

Wolfram Jäger, Jürgen Ries, Maik Erler, Peter Schöps

**OptiHaP – Umsetzung
einer optimierten Prüfung
der Haftscherfestigkeit im
Mauerwerksbau in Anlehnung an
das bisherige europäische Verfahren
nach DIN EN 1052-3**

F 3191

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) 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 reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0467-6

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/tauforschung



Endbericht

Titel: OptiHaP

Umsetzung einer optimierten Prüfung der Haftscherfestigkeit
im Mauerwerksbau in Anlehnung an das bisherige europäische
Verfahren nach DIN EN 1052-3

Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.43

Förderer: BBSR
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
Referat II 3
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn

Mitfinanziert durch:
Quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG
Mühlenschweg 6, 49090 Osnabrück
Planungs- und Ingenieurbüro für Bauwesen Radebeul
Wichernstr. 12, 01445 Radebeul
Verband Bauen in Weiß
Hohes Steinfeld 1, 14797 Kloster Lehnin
Bundesverband Leichtbeton e.V.
Sandkauler Weg 1, 56564 Neuwied
Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstr. 30 B, 10829 Berlin

Weiter unterstützt durch:
Franken Maxit Mauermörtel GmbH & Co. KG
Azendorf 63, 95359 Kassendorf
Ziegelwerk Freital Eder GmbH
Wilsdruffer Straße 25, 01705 Freital

Forschende Stelle: Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur
Lehrstuhl Tragwerksplanung
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger
01062 Dresden

Bearbeiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger
M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Ries
Dipl. Wirtsch. Dipl.-Ing. (FH) Maik Erler
Dipl.-Ing. Peter Schöps

Datum: 31.10.2018/31.03.2019

Druckdatum 30.09.2019 15:18

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangspunkt.....	4
1.1. Deutsches Prüfverfahren.....	4
1.1.1. Prinzipieller Aufbau.....	4
1.1.2. Anwendung.....	4
1.2. Europäisches Prüfverfahren.....	5
1.2.1. Prinzipieller Aufbau: Versuchsaufbau A.....	5
1.2.2. Prinzipieller Aufbau: Versuchsaufbau B.....	6
1.3. Anwendung.....	6
1.4. Hypothesen zu den Ursachen der Unterschiede.....	8
2. Lösungsentwicklung.....	8
3. Einfache Modellüberlegungen.....	10
3.1. Biegeeinfluss.....	10
3.2. Zu den Stahlplatten.....	12
3.2.1. Dimension.....	13
3.2.2. Nachweis der Klebefuge.....	14
4. Numerische Untersuchungen.....	15
4.1. Prüfkörper aus Kalksandstein bzw. Ziegel mit Dünnbettmörtel zur Variantenbetrachtung.....	16
4.1.1. Allgemeine Angaben.....	16
4.1.2. Abstand der Auflagerpunkte nach DIN EN 1052-3.....	16
4.1.3. Auflagerung des Prüfkörpers über Z-Platten.....	29
4.1.4. Zentrische Lagerung.....	31
4.1.5. Vollflächige Lagerung auf den unteren Lagerplatten, Prüflast 100 kN.....	37
4.1.6. Seitlich aufgeklebte Stahlplatten.....	41
4.1.8. Schlussfolgerungen.....	46
5. Experimentelle Untersuchungen.....	46
5.1. Auswertung der Haftscherversuche.....	46
5.1.1. Versuchsreihe 06.03.2018.....	46
5.1.2. Versuchsreihe 30.05.2018.....	47
5.1.3. Vergleich der Ergebnisse.....	54
5.1.4. Versuchsreihe 30.05.2018.....	55
5.1.5. Versuchsreihe 21.08.2018.....	56
5.1.6. Versuchsreihe 22.08.2018.....	59
5.1.7. Versuchsreihe 30.08.2018.....	61
5.1.8. Versuchsreihe 04.09.2018.....	64
5.1.9. Versuchsreihe 07.11.2018.....	68
5.2. Zusammenfassung der Versuchsreihen.....	70
6. Resümee.....	71
7. Umgang mit den bisherigen Werten in der Norm EN 1996-1-1/NA.....	73
8. Abschätzung der Auswirkungen.....	73
9. Praxisüberführung.....	73
10. Literatur und Quellen.....	73

1. Ausgangspunkt

Mit dem Übergang auf die europäischen Produkt- und Prüfnormen wird die Haftscherfestigkeitsprüfung nach DIN EN 1052-3 [1] durchgeführt. Wie vorangegangene Vergleiche gezeigt haben, sind die damit erreichbaren Werte etwa um die Hälfte geringer als nach dem bisherigen deutschen Prüfverfahren nach DIN 18555-5 [2]. Der Fakt an sich wurde von *Schubert* und *Lohaus* festgestellt, die Ursachen dafür konnten nicht geklärt werden. Das Phänomen führt allgemein zu einer Verunsicherung. Im Rahmen einer Eigenforschung konnten diese jedoch geortet und dingfest gemacht werden. Es war im Rahmen dieses Forschungsvorhabens der theoretisch geortete Versuchsaufbau zu testen und ggf. weiter zu optimieren sowie praxisgerecht aufzubereiten. Ausgangspunkt war dabei die bisherige Versuchstechnik, die in gewisser, wirtschaftlich vertretbarer Weise verbessert werden sollte. In Deutschland ist es inzwischen übliche Praxis auf der Grundlage der Ergebnisse von *Schubert* und *Lohaus* die Ergebnisse der Prüfung nach DIN EN 1052-3 mit dem Faktor 2 zu multiplizieren und dann weiter zu verwenden. Sofern der Faktor 2 bestätigt werden kann, sind keine Veränderungen in den einschlägigen Normen notwendig. Andernfalls sollten die entsprechenden Werte für die Norm bereitgestellt werden.

1.1. Deutsches Prüfverfahren

Das ehemalige deutsche Prüfverfahren war in DIN 18555-5 [1] geregelt.

1.1.1. Prinzipieller Aufbau

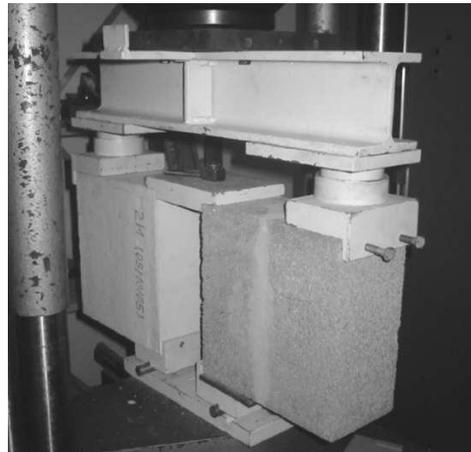
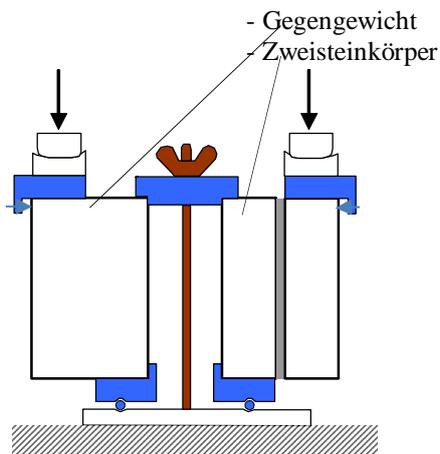


Bild 1 Versuchsaufbau für das deutsche Prüfverfahren nach DIN 18555-5 [2]

1.1.2. Anwendung

Zur Anwendung und deren Analyse s. auch [9].

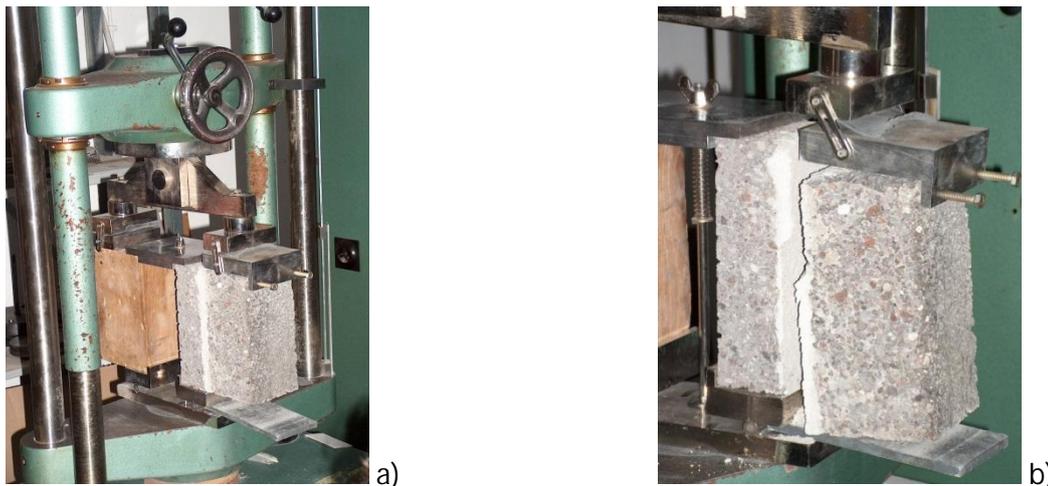


Bild 2 Prüfkörper aus Leichtbeton a) Im Prüfgeschirr nach DIN 18555-5 vor Belastungsbeginn; b) Prüfkörper nach dem Bruch [9]

1.2. Europäisches Prüfverfahren

Das Europäische Prüfverfahren ist in DIN EN 1052-3 [1] geregelt. Dabei werden in dieser Norm zwei mögliche Versuchsaufbauten angeboten.

1.2.1. Prinzipieller Aufbau: Versuchsaufbau A

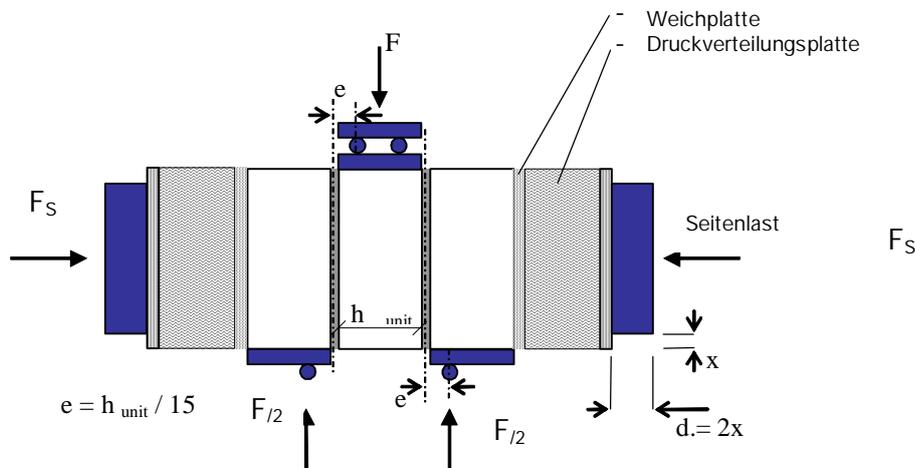


Bild 3 Versuchsaufbau europäisches Prüfverfahren A entsprechend DIN EN 1052-3 [1]

Bei jeder der drei Vorlaststufen sind mindestens drei Prüfkörper zu prüfen. Bei Mauersteinen mit einer Druckfestigkeit $> 10 \text{ N/mm}^2$ sind Vorlasten zu wählen, die etwa $0,2 \text{ N/mm}^2$, $0,6 \text{ N/mm}^2$ und $1,0 \text{ N/mm}^2$ ergeben. Bei Mauersteinen mit einer Druckfestigkeit $< 10 \text{ N/mm}^2$ sind Vorlasten zu wählen, die etwa $0,1 \text{ N/mm}^2$, $0,3 \text{ N/mm}^2$ und $0,5 \text{ N/mm}^2$ ergeben. Die Vorlast ist im Bereich von $\pm 2 \%$ des Ausgangswertes zu halten. Das Aufbringen der Vorlast muss nach Bild 3 erfolgen. Die Biegesteifigkeit der zum Aufbringen der Vorlast benutzten Lastverteilungsbalken muss ausreichend groß sein, um eine gleichmäßige Spannungsverteilung zu sichern. Falls die Druckplatten der Maschine kürzer als die Länge der Prüfkörper l_u sind, dürfen Lastverteilungsbalken benutzt werden. Deren Länge muss der Länge des Prüfkörpers l_u entsprechen, und sie müssen eine Dicke aufweisen, die größer als oder gleich der Länge des Prüfkörpers ab dem Rand der Druckplatte ist.

1.2.2. Prinzipieller Aufbau: Versuchsaufbau B

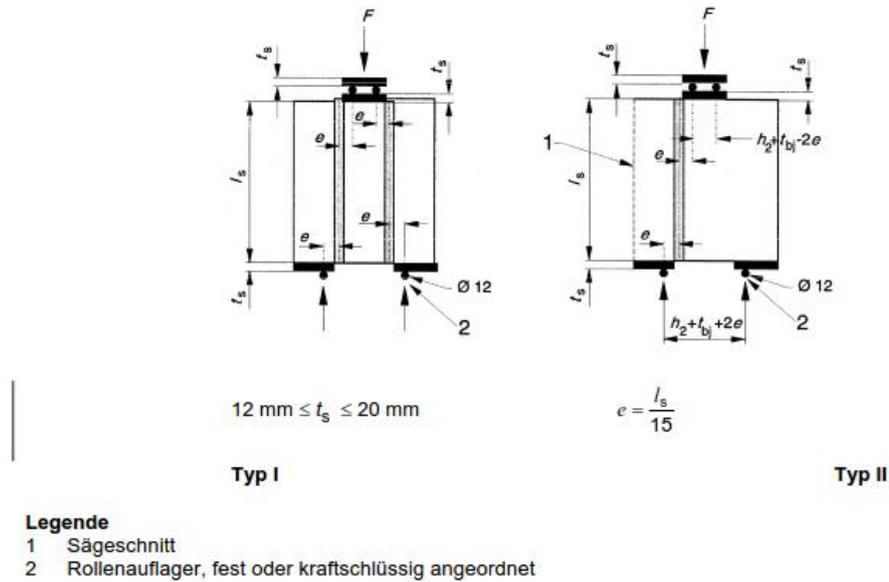


Bild 4 Versuchsaufbau europäisches Prüfverfahren B entsprechend DIN EN 1052-3 [1]

Es sind mindestens sechs Prüfkörper bei einer Vorlast von Null zu prüfen.

1.3. Anwendung

Um weiter in die Materie einzudringen, wurden Haftscherversuche nach dem europäischen Verfahren intensiv beobachtet.

- Verfahren B

Dabei wurde beim Verfahren B immer wieder die Bewegung kurz vor dem Bruchvorgang festgestellt, die infolge des eingetragenen Biegemomentes schließlich zu Zugspannungen in der Fuge führt, die das Ergebnis beeinflussen.



Bild 5 Versuch nach DIN EN 1052-3 Verfahren B, Typ II mit Porenbeton und Dünnbettmörtel (ohne Textil in der Lagerfuge) – Bruch des Steins nahe der Fuge (OML Institut für Massivbau der TU Dresden)



Bild 6 Verfahren B, Typ II mit Porenbeton und Dünnbettmörtel (mit Textil in der Lagerfuge) – Bruch des größeren Steines in der Mitte des Versuchskörpers (Das Wegrollen der Lagerplatte unten ist deutlich zu erkennen)



Bild 7 Versuchsaufbau mit 3 Steinen nach DIN EN 1052-3, Verfahren B, Typ I, vor dem Versuch

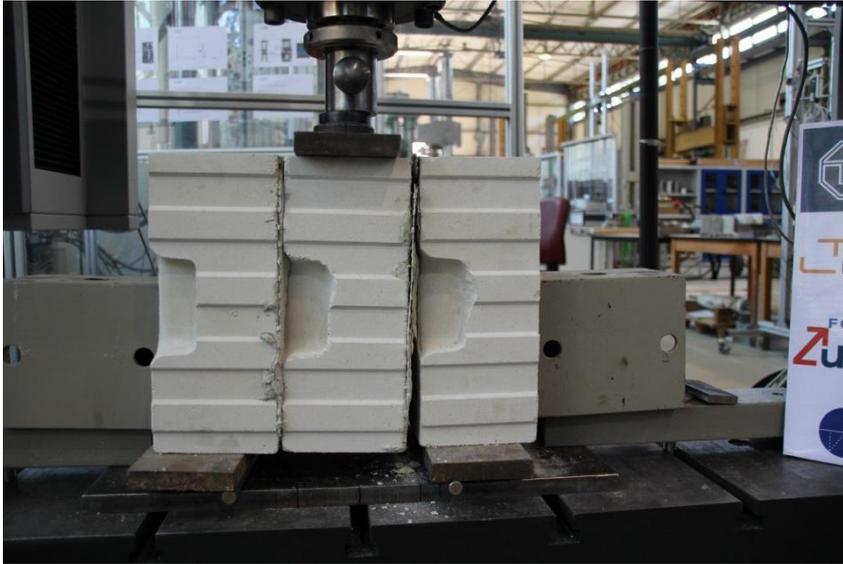


Bild 8 Versuchsaufbau mit 3 Steinen, Versuchsergebnis – Bruch in der Fuge

Im Ergebnis ist deutlich der Biegeeinfluss im Probekörper festzustellen, der das Ergebnis verfälscht.

1.4. Hypothesen zu den Ursachen der Unterschiede

Im Zuge der Beantragung und Vorbereitung des Projektes wurden Analysen und Vergleiche mit anderen Verfahren angestellt (vgl. [10]). Als wesentliche Ursachen für die Abweichungen zwischen europäischem und deutschem Prüfaufbau wurden daraus abgeleitet:

- Biegeeinfluss im Prüfkörper (Durch den im Prüfkörper eingetragenen Biegeeinfluss entstehen im Zugspannungen, die zu Rissen und damit zum Verlust der Haftscherfestigkeit in den gezogenen Bereichen führen)
- Spannungskonzentrationen durch die Lasteinleitungsplatten führen zu erheblichen Spannungsspitzen im Mörtel der Fuge, die geprüft werden soll. Diese verfälschen das Ergebnis ebenfalls.

Im Zuge der Bearbeitung hat es sich herauskristallisiert, dass die Frage der Lasteinleitung von untergeordneter Bedeutung ist und nicht die Dimension erreicht, die den Unterschied zwischen dem deutschen und dem Europäischen Prüfverfahren ausmacht.

2. Lösungsentwicklung

In [10] wurde intuitiv vorgeschlagen, die Lasteinleitung in der Systemlinie der Fuge vorzunehmen, um eine reine Scherbeanspruchung zu erzeugen.

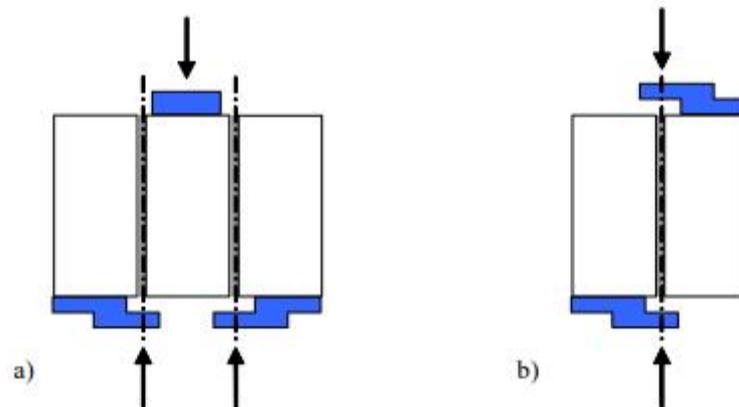


Bild 9 Vorschlag aus [10] zur Verbesserung der Lasteinleitung

Anhand eines Versuchskörpers aus Holzsteinen und Fugen aus Filz, die mit dem Holz verklebt wurden, sind die Verbesserungen getestet worden:

- Aufgrund der Z-förmigen Lasteinleitungsplatte unten kommt es zu einer kinematischen Kette. Deshalb wurde die Z-Platte mit dem rechten und dem linken Stein verspannt.
- Es kommt nach wie vor zu Biegezugspannungen im Prüfkörper.

In einem zweiten Schritt wurde nunmehr ein Geschirr konstruiert, das ein Abrollen der seitlichen Steine im Bruchvorgang verhindern soll.

- Es verbleiben erhebliche Biegezugspannungen im Prüfkörper, die Stauchungen in der Druckzone führen zur Ausbildung von Biegezugspannungen, die nicht erwünscht sind.

In einem weiteren Schritt wurden dann am oberen Ende der Druckzone Abstandshalter eingebaut.

- Die Biegezugspannungen in dem Holzprobekörper konnten dadurch abgebaut und auf ein ggf. vernachlässigbares Maß reduziert werden.

Bei der Erprobung an realen Mauerwerkprüfkörpern musste festgestellt werden, dass

- das Geschirr Schlupf zulässt, der sich auf das Ergebnis auswirkt und
- durch das Anspannen der Flachstäbe und Winkel sekundäre Spannungen im Prüfkörper entstehen, die teilweise zu einem Spaltzugversagen der Steine geführt haben.

Durch eine statisch unbestimmte Rechnung ist dann ermittelt worden, welche Dimensionen die Zug- und Druckstäbe des Geschirrs haben müssten, um die Biegebeanspruchung aus dem Mauerwerkskörper heraus zu nehmen bzw. eben ihn drastisch zu reduzieren. Bei den dabei ermittelten Dimensionen und dem Fakt des Schlupfes wurde dann das Aufkleben von zwei Stahlplatten auf den Dreisteinprüfkörper für die weitere Arbeit am Verfahren B bevorzugt.

Für das Verfahren A galt es den Biegeinfluss zu fassen und durch Festlegung entsprechend angepasster Seitenlaststufen eliminieren zu können.

Beide Richtungen sind ingenieurmäßig, numerisch und experimentell weiter verfolgt worden.

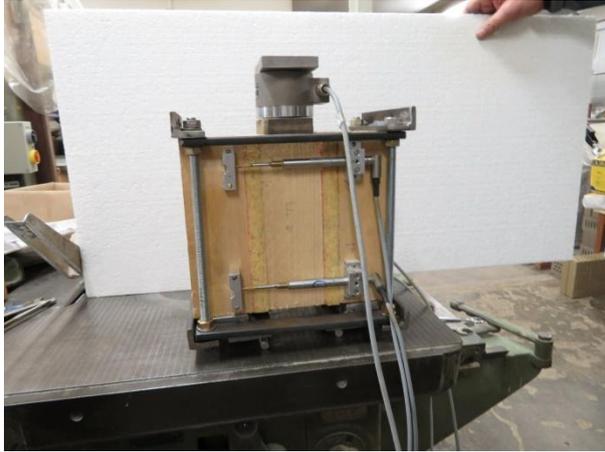


Bild 10 Phantom-Prüfkörper mit Zug- und Druckgeschirr (li.) und Prüfkörper mit aufgeklebten Stahlplatten (re.)

3. Einfache Modellüberlegungen

Wegen der erforderlichen Tragfähigkeit der Klebefuge zwischen den Stahlplatten und den Steinen des Prüfkörpers wurde im Laufe der Bearbeitung auf Prüfkörper aus 3 x 2 DF-Steinen übergangen.

3.1. Biegeeinfluss

Entscheidend ist der Biegeeinfluss in der Fuge, der entweder durch die Seitenlast überdrückt oder durch die Stahlplatten verhindert werden muss.

Die Idealisierung des Prüfkörpers als Träger auf zwei Stützen ist in Bild 12 dargestellt. Das Bild a) zeigt dabei die Variante der Lasteinleitung gemäß Norm über die Rollen und deren Abstand von der Fuge. Es kommt dabei zu einer Lastausbreitung bis in die Mitte der Höhe des Steins.

Für Bild 12, b) und Bild 11 ergibt sich die maximale Biegespannung in der Fuge wie folgt:

- Biegemoment

$$M_{L/4} = \frac{F}{2} \cdot \frac{L}{4} = \frac{F \cdot L}{8} \quad (1)$$

- Randspannung

$$W = \frac{b \cdot l_s^2}{6} \quad (2)$$

$$\sigma_R^Z = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot L}{8} \cdot \frac{6}{b \cdot l_s^2} = \frac{3}{4} \cdot \frac{F \cdot L}{b \cdot l_s^2} \quad (3)$$

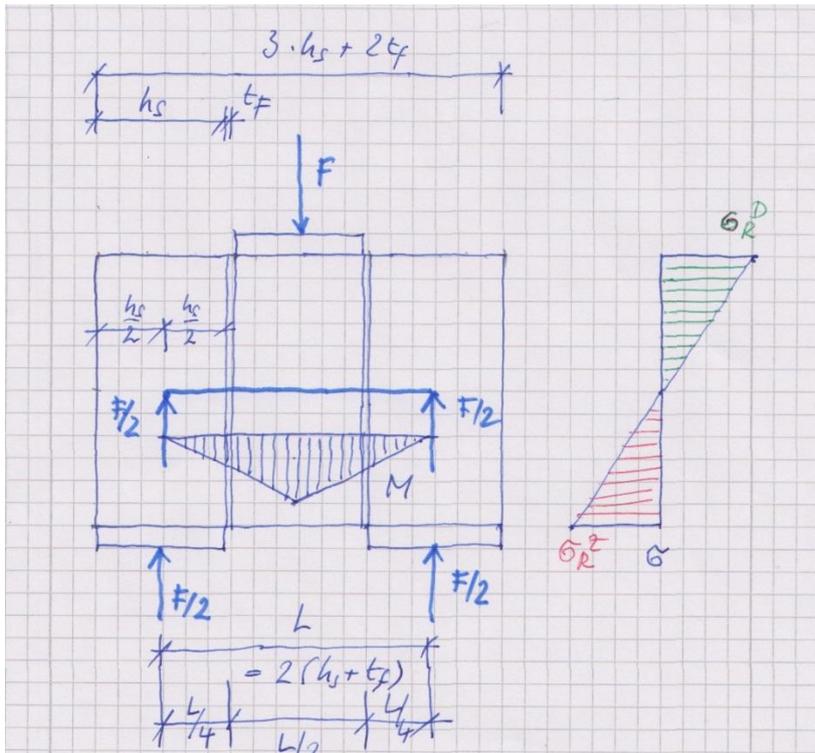


Bild 11 Momentenverlauf und Biegespannungen vereinfacht am Träger auf zwei Stützen dargestellt für mittige Auflagerung der Grundplatten

- Erforderliche Seitenlast zur Überdrückung bei Verfahren A

$$F_s = \sigma_R^Z \cdot b \cdot l_s = \frac{3 P \cdot L}{4 l_s} \quad (4)$$

b=	115	mm	l _s =	240	mm
A=	27600	mm ²			
h _s =	115	mm	t _f =	12	mm
L=	254				
f _{v0}	F	F _{s erf.}	Sigma s		
N/mm ²	kN	kN	N/mm ²		
0,1	5,52	4,38	0,159		
0,3	16,56	13,14	0,476		
0,5	27,6	21,91	0,794		
0,7	38,64	30,67	1,111		
0,9	49,68	39,43	1,429		
1,1	60,72	48,20	1,746		
1,3	71,76	56,96	2,064		
1,5	82,8	65,72	2,381		
1,7	93,84	74,49	2,699		
1,9	104,88	83,25	3,016		
2,1	115,92	92,01	3,334		

Tabelle 1 Erforderliche Seitenlasten und zugehörige Druckspannungen

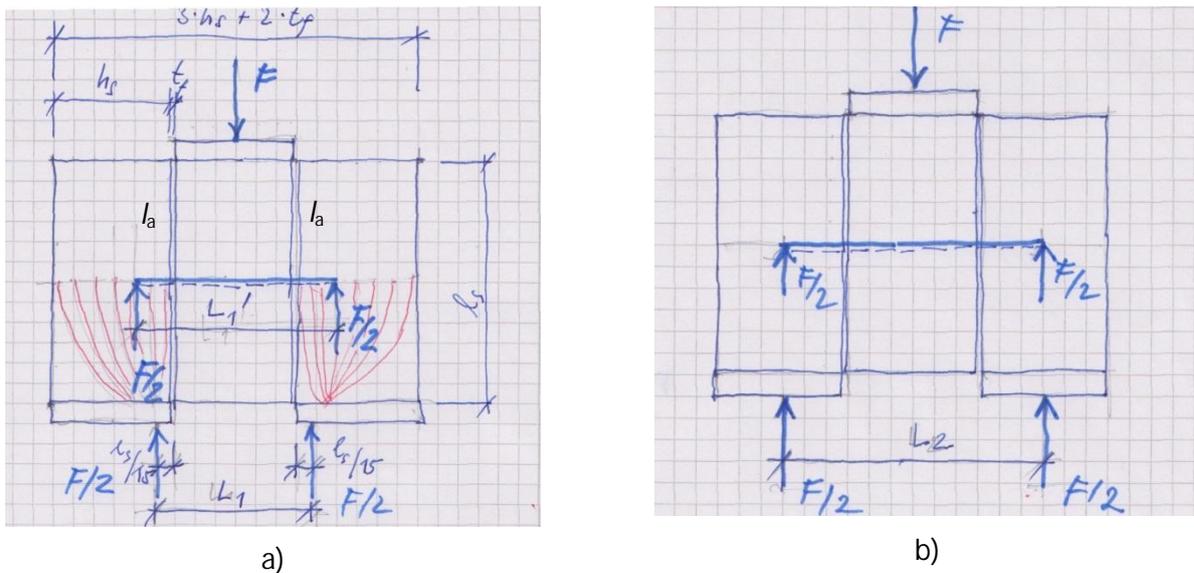


Bild 12 Idealisierung des Prüfkörpers als Träger auf zwei Stützen a) mit Lasteinleitung nach DIN EN 1052-3 b) mit Lasteinleitung mittig der Grundplatten

Setzt man die Lasteinleitung über die Rollen nach Norm an, ergibt sich nach Bild 12 das Biegemoment zu

- Biegemoment

$$M_{Fu} = \frac{F}{2} \cdot l_a = \tag{5}$$

- Randspannung

$$W = \frac{b \cdot l_s^2}{6} \tag{6}$$

$$\sigma_R^Z = \frac{M_{Fu}}{W} = \frac{F \cdot l_a}{2} \cdot \frac{6}{b \cdot l_s^2} = 3 \cdot \frac{F \cdot l_a}{b \cdot l_s^2} \tag{7}$$

- Erforderliche Seitenlast zur Überdrückung bei Verfahren A

$$F_s = \sigma_R^Z \cdot b \cdot l_s = 3 \frac{F \cdot l_a}{l_s} \tag{8}$$

3.2. Zu den Stahlplatten

Es sollen zu beiden Seiten des Prüfkörpers Stahlplatten so aufgeklebt werden, dass der mittlere Stein frei steht und die Verdrehung der Außensteine verhindert wird.

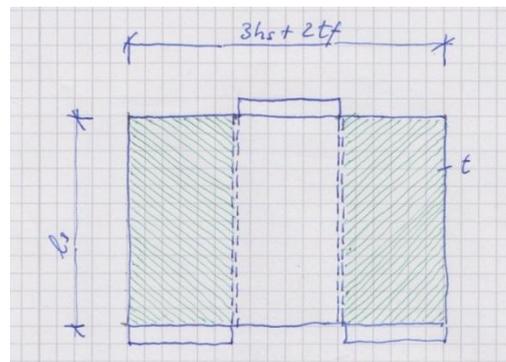


Bild 13 Ansicht des Prüfkörpers mit aufgeklebten Stahlplatten (grün schraffiert – Klebeflächen)

Es wird ein Kleber verwendet, der unter Wärmeeinwirkung sich vom Untergrund leicht ablösen lässt.

3.2.1. Dimension

- Abmessungen der Platten
 - Dreisteinkörper aus Steinen 2 DF
 - § Normalfuge: $l_{PK} = 3 \times 113 + 2 \cdot 12 = 363 \text{ mm}$, $h_{PK} = 240 \text{ mm}$
 - Gewählt: Stahlplatte $37 \times 24 \times 11,5 \text{ cm}^3$
 - § Dünnbettfuge: $l_{PK} = 3 \times 113 + 2 \cdot 3 = 345 \text{ mm}$, $h_{PK} = 240 \text{ mm}$
- E-Moduli
 - $E_{Mw} = 5.000 \text{ MN/m}^2$
 - $E_{Stahl} = 210.000 \text{ MN/m}^2$
- Biegesteifigkeit
 - Dreisteinkörper:
 - $(E_{Mw} \cdot I)_{Mw} = 5.000 \text{ MN/m}^2 \cdot 0,115 \text{ m} \cdot (0,240 \text{ m})^3 / 12 = 0,662 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$
 - Stahlplatte $t = 20 \text{ mm}$
 - $(E_{Mw} \cdot I)_{Mw} = 210.000 \text{ MN/m}^2 \cdot 0,02 \text{ m} \cdot (0,240 \text{ m})^3 / 12 = 4,838 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$
- Nachweis des ausreichenden Abbaus der Biegespannungen im Prüfkörper
 - Dünnbettmörtel
 - § Erwartete Scherfestigkeit des Dreisteinkörpers
 $f_{v0} = 1,0 \text{ MN/mm}^2 = 1,0 \text{ MPa}$
 - § Erwarteter Scherwiderstand des Dreisteinkörpers
 $A = 2 \cdot 0,24 \cdot 0,115 = 0,0552 \text{ m}^2$
 $F = 1,0 \text{ MPa} \cdot 0,0552 \text{ m}^2 = 0,0552 \text{ MN} = 55,2 \text{ KN}$
 - § Biegenormalspannung
 $L = 2 \cdot 0,113 + 2 \cdot 0,002 = 0,232 \text{ m}$
 $\sigma_R^Z = \frac{3}{4} \cdot \frac{F \cdot L}{b \cdot l_s^2} = 3/4 \cdot 0,0552 \cdot 0,232 / (0,115 \cdot 0,240^2) = 1,48 \text{ MPa}$
 - § Anteilige Biegenormalspannung im Dreisteinkörper
 $\sigma_R^Z = \frac{1,48}{14,6} = 0,10 \text{ MPa}$
 - § < Haftzugfestigkeit Dünnbettmörtel – Stein $f_{Hz} = 1,0 \text{ MPa}$
Der Querschnitt bleibt ungerissen.
Die im Druckbereich eintretende Erhöhung der gemessenen Scherfestigkeit liegt im Bereich der Versuchsgenauigkeit und kann vernachlässigt werden.
Blechdicke $t = 20 \text{ mm}$ ausreichend.
 - Normalmörtel
 - § Erwartete Scherfestigkeit des Dreisteinkörpers
 $f_{v0} = 0,5 \text{ MN/mm}^2 = 0,5 \text{ MPa}$
 - § Erwarteter Scherwiderstand des Dreisteinkörpers
 $A = 2 \cdot 0,24 \cdot 0,115 = 0,0552 \text{ m}^2$
 $F = 0,5 \text{ MPa} \cdot 0,0552 \text{ m}^2 = 0,0276 \text{ MN} = 27,6 \text{ KN}$
 - § Biegenormalspannung
 $L = 2 \cdot 0,113 + 2 \cdot 0,002 = 0,232 \text{ m}$
 $\sigma_R^Z = \frac{3}{4} \cdot \frac{F \cdot L}{b \cdot l_s^2} = 3/4 \cdot 0,0276 \cdot 0,232 / (0,115 \cdot 0,240^2) = 0,78 \text{ MPa}$
 - § Anteilige Biegenormalspannung im Dreisteinkörper
 $\sigma_R^Z = \frac{0,78}{14,6} = 0,053 \text{ MPa}$
 - § < Haftzugfestigkeit Normalmörtel – Stein $f_{Hz} = 0,070 \dots 0,48 \text{ MPa}$
Der Querschnitt bleibt ungerissen.

Die im Druckbereich eintretende Erhöhung der gemessenen Scherfestigkeit liegt im Bereich der Versuchsgenauigkeit und kann vernachlässigt werden. Blechdicke $t = 20$ mm ausreichend.

3.2.2. Nachweis der Klebefuge

Als Kleber zwischen Stahlplatten und Dreisteinkörper wird das Produkt „Sikadur 30 Normal“ der Fa. Sika Schweiz AG, Zürich, verwendet. Es handelt sich um einen 2-Komponentenkleber auf Epoxidharzbasis.

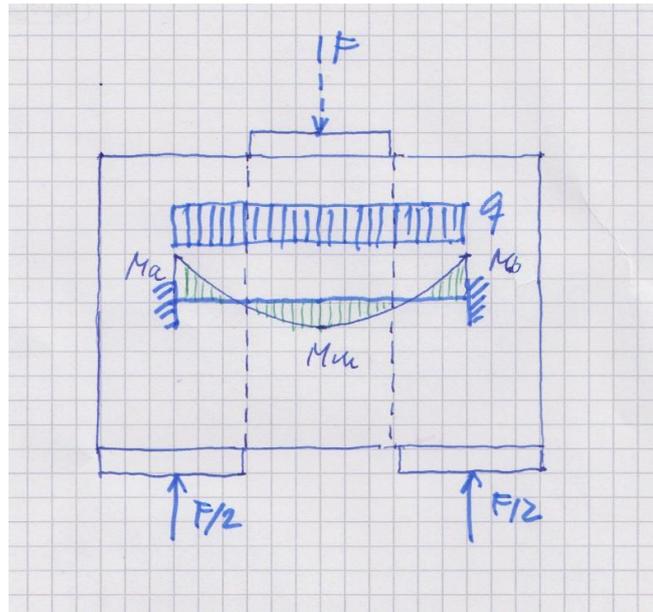


Bild 14 Idealisierung des Prüfkörpers als eingespannter Träger

Der Dreisteinkörper besteht aus drei Steinen im Format 2DF mit zwei Mörtelfugen. Die höchste Beanspruchung tritt bei Dünnbettmörtel auf.

Anforderung: Die Klebeverbindung zwischen Stahlblechen und Mauerwerk darf nicht versagen.

Die Dreisteinkörper 3* 2DF mit Dünnbettfuge haben die Abmessungen 37,9x24x11,5 cm
 Stahlbleche 24x37x2,0 cm mit einer Klebeflächen von ca. 24x11 cm

Biegemoment

Da die Verdrehung der Enden des Prüfkörpers verhindert wird, kann das statische System als eingespannter Träger auf zwei Stützen idealisiert werden (Bild 14). Die Pressenkraft von oben hat sich bis zur Mitte des Prüfkörpers soweit gleichmäßig, dass sie als Streckenlast angenommen werden kann.

- Einspannmoment
 - $M_a = M_b = (F/x) \cdot x^2/12 = (0,0552/0,23) \cdot 0,23^2/12 = 0,001058$ MNm
 Die aus dem Prüfkörper entstehenden Einspannmomente müssen über die Klebefuge in die Stahlplatten über Torsion abgetragen werden.
- Wird auf 2 Klebeflächen aufgeteilt
 - $M_T = 0,001058/2 = 0,000529$ MNm

- Torsionswiderstandsmoment der Klebefläche
 - $W_T = h_1 \cdot x_s \cdot b^2 = 0,25 \cdot 0,24 \cdot 0,113^2 = 7,6614 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$
- Torsionsbeanspruchung t

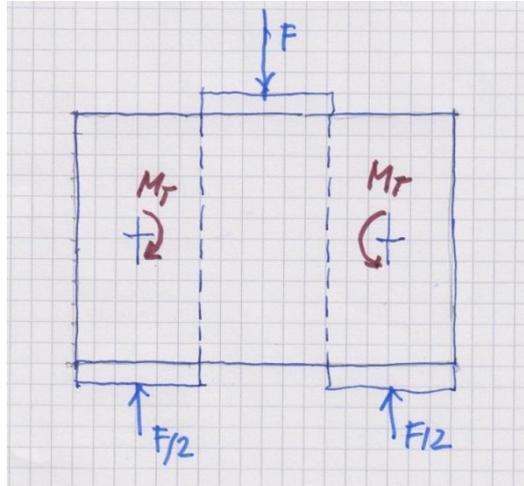


Bild 15 Torsionsmomente in der Klebefuge Stahlplatte – Stein

- Beanspruchung der Klebefuge
 - $t = M_T / W_T = 0,000529 \text{ MNm} / 7,6614 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 = 0,690 \text{ MN/m}^2$
 - $< 13 \text{ MPa} / 1,5 = 8,67 \text{ MPa} = \text{Scherfestigkeit Kleber nach drei Tagen } 13 - 16 \text{ MPa}$ [11]
 - Der Kleber kann das anliegende Torsionsmoment übertragen.
- Beanspruchung des Klebegundes
 - Als äußerst konservativ wird angenommen, dass der Klebegrund auf dem Stein – das Steinmaterial selbst – bei der Haftscherfestigkeit versagt und dgl. bei der Klebung passiert, dann muss die Haftscherbeanspruchung aus der Klebung geringer sein, als die der Mörtelfuge.
 - $t = M_T / W_T = 0,690 \text{ MN/m}^2$
 - $< 1 \text{ MPa} = \text{erwartete Haftscherfestigkeit in der Mörtelfuge}$

Damit wird gewährleistet, dass die Mörtelfuge im Prüfkörper eher versagt, als die Klebefuge zwischen Stahlplatte und Stein.

4. Numerische Untersuchungen

Im Zuge der Vorbereitung und Durchführung des Forschungsvorhabens sind die unterschiedlichsten numerischen Untersuchungen sowohl im elastischen als auch im materiell nichtlinearen Bereich durchgeführt worden (s. [10], [12], [13] und [14]). Hier sollen lediglich die numerischen Untersuchungen dargestellt werden, die die Endlösung untersetzen. Hauptaugenmerk wurde dabei auf die notwendige Überdrückung bzw. Freistellung von Biegespannungen im Prüfaufbau gelegt. Dazu reichten elastische Rechnungen mit dem Programmsystem ANSYS aus [15].

4.1. Prüfkörper aus Kalksandstein bzw. Ziegel mit Dünnbettmörtel zur Variantenbetrachtung

Die experimentellen Untersuchungen zum Prüfaufbau wurden i.W. mit Prüfkörpern hergestellt aus Dünnbettmörtel durchgeführt. Insofern beschränken sich die numerischen Simulationen im ersten Teil auf Prüfkörper aus Dünnbettmörtel.

Es wurden Vergleichsprüfungen im MPA Hannover durchgeführt, die hier ebenfalls mit simuliert worden sind.

4.1.1. Allgemeine Angaben

Material	Stfkl.	E-Modul in N/mm ²
KS	20	10000
Ziegel	12	10000
Mörtel	DM	6000

Tabelle 2 Für die Simulation zu Grunde gelegte Materialien

Die Querdehnzahl wurde allgemein mit 0,2 angenommen. Für den Versuchsaufbau Hannover wurde zusätzlich eine 8 mm Schicht zur Verteilung der Seitenlast angesetzt. Dieser wurde auf Grund fehlender Angaben als Material Neopren zugewiesen (hyperelastisch). Es wurde die Symmetrie ausgenutzt.

4.1.2. Abstand der Auflagerpunkte nach DIN EN 1052-3

Aus den bisherigen Erfahrungen heraus war die Variante voll aufgelagerte Lagerplatten aus Stahl mit ins Kalkül zu ziehen. Die Rollenlagerung führt auch bei erheblicher Dicke dieser Platten noch zu Spannungskonzentrationen im Prüfkörper, die vermieden werden sollten. Es wird eine Einrückung der Rollen vom Rand der Lagerplatte mit $e = 1,6$ cm vorgesehen (siehe Bild 3).

4.1.2.1. Laststufe der Prüflast 72 kN

Entscheidend für die Beurteilung sind die Spannungen in der Fuge.

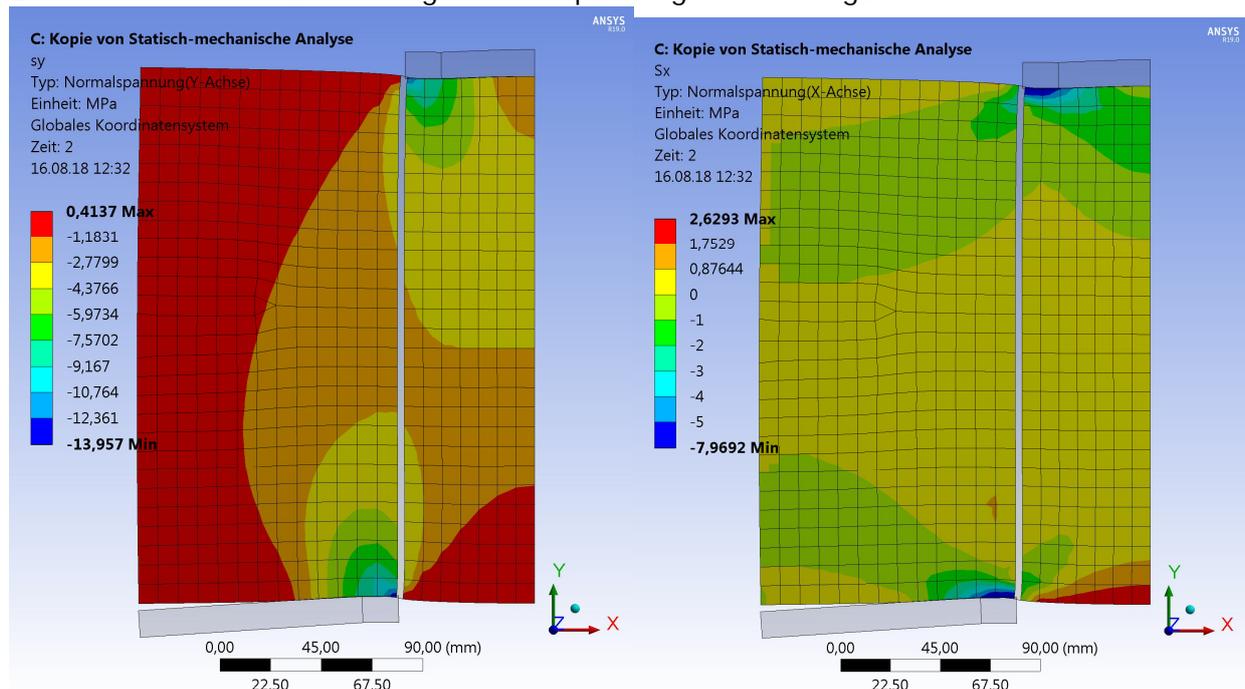


Bild 16 Normalspannungen (links: s_y ; rechts: s_x ; Norm; Gesamtlast 72 kN; Norm)

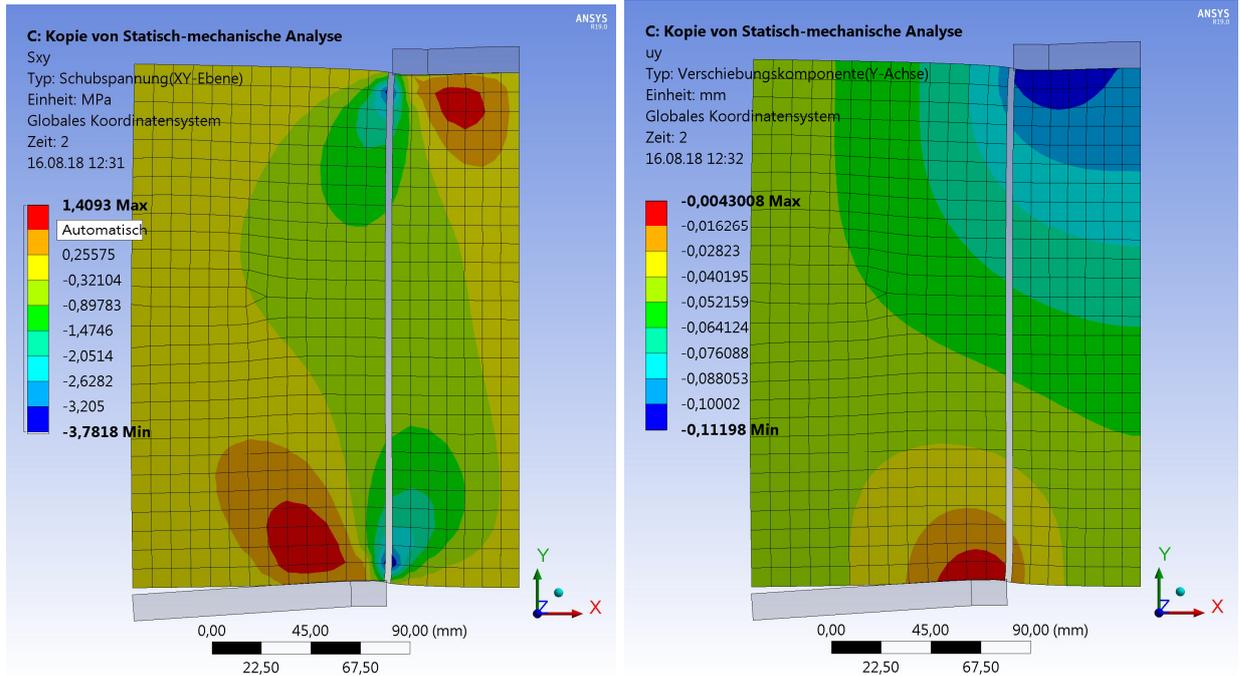


Bild 17 Schubspannungen (links) und vertikale Verformung(rechts) (Norm; Gesamtlast 72 kN; Norm)

Im Bild 17 sind deutlich die in den Schubspannungen entstehenden Spannungsspitzen zu erkennen, die erheblichen Einfluss auf das Prüfergebnis haben.

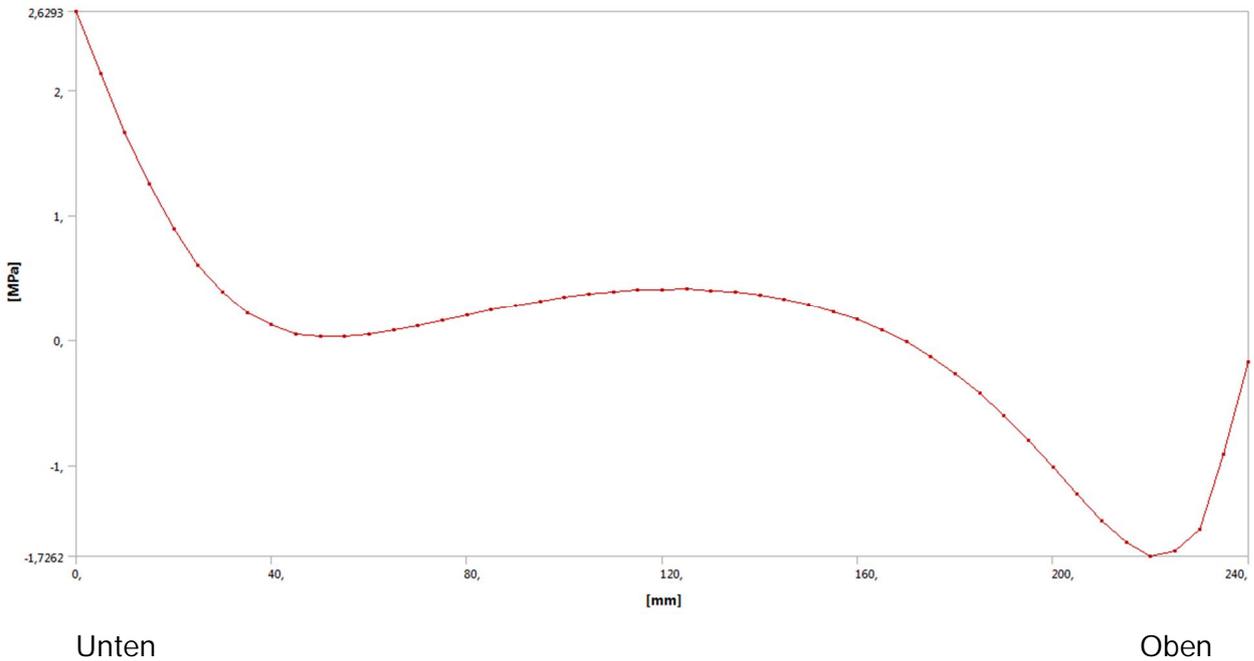


Bild 18 Horizontale Normalspannung an der Symmetrieachse des Prüfkörpers (Norm; Gesamtlast 72 kN)

4.1.2.2. Laststufe der Prüflast 100 kN

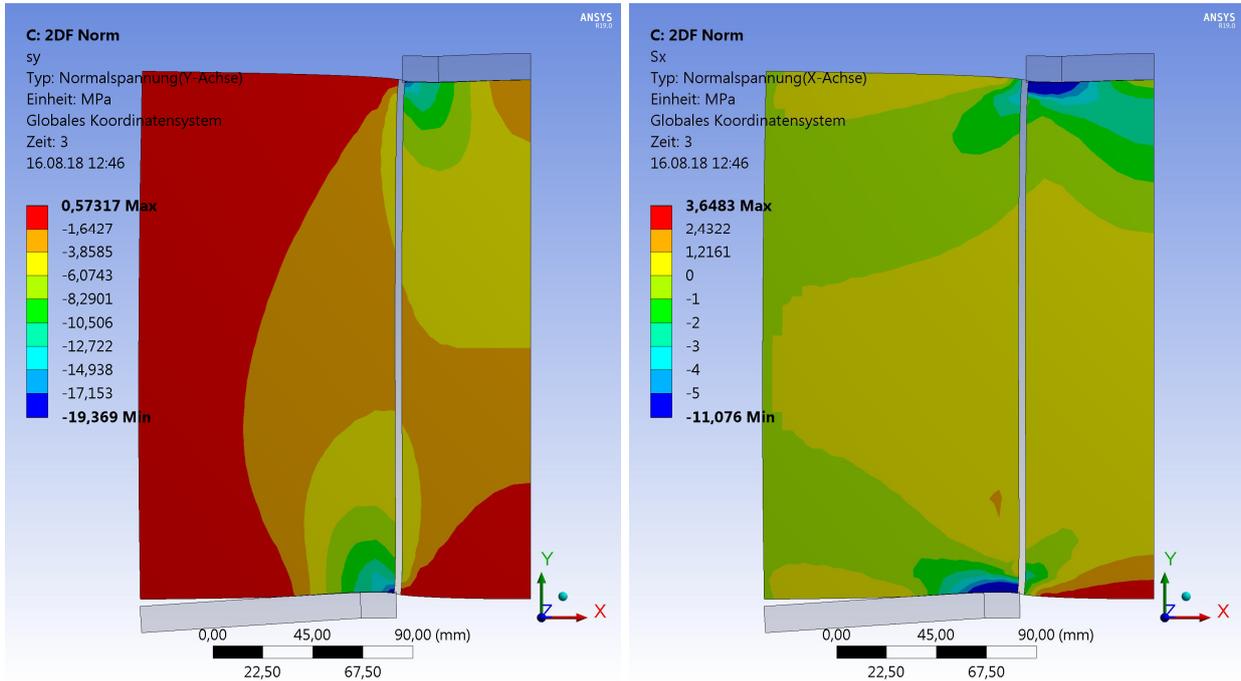


Bild 19 Normalspannungen (links: s_y ; rechts: s_x ; Norm; Gesamtlast 100 kN; Norm)

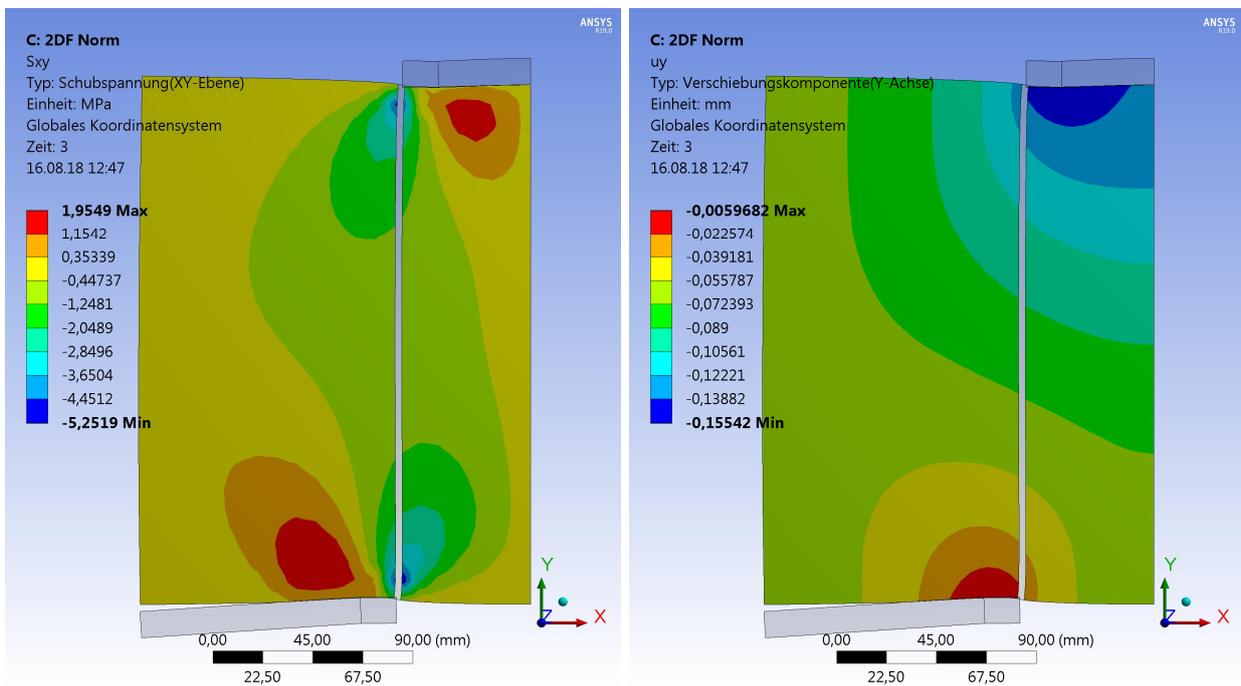


Bild 20 Schubspannungen (links) und vertikale Verformung(rechts) (Norm; Gesamtlast 100 kN; Norm)

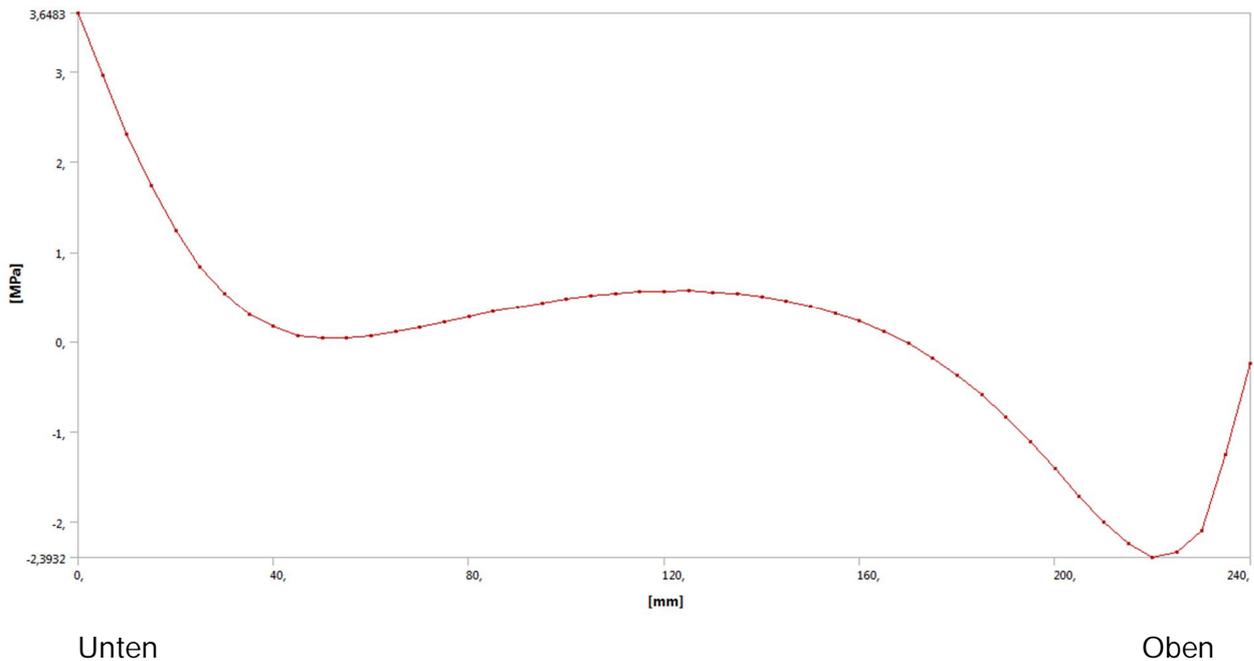


Bild 21 Horizontale Normalspannung an der Symmetrieachse (Norm; Gesamtlast 100 kN)

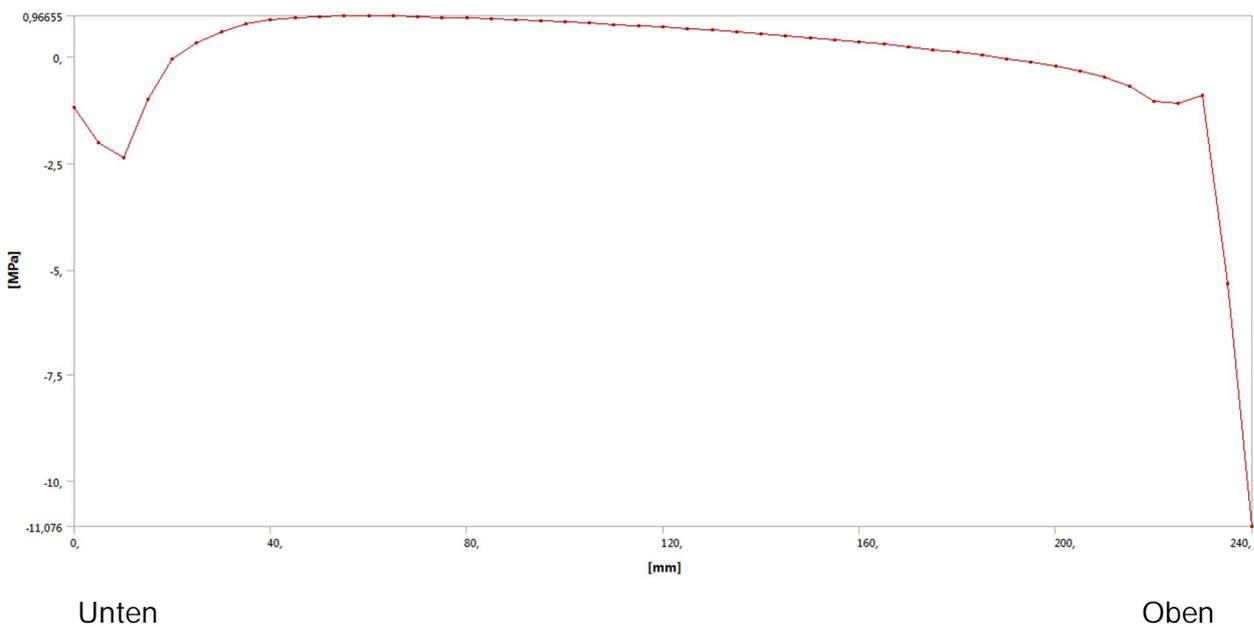


Bild 22 Horizontale Normalspannung an der Fuge (Norm; Gesamtlast 100 kN)

Die in Bild 22 dargestellte Spannungsspitze (rechts bzw. oben) wird durch die Lasteintragung theoretisch hervorgerufen und so in der Realität nicht auftreten.

Wie in den Bild 18 und Bild 21 zu erkennen ist, ändert sich die Verteilung der Normalspannungen über den Querschnitt mit steigender Last nicht sondern verhält sich proportional.

4.1.2.3. Prüfaufbau MPA Hannover mit Vorspannung und Vollsteinen (51,6 kN oder 1,87 N/mm²)

Vergleiche auch [3]. Im Prüfaufbau des MPA Hannover werden unter den beiden Lagerplatten die Rollen nach Norm DIN EN 1052-3 angeordnet. Der Prüfkörper erhält eine Seitenlast, die ihn vorspannt.

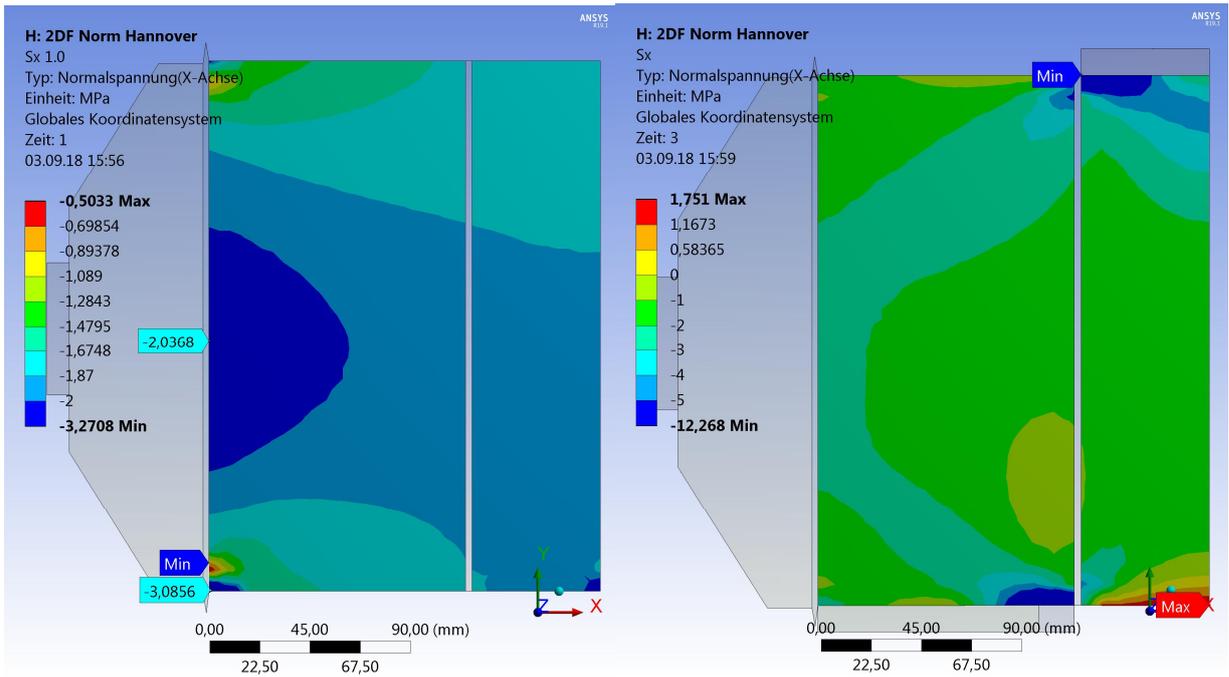


Bild 23 Normalspannungen s_x (links: nur Vorspannung aus Seitenlast; rechts: +100 kN Auflast)

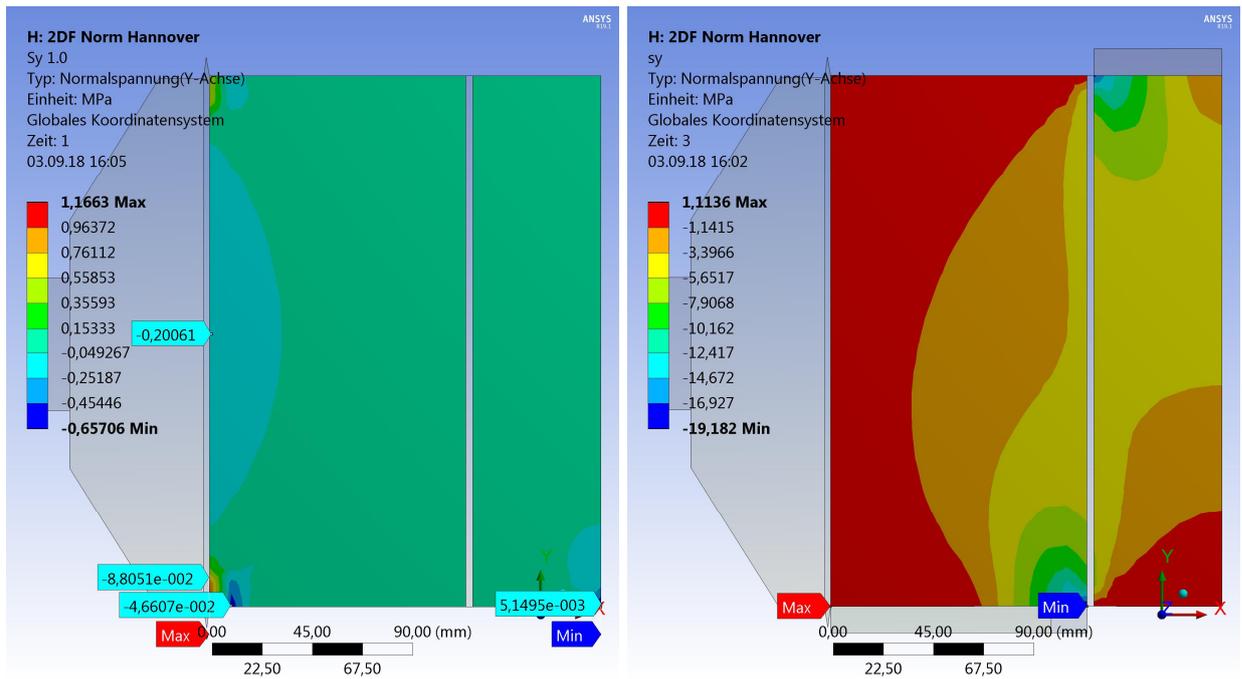


Bild 24 Normalspannungen s_y (links: nur Vorspannung aus Seitenlast; rechts: +100 kN Auflast)

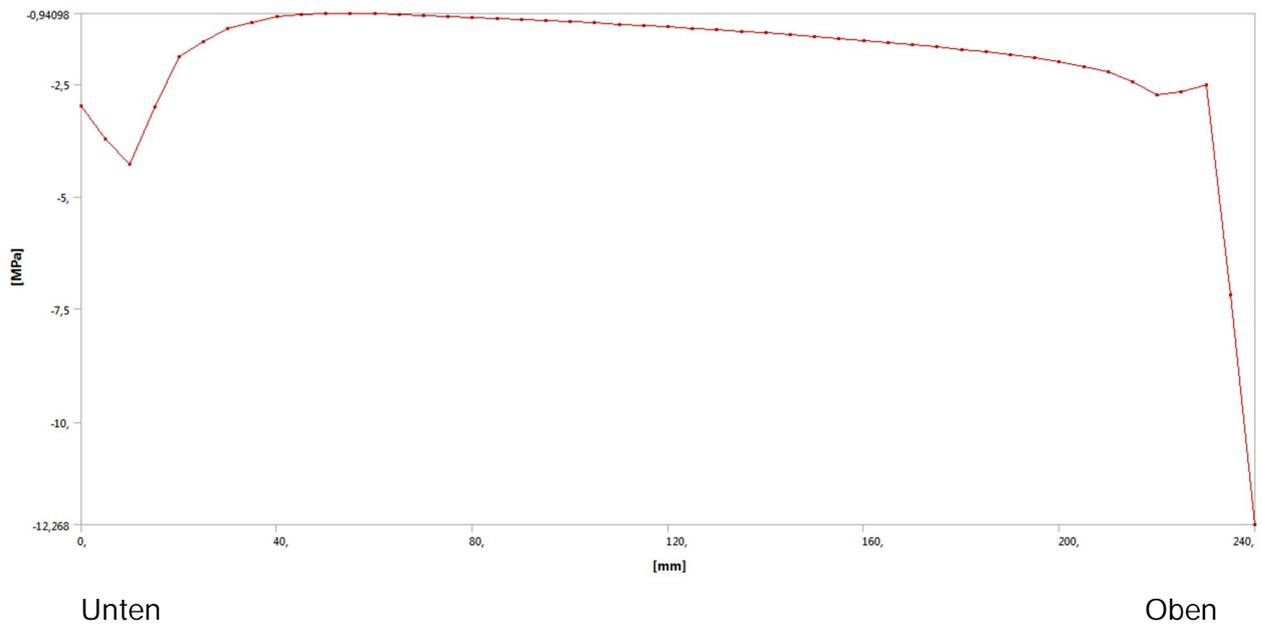


Bild 25 Horizontale Normalspannung an der Fuge (Gesamtlast 100 kN; Vorspannung von 51,6 kN = 1,87 N/mm²)

Im Folgenden sind die Spannungen zur besseren Vergleichbarkeit normiert dargestellt.

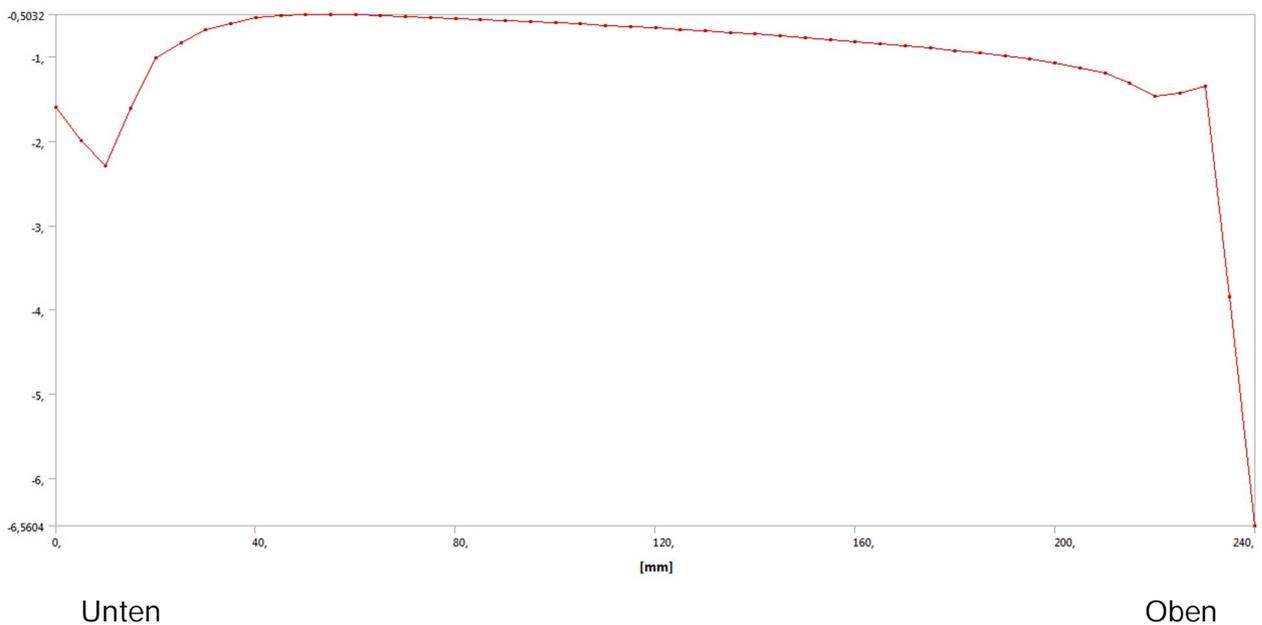


Bild 26 Normierte Horizontale Normalspannung an der Fuge (Gesamtlast 100 kN; Vorspannung 1,00 N/mm²)

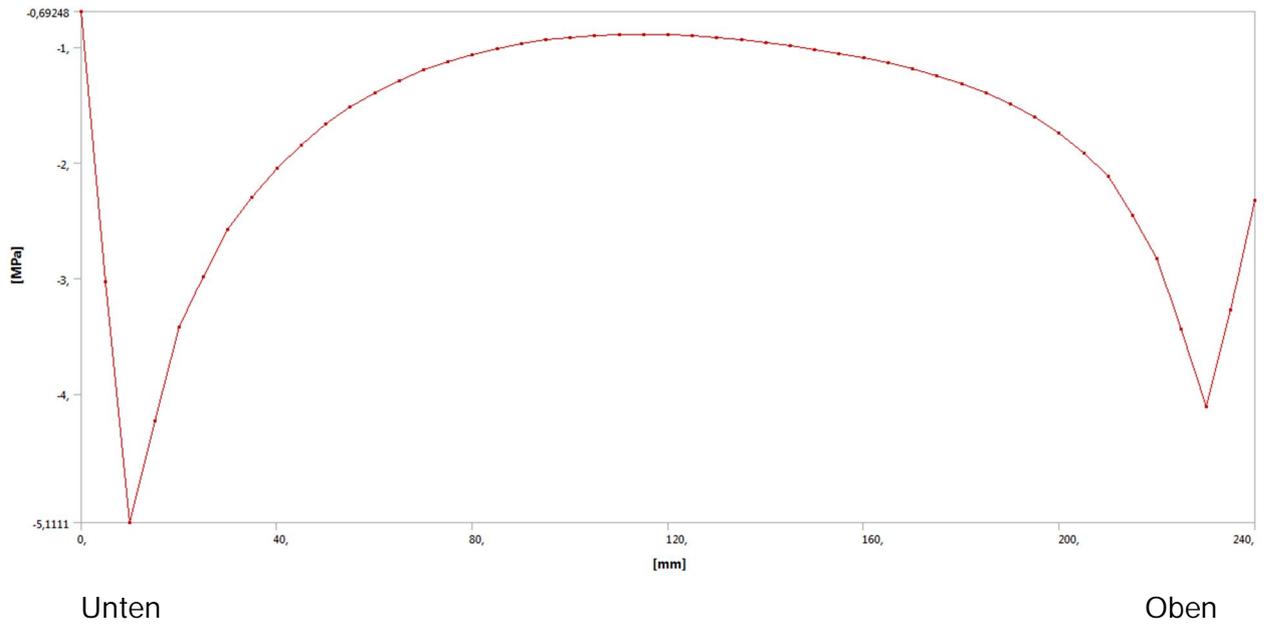


Bild 27 Schubspannung an der Fuge (Gesamtlast $100 \text{ kN} = 1,81 \text{ N/mm}^2$; Vorspannung von $51,6 \text{ kN} = 1,87 \text{ N/mm}^2$)

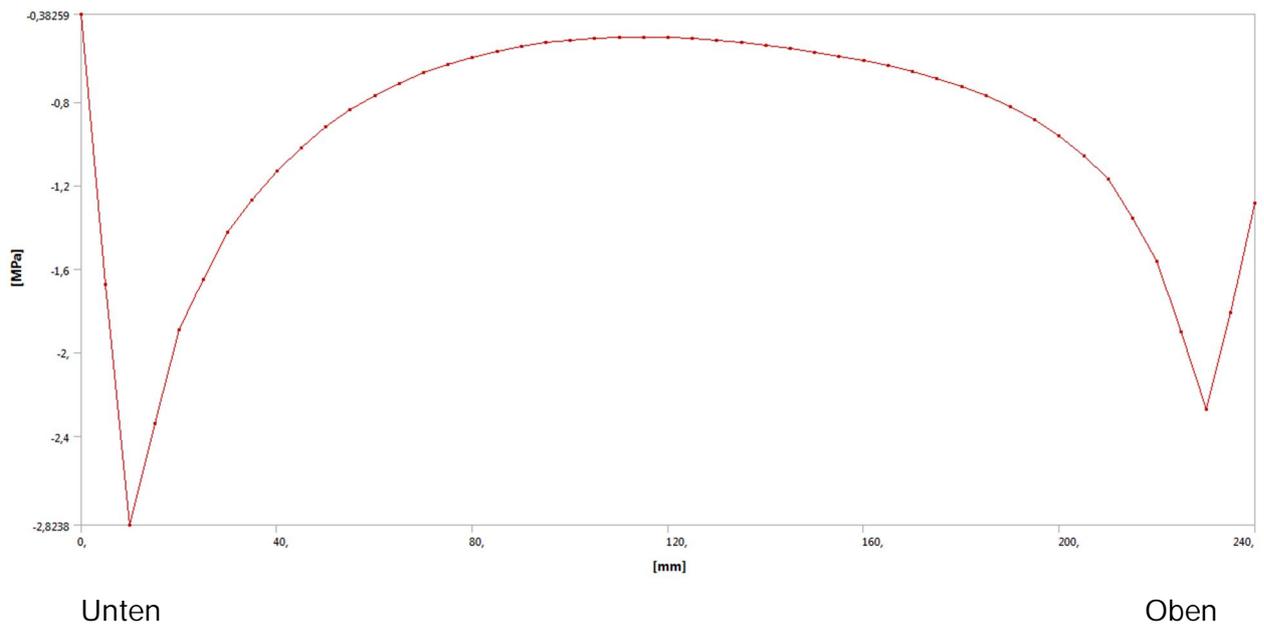


Bild 28 Normierte Schubspannung an der Fuge (Vorspannung von $51,6 \text{ kN} = 1,87 \text{ N/mm}^2$)

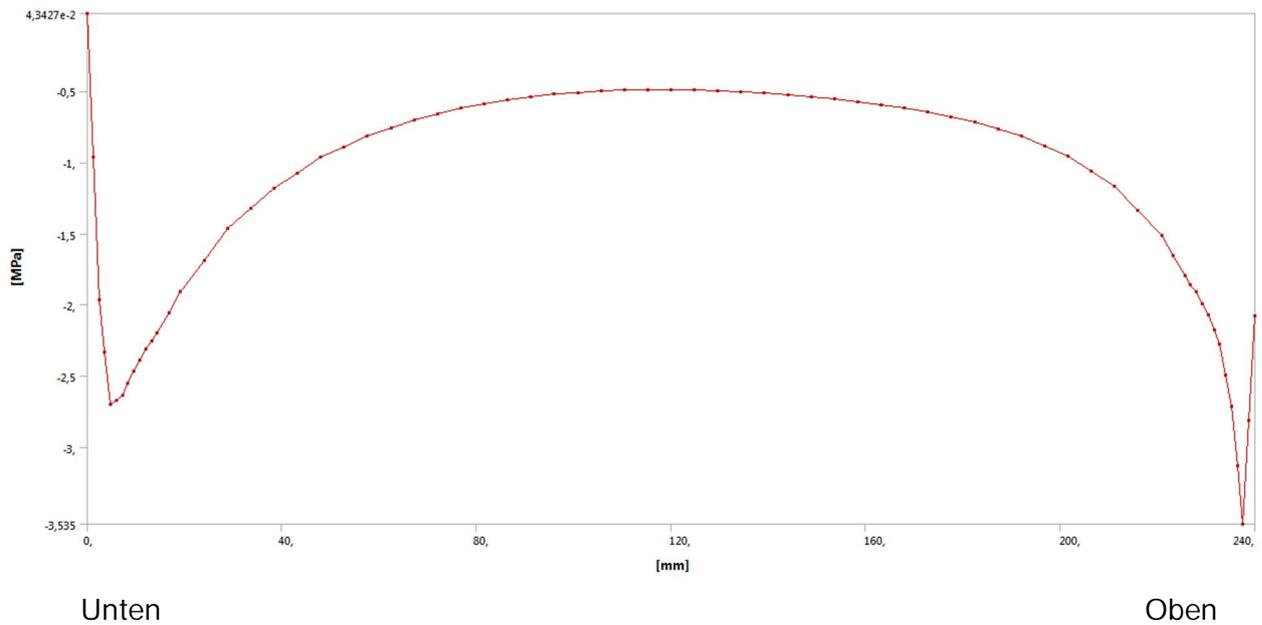


Bild 29 *Normierte Schubspannung an der Fuge (Vorspannung von 51,6 kN = 1,87 N/mm²; mit verfeinertem Netz am Rand)*

Im Folgenden sind die Ergebnisse für eine Vorspannung mit 0,2 N/mm² dargestellt.

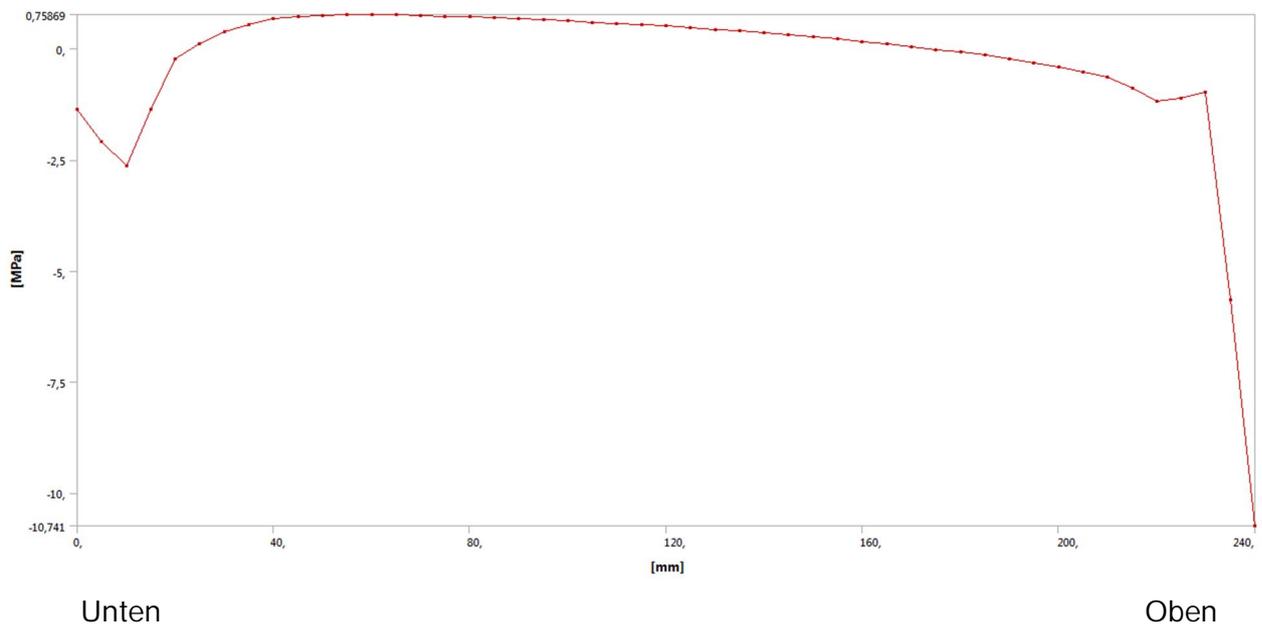
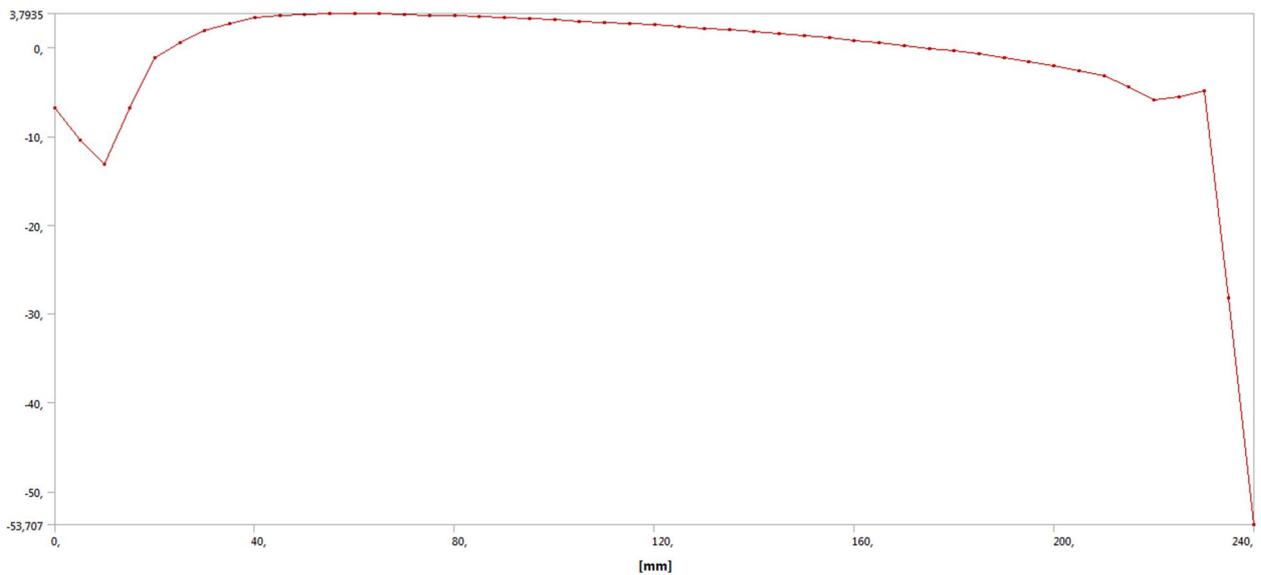


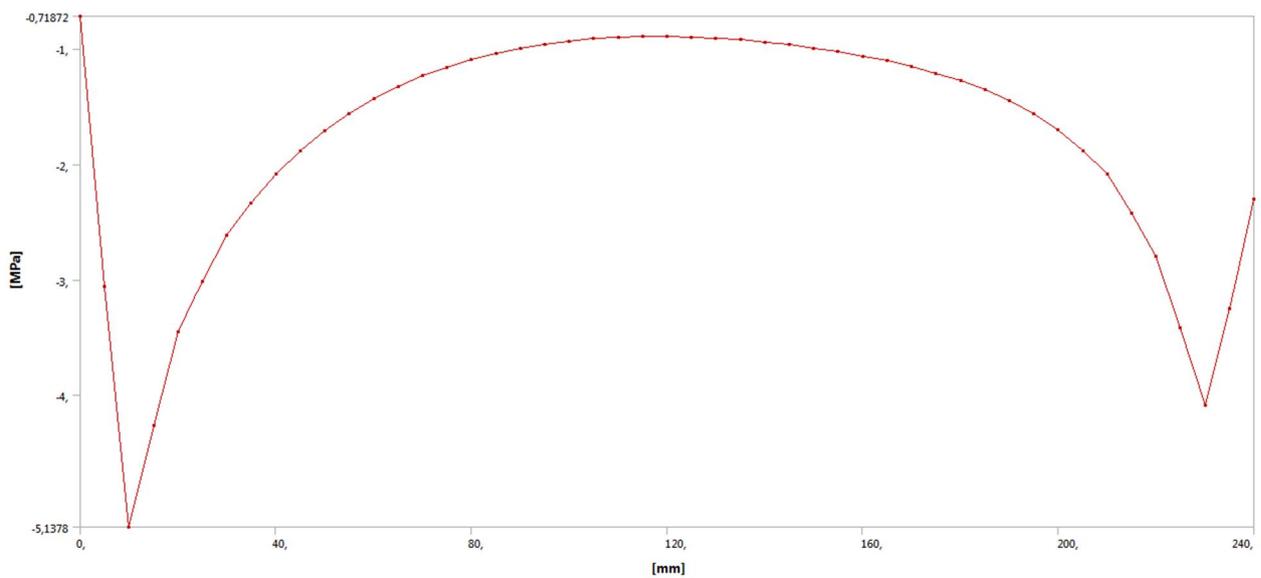
Bild 30 *Horizontale Normalspannung an der Fuge (Gesamtlast 100 kN; Vorspannung von 5,52 kN = 0,2 N/mm²)*



Unten

Oben

Bild 31 Normierte Horizontale Normalspannung an der Fuge (Gesamtlast 100 kN; Vorspannung von 5,52 kN = 0,2 N/mm²)



Unten

Oben

Bild 32 Schubspannung an der Fuge (Gesamtlast 100 kN = 1,81 N/mm²; Vorspannung von 5,52 kN = 0,2 N/mm²)

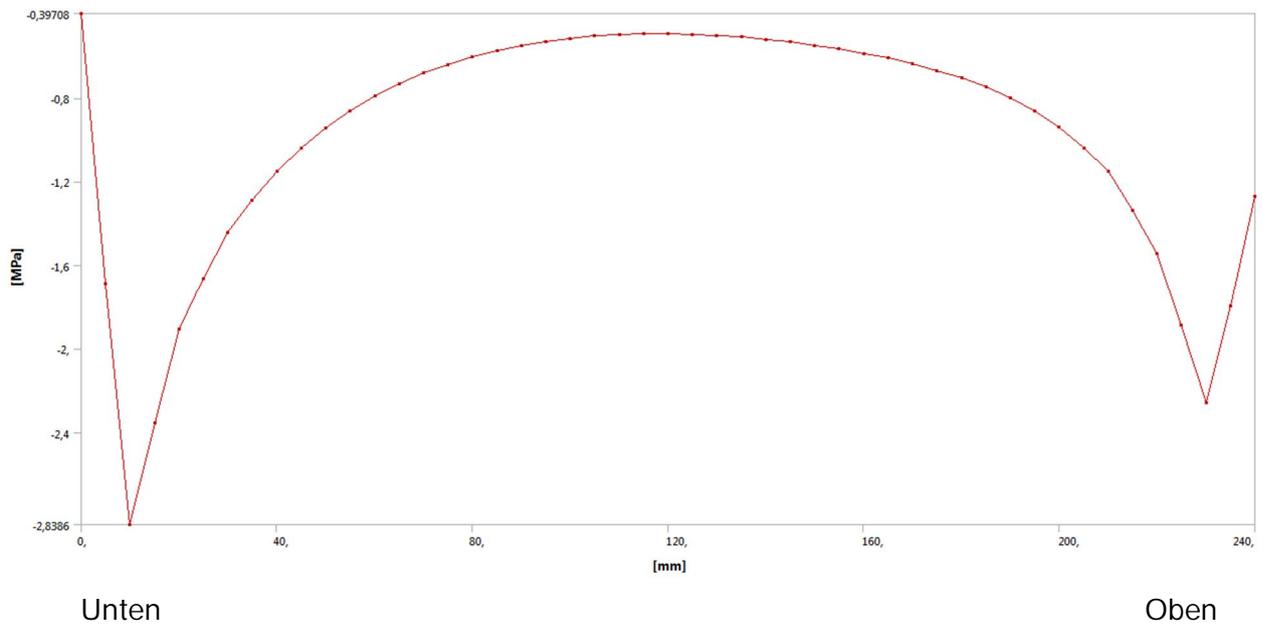


Bild 33 Normierte Schubspannung an der Fuge (Vorspannung von 5,52 kN = 0,2 N/mm²)

Mittlere Vorspannung s_x	s_x in N/mm ²	s_y in N/mm ²
-0,94	-1,03	-0,10
-1,87	-2,04	-0,20
-2,5	-2,72	-0,27
-3	-3,27	-0,32
-3,5	-3,81	-0,38

Tabelle 3 Interpolation für andere Laststufen (Lastschritt 1 = Vorspannung)

Vergleicht man Bild 33 und Bild 28, ist die Schubspannungsverteilung im Zustand I bei unterschiedlicher Vorspannung gleich geblieben.

Da mit Ausnahme der Kontaktdefinition und der Weicheinlage nur lineare Zusammenhänge bestehen, lässt sich das Ergebnis für andere Laststufen extrapolieren.

4.1.2.4. Prüfaufbau MPA Hannover mit Vorspannung und Lochsteinen (51,6 kN oder 1,87 N/mm²)

Im folgenden Modell schließt die Lagerfuge bündig mit den Löchern ab.

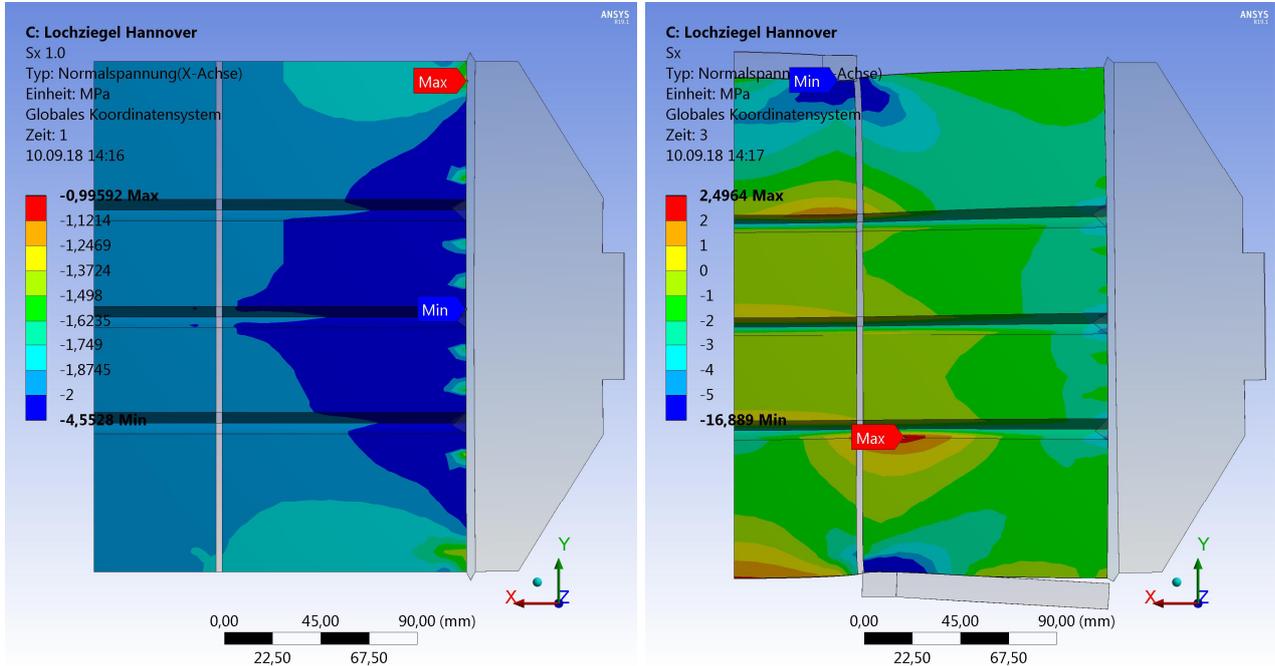


Bild 34 Normalspannungen s_x (links: nur Vorspannung; rechts: +100 kN Auflast)

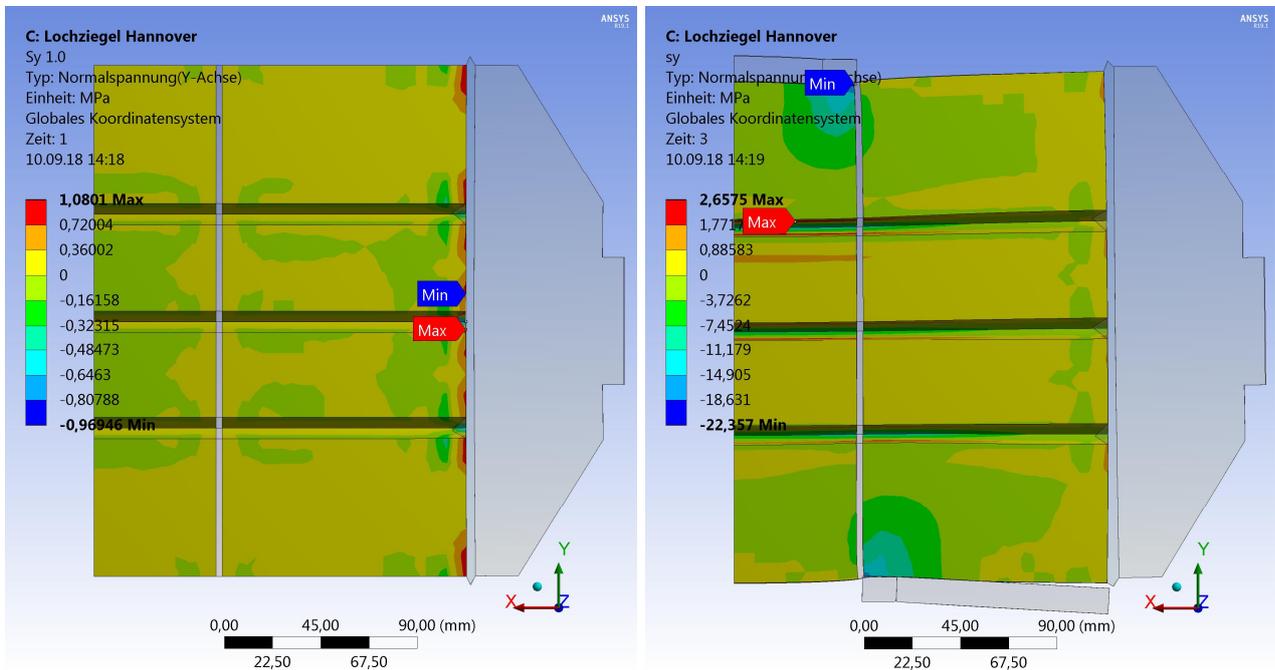


Bild 35 Normalspannungen s_y (links: nur Vorspannung; rechts: +100 kN Auflast)

Im folgenden verfeinerten Modell wird von einem Verkrallen durch in die Löcher gedrückten Mörtel ausgegangen. Es wird von einer Einbindetiefe von jeweils 1,0 cm ausgegangen.

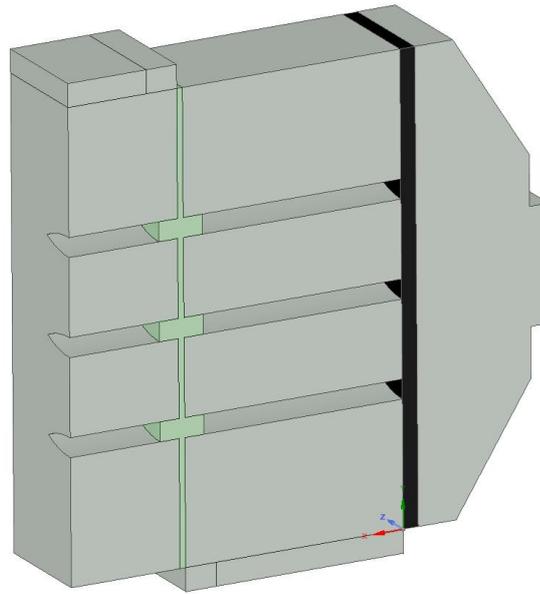


Bild 36 Modell mit vereinfachter Verzahnung im Bereich der Löcher (je cm)

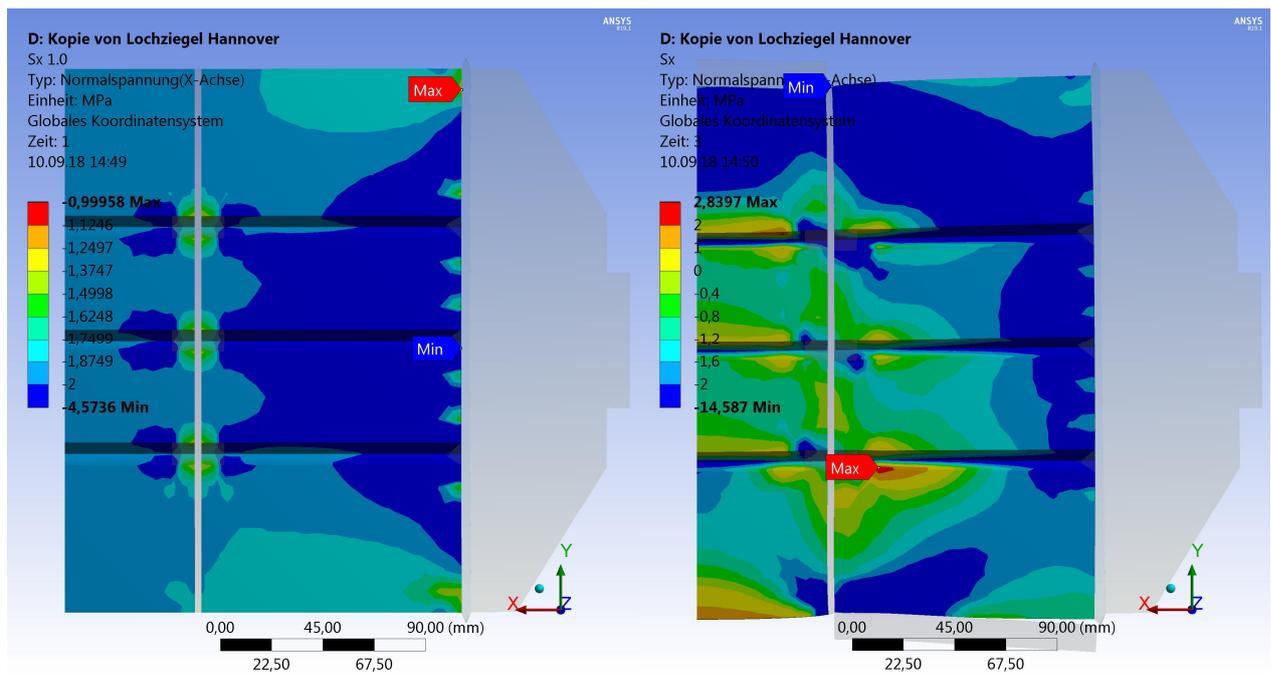


Bild 37 Normalspannungen s_x (links: nur Vorspannung; rechts: +100 kN Auflast)

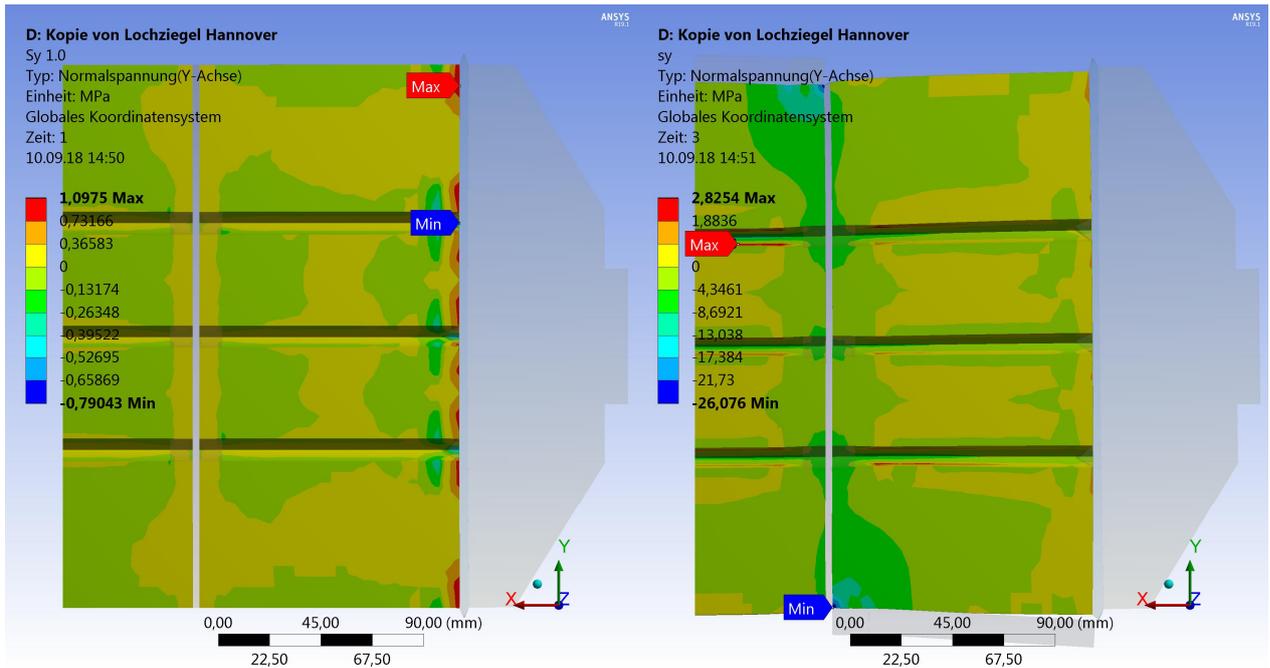


Bild 38 Normalspannungen s_y (links: nur Vorspannung; rechts: +100 kN Auflast)

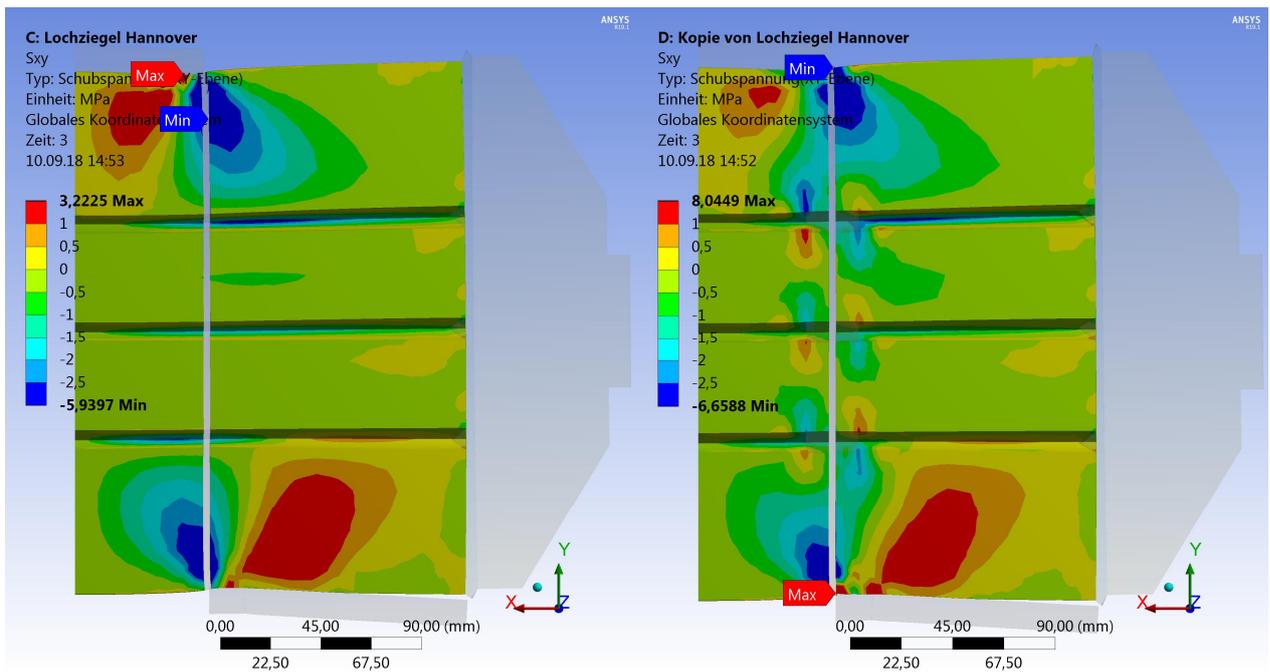


Bild 39 Schubspannungen s_{xy} (links: bündige Fuge; rechts: mit Verkrallung)

4.1.3. Auflagerung des Prüfkörpers über Z-Platten

Die Platten haben einen Abstand zur Fuge von 2,0 cm. Bei der unteren Stahlplatte wird die Lasteinleitung in Fugenmitte mittels eines z-förmigen Kragarms erzielt.

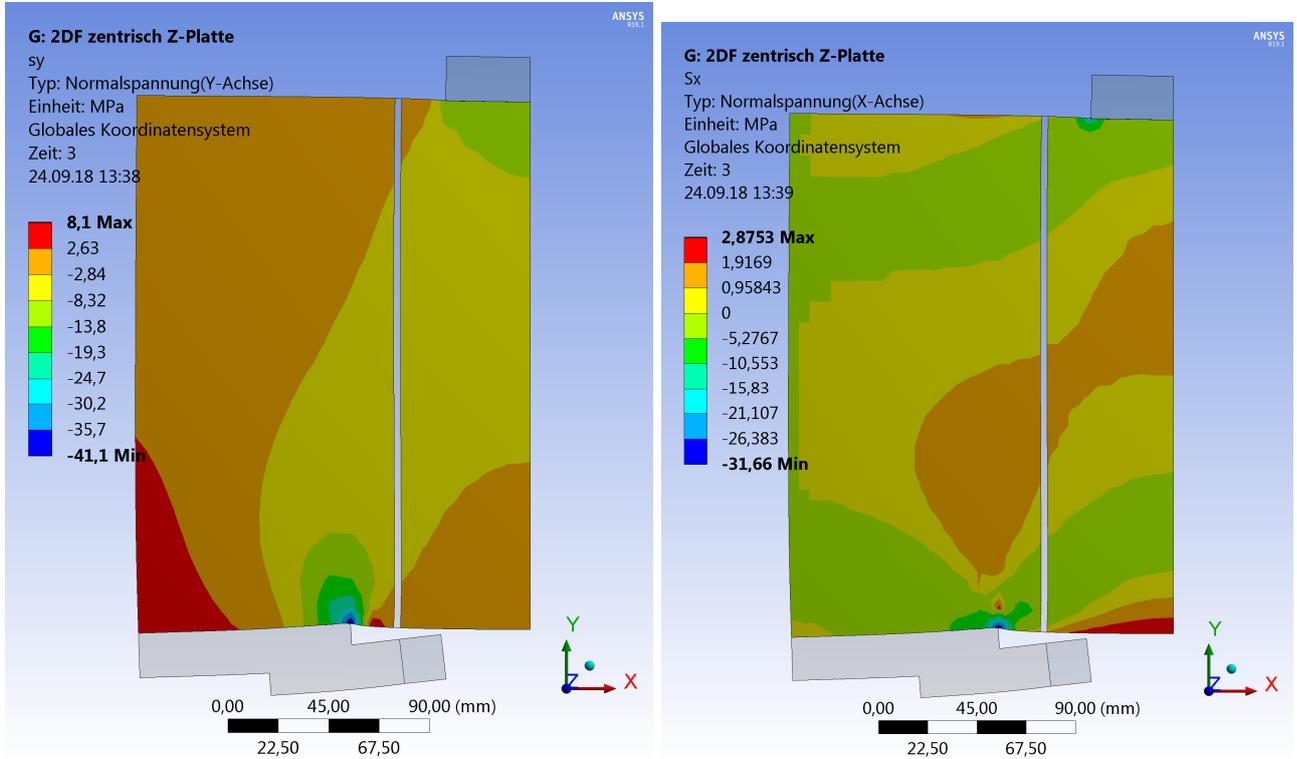


Bild 40 Normalspannungen (links: s_y ; rechts: s_x ; zentrisch; Gesamtlast 100 kN)

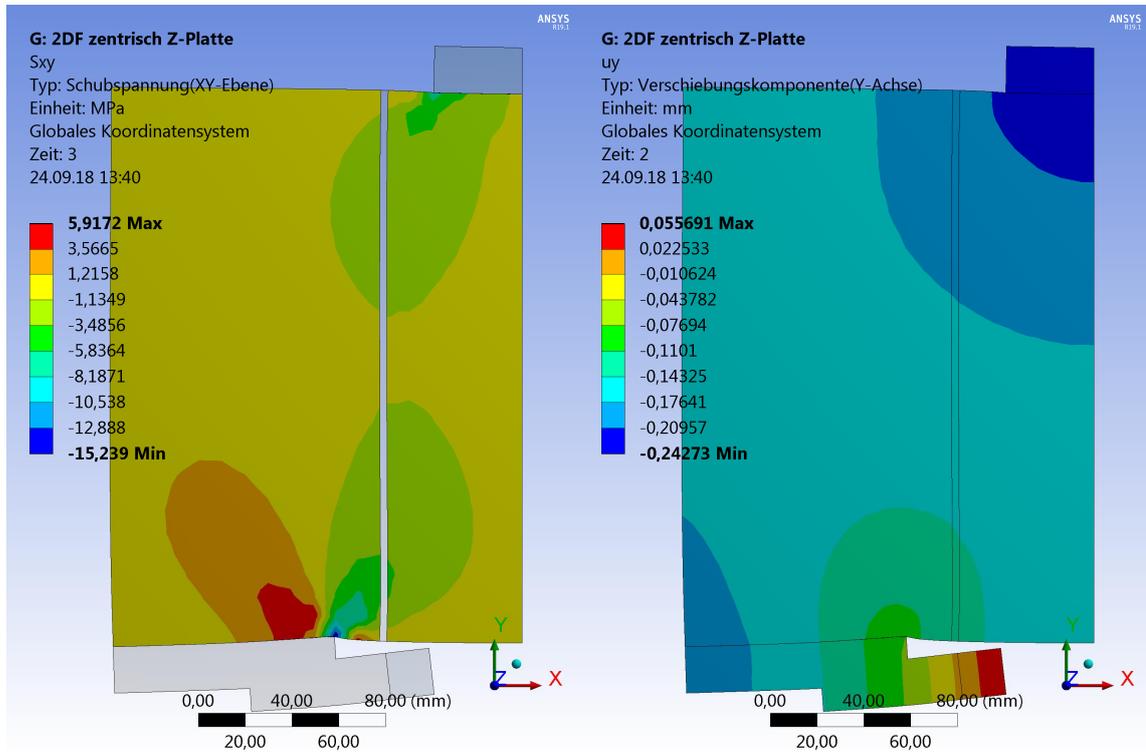


Bild 41 Schubspannungen (links) und vertikale Verformung(rechts) (zentrisch; Gesamtlast 100 kN)

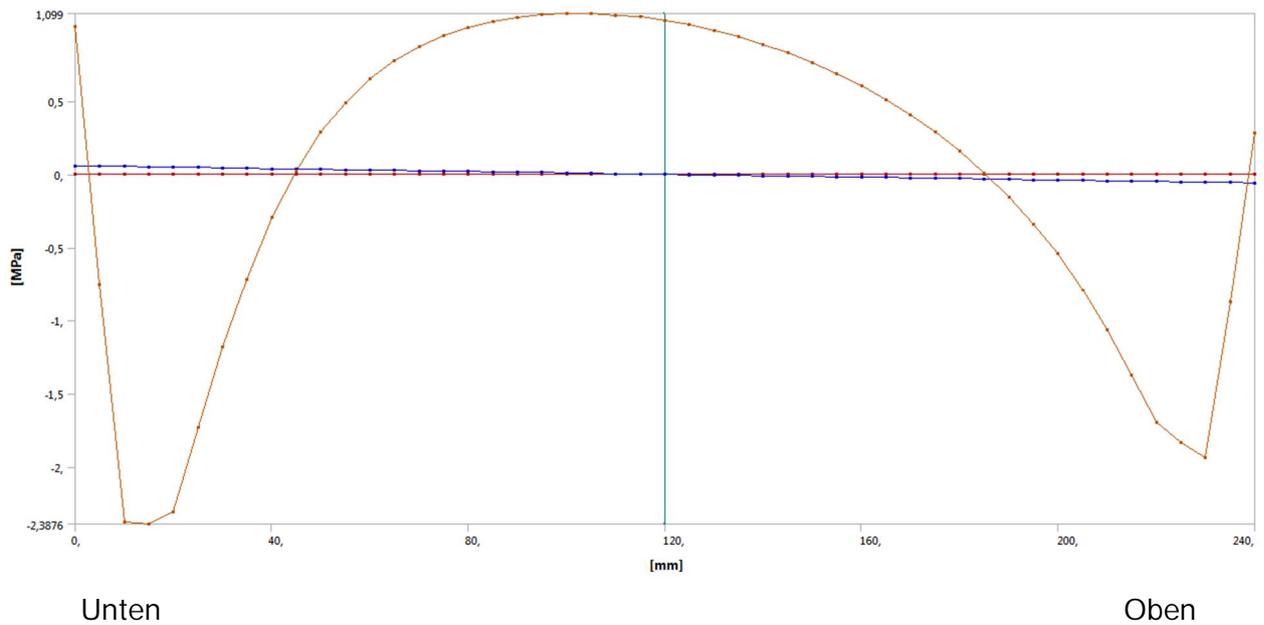


Bild 42 Horizontale Normalspannung an der Fuge (zentrisch; Gesamtlast 100 kN)

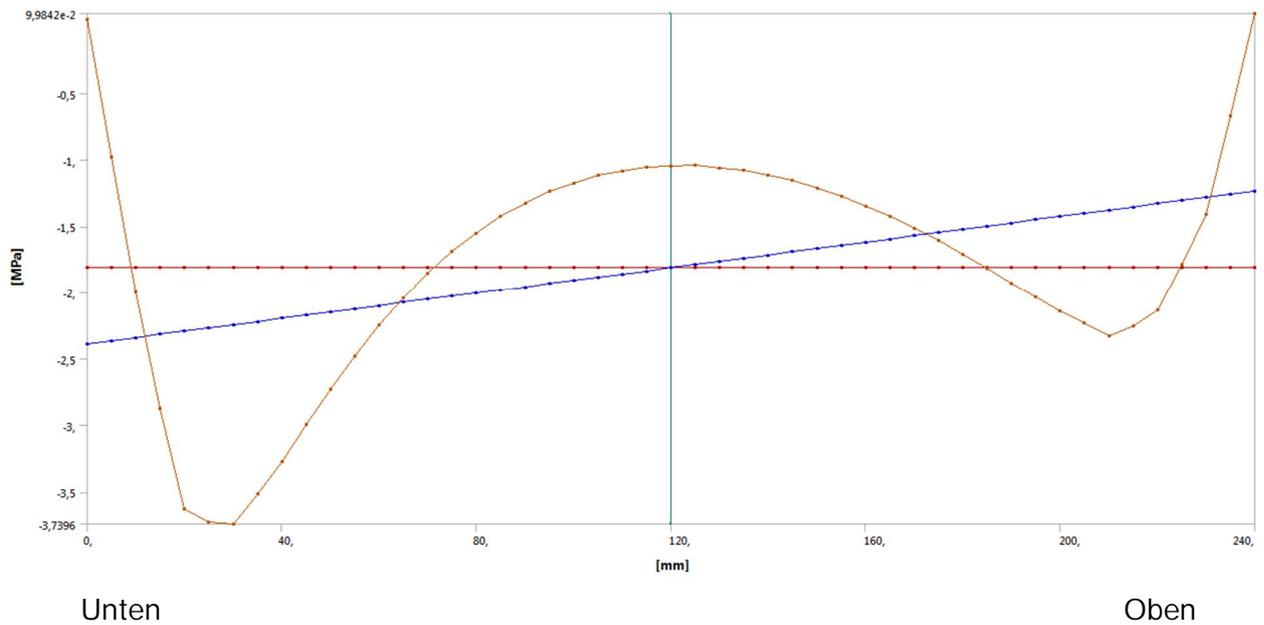


Bild 43 Schubspannung an der Fuge (zentrisch; Gesamtlast 100 kN)

Die elastische Rechnung bringt nicht die erwartete Verbesserung durch Abbau der Spannungsspitzen. Die Variante setzt voraus, dass die Z-Platten an die Steine angeklebt werden, was jedoch wegen der hohen Kräfte Probleme bereitet. Eine Verspannung der Z-Platten nach oben am Stein trägt eine gewisse Vorspannung ein, da ansonsten Schlupf eintritt. Außerdem führen die auftretenden Kräfte zu Spaltzugbrüchen der Steine, die wiederum das Ergebnis verfälschen.

4.1.4. Zentrische Lagerung

4.1.4.1. Laststufe der Prüflast 72 kN

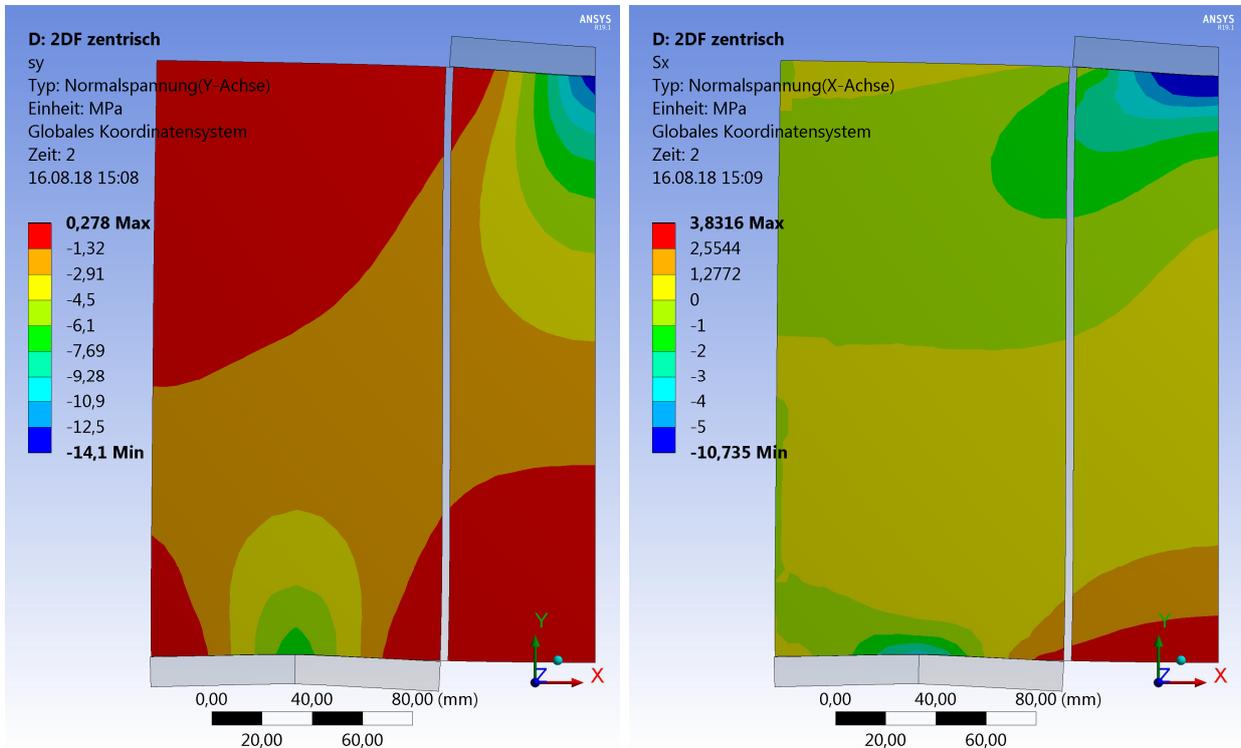


Bild 44 Normalspannungen (links: s_y ; rechts: s_x ; zentrisch; Gesamtlast 72 kN)

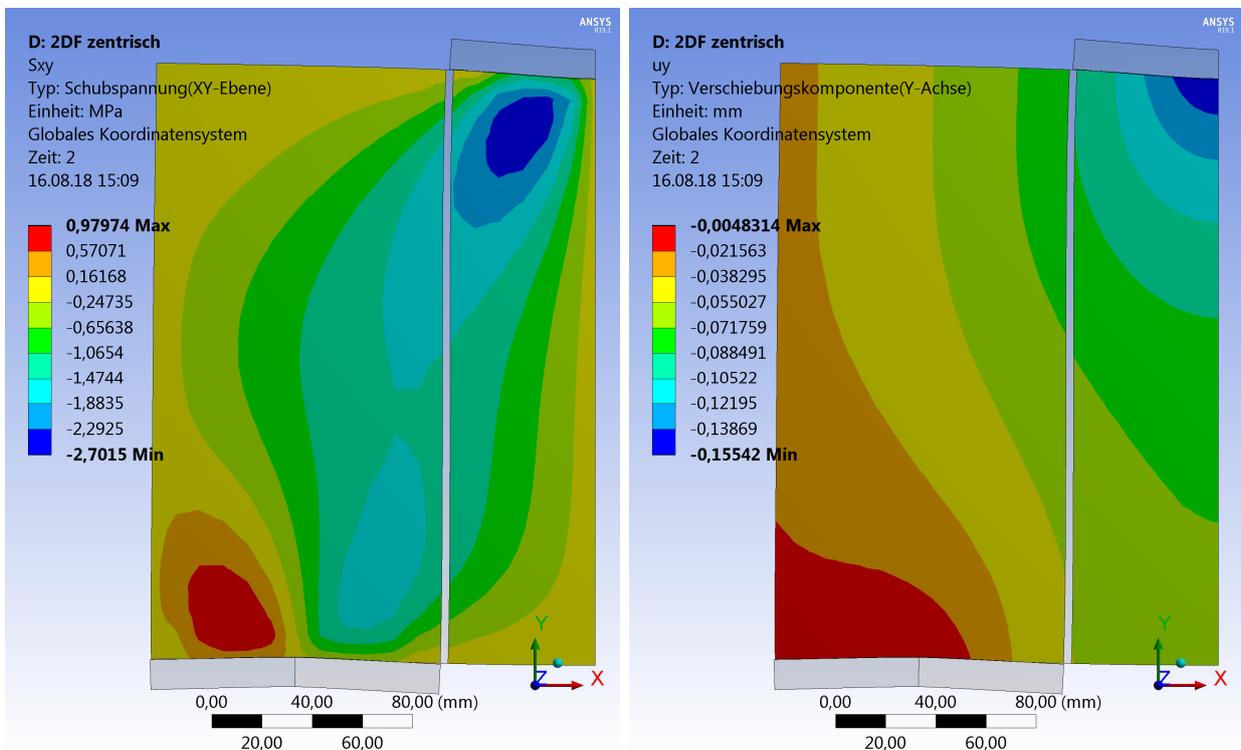
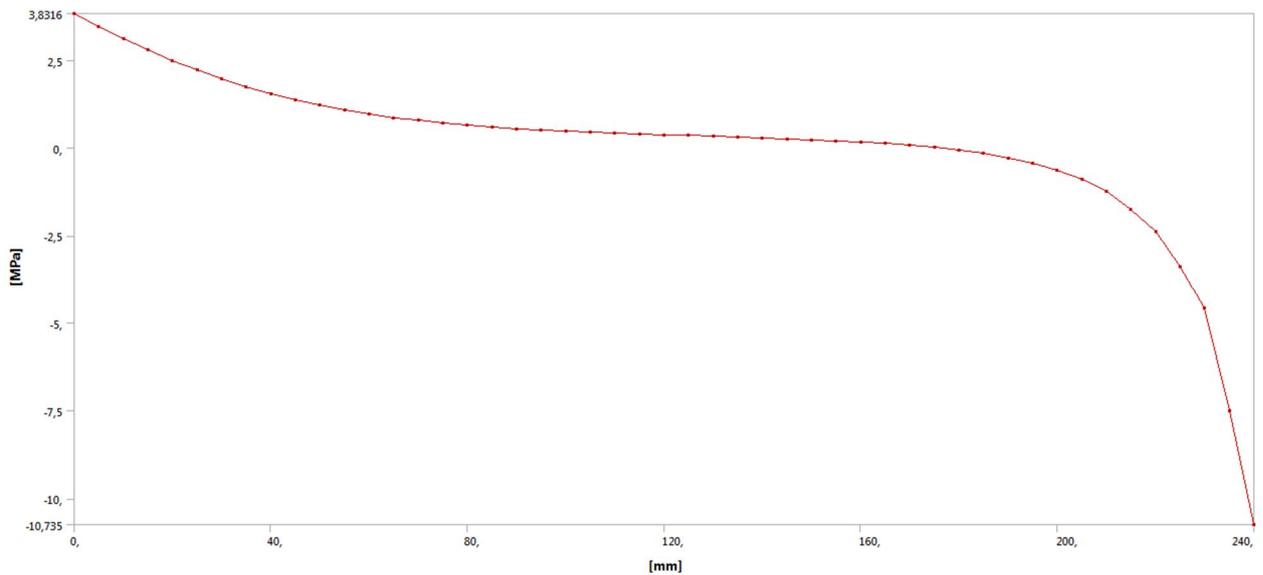


Bild 45 Schubspannungen (links) und vertikale Verformung(rechts) (zentrisch; Gesamtlast 72 kN)



Unten

Oben

Bild 46 Horizontale Normalspannung an der Symmetrieachse (zentrisch; Gesamtlast 72 kN)

4.1.4.2. Laststufe der Prüflast 100 kN

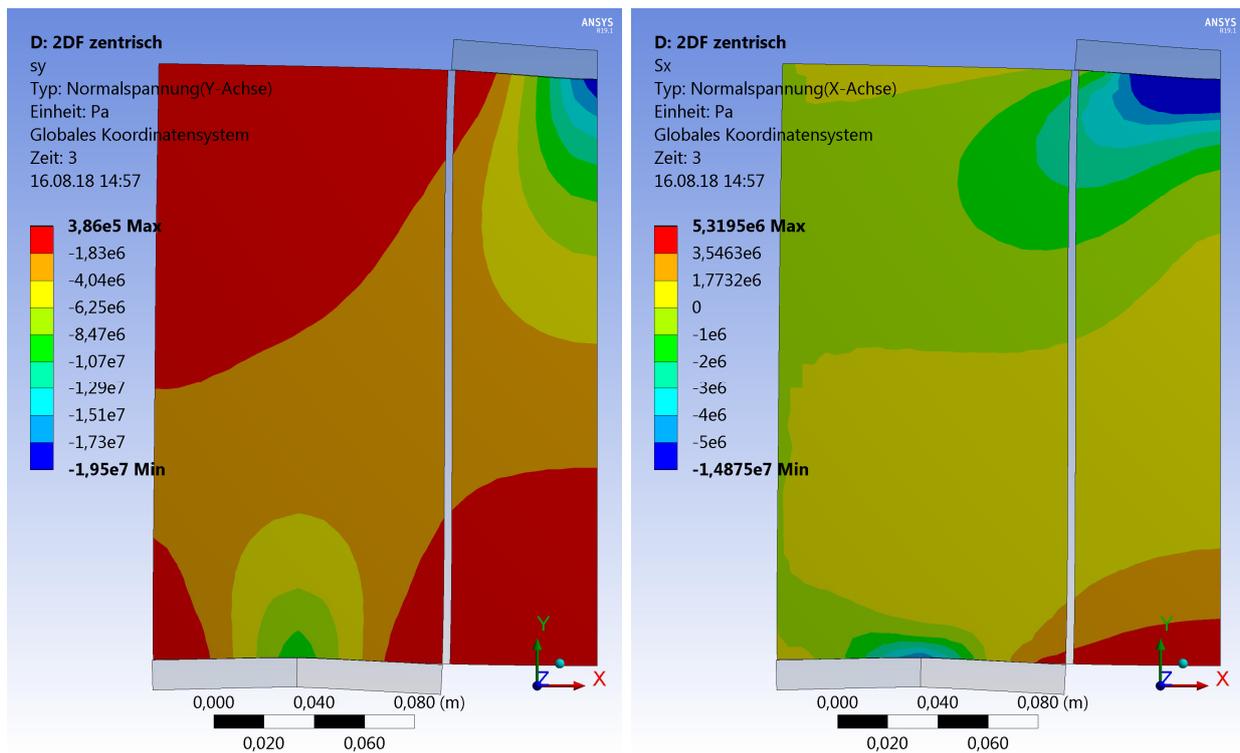


Bild 47 Normalspannungen (links: s_y ; rechts: s_x ; zentrisch; Gesamtlast 100 kN)

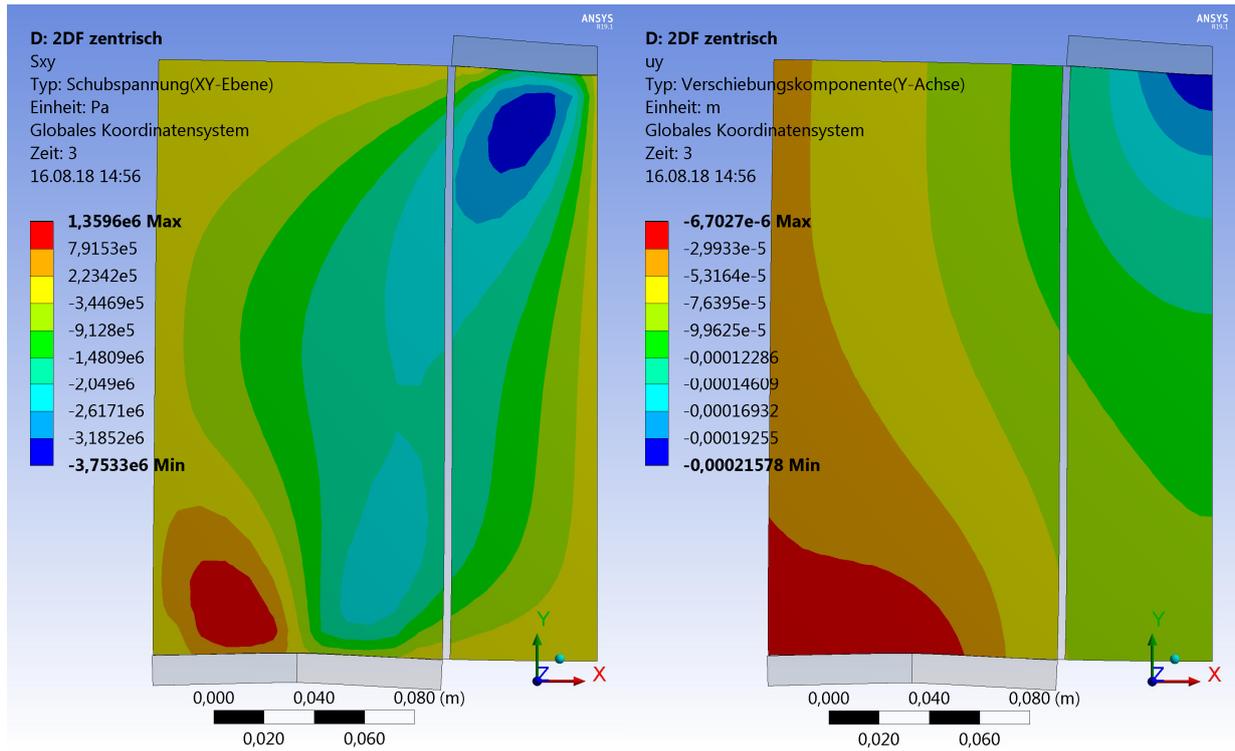


Bild 48 Schubspannungen (links) und vertikale Verformung(rechts) (zentrisch; Gesamtlast 100 kN)

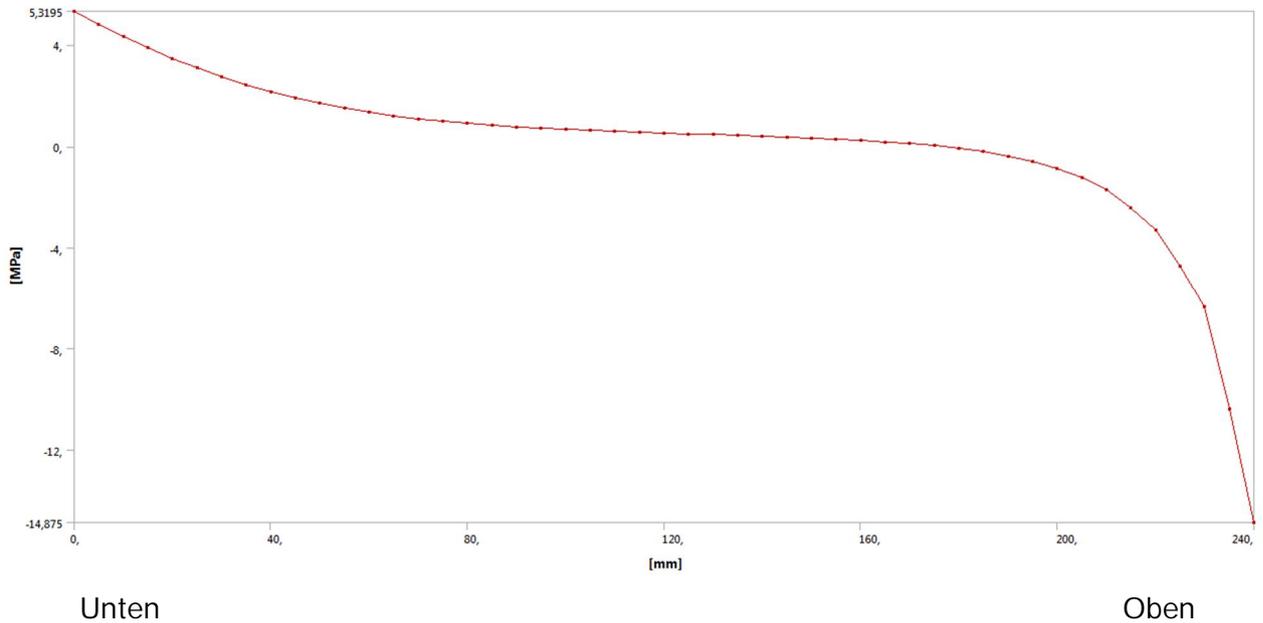


Bild 49 Horizontale Normalspannung an der Symmetrieachse (zentrisch; Gesamtlast 100 kN)

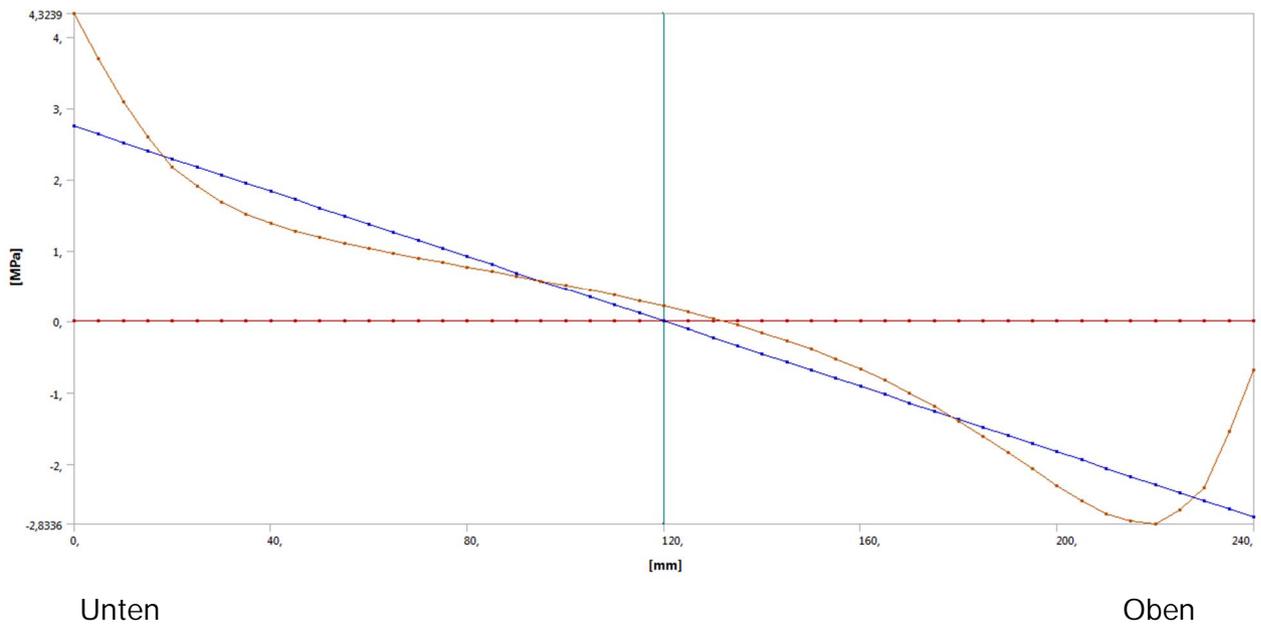


Bild 50 Horizontale Normalspannung an der Fuge (zentrisch; Gesamtlast 100 kN)

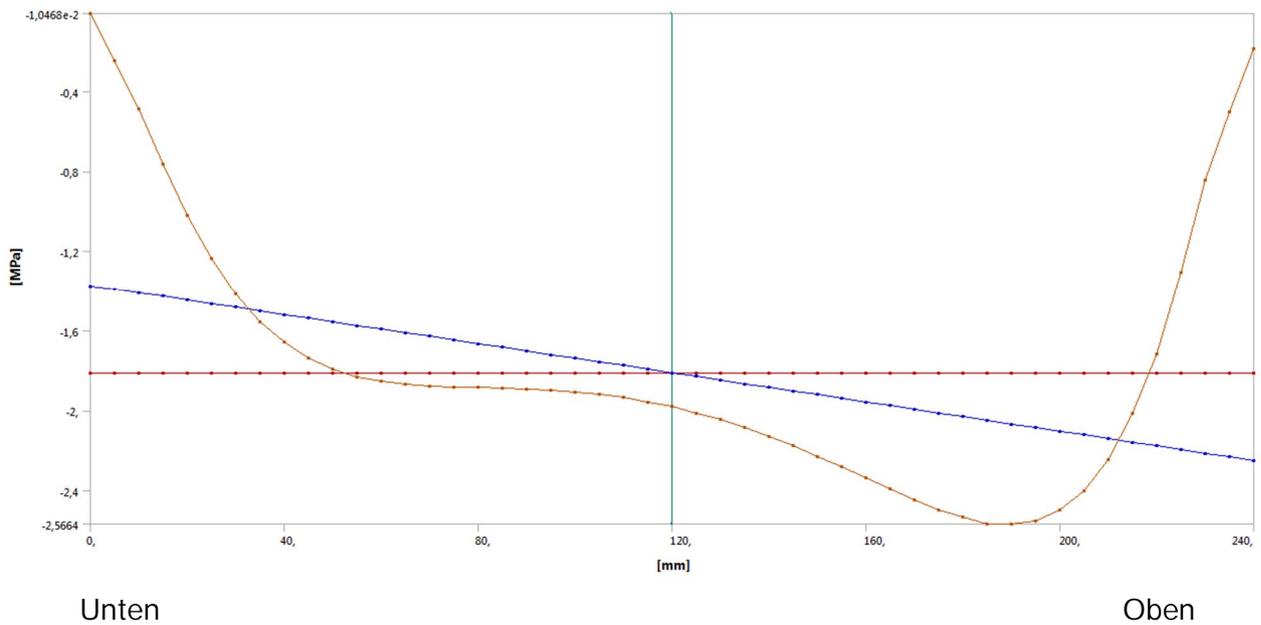


Bild 51 Schubspannung an der Fuge (zentrisch; Gesamtlast 100 kN)

4.1.4.3. Laststufe 100 kN (1,81 N/mm²) mit Vorspannung von 121,7 kN (4,41 N/mm²)

Die horizontale Vorspannung wurde gleichmäßig über die Steinhöhe aufgebracht und so gewählt, dass die Zugspannung (s.v.) am Fugenrand überdrückt ist.

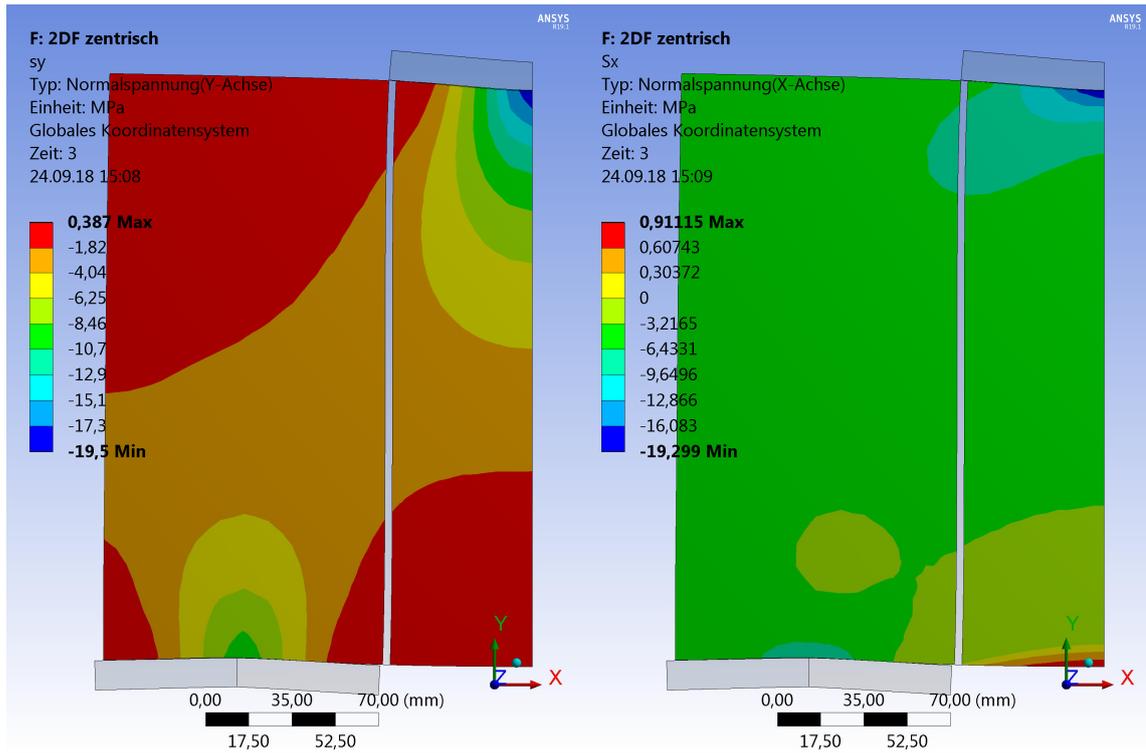


Bild 52 Normalspannungen (links: s_y ; rechts: s_x ; zentrisch; Gesamtlast 100 kN)

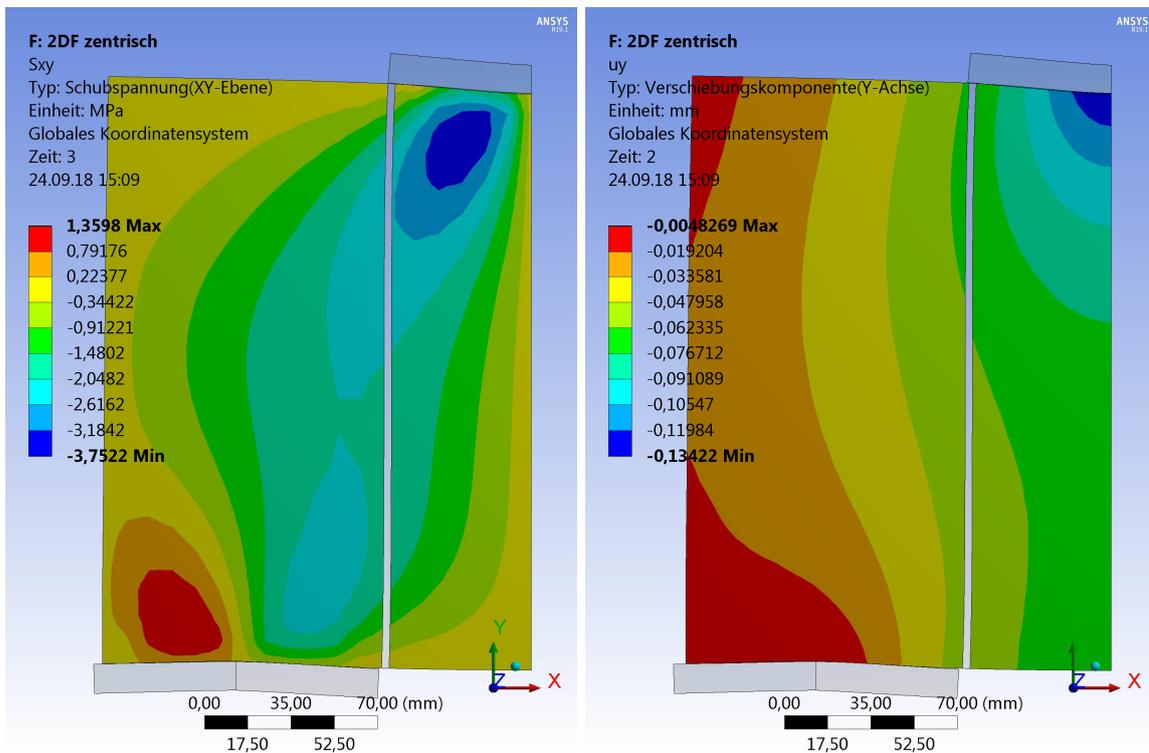
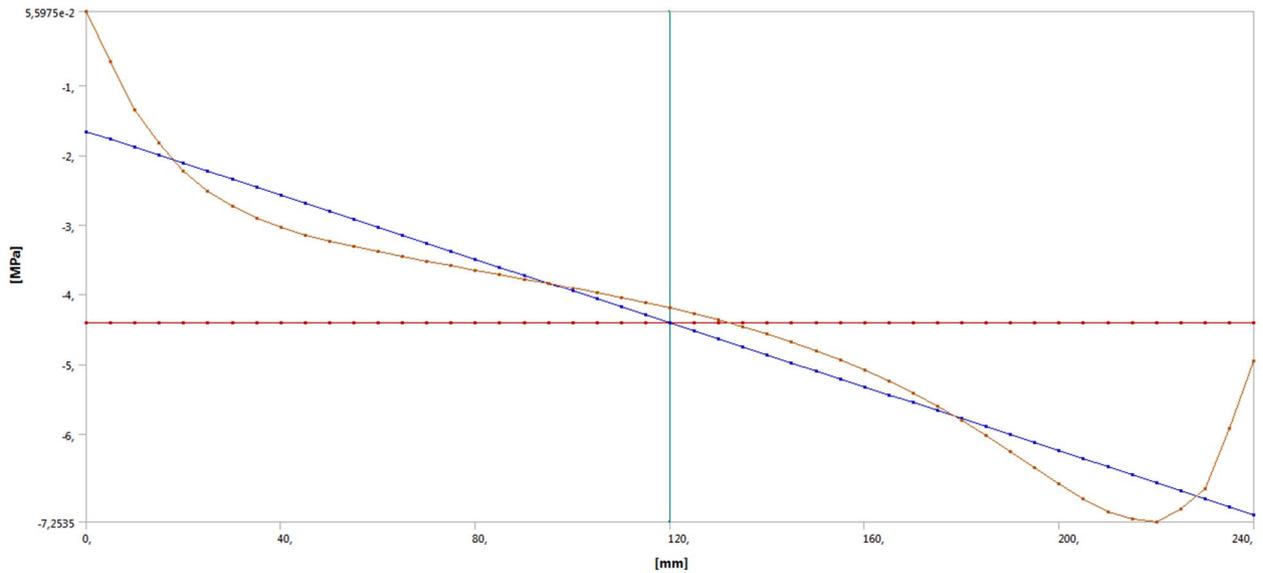


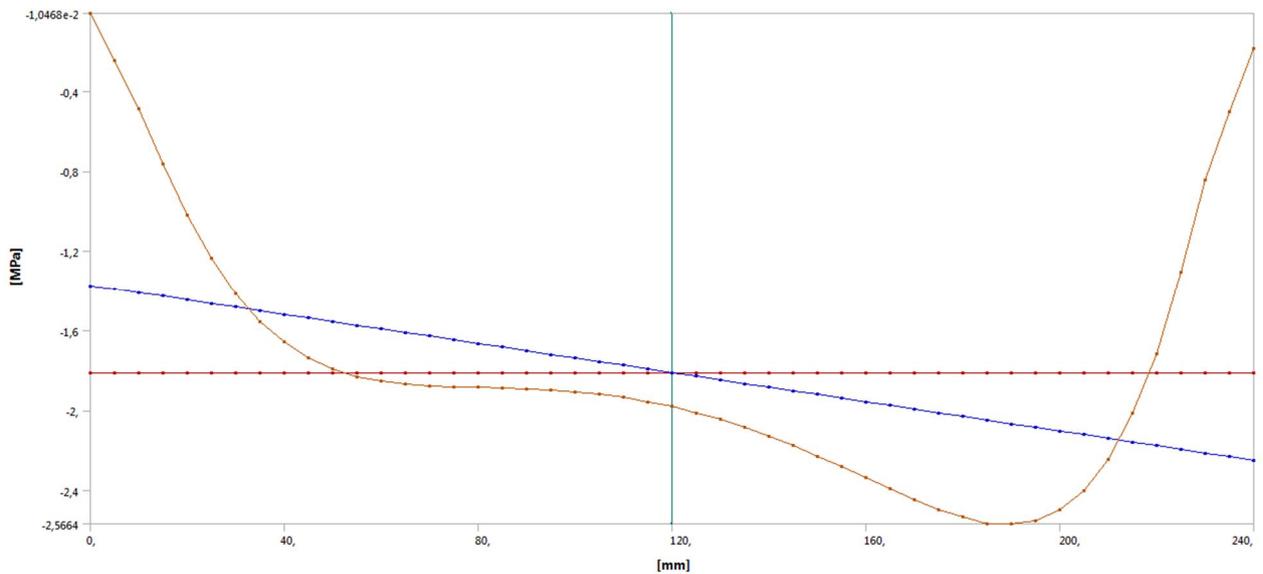
Bild 53 Schubspannungen (links) und vertikale Verformung(rechts) (zentrisch; Gesamtlast 100 kN)



Unten

Oben

Bild 54 Horizontale Normalspannung an der Fuge (zentrisch; Gesamtlast 100 kN; Vorspannung von 121,7 kN)



Unten

Oben

Bild 55 Schubspannung an der Fuge (zentrisch; Gesamtlast 100 kN; Vorspannung von 121,7 kN)

4.1.5. Vollflächige Lagerung auf den unteren Lagerplatten, Prüflast 100 kN

4.1.5.1. Ohne Vorspannung

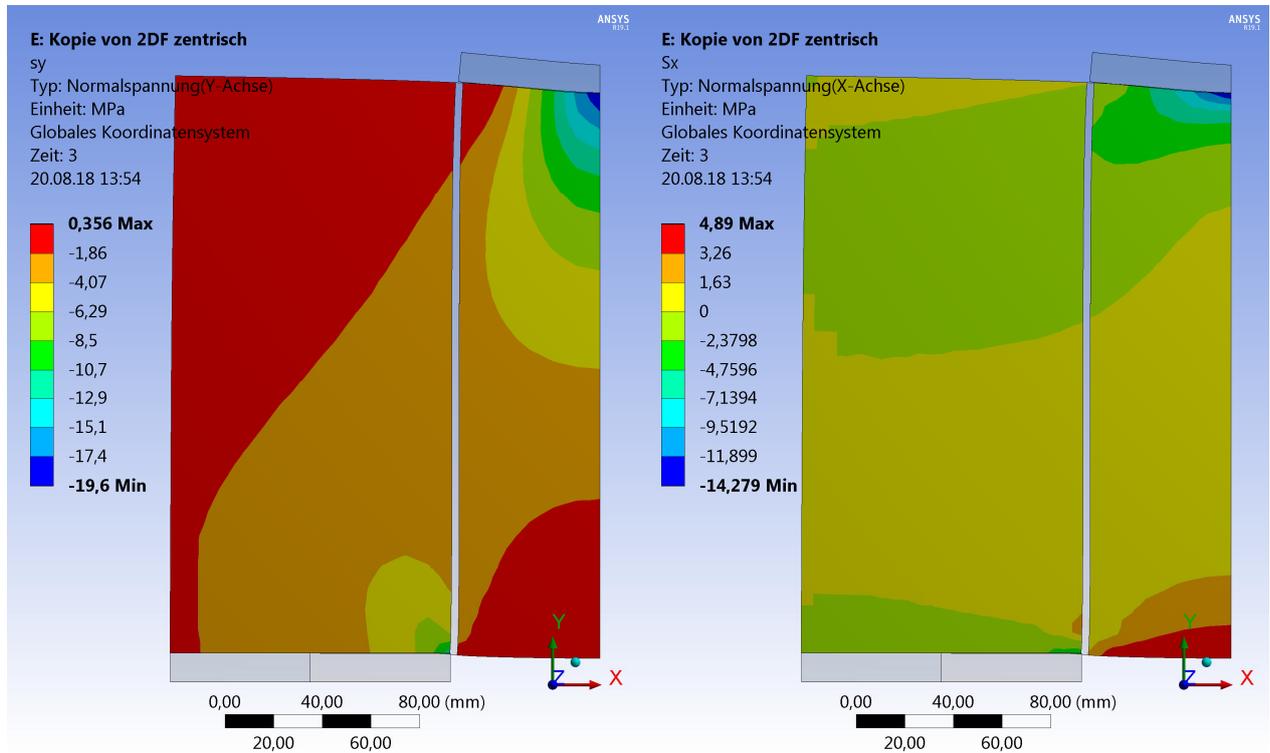


Bild 56 Normalspannungen (links: s_y ; rechts: s_x ; flächig; Gesamtlast 100 kN)

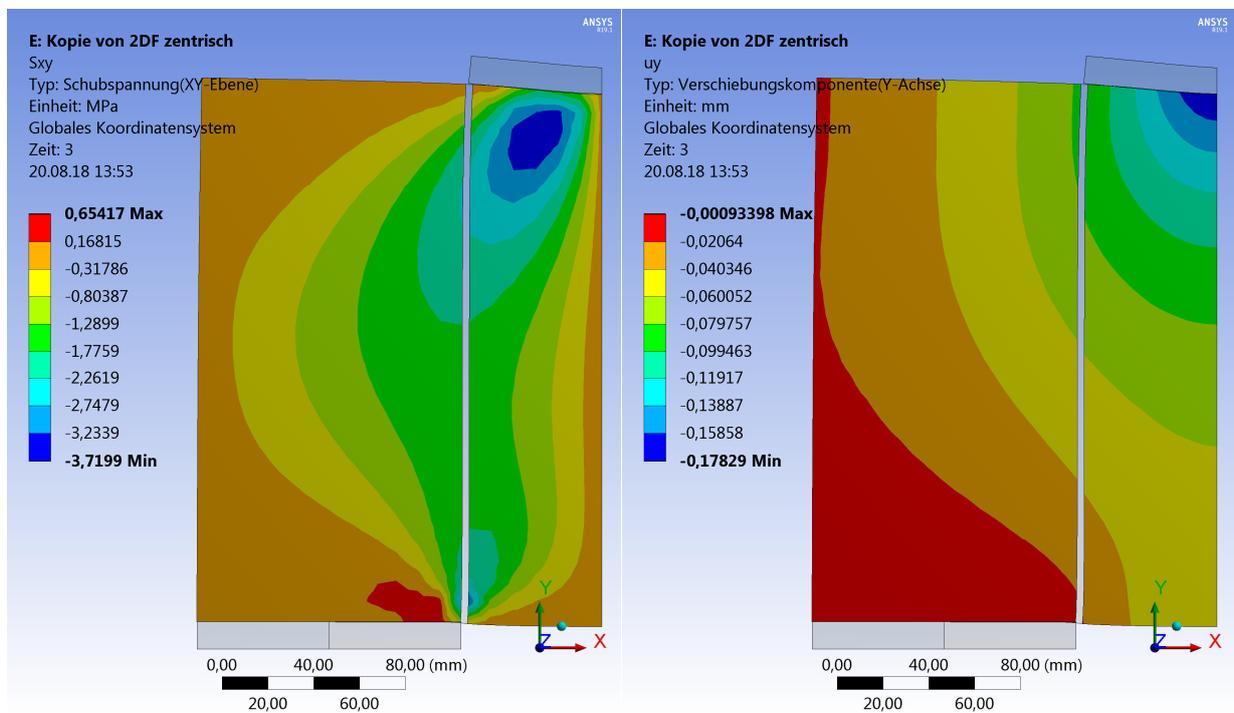


Bild 57 Schubspannungen (links) und vertikale Verformung(rechts) (flächig; Gesamtlast 100 kN)

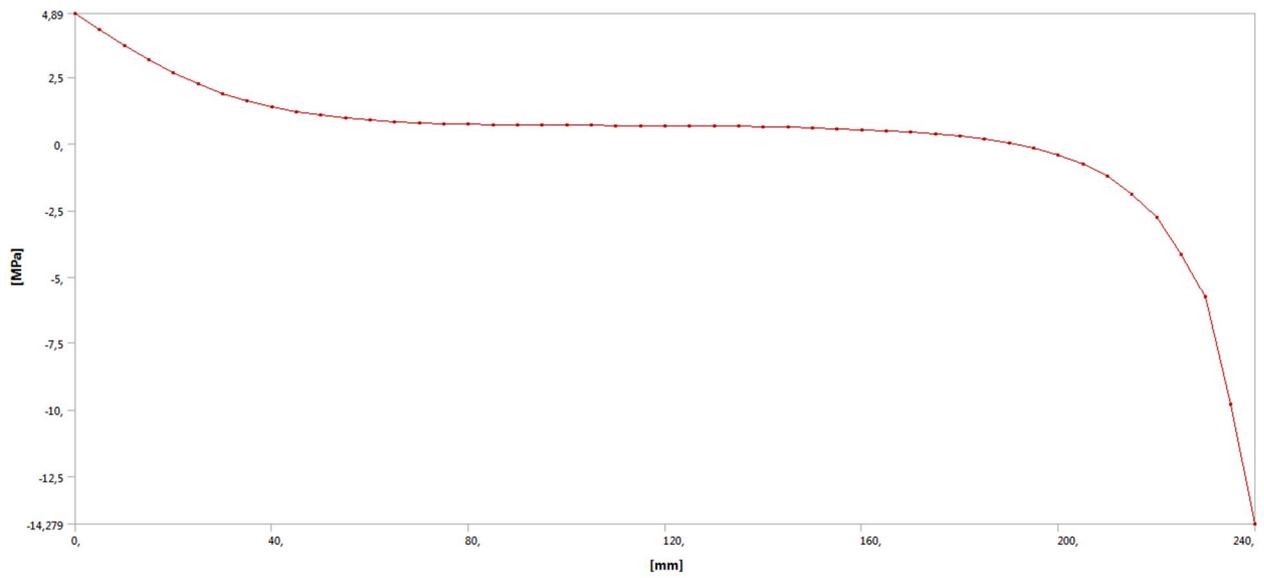


Bild 58 Horizontale Normalspannung an der Symmetrieachse (flächig; Gesamtlast 100 kN)

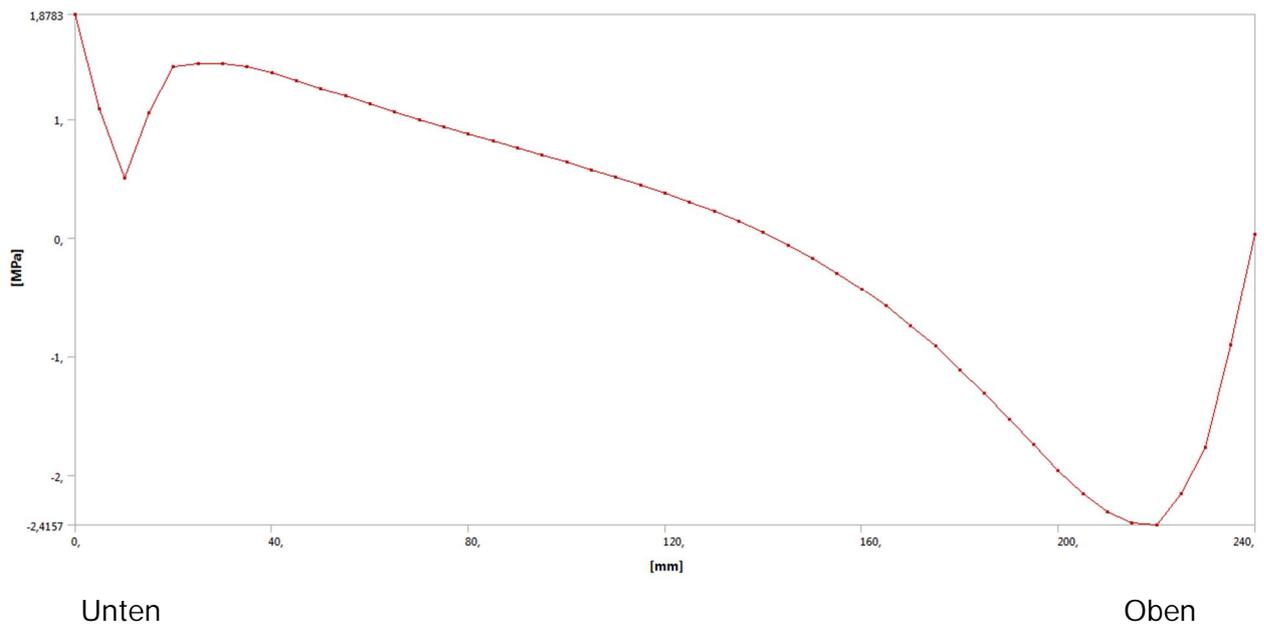


Bild 59 Horizontale Normalspannung an der Fuge (flächig; Gesamtlast 100 kN)

4.1.5.2. Vorspannung flächig mit von 51,6 kN (1,87 N/mm²)

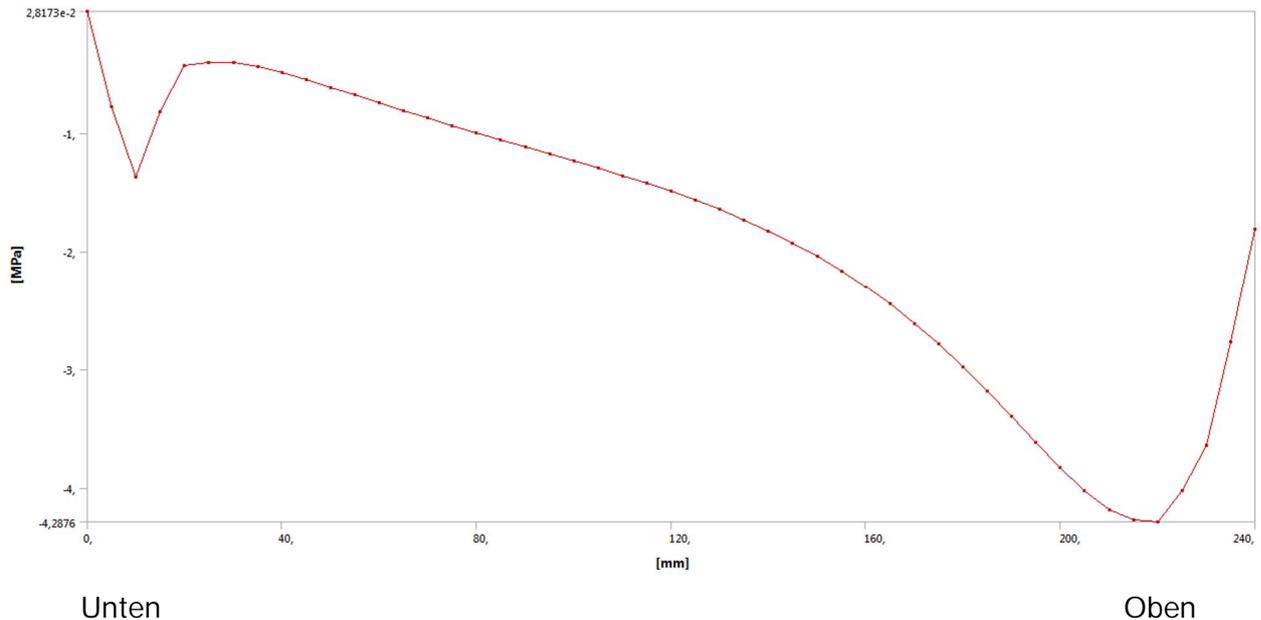


Bild 60 Horizontale Normalspannung an der Fuge (flächig; Gesamtlast 100 kN; Vorspannung von 51,6 kN)

4.1.5.3. Vorspannung über U-Profile flächig mit 51,6 kN (1,87 N/mm²) und Vorspannung flächig RR-Profilen mit 51,6 kN (1,87 N/mm²)

Die Simulation diente der Optimierung der Lasteinleitung für die an der TU Dresden durchgeführten Versuchsserien. Sie sind ausführlich in [15] dokumentiert.

4.1.5.4. Mit um 2 cm eingerückten Lasteinleitungsplatten – ohne Vorspannung

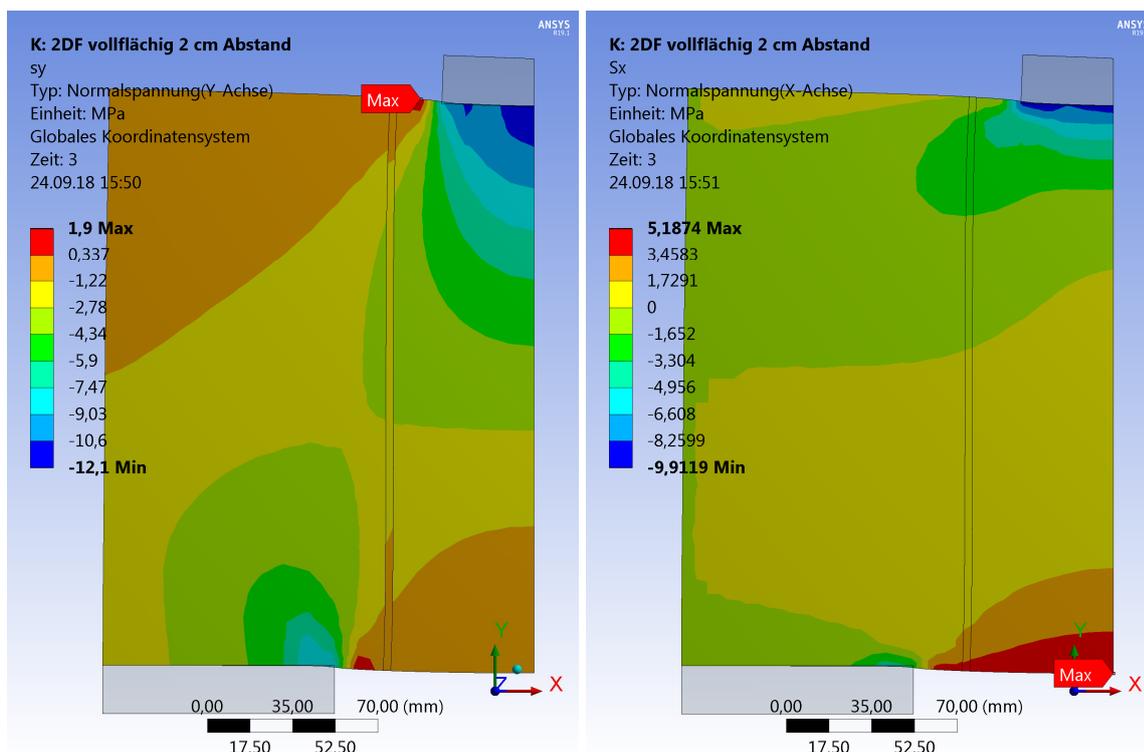


Bild 61 Normalspannungen (links: s_y ; rechts: s_x ; flächig; Gesamtlast 100 kN)

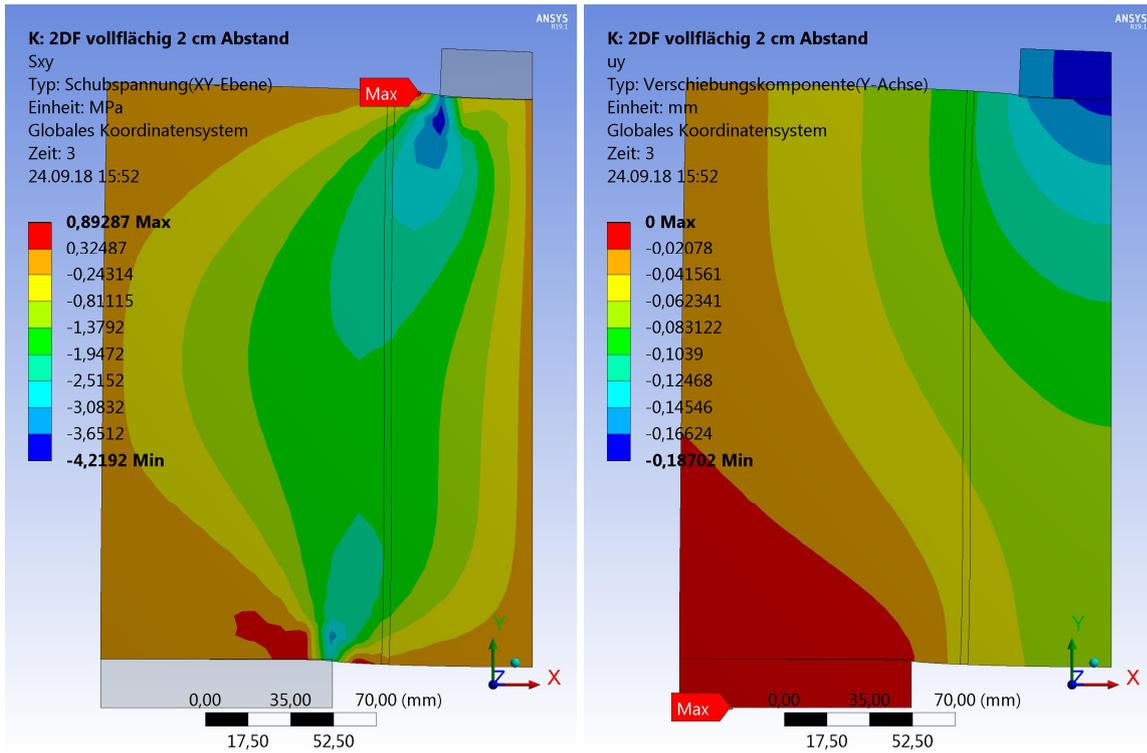


Bild 62 Schubspannungen (links) und vertikale Verformung(rechts) (flächig; Gesamtlast 100 kN)

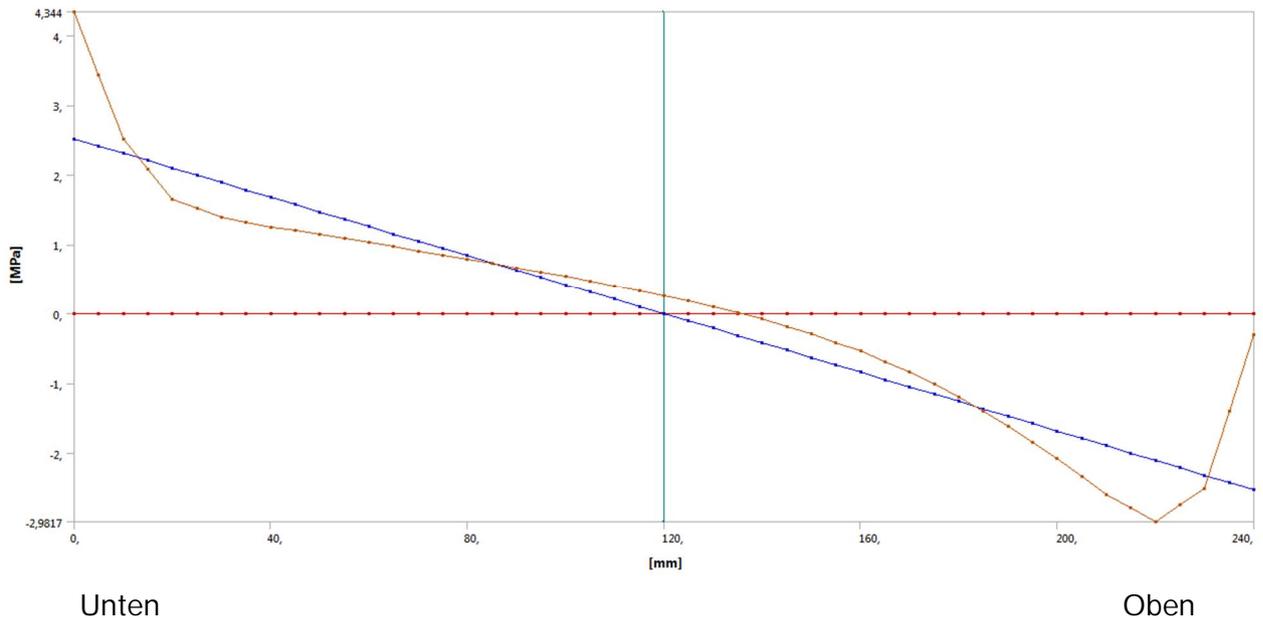


Bild 63 Horizontale Normalspannung an der Fuge (flächig; Gesamtlast 100 kN)

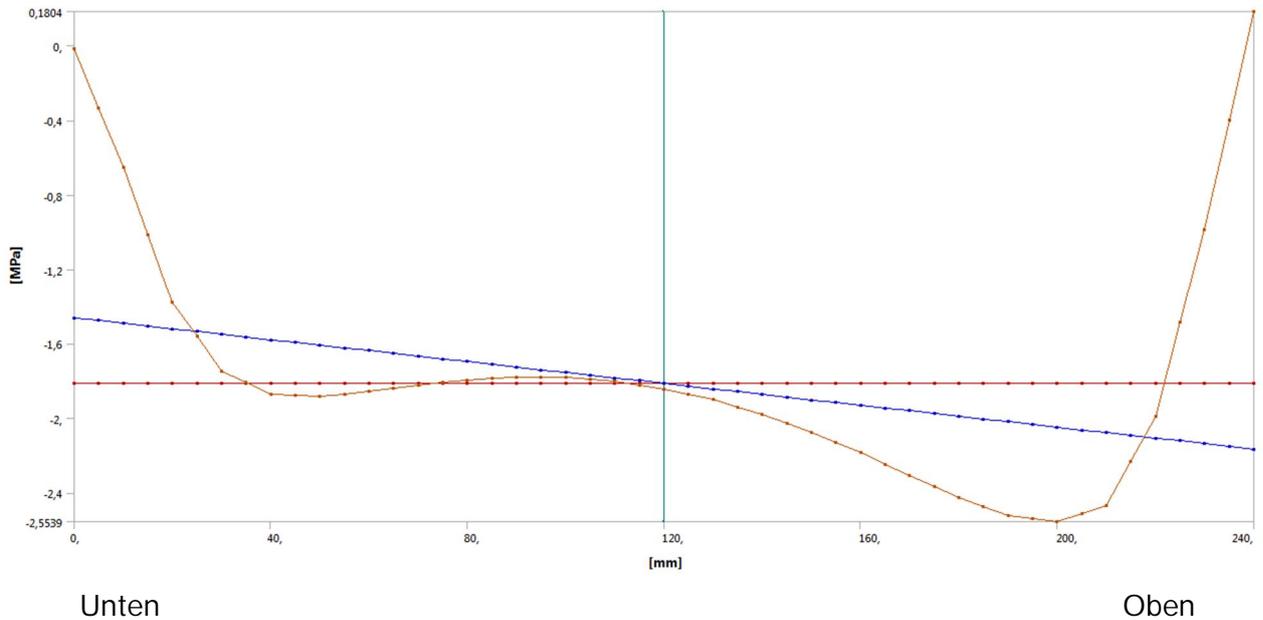


Bild 64 Schubspannungen an der Fuge (flächig; Gesamtlast 100 kN)

4.1.6. Seitlich aufgeklebte Stahlplatten

4.1.6.1. Vollflächige Auflagerung mit Stahlplatten – 3D Simulation

Bei dem 3-D-Modell wird neben der Symmetrie in Längsrichtung auch die Symmetrie in der Breite ausgenutzt. Somit wird $\frac{1}{4}$ des Versuchskörpers modelliert. Zusätzlich sind die beide äußeren steinen durch 2,0 cm dicke aufgeklebte Stahlplatten miteinander verbunden. Es wird keine Vorspannung aufgebracht. Die folgenden Ansichten sind auf die Symmetrieebenen gerichtet.

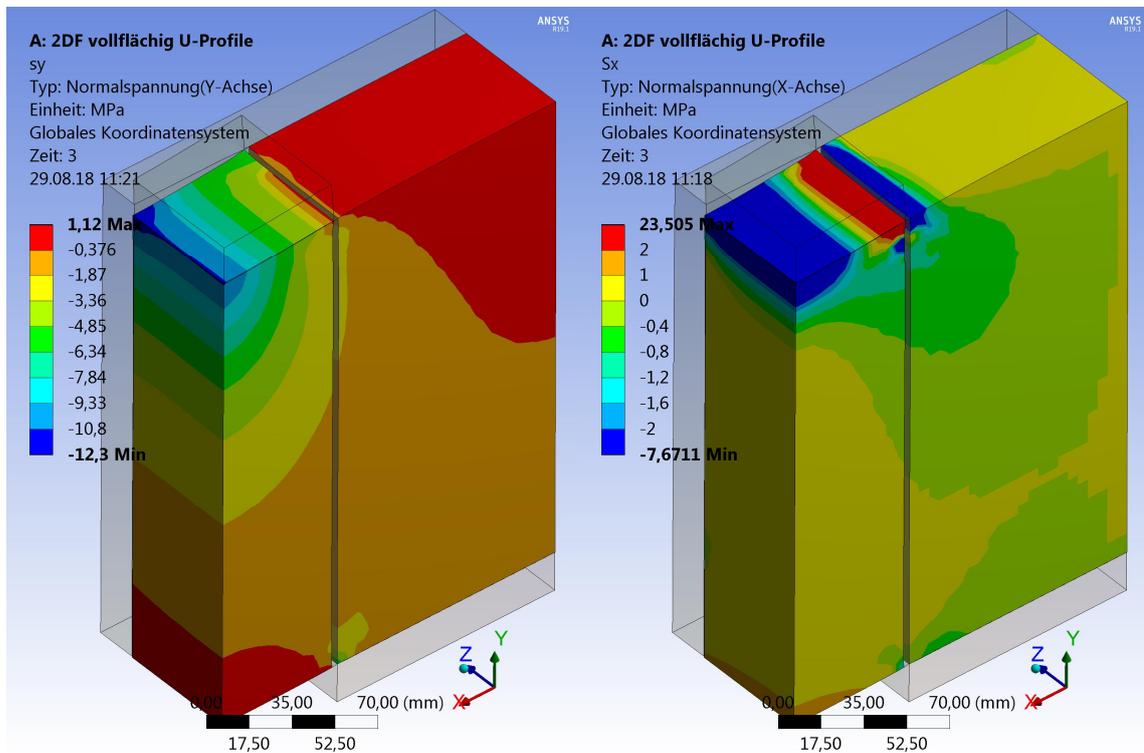


Bild 65 Normalspannungen (links: s_y ; rechts: s_x ; flächig; Gesamtlast 100 kN)

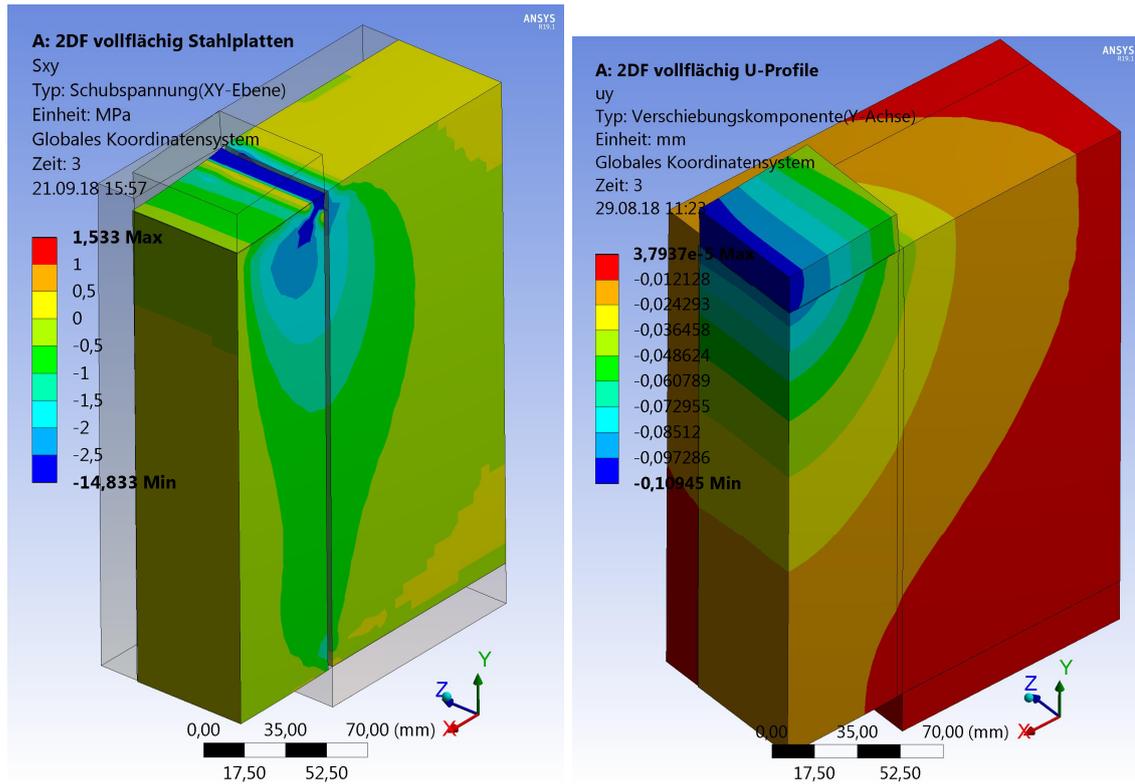


Bild 66 Schubspannungen (links) und vertikale Verformung(rechts) (flächig; Gesamtlast 100 kN)

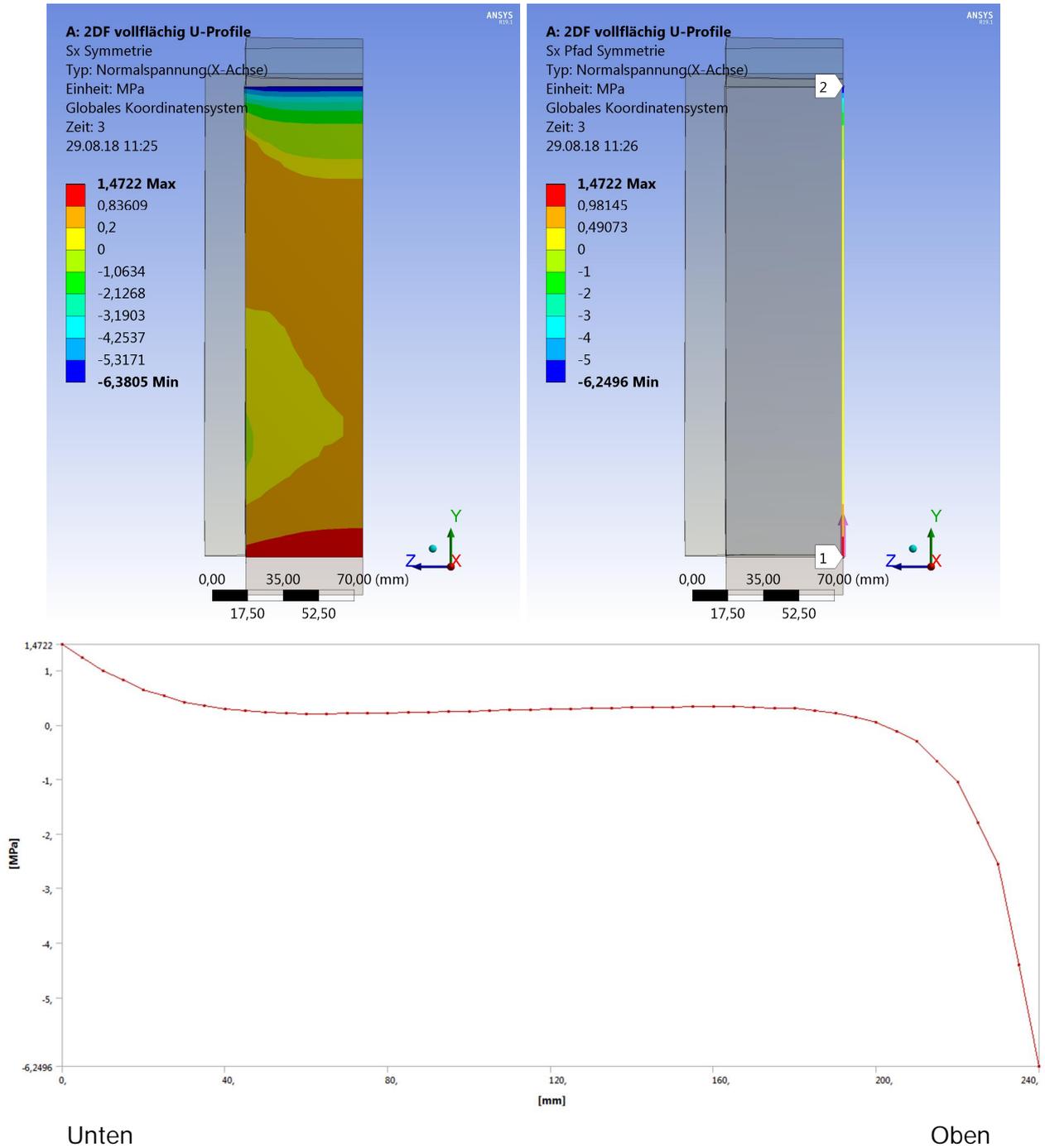


Bild 67 Horizontale Normalspannung an der Symmetrie (flächig; Gesamlast 100 kN)

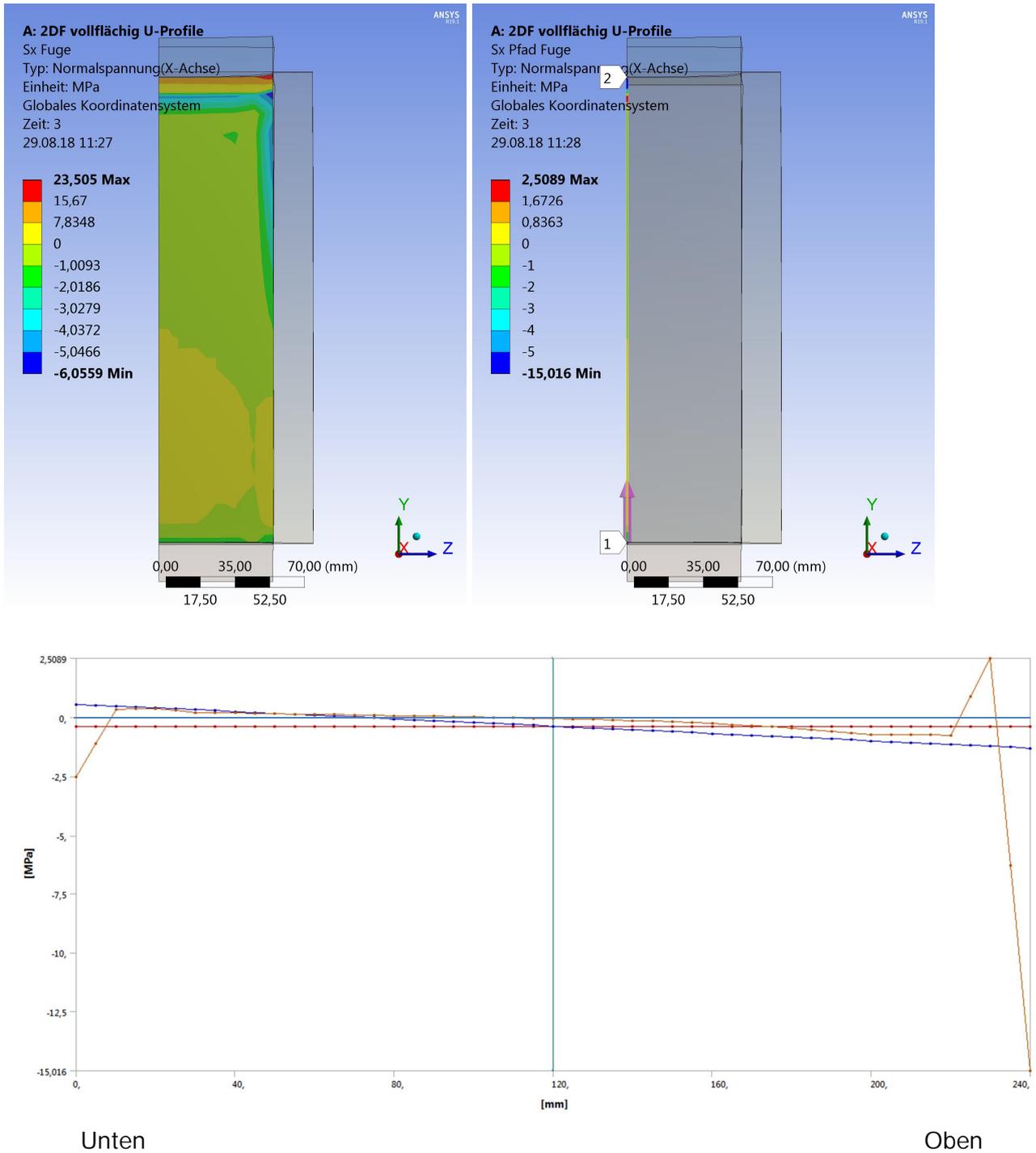


Bild 68 Horizontale Normalspannung an der Fuge (flächig; Gesamtlast 100 kN)

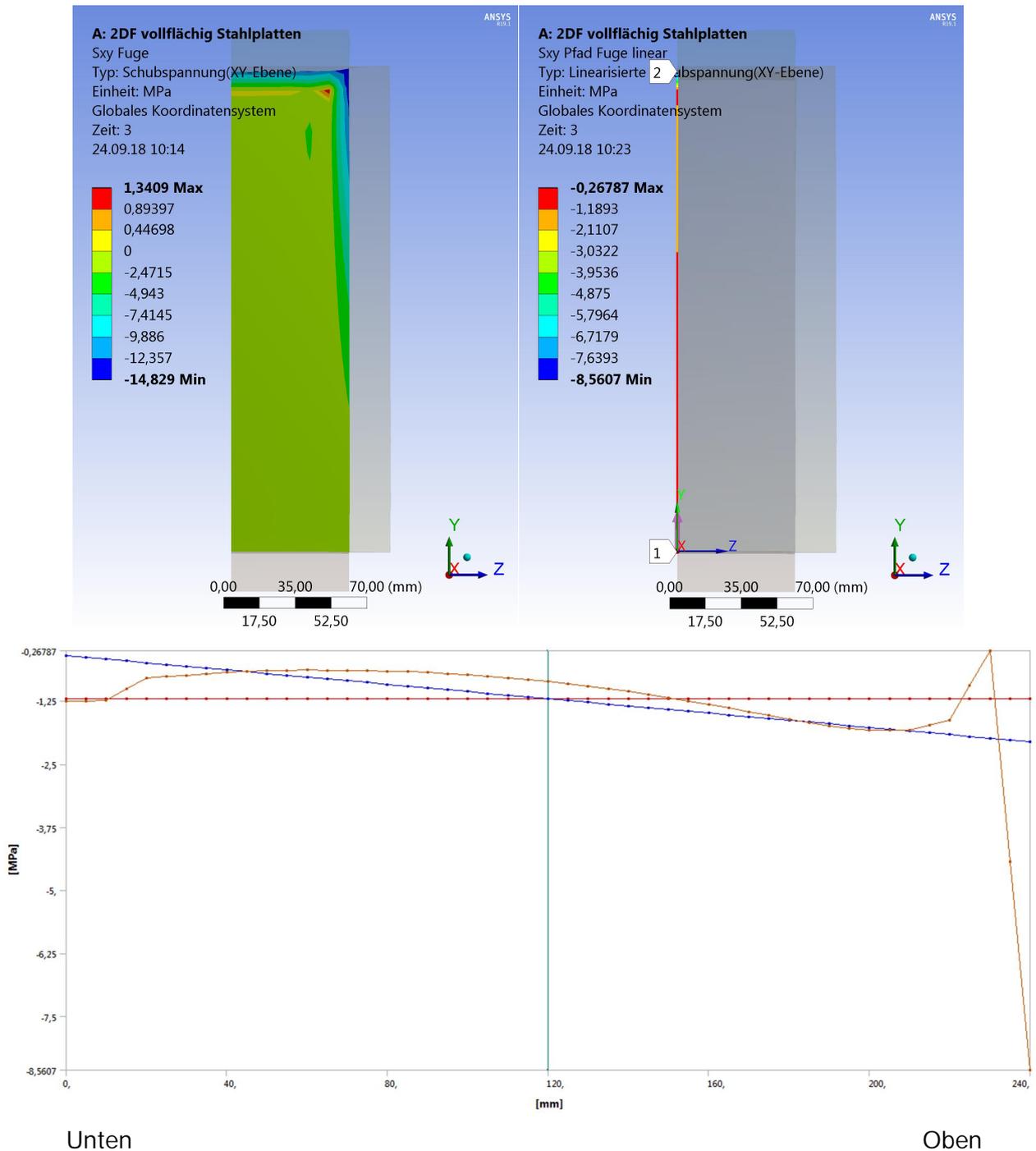


Bild 69 Schubspannung an der Fuge (flächig; Gesamtlast 100 kN)

4.1.7.1. Vollflächige Auflagerung mit Stahlplatten und Randabstand

Varianten dazu wurden in [15] untersucht. Ziel war dabei, ggf. auch Messungen am Dreisteinprüfkörper durchführen zu können. Die Einrückung verfälscht aber wieder den Spannungsverlauf, sodass diese Varianten nicht weiter verfolgt worden sind.

4.1.8. Schlussfolgerungen

In Auswertung der durchgeführten Simulationen erweisen sich folgende Varianten als brauchbar und vergleichbar:

- Prüfung nach modifiziertem Verfahren A gem. DIN EN 1052-3, jedoch mit erhöhter Seitenlast, die vom Erwartungswert der Haftscherfestigkeit mit der Randbedingung der Überdrückung der Biegenormalspannungen im Prüfkörper zu ermitteln sind und voll aufliegenden Grundplatten ca. 2 cm vom Steinrand eingerückt
- Prüfung nach modifiziertem Verfahren B in Anlehnung an DIN EN 1052-3 mit aufgeklebten Stahllaschen und voll aufliegenden Grundplatten

5. Experimentelle Untersuchungen

5.1. Auswertung der Haftscherversuche

5.1.1. Versuchsreihe 06.03.2018

Material:	Kalksandstein, Normalformat, Dünnbettmörtel, Dreisteinkörper,
Herstellung/Lagerung	Raumklima
Verfahren:	EN 1052-3:2002 [2], Verfahren B ohne Seitenlast 10.2
Auswertung:	vereinfachtes Verfahren 10.2.2.
Belastungsgeschwindigkeit:	350 N/s

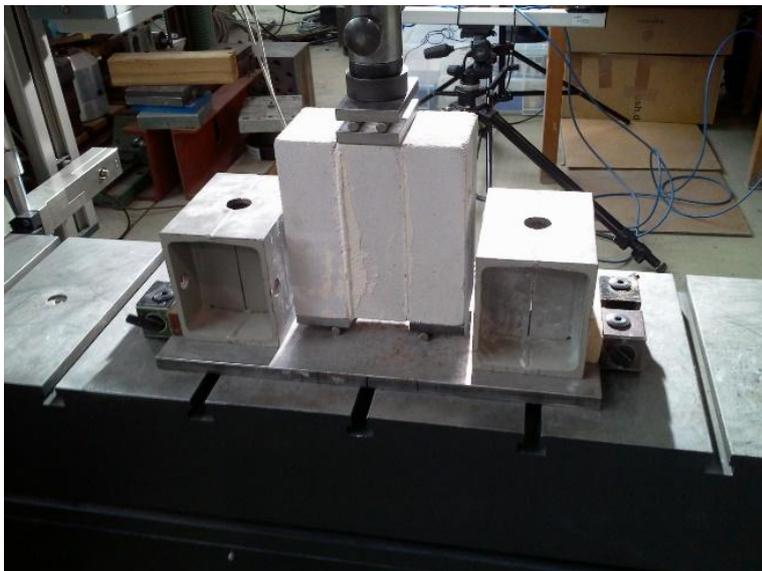


Bild 70 Dreisteinkörper NF ohne Seitenlast, Versuch nach Norm, Verfahren B

Die Lagerung der Prüfkörper erfolgte auf Rollen gem. Vorgabe der Prüfnorm s. Bild 70.

	F	2*A	fvoi	fvo mittel	fvok 80%	fvok min	fvok
	[N]	[mm ²]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
V1	61900	55200	1,12	1,02	0,82	0,66	0,66
V2	65900	55200	1,19				
V3	36300	55200	0,66				
V5	54200	55200	0,98				
V6	52600	55200	0,95				
V7	67400	55200	1,22				
(V4 nicht wertbar)							

Tabelle 4 Ergebnisse der Prüfung Kalksandstein mit Dünnbettmörtel nach originalem Verfahren B gemäß DIN EN 1052-3

Es ergibt sich eine mittlere Haftscherfestigkeit $f_{vo}=1,02$ MPa und eine charakteristische Haftscherfestigkeit $f_{vok}=0,66$ MPa.

Zum Vergleich werden die Ergebnisse der Versuche von *Schubert* und *Lohaus* herangezogen.

	Lohaus	Schubert	Jäger/Ries
Mittel	0,51	0,92	1,02

Tabelle 5 Vergleich der Ergebnisse mit denen von Schubert [4] und Lohaus [3]

Zur Tabelle 5 ist anzumerken, dass *Lohaus* mit dem sog. Referenzstein gearbeitet hat, der speziell konditioniert worden ist, um den ungünstigsten Fall im Mauerwerk abzubilden. Die beiden Werte sind somit nicht vergleichbar.

5.1.2. Versuchsreihe 30.05.2018

5.1.2.1. Daten und Ergebnisse

Material:	Kalksandstein, Normalformat, Dünnbettmörtel, Dreisteinkörper
Herstellung/Lagerung	Raumklima
Verfahren:	EN 1052-3:2002 [2], Verfahren A mit Seitenlast 8.2.1., jedoch keine Kraftregelung der Seitenlast und zusätzliche Vorlaststufe 1,40 MPa
Auswertung:	Verfahren A 10.1.
Belastungsgeschwindigkeit:	350 N/s



Bild 71 Dreisteinkörper NF mit Seitenlast

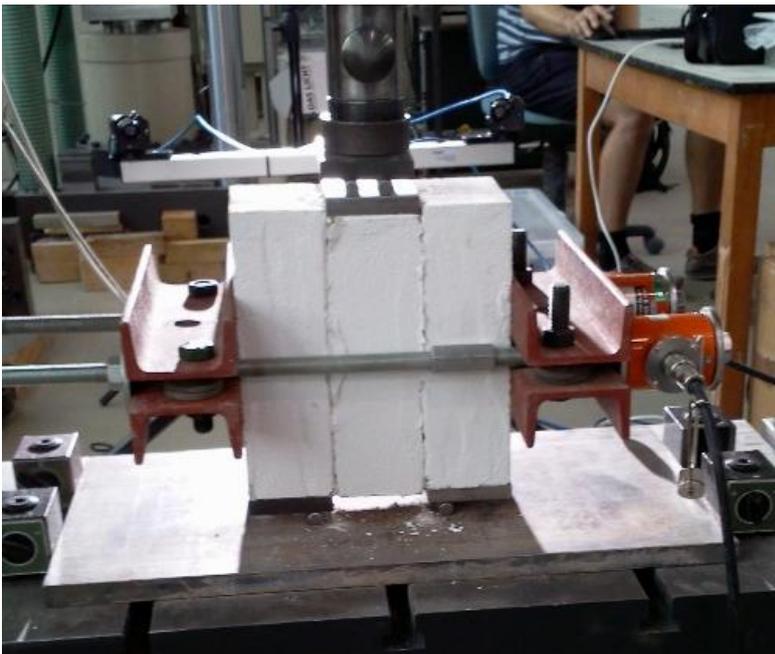


Bild 72 Dreisteinkörper NF mit Seitenlast (Verfahren A, Typ I), Abscheren mittlerer Stein, Bruchzustand

Die Lagerung der Lasteinleitungsplatten erfolgte auf Rollen gem. Vorgabe der Norm.

Versuch mit Seitenlast Serie 1									
Kraftaufnehmer Seitenlast									
Nr	Benennung	F	f_v	$s_{\text{Derf.}}^{*)}$	σ_{Anfang}	$F/2_{\text{Anfang}}$	$F/2_{\text{Ende}}$	F_{Ende}	σ_{Ende}
		KN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	KN	KN	KN	N/mm ²
1	KS-DM-SL020-V1	45,3	0,82	0,66	0,20	2,8	9,0	18,0	0,65
2	KS-DM-SL060-V1	75,4	1,37	1,10	0,60	8,3	17,0	34,0	1,23
3	KS-DM-SL100-V1	85,2	1,54	1,23	1,00	13,8	20,2	40,4	1,46
4	KS-DM-SL140-V1	107,9	1,95	1,56	1,40	19,3	25,5	51,0	1,85
Versuch mit Seitenlast Serie 2									
Nr	Benennung	F	f_v	$s_{\text{Derf.}}^{*)}$	σ_{Anfang}	$F/2_{\text{Anfang}}$	$F/2_{\text{Ende}}$	F_{Ende}	σ_{Ende}
		KN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	KN	KN	KN	N/mm ²
1	KS-DM-SL020-V2	38,5	0,70	0,56	0,20	2,8	8,2	16,4	0,59
2	KS-DM-SL060-V2	63,8	1,16	0,93	0,60	8,3	16,1	32,2	1,17
3	KS-DM-SL100-V2	99,8	1,81	1,45	1,00	13,8	20,5	41,0	1,49
4	KS-DM-SL140-V2	97,2	1,76	1,41	1,40	19,3	22,5	45,0	1,63
Versuch mit Seitenlast Serie 3									
Nr	Benennung	F	f_v	$s_{\text{Derf.}}^{*)}$	σ_{Anfang}	$F/2_{\text{Anfang}}$	$F/2_{\text{Ende}}$	F_{Ende}	σ_{Ende}
		KN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	KN	KN	KN	N/mm ²
1	KS-DM-SL020-V3	47,3	0,86	0,56	0,20	2,8	8,3	16,6	0,60
2	KS-DM-SL060-V3	70,4	1,28	0,93	0,60	8,3	17,0	34,0	1,23
3	KS-DM-SL100-V3	96,5	1,75	1,45	1,00	13,8	21,1	42,2	1,53
4	KS-DM-SL140-V3	102,0	1,85	1,41	1,40	19,3	23,5	47,0	1,70
Durchschnitt									
Nr	Benennung	F	f_v	$s_{\text{Derf.}}^{*)}$	σ_{Anfang}	$F/2_{\text{Anfang}}$	$F/2_{\text{Ende}}$	F_{Ende}	σ_{Ende}
		KN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	KN	KN	KN	N/mm ²
1	KS-DM-SL020-D	43,7	0,79	0,63	0,20	2,8	8,5	17,0	0,62
2	KS-DM-SL060-D	69,9	1,27	1,02	0,60	8,3	16,7	33,4	1,21
3	KS-DM-SL100-D	93,8	1,70	1,36	1,00	13,8	20,6	41,2	1,49
4	KS-DM-SL140-D	102,4	1,85	1,48	1,40	19,3	23,8	47,7	1,73

*) erforderliche Überdrückung in der Fuge mit den Ergebnissen nach FEM (Bild 22)

Tabelle 6 Ergebnisse der drei Versuchsserien mit je vier Seitenlaststufen 0,2-0,6-1,0-1,4 MPa

Die Spalte mit der erforderlichen Überdrückung zur Egalisierung der Biegezugspannungen ist die Spalte $s_{\text{Derf.}}$. D.h. dass bei keiner Seitenlaststufe eine vollständige Überdrückung der Biegespannungen gegeben war. Eine scharfe Grenze ist jedoch nicht zu ziehen, da ggf. die Haftzugfestigkeit zum Tragen kommt und das Aufreißen der Fuge verhindert oder zumindest teilweise verhindert.

Die Normalspannung der Seitenlast stieg gleichmäßig bis zum Versuchsende an.

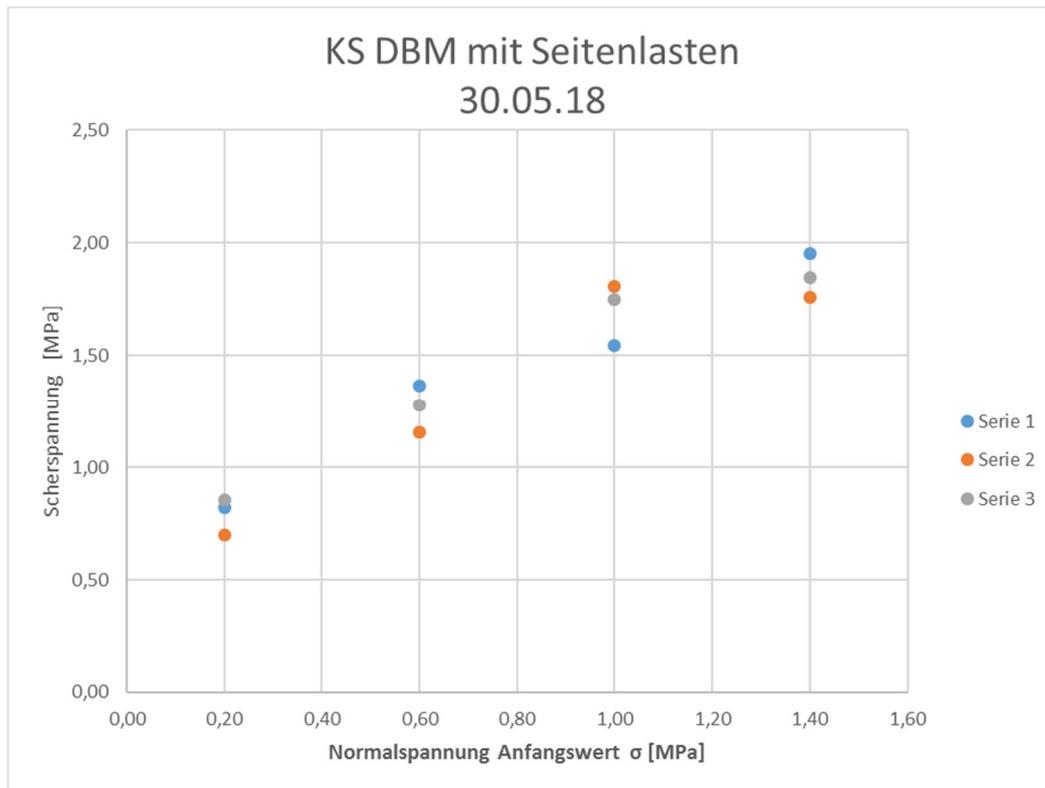


Bild 73 Ergebnisse der drei Serien bezüglich des Anfangswertes der Normalspannung.

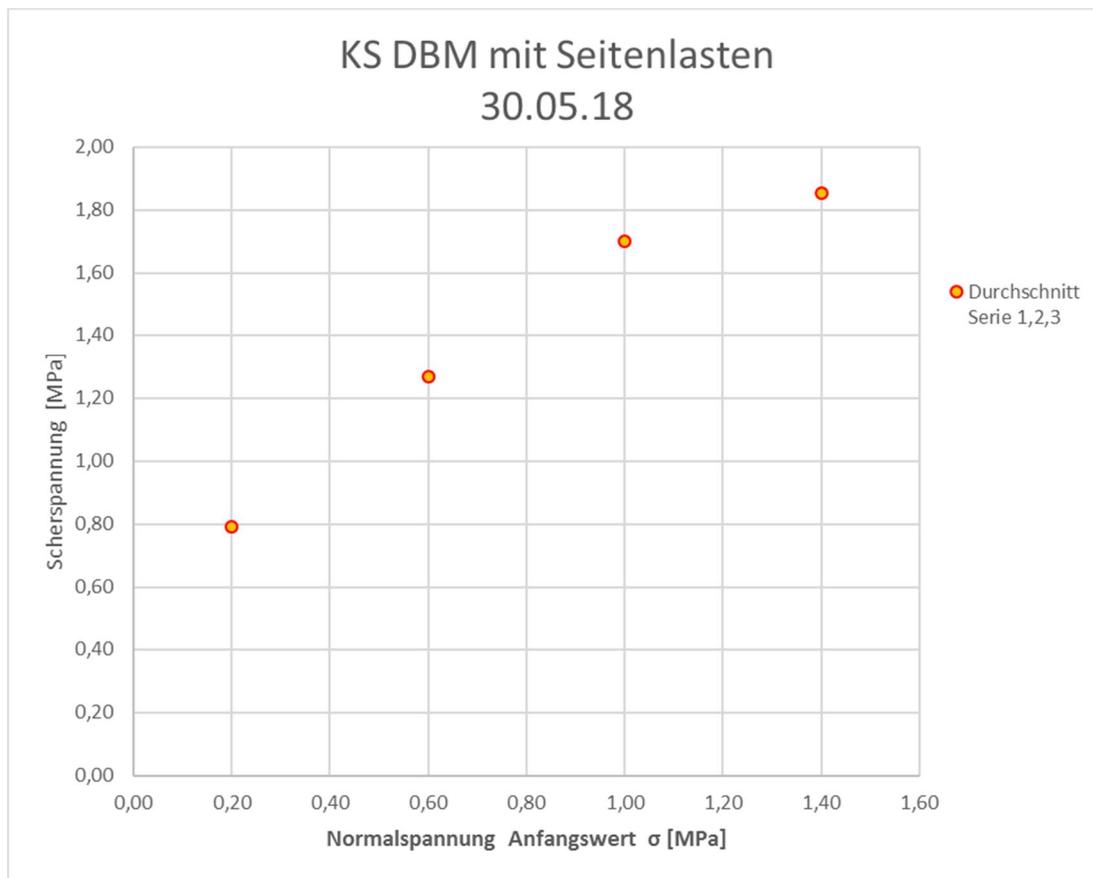


Bild 74 Durchschnitt der drei Serien bezüglich des Anfangswertes der Normalspannung.

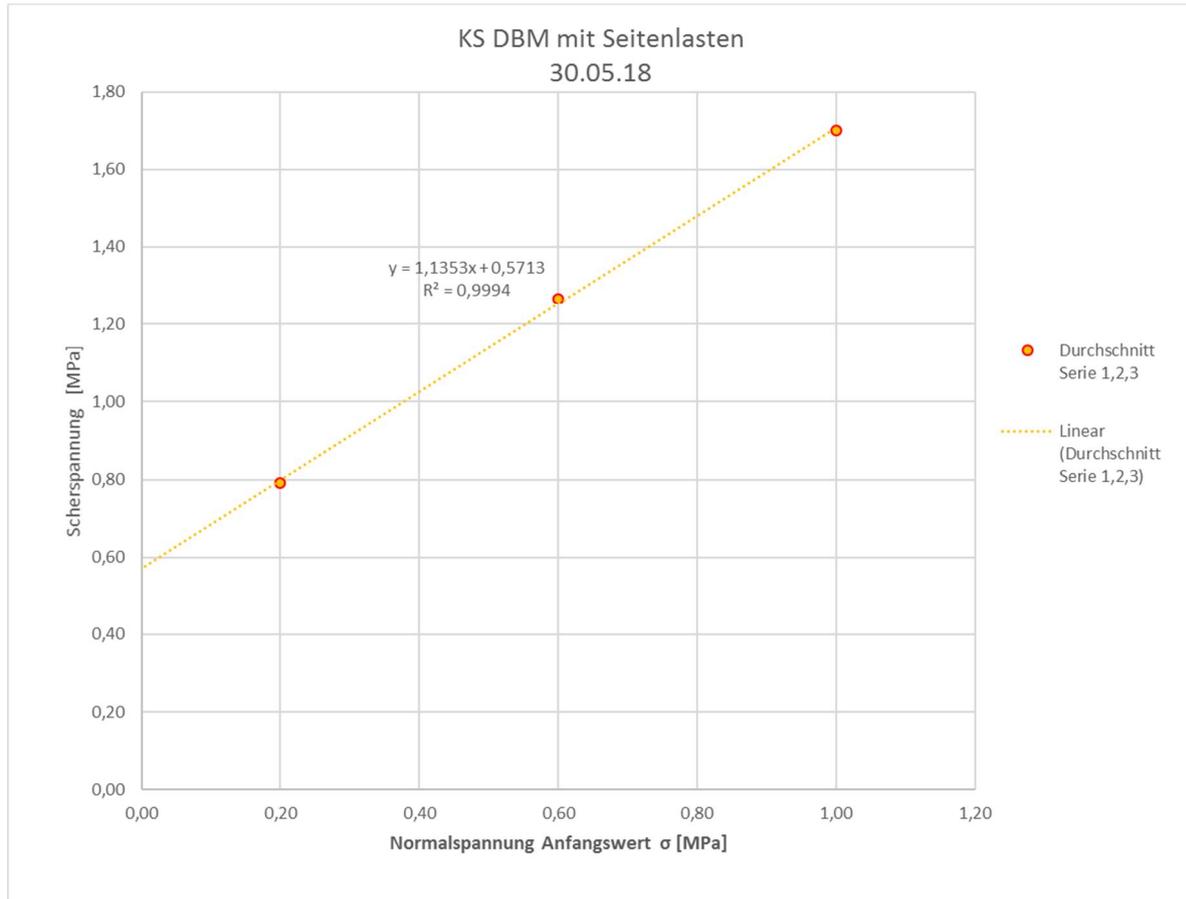


Bild 75 Auswertung der Seitenlaststufen (Anfangswert) nach Norm 0,2-0,6-1,0 MPa

Die Auswertung erfolgt nach Norm DIN EN 1052-3.

Mit den Anfangsseitenlaststufen 0,2 – 0,6 – 1,0 MPa ergibt sich eine mittlere Haftscherfestigkeit $f_{v0}=0,57$ MPa und ein Winkel von $\tan \alpha=48,6^\circ= 1,13$.

Die charakteristische Haftscherfestigkeit beträgt $f_{v0k}=0,46$ MPa, der charakteristische Winkel $\alpha_k=38,9^\circ$ und der zugehörige $\tan \alpha_k=38,9^\circ = 0,81$

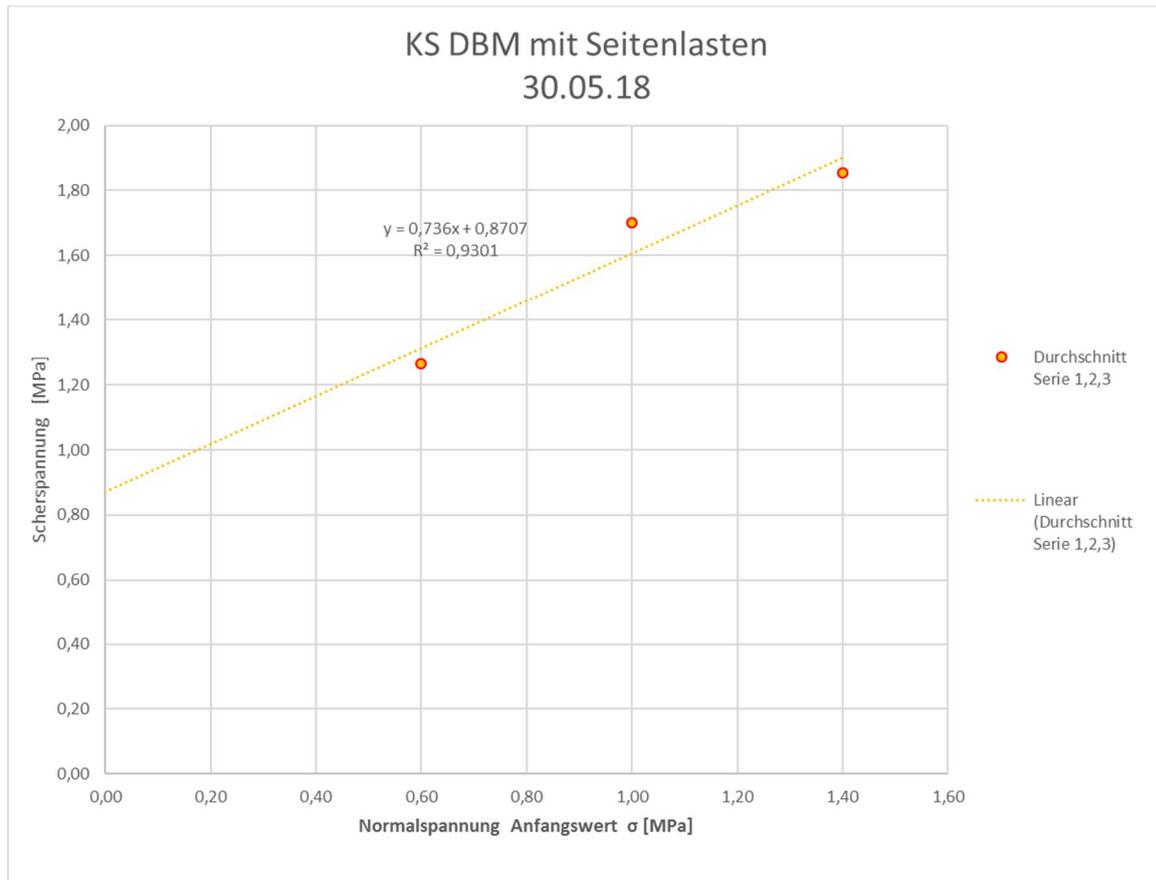


Bild 76 Auswertung der erhöhten Seitenlaststufen (Anfangswert) 0,6-1,0-1,4 MPa

Mit erhöhten Anfangsseitenlaststufen 0,6 – 1,0 – 1,4 MPa ergibt sich eine mittlere Haftscherfestigkeit $f_{vo}=0,87$ MPa und ein Winkel von $\alpha_k=36,4^\circ$ und $\tan \alpha_k =36,4^\circ = 0,74$. Die charakteristische Haftscherfestigkeit beträgt $f_{vok}=0,70$ MPa, der charakteristische Winkel $\alpha_k = 29,1^\circ$ und $\tan \alpha_k =29,1^\circ=0,56$

Da eine vollständige Überdrückung des Querschnittes noch nicht gegeben ist, muss immer noch damit gerechnet werden, dass Biegeeinflüsse das Ergebnis verfälschen.

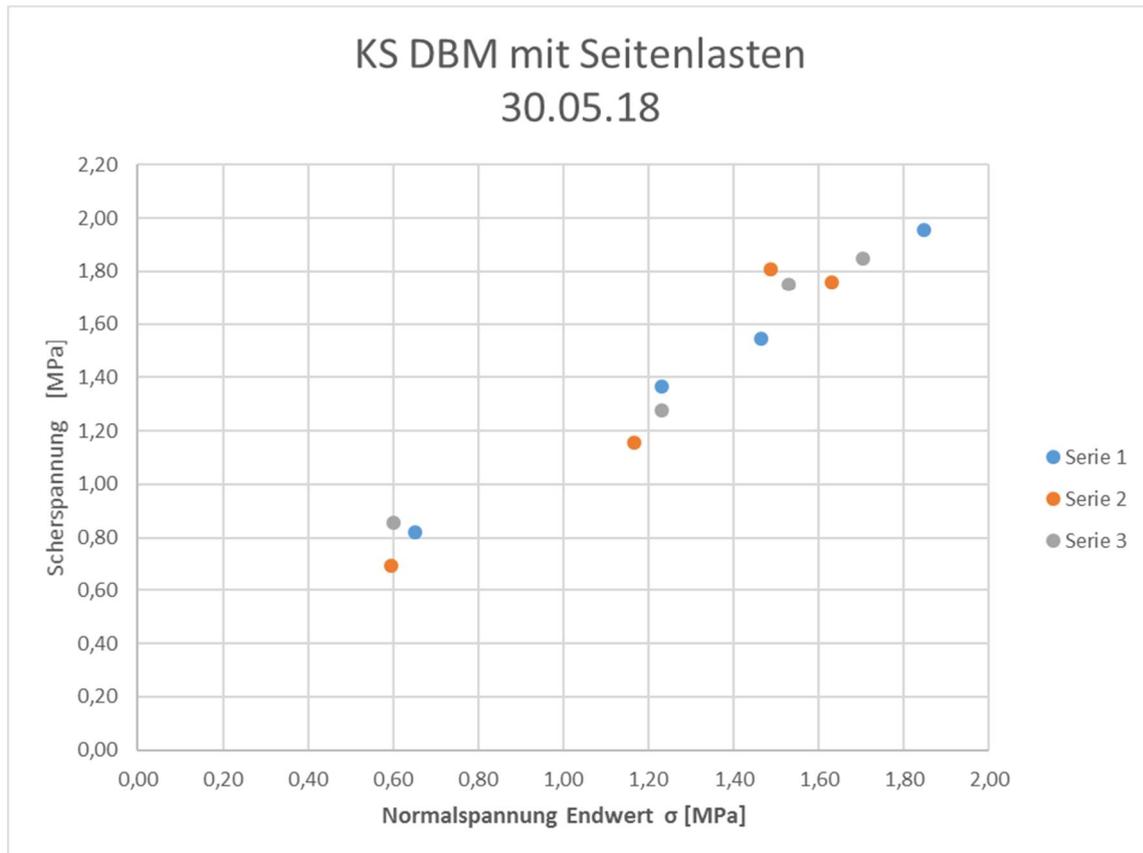
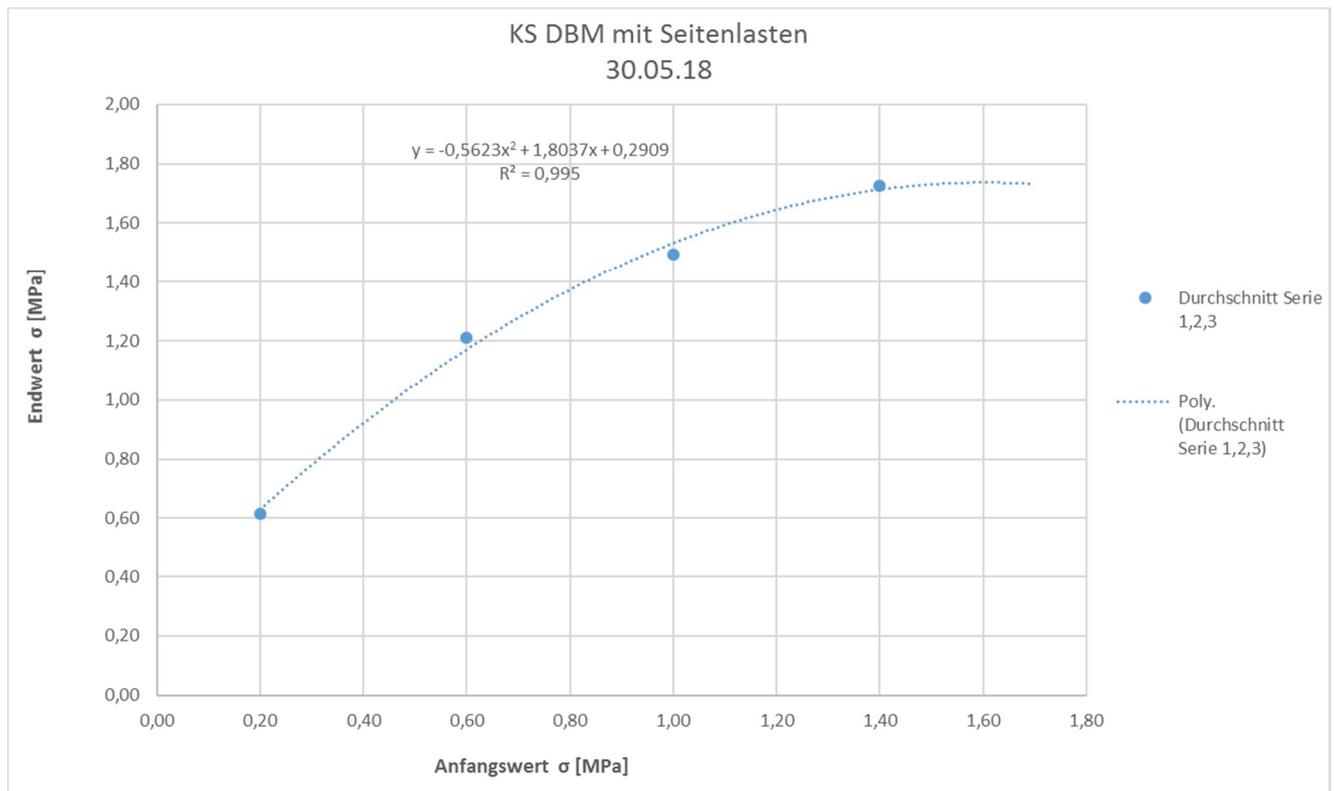


Bild 77 Auswertung aller Seitenlaststufen bezüglich des Endwertes der Normalspannung

Wenn man auf der horizontalen Achse alternativ den Endwert der Normalspannung anträgt ergibt sich nahezu eine Gerade, die durch den Ursprung geht. Am Ende des Versuchs wirkt in den Scherfugen nur noch Reibung, die Kohäsion ist dann nicht mehr wirksam. Es ergibt sich ein Endreibungsbeiwert von ca. $m = 0,9$.

5.1.2.2. Erforderliche Seitenlast



Hier sind dargestellt der Anfangswert und der Endwert der Normalspannung. Der Unterschied wird immer kleiner, dieser ist am Scheitel bei ca. 1,72 MPa etwa null. Je kleiner der Unterschied der Normalspannung am Versuchsanfang und Versuchsende desto näher ist man an einer reinen Scherbeanspruchung. Die Kraftänderung / Spannungsänderung der Seitenlast wird bei zunehmender Seitenlast immer geringer – somit hat die Dilatanz ab dieser Seitenlast keine Auswirkung mehr. Für den Dreisteinkörper 3xNF aus Kalksandstein vermauert mit Dünnbettmörtel ergäbe sich eine erforderliche Seitenlast von $N \sim 0,46 \cdot F$ (47kN / 102,4kN). Für die Ermittlung der Haftscherfestigkeit müssten entsprechende Seitenlasten $s = 1,72$ MPa gewählt werden.

5.1.3. Vergleich der Ergebnisse

Vergleich der Ergebnisse in N/mm²

1	2		3		4		5			
Verfahren	Ohne Seitenlast		Mit Seitenlast nach Norm		Mit erhöhter Seitenlast		Unterschied 2 = 3 x		Unterschied 2 = 4 x	
B	1,02	0,66								
A, Typ I			0,57	0,40	0,87	0,70	1,8	1,65	1,17	0,94

Nach *Lohaus* haben die seinerzeit durchgeführten Untersuchungen ergeben, dass die Haftscherfestigkeiten nach Verfahren A etwa 10% höhere Werte liefern als sie sich nach Verfahren B ergeben. Die hier erhaltenen Ergebnisse sind demgegenüber widersprüchlich.

5.1.4. Versuchsreihe 30.05.2018

Material: Ziegel, Normalformat, Dünnbettmörtel, Dreisteinkörper
 Herstellung/Lagerung: Raumklima
 Verfahren: EN 1052-3:2002 [2], Verfahren B ohne Seitenlast 10.2 jedoch vereinfachte Lasteinleitung ohne Rollenlager
 Auswertung: vereinfachtes Verfahren 10.2.2.
 Belastungsgeschwindigkeit: 350 N/s



Bild 78 Prüfkörper mit 3 x NF nach dem Bruch

Die Lagerung der Prüfkörper erfolgte ohne Rollen, weil sich hierbei eine bessere Spannungsverteilung ergibt, als bei der Rollenlagerung (s. FEM-Berechnung).

σ	F	f_v	
N/mm ²	kN	N/mm ²	
0	33,9	0,61	ZI-DM-oSB-V1
0	29,0	0,53	ZI-DM-oSB-V2
0	59,7	1,08	ZI-DM-oSB-V3
	40,9	0,74	Durchschnitt
		0,59	0,8*Durchschnitt
		0,53	Minimum

Tabelle 7 Prüfergebnisse Ziegel Dünnbettmörtel

Es ergibt sich ein Mittelwert für die Haftscherfestigkeit von $f_{v,om} = 0,74$ MPa sowie eine charakteristische Haftscherfestigkeit $f_{v,ok} = 0,53$ MPa.

Ein Vergleich mit *Schubert* und *Lohaus* ist nicht möglich, da Vollziegel und Dünnbettmörtel dort nicht untersucht worden sind.

5.1.5. Versuchsreihe 21.08.2018

Material:	Kalksandstein, 2DF, Dünnbettmörtel, Dreisteinkörper
Herstellung/Lagerung	Raumklima
Verfahren:	EN 1052-3:2002 [2], Verfahren A mit Seitenlast 8.2.1. keine Kraftregelung der Seitenlast ; Vorlaststufen 2,5 – 3,0 – 3,5 MPa
Auswertung:	Verfahren A 10.1.
Belastungsgeschwindigkeit:	350 N/s

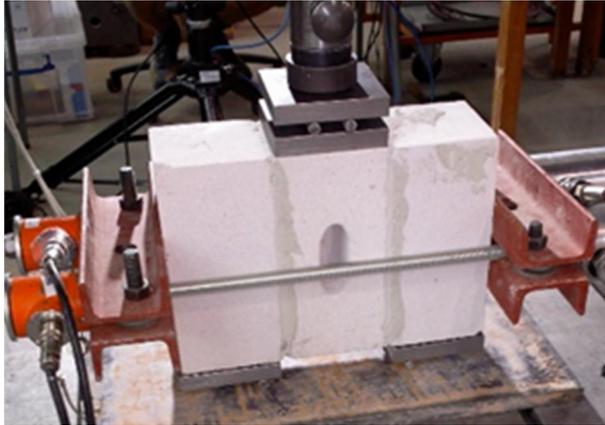


Bild 79 Prüfkörper aus 2DF KS in der Prüfeinrichtung

Die Lagerung der Prüfkörper erfolgte auf Rollen gem. Vorgabe der Norm.

Versuch mit Seitenlasten Serie 1					
Nr	Benennung	F	f_{voi}	σ	$S_{Derf.}^{*)}$
		KN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1		99,362	1,80	2,50	1,44
2		116,599	2,11	3,00	1,69
3		136,115	2,47	3,50	1,98
Versuch mit Seitenlasten Serie 2					
Nr	Benennung	F	f_{voi}	σ	$S_{Derf.}^{*)}$
		KN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1		100,609	1,82	2,50	1,46
2		120,610	2,18	3,00	1,74
3		134,455	2,44	3,50	1,95
Versuch mit Seitenlasten Serie 3					
Nr	Benennung	F	f_{voi}	σ	$S_{Derf.}^{*)}$
		KN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1		97,302	1,76	2,50	1,41
2		116,414	2,11	3,00	1,69
3		132,899	2,41	3,50	1,93
Durchschnitt					
Nr	Benennung	F	f_{voi}	σ	$S_{Derf.}^{*)}$
		KN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1		99,091	1,80	2,50	1,44
2		117,874	2,14	3,00	1,71
3		134,490	2,44	3,50	1,95

*) erforderliche Überdrückung in der Fuge mit den Ergebnissen nach FEM (Bild 22)

Tabelle 8 Ergebnisse der drei Versuchsserien mit je drei Seitenlaststufen 2,5-3,0-3,5 MPa Dreisteinkörper 2DF mit Seitenlast

Die Seitenlast blieb in allen Versuchen über die Versuchsdauer konstant. Wie die rechte Spalte in Tabelle 8 zeigt, waren die Querschnitte stets überdrückt und es traten keine Biegespannungen auf.

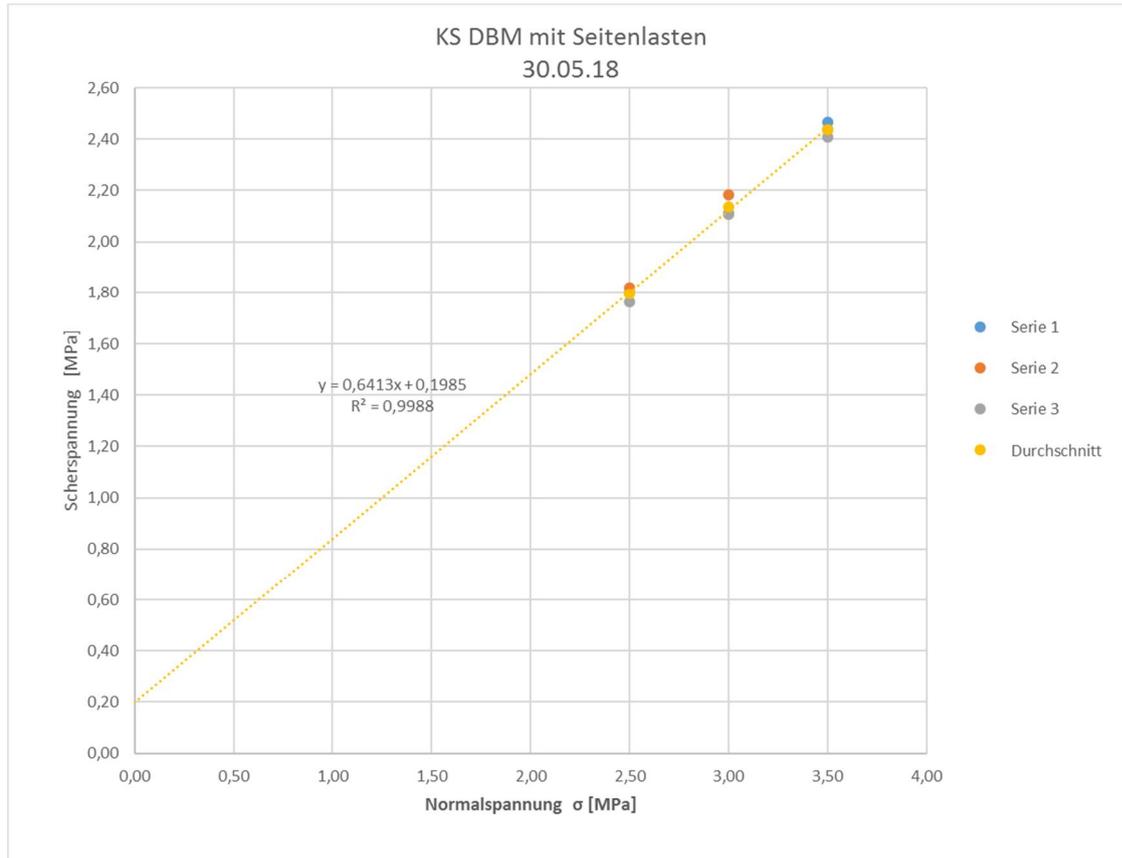


Tabelle 9 Auswertung der erhöhten Seitenlaststufen 2,5-3,0-3,5 MPa

Mit erhöhten Anfangsseitenlaststufen 2,5 – 3,0 – 3,5 MPa ergibt sich eine mittlere Haftscherfestigkeit $f_{v0}=0,20$ MPa und ein Winkel von $\alpha_k = 32,7^\circ$ und $\tan \alpha_k = 0,64$.

Die charakteristische Haftscherfestigkeit beträgt $f_{vok}=0,16$ MPa, der charakteristische Winkel $\alpha_k=27,2^\circ$ und $\tan \alpha_k=27,2^\circ = 0,51$.

5.1.6. Versuchsreihe 22.08.2018

Material:	Kalksandstein, 2DF, Dünnbettmörtel, Dreisteinkörper
Herstellung/Lagerung:	Raumklima
Verfahren:	Ries in Anlehnung an Verfahren B der DIN EN 1002-3, beidseitig auf äußeren Steinen geklebte Stahlbleche (Sikadur 30 normal)
Auswertung:	vereinfachtes Verfahren 10.2.2.
Belastungsgeschwindigkeit:	350 N/s



Bild 80 Herstellung Dreisteinkörper mit auf den äußeren Steinen geklebten Stahlblechen

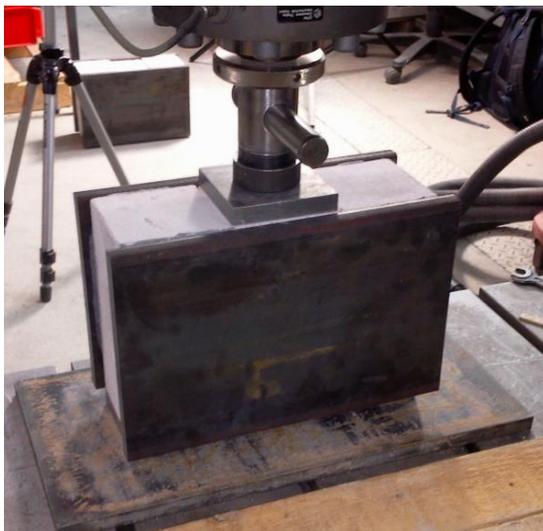


Bild 81 Dreisteinkörper mit auf den äußeren Steinen geklebten Stahlblechen, vereinfachte Lasteinleitung ohne Rolle ; rechts: Abscheren des mittleren Steines, die Klebefuge ist unversehrt

					fvo	fvo _k	fvo _k		fvo _k
					f _{voi}	mittel	80%	min	
	F		2*A						
	[N]		[mm ²]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
V1	54200		55200		0,98	1,12	0,90	0,98	0,90
V2	63100		55200		1,14				
V3	59100		55200		1,07				
V4	71000		55200		1,29				
V5	63100		55200		1,14				
V6	62000		55200		1,12				

Tabelle 10 Ergebnisse der Prüfung Dreisteinkörper mit aufgeklebten Stahlplatten am 22.08.18

Es ergibt sich eine mittlere Haftscherfestigkeit $f_{vo}=1,12$ MPa und eine charakteristische Haftscherfestigkeit $f_{vo,k}=0,90$ MPa.

5.1.7. Versuchsreihe 30.08.2018

Material: Kalksandstein, 2DF, Dünnbettmörtel, Dreisteinkörper
Herstellung/Lagerung: Raumklima
Verfahren: EN 1052-3:2002 [2], Verfahren A mit Seitenlast 8.2.1. keine Kraftregelung der Seitenlast ; Vorlaststufen 1,3 – 1,7 – 2,1 MPa
Auswertung: Verfahren A 10.1.
Belastungsgeschwindigkeit: 350 N/s

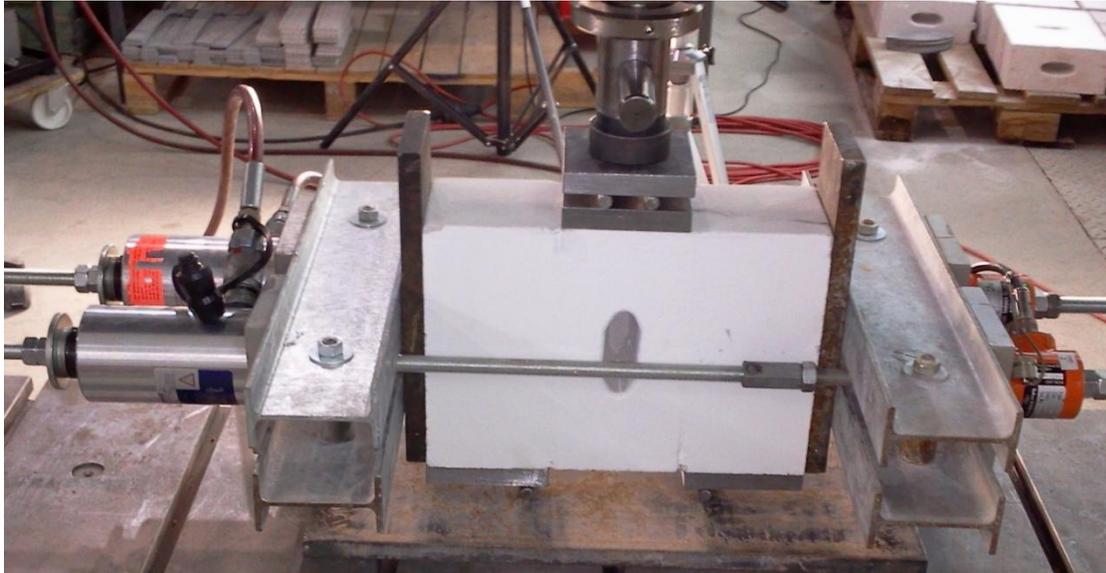


Bild 82 Dreisteinkörper 2DF mit Seitenlast



Bild 83 Dreisteinkörper 2DF mit Seitenlast, Abscheren mittlerer Stein

Versuch mit Seitenlasten Serie 1					
Nr	Benennung	F	f_{voi}	σ	$s_{Def.}^{*})$
		KN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1		103,000	1,87	2,10	1,50
2		78,800	1,43	1,70	1,36
3		64,200	1,16	1,30	0,93
Versuch mit Seitenlasten Serie 2					
Nr	Benennung	F	f_{voi}	σ	$s_{Def.}^{*})$
		KN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1		105,000	1,90	2,10	1,52
2		89,200	1,62	1,70	1,30
3		67,800	1,23	1,30	0,98
Versuch mit Seitenlasten Serie 3					
Nr	Benennung	F	f_{voi}	σ	$s_{Def.}^{*})$
		KN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1		105,000	1,90	2,10	1,68
2		86,800	1,57	1,70	1,26
3		67,800	1,23	1,30	0,98
Durchschnitt					
Nr	Benennung	F	f_{voi}	σ	
		KN	N/mm ²	N/mm ²	
1		104,333	1,89	2,10	
2		84,933	1,54	1,70	
3		66,600	1,21	1,30	

*) erforderliche Überdrückung in der Fuge mit den Ergebnissen nach FEM (Bild 22)

Tabelle 11 Ergebnisse der drei Versuchsserien mit je drei Seitenlaststufen 1,3-1,7-2,1 MPa

Die Seitenlast blieb in allen Versuchen über die Versuchsdauer konstant.
 Die Querschnitte waren jeweils überdrückt.

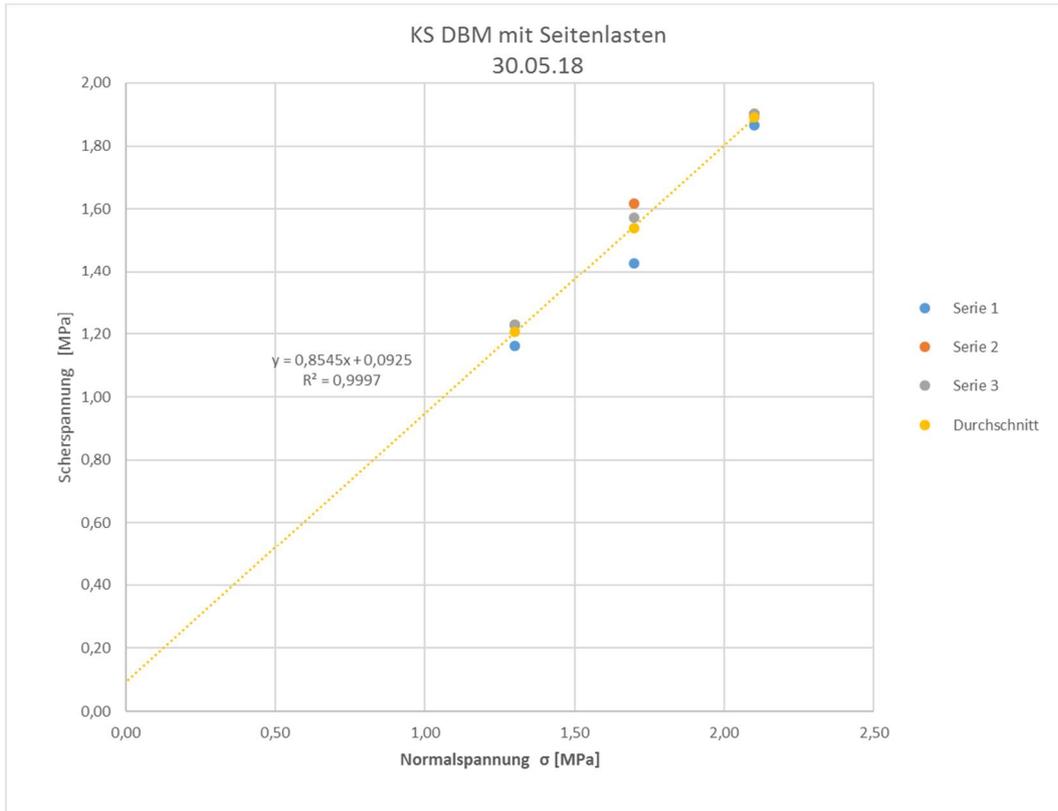


Bild 84 Auswertung der erhöhten Seitenlaststufen 1,3-1,7-2,1 MPa

Mit erhöhten Anfangsseitenlaststufen 1,3 – 1,7 – 2,1 MPa ergibt sich eine mittlere Haftscherfestigkeit $f_{v0}=0,09$ MPa und ein Winkel von $\alpha=40,5^\circ$ mit $\tan \alpha= 0,85$.

Die charakteristische Haftscherfestigkeit beträgt $f_{v0k}=0,07$ MPa, der charakteristische Winkel $\alpha_k=34,3^\circ$ mit $\tan \alpha= 0,68$.

Während der Versuchsdurchführung traten Steinschädigungen auf, sodass die Serie im Sinne der Forschungshypothese nicht verwertbar ist.

5.1.8. Versuchsreihe 04.09.2018

Material:	Ziegel, 2DF, Dünnbettmörtel, Dreisteinkörper
Herstellung/Lagerung	Raumklima
Verfahren:	EN 1052-3:2002 [2], Verfahren A mit Seitenlast 8.2.1. Kraftregelung der Seitenlast über manuell betätigte Ventile je nur ein Dreisteinkörper pro Laststufe Vorlaststufen 0,2 – 0,4 – 0,6 – 0,8 – 1,0 – 1,2 – 1,4 – 1,6 – 1,8 – 2,0 – 2,25 – 2,5 – 3,0 – 3,5 MPa
Belastungsgeschwindigkeit:	367 N/s

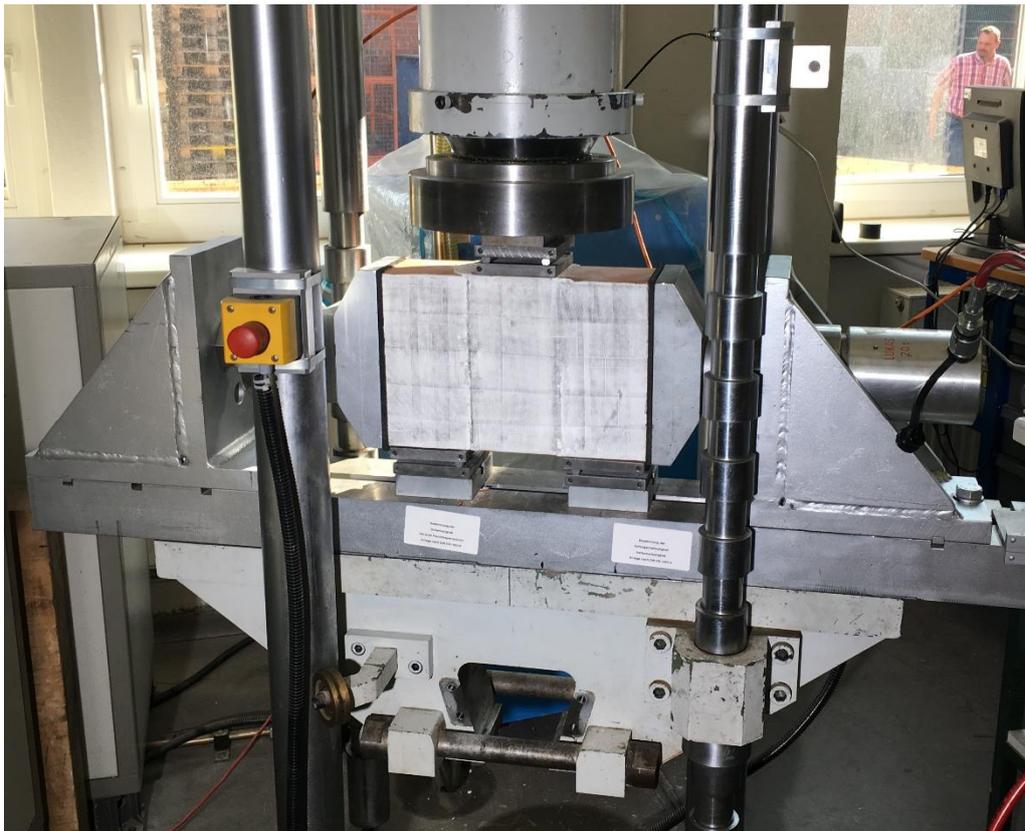


Bild 85 Dreisteinkörper 2DF mit Seitenlast

Zur Erfassung über ein breites Spektrum der Seitenlast wurden an der Universität Hannover 13 Einzelversuche mit 13 verschiedenen Seitenlasten mit jeweils geringem Abstand (D_s) durchgeführt.

Nr	σ N/mm ²	F _{Seite} kN	F kN	f _v N/mm ²	Benennung Überdrückt	kN/min	Bemerkung
1	0,2	5,52	43,4	0,79	ZI-0.2 Nein	22,0	
2	0,4	11,04	53,0	0,96	ZI-0.4 Nein	22,0	
3	0,6	16,56	62,1	1,13	ZI-0.6 Nein	22,0	
4	0,8	22,08	73,4	1,33	ZI-0.8 Nein	22,0	
5	1,0	27,60	78,8	1,43	ZI-1.0 Nein	22,0	
6	1,2	33,12	84,1	1,52	ZI-1.2 Etwa	22,0	Riss im Ziegel
7	1,4	38,64	82,4	1,49	ZI-1.4 Ja	22,0	Riss im Ziegel
8/15	1,6	44,16	113,9	2,06	ZI-1.6 Ja	22,0	2 Versuche (115,8 ; 112,0)
9	1,8	49,68	109,3	1,98	ZI-1.8 Ja	22,0	Riss im Ziegel
10/16	2,0	55,20	122,8	2,22	ZI-2.0 Ja	22,0	2 versuche (126,7 ; 118,8)
14	2,25	62,10	123,3	2,23	ZI-2.25 Ja	22,0	Riss im Ziegel
11	2,5	69,00	129,2	2,34	ZI-2.5 Ja	22,0	Riss im Ziegel
12	3,0	82,80	152,0	2,75	ZI-3.0 Ja	22,0	Riss im Ziegel
13	3,5	96,60	171,4	3,11	ZI-3.5 Ja	22,0	Riss im Ziegel

Tabelle 12 Ergebnisse der Versuche mit 13 Seitenlaststufen 0,2 bis 3,5 MPa

Es wurden die 3 Vorlaststufen nach Norm, die ersten 8 und die letzten 6 Vorlaststufen separat ausgewertet. Die Trennung bei 1,6 MPa zwischen grauer und blauer Kurve hat ihre Begründung mit der Versuchsserie vom 30.05.18 ; ab der Vorlaststufe von ca. 1,7 MPa hatte sich eine über die Versuchsdauer konstante Seitenlast gezeigt; dies bedeutet, es findet dann keine horizontale Verformung mehr statt bzw. der Einfluss aus Biegung im Dreisteinkörper wurde durch die Seitenlast eliminiert.

Die Auswertung der drei Normseitenlaststufen ergibt einen $f_{v0} = 0,63$ MPa ; eine Auswertung aller Laststufen der grauen Kurve bis 1,6 MPa ergibt einen $f_{v0} = 0,65$ MPa.

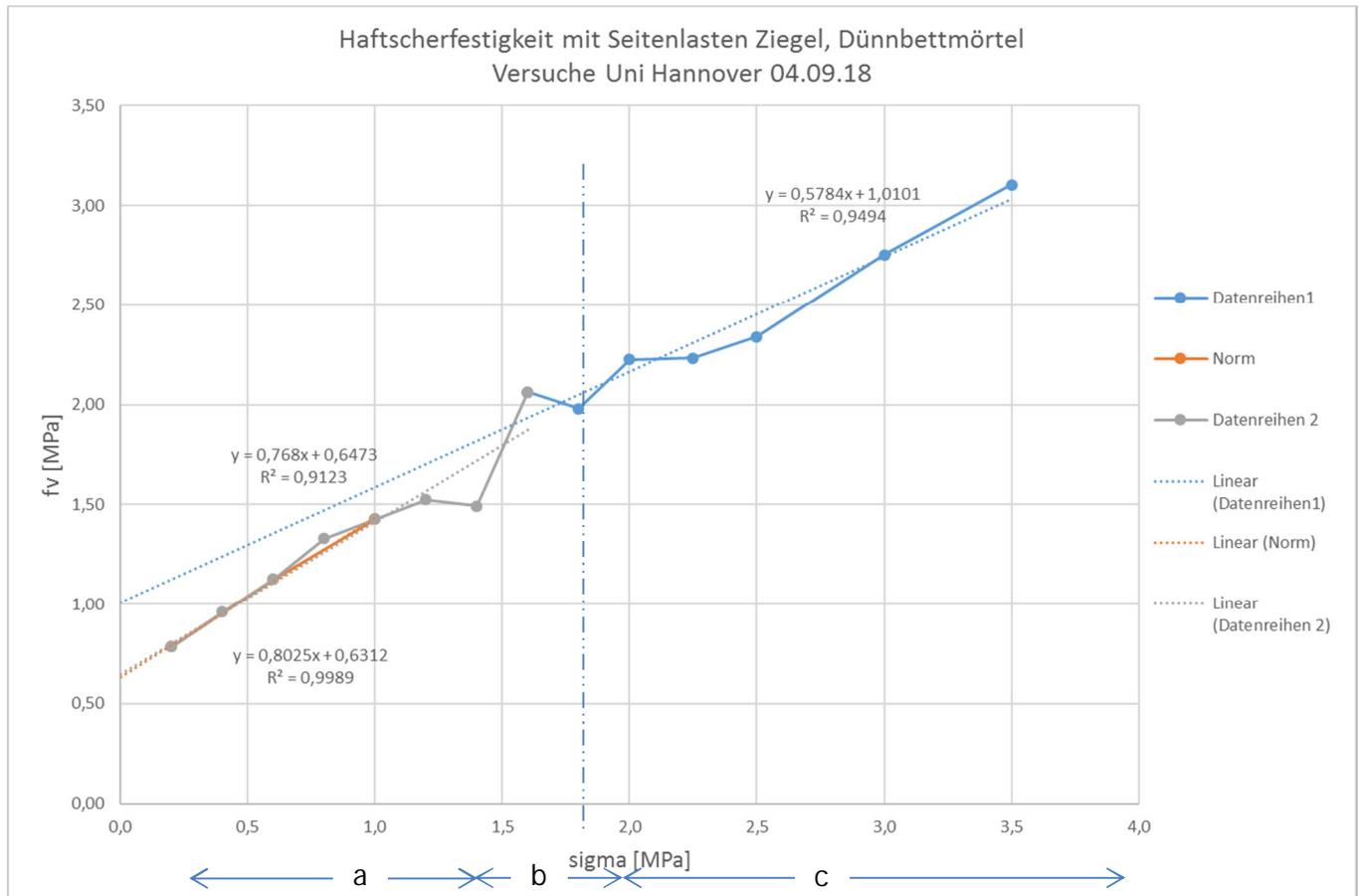


Bild 86 Auswertung der Seitenlaststufen separat für den roten (Norm), grauen (Einfluss Biegung) und blauen (überdrückt er) Bereich. Die Strich-Punkt-Linie gibt die Grenze zwischen dem nicht überdrückten und dem überdrückten Bereich an

Die Auswertung der zweiten Kurvenhälfte ab 1,6 MPa (blau) ergibt einen $f_{v0} = 1,0$ MPa. Dieser Wert liegt sehr nahe bei der Versuchsreihe vom 22.08. (geklebte Stahlbleche 1,12 MPa).

Diskussion des Kurvenverlaufes

Bereich a)

Hier treten Biegezugspannungen auf. Theoretisch nimmt man an, dass der Querschnitt gerissen ist, was er aber hier noch nicht oder noch nicht über die halbe Querschnittshöhe ist. Solange der Querschnitt nicht gerissen ist, weil die Haftzugfestigkeit noch wirkt, können sich u.E. Haftscherspannungen ausbilden, wobei hierzu keine gesicherten Erkenntnisse vorliegen. Das erklärt jedoch die unterschiedliche Neigung z.B. gegenüber dem KS-Prüfkörper, der eine vollkommen glatte Oberfläche aufweist.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Biegezugspannungen den Seitenlastspannungen gegenüber gestellt.

Nr	σ	FSeite	F	Biegezugspannung		ft0	gerissen von h [mm]	
				Handr.	FEM		Handr.	FEM
0	N/mm ²	kN	kN			N/mm ²	Handr.	FEM
1	0,2	5,52	43,36	0,61	0,41	0,19	82,55	64,06
2	0,4	11,04	53	0,74	0,50	0,19	89,36	74,24
3	0,6	16,56	62,1	0,87	0,58	0,19	93,85	80,94
4	0,8	22,08	73,4	1,03	0,69	0,19	97,88	86,95
5	1	27,6	78,8	1,11	0,74	0,19	99,39	89,22
6	1,2	33,12	84,1	1,18	0,79	0,19	100,69	91,16
7	1,4	38,64	82,4	1,16	0,77	0,19	100,29	90,56
8/15	1,6	44,16	113,9	1,60	1,07	0,19	105,74	98,70
9	1,8	49,68	109,3	1,53	1,03	0,19	105,14	97,81
10/16	2	55,2	122,8	1,72	1,15	0,19	106,78	100,25
14	2,25	62,1	123,3	1,73	1,16	0,19	106,83	100,33
11	2,5	69	129,2	1,81	1,21	0,19	107,43	101,23
12	3	82,8	152	2,13	1,43	0,19	109,32	104,04
13	3,5	96,6	171,4	2,41	1,61	0,19	110,53	105,85
	ls=	0,24	b=	0,115				
	la=	0,031	m	Abstand der Rollenlager=			ls/15	

Tabelle 13 Weitere Auswertung der Versuchsdaten (Haftzugfestigkeit gem. [7])

Bei der Handrechnung wurde die tatsächliche Lage der Rollen an den Fußpunkten für die Momentenberechnung genutzt. Dabei wurde eine geringfügige Lastausbreitung im Stein berücksichtigt.

Die Haftzugfestigkeit wurde [7], Tab. 8 entnommen, jedoch nicht gemessen. Dabei ist zu beachten, dass die dort angegebenen Werte für Hochlochziegel gelten und mit dem sog. Bond-Wrench-Test ermittelt worden sind. Eine gesicherte Korrelation zu den in Europa üblichen Prüfverfahren existiert nicht. Es soll damit gezeigt werden, solange Biegezugsspannungen auftreten und diese nicht durch die Haftzugfestigkeit gedeckt werden können, eine andere Neigung der Geraden als in den weiter folgenden Bereichen herauskommen muss. Je nachdem, wie groß die Haftzugfestigkeit ist, umso mehr schmiegt sich die Gerade an die obere Tangente an.

Bereich b)

Hier handelt es sich um den Übergang von gerissenem zu ungerissenem Zustand, bevor eine vollständige Überdrückung eintritt und die Ergebnisse für die Ermittlung der Haftscherfestigkeit genutzt werden können.

Bereich c)

Hier ist eine vollständige Überdrückung erreicht worden. Allerdings kommt man hier bereits in Bereiche, wo die Spaltzugfestigkeit der Steine oder deren Druckfestigkeit anspringt. Hinzu kommt, dass es sich um einen biaxialen Spannungszustand handelt, der für den Mörtel durch einige Besonderheiten gekennzeichnet ist (vgl. [16]).

5.1.9. Versuchsreihe 07.11.2018

Material: Ziegel, 2DF, M20, Dreisteinkörper mit seitlich aufgeklebten
Stahlplatten
Herstellung/Lagerung: Raumklima
Verfahren: EN 1052-3:2002 [2], Verfahren A mit Stahlplatten.
Belastungsgeschwindigkeit: $V_0=10$ mm/min; $V_1= 20$ kN/min
s. [19]



Bild 87 Prüfkörper mit aufgeklebten Stahllaschen



Bild 88 Prüfkörper mit aufgeklebten Stahllaschen - Bruch

Nr	F	f_v					
	kN	N/mm ²					
1	60,42	1,09		Bemerkungen:			
2	54,31	0,98		0,15 N/mm ² Standardabweichung			
3	49,91	0,90		13,5% Variation			
4	59,91	1,09					
5	70,09	1,27					
6	70,14	1,27					
	60,80	1,10	N/mm ²				
	0,8*f _v	0,88	N/mm ²				

Tabelle 14 Ergebnisse der Prüfung mit Stahlplatten – Vollziegel, NM M20

Die Auswertung ergibt einen Wert für $f_{v0} = 1,10$ MPa. Dieser Wert liegt sehr nahe bei der Versuchsreihe vom 04.09.18 (Seitenlast, Auswertung der oberen Seitenlaststufen bei Überdrückung 1,00 MPa), wengleich dort Dünnbettmörtel verwendet worden ist. Der Variationskoeffizient ist bei dieser Serie bemerkenswert gering.

5.2. Zusammenfassung der Versuchsreihen

Versuchsreihe	Datum	06.03.	30.05.	30.05.	30.05.	21.08.	22.08.	30.08.	04.09.	04.09.	04.09.	07.11.
Material		KS DBM	KS DBM	KS DBM	Zi DBM	KS DBM	KS DBM	KS DBM	Zi DBM	Zi DBM	Zi DBM	Zi NM IIIa
Format		NF	NF	NF	NF	2DF	2DF	2DF	2DF	2DF	2DF	2 DF
Seitenlast	[MPa]	-	0,2-0,6-1,0	0,6-1,0-1,4	-	2,5-3,0-3,5	- beidseitig geklebte Stahlbleche	1,3-1,7-2,1	0,2-0,6-1,0	0,2-0,4-0,6-0,8- 1,0-1,2-1,4-1,6	1,8-2,0-2,25-2,5- 3,0-3,5	- beidseitig geklebte Stahlbleche
fvo	[MPa]	1,02	0,57	0,87	0,74	0,20	1,12	0,09	0,63	0,65	1,00	1,1
fvok	[MPa]	0,66	0,46	0,70	0,53	0,16	0,90	0,07	0,50	0,52	0,80	0,88
Abweichungen	KS DBM		69,7%									
	KS DBM					136,4%						
	KS DBM					196%						
	Zi DBM								150,9%			

Tabelle 15 Übersicht über die durchgeführten 10 Versuchsreihen sowie eine ergänzende Serie [19]

Hier kann man erkennen, dass die Versuchsreihe vom 04.09. mit den Seitenlaststufen ab 1,8 MPa und die Versuchsreihe vom 22.08. mit den beidseitig geklebten Stahlblechen sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Die Versuchsreihe vom 04.09. mit Seitenlaststufen < 1,8 MPa lieferte aufgrund des Einflusses der Biegebeanspruchung wesentlich niedrigere Haftscherfestigkeiten, hier war der Querschnitt noch nicht ausreichend „überdrückt“. Um einen korrekten Wert der Haftscherfestigkeit extrapolieren zu können, muss eine ausreichende Anzahl an Seitenlaststufen geprüft werden (siehe blaue Kurve). Die Auswertungen, in denen mit nur drei Seitenlaststufen belastet wurde, zeigen sehr starke Schwankungen im Bereich 0,07-0,70 MPa. Dies resultiert aus den stark unterschiedlichen Steigungen dieser Kurvenbereiche. Durch die Wahl eines größeren Auswertebereichs der Seitenlaststufen werden diese Steigungsunterschiede gemittelt, der Schnittpunkt der extrapolierten Gerade mit der vertikalen Achse nähert sich der physikalisch vorhandenen Haftscherfestigkeit bzw. dem Wert des Versuchsaufbaus mit angeklebten Stahlblechen.

Die Prüfung mit geklebten Stahlblechen kann als Referenzwert für die Haftscherfestigkeit gesehen werden. Hier wird eine Verformung in horizontaler Richtung und somit eine Biegebeanspruchung durch die steife Verklebung der äußeren beiden Steine komplett verhindert. Es verbleibt hier nur noch eine Verformungsmöglichkeit des mittleren Steines in vertikaler Richtung, somit entsteht eine reine Scherbeanspruchung.

Aus den obigen Ergebnissen ist abzuleiten, dass die Prüfung mit aufgeklebten Stahlblechen und die Prüfung mit Seitenlaststufen ab 1,8 MPa für die Haftscherfestigkeit sehr ähnliche Ergebnisse liefern.

Ein weiterer Versuch vom 04.11.2018, durchgeführt in der MPA Hannover mit seitlich aufgeklebten Stahlplatten erbrachte analoge Ergebnisse, wenn man ansetzt, dass NM IIIa (M20 – deutscher Hersteller) und DBM annähernd gleiche Ergebnisse erbringen werden.

Zu bedenken ist auch, dass die hohen Seitenlaststufen nicht bei allen Materialien, z.B. Porenbeton, aufgebracht werden können; die Druckfestigkeit kommt hier zumindest an ihre Grenzen bzw. der große Steifigkeitsunterschied Fuge-Stein kann zum Steinversagen führen. Insofern ist es ausreichend, die Methode B modifiziert mit aufgeklebten Stahlblechen für die zukünftige Anwendung zu empfehlen.

Vor einer praktischen Einführung sollte noch eine statistische Absicherung durchgeführt werden, die den Rahmen des Forschungsvorhabens gesprengt hätte.

6. Resumee

Der bisherige Versuchsdurchführung der Haftscherfestigkeitsprüfung nach DIN EN 1052-3 hat den Nachteil, dass er durch den Versuchsaufbau Biegemomente unter Last hervorruft, die sich negativ auf den Spannungszustand während der Prüfung auswirken. Es ist schwierig, dieses Phänomen zu eliminieren und einen über den Prüfquerschnitt möglichst gleich verteilten Spannungszustand zu erzeugen (vgl. auch [17]).

Hinzu kommt der Effekt des Auseinanderrollens der Steine rechts und links, der zu einer weiteren Herabsetzung des Prüfergebisses führt. Der Prüfaufbau ist sehr anfällig, weshalb dann auch die Ergebnisse stark streuen.

Bei dem Verfahren A nach DIN EN 1052-3 ist die Höhe der ermittelten Haftscherfestigkeit von der Höhe der Seitenlaststufen abhängig. Dieses Verfahren wurde in Anlehnung an das aus der Geotechnik seinerzeit entwickelt (s. [18]). Diese Vorlaststufen dienen dem „Überdrücken“ der bei der Versuchsdurchführung entstehenden Biegezugbeanspruchung. Die Biegezugbeanspruchungen führen zum Reißen der zu prüfenden Fuge und verhindern das Ausbilden der Haftscherfestigkeit. Um eine extrapolierte Haftscherfestigkeit zu erhalten, welche der physikalischen möglichst nahe kommt, müssen ausreichend viele Vorlaststufen in einem ausreichend großen Normalspannungsbereich gewählt werden. Bei nur drei Vorlaststufen mit einem Abstand von jeweils 0,5 MPa wird es im überdrückten Bereich ($>1,7$ MPa) zu stark unterschiedlichen Steigungen der extrapolierten Geraden und somit zu starken Unterschieden zwischen den ermittelten Haftscherfestigkeiten kommen. Deshalb ist es eine Lösung, die Auflaststufen in Abhängigkeit von der zu erwartenden Prüflast zu bestimmen und nicht starr, wie in DIN EN 1052-3 festzulegen. Diese modifizierte Vorgehensweise in Anlehnung an Verfahren A ist für Steine mit mittlerer bis höherer Steifigkeit geeignet und wurde in dem durchgeführten Forschungsvorhaben zur Validierung des modifizierten Verfahrens B herangezogen.

Das Verfahren B nach DIN EN 1052-3 wurde dahingehend modifiziert, dass auf den Dreisteinkörper rechts und links jeweils eine 2 cm dicke Stahlplatte aufgeklebt wird. Der verwendete und dafür geeignete Kleber kann durch Erwärmen von der Stahlplatte einfach wieder gelöst werden, was eine einfache Praxiseinführung ermöglicht. Es ist kein prinzipiell neuer Versuchsaufbau notwendig. Durch die Steifigkeitsunterschiede zwischen Stahlplatten und Mauerwerksprüfkörper wird das Biegemoment in den Stahlplatten konzentriert und der Dreisteinkörper bleibt weitgehend von Biegeeinflüssen frei. Zudem ist die Schubspannungsverteilung über den Querschnitt gleichmäßiger, sodass ein realitätsnäherer Materialkennwert erreicht wird. Die Streuung der Ergebnisse kann damit wesentlich im Vergleich mit den anderen Verfahren verringert werden.

Sowohl die Variante mit aufgeklebten Stahlblechen als auch die Prüfung nach außer Kraft gesetzter DIN-Norm liefern größere Werte für die Haftscherfestigkeit im Vergleich zur gültigen europäischen Norm. Die aufgeklebten Stahlbleche verhindern die Verdrehung der beiden äußeren Steine des Dreisteinkörpers. Hierdurch kann eine Verformung des Prüfkörpers nur in Richtung der vertikalen Prüflast erfolgen; dies stellt die Grundlage für eine nahezu reine Scherbeanspruchung dar. Diese wurde in der außer Kraft gesetzten DIN 18555-5 durch die horizontalen Stellschrauben bzw. Anschläge erreicht.

Die Prüfung nach europäischer Norm liefert z.Z. zu kleine Haftscherfestigkeiten, weil die Beanspruchung senkrecht zur Scherfuge zu groß ist – was auch bei einer Prüfung mit Seitenlasten von 0,2-0,6-1,0 MPa der Fall ist. Diese ungewollte Querbeanspruchung der Fuge mindert die aufnehmbare Spannung der Scherfuge in vertikaler Prüfrichtung ab.

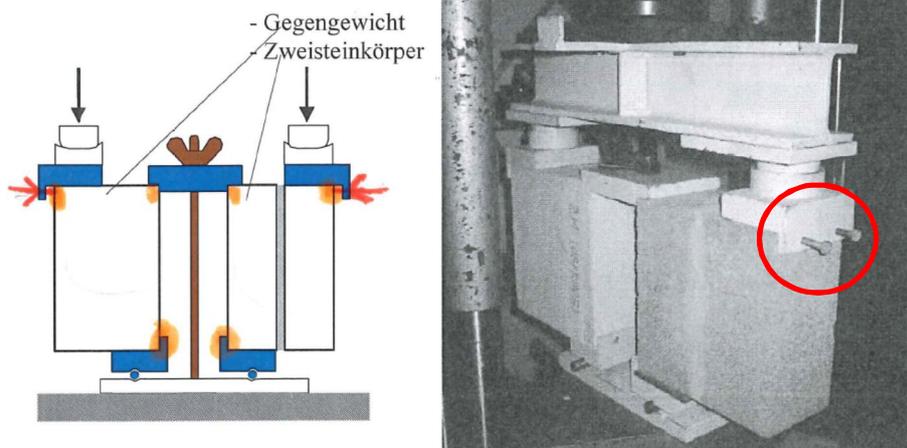


Bild 89 Versuchsaufbau nach DIN 18555-5 [2] mit Markierung der horizontalen Stellschrauben

Für die Ermittlung der Haftscherfestigkeit muss eine nahezu rein tangentielle Beanspruchung der Prüffläche erfolgen. Hierzu muss bei der Versuchsdurchführung eine Beanspruchung und Verformung senkrecht zur Prüffläche möglichst vollständig verhindert werden. Dies kann beim Dreisteinkörper durch eine ausreichend große Seitenvorlast (A) oder durch konstruktive Maßnahmen wie die aufgeklebten Stahlbleche (B) erfolgen.

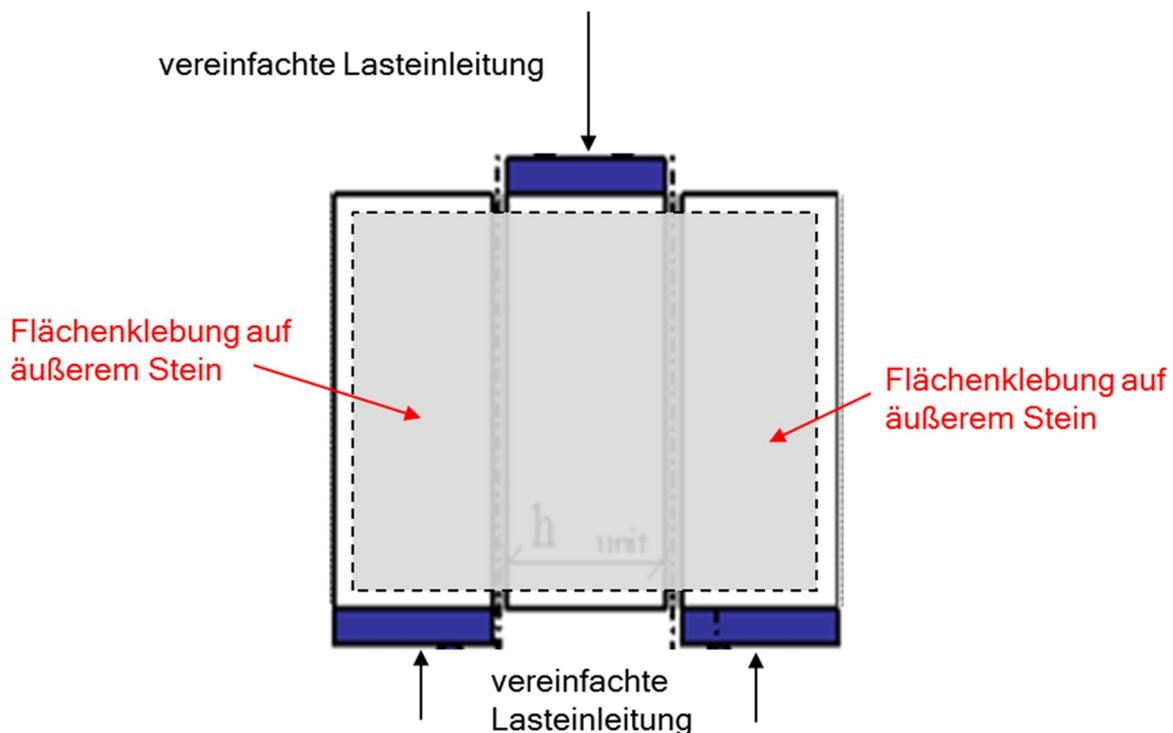


Bild 90 Versuchsaufbau mit beidseitig auf den äußeren Steinen geklebten Stahlblechen – vereinfachte Darstellung – Verfahren B

Die Klebefläche der Stahlbleche muss wiederum ausreichend groß sein; die vorab erstellte theoretische Berechnung hatte sich experimentell bei Verwendung des Steinformats 2DF bestätigt – die Klebeflächen konnten die auftretende Torsionsbeanspruchung aufnehmen.

Die Seitenvorlasten beim Verfahren A müssen im „überdrückten“ Bereich gewählt werden, um den Einfluss aus Biegung bzw. die Beanspruchung senkrecht zur Fuge zu eliminieren. Es ist eine ausreichende Anzahl und ein ausreichend großer Bereich der Seitenlaststufen im „überdrückten Bereich“ zu wählen; da diese Parameter das abschließend extrapolierte Ergebnis der Haftscherfestigkeit beeinflussen. Grenzen sind diesem Verfahren durch die Steifigkeit gesetzt.

7. Umgang mit den bisherigen Werten in der Norm EN 1996-1-1/NA

Eine Überprüfung der in der Norm DIN EN 1996-1-1/NA ([20], [21]) angegebenen Werte für die Haftscherfestigkeit in der Breite war nicht möglich, da bei der Umsetzung eines optimierten Versuchsaufbaus sich erheblich mehr Probleme ergeben hatten, als zu erwarten waren. Da das Verhältnis der Werte nach dem alten (DIN 18555-5 [2]) Verfahren und dem neuen Europäischen Verfahren (DIN EN 1052-3 [1]) in etwa bestätigt werden konnte, besteht in dieser Hinsicht kein akuter Handlungsbedarf, was die in der DIN EN 1996-1-1/NA enthaltenen Werte für die Haftscherfestigkeit betrifft.

Wie auch schon *Schubert* [6] und *Brameshuber* [8] gezeigt haben, sind die Werte für die einzelnen Stein-Mörtel-Kombinationen sehr unterschiedlich. Beim Ansatz davon unabhängiger ungünstigster Werte (KS-Referenzstein) werden Tragreserven verschenkt. Hier sollte in der Norm die Verwendung Stein-Mörtel-konkreter Werte zukünftig erlaubt werden.

8. Abschätzung der Auswirkungen

Das Forschungsvorhaben hatte zwei Zielstellungen:

- Klarstellung der Ursachen für die Unterschiede in den Prüfverfahren nach DIN 18555-5 und DIN EN 1052-3 und
- Bereitstellung eines modifizierten Verfahrens, das die Ursachen weitgehendst abstellt

Damit sollten wissenschaftliche Unsicherheiten in der Beurteilung des Schubtragverhaltens von Wandscheiben abgeklärt werden und für die Zukunft eine realistischere Ermittlung der Haftscherfestigkeit erreicht werden.

Da in der einschlägigen Norm zum Mauerwerksbau DIN EN 1996-1-1 unter Ansatz der Ergebnisse von *Schubert* und *Lohaus* auf dem alten Niveau belassen worden sind, müssen erst einmal keine bedeutenden Veränderungen veranlasst werden. Eher wird diese bei der Zulassung von neuen Produkten eine Rolle spielen und zu einer besseren Materialausnutzung führen, was als wesentliches Ergebnis des Forschungsvorhabens angesehen werden kann.

9. Praxisüberführung

Die Ergebnisse werden in dem nationalen und dem europäischen Normungsgremium vorgestellt werden, um dann in die Europäische Normung Eingang zu finden. Ein größer angelegter Ringversuch wird zur Überzeugung der CEN-Mitgliedsländer notwendig werden.

Die Ergebnisse werden im Mauerwerk-Kalender und in der Zeitschrift *European Masonry Journal* und den nächsten internationalen Mauerwerkskonferenzen vorgestellt werden

Die Deutsche Bauaufsicht ist über die Ergebnisse über Beteiligung des DIBt informiert.

Die Ergebnisse werden den Normungsgremien zur Verfügung gestellt, um eine Praxiseinführung in Angriff zu nehmen.

10. Literatur und Quellen

- [1] DIN EN 1052-3: 2002-10: Methods of test for masonry. Part 3: Determination of initial shear strength, Beuth Verlag, Berlin, 2007. Deutsche Version von EN 1052-3:2002.

- [2] DIN 18555-5: 1986-03: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln. Festmörtel. Bestimmung der Haftscherfestigkeit von Mauermörteln. Berlin: DIN e.V. 1986.
- [3] Lohaus, L.: Zusammenfassung: Prüfverfahren für Mauerwerk, Bestimmung der Haftscherfestigkeit. Institut für Baustoffe, Universität Hannover. 30.01.2009
- [4] Schubert, P.; Förster, Ch.; Schmidt, U.: : Vergleichsversuche Haftscherfestigkeit nach DIN EN 18555-5 und DIN EN 1052-3 (KS, Hlz). Forschungsbericht 786. Institut für Bauforschung Aachen, RWTH Aachen, 26.01.2000
- [5] Schubert, P.; Förster, Ch.: Haftscher-Vergleichsversuche an Porenbeton-Plansteinen mit Dünnbettmörtel. Forschungsbericht 789/1. Institut für Bauforschung Aachen, RWTH Aachen, 16.12.1999
- [6] Schubert, P.: Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen. In: Mauerwerk-Kalender 34 (2009). Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn: Berlin, S. 3-27
- [7] Schubert, P.; Brameshuber, W.: Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen. In: Mauerwerk-Kalender 36 (2011). Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn: Berlin, S. 3-32
- [8] Brameshuber, W.: Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen. In: Mauerwerk-Kalender 41 (2016). Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn: Berlin, S. 3-29
- [9] Glitza, H.; Jäger, W.; Burkert, T.: Zur Haftscherfestigkeit bei Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen. Mauerwerk 10 (2006) 3, S. 102–111
- [10] Jäger, W.; Montazerolghaem, M.: A comparative numerical evaluation of masonry initial shear test methods and modifications proposed for EN 1052-3. In: Proceedings of the 9th IMC Guimarães/Portugal, University of Minho, 7-9 July 2014. Eds. P. B. Lourenço, B. A. Haseltine and G. Vasconcelos. Abstract ID 1544, S. 455. Electronic supplement to the Book of Abstracts
- [11] SikaDur-30. Armierungskleber. Produktdatenblatt. Sika GmbH. www.sika.at Aufruf 23.06.2018
- [12] Jäger, W.; Bakeer, T.; Ries, J. et al: 1. Zwischenbericht. Dezember 2017. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung, Dresden 2017
- [13] Jäger, W.; Ries, J.: 2. Zwischenbericht. April 2018. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung, Dresden 2018
- [14] Jäger, W.; Ries, J.; Erler, M.: 3. Zwischenbericht. Juni 2018. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung, Dresden 2018
- [15] Schöps, P.: Tastrechnungen zum Prüfaufbau für das Forschungsprojekt OptiHaP: Erarbeitet im Auftrag des LS Tragwerksplanung der TU Dresden. Jäger Ingenieure GmbH Radebeul, Bericht, Juni bis September 2018
- [16] Schneemayer, A.; Schranz, C.: Tschegg, E.K. & Kolbitsch, A.: Ein- und zweiaxiales Bruchverhalten von Mauermörtel in Ziegelmauerwerk. Mauerwerk 18 (2014) H. 2, S. 90 - 97
- [17] Wawrziniok, O.: Handbuch des Materialprüfungswesens für Maschinen- und Bauingenieure. Julius Springer: Berlin 1908
- [18] Katzenbach, R.: Studienunterlagen Geotechnik. XV Labor- und Feldversuche. Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt. Ohne Datum. http://www.geotechnik.tu-darmstadt.de/media/institut_und_versuchsanstalt_fuer_geotechnik/studiumundlehre_1/must_erloesungen/umweltgeotechnik_3/15_-_Labor_und_Feldversuche_12-05-02.pdf. Aufruf 28.03.2018

- [19] Jäger, W., Erler, M.: Auswertung einer Versuchsserie mit aufgeklebten Stahlplatten und Prüfkörpern aus Mauerziegeln und Normalmörtel M20 hergestellt. Unveröffentlichtes Manuskript. Lehrstuhl Tragwerksplanung der TU Dresden, November 2018
- [20] DIN EN 1996-1-1:2013-02: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk; Deutsche Fassung EN 1996-1-1:2005+A1:2012. NABau im DIN, Berlin 2013
- [21] DIN EN 1996-1-1/NA:2012-05: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. NABau im DIN, Berlin 2012