbild

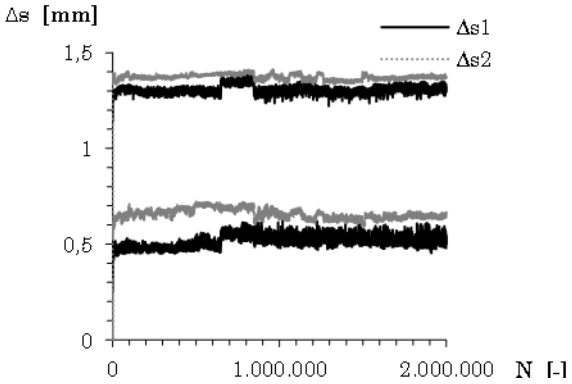
FZ-8-V_S2 (0,85 : 0,05)



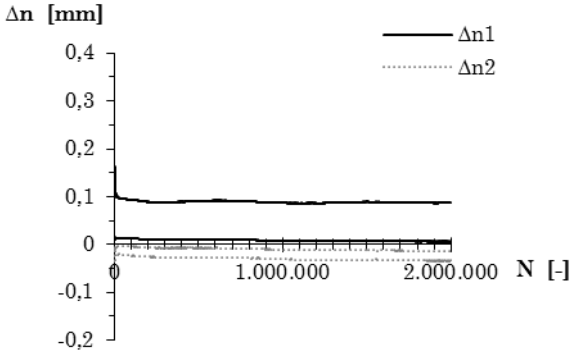
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

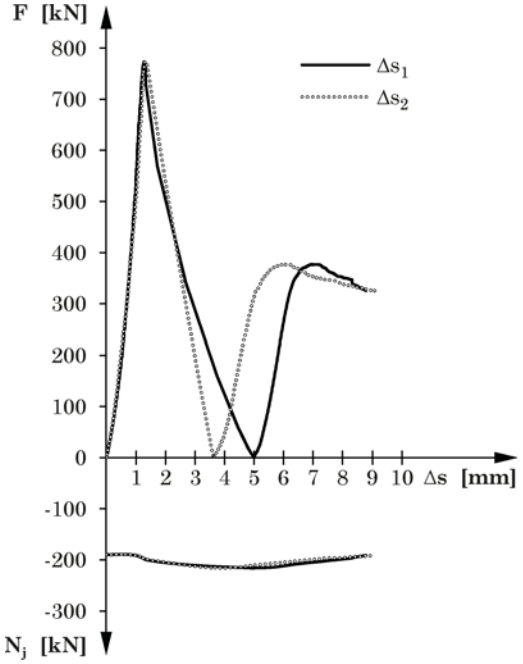


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

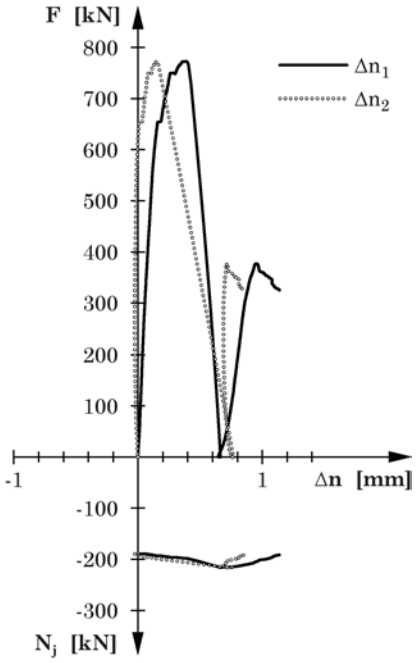
FZ-1-V_S2 (0,80 : 0,05)

Weggeregelte Abscherversuche unter statischer Belastung zur Prüfung der Resttragfähigkeit (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Kontaktflächen		F_{ult}	$N_{j,ult}$	$\Delta s_{1,ult}$	$\Delta s_{2,ult}$	$\Delta n_{1,ult}$	$\Delta n_{2,ult}$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
FZ-23-V_S2 (0,90 : 0,05)	17.04.2014	184	50,2	95,0	772,9	-198,2	1,287	1,314	0,388	0,153
FZ-22-V_S2 (0,85 : 0,05)	27.03.2014	163	49,7	94,6	718,3	-196,0	1,120	1,138	0,141	0,002
FZ-1-V_S2 (0,80 : 0,05)	24.03.2014	160	50,2	94,9	615,8	-202,4	1,078	1,275	0,157	0,010



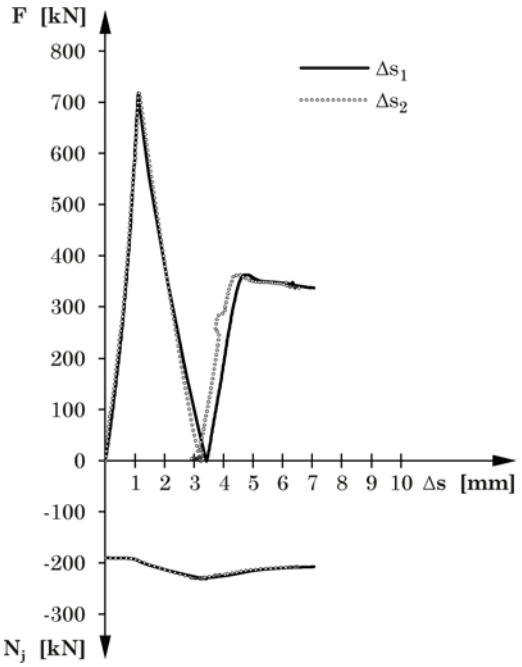
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



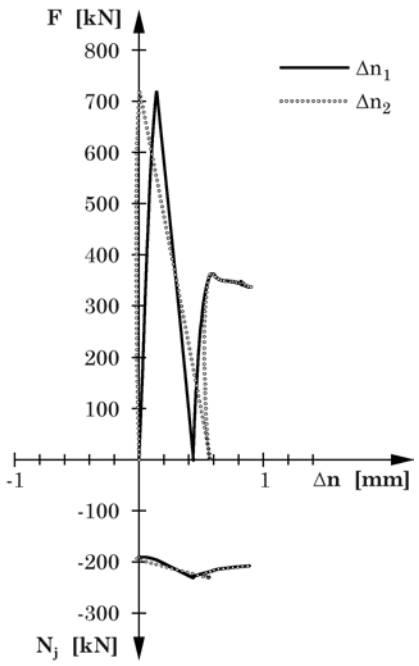
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

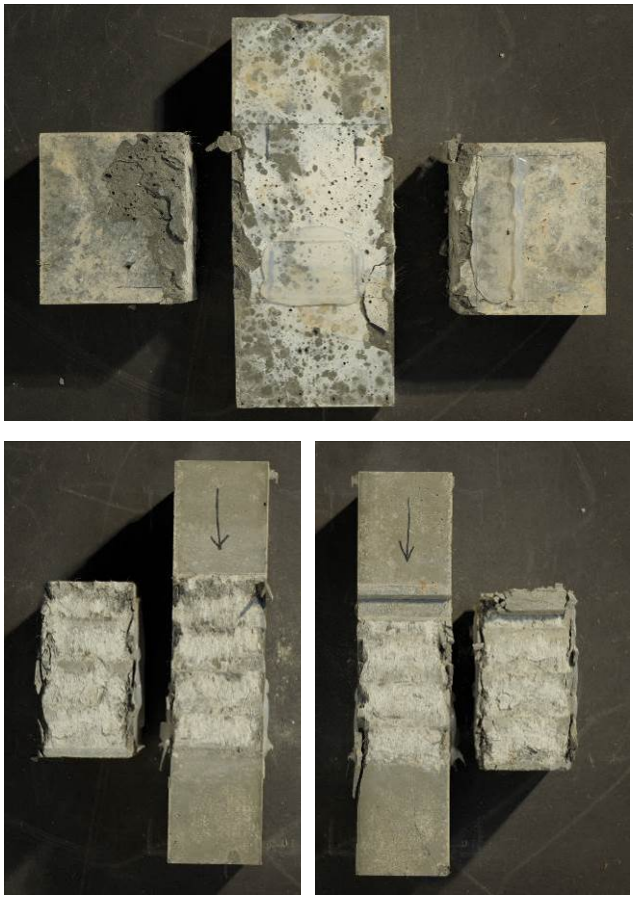
FZ-23-V_S2 (0,90 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

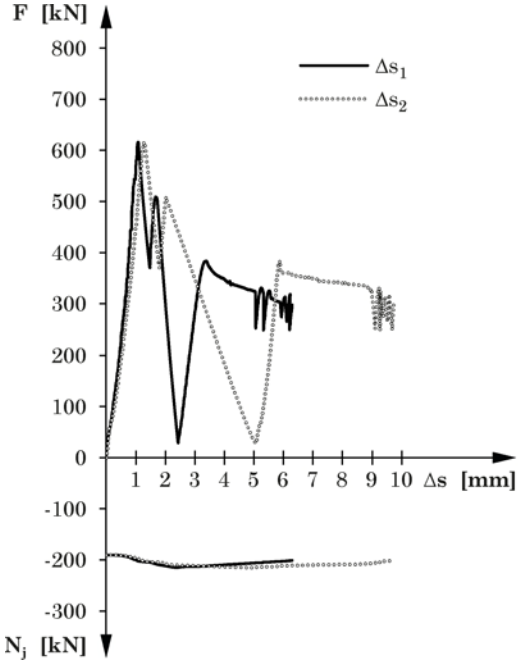


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

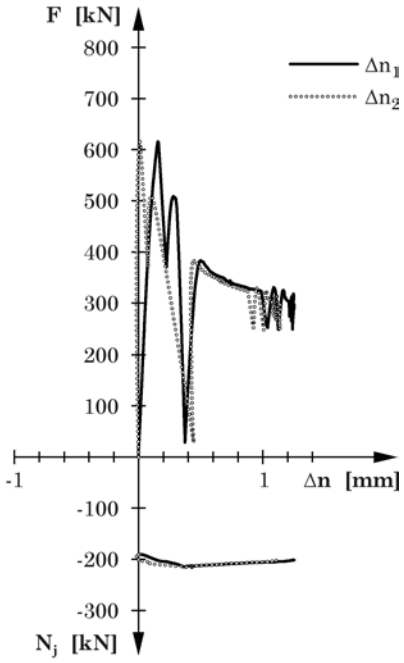


c) Bruchbild

FZ-22-V_S2 (0,85 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

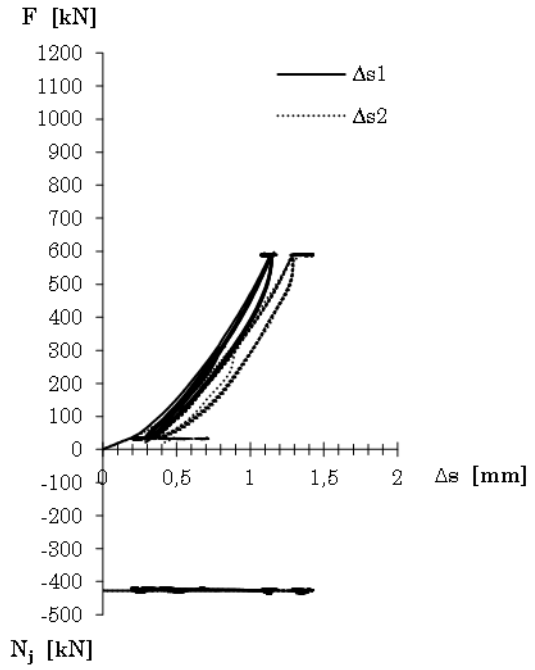
c) Bruchbild

FZ-1-V_S2 (0,80 : 0,05)

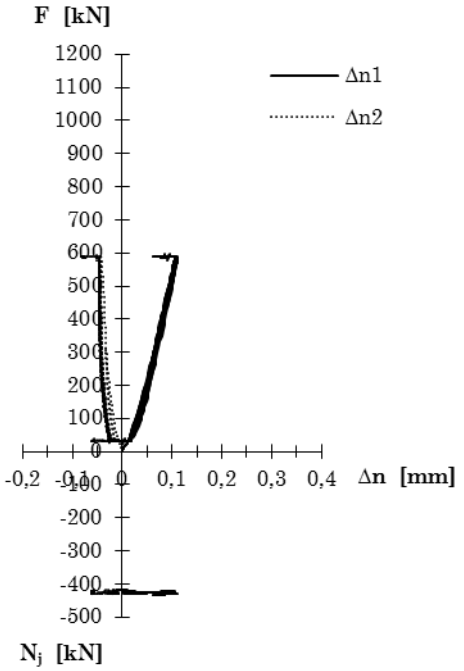
D.4.2.3 V_S3 (C16 und C17)

Kraftgeregelte Abscherversuche unter zyklischer Belastung

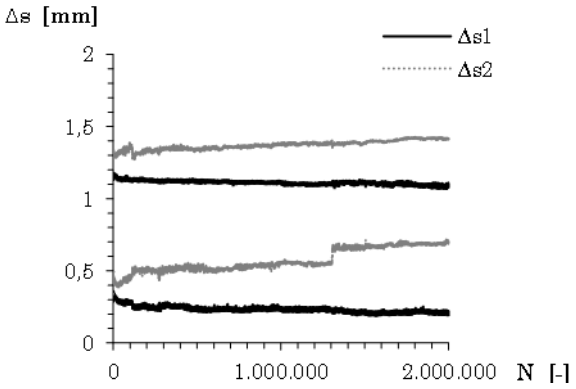
Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Prüfdatum	Alter	F_{ult}	Belastungs-horizonte		f_p	N_f	Bemerkung
				F_o	F_u			
		[Tage]	[kN]	[kN]	[kN]	[Hz]	[-]	
FZ-13-V_S3 (0,90 : 0,05)	07.07.2014	258	657,3	591,6	32,9	9	2.000.004	Durchläufer
FZ-12-V_S3 (0,85 : 0,05)	04.07.2014	255	657,3	558,7	32,9	10	2.000.507	Durchläufer
FZ-15-V_S3 (0,85 : 0,05)	02.06.2014	223	657,3	558,7	32,9	1 - 10	107	Versagen
FZ-2-V_S3 (0,80 : 0,05)	19.05.2014	209	657,3	525,8	32,9	10	2.000.008	Durchläufer



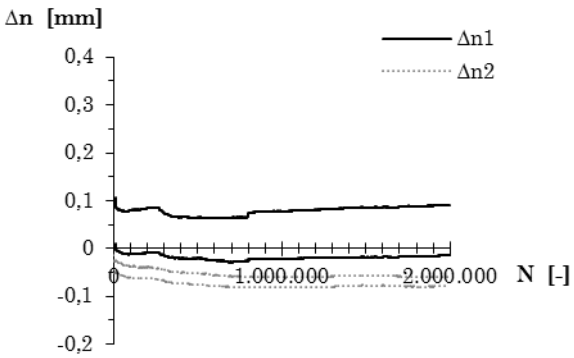
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

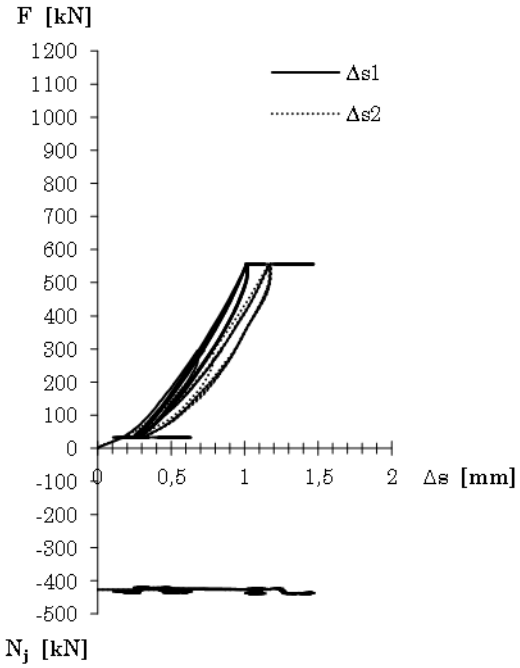


c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

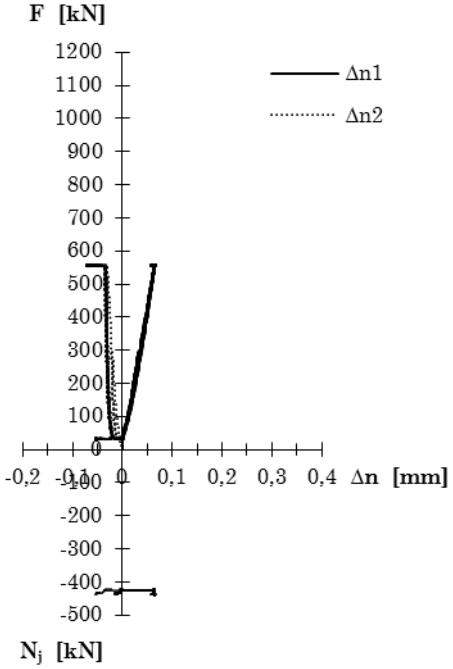


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

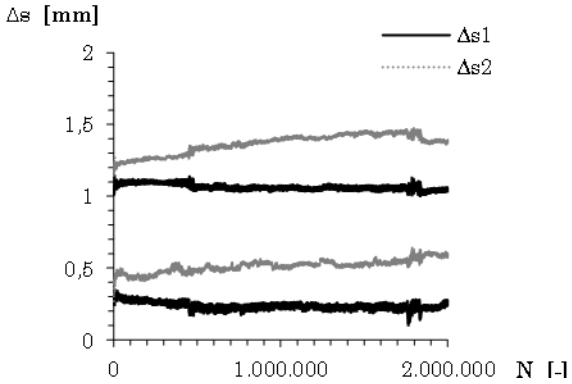
FZ-13-V_S3 (0,90 : 0,05)



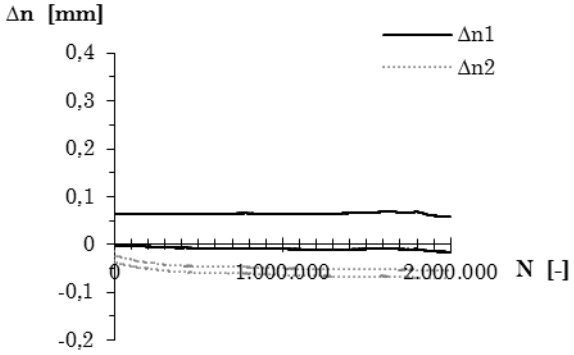
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

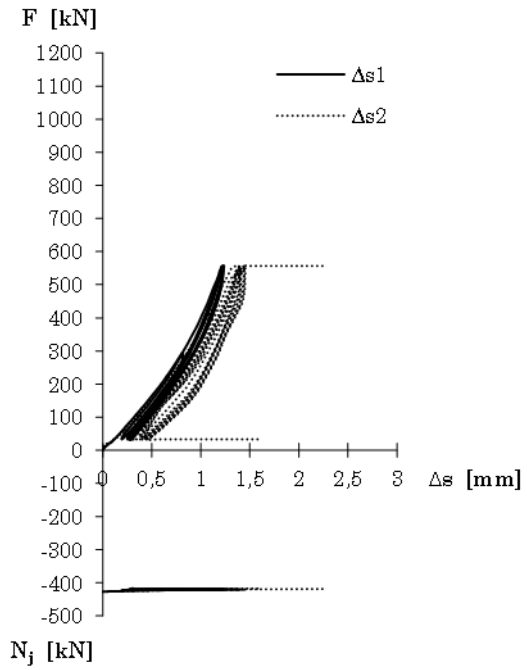


c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

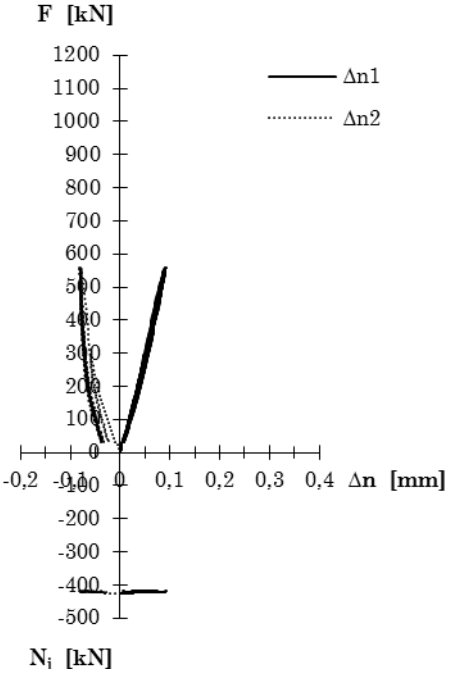


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

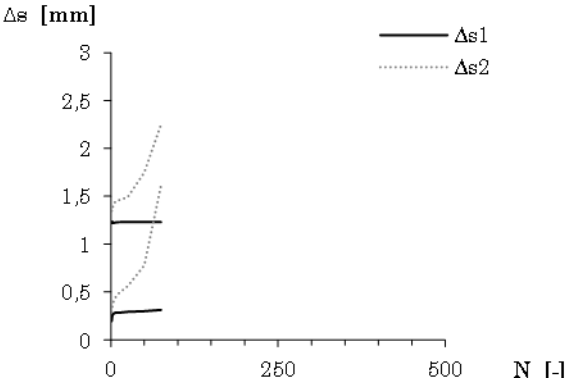
FZ-12-V_S3 (0,85 : 0,05)



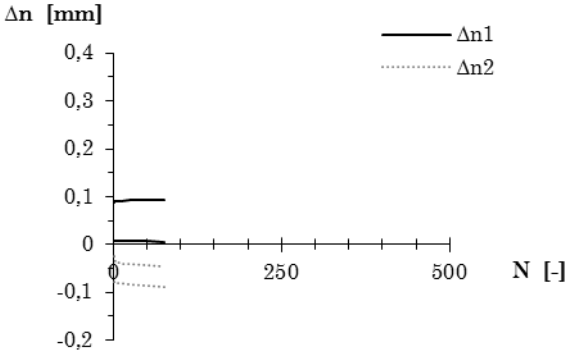
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



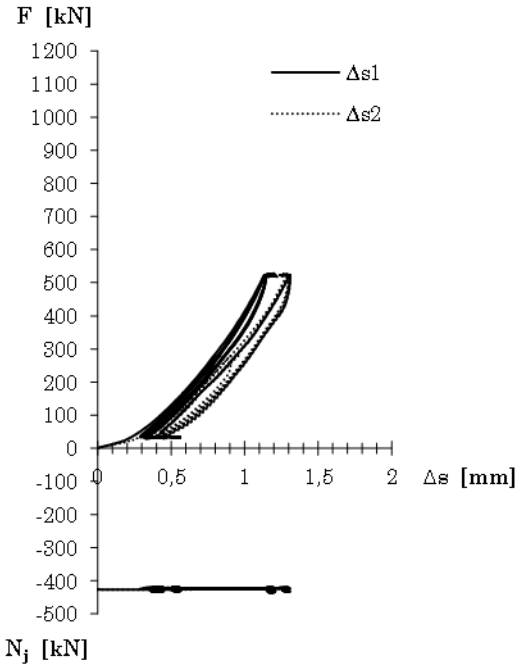
c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



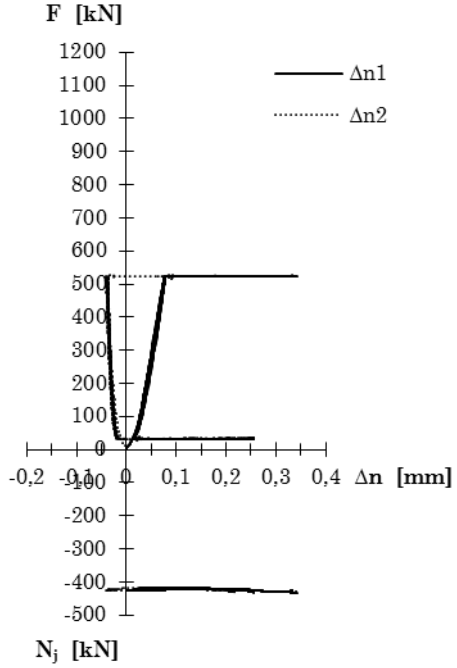
d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

e) Bruchbild

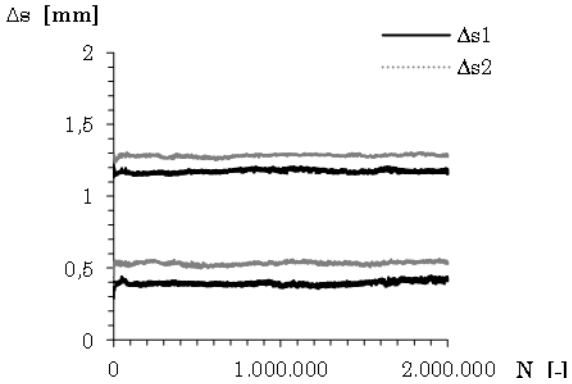
FZ-15-V_S3 (0,85 : 0,05)



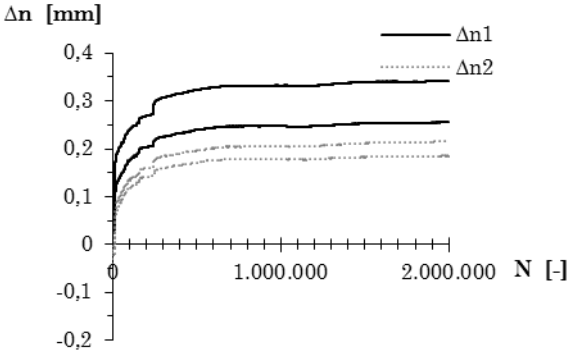
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

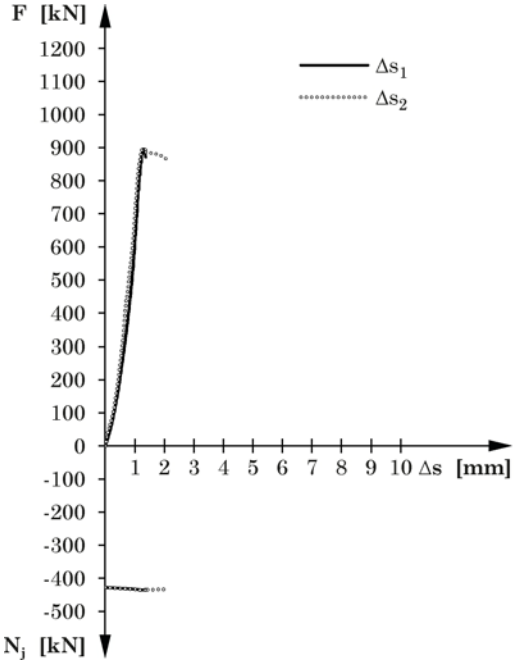


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

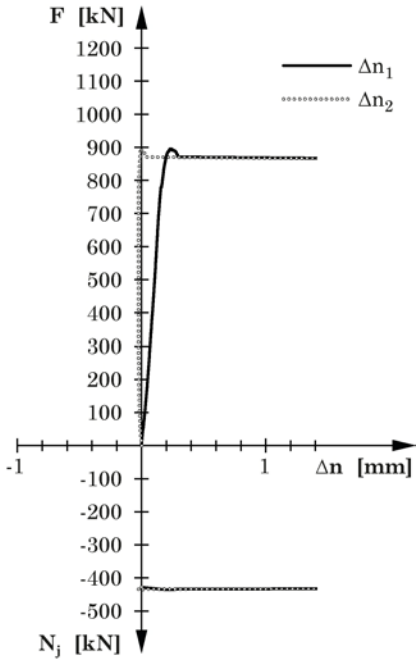
FZ-2-V_S3 (0,80 : 0,05)

Weggeregelte Abscherversuche unter statischer Belastung zur Prüfung der Resttragfähigkeit (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

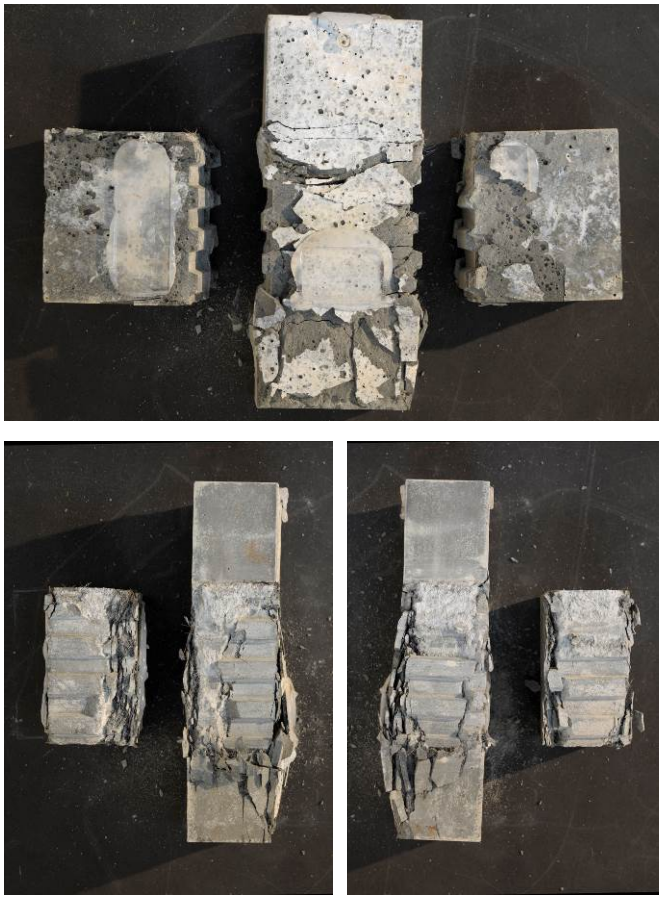
Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Kontaktflächen		F_{ult}	$N_{j,ult}$	$\Delta s_{1,ult}$	$\Delta s_{2,ult}$	$\Delta n_{1,ult}$	$\Delta n_{2,ult}$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
FZ-13-V_S3 (0,90 : 0,05)	10.07.2014	261	50,2	94,5	895,6	-435,7	1,296	1,257	0,233	-0,007
FZ-12-V_S3 (0,85 : 0,05)	07.07.2014	258	50,4	95,0	883,4	-432,7	1,298	1,573	0,180	-0,016
FZ-2-V_S3 (0,80 : 0,05)	22.05.2014	212	50,2	94,9	884,5	-427,6	1,333	1,765	0,383	0,215



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

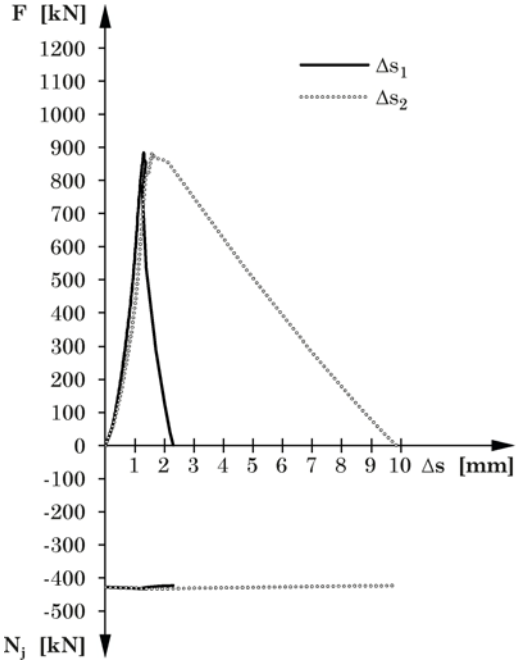


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

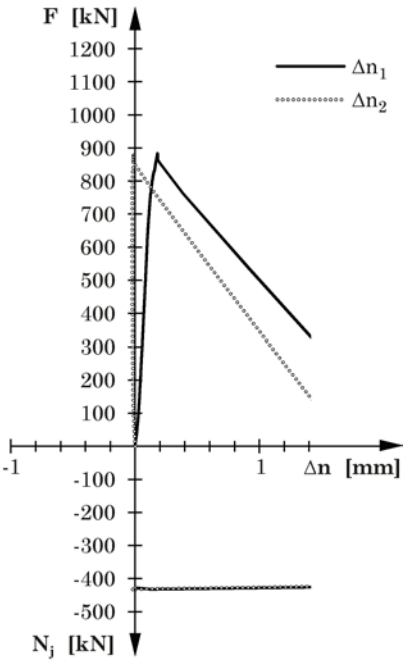


c) Bruchbild

FZ-13-V_S3 (0,90 : 0,05)



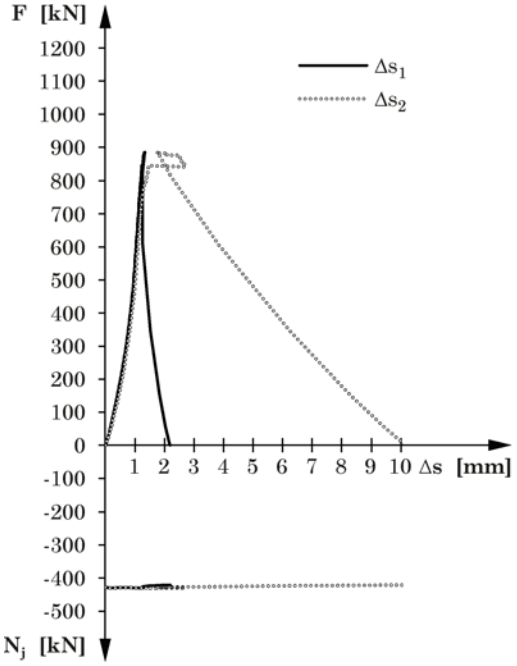
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



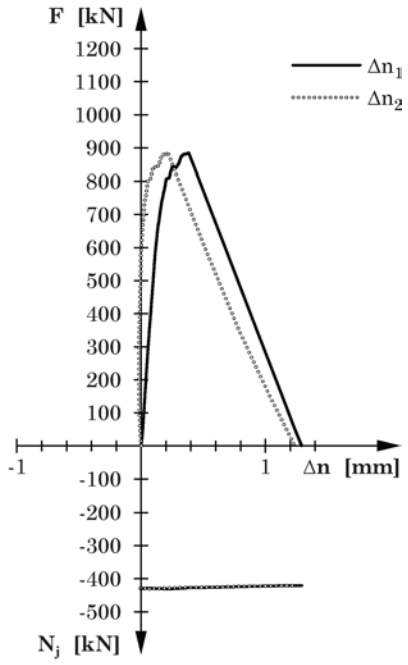
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

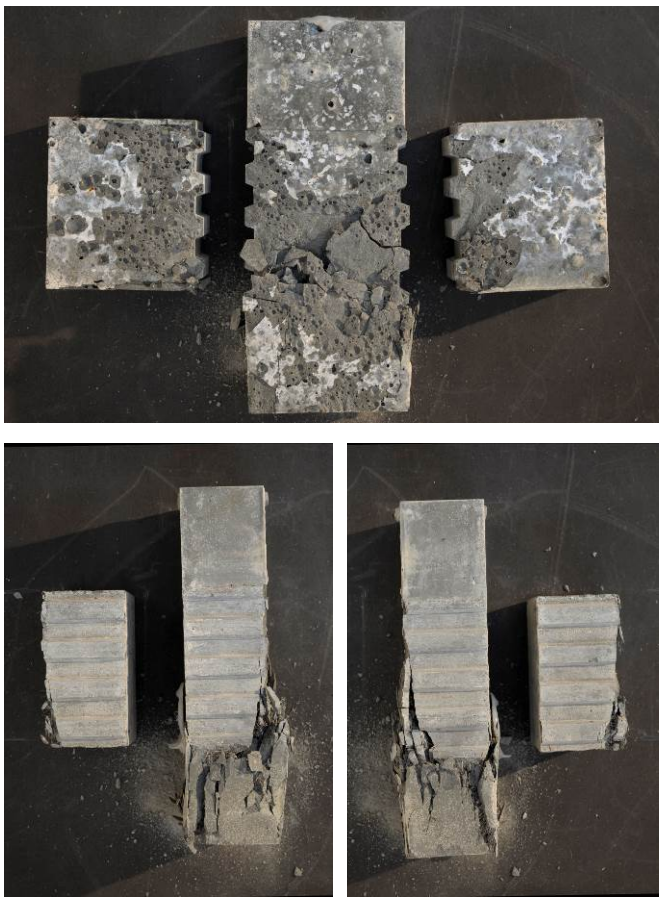
FZ-12-V_S3 (0,85 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



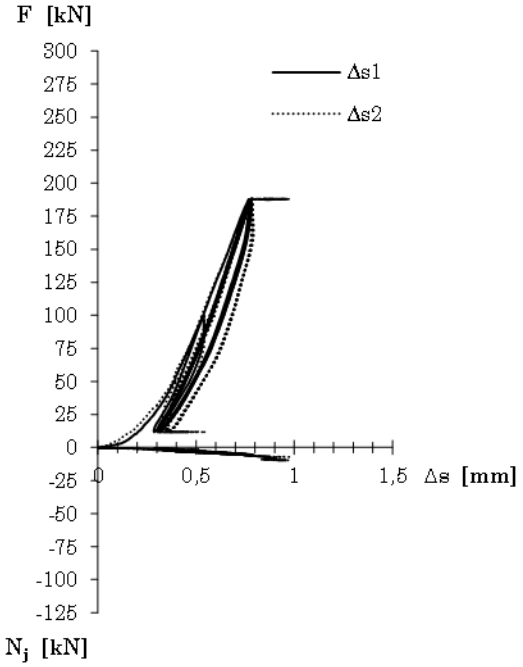
c) Bruchbild

FZ-2-V_S3 (0,80 : 0,05)

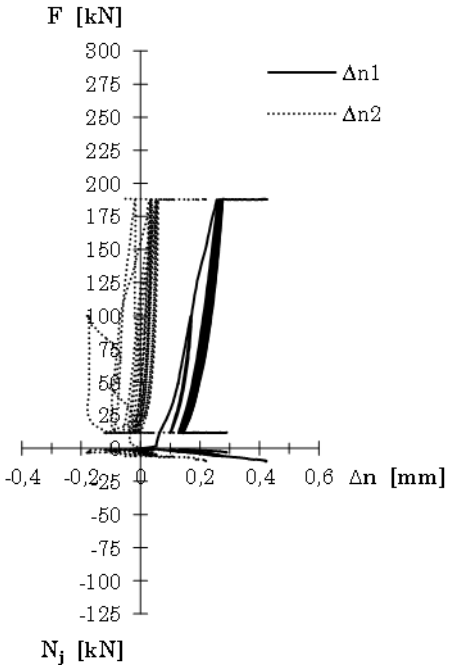
D.4.2.4 V_S4 (C18 und C19)

Kraftgeregelte Abscherversuche unter zyklischer Belastung

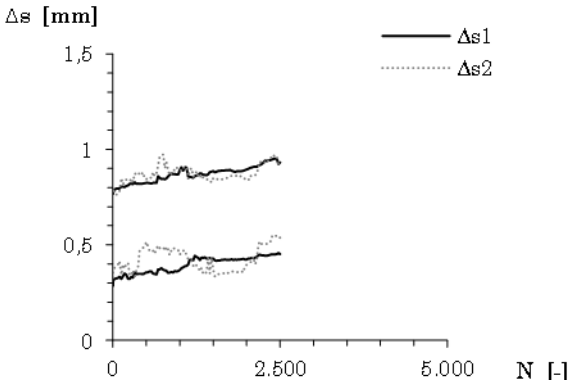
Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Prüfdatum	Alter	F_{ult}	Belastungs-horizonte		f_p	N_f	Bemerkung
				F_o	F_u			
		[Tage]	[kN]	[kN]	[kN]	[Hz]	[-]	
FZ-3-V_S4 (0,80 : 0,05)	23.06.2014	230	237,0	189,6	11,9	1 - 10	2.533	Versagen
FZ-15-V_S4 (0,80 : 0,05)	23.06.2014	230	237,0	189,6	11,9	1 - 10	35	Versagen
FZ-2-V_S4 (0,80 : 0,05)	24.06.2014	231	237,0	189,6	11,9	0,1	5	Versagen
FZ-16-V_S4 (0,75 : 0,05)	14.07.2014	251	237,0	177,8	11,9	1 - 10	149	Versagen
FZ-22-V_S4 (0,75 : 0,05)	14.07.2014	251	237,0	177,8	11,9	1 - 10	101	Versagen
FZ-25-V_S4 (0,75 : 0,05)	14.07.2014	251	237,0	177,8	11,9	0,1	0	Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 146,3 kN)
FZ-14-V_S4 (0,70 : 0,05)	30.06.2014	237	237,0	165,9	11,9	10	249.194	Versagen
FZ-6-V_S4 (0,70 : 0,05)	25.06.2014	232	237,0	165,9	11,9	1 - 10	280	Versagen
FZ-1-V_S4 (0,70 : 0,05)	30.06.2014	237	237,0	165,9	11,9	0,1	1	Versagen
FZ-5-V_S4 (0,65 : 0,05)	16.07.2014	253	237,0	154,1	11,9	1 - 10	20	Versagen
FZ-24-V_S4 (0,65 : 0,05)	16.07.2014	253	237,0	154,1	11,9	0,1	2	Versagen
FZ-13-V_S4 (0,65 : 0,05)	16.07.2014	253	237,0	154,1	11,9	0,1	0	Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 106,4 kN)
FZ-18-V_S4 (0,65 : 0,05)	16.07.2014	253	237,0	154,1	11,9	0,1	0	Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 133,4 kN)
FZ-19-V_S4 (0,65 : 0,05)	16.07.2014	253	237,0	154,1	11,9	0,1	0	Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 143,2 kN)
FZ-23-V_S4 (0,65 : 0,05)	16.07.2014	253	237,0	154,1	11,9	0,1	0	Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 99,1 kN)
FZ-11-V_S4 (0,60 : 0,05)	25.06.2014	253	237,0	142,2	11,9	10	2.000.501	Durchläufer
FZ-20-V_S4 (0,60 : 0,05)	16.07.2014	253	237,0	142,2	11,9	1 - 10	1.485	Versagen
FZ-17-V_S4 (0,60 : 0,05)	14.07.2014	253	237,0	142,2	11,9	0,1	0	Oberlast wurde nicht erreicht (Versagen bei 113,9 kN)



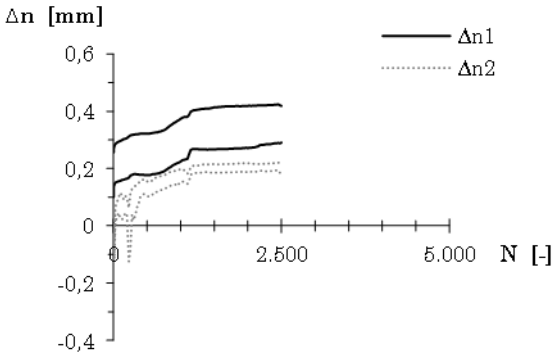
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



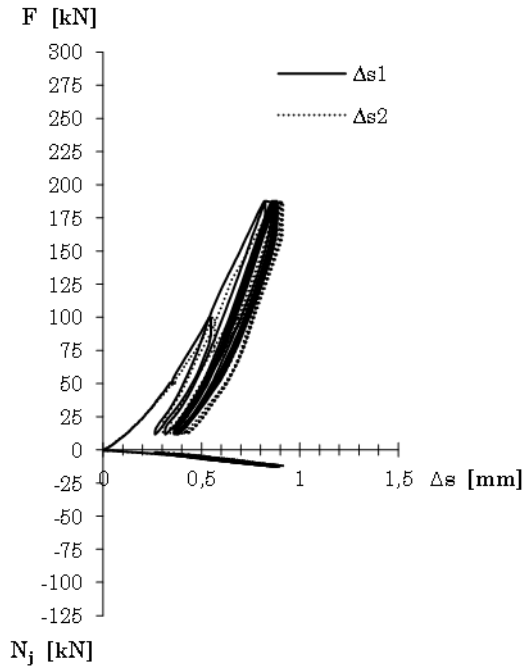
c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



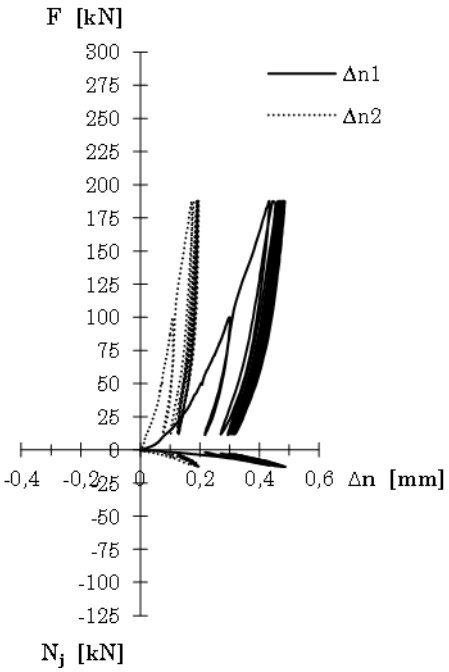
d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

e) Bruchbild

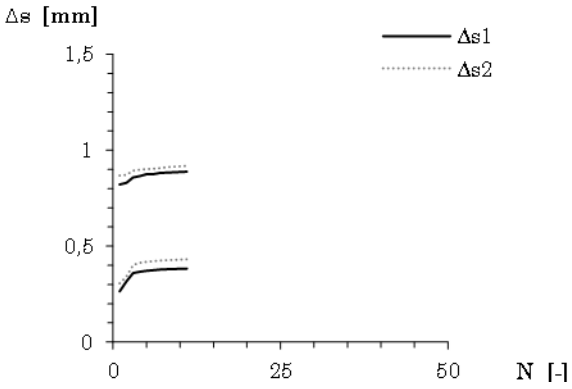
FZ-3-V_S4 (0,80 : 0,05)



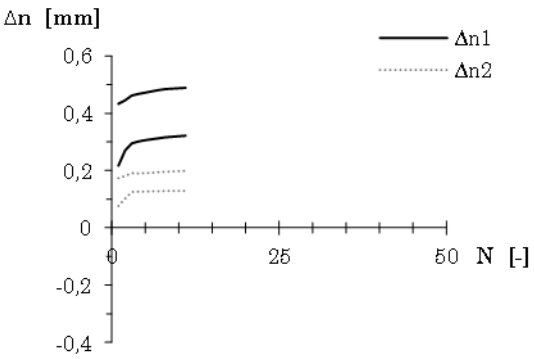
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



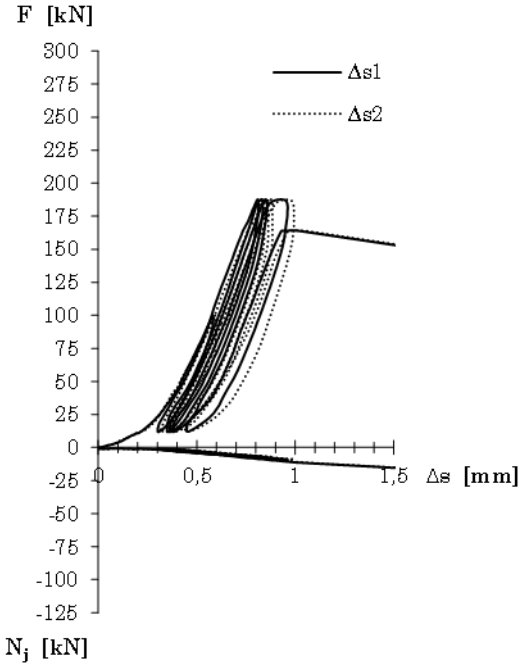
c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



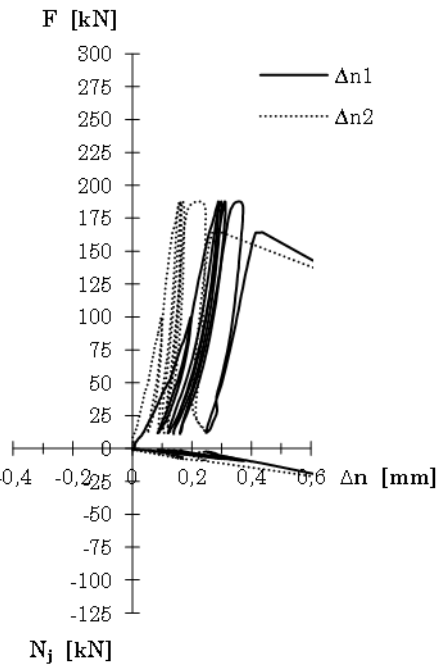
d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

e) Bruchbild

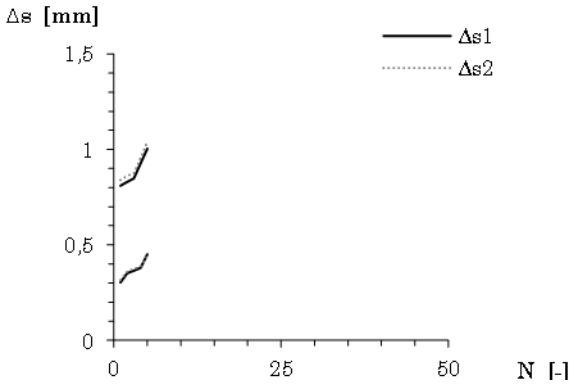
FZ-15-V_S4 (0,80 : 0,05)



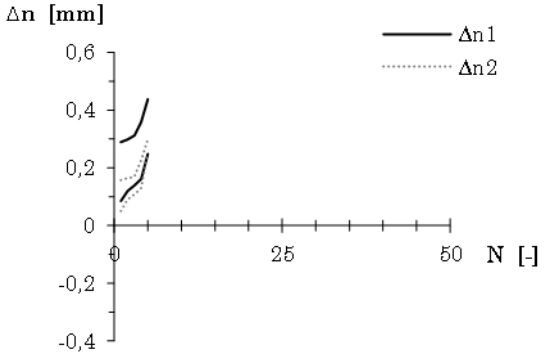
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



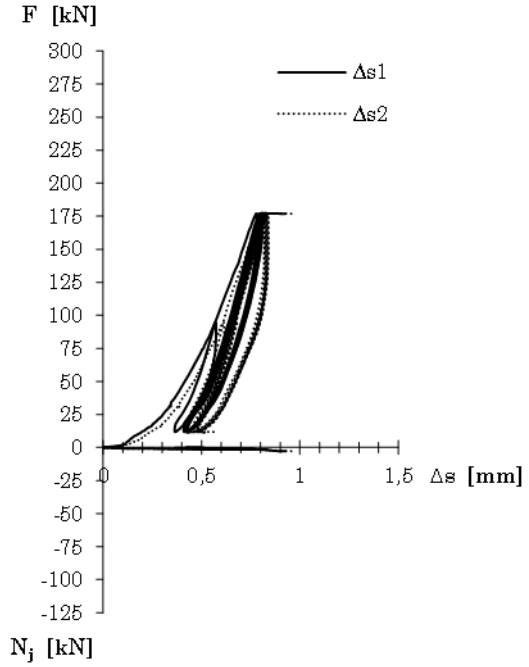
c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



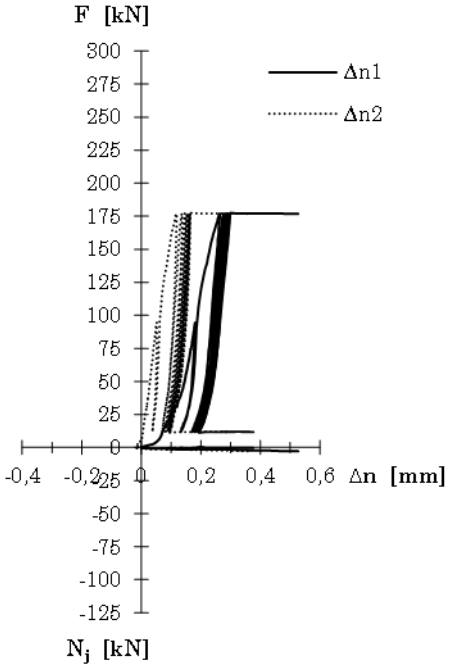
d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

e) Bruchbild

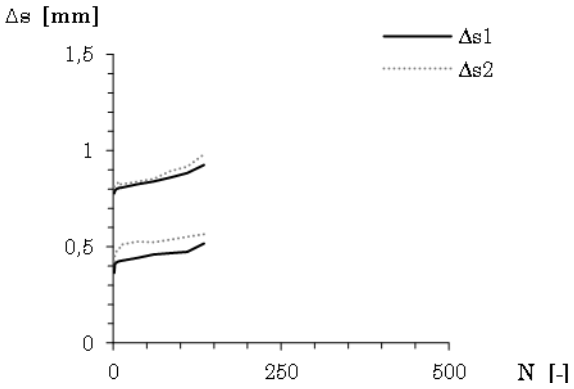
FZ-2-V_S4 (0,80 : 0,05)



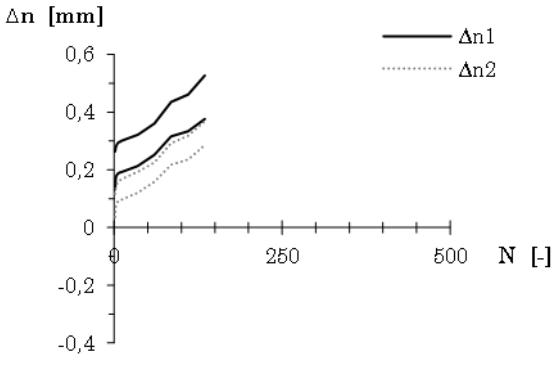
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



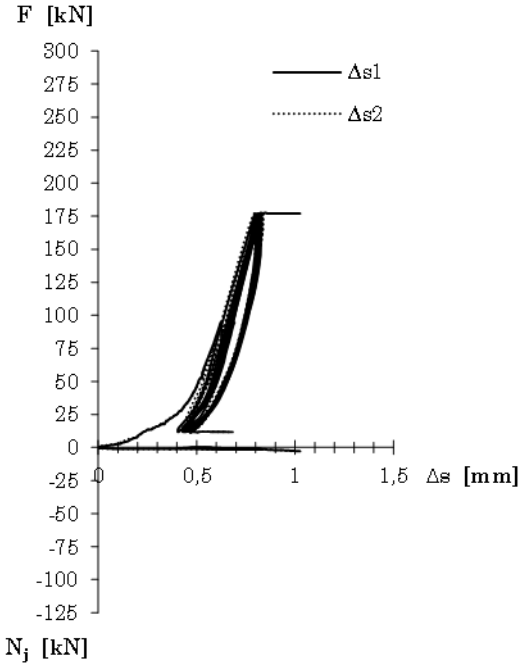
c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



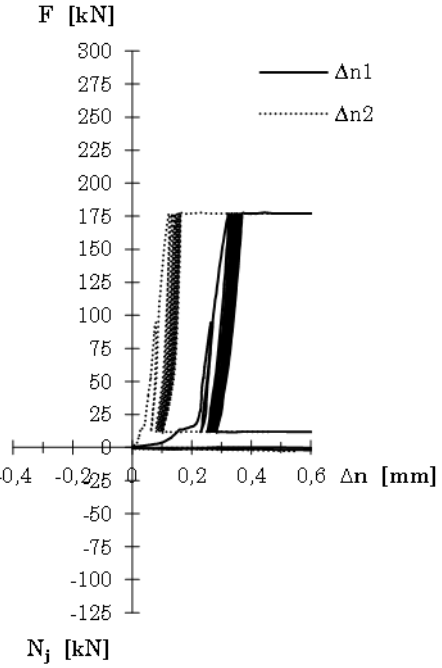
d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

e) Bruchbild

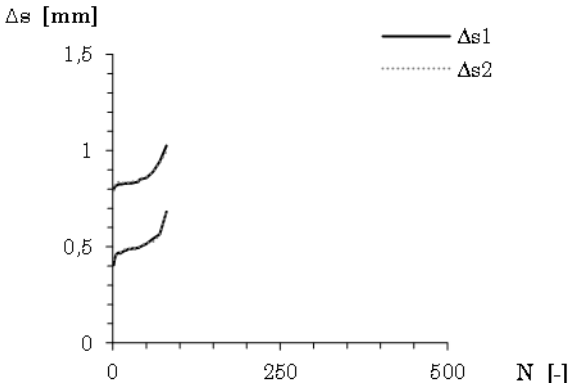
FZ-16-V_S4 (0,75 : 0,05)



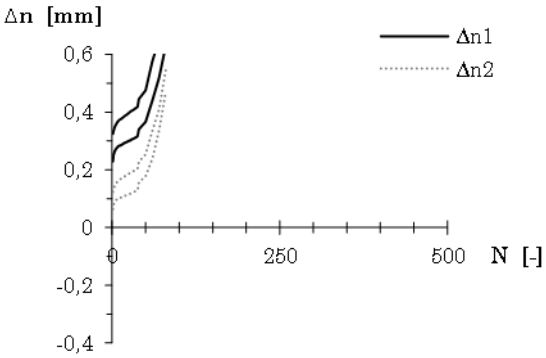
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



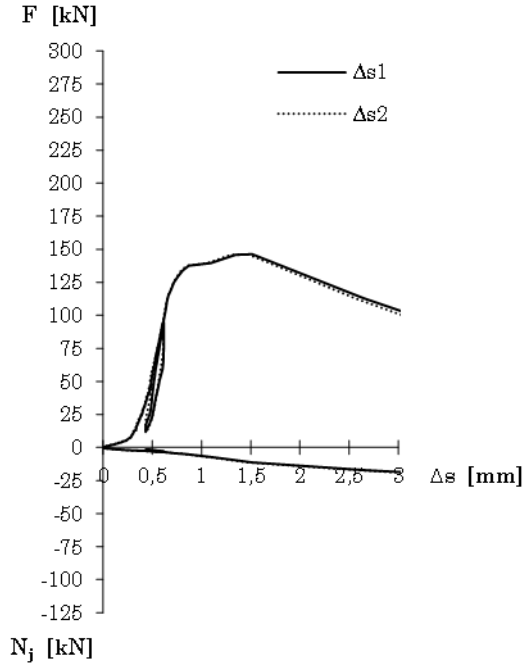
c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



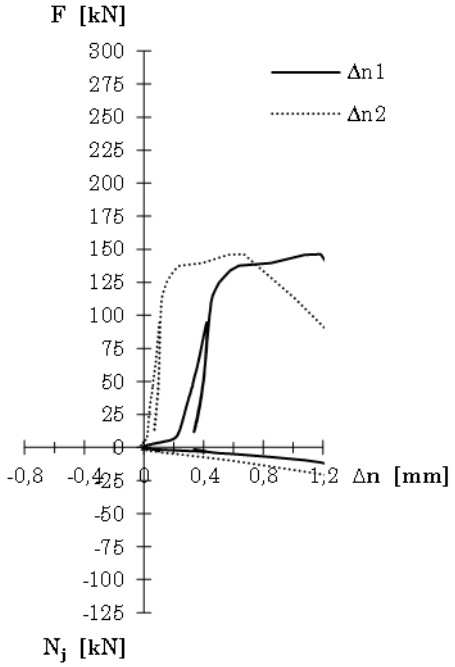
d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

e) Bruchbild

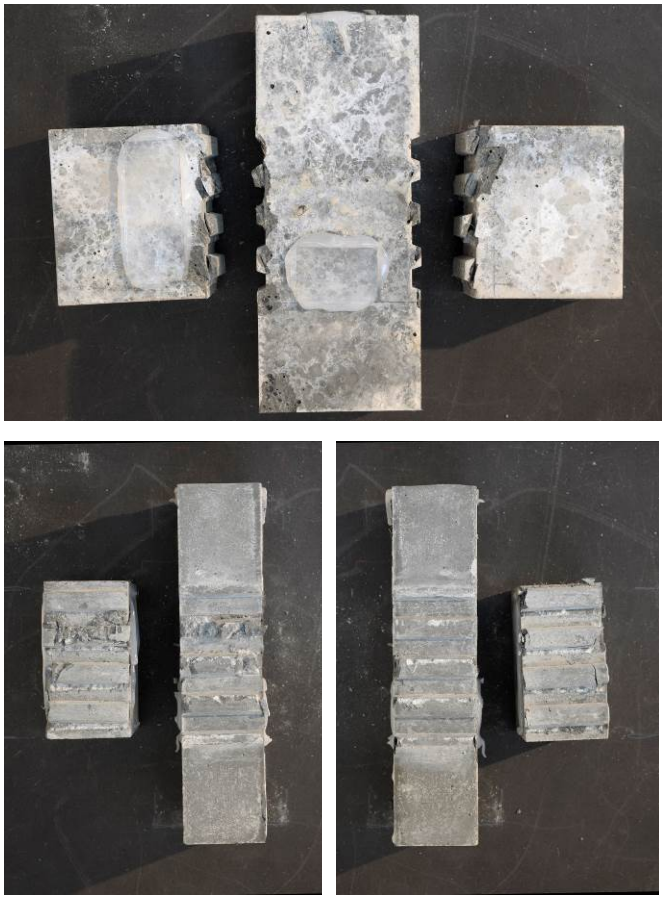
FZ-22-V_S4 (0,75 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

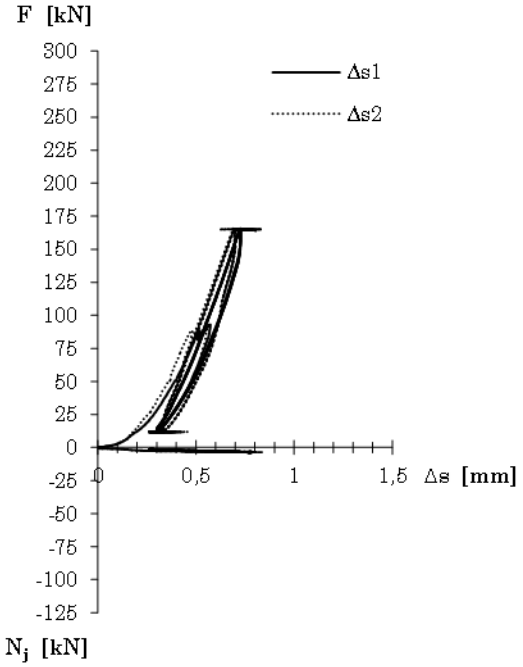


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

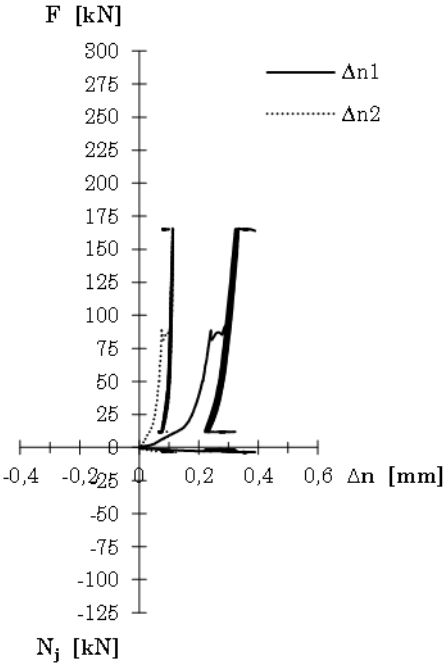


c) Bruchbild

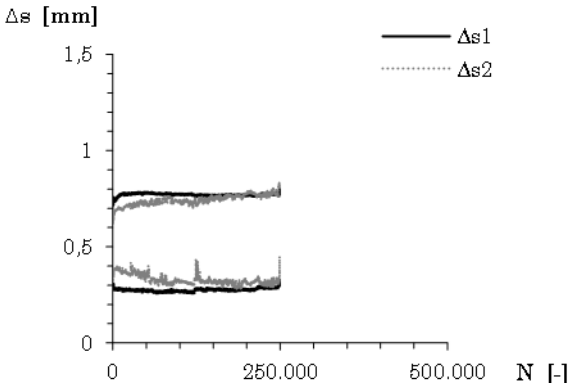
FZ-25-V_S4 (0,75 : 0,05)



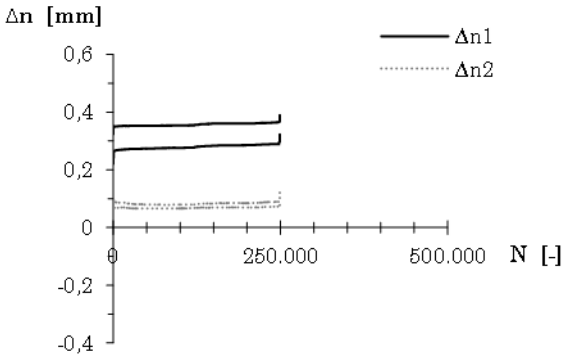
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



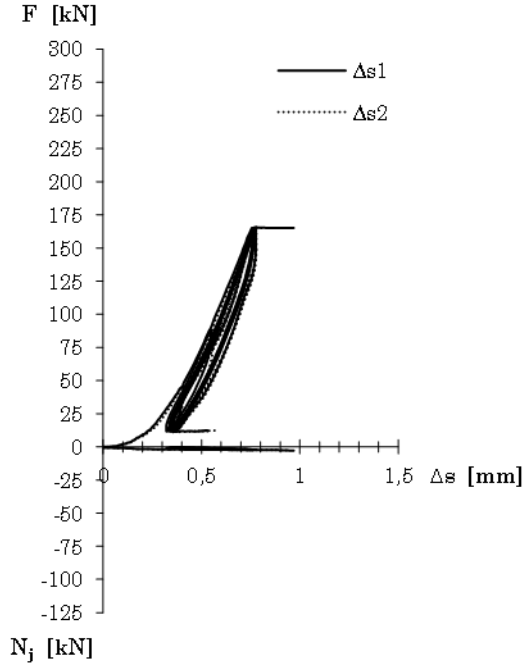
c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



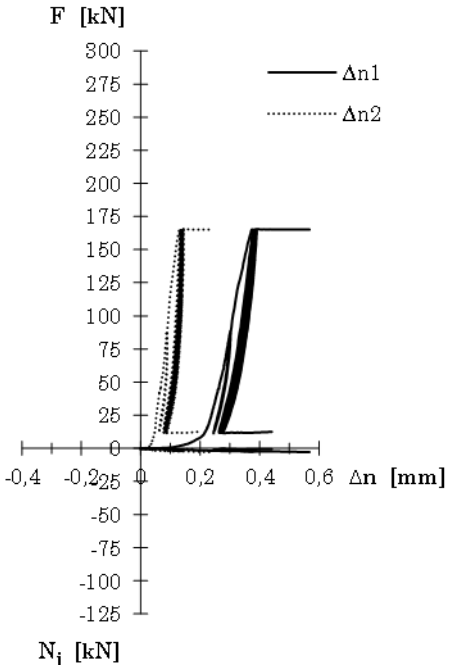
d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

e) Bruchbild

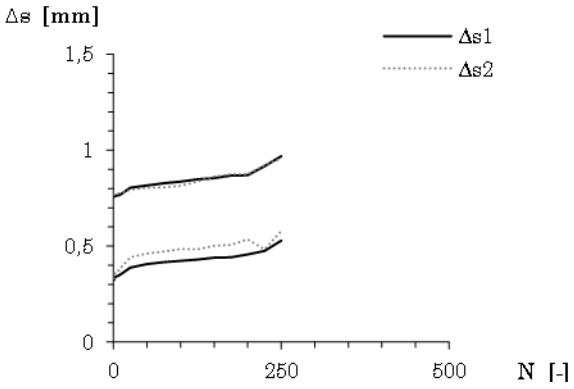
FZ-14-V_S4 (0,70 : 0,05)



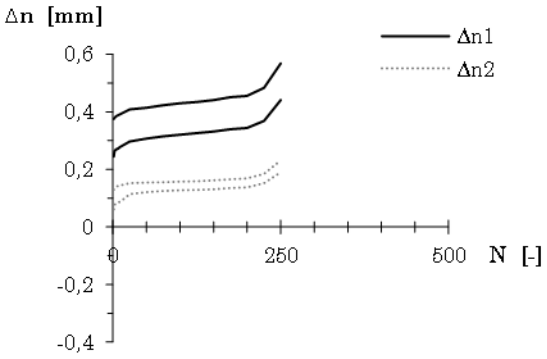
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



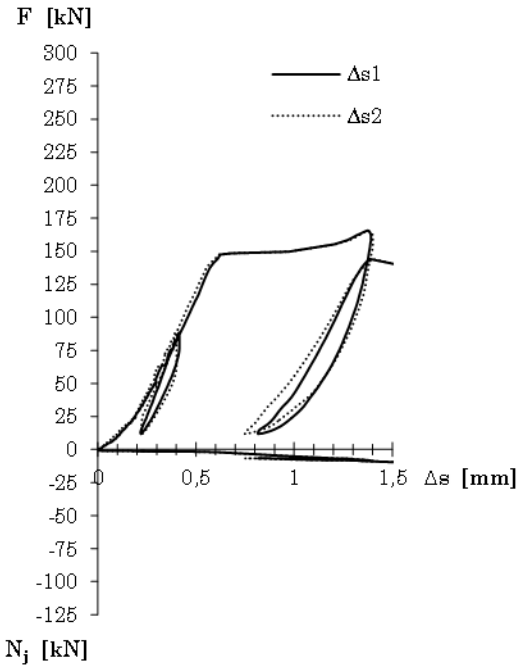
c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



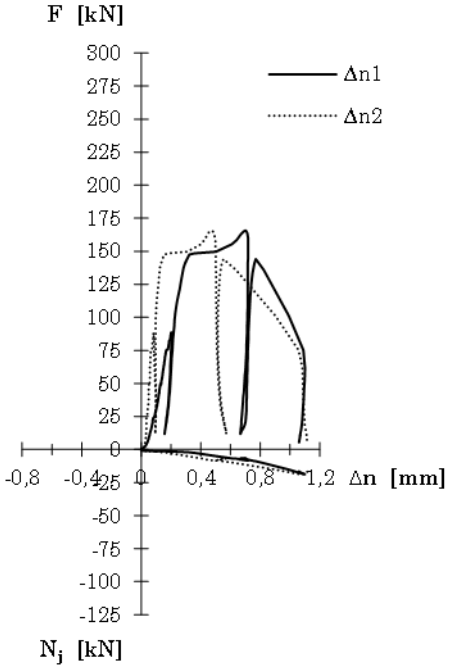
d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

e) Bruchbild

FZ-6-V_S4 (0,70 : 0,05)



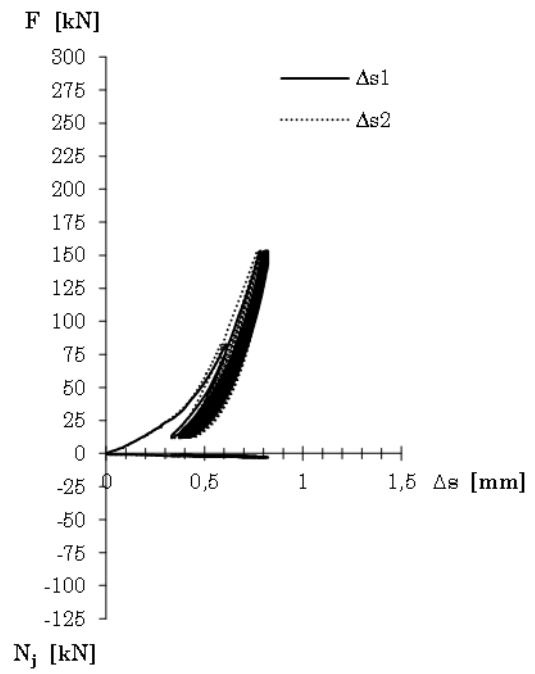
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



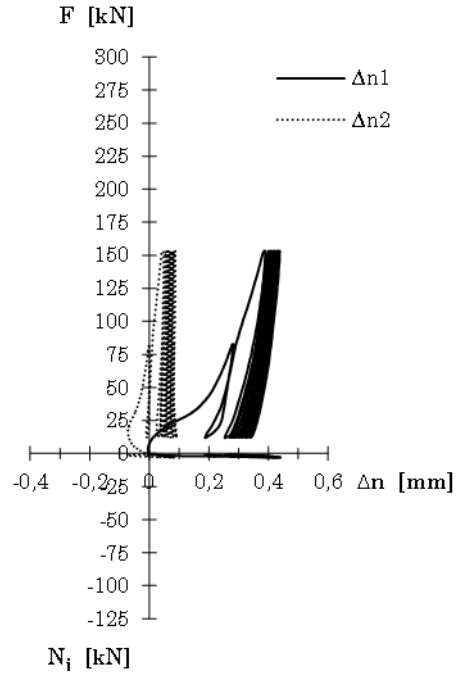
b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

c) Bruchbild

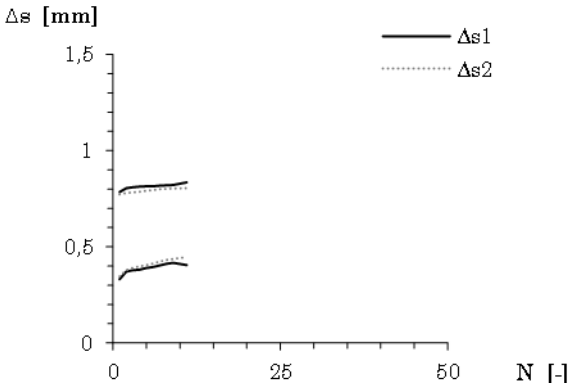
FZ-1-V_S4 (0,70 : 0,05)



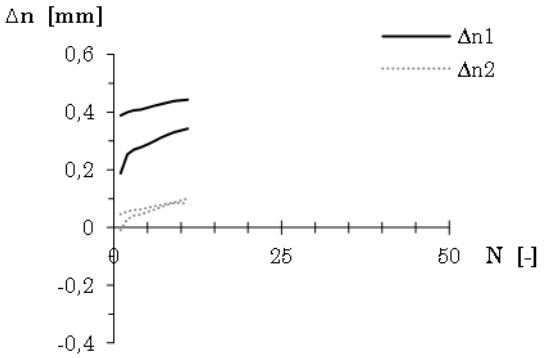
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



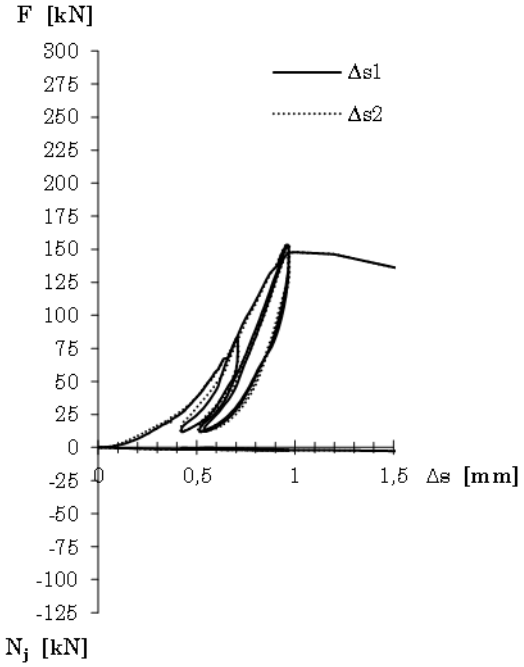
c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



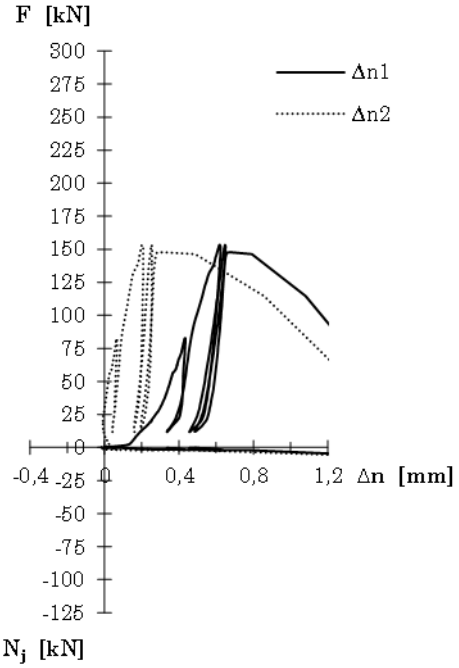
d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

e) Bruchbild

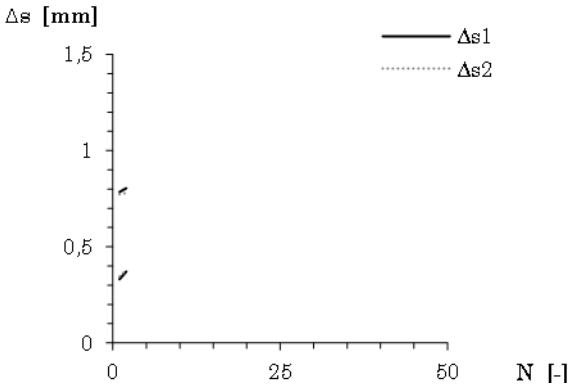
FZ-5-V_S4 (0,65 : 0,05)



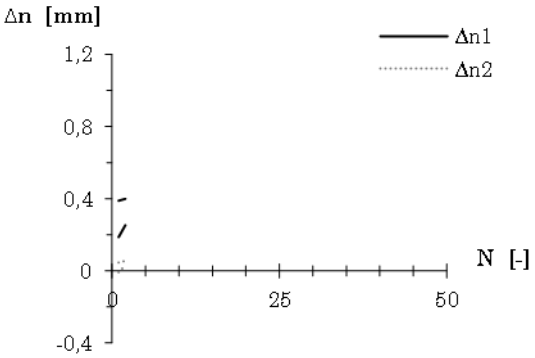
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



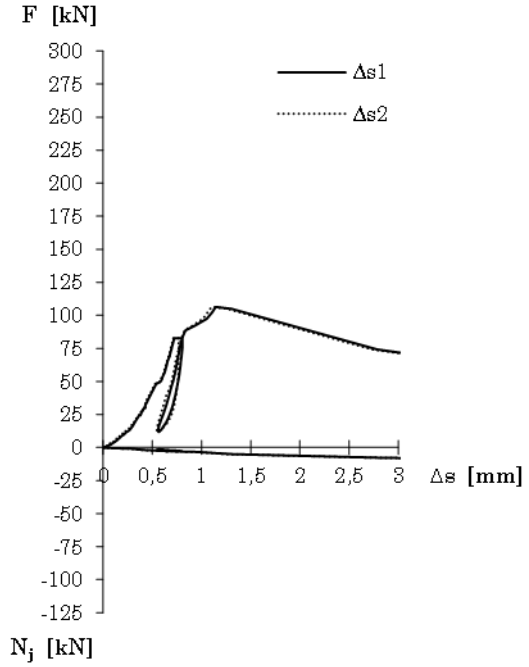
c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



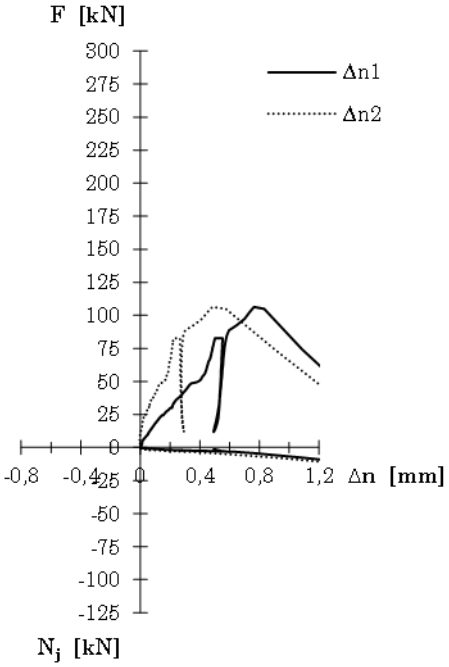
d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

e) Bruchbild

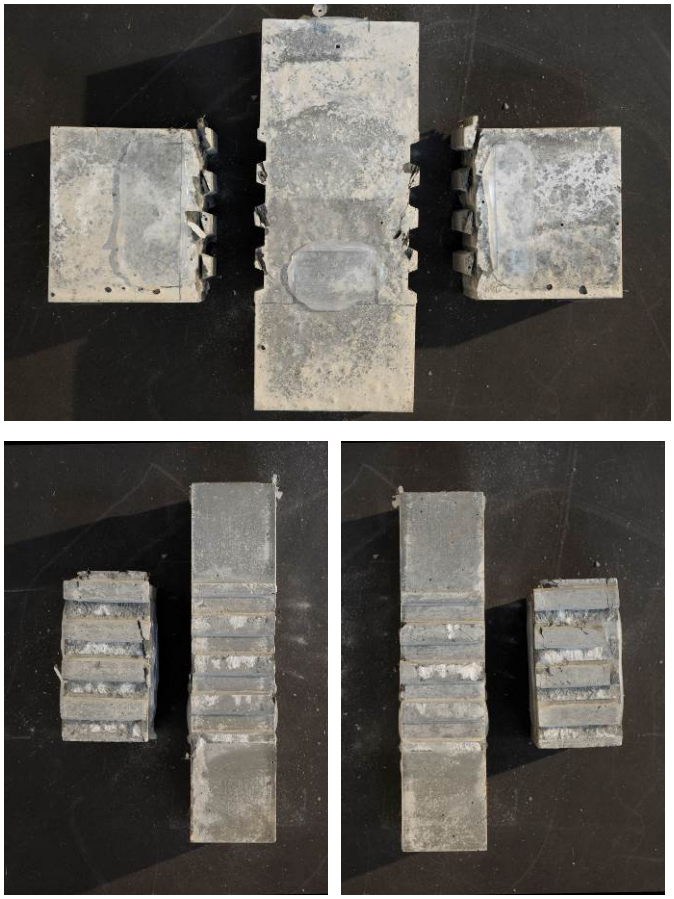
FZ-24-V_S4 (0,65 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

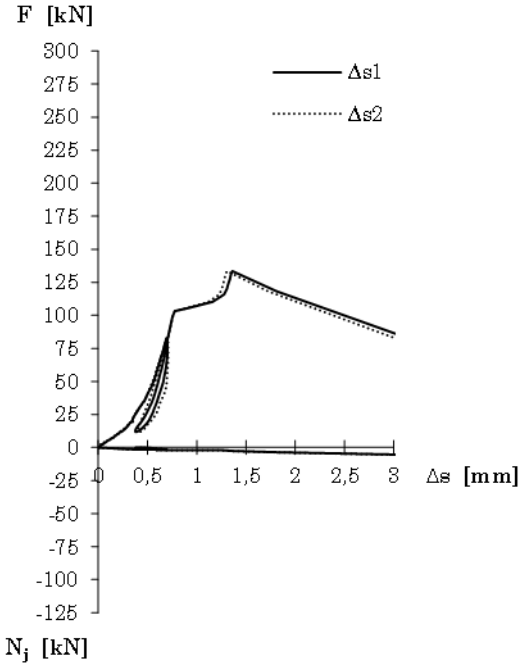


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

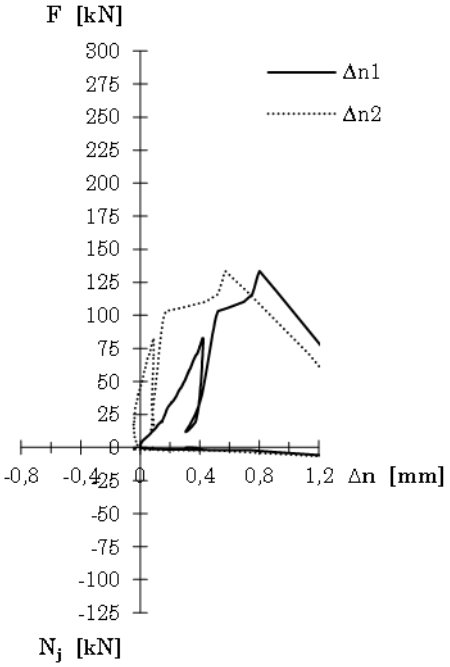


c) Bruchbild

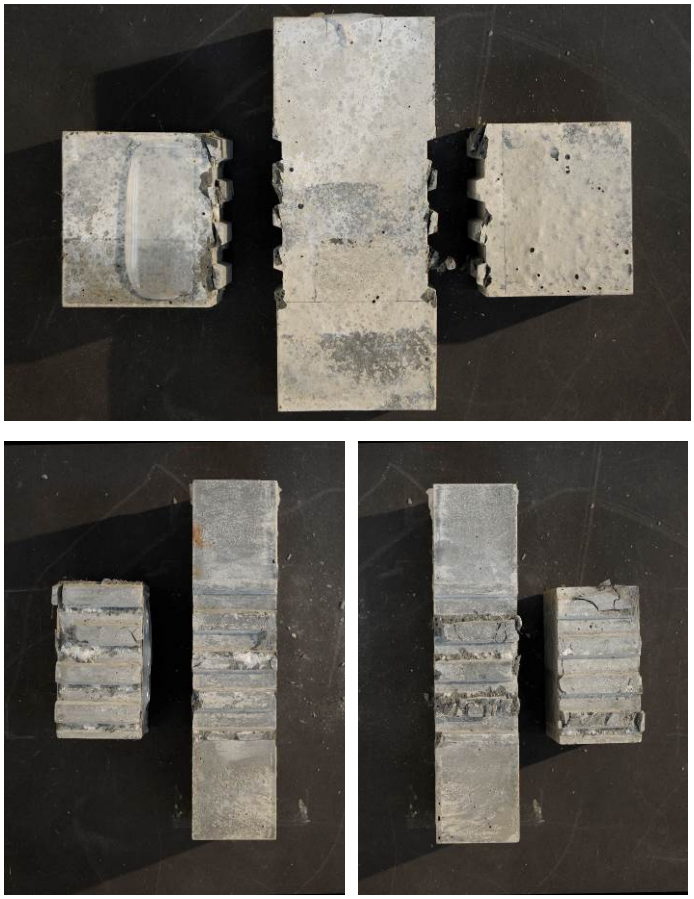
FZ-13-V_S4 (0,65 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

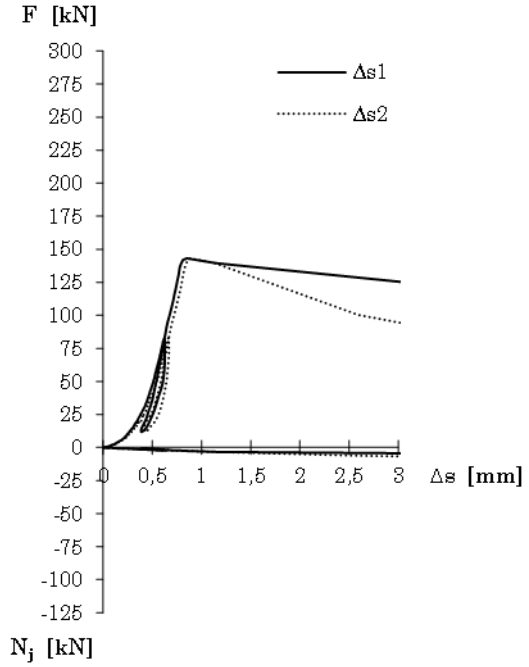


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

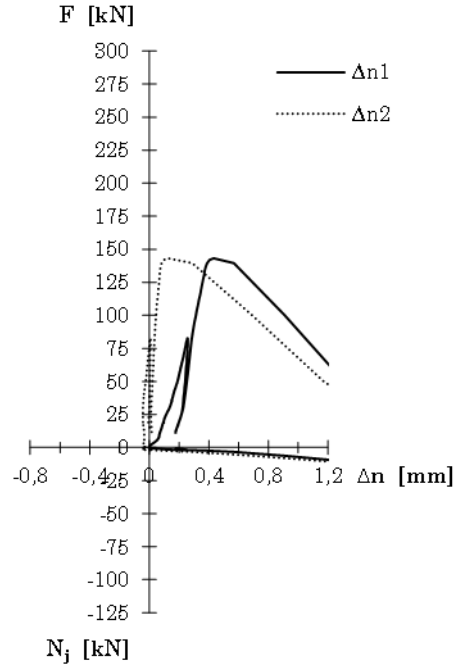


c) Bruchbild

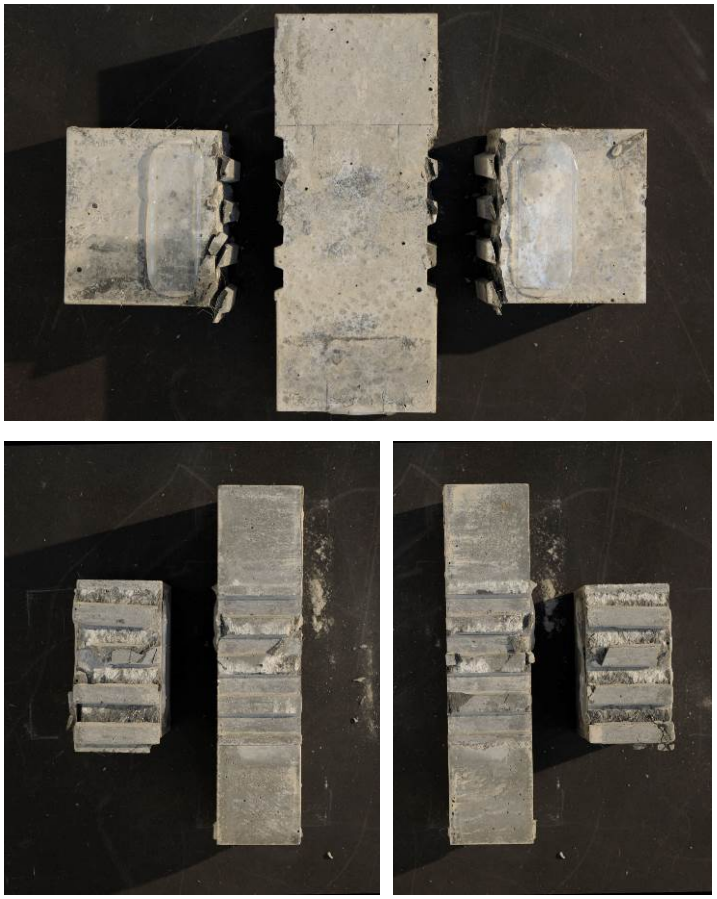
FZ-18-V_S4 (0,65 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

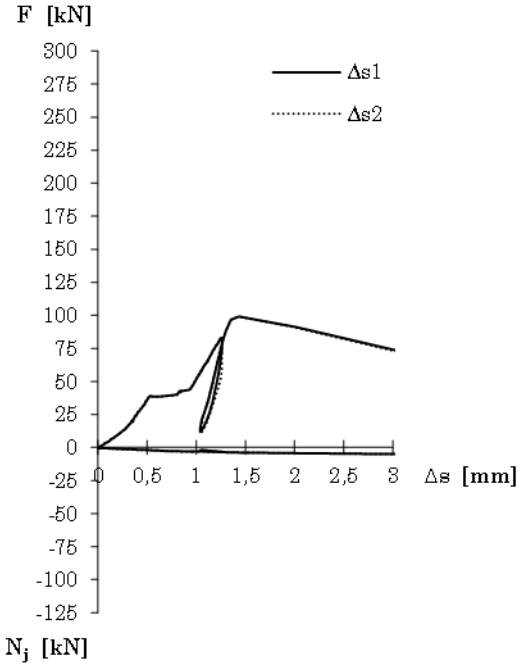


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

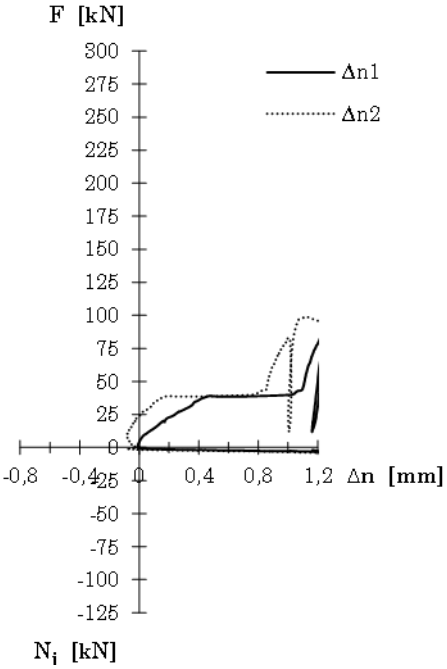


c) Bruchbild

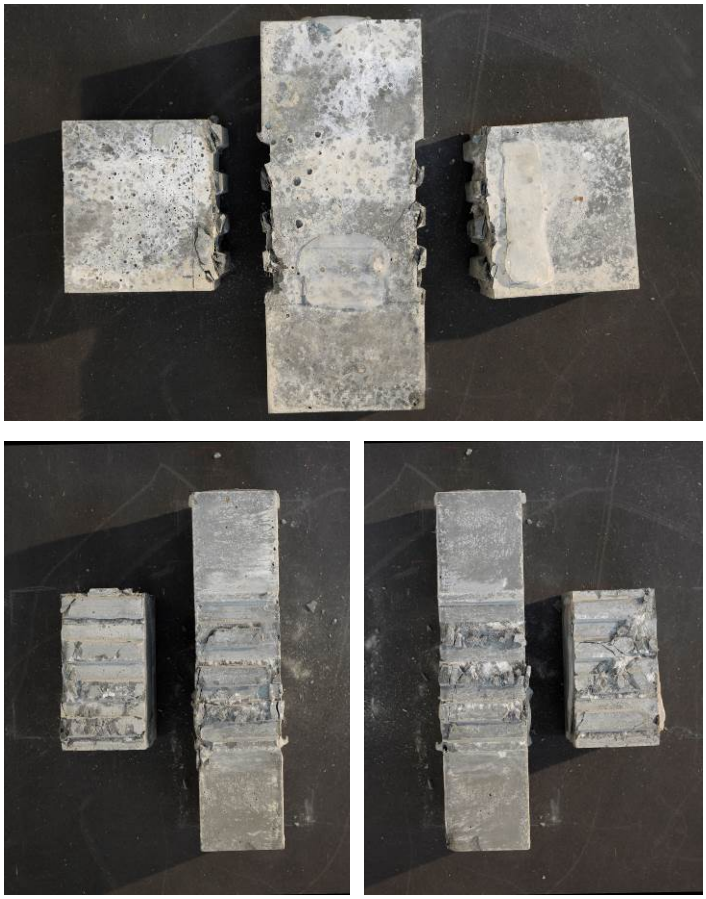
FZ-19-V_S4 (0,65 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

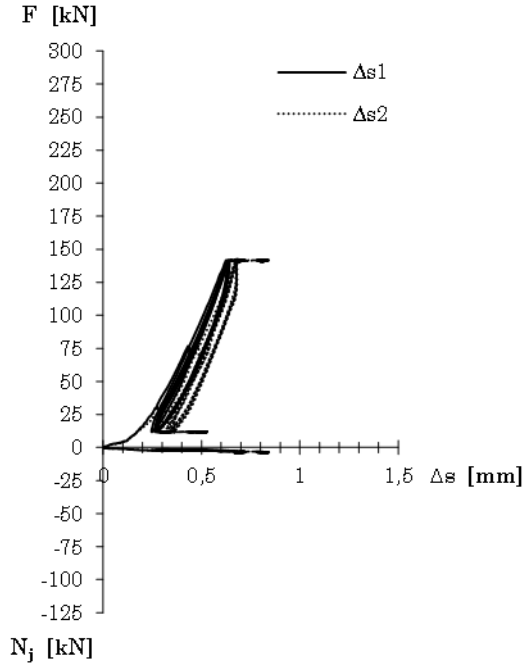


b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

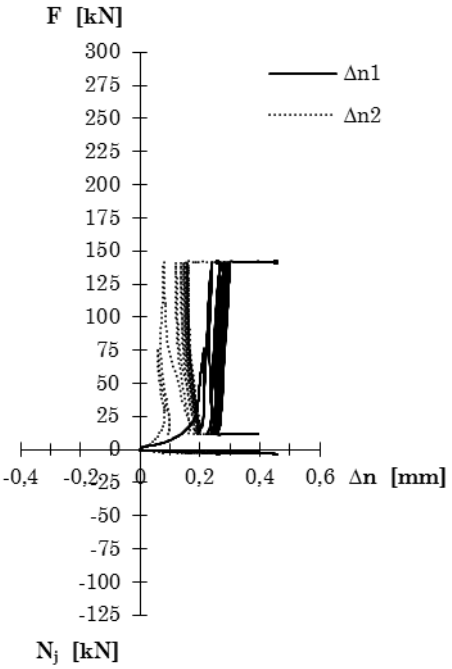


c) Bruchbild

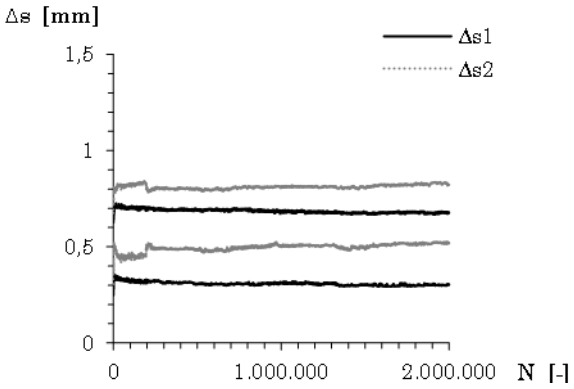
FZ-23-V_S4 (0,65 : 0,05)



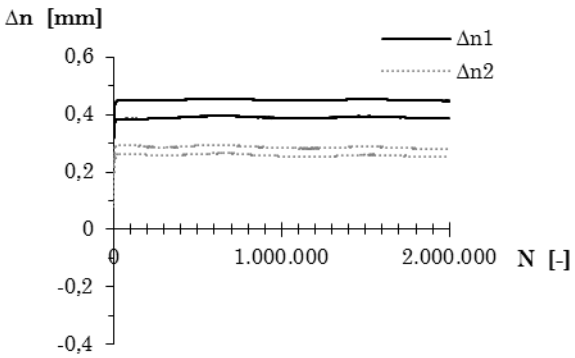
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

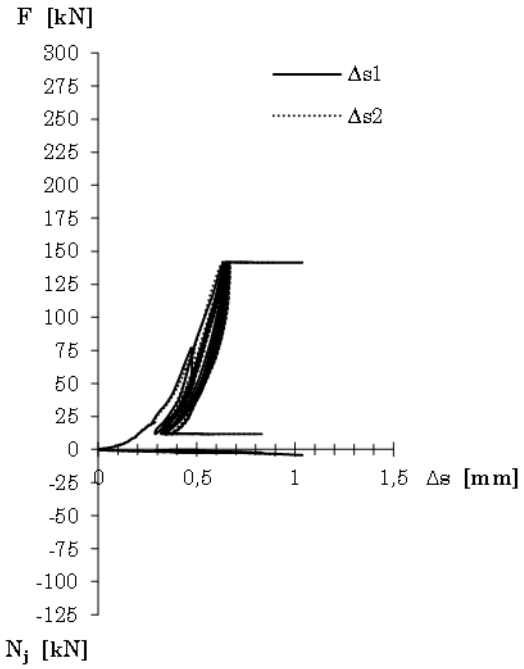


c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)

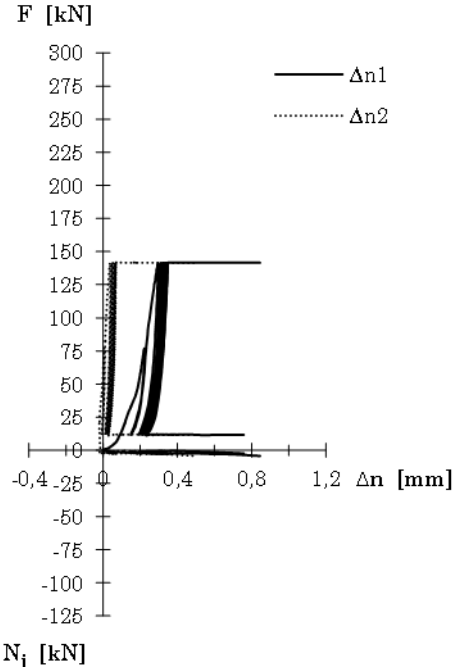


d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

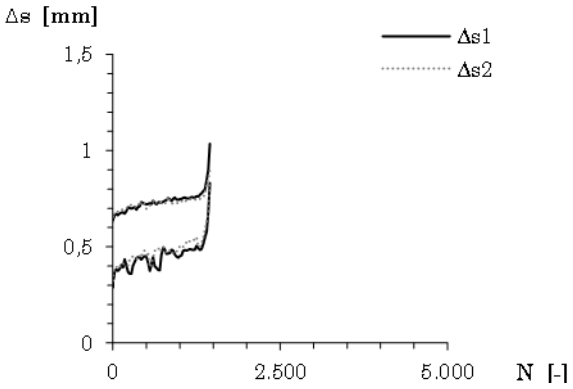
FZ-11-V_S4 (0,60 : 0,05)



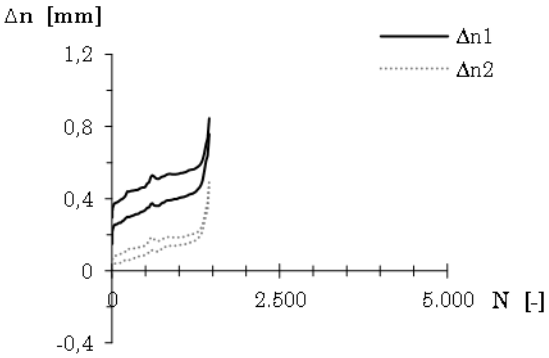
a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



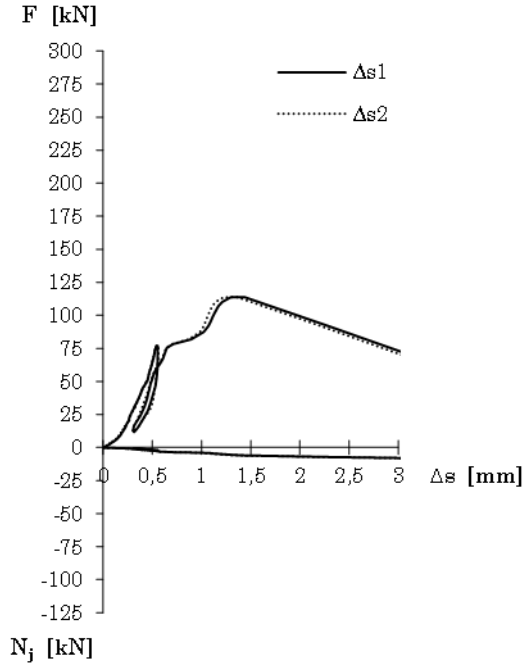
c) Verformungsentwicklung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



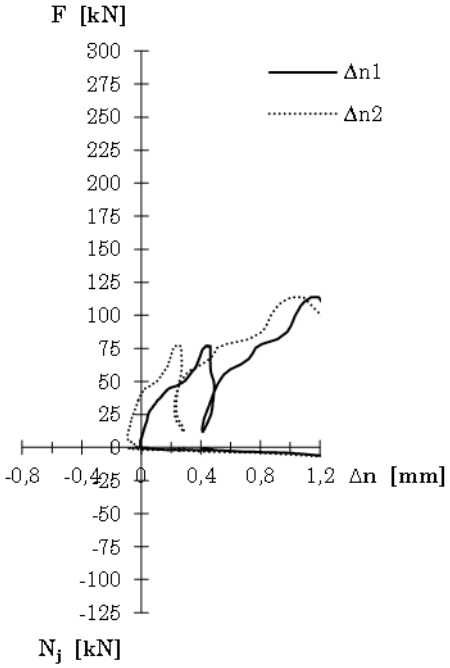
d) Verformungsentwicklung
(Verformung normal zur Fuge)

e) Bruchbild

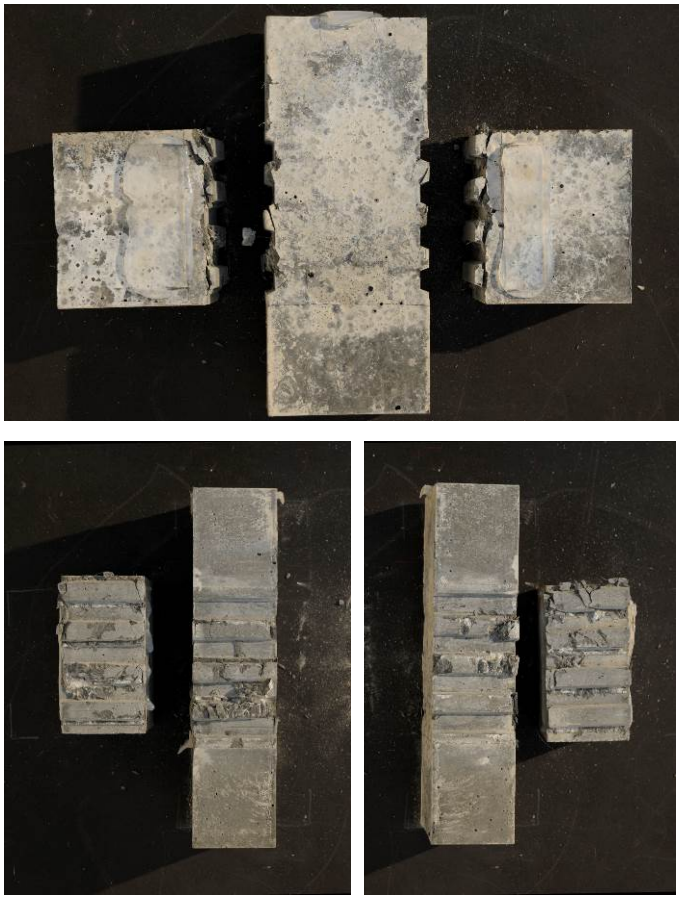
FZ-20-V_S4 (0,60 : 0,05)



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)

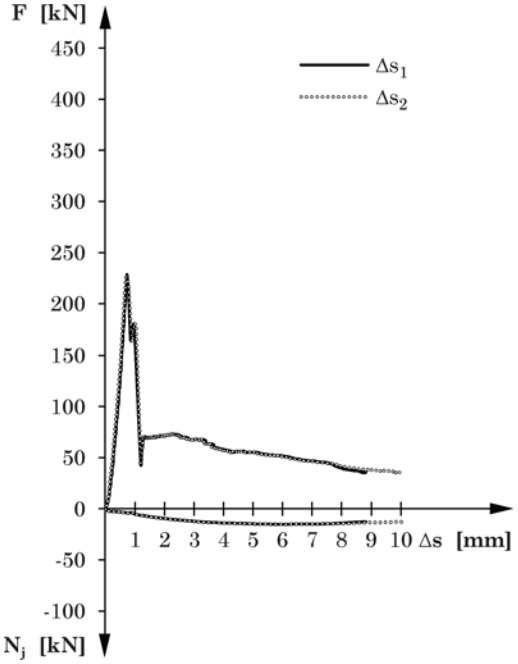


c) Bruchbild

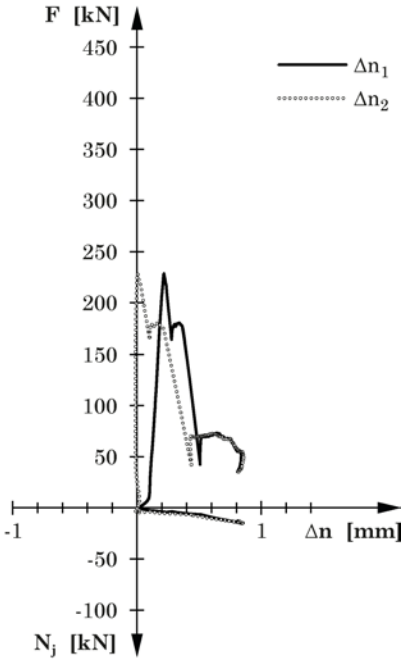
FZ-17-V_S4 (0,60 : 0,05)

Weggeregelte Abscherversuche unter statischer Belastung zur Prüfung der Resttragfähigkeit (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/min; im abfallenden Ast wurde die Belastungsgeschwindigkeit stufenweise erhöht)

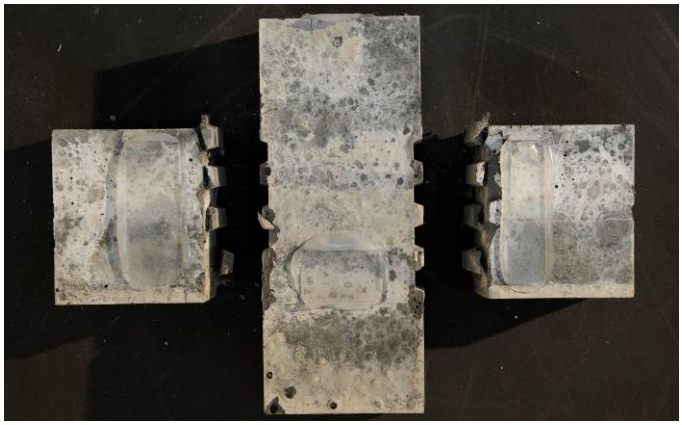
Kennzeichnung (bez. Oberlast : bez. Unterlast)	Prüfdatum	Alter	Abmessungen der kleineren der beiden Kontaktflächen		F_{ult}	$N_{j,ult}$	$\Delta s_{1,ult}$	$\Delta s_{2,ult}$	$\Delta n_{1,ult}$	$\Delta n_{2,ult}$
			b	h						
		[Tage]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
FZ-11-V_S4 (0,60 : 0,05)	30.06.2014	237	49,9	94,7	228,6	-4,0	0,736	0,709	0,217	0,003



a) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verschiebung parallel zur Fuge)



b) Kraft-Verformungs-Beziehung
(Verformung normal zur Fuge)



c) Bruchbild

FZ-11-V_S4 (0,60 : 0,05)