

**Erarbeitung von material-
spezifischen Widerstandskenn-
werten für die
Verbundfugenbemessung von
Stahlfaserspritzbetonergänzungen
im Hinblick auf das nationale
Anwendungsdokument zu
DIN EN 14487 und DIN EN 14488**

T 3364

T 3364

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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.

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

2019

ISBN 978-3-7388-0281-8

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



Technische Universität München



Ingenieurfacultät
Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Massivbau

**Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Dipl.-Wirt. Ing.
Oliver Fischer**

Theresienstraße 90
Gebäude N6
80333 München
Germany

Tel +49.89.289.23039
Fax +49.89.289.23030

www.mb.bgu.tum.de
massivbau@tum.de

Schlussbericht

Erarbeitung von materialspezifischen Widerstandskennwerten für die Verbundfügenbemessung von Stahlfaserspritzbetonergänzungen im Hinblick auf das nationale Anwendungsdokument zu DIN EN 14487 und DIN EN 14488

Datum: September 2017

Bearbeitung: Oliver Fischer, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing.
Roland Niedermeier, PD Dr.-Ing. habil.
Sebastian Schmidt, Dipl.-Ing. (FH) M.Sc.

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)
Kolonnenstraße 30 B
10829 Berlin
Germany

Geschäftszeichen: P 52-5- 7.316-1481/15

Dieser Schlussbericht umfasst insgesamt 98 Seiten, inkl. 37 Seiten Anhang.

Danksagung

Die Durchführung der, durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) finanziell geförderten, Forschungsarbeit wurde durch die folgenden Partner dankenswerterweise unterstützt:

- **Förderverein Massivbau der TU München e.V.**
- **Bekaert Maccaferri Underground Solutions**
- **Scholz Farbpigmente**

Erarbeitung von materialspezifischen Widerstandskennwerten für die Verbundfugembemessung von Stahlfaserspritzbetoneergänzungen im Hinblick auf das nationale Anwendungsdokument zu DIN EN 14487 und DIN EN 14488

Im Rahmen der Forschungsarbeit wird die Tragfähigkeit der Verbundfuge von unbewehrten Stahlfaserspritzbetoneergänzungen experimentell sowie numerisch untersucht. Die Bewertung der Schubfestigkeit der unbewehrten Verbundfuge erfolgt durch kleinformatige Probekörper ohne Fugennormalspannung und mit Fugennormalspannung. Dabei wird der Einfluss der Oberflächenvorbehandlung, des Betonuntergrundes und des Fasergehaltes bei verschiedenen Rautiefen unter Verwendung von verschiedenen, praxisüblichen Spritzbetonmischungen untersucht. Des Weiteren werden die zwangsspannungsinduzierenden Schwindverformungen für unterschiedliche Spritzbetonmischungen ermittelt. Die statistische Auswertung der durchgeführten Kleinkörperversuche ohne Fugennormalspannung zeigt, dass bei der verwendeten Fasergeometrie mit den Bemessungsansätzen der Adhäsionstragfähigkeit nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) für Bauteile, die nachträglich mit Spritzbeton bzw. unbewehrten Stahlfaserspritzbeton ergänzt werden, unter sorgfältiger Nachbehandlung ein ausreichendes Sicherheitsniveau für Fugen der Rauheitskategorie rau, verzahnt und spritzrau erreicht wird.

Elaboration of material-specific coefficients of resistivity for the assessment of interfaces of steel fibre shotcrete supplements in accordance with National Application Standards concerning DIN EN 14487 and DIN EN 14488

As part of the research project, experimental and numerical investigations will be conducted, on the load bearing characteristics of the connection of non-reinforced steel fibre sprayed concrete supplements. The assessment of the shear strength of the non-reinforced interface is performed on small format specimens without and with normal residual stress of the interfaces. This will include the investigation of the influence of the surface pretreatment methods, of the concrete base and of the fibre content for different depths of roughness by the use of different typical sprayed concrete mixtures. In addition, it will be determined what will be the restraint induced shrinkage deformation for different types of sprayed concrete. A statistical evaluation based on small format specimens without normal stress on the interface shows, following the used steel fibre geometry meeting the design regulations of the bonding load capacity in accordance with (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in combination with (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04), that a sufficient level of safety can be achieved for building structures subsequently supplemented by sprayed concrete or non-reinforced steel fibre sprayed concrete, provided that careful curing of the interfacing surfaces is guaranteed. This applies to interfaces with roughness categories of rough, indented or gun-finished.

Élaboration des paramètres caractéristiques de résistance spécifique des matériaux pour le dimensionnement des joints d'adhérence des ajouts de bétons projetés fibrés conformément aux annexes nationales des normes DIN EN 14487 et DIN EN 14488

Dans le cadre des travaux de cette recherche, la résistance des joints d'adhérence des ajouts non armés de bétons projetés fibrés est étudiée expérimentalement et numériquement. L'évaluation de la résistance au cisaillement des joints d'adhérence non armés est réalisée sur des éprouvettes de petites dimensions avec ou sans contrainte normale des joints. L'influence de la préparation de la surface, du support en béton et de la teneur en fibres pour des différentes rugosités des différents mélanges de béton projetés usuels, est étudiée. En outre, des retraits induits par contrainte de différents mélanges du béton projeté sont identifiés. L'évaluation statistique des essais réalisés sur éprouvettes de petites dimensions, sans contraintes normales, démontre que, suivant la géométrie des fibres utilisées, basé sur des approches de dimensionnement de la résistance à l'adhésion suivant (DIN EN 1992-1-1:2011-01) en combinaison avec (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) pour des structures, renforcées ultérieurement par béton projetés ou béton projeté fibré, en combinaison avec un post-traitement minutieux, un niveau de sécurité satisfaisant des joints à catégories de rugosité, rugueuse, indentée et rugosité après projection, est atteint.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Zielsetzung	2
2	Normative Regelungen	3
2.1	Nachweis des Verbundes	3
2.2	Konstruktive Regelungen	5
3	Experimentelle Untersuchungen	7
3.1	Versuchsprogramm zur Bestimmung der Verbundfestigkeit	7
3.2	Herstellung der Versuchskörper	8
3.3	Experimentelle Bestimmung des Schwindverhaltens	14
3.4	Zusammensetzung der verwendeten Betone	16
3.5	Betoneigenschaften	18
3.6	Oberflächenrauheiten	23
4	Numerische Untersuchungen	24
4.1	Inverse Analyse der Keilspaltzugversuche	24
5	Ergebnisse der Untersuchungen	28
5.1	Allgemeines	28
5.2	Einfluss der Oberflächenvorbehandlung	29
5.3	Einfluss des Betonuntergrundes	30
5.4	Einfluss des Fasergehaltes	33
5.5	Schwindverhalten von Spritzbeton	35
6	Überprüfung des Bemessungsansatzes	39
6.1	Allgemeines	39
6.2	Versuchstyp IV - Traganteil der Adhäsion	41
6.3	Versuchstyp IIc - Traganteil der Reibung	45
7	Zusammenfassung	48
	Bezeichnungen	49
	Literaturverzeichnis	53
	Anhang	61
A.1	Festbetoneigenschaften	62
A.2	Oberflächenrautiefe nach Kaufmann	67
A.3	Verbundfestigkeiten	80
A.4	Belastungsregime Keilspaltzugversuch	83
A.5	Schwindkurven	84

A.6	Umrechnung von Betonkenngrößen	95
A.6.1	Betondruckfestigkeit	95
A.6.2	Betonzugfestigkeit	97
A.6.3	Umrechnung von Festigkeitsgrößen	98

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Durch die europäischen Normen EN 14487 und EN 14488 ist mit dem nationalen Anwendungsdokument (DIN 18551:2010-02) die Anwendung und Prüfung von faserverstärktem Spritzbeton, der unter anderem zur Instandsetzung auf Spritzbeton oder auf Bauteile aus Beton aufgebracht wird, umfangreich geregelt. So werden in (DIN EN 14488-3:2006-09) Prüfverfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von faserverstärkten, balkenförmigen Spritzbetonprüfkörpern festgelegt. In (DIN EN 14488-5:2006-08) ist die Bestimmung der Energieabsorption bei faserverstärkten plattenförmigen Prüfkörpern geregelt. (DIN EN 14488-7:2006-08) beschreibt Prüfmethode zur Bestimmung des Fasergehaltes von faserverstärktem Spritzbeton. Des Weiteren ist in (EFNARC 1997) sowie in der von der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik herausgegebenen (ÖVBB Rili Spritzbeton 2009) die Anwendung, Herstellung und Prüfung von stahlfaserverstärktem Spritzbeton geregelt.

Nach Einführung von (DIN 18551:2014-08) verweist diese, soweit keine zusätzlichen Angaben gemacht werden, in Sachen Bemessung auf (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04). Durch die bauaufsichtliche Einführung von (DAfStb Rili Stahlfaserbeton 2012), welche als Ergänzung zu (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) zu verwenden ist, ist zwar der Baustoff Stahlfaserbeton geregelt, Stahlfaserspritzbeton ist davon jedoch explizit ausgenommen. Mit der Rücknahme von (DBV 2001 b) existieren in Deutschland keine gültigen Bemessungsregeln für Stahlfaserspritzbeton.

Die Anwendung von Stahlfasern zur Verbesserung der Nachrisseseigenschaften von Beton führte bereits in den 1940er Jahren in amerikanischen Forschungseinrichtungen zu ersten Untersuchungen. Ab Ende der 50er Jahre wurden auch in Deutschland erste Forschungsvorhaben dazu angestrengt. Seit dem Beginn der 70er wurden erste Versuche unternommen, Stahlfaserbeton als Spritzbeton aufzutragen. Die erste Phase, die Eigenschaften von stahlfaserverstärkten Spritzbeton zu erfassen, hielt bis in die Mitte der 80er Jahre an und führte bereits 1974 zur Gründung des DBV Arbeitskreises *Faserbeton*. Dieser veröffentlichte erstmalig 1977 das DBV Merkblatt *Stahlfaserspritzbeton* (DBV 1977), welches 1984 überarbeitet und als (DBV 1984) veröffentlicht wurde. Es beschrieb die durch die Zugabe von Stahlfasern veränderten Sachverhalte gegenüber dem in (DIN 18551:1979-07) geregelten, herkömmlichen Spritzbeton. Mit der Novellierung dieser Leitlinie als Merkblatt *Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfaserspritzbetons* (DBV 1992 b) wurden dem Anwender durch den DBV Arbeitskreis erstmalig Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserspritzbeton bereitgestellt. Das Merkblatt (DBV 1992 b) ist dabei als Ergänzung von (DIN 18551:1992-03) anzuwenden.

Da das quasi monolithische Zusammenwirken des bestehenden Bauteils mit der neu aufgetragenen Spritzbetonschicht eine wesentliche Grundlage für die Bemessung von mit Spritzbeton ergänzten Bauteilen bildet, wurden in (DBV 1992 a) auch Angaben zur Ermittlung der maximal über die Fuge übertragbaren Schubkraft angegeben. Der Traganteil der Adhäsion wird mit 30% der aufnehmbaren Scherkraft quantifiziert. Die vorgeschlagene Annahme der aufnehmbaren Scherkraft wird mit dem 0,6-fachen Wert der 10%-Quantile der Biegezugfestigkeit angegeben. Der in (DBV 1992 a) vorgeschlagene, ansetzbare Reibbeiwert von $\mu = 1,0$ bei spritzrauen Oberflächen überschreitet den in (DIN EN 1992-1-1:2011-01) angegebenen Reibbeiwert von $\mu = 0,9$ für verzahnte Fugen, die in ihrer Rautiefe nach Kaufmann in etwa mit spritzrauen Oberflächen vergleichbar sind.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, den Einfluss der Vorbereitung des Untergrundes und die Art des Untergrundes (Normalbeton, Spritzbeton) auf die Verbundfestigkeit zwischen Grund- und Ergänzungsbeton aus unbewehrtem Stahlfaserspritzbeton, sowie die Vergleichbarkeit mit Ortbeton- bzw. unbewehrten Spritzbetonergänzungen zu untersuchen. Die Verbundfestigkeiten werden durch Spaltzugversuche, Keilspaltzugversuche sowie Schub-Druckversuche quantifiziert. Zur Beurteilung der aus den Versuchen erhaltenen Materialkennwerte werden ergänzende numerische Berechnungen durchgeführt. Mit den Erkenntnissen aus den Traglastprüfungen soll die Prüfung der Anwendbarkeit des für Normalbeton formulierten Verbundfugennachweises für unbewehrten Stahlfaserspritzbeton erfolgen bzw. mit Vergleichsberechnungen einfache Rechenmodelle erarbeitet werden, die in einer Ergänzung der Nachweisformate der (DIN 18551:2014-08) münden.

2 Normative Regelungen

2.1 Nachweis des Verbundes

Während die Anwendung und Ausführung des Baustoffes Stahlfaserspritzbeton in (DIN 18551:2014-08) mit der europäischen Norm EN 14487 geregelt ist, wird Abschnitt 5.1 der (DIN EN 14487-1:2006-03) hinsichtlich der Bemessung von Stahlfaserspritzbeton durch (DIN 18551:2014-08) lediglich mit dem Hinweis „*Sofern die Tragwirkung von Stahlfasern in Ansatz gebracht werden soll, sind über diese Norm hinausgehende Nachweise erforderlich*“ ergänzt. Für die Bemessung von Betonbauteilen, die mit Spritzbeton hergestellt oder verstärkt werden, gilt, soweit in (DIN 18551:2014-08) nichts anderes bestimmt ist, (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04). Durch die bauaufsichtliche Einführung von (DAfStb Rili Stahlfaserbeton 2012), die als eine Ergänzung von (DIN EN 1992-1-1:2011-01) und (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) verfasst worden ist, sind die Bemessung und Konstruktion von Tragwerken des Hoch- und Ingenieurbaus aus Stahlfaserbeton sowie Stahlfaserbeton mit Betonstahlbewehrung bis einschließlich zur Druckfestigkeitsklasse C50/60 geregelt. Die Anwendung der Bemessungsregeln für Stahlfaserspritzbeton ist dabei jedoch explizit ausgenommen. Seit der Rücknahme der (DBV 2001 b) im Juli 2013 existieren in Deutschland damit keine gültigen Bemessungsregeln von Stahlfaserspritzbeton mehr. Die in (DIN 18551:2014-08) bei Ansatz der Tragwirkung von Stahlfaserspritzbeton geforderten, über die Norm hinausgehenden Nachweise, können somit zu einem sehr divergierenden Sicherheitsniveau führen.

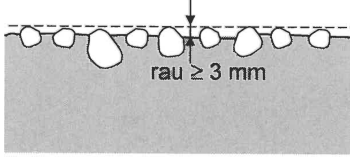
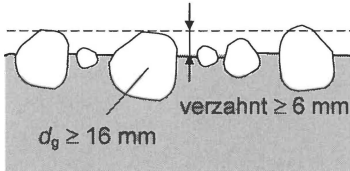
Das in (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) enthaltene Nachweisformat von schubbeanspruchten Fugen, welche in (Zilch u. Müller 2007) an Versuchskörpern mit Ortbetonerfüllung kalibriert wurde und durch den Verweis von (DIN 18551:2014-08) auch für Spritzbetonerfüllungen anzuwenden ist, setzt sich dabei additiv aus den Traganteilen Adhäsion, Reibung und Bewehrung zusammen. Die Tragwirkung der Adhäsion kann nach (Bischof u. Possart 1983) und (Fiebrich 1987) in spezifische Adhäsion (chemische Bindungen wie z. B. Ionenbindung, physikalische Bindungen wie z. B. Van der Waals Kräfte und thermodynamische Bindungen wie z. B. Dispersionskräfte) und mechanische Adhäsion (mikromechanische Verzahnung), bei der durch Kapillarwirkung flüssige Bestandteile des Frischbetons in mikroskopische Poren des Altbetons eindringen und dort aushärten, unterteilt werden. Die Tragwirkung der Reibung kommt nur bei überdrückten Fugen zustande. Die Drucknormalspannungen quer zu Verbundfuge, die durch die Dübel- bzw. Klemmwirkung der Bewehrung entstehen, sind in dem Bewehrungsanteil enthalten und in Gleichung 2.1 nicht dargestellt, da im Rahmen dieser Arbeit nur unbewehrte Spritzbetonfugen behandelt werden. Obwohl diese drei Tragwirkungen von der Relativverschiebung

der beiden Verbundpartner abhängen, ist die Bemessungsgleichung für den Grenzzustand der Tragfähigkeit in (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) verschiebungsunabhängig kalibriert und auf die maximale Druckstreben­tragfähigkeit begrenzt.

$$v_{Rdi} = c_i \cdot f_{ctd} + \mu_i \cdot \sigma_n \leq 0,5 \cdot \nu \cdot f_{cd} \quad (2.1)$$

Die maximal über die Verbundfuge übertragbare Schubspannung v_{Rdi} ist dabei lediglich von der Rauheit ¹, des Altbetons (c_i , μ_i und ν), den Bemessungswerten der Zug- bzw. Druckfestigkeit (f_{ctd} , f_{cd}) des geringer festen Verbundpartners sowie der Normalspannung senkrecht zur Fuge (σ_n) abhängig. Zur Quantifizierung der Rauheit wird die Oberflächenbeschaffenheit des Altbetons vereinfachend in die vier Kategorien *sehr glatt*, *glatt*, *rau* und *verzahnt* eingeteilt.

Tabelle 2.1: Oberflächenbeschaffenheit nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) und (DAfStb Heft 600)

Kategorie	Oberflächenbeschaffenheit	c_i	μ_i	ν
rau	<ul style="list-style-type: none"> mindestens 3 mm Freilegen der Gesteinskörnungen  <p>→ $R_t \geq 1,5 \text{ mm}$ bzw. $R_p \geq 1,1 \text{ mm}$</p>	0,40 ¹	0,70	0,50
verzahnt	<ul style="list-style-type: none"> mindestens 6 mm Freilegen der Gesteinskörnungen bei Verwendung einer Gesteinskörnung mit $d_g \geq 16 \text{ mm}$  <p>→ $R_t \geq 3,0 \text{ mm}$ bzw. $R_p \geq 2,2 \text{ mm}$</p>	0,50	0,90	0,70

¹ In den Fällen, in denen die Fuge infolge Einwirkungen rechtwinklig zur Fuge unter Zug steht, ist $c_i = 0$ zu setzen

Die Entscheidungskriterien für die Einteilung in die für eine nachträgliche Verstärkung mit Spritzbeton relevanten Rauheitskategorien *rau* und *verzahnt*, sowie die Rauheitsparameter c_i , μ_i und ν für Betone der Festigkeitsklassen $\leq C55/57$ sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Die Rauheit *spritzrauer* Oberflächen ist nach (Schmidt et al. 2014) mit der Rauheit *verzahnter* Oberflächen gleichzusetzen.

¹ Anstelle der in (DIN EN 1992-1-1:2011-01) und (Fingerloos et al. 2012) verwendeten Begriffe der *Rauigkeit* bzw. *Rauigkeitskategorie* werden in Anlehnung an (DIN 4760:1982-06) und (DIN EN ISO 4287:2010-07) in der vorliegenden Arbeit dafür die Termini *Rauheit* und *Rauheitskategorie* verwendet.

Die Zuordnung der mittleren Rautiefe nach Kaufmann R_t zu den Beiwerten c_i , μ_i und ν ist in Bild 2.1 graphisch dargestellt. Dabei stellt die fettgedruckte, schwarze Linie den stufenförmigen Verlauf des Beiwerts c_i nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) dar. Für den Vergleich der experimentell ermittelten, maximal übertragbaren Schubspannung mit den Bemessungswerten nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) in Abschnitt 6 wird, auf der sicheren Seite liegend, der Kurvenverlauf des Beiwerts c_i gleichmäßig linear interpoliert (punktierte schwarze Linie). Genauso wird für den Festigkeitsabminderungsbeiwert ν (rote strichpunktierte bzw. punktierte Linie) verfahren. Da die Überprüfung des Reibanteils nur für spritzraue Oberflächen durchgeführt wird, werden in Abschnitt 6 auch spritzraue Oberflächen die eine etwas kleinere Rautiefe nach Kaufmann als $R_t = 3 \text{ mm}$ aufweisen in die Rauheitskategorie *spritzrau* bzw. *verzahnt* eingeordnet, womit eine Interpolation des Reibbeiwerts μ_i nicht notwendig ist.

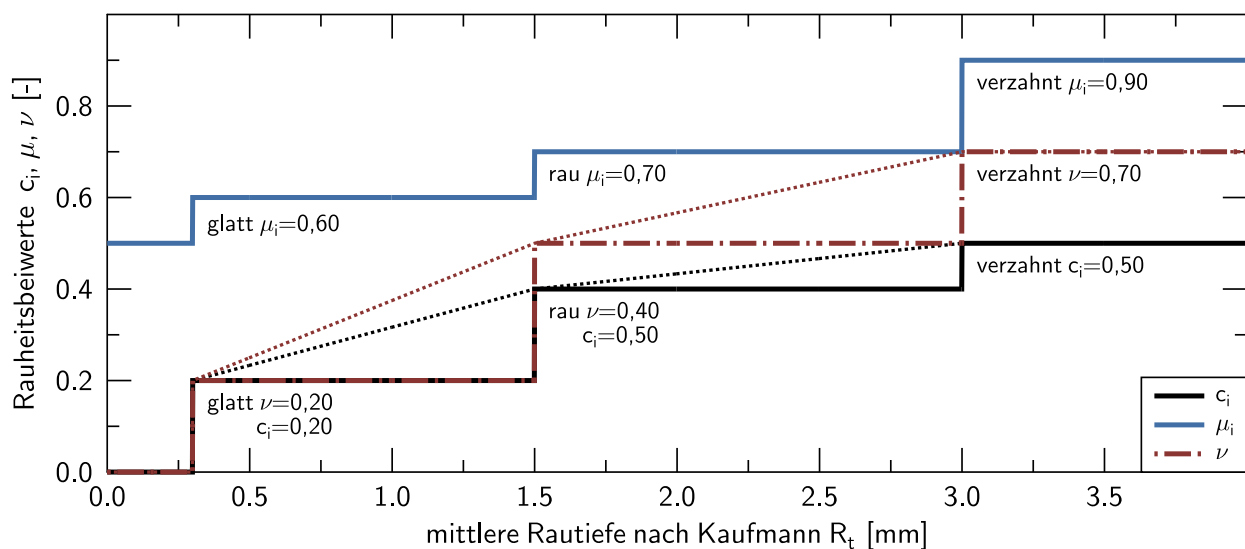


Bild 2.1: Beiwerte c_i , μ_i und ν in Abhängigkeit von der mittleren Rautiefe nach Kaufmann

2.2 Konstruktive Regelungen

Für die Anwendung von Stahlfaserspritzbeton werden weder in (DIN EN 14487-1:2006-03), (DIN EN 14487-2:2007-01) noch in (DIN 18551:2014-08) konstruktive Regelungen vorgegeben. Somit sind die folgenden, allgemein für Spritzbeton vorgegebenen konstruktiven Regelungen, die bereits in (Fischer et al. 2014) zusammengefasst wurden, zu beachten. Die Anrechnung von Zwangsspannungen für Spritzbetonergänzungen, wie sie zum Beispiel aus dem unterschiedlichen Schwindverhalten der beiden Verbundpartner resultieren, sind in der aktuell gültigen Regelwerken für Spritzbeton nicht explizit beschrieben, sondern durch die Anwendung konstruktiver Maßnahmen abzudecken. In

(DIN EN 1992-1-1:2011-01) wird im Abschnitt *Zusätzliche Regeln für Bauteile und Tragwerke aus Fertigteilen* durch (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) die Anordnung einer Verbundsicherungsbewehrung in Randbereichen von nachträglich ergänzten Platten gefordert. Dabei sind innerhalb eines $0,75\text{ m}$ breiten Streifens mindestens $6\text{ cm}^2/\text{m}$ Verbundbewehrung einzubauen. Die hier vorgeschlagene Menge an Verbundbewehrung wurde nach (Fingerloos et al. 2012) an einer Elementplatte (60 mm Fertigteil + 250 mm Ortbeton) anhand ungünstiger Ausgangsannahmen für differentielles Schwinden bei glatter Fuge rechnerisch abgeschätzt. Bei durchgehend mit Gitterträgern bewehrten Platten und rauen Fugen sind die Verhältnisse nach (Fingerloos et al. 2012) jedoch deutlich günstiger, sodass übliche geschosshohe Auflasten durch massive tragende Wände mit aufliegenden Decken ausreichend sind, um die beim vollständigen Verbundverlust auftretende, senkrecht zur Fuge wirkende Zuglast von 200 kN/m aufnehmen zu können. Weitere Hintergründe zu dieser Regelung können z.B. den Ausführungen von (DAfStb Heft 456) oder (FIP 1982) entnommen werden. Wenn der Nachweis der Schubkraftübertragung nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01) ohne Anrechnung von Verbundbewehrung geführt werden kann, muss nach (DIN 18551:2014-08) bei Platten lediglich die zusätzliche Zugbewehrung im vorhandenen Beton mit mindestens 4 Stahldübeln M8 je m^2 ($\hat{=} 2\text{ cm}^2/\text{m}^2$ flächig bzw. $\hat{=} 1,5\text{ cm}^2/\text{m}$ in einem Streifen von $0,75\text{ m}$) verankert werden. Für Balken ist in den Endbereichen eine konstruktive Verbundbewehrung vorzusehen.

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Versuchsprogramm zur Bestimmung der Verbundfestigkeit

Die verschiedenen Versuchsparameter können Tabelle 3.1 entnommen werden. Insgesamt werden acht Serien (VP-1 bis VP-8) mit jeweils einer Verbundplatte, bestehend aus sechs Spaltzug- und zwei Keilspaltzugkörpern, sowie vier Serien Schub-Druckkörper (VP-9 bis VP-12) untersucht. Die Serien zur Bestimmung der Adhäsionstragwirkung werden aus Trockenspritzbeton sowie Nassspritzbeton hergestellt, wobei Rautiefe, der Betonuntergrund (Normalbeton, Spritzbeton), die Oberflächenvorbehandlung (feucht, trocken) und der Fasergehalt variiert werden. Für die Bestimmung des Reibungstraganteils wird nur Spritzbeton als Untergrund verwendet und dabei der Fasergehalt variiert. Insgesamt wird dadurch die Verbundfestigkeit an 48 Spaltzugversuchen, 16 Keilspaltzugversuchen sowie 16 Schub-Druckkörpern bestimmt.

Zusätzlich zu den Verbundversuchen werden die Festbetoneigenschaften (Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Biegezugfestigkeit und Zugfestigkeit) des verwendeten Normalbetons sowie des Spritzbetons 28 Tage nach der Herstellung sowie am Versuchstag ermittelt. Die Ergebnisse der Festbetonprüfungen werden in Abschnitt 3.5 vorgestellt.

Tabelle 3.1: Versuchsserien der Verbundplatten

	Serie	Grundplatte	Erg.-platte	Rauheitskategorie	mittlere Rautiefe ¹	Oberflächenvorbehandlung ²	Fasergehalt Grundplatte	Fasergehalt Erg.platte
Typ V / Typ IV	VP-1	M-0	M-5	rau	1,28	feucht	-	30 kg/m ³
	VP-2	M-0	M-5	verzahnt	2,68	feucht	-	30 kg/m ³
	VP-3	M-0	M-5	rau	1,28	trocken	-	30 kg/m ³
	VP-4	M-0	M-5	verzahnt	2,66	trocken	-	30 kg/m ³
	VP-5	M-1	M-1	spritzrau	3,85	trocken	-	-
	VP-6	M-2	M-2	spritzrau	3,49	trocken	30 kg/m ³	30 kg/m ³
	VP-7	M-2	M-3	spritzrau	3,68	trocken	30 kg/m ³	40 kg/m ³
	VP-8	M-2	M-4	spritzrau	3,65	trocken	30 kg/m ³	50 kg/m ³
Typ IIc	VP-9	M-2	M-2	spritzrau	3,96	trocken	30 kg/m ³	30 kg/m ³
	VP-10	M-2	M-2	spritzrau	3,68	trocken	30 kg/m ³	30 kg/m ³
	VP-11	M-4	M-4	spritzrau	3,24	trocken	50 kg/m ³	50 kg/m ³
	VP-12	M-4	M-4	spritzrau	3,20	trocken	50 kg/m ³	50 kg/m ³

¹ rau: $R_t \geq 1,5 \text{ mm}$; verzahnt: $R_t \geq 3,0 \text{ mm}$; starkt verzahnt $R_t \geq 4,0 \text{ mm}$ (R_t : Rautiefe nach Kaufmann)

² feucht: nach (DIN 18551:2014-08) bzw. nach (DIN EN 1504-10:2004-04) erscheint die Oberfläche matt und feucht ohne schimmernden Wasserfilm; trocken: kein Vornässen

3.2 Herstellung der Versuchskörper

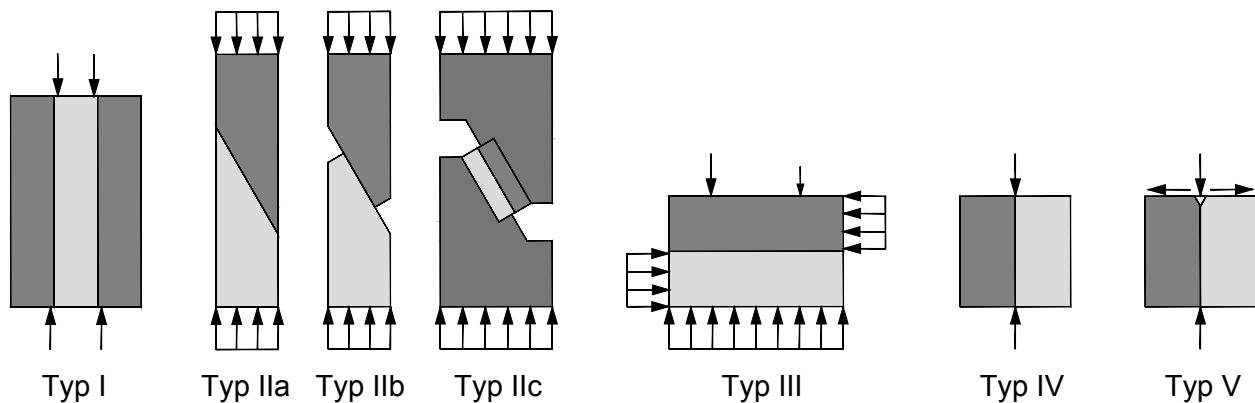


Bild 3.1: Versuchstypen zur Bestimmung der Verbundfestigkeit in Anlehnung an (Reinecke 2004)

Die Untersuchungen zum Verbundtragverhalten von Stahlfaserspritzbetoneergänzungen werden anhand von Kleinkörperversuchen durchgeführt. Dazu existieren eine Reihe unterschiedlicher Versuchstypen, die sich im Wesentlichen in der Probekörpergröße, der Lasteinleitung sowie in der Spannungsverteilung unterscheiden. Der für die jeweilige Untersuchung verwendete Versuchstyp ist aufgrund der festgelegten Rahmenbedingungen wie z. B. der gesuchten physikalischen Kenngröße oder der Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu wählen. In Anlehnung an (Reinecke 2004) sind in Bild 3.1 die Versuchstypen aufgeführt, die auch in der Überprüfung der Verbundfugentragfähigkeit von Ortbetoneergänzungen von (Zilch u. Müller 2007) verwendet wurden. Die Bewertung der Adhäsion der Verbundfuge von Stahlfaserspritzbetoneergänzungen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit wie in (Fischer et al. 2014) durch die experimentell an Spaltzugkörpern (Versuchstyp IV in Bild 3.1) sowie Keilspaltzugkörpern (Versuchstyp V in Bild 3.1) ermittelte Verbundzugfestigkeit. Da durch das geforderte quasi-monolithische Tragverhalten des nachträglich ergänzten Bauteils nur geringe Verformungen in der Fuge zugelassen werden, wird der Reibanteil durch die Spitzenscherfestigkeit, ermittelt am Versuchstyp II, bewertet.

Da die Form der Versuchstypen IIa und IIb nur für geschalte und nachträglich aufgeraute Betonoberflächen praktikabel ist, wird der Versuchstyp IIc, der in ähnlicher Form bereits von *Ilizkaja* (erwähnt in (Everling 1962)) und (Koenning 1991) Anwendung fand, verwendet. Dadurch können die Versuchskörper in praxisüblichen Schichtdicken hergestellt werden und es erfolgt weder eine Beeinträchtigung des Betongefüges durch eine vorhandene Schalung, noch eine praxisunübliche Faserorientierung durch eine andere Spritzrichtung. Die Versuchskörper der verwendeten Versuchstypen IIc und IV werden dabei aus den gleichen großformatigen Verbundplatten mit den Abmessungen $850 \times 500 \times 150 \text{ mm}$ herausgesägt.

Für die Herstellung der Spaltzugkörper sowie Keilspaltzugkörper werden aus der in Bild 3.2 exemplarisch dargestellten Verbundplatte jeweils sechs Spaltzugwürfel mit einer Kantenlänge

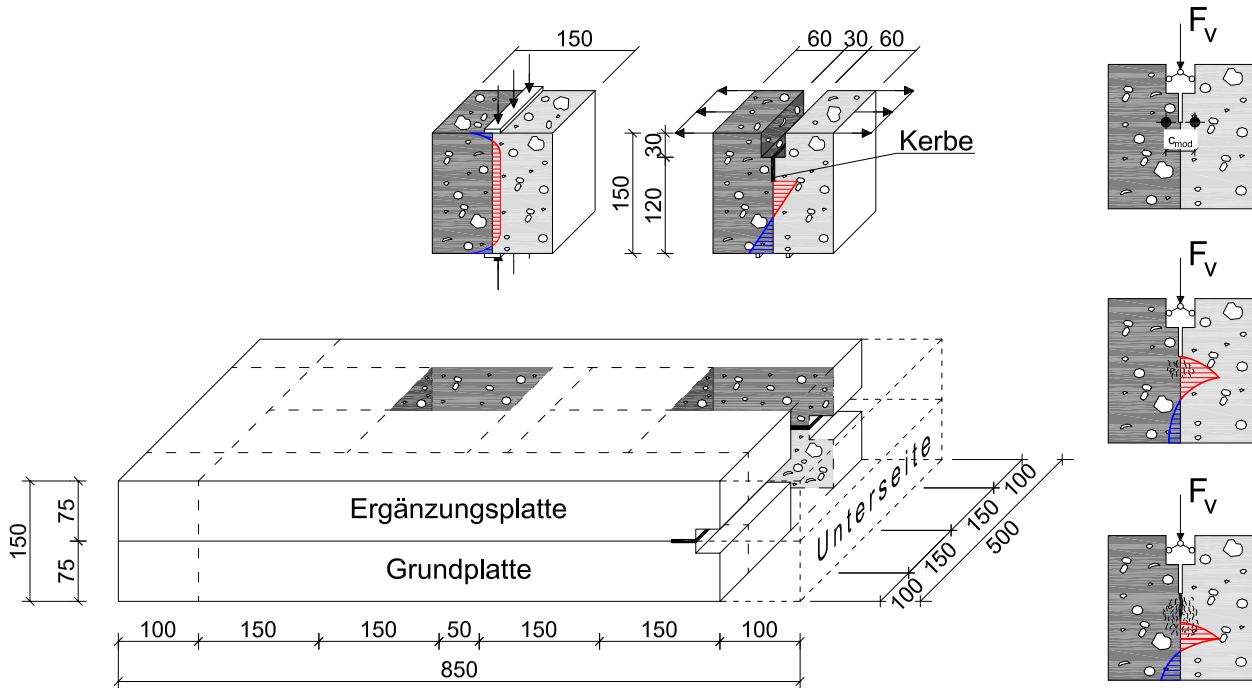


Bild 3.2: Verbundplatte für Spaltzug- und Keilspaltzugkörper

von 150 mm sowie zwei Keilspaltzugwürfel mit einer Kantenlänge von 150 mm gesägt. Um Spritzschatten zu vermeiden wird dabei ein umlaufender Randabstand der Versuchskörper von 100 mm bei einer Spritzbetonauftragsdicke von 75 mm eingehalten.

Die Durchführung der Spaltzugprüfungen erfolgt nach (DIN EN 12390-6:2010-09). Jedoch werden wie in (Fischer et al. 2014) abweichend zu den geometrischen Angaben in (DIN EN 12390-6:2010-09) Lasteinleitungsstreifen mit einer Breite von 10 mm und einer Dicke von 3 mm verwendet, um eine geringere Quersugsbehinderung der vollflächig auf den Würfel aufliegenden Lasteinleitungsstreifen zu erhalten. Dies konnte in (Fischer et al. 2014) durch Vorversuche bestätigt werden. Die Versuchsdurchführung der Keilspaltzugversuche erfolgt in Anlehnung an (RILEM 1994) weggesteuert durch die Rissaufweitung. Das dabei verwendete, abschnittsweise definierte Belastungsregime ist in Anhang A.4 angegeben.

Da sich beim Keilspaltzugversuch, wie in Bild 3.2 rechts illustriert, eine sich ständig ändernde Bruchprozesszone ausbildet, handelt es sich um einen sogenannten indirekten Zugversuch. Die Zugfestigkeit muss dabei anhand einer inversen Analyse ermittelt werden. Eine genauere Beschreibung der Versuchsdurchführung der Keilspaltzugversuche, sowie das verwendete Vorgehen bei der inversen Analyse ist in Kapitel 4 zu finden.

Für den Versuchstyp IIc (Schub-Druckkörper) werden, wie in Bild 3.3 exemplarisch gezeigt, je vier Schub-Druckkörper mit den Abmessungen $300 \times 150 \times 150\text{ mm}$ aus der Verbundplatte gesägt. Da eine gewisse langwellige Unebenheit der Spritzbetonoberfläche der Grundplatte herstellungsbe-

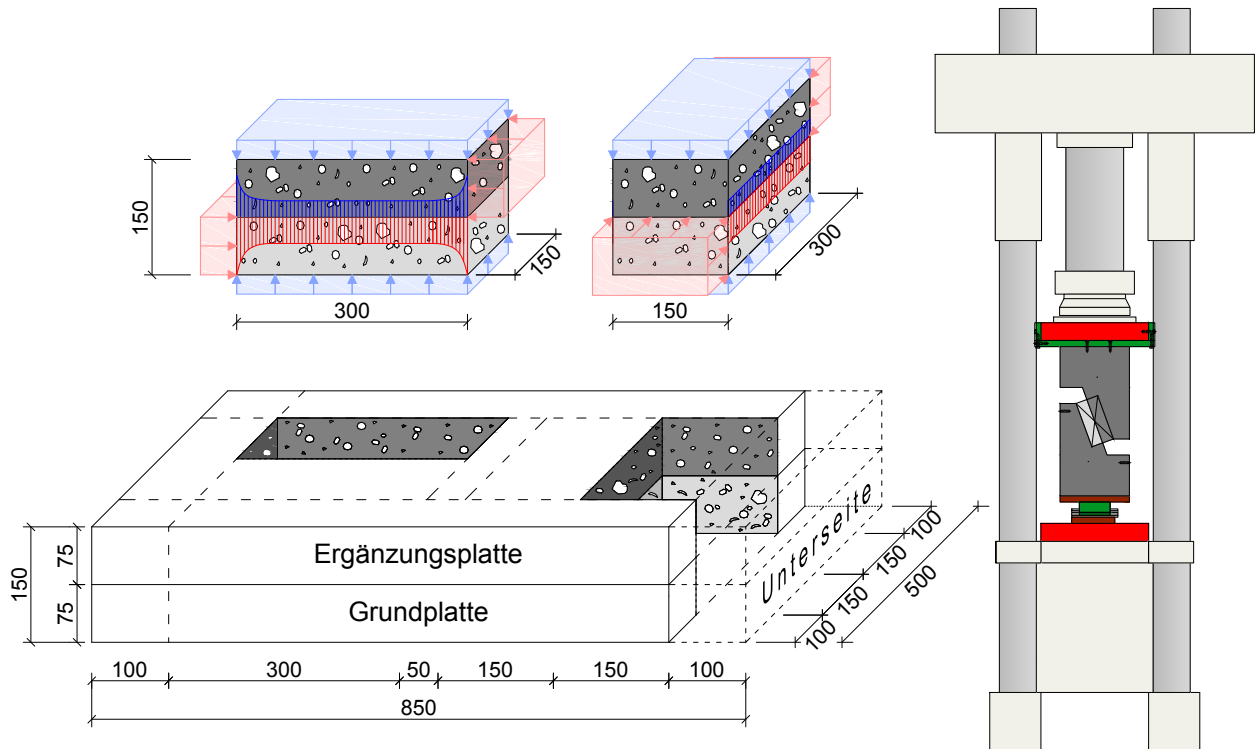


Bild 3.3: Verbundplatte für Schub-Druckkörper und Versuchsübersicht

dingt nicht vermieden werden kann, wurde eine maximale Abweichung der Oberfläche der ersten Schicht eines Schub-Druckkörpers von $\pm 15 \text{ mm}$ aus der theoretischen Verbundebene festgelegt. Zur Einhaltung des festgelegten Qualitätsmaßstabs wird nach der Herstellung der ersten Spritzbetonschicht (Grundplatte) die Oberfläche vollständig mit einem 3D-Oberflächenscanner digitalisiert. Die erzeugten dreidimensionalen Punktwolken werden anschließend in Matlab eingelesen und hinsichtlich der Ebenheit der Oberfläche ausgewertet. Damit die Verbundfuge möglichst mittig im Verbundkörper liegt, wird die Lage und die Orientierung der Schub-Druckkörper aufgrund der Oberflächentopographie so festgelegt, dass die maximale Abweichung der tatsächlichen Oberfläche der ersten Schicht von der theoretischen Verbundebene in der horizontalen Symmetrieachse des Verbundkörpers, ermittelt mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, möglichst gering ist. Demnach ist der geometrische Ort der Schub-Druckkörper nicht festgelegt, sondern wird jedesmal neu von Verbundplatte zu Verbundplatte unter Einhaltung der festgelegten Randabstände definiert. Dieses Vorgehen ist in Bild 3.4 visualisiert.

Zum Ausgleich von Unebenheiten der gesägten Versuchskörperoberflächen, sowie zur Sicherstellung der Kraftübertragung zwischen UHPC-Auflager und Verbundkörper, werden die Schub-Druckkörper mit einem 2-Komponenten Klebstoff auf Epoxy-Acrylat Basis in die UHPC-Auflager geklebt. Die mechanischen Festigkeitskennwerte des verwendeten Klebstoffs überschreiten die Festigkeitskennwerte der verwendeten Betone, womit sichergestellt werden kann, dass das Versagen in einer der

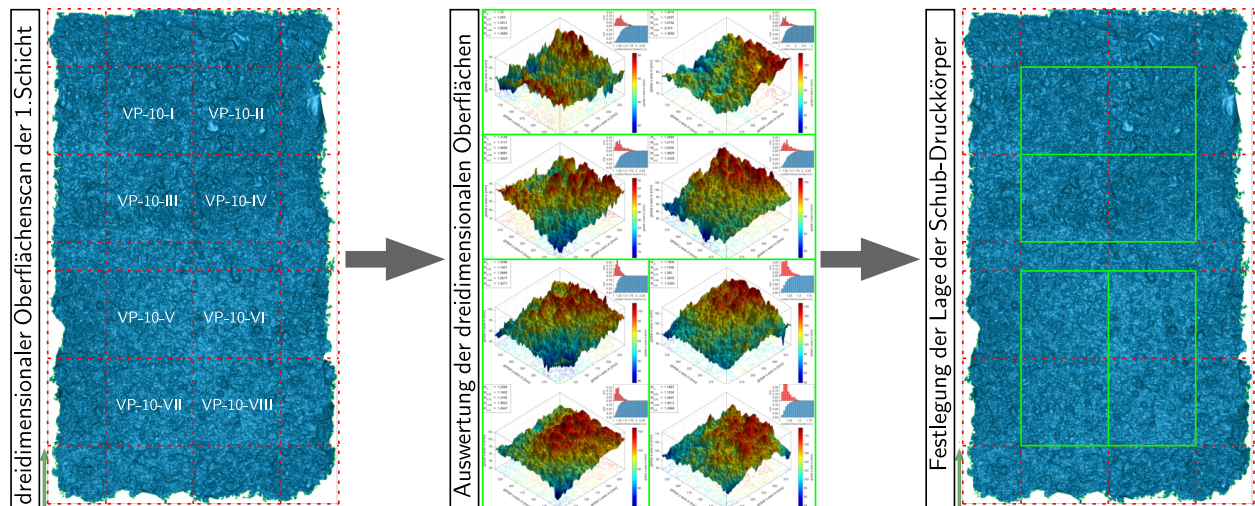


Bild 3.4: Verfahrensablauf zur Festlegung der Lage der Schub-Druckkörper

beiden Betonschichten stattfindet. Der Klebevorgang sowie die Aushärtung des Klebstoffs erfolgt unter einer geringen, konstant gehaltenen Vorkraft in der Prüfmaschine, damit sich die Kalotte ausrichten kann und keine äußeren Momente in den momentenfreien Versuchsaufbau eingetragen werden. Durch das Einkleben des Verbundkörpers ergibt sich zudem der positive Nebeneffekt, dass die in Bild 3.3 links oben dargestellten, tatsächlich vorhandenen ungleichmäßigen Schubspannungen und Normalspannungen in der Fuge vergleichmäßigt werden.

Für die Auswertung der Versuche in den Kapiteln 5 und 6 werden wie in (Wolfram 1958), (DAfStb Heft 372), (Koenning 1991), (Reinecke 2004) und (Zilch u. Müller 2007) die Fugenspannungen entlang der Fuge als konstant angenommen, siehe Bild 3.3 oben mitte. Der Traglastversuch wird nach erfolgter Aushärtung des Klebers weggesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von $0,0025 \text{ mm/s}$ durchgeführt.

Die Herstellung der Grundplatten aus Normalbeton erfolgt wie in (Fischer et al. 2014). Dabei werden die Grundplatten der Verbundplatten mit einer Bauteilhöhe von 75 mm und einer Grundfläche von $850 \times 500 \text{ mm}$ liegend in einer Holzschalung betoniert und auf dem Rütteltisch verdichtet. Unmittelbar nach dem Betonieren werden die Probekörper durch Folien abgedeckt. Das Ausschalen erfolgt einen Tag nach der Betonage. Nach dem Ausschalen werden die Grundplatten nach (DIN EN 12390-2:2009-08) in Verbindung mit (DIN EN 12390-2/Ber 1:2012-02) bis zum 7. Tag durch Abdecken mit feuchten Jutesäcken und Folie nachbehandelt und ab dem 8. Tag bei konstantem Klima (20°C und $65\% \text{ RF}$) gelagert. Im Alter von acht Tagen werden die Grundplatten durch Strahlen mit festen Strahlmitteln (kurz SmS) bis zum Erreichen der geplanten Rauheitskategorien aufgeraut. Nach insgesamt 28 Tagen werden die Grundplatten mit Spritzbeton ergänzt.

Für die Herstellung der Grundplatten aus Spritzbeton werden die 75 mm hohen Schalungen, mit der Grundfläche von $850 \times 500 \text{ mm}$, fest auf großformatige, vertikal aufgestellte Betonplatten

montiert, um einen konstanten Spritzenergieeintrag sicherzustellen. Der Nassspritzbetonauftrag erfolgt mit einer relativ geringen Spritzleistung von ungefähr $10,0 \text{ m}^3/\text{h}$. Damit können die Abweichungen der Spritzbetonoberfläche aus der Ebene minimiert werden, und die Anforderung von $\pm 15 \text{ mm}$ eingehalten werden. Unmittelbar nach dem Spritzvorgang werden die Grundplatten mit feuchten Jutesäcken abgedeckt und bis zum Transport der Probekörper zum Laboratorium für den konstruktiven Ingenieurbau der Technische Universität München 10 Tage am Ort des Spritzbetonauftrags im *VersuchsStollen Hagerbach* unter nahezu konstanten klimatischen Bedingungen gelagert. Während der Lagerung der Grundplatten im Laboratorium für den konstruktiven Ingenieurbau der Technische Universität München bei konstantem Klima (20°C und $65\% \text{ RF}$) wird der Oberflächenscan der Spritzbetonoberfläche durchgeführt, bevor die Verbundplatten für den Auftrag der Ergänzungsplatten wieder zum *VersuchsStollen Hagerbach* transportiert werden.

Die Ergänzung der vertikal an die großformatigen Betonplatten montierten Grundplatten mit Spritzbeton erfolgt bei den Trockenspritzbetonarbeiten mit einer Spritzleistung von ungefähr $6,0 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Betonförderleistungen des Nassspritzbetonauftrags der Ergänzungsschicht werden mit einer im Tunnelbau praxisüblichen Betonförderleistung von ungefähr $20,0 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgeführt. Nach der Ergänzung mit Spritzbeton werden die Verbundplatten mit feuchten Jutesäcken abgedeckt und bis zum Transport der Probekörper zum Laboratorium für den konstruktiven Ingenieurbau der Technische Universität München 10 Tage am Ort des Spritzbetonauftrags im *VersuchsStollen Hagerbach* unter nahezu konstanten klimatischen Bedingungen gelagert. Anschließend erfolgt die Lagerung im Laboratorium für den konstruktiven Ingenieurbau der Technische Universität München bis zur Durchführung der Festigkeitsprüfungen unter Normklima (20°C und $65\% \text{ RF}$). Die Festigkeitsversuche zur Bestimmung des Adhäsionsverhaltens werden 28 Tage nach dem Aufbringen der Ergänzungsschicht durchgeführt, während die Versuche des Typs IIc wegen des hohen Zeitaufwandes sukzessive durchgeführt werden. Um ungewollte Schwindeinflüsse minimal zu halten, werden die Sägearbeiten zur Herstellung der kleinformatigen Versuchskörper erst kurz vor den Festigkeitsprüfungen durchgeführt.

Sämtliche Spritzbetonarbeiten werden unter praxisnahen Bedingungen im *VersuchsStollen Hagerbach* ausgeführt. Die Nassspritzarbeiten erfolgen im Dichtstromverfahren mit dem Spritzmobil der Marke *Meyco Potenza* in Kombination mit der Doppelkolbenpumpe *Meyco Suprema 30*, mit optimierten Push-Over System zur Kompensation der Pulsation der Betonförderrate und somit zu einer gleichmäßigeren Beschleunigerdosierung, sowie dem Luftkompressor *Frankfurt Kompressor TYP DSM 75-4*. Die Trockenspritzbetonarbeiten werden im Dünnstromverfahren mit einer Rotorspritzmaschine *Sika Aliva 257* ausgeführt. Zur Dosierung des flüssigen Beschleunigers wird die externe Dosierpumpe *Sika Aliva 403.6* verwendet. Ein gleichbleibender Beschleunigergehalt wird durch stetige Gewichtskontrolle des Beschleunigerausgangsbehältnisses in festgelegten Zeitabständen garantiert.

Um die Verbundfuge besser erkennen zu können, werden dem Spritzbeton für die Ergänzungsplatten Farbpigmente beigemischt. Die zugemischten, anorganischen Eisenoxidpigmente *Bayferrox 130* der Firma *LANXEES*, die speziell für die Herstellung von Zement- und kalkgebundenen Bauprodukten entwickelt wurden, sind als inerte Zusatzstoffe anzusehen, die sich somit nicht an den chemischen Erhärtungsprozessen beteiligen. Die verwendeten Farbpigmente entsprechen den Anforderungen der (DIN EN 12878:2014-07). Um sicherzustellen, dass die Farbzugabe keine Auswirkung auf die Festigkeiten des Betons hat, wurden vorab im Normalbetonverfahren separate Probekörper der Zusammensetzung der Mischung M-1 mit und ohne Farbpigmente hergestellt und die Betondruckfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit sowie der Elastizitätsmodul geprüft und verglichen. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 3.5 erläutert.

3.3 Experimentelle Bestimmung des Schwindverhaltens

Zur Abschätzung der durch die nachträglich aufgetragene Spritzbetonergänzungsschicht induzierten Zwangsspannungen werden wie in (Fischer et al. 2014) Schwindversuche an Platten aus Spritzbeton sowie für Vergleichszwecke aus Normalbeton durchgeführt. Während Schwindmaße meist an Festbeton nach (DAfStb Heft 422) in Verbindung mit (DIN 1045-2:2008-08) ermittelt werden, sollen im Rahmen dieser Arbeit schon die frühen Schwindverformungen erfasst werden, da diese mit der frühen Erhärtung von Beton zu Zwangsspannungen führen. Um auch die spritzbetonspezifische Zusammensetzung des Betons zu berücksichtigen, kommt die Anwendung von kommerziellen Schwindrinnen nicht in Betracht. Auf eine vergleichende Ermittlung des Schwindmaßes nach (DAfStb Heft 422) wurde aus logistischen Gründen verzichtet. Die Schwindverformungen werden deshalb, wie in (Cornejo-Malm 1995), mit dem in Bild 3.5 gezeigten Versuchsaufbau, in Anlehnung an (Wittmann 1975), gemessen. Neben der Berücksichtigung der Schwindverformungen der ersten

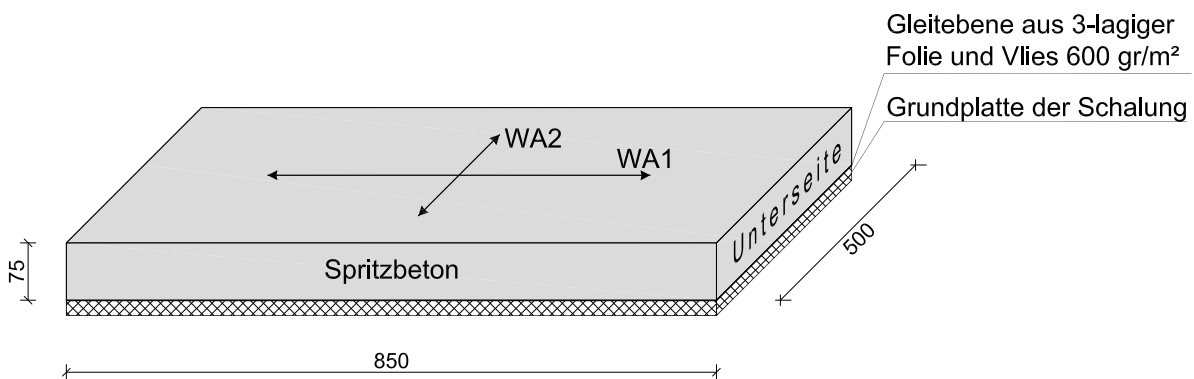


Bild 3.5: Schwindplatten zur Messung der freien Schwindverformung

Stunden nach der Betonage, wird, durch die Geometrie der Platte, dem Austrocknungsverhalten sowie dem Ablauf der Hydratationswärme, den in der Praxis vorhandenen Randbedingungen Rechnung getragen. Um reibungsbedingte Verfälschungen des Schwindmaßes zu minimieren wird der Spritzbeton auf mehrere Lagen eingölter Folie aufgebracht. Zur Sicherstellung der Haftung des Spritzbetons auf der vertikalen Spritzfläche, wird zusätzlich zu den eingölten Folien eine Lage Vlies mit den Seitenwänden der Schalung eingespannt. Nach dem Spritzvorgang und dem Wegklappen der seitlichen Schalung kann sich die Schwindplatte somit wieder frei verformen. Die Schwindverformungen werden durch je zwei senkrecht zueinander stehende Dehnungsaufnehmer (WA1 und WA2 in Bild 3.5) gemessen. Die Basislänge des Dehnungsaufnehmers WA-1 beträgt 500 mm die von WA-2 300 mm . Die Lage ist aus den Bildern 3.5 und 3.6 ersichtlich. Die horizontale sowie vertikale Lagesicherung erfolgt durch die Montage der Dehnungsaufnehmer an U-Profilen, die unter Verwendung einer Schablone nach der Betonage in den noch plastischen Beton gedrückt werden. Durch die Einbindelänge der U-Profile von $37,5\text{ mm}$ werden näherungsweise über die

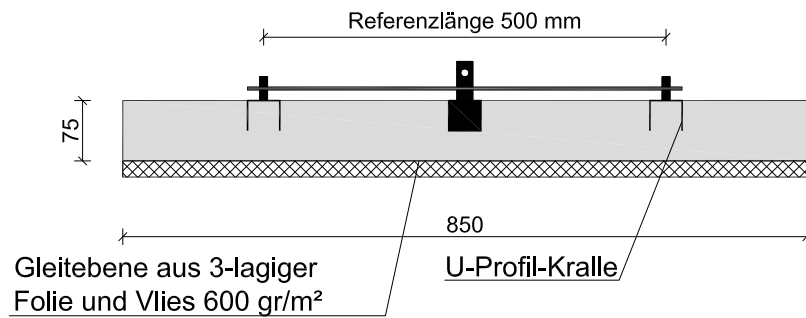


Bild 3.6: Messinstallation der Schwindversuche

Dickenrichtung mittlere Dehnungen gemessen. Für die Dehnungsmessung kommen wegen ihrer hohen Genauigkeit sowie der geringen Rückstellkraft der Messzunge Aufnehmer vom Typ *DD1* des Herstellers *HBM* zum Einsatz.

Eine Überprüfung der in Bild 3.6 für die Schwindversuche von Spritzbeton dargestellten Messinstallation fand in (Fischer et al. 2014) durch einen Vergleich der Schwindmaße, die mit dieser Messinstallation an einem Balken mit den Abmessungen $150 \times 150 \times 700 \text{ mm}$ ermittelt wurden, mit den in (Wittmann 1975) ermittelten Werten statt. Insgesamt werden die Schwindverformungen an je zwei Schwindplatten der Nassspritzbetonmischungen M-1 (SP-M-1-I und SP-M-1-II), M-2 (SP-M-2-I und SP-M-2-II), M-3 (SP-M-3-I und SP-M-3-II) und M-4 (SP-M-4-I und SP-M-4-II) sowie zwei Schwindplatten der Trockenspritzbetonmischung M-5 (SP-M-5-I und SP-M-5-II) gemessen. Die Schwindmessungen werden in der Regel eine Stunde nach der Betonage gestartet. Sämtliche Schwindversuche finden in einem klimatisierten Raum des *VersuchsStollens Hagerbach* unter einem konstanten Klima von 20°C und $65\% \text{ RF}$ statt.

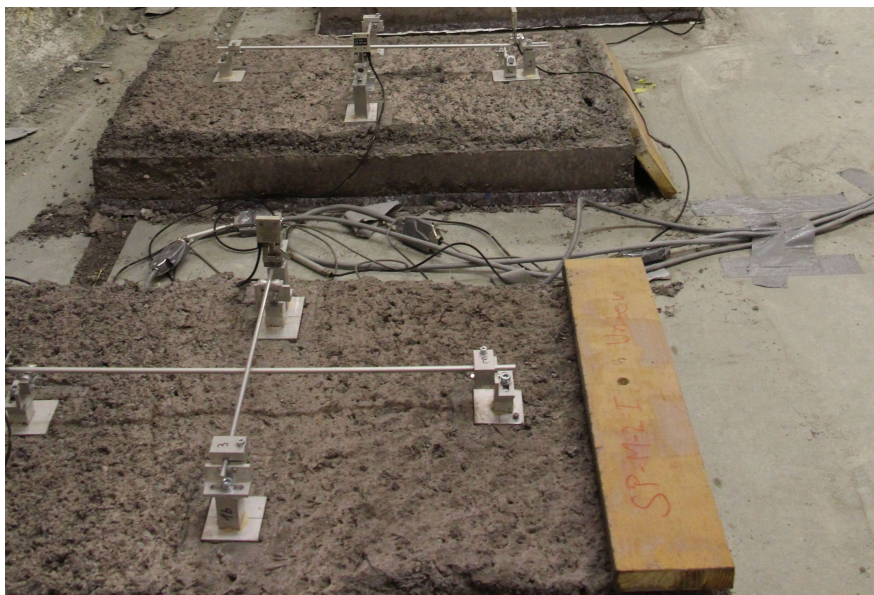


Bild 3.7: Aufbau der Frühschwindversuche

3.4 Zusammensetzung der verwendeten Betone

Als Beton für die Grundplatte wird auf die in (Fischer et al. 2014) verwendete Normalbetonmischung zurückgegriffen. Die Nassspritzbetonmischungen (M-1, M-2, M-3 und M-4) haben eine nahezu identische Zusammensetzung, lediglich der Fasergehalt variiert. Während die Ausgangsmischung M-0 ohne Stahlfaserzugabe hergestellt wird, werden in Mischung M-1 30 kg/m^3 , in Mischung M-2 40 kg/m^3 und in Mischung M-4 50 kg/m^3 Stahlfasern zugegeben. Um die Pumpbarkeit beizubehalten, wird der versteifenden Wirkung der Stahlfasern durch erhöhte Zugabe von Fließmittel entgegengewirkt. Die Beschleunigerzugabe an der Düse beträgt $6\text{-}M.\%$ bezogen auf die Zementmenge. Für die Trockenspritzbetonmischung M-5 wird die Gesteinskörnung mit einer Eigenfeuchte von 3% mit dem Zement und den Fasern trocken gemischt. Anschließend wird die Trockenmischung mit einem Fahrmischer zur Spritzstelle verfahren. Vor Ort werden Wasser und $\approx 5,50\text{-}M.\%$ Beschleuniger zugegeben. Die Betonzusammensetzungen können Tabelle 3.2 entnommen werden. Die Zugabe von $1,0 \text{ kg/m}^3$ Farbpigmenten entspricht $0,24 \text{ M.}\%$ bezogen auf

Tabelle 3.2: Zusammensetzung des verwendeten Betons in kg/m^3 (Bereitstellungsgemisch)

	M-0	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
CEM I 32,5R ¹	310	–	–	–	–	–
CEM I 42,5N ²	–	425	425	425	425	350
Sand 0/1	–	120	120	120	120	–
Sand 0/4	970	990	990	990	990	900
Kies 4/8	186	598	598	598	598	600
Kies 8/16	776	–	–	–	–	–
Fließmittel ³	–	1,00	1,07	1,09	1,12	–
Beschleuniger	–	6,00 ⁴	6,00 ⁴	6,00 ⁴	6,00 ⁴	5,50 ⁵
Fasergehalt ⁶	–	–	30,0	40,0	50,0	30,0
Farbpigment ⁷	–	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
w/z-Wert	0,57	0,47	0,47	0,47	0,47	$\approx 0,50$

¹ Märker Portlandzement (Märker Zement GmbH)

² Holcim Normo 4, Werk Untervaz (Holcim AG, Schweiz)

³ BASF MasterGlenium 327C; Angabe in Massenprozent bezogen auf den Zementgehalt

⁴ BASF MasterRoc SA 193; Angabe in Massenprozent bezogen auf den Zementgehalt

⁵ BASF MasterRoc SA 160; Angabe in Massenprozent bezogen auf den Zementgehalt

⁶ Bekaert Dramix RC-65/35 BG

⁷ Bayferrox 130 (LANXESS); nur im Ergänzungsбетон

den Bindemittelgehalt und liegt damit deutlich unter dem in (Kusterle et al. 2014) empfohlenen Maximalwert von $5 \text{ M.}\%$. Zudem wird der Siebdurchgang in der Kornfraktion von $0,063 \text{ mm}$ durch die verwendete Menge an Farbpigmente mit einer vorherrschenden Teilchengröße von $0,17 \mu\text{m}$ nur um $0,03 \text{ Vol.}\%$ nach oben verschoben. Der Vergleich der Sieblinien in Bild 3.8 der verwendeten Mischungen M-1 bis M-5 mit den in (ÖVBB Rili Spritzbeton 2009) und (EFNARC 1996) als

optimal angegebenen Sieblinienbereichen zeigt, dass sich die Zusammensetzung der verwendeten Gesteinskörnungen, unter Berücksichtigung der großen Streubreite der empfohlenen Sieblinien, durchaus im üblichen Bereich befinden.

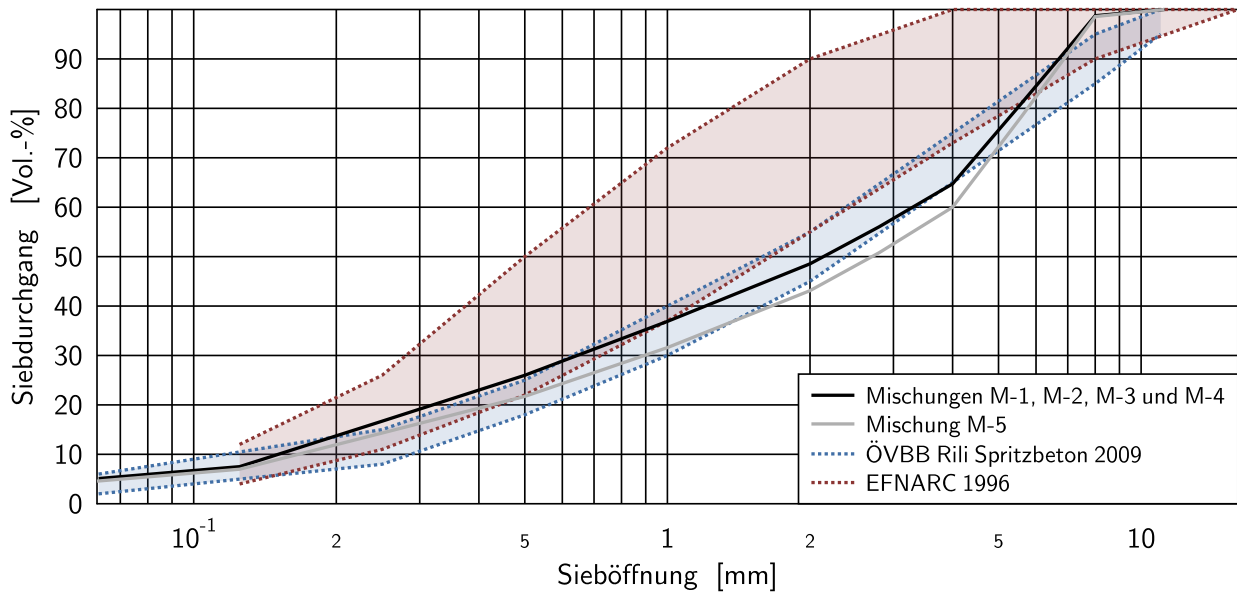


Bild 3.8: Sieblinie der verwendeten Spritzbetonmischungen

3.5 Betoneigenschaften

Zur Bestimmung Festbetoneigenschaften der verwendeten Normalbetonmischung M-0, werden der Mischung Proben entnommen und zusätzliche Begleitkörper hergestellt. Das Ausschalen erfolgt einen Tag nach der Betonage. Nach dem Ausschalen werden die Probekörper nach (DIN EN 12390-2:2009-08) in Verbindung mit (DIN EN 12390-2/Ber 1:2012-02) nachbehandelt. Die Zylinderdruckfestigkeit wird an drei Druckzylindern nach (DIN EN 12390-3:2009-07), der Elastizitätsmodul an drei Zylindern nach (DIN EN 12390-13:2014-06) mit anschließender Druckprüfung und die zylindrische Spaltzugfestigkeit an drei Zylindern gemäß (DIN EN 12390-6:2010-09) jeweils nach 28 Tagen sowie am Versuchstag der Verbundkörper geprüft. Die Größe der Zylinder beträgt $\varnothing 150 \times 300 \text{ mm}$. Zusätzlich wird die Würfelspaltzugfestigkeit an sechs Spaltzugwürfeln nach (DIN EN 12390-6:2010-09) mit den Abmessungen $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$, sowie die Keilspaltzugfestigkeit in Anlehnung an (RILEM 1994) an zwei Keilspaltzugwürfeln mit den Abmessungen $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ am Versuchstag geprüft. Das Ausschalen erfolgt einen Tag nach der Betonage. Nach dem Ausschalen werden die Probekörper nach (DIN EN 12390-2:2009-08) in Verbindung mit (DIN EN 12390-2/Ber 1:2012-02) nachbehandelt.



(a) Anordnung der Schalungen für Verbundplatten, Schwindplatten und der monolithischen Platten



(b) Seitenwangen für die monolithischen Platten

Bild 3.9: Befestigung der Schalungen für den Spritzbetonauftrag

Desweiteren werden zur Ermittlung der Festbetoneigenschaften (Betondruckfestigkeit, Betonzugfestigkeit und Elastizitätsmodul) der Spritzbetonmischungen (M-1 bis M-5) je Spritzbetonauftrag monolithische Probekörper hergestellt. Um auch hier den vollen Spritzenergieeintrag zu gewährleisten und um möglichst die gleichen Materialeigenschaften zu erreichen wie bei den Verbundplatten selbst, werden die Begleitkörper mit derselben Betonförderleistung hergestellt wie die jeweilige Schicht der Verbundplatten. Zudem werden Seitenwangen auf die großformatigen Betonplatten montiert, die als Begrenzung und Höhenlehre für die monolithische Spritzbetonschicht (Bohrkerne und Würfel) dienen. Die Anordnung der Schalungen kann Bild 3.9 entnommen werden. Die Nach-

behandlung der monolithischen Platten für die Begleitkörper erfolgt analog zu den Verbundplatten nach (DIN EN 12390-2:2009-08) in Verbindung mit (DIN EN 12390-2/Ber 1:2012-02).

Aus den Prüfplatten werden, für die Festigkeitsprüfungen nach 28 Tagen sowie einen Tag vor der Festigkeitsprüfung der Verbundplatte, jeweils drei Zylinder für die Druckfestigkeitsprüfung nach (DIN EN 12390-3:2009-07), sowie drei Zylinder zur Elastizitätsmodulprüfung nach (ISO 1920-10:2010-09) mit anschließender Druckfestigkeitsprüfung, deren Abmessungen von $\varnothing 100 \times 200 \text{ mm}$ in Anlehnung an (DIN EN 14487-1:2006-03) in Verbindung mit (ISO 1920-10:2010-09) festgelegt wurden, durch Kernbohrung parallel zur Spritzrichtung entnommen. Im Anschluss an die Druckfestigkeitsprüfungen wird an denselben Bohrkernen der Stahlfasergehalt im Festbeton nach (DIN EN 14488-7:2006-08) ermittelt.

Zur Bestimmung der monolithischen Zugfestigkeit des Spritzbetons werden je Spritzbetonauftrag jeweils nach 28 Tagen sowie einen Tag vor der Verbundfestigkeitsprüfung je drei Spaltzugzylinder mit den Abmessungen $\varnothing 100 \times 100 \text{ mm}$, je vier Spaltzugwürfel mit den Abmessungen $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$, sowie zwei Keilspaltzugwürfel mit den Abmessungen $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ aus der monolithischen Platte, unter Einhaltung der Randabstände, gebohrt bzw. gesägt. Die Spaltzugprüfungen am Zylinder sowie am Würfel werden nach (DIN EN 12390-6:2010-09) und die Keilspaltzugwürfel in Anlehnung an (RILEM 1994) geprüft. Die Spaltzugfestigkeiten beschreiben die Zugfestigkeit des Spritzbetons senkrecht zur Spritzrichtung, während die monolithischen Keilspaltzugversuche für den direkten Vergleich mit den Verbundkeilspaltzugfestigkeiten parallel zur Spritzrichtung durchgeführt werden. Die Nachbehandlung erfolgt analog zu den Verbundplatten.

Zusätzlich werden nach (DIN EN 14488-1:2005-11) gesonderte Spritzkisten mit den Abmessungen $600 \times 600 \times 100 \text{ mm}$ hergestellt. Die Oberfläche der Spritzkisten wird direkt nach dem Spritzvorgang, wie in (De Rivaz 2012) beschrieben, mit einem Stahllineal abgezogen und mit feuchten Jutesäcken und Folie vor Austrocknung geschützt. Das Ausschalen erfolgt einen Tag nach der Betonage. Nach dem Ausschalen werden die Probekörper erneut mit feuchten Jutesäcken und Folie abgedeckt und bis zum Transport der Probekörper zur Technische Universität München, 10 Tage am Ort des Spritzbetonauftrags im *VersuchsStollen Hagerbach* unter nahezu konstanten klimatischen Bedingungen gelagert. Anschließend erfolgt die Lagerung im Laboratorium für den konstruktiven Ingenieurbau der Technische Universität München nach (DIN EN 12390-2:2009-08) mit feuchten Jutesäcken und Folie bevor drei Tage vor der Festigkeitsprüfung eine waagrechte Nut mit einer Tiefe von 10 mm in die Schalseite des Betons gesägt wird. Anschließend werden die Probekörper bis drei Stunden vor Festigkeitsprüfung wieder nach (DIN EN 12390-2:2009-08) gelagert, um die Schwindeinflüsse an der Nut möglichst gering zu halten. Je Stahlfaserspritzbetonmischung werden vier Biegeplatten in Anlehnung an (EFNARC 2011), sowie sechs Biegebalken in Anlehnung an (DIN EN 14651:2007-12) im Alter von 28 Tagen geprüft. Die Biegebalken ($600 \times 150 \times 100 \text{ mm}$) werden dabei aus den Spritzkisten herausgesägt. Die Prüfung der Biegeplatten und der Biegebalken

Tabelle 3.3: Mittelwerte der Nachrisszugfestigkeiten in N/mm^2

		Grundplatten		Ergänzungsplatten			
		M-2	M-4	M-2	M-3	M-4	M-5
DIN EN 14651	$f_{ct,L}^f$	5,75	5,54	4,98	5,61	5,18	4,63
	$f_{R,1}$	1,90	2,71	2,20	3,29	4,58	2,21
	$f_{R,2}$	1,82	2,45	2,06	3,21	4,39	2,09
	$f_{R,3}$	1,75	2,24	1,86	2,99	3,94	1,95
	$f_{R,4}$	1,57	2,00	1,64	2,70	3,44	1,73
EFNARC	$f_{ct,L}^f$	5,16	6,23	4,98	5,93	5,56	4,75
	$f_{R,1}$	1,90	3,07	1,95	3,74	4,37	2,23
	$f_{R,2}$	1,81	3,00	1,86	3,68	4,26	2,11
	$f_{R,3}$	1,68	2,77	1,70	2,70	3,96	1,92
	$f_{R,4}$	1,52	2,46	1,51	2,56	3,52	1,67

erfolgt weggesteuert durch die Mittendurchbiegung. Zusätzlich wird die Rissbreite mit erfasst. Aufgrund der verminderten Probekörperhöhe ($h_{sp,DINEN14651} = 125 \text{ mm}$, $h_{sp,EFNARC} = 90 \text{ mm}$) erfolgt eine Umrechnung der in (DIN EN 14651:2007-12) angegebenen Prüfgeschwindigkeit durch dehnungsäquivalente Rissöffnungen. Bis zu einer Durchbiegung von $0,26 \text{ mm}$ beträgt die Prüfgeschwindigkeit $0,06 \text{ mm/min}$ danach $0,25 \text{ mm/min}$ bis zur Mittendurchbiegung von $5,5 \text{ mm}$. Die Mittelwerte der Biegezugprüfungen sind in Tabelle 3.3 angegeben.

In Tabelle 3.4 sind die Mittelwerte der Betondruckfestigkeit, des Elastizitätsmoduls, der Spaltzugfestigkeit sowie der Keilspaltzugfestigkeit für die Grundplatten zusammengestellt. Dabei weisen die Spritzbetonmischungen unabhängig vom Fasergehalt nahezu gleich große Druckfestigkeiten auf.

Tabelle 3.4: Festbetoneigenschaften der Grundplatten in N/mm^2

	M-0	M-1	M-2	M-4
$f_{cm,cyl,28}$	35,16	44,54	44,46	45,29
$f_{cm,cyl,56}$	36,48	47,78	49,82	47,25
$E_{cm,cyl,28}$	32788	22957	23196	21682
$E_{cm,cyl,56}$	32813	23152	24433	23852
$f_{ctm,spl,cyl,28}$	3,29	4,19	4,53	5,06
$f_{ctm,spl,cyl,56}$	3,30	4,83	4,97	5,21
$f_{ctm,spl,cube,28}$	–	3,53	4,05	4,17
$f_{ctm,spl,cube,56}$	3,64	3,55	4,12	3,95
$f_{ctm,kspl,cube,56}$	1,60	1,78	1,57	2,08

Tabelle 3.5: Festbetoneigenschaften der Ergänzungsplatten in N/mm^2

	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
$f_{cm,cyl,28}$	40,53	35,99	39,78	36,85	47,37
$E_{cm,cyl,28}$	23977	23309	20905	20295	22499
$f_{ctm,spl,cyl,28}$	4,49	4,38	4,99	4,75	4,97
$f_{ctm,spl,cube,28}$	3,36	3,68	3,78	4,40	3,68
$f_{ctm,kspl,cube,28}$	1,28	1,58	1,91	1,21	1,28

Die Festigkeitswerte der Spritzbetonmischungen der Ergänzungsplatten können Tab 3.5 entnommen werden. Dabei ist auffällig, dass die Nassspritzbetonmischungen (M-1, M-2, M-3 und M-4), trotz gleicher Betonzusammensetzung wie bei der Herstellung der Grundplatten, allesamt geringere Betondruckfestigkeiten aufweisen, während der Elastizitätsmodul annähernd in derselben Spannweite wie beim ersten Spritzbetonauftrag liegt. Die Zugfestigkeiten der Grundplatten und der Ergänzungsplatten erreichen ähnliche Werte. Die Abweichung der Betondruckfestigkeit der Probekörper mit Farbpigmenten $48,61 N/mm^2$ und ohne Farbpigmente $47,30 N/mm^2$, des Elastizitätsmoduls mit Farbpigmenten $30106 N/mm^2$ und ohne Farbpigmente $30172 N/mm^2$ und der Spaltzugfestigkeit mit Farbpigmente $3,48 N/mm^2$ und ohne Farbpigmente $3,38 N/mm^2$ liegen im normalen Streubereich der jeweiligen Festigkeitswerte. Ein Einfluss der Farbpigmente auf die mechanische Festigkeit kann somit im vorliegenden Fall ausgeschlossen werden. Sämtliche Einzelwerte der Festbetoneigenschaften sind in Anhang A.1 enthalten.

Die tatsächlich vorhandenen Stahlfasergehalte, der Faserrückprall sowie das Ausbreitmaß und die Konsistenzklassen der verschiedenen Spritzbetonmischungen sind in den Tabellen 3.6 und 3.7

Tabelle 3.6: Istwerte des Stahlfasergehalts in kg/m^3 , Faserrückprall und Ausbreitmaß in mm der Grundplatten

	M-0	M-1	M-2	M-4
Soll-Fasergehalt	0	0	30,0	50,0
Ist-Fasergehalt ¹	0	0	31,7	50,8
Ist-Fasergehalt ²	0	0	15,1	28,8
Faserrückprall	0	0	49,5 %	42,5 %
Ausbreitmaß ³	380	625	580	585
Konsistenzklasse ⁴	F2	F5	F5	F5

¹ nach (DIN EN 14488-7:2006-08) am Frischbeton der Grundmischung

² nach (DIN EN 14488-7:2006-08) am Festbeton, je 6 Bohrkernen $\varnothing 100 \times 200 mm$ je Mischung

³ nach (DIN EN 12350-5:2009-08)

⁴ nach (DIN EN 206:2014-07)

Tabelle 3.7: Istwerte des Stahlfasergehalts in kg/m^3 , Faserrückprall und Ausbreitmaß in mm der Ergänzungsplatten

	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
Soll-Fasergehalt	0	30,0	40,0	50,0	30,0
Ist-Fasergehalt ¹	0	34,3	43,3	58,0	–
Ist-Fasergehalt ²	0	20,4	29,8	37,8	21,7
Faserrückprall	0	31,9 %	25,6 %	24,4 %	27,8 %
Ausbreitmaß ³	685	655	605	615	–
Konsistenzklasse ⁴	F6	F6	F5	F5	–

¹ nach (DIN EN 14488-7:2006-08) am Frischbeton der Grundmischung

² nach (DIN EN 14488-7:2006-08) am Festbeton, je 6 Bohrkernen $\varnothing 100 \times 200 \text{ mm}$ je Mischung

³ nach (DIN EN 12350-5:2009-08)

⁴ nach (DIN EN 206:2017-01)

aufgeführt. Die Ermittlung des Ist-Fasergehaltes am Festbeton erfolgt dabei an je 6 Bohrkernen je Mischung. Der Stahlfasergehalt im Frischbeton wird an der Grundmischung vor dem Spritzbetonauftrag durchgeführt. Dazu wird je Betonmischung eine Probe direkt aus dem Betonmischer entnommen und der Ist-Fasergehalt durch Auswaschen und Trocknen bestimmt. Die tatsächlich in der Grundmischung enthaltenen Faservolumen stimmen bei der Herstellung der Grundplatten und Ergänzungsplatten gut mit dem angestrebten Stahlfasergehalt überein. Der Stahlfaserrückprall wird aus dem Ist-Fasergehalt im Festbeton und dem Soll-Fasergehalt bestimmt.

$$\text{Faserrückprall} = \frac{\text{Soll-Fasergehalt} - \text{Ist-Fasergehalt}}{\text{Soll-Fasergehalt}} \quad (3.1)$$

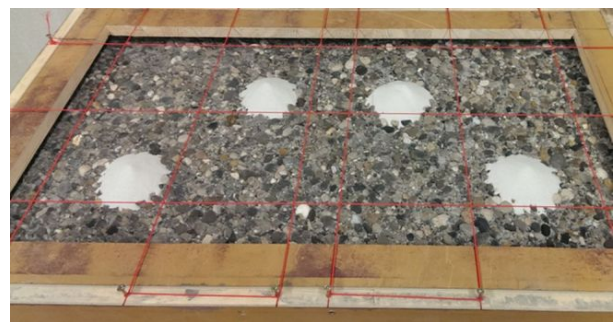
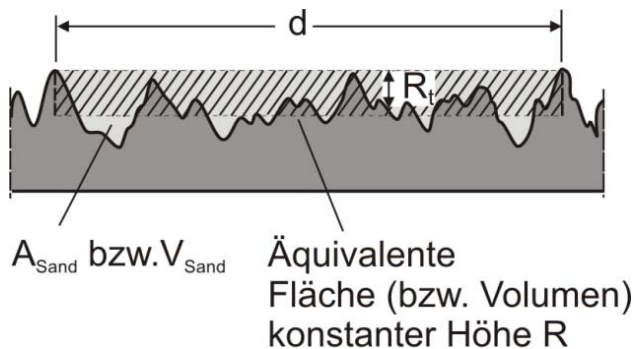
Bei Auftrag der Ergänzungsplatten liegt dieser bei 25 – 30%. Der tatsächlich im Festbeton vorhandene Stahlfasergehalt im erhärteten Spritzbeton erscheint durch den Stahlfaserrückprall von 40 – 50% bei den gespritzten Mischungen der Grundplatten niedrig, jedoch zeigt die Auswertung von verschiedenen Literaturstellen (Banthia et al. 1994), (Austin et al. 1997), (Heere et al. 1999) (Cengiz u. Turanli 2004), (Bindiganavile u. Banthia 2006) und (Kaufmann et al. 2013), dass der Stahlfaserrückprall an beiden Spritzterminen durchaus in einem für Stahlfaserspritzbeton üblichen Bereich liegt.

3.6 Oberflächenrauheiten

Wie in (Fischer et al. 2014) wird in Ermangelung einer genormten Methode zur Ermittlung von Rauheitskenngrößen im konstruktiven Betonbau das anerkannte, praxistaugliche Sandflächenverfahren nach Kaufmann verwendet. Dabei wird zur Bestimmung der Rautiefe eine definierte Sandmenge auf der zu prüfenden Oberfläche kreisförmig verteilt, sodass die Vertiefungen gerade ausgefüllt sind. Die mittlere Rautiefe ergibt sich zu

$$R_t = \frac{4V}{\pi \cdot d^2} \quad (3.2)$$

und kann als gedachter zylindrischer Körper mit einer mittleren Höhe R_t und dem Durchmesser d interpretiert werden. Das Sandvolumen V soll zwischen 25 und 50 cm^3 groß und aus trockenem Quarzsand mit einer Körnung von $0,1$ bis $0,5 \text{ mm}$ bestehen. Der Sand ist auf die trockene und saubere Oberfläche zu schütten und mit einem definierten Holzstempel von $\varnothing = 50 \text{ mm}$ durch spiralförmig sich erweiternde Kreisbewegungen in die Vertiefung der Oberfläche ohne Druck einzureiben. Bei der Bestimmung der mittleren Rautiefe R_t nach Kaufmann wird angestrebt die Fläche jedes einzelnen Versuchskörpers größtmöglich zu erfassen. Dafür wird die Sandmenge je nach geplanter Rautiefe angepasst, sodass für die jeweilige Soll-Rautiefe ein mittlerer Kreisdurchmesser von 15 cm erreicht wird. Um einigermaßen aussagekräftige Werte zu erhalten erfolgt die Bildung des Mittelwertes anhand von mindestens drei Messungen pro Versuchskörper (Keilspaltzugkörper bzw. Spaltzugkörper). Die mittlere Rautiefe je Verbundplatte (ermittelt als Mittelwert der acht Messstellen je Verbundplatte) kann Tabelle 3.1 entnommen werden. Die Einzelwerte sowie die Mittelwerte je Verbundkörper sind im Anhang A.2 dokumentiert.



(a) Darstellung der Rautiefe R_t nach Kaufmann (Lenz 2012)

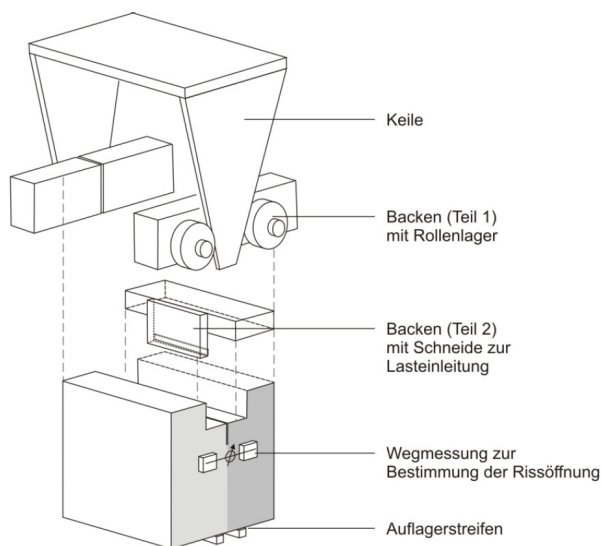
(b) Durchführung des Sandflächenverfahrens

Bild 3.10: Ermittlung der Rautiefe nach Kaufmann

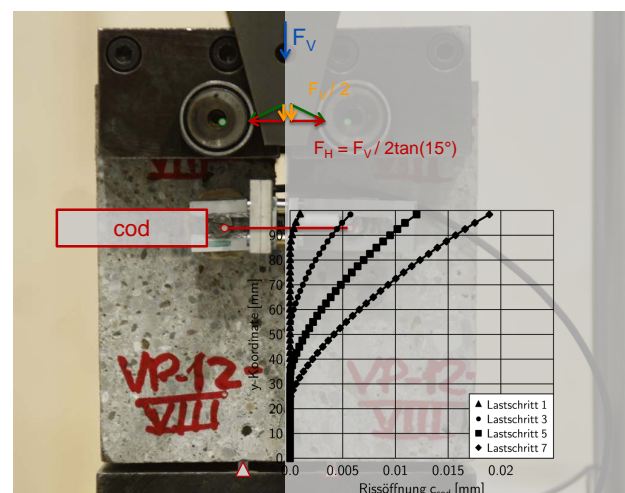
4 Numerische Untersuchungen

4.1 Inverse Analyse der Keilspaltzugversuche

Wie in (Fischer et al. 2014) werden zur Bestimmung der Bruchenergie sowie der Keilspaltzugfestigkeit Keilspaltzugversuche durchgeführt. Der schematische Versuchsaufbau der Keilspaltzugversuche ist in Bild 4.1 (a) dargestellt. Der Probekörper wird zur Versuchsdurchführung auf zwei Linienlager aufgestellt. Anschließend werden die Backen mit Schneide zur Lasteinleitung und Rollenlager in die Nut am oberen Ende des Probekörpers gelegt. Auf Höhe der geschnittenen Risskerbe werden Dehnungsaufnehmer befestigt und die Rissöffnung c_{cod} gemessen. Die Belastung erfolgt durch eine vertikale Verschiebung der Keile, die von der gemessenen Rissöffnung gesteuert wird. Aus der Vertikalkraft lässt sich durch trigonometrische Beziehungen, wie in Bild 4.1(b) dargestellt, eine horizontale Spaltkraft berechnen.



(a) Schematischer Versuchsaufbau (Lenz 2012)



(b) Modellierung mit FEM für inverse Analyse

Bild 4.1: Ermittlung der Keilspaltzugfestigkeit

Während beim Spaltzugversuch der Probekörper bei Erreichen der Maximallast versagt, und die Zugfestigkeit direkt aus der bestimmten Prüfkraft unter Verwendung der bekannten Spannungsüberhöhungen an der Lasteinleitung bestimmt werden kann, bildet sich beim Keilspaltzugversuch eine sich ändernde Bruchprozesszone aus. Die Keilspaltzugfestigkeit muss nachträglich anhand einer inversen Analyse der im Experiment erhaltenen Daten bestimmt werden. Grundsätzlich kann eine inverse Analyse als Ermittlung von Eingangswerten anhand von Ausgangswerten beschrieben werden. Im Fall des Keilspaltzugversuches heißt dies, dass die Materialeigenschaften, die als Ein-

gangswerte für ein numerisches Modell zur Nachrechnung des Keilspaltzugversuches fungieren, durch die Ausgangswerte des Experiments, dem Spaltkraft-Rissöffnungsverlauf ermittelt werden.

Dafür wird jeder Versuchskörper mit seiner tatsächlichen Geometrie modelliert. Da sich im Versuchskörper nahezu eine ebener Spannungszustand einstellt, kann der Versuchskörper durch ein zweidimensionales FEM-Modell abgebildet werden. Der Beton wird dabei mit linear-elastischem Materialverhalten vereinfacht, da sich die Entfestigung des Materials ausschließlich in der Fuge der beiden Verbundpartner durch Ausbildung einer Bruchprozesszone, ausgehend von der Risspitze, fortpflanzt. Das einaxiale Entfestigungsverhalten lässt sich bei Stahlfaserbeton mit unterkritischen Fasergehalten grob in zwei Bereiche aufteilen. Im ersten abfallenden Ast der Spannungs-Rissöffnungslinie ist die Tragwirkung der Faser sehr gering. Hier wirkt zusätzlich zum Zugtraganteil der Betonmatrix nur die Adhäsion der Faser mit der umgebenden Betonmatrix. Die Spannungs-Rissöffnungslinie fällt bei geringen Fasermengen zunächst ähnlich schnell ab wie bei unbewehrtem Beton. Im zweiten abfallenden Ast der Spannungs-Rissöffnungslinie wirken, bei optimal auf den Beton abgestimmter Fasergeometrie und Fasermaterialeigenschaften, der Reibverbund zwischen Fasern und Betonmatrix sowie bei Fasern mit formschlüssiger, mechanischer Verankerung zusätzlich der Formverbund. Durch die nahezu konstante Reibspannung stabilisiert sich die Spannungs-Rissöffnungslinie in diesem Bereich bzw. nimmt langsam mit der sich verringernden Reibfläche bzw. mit fortschreitender plastischer Verformung und somit der Verringerung des Formverbundes ab. Eine Übersicht über mathematischen Beschreibungsmöglichkeiten des Rissöffnungsverhaltens von Stahlfaserbeton ist z. B. in (Thomee 2005) enthalten. Dabei werden neben einer konstanten Spannungs-Rissöffnungsbeziehung, mehrere bilineare und trilineare Spannungs-Rissöffnungsansätze sowie eine Potenzfunktion für die Spannungs-Rissöffnungsbeziehung beschrieben. Für die inverse Analyse der durchgeführten Keilspaltzugversuche aus Stahlfaserspritzbeton werden entlang der Fuge Interfaceelemente mit einem bilinearen fiktiven Rissmodell angeordnet. Im Gegensatz zu (Löfgren et al. 2007) konnten die hier durchgeführten Keilspaltzugversuche an Stahlfaserspritzbeton sehr gut mit dem in (fib Model Code 2010) beschriebenen, bilinearen fiktiven Rissmodell für die Interfaceelemente nachgerechnet werden. Das in Bild 4.2 dargestellte fiktive Rissmodell ist durch

$$\sigma_{ct} = \begin{cases} f_{ct} \cdot (1,0 - 0,8 \cdot \Delta u_N) & \text{für } \Delta u_N \leq \Delta u_{N1} \\ f_{ct} \cdot (0,25 - 0,05 \cdot \Delta u_N) & \text{für } \Delta u_N \geq \Delta u_{Nc} \end{cases} \quad (4.1)$$

mit

$$\alpha_{ft} = \sigma_1 / f_{ct} \quad (4.2)$$

$$\alpha_{wc} = \Delta u_{N1} / \Delta u_{Nc} \quad (4.3)$$

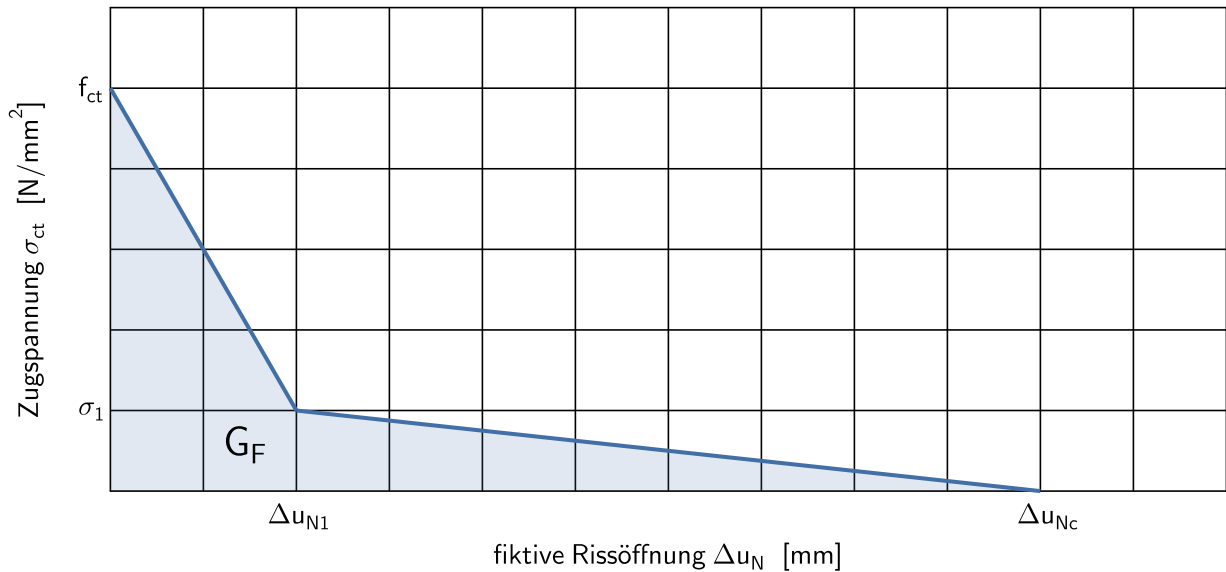
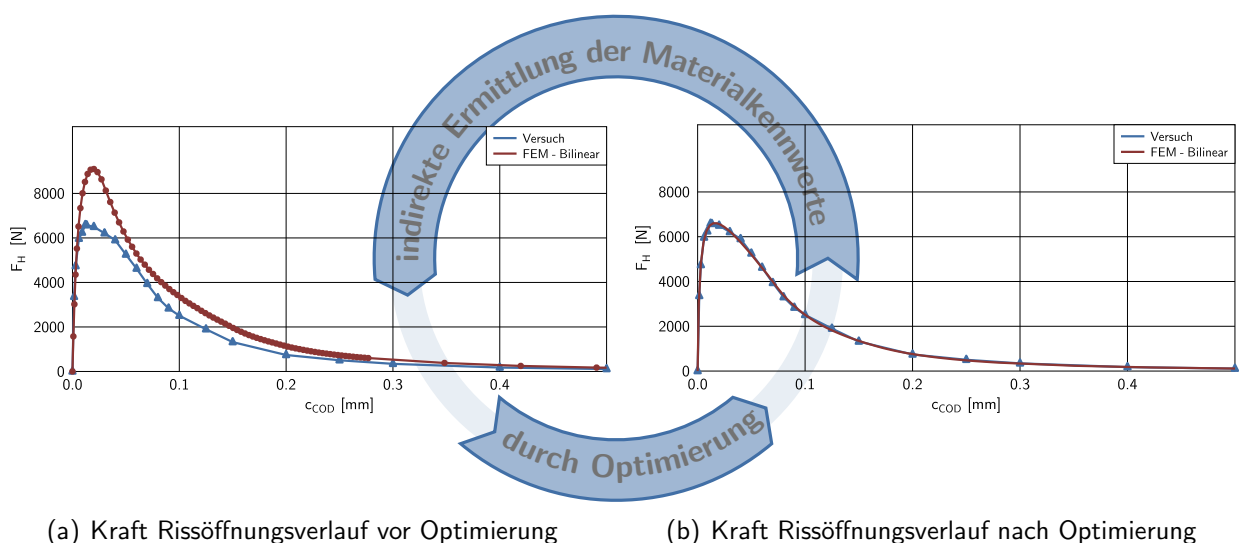


Bild 4.2: Bilineares fiktives Rissmodell nach (fib Model Code 2010)

abschnittsweise definiert. Neben den Formparametern des bilinearen Verbundmodells α_{ft} und α_{wc} stellen das Elastizitätsmodul E_c , die Bruchenergie G_F und die Zugfestigkeit f_{ct} die variablen Eingangsgrößen des numerischen Systems dar. Diese werden ausgehend von einem Startparametersatz so lange variiert, bis die Abweichung der experimentellen Last-Verformungskurve zur numerisch ermittelten Last-Verformungskurve ein Minimum erreicht. Die besten Ergebnisse des automatisierten Optimierungsvorganges werden bei der vorliegenden inversen Analyse durch die Kopplung eines Partikelschwarmalgorithmus mit einer gradientenfreien Simplex-Methode erzielt. Das grundsätzliche Vorgehen der inversen Analyse der Keilspaltzugfestigkeit ist in Bild 4.3 illustriert.



(a) Kraft Rissöffnungsverlauf vor Optimierung

(b) Kraft Rissöffnungsverlauf nach Optimierung

Bild 4.3: Inverse Analyse der Keilspaltzugversuche

Die Mittelwerte $f_{ctm,kspl}$ der Keilspaltzugfestigkeiten sind in Tabelle 3.4 und Tabelle 3.5 zusammengefasst. Die Einzelwerte der numerisch ermittelten Keilspaltzugfestigkeiten $f_{ct,kspl}$ sowie die Bruchenergien G_F sämtlicher monolithischer Versuchskörper sind in Anhang A.1 aufgeführt. Die Ergebnisse für die Verbundkörper können Anhang A.3 entnommen werden.

5 Ergebnisse der Untersuchungen

5.1 Allgemeines

Die Auswertung der Spaltzugwürfel erfolgt analog zu (Fischer et al. 2014). Trotz abweichender Abmessung der Lasteinleitungsstreifen wird die Formel nach (DIN EN 12390-6:2010-09)

$$f_{ct,spl} = \frac{2 \cdot F_{max}}{\pi \cdot b \cdot h} \quad (5.1)$$

unter Vernachlässigung der Formfunktionen, die den Einfluss des Geometrieverhältnisses von Lasteinleitungsstreifen zu Probekörperabmessung berücksichtigen, verwendet. Die mechanischen Kennwerte der Keilspaltzugwürfel werden anhand der in Abschnitt 4 gezeigten inversen Analyse ermittelt. Im Folgenden werden die experimentell ermittelten Verbundkennwerte als absolute und als relative Einzel- sowie Mittelwerte in Abhängigkeit von der mittleren Rautiefe nach Kaufmann dargestellt. Bei der Ermittlung der Mittelwerte der Spaltzugfestigkeiten werden zur Mittelwertbildung der Rauheit nur die sechs Messstellen je Verbundplatte verwendet, aus denen Spaltzugkörper geschnitten werden. Bei der Mittelwertbildung der Rauheiten der mittleren Keilspaltzugfestigkeiten bzw. der Bruchenergien wird analog verfahren. Die relativen Festigkeitskennwerte sind auf den geringeren monolithischen Festigkeitskennwert (ermittelt am Spaltzug- bzw. Keilspaltzugwürfel), geprüft am Versuchstag der Verbundkörper, der beiden Verbundpartner bezogen. Zusätzlich zu den Einzel- (gefüllte Marker) und Mittelwerten (ungefüllte Marker) sind die Standardabweichungen der Rauheiten je Verbundplatte in horizontaler Richtung sowie die Standardabweichungen der Festigkeiten bzw. Bruchenergien in vertikaler Richtung dargestellt. Zur Darstellung der Ergebnisse werden die mechanischen Kennwerte in Abhängigkeit von der Rautiefe, die neben dem Bemessungswert der Zugfestigkeit durch den Beiwert c_i in den momentan gültigen Bemessungsansatz eingeht, dargestellt. Der Festigkeitseinfluss wird durch die Umrechnung in relative Festigkeiten teilweise berücksichtigt. Die Aufzählung der in den Diagrammen dargestellten Verbundplatten erfolgt zur einfacheren Zuordnung in aufsteigender Reihenfolge der mittleren Rautiefe nach Kaufmann der Spaltzugkörper.

Für die Auswertung der Schub-Druckkörper (Versuchstyps IIc) werden wie in (Wolfram 1958), (DAfStb Heft 372), (Koenning 1991), (Reinecke 2004) und (Zilch u. Müller 2007) die Fugenspannungen entlang der Fuge als konstant angenommen. Die Spannungen in der Verbundfuge werden in Abhängigkeit von der Länge l und der Breite b der Verbundfuge, sowie dem Fugenneigungswinkel der Verbundfuge zur Vertikalen α mit

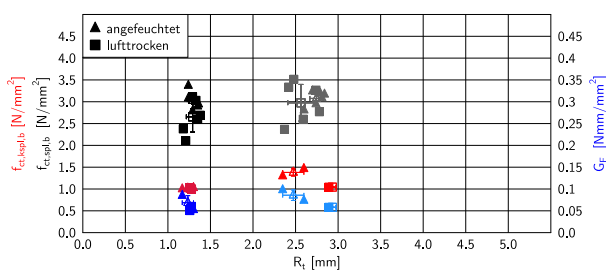
$$\tau = \frac{F_{max}}{l \cdot b} \cdot \sin(\alpha) \quad (5.2.a)$$

$$\sigma_n = \frac{F_{max}}{l \cdot b} \cdot \cos(\alpha) \quad (5.2.b)$$

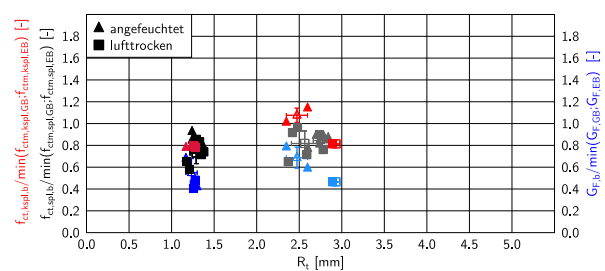
berechnet.

5.2 Einfluss der Oberflächenvorbehandlung

Das Vornässen der gesäuberten Auftragsfläche, wie dies nach (DIN 18551:2014-08) bei der Instandsetzung und Verstärkung von Tragwerken gefordert wird, führt bei Ergänzung von Normalbetonoberflächen der Rauheitskategorie *rau* (Rautiefe nach Kaufmann $\leq 1,5\text{ mm}$) mit der Trockenspritzbetonmischung M-5 zu einer geringen Festigkeitssteigerung. Die mittlere relative Verbundfestigkeit vorgehässeter Fugen beträgt 0,83 im Vergleich zur mittleren relativen Verbundfestigkeit lufttrockener Fugen von 0,73. Für mittlere Rautiefen nach Kaufmann $\geq 1,5\text{ mm}$ ist keine nennenswerte Festigkeitssteigerung festzustellen.



(a) Darstellung der absoluten Verbundkennwerte



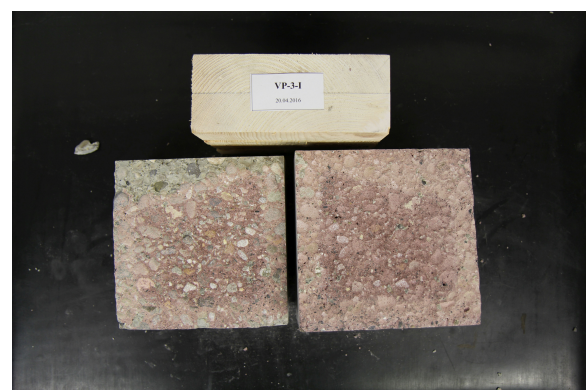
(b) Darstellung der relativen Verbundkennwerte

Bild 5.1: Mechanische Verbundkennwerte für Verbundkörper mit angefeuchteter (VP-1, VP-2) und luftgetrockneter Grundplattenoberfläche (VP-3, VP-4)

Dies zeigen auch die Bruchbilder der Versuchskörper. Während der Bruch bei den Verbundkörpern mit angefeuchteter Fuge immer in der Schicht des minderfesten Verbundpartners eintritt, verläuft der Bruch bei nahezu allen Versuchskörpern der mit luftgetrockneter Oberfläche ergänzten Verbundplatte direkt entlang der Verbundfuge. Beispielhaft für alle Versuchskörper der Verbundplatte VP-3 ist dies für den Spaltzugwürfel VP-3-I in Bild 5.2 illustriert.



(a) Vorderansicht bezogen auf Lasteinleitung



(b) Bruchfläche des Verbundkörpers

Bild 5.2: Riss verläuft in der Verbundfuge von VP-3

5.3 Einfluss des Betonuntergrundes

Die Versuchsergebnisse von Verbundkörpern, deren spritzraue Oberfläche durch Spritzbeton ergänzt wurden, führten in (Fischer et al. 2014) zu deutlich geringeren Verbundfestigkeiten als aufgrund der, mit verzahnten Oberflächen vergleichbaren, hohen mittleren Rautiefe nach Kaufmann zu erwarten gewesen wäre. Begründet wurde dies durch die nicht vollständig eingespritzte Oberfläche (s. Bild 5.3) und die sich dadurch verringere tatsächliche Adhäsionsfläche. Da in (Fischer et

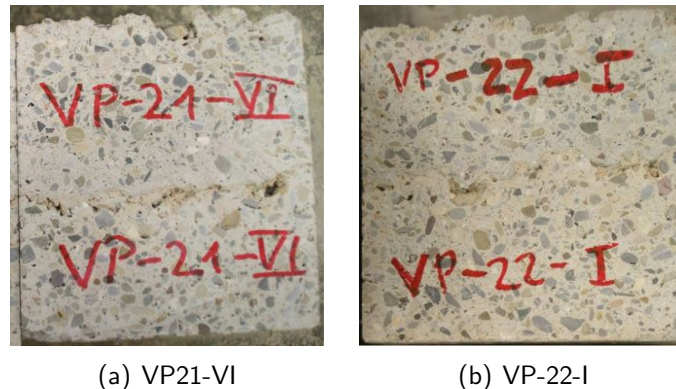


Bild 5.3: Spritzschatten in der Verbundfuge bei spritzrauen Oberflächen (Fischer et al. 2014)

al. 2014) die Schalungen der Verbundplatten, wie in (DIN EN 14488-1:2005-11) beschrieben, in einem Winkel von 20° zur Senkrechten angelehnt wurden und zudem der Beton mit einer verringerten Spritzleistung von ca. $8,6 \text{ m}^3/h$ gefördert wurde, wird bei der Herstellung der aktuellen Versuchsserie verstärkt darauf Wert gelegt, dass der Spritzenenergieeintrag gewährleistet ist. Dem wird durch die Befestigung der Schalungen der Verbundplatten auf großformatigen, vertikal aufgestellten Betonplatten und durch eine im Tunnelbau übliche Betonförderleistung von ca. $20 \text{ m}^3/h$ Rechnung getragen. Wie exemplarisch in Bild 5.4 zu erkennen ist, wird die spritzraue

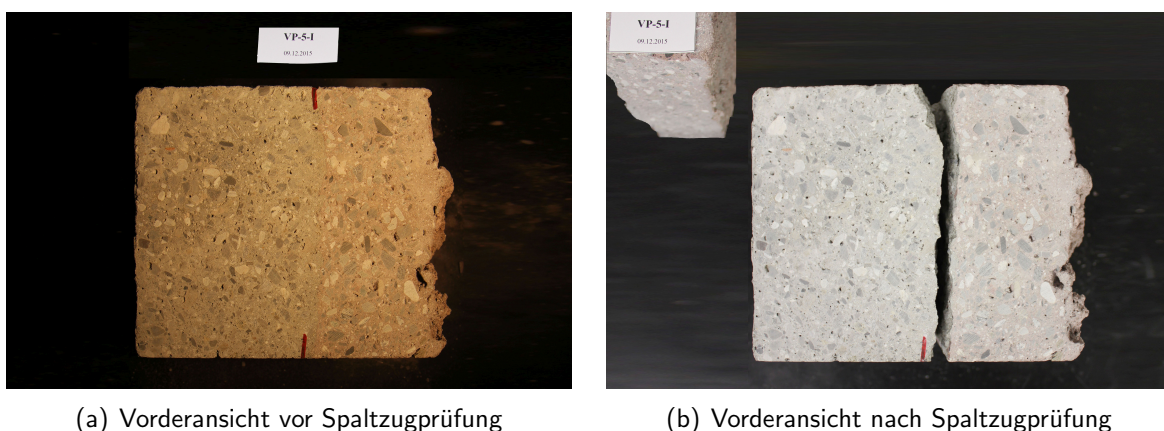


Bild 5.4: Vollständig eingespritzte spritzraue Oberfläche von VP-5-I

Oberfläche dadurch vollständig durch den Spritzbeton der Ergänzungsschicht benetzt und es entstehen keine Spritzschatten bei der Herstellung der Verbundkörper mit spritzrauer Oberfläche wie dies in (Fischer et al. 2014) beobachtet wurde. Während die in (Fischer et al. 2014) beschriebenen Verbundkörper mit spritzrauer Oberfläche lediglich mittlere relative Verbundspaltzugfestigkeiten von 0,48 beziehungsweise 0,64 erreichen konnten, versagen die Versuchskörper von VP-5, wie in Bild 5.5 dargestellt, bei einer mittleren relativen Verbundspaltzugfestigkeit von 0,95 und somit quasi monolithisch.

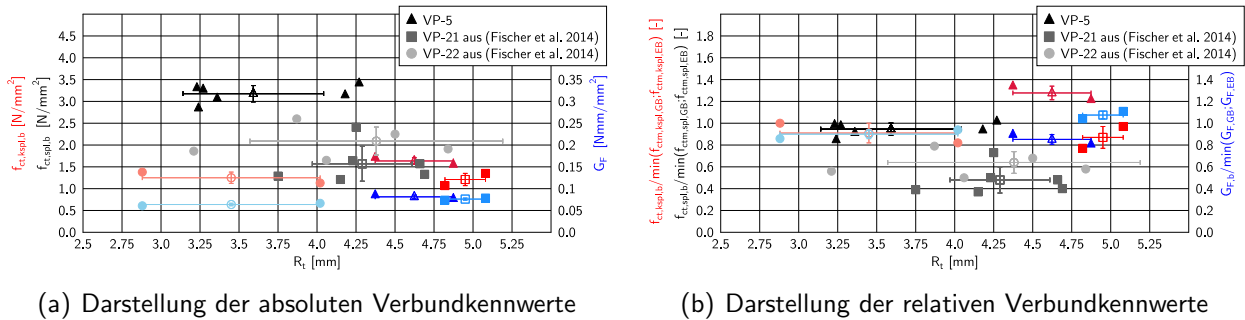


Bild 5.5: Mechanische Verbundkennwerte für Verbundkörper mit Spritzbetonergänzung und spritzrauer Oberfläche

Auch der in Bild 5.6 illustrierte Vergleich von VP-5 mit den durch Strahlen mit festen Strahlmitteln beziehungsweise Höchstdruckwasserstrahlen bis zur Rauheitskategorie *verzahnt* aufgerauten Oberflächen der Versuchskörper VP-14 und VP-16 aus (Fischer et al. 2014) lässt auf keine Verringerung der Verbundfestigkeiten bei *spritzrauen* Oberflächen schließen. Die Verbundkörper der Verbundplatte VP-5 erreichen nahezu dieselben absoluten und relativen Festigkeitskennwerte wie die Verbundkörper VP-14 und VP-16 aus (Fischer et al. 2014), dessen Normalbetongrundplatten nachträglich durch Strahlen mit festen Strahlmitteln beziehungsweise Höchstdruckwasserstrahlen aufgeraut wurden.

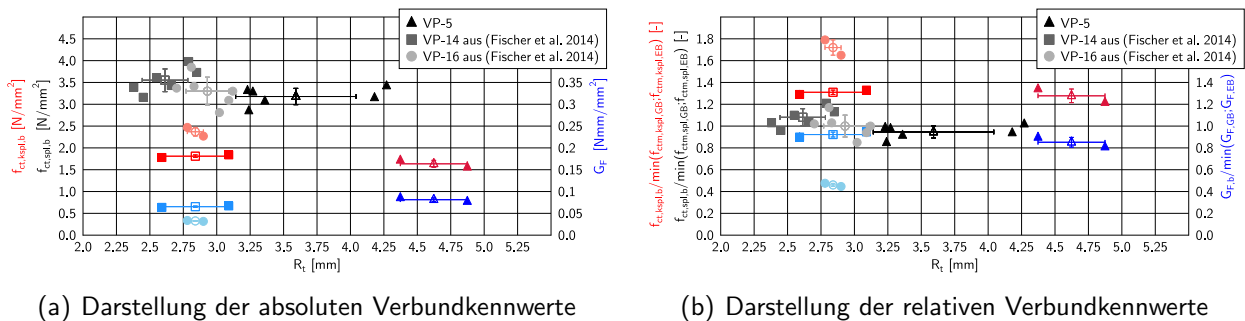


Bild 5.6: Vergleich der mechanischen Verbundkennwerte von Verbundkörpern mit Spritzbetonergänzung und spritzrauer Oberfläche (VP-5) mit Spritzbetonergänzung und verzahnter Normalbetonoberfläche (VP-14 und VP-16 aus (Fischer et al. 2014))

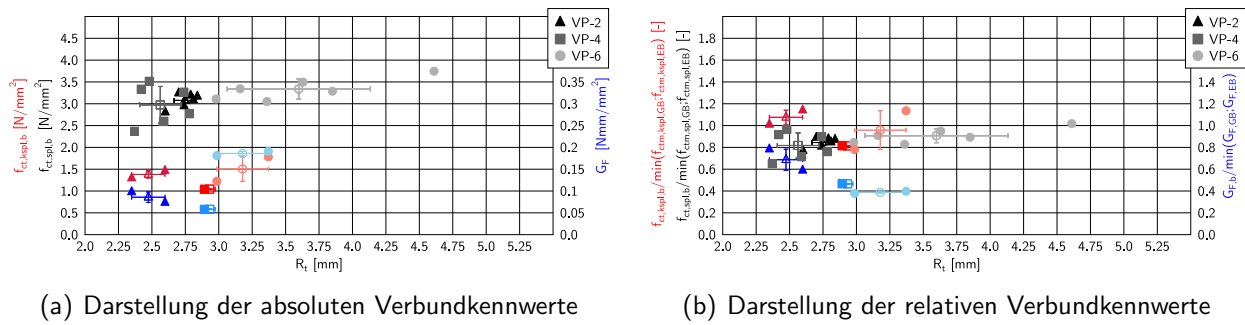
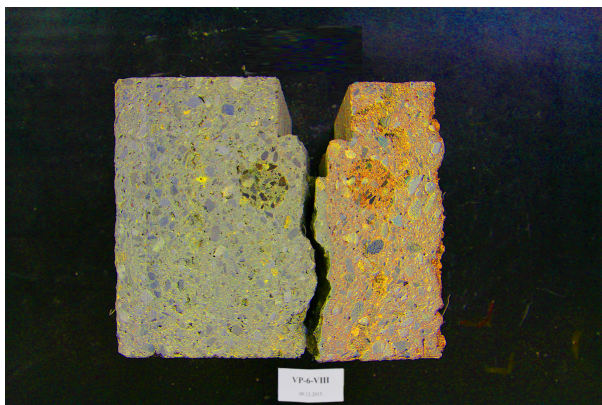


Bild 5.7: Vergleich der mechanischen Verbundkennwerte von Verbundkörpern mit Stahlfaserspritzbetonergänzung und verzahnter Normalbetonoberfläche (VP-2, VP-4) mit Stahlfaserspritzbetonergänzung und spritzrauer Stahlfaserspritzbetonoberfläche (VP-6)

Der Vergleich von Stahlfaserspritzbetonergänzungen auf nachträglich aufgeraute Normalbetonoberflächen (VP-2, VP-4) und auf Grundplatten bestehend aus Stahlfaserspritzbeton (VP-6) zeigt nahezu gleiche absolute sowie gleiche relative Verbundspaltzugfestigkeiten. Die höheren absoluten Werte der Bruchenergie des Verbundkörpers VP-6 dessen Grundplatte einen Fasergehalt von $C_f = 30 \text{ kg/m}^3$ enthält, sind nicht auf ein Mitwirken etwaig eingespritzter Stahlfasern der ersten Schicht, und somit die Verbundfuge kreuzenden Stahlfasern zurückzuführen, sondern ist darin begründet, dass der Verbund zwischen den beiden Verbundpartnern so gut ist, dass ein monolithisches Versagen im Grundbeton eintritt. Dies zeigt Bild 5.8. Obwohl für den Keilspaltzugversuch eine Kerbe in der Lage des Risses gesägt wurde, breitet sich der Riss im Beton der Grundplatte aus.



(a) Vorderansicht des Keilspaltzugkörpers¹



(b) Bruchfläche des Keilspaltzugkörpers

Bild 5.8: Riss verläuft im Grundbeton von VP-6

¹Foto zur besseren Sichtbarkeit der Fuge mit Farbfilter nachbearbeitet

5.4 Einfluss des Fasergehaltes

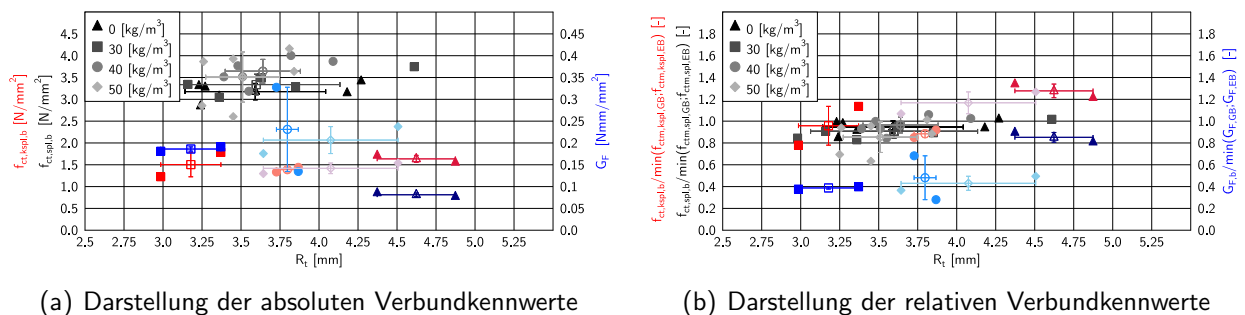
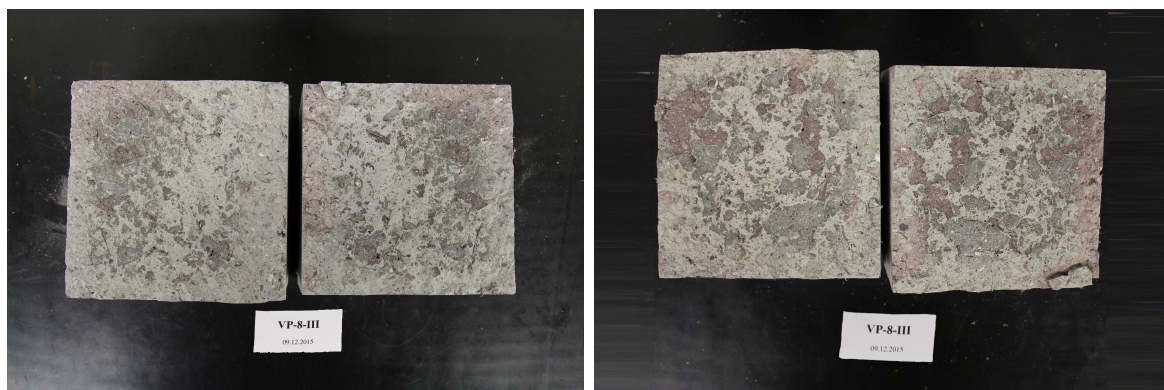


Bild 5.9: Mechanische Verbundkennwerte für Verbundkörper mit unterschiedlichen Stahlfasergehalten

Die beiden Prüfkörper VP-8-III und VP-8-V sind durch ihre geringen Verbundfestigkeiten auffällig. Bei Anwendung des Ausreißertests nach (Grubbs u. Beck 1972) sind diese nicht als Ausreißer zu werten, jedoch zeigen die Bruchbilder in Bild 5.10 hellere Bereiche in der Verbundfuge. Eine physikalische Ursache, und somit ein reproduzierbarer Fehler in der Versuchskörperherstellung, der einen Ausschluss als echten Ausreißer rechtfertigen würde, kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht gefunden werden. Würden die Verbundspaltzugfestigkeiten der Prüfkörper VP-8-III und VP-8-



(a) Bruchbild VP-8-III

(b) Bruchbild VP-8-V

Bild 5.10: Optische Farbauffälligkeiten in der Verbundzone

V als Ausreißer ausgeschlossen werden, ergäbe sich für einen Fasergehalt von $C_f = 50 \text{ kg/m}^3$ eine Verbundspaltzugfestigkeit von $f_{ct,spl,b} = 3,90 \text{ N/mm}^2$ und somit eine positive Korrelation zwischen Fasergehalt und absoluter Verbundfestigkeit. Die Betrachtung der relativen Verbundfestigkeiten in Bild 5.9 zeigt jedoch, dass die Fasern keine Auswirkung auf die Spitzenverbundfestigkeit haben und alle Verbundkörper nahezu die monolithische Festigkeit erreichen. Da die Fasern im Nachbruchbereich mitwirken sind auch die absoluten Bruchenergien bei den Verbundkörpern

mit Stahlfasern höher. Eine eindeutige Aussage über den Einfluss des Fasergehaltes auf die Verbundfestigkeit kann nicht getroffen werden, jedoch erreichen, wie in Bild 5.9(b) zu sehen ist, sämtliche Probekörper außer VP-8-III und VP-8-V nahezu die monolithische Festigkeit. Eine Verminderung der Festigkeiten mit steigendem Fasergehalt scheint somit nicht sehr wahrscheinlich.

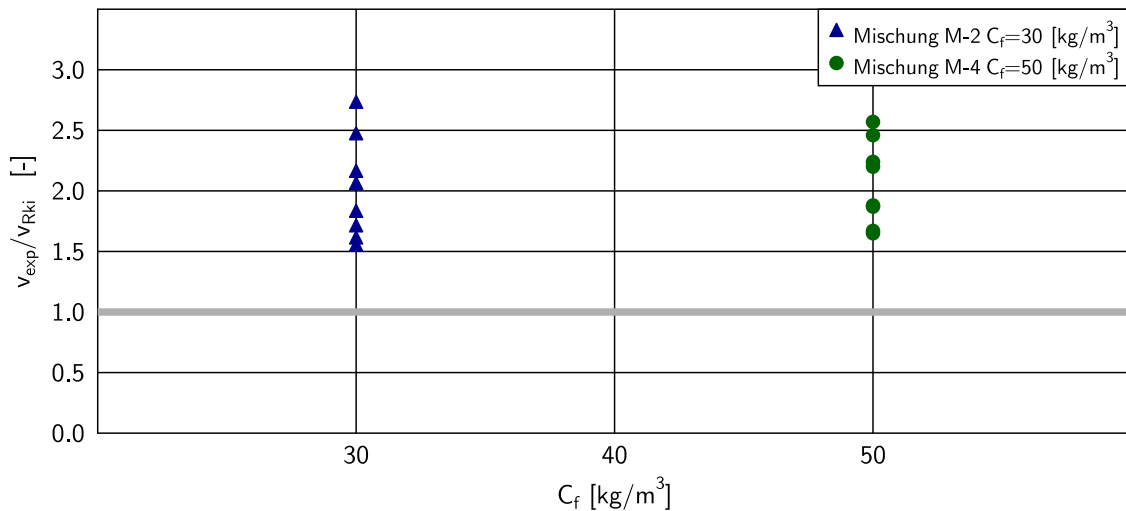
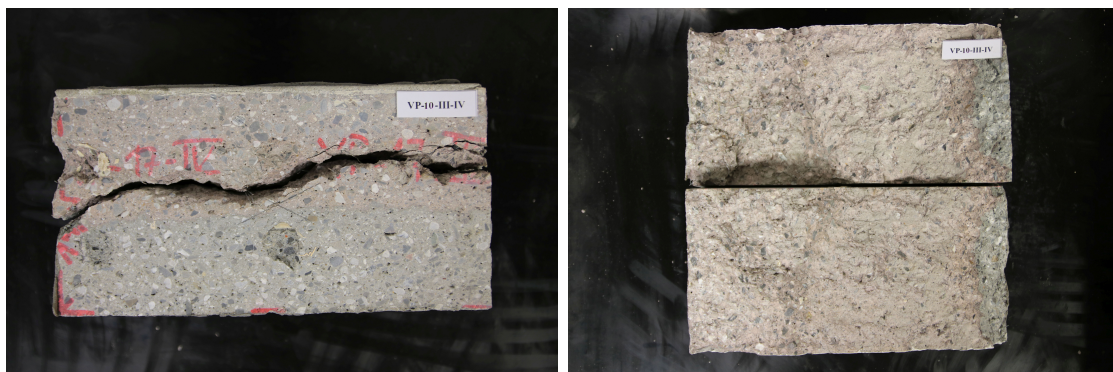


Bild 5.11: Vergleich von experimentellen Festigkeiten mit den charakteristischen Werten nach Gleichung 2.1

Auch beim Vergleich der experimentellen Ergebnisse der Schub-Druckkörper mit einem Fasergehalt von $C_f = 30 \text{ kg/m}^3$ (Körper der Verbundplatten VP-9 und VP-10) und $C_f = 50 \text{ kg/m}^3$ (Körper der Verbundplatten VP-10 und VP-11) zeigt sich keine eindeutige Abhängigkeit der Ergebnisse vom Fasergehalt. Die in Bild 5.11 dargestellten Verhältniszerte aus experimentell ermittelter Schubspannung (nach Gleichung 5.2.a) und den nach EC-2 aufnehmbaren Spannungen (nach Gleichung 2.1) auf charakteristischem Niveau, liegen alle auf der sicheren Seite. Bei nahezu allen Versuchen des Typs IIc stellt die Fuge keine Schwächung des Verbundquerschnitts dar. Stattdessen verläuft der Bruch neben der Fuge, wie beispielsweise in Bild 5.4 für Versuchskörper VP-10-III-IV zu sehen ist.



(a) Vorderansicht von VP-10-III-IV

(b) Bruchfläche von VP-10-III-IV

Bild 5.12: Bruchbild von Schub-Druckkörper VP-10-III-IV

5.5 Schwindverhalten von Spritzbeton

Die Auswertung der Schwindversuche erfolgt wie auch die in Abschnitt 3.3 beschriebene Versuchsdurchführung der Schwindversuche analog zu (Fischer et al. 2014). Dabei werden durch den frühen Messbeginn (1 h bzw. 2 h nach Betonage) bereits Verformungen gemessen, bevor die Erstarrung beginnt. Durch die Verformungen, die sich in der plastischen Phase des Betons einstellen, können sich jedoch keine relevanten Spannungen aufbauen. Der maßgebende Zeitpunkt für den schwindinduzierten Aufbau von Zwangsspannungen ist der Zeitpunkt ab dem sich ein durchgehender Festkörper ausbildet und Zugspannungen in der Matrix übertragen werden können (Weiss 2003). Da dieser Zeitpunkt t_0 , der oft als *time zero* bezeichnet wird, nicht einheitlich

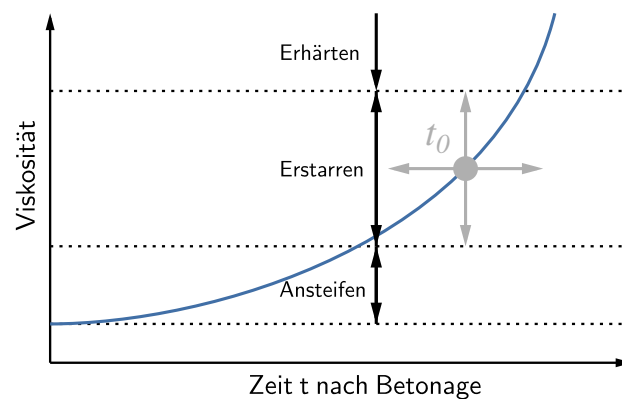


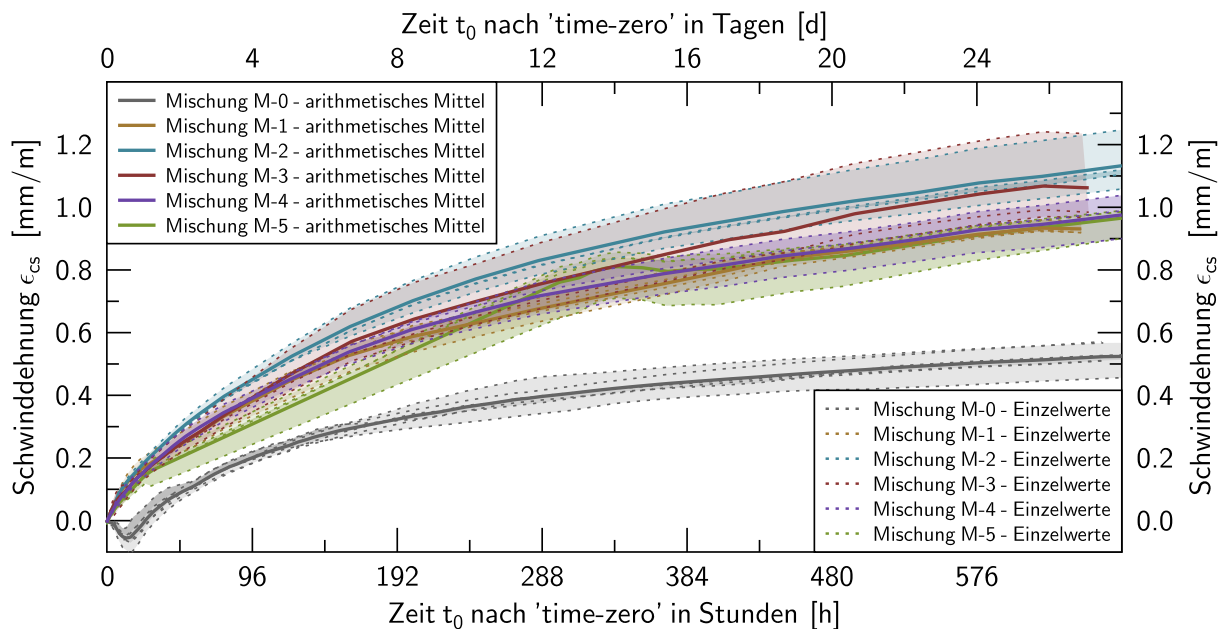
Bild 5.13: Festlegung von *time-zero* t_0 zur Bestimmung effektiver Schwindverformungen

für verschiedene Betonzusammensetzungen festgelegt werden kann, schlägt (Fontana 2007) die Dehnrateschleife als maßgebenden Parameter zur Bestimmung des Erstarrungszeitpunktes vor. In seinen experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Mischungszusammensetzung auf die frühen autogenen Verformungen an Bindemittelleimen stellt er zu Beginn stark ansteigende Verformungsgeschwindigkeiten fest, die er auf die Beschleunigung der Zementhydratation zurückführt. Diese ist mit verstärktem chemischen Schwinden und Selbstaustrocknung verbunden. Im weiteren zeitlichen Verlauf erfolgt der Übergang vom plastischen in den festen Zustand. Die in diesem Zeitraum schnell zunehmende Steifigkeit des Festkörpers behindert dabei die Verformung, sodass die Dehnrateschleife während der Erstarrung wieder abnimmt, obwohl die Hydratationsrate in diesem Zeitraum weiter ansteigt (Fontana 2007). Fontana legt deshalb den Zeitpunkt t_0 , ab dem bei gegebener Behinderung Zwangsspannungen durch die Schwindverformungen induziert werden, mit dem Zeitpunkt der maximalen Dehnrateschleife fest. Für die Auswertung der eigenen Schwindversuche erfolgt die Festlegung von t_0 , wie bei den experimentellen Untersuchungen zum Schwindverhalten in (Lenz 2012) und (Fischer et al. 2014), anhand der Abnahme der Verformungsgeschwindigkeit. Dabei wird von (Lenz 2012) das Abfallen der Dehnrateschleife nach Erhärtungsbeginn auf Werte unter $0,320 \frac{mm}{m \cdot d}$ als Grenzwert gewählt. Das schematische Vorgehen ist in Bild 5.14 illustriert.

Tabelle 5.1: Endschwindmaße der Mischungen M-0, M-1, M-2, M-3, M-4 und M-5 in mm/m

	M-0	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
ϵ_{csm}	0,54	0,93	1,14	1,06	0,98	0,97

Die Auswertungen der einzelnen Schwindversuche sind in Anhang A.5 aufgeführt. Bei den Schwindversuchen SP-M-3-II und SP-M-4-II wurden wegen eines defekten Dehnungsaufnehmers jeweils nur mit einem Dehnungsaufnehmer gemessen. Bei dem Schwindversuch der Mischung M-5 sind im Zeitraum zwischen $43 h$ und $313 h$ nach Betonage keine Zwischenwerte gespeichert worden, die Endschwindmaße sind jedoch von dem Datenspeicherproblem unbeeinträchtigt und können verwendet werden. Der Schwindverlauf der einzelnen Versuchskörper sowie das arithmetische Mittel der Schwindverläufe sind in Bild 5.15 dargestellt. Der Schwindverlauf der Normalbetonmischung M-0

**Bild 5.15:** Schwindverlauf von Normalbeton, Trockenspritzbeton und Nassspritzbeton bei $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $65\text{ }\%$ RF

wurde zum Vergleich aus (Fischer et al. 2014) übernommen. Die Nassspritzbetonmischung M-1, mit einem Fasergehalt von $C_f = 0\text{ kg/m}^3$, zeigt ein Endschwindmaß von $\epsilon_{csm} = 0,93\text{ mm/m}$. Die mittleren Endschwindmaße der Stahlfaserspritzbetonmischungen nehmen zwar mit zunehmenden Stahlfasergehalt ab, jedoch sind die Unterschiede der Mittelwerte im Vergleich zu den Streubreiten gering, so dass hier kein gesicherter Zusammenhang zwischen Stahlfasergehalt und Schwindverhalten abgeleitet werden kann. Die Trockenspritzbetonmischung liegt mit einem mittlerem Endschwindmaß von $\epsilon_{csm} = 0,97\text{ mm/m}$ im Bereich der Nassspritzbetonmischungen. Die gemessenen Endschwindmaße liegen alle im selben Bereich wie die in (Fischer et al. 2014) gemessenen

Werte für den unbewehrten Nassspritzbeton mit $\epsilon_{csm} = 1,14 \text{ mm/m}$ und $\epsilon_{csm} = 1,24 \text{ mm/m}$ für Trockenspritzbeton. Die im Vergleich zu Normalbeton hohen Endschwindmaße sämtlicher Spritzbetonmischungen können auf den höheren Gehalt an Zement, Wasser und Feinkornbestandteilen zurückgeführt werden. Zudem kann nach (VDZ 2002 a) Beton mit Beschleuniger ein größeres Schwinden aufweisen, als unbeschleunigter Beton.

6 Überprüfung des Bemessungsansatzes

6.1 Allgemeines

Für die Überprüfung, ob das geforderte Sicherheitsniveau bei Anwendung des Verbundfugennachweises nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) auch für Stahlfaserspritzbetoneergänzungen bzw. Spritzbetoneergänzungen auf spritzrauen Oberflächen eingehalten wird, werden wie in (Fischer et al. 2014) die experimentellen Verbundfestigkeiten mit den Bemessungswerten nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) verglichen. Damit auch Bauteile mit Stahlfaserspritzbetoneergänzung vorerst wie Bauteile mit Spritzbetoneergänzung bemessen werden können, und somit außer dem Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit unter Einhaltung der für Spritzbeton geltenden konstruktiven Regelungen keine weiteren Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit, wie z. B. die Begrenzung von Rissbreiten im Fugenbereich oder der Durchbiegung nachträglich ergänzter Querschnitte, gestellt werden müssen, wird der Verbundfugennachweis im ungerissenen Zustand I und insofern mit der zentrischen Zugfestigkeit geführt. Der für den Nachweis der Verbundtragfähigkeit nach Gleichung 2.1 benötigte Bemessungswert der Zugfestigkeit wird aus der, in der Praxis laufend durch die Konformitätskontrolle geprüften Druckfestigkeit ermittelt. Da ausschließlich Laborwerte vorliegen, wird die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit, wie in (Hegger et al. 1999) festgelegt, mit

$$f_{ck} = f_{cm} - \Delta f_c \quad \text{mit } \Delta f_c = 4 \text{ in } N/mm^2 \quad (6.1)$$

berechnet. Für f_{cm} wird die an einem Zylinder mit $d/h = 150 \text{ mm}/300 \text{ mm}$ ermittelte Druckfestigkeit $f_{c,cyl,150/300}$ verwendet. Für den Fall, dass die Spritzbetonschicht für die Bemessung der Verbundfugentragfähigkeit maßgebend wird, wird wegen der Prüfkörpergeometrie der Druckfestigkeitszylinder ($\varnothing 200/100 \text{ mm}$) die Zylinderdruckfestigkeit des Spritzbetons (ermittelt am Bohrkern parallel zur Spritzrichtung) nach (DAfStb Heft 597) mit

$$f_{c,cyl,150/300} = \frac{0,92}{0,95} \cdot f_{c,cyl,100/200} \quad (6.2)$$

umgerechnet. Eine Erhöhung der Bohrkernfestigkeit mit dem in (DIN EN 13791:2008-05) vorgegebenen Faktor von 0,85 erfolgt nicht, da die Bohrkern an extra gespritzten Prüfplatten entnommen und unter denselben Bedingungen wie die Versuchskörper zur Bestimmung der Verbundfestigkeit gelagert werden. Eine Abminderung der Zylinderdruckfestigkeit der Probekörper, die nach (DIN EN 12390-2/Ber 1:2012-02) trocken gelagert werden, mit dem für Würfel geltenden Wert 0,92

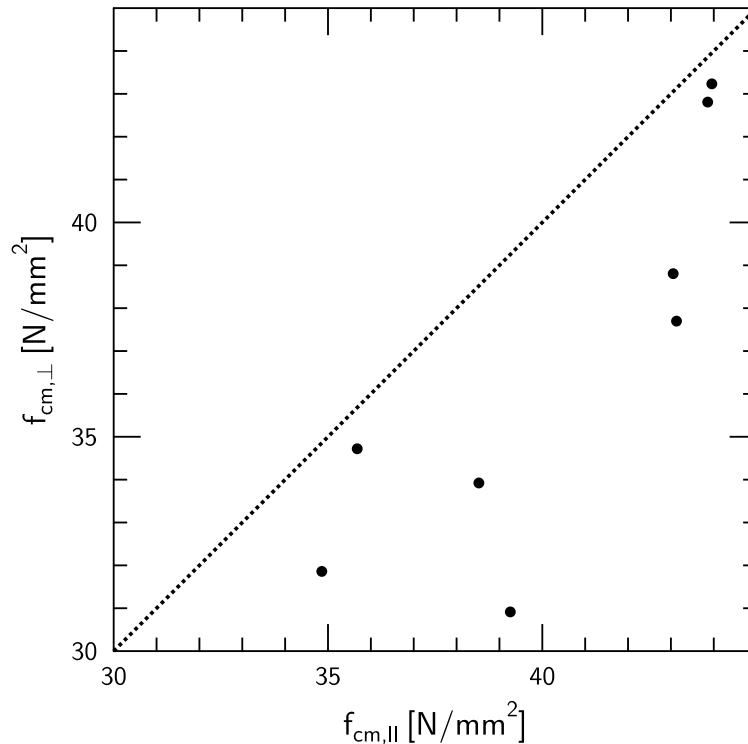


Bild 6.1: Vergleich von Bohrerndruckfestigkeiten parallel und senkrecht zur Spritzrichtung (Schmidt et al. 2018)

erfolgt nicht, da eine Übertragung auf Zylinder nicht ohne Weiteres möglich ist. Der Ansatz eines vermutlich höheren Wertes als er für Würfel gilt würde zudem zu einer Vergrößerung des Sicherheitsabstandes von Bemessungswert und Versuch führen und läge damit bei der Überprüfung des Sicherheitsniveaus auf der unsicheren Seite.

Untersuchungen zur Ableitung der mechanischen Kennwerte von Spritzbeton anhand der Druckfestigkeit zeigen ein anisotropes Verhalten von Spritzbeton (Schmidt et al. 2018). Die Auswertung von Druckfestigkeiten die an Bohrkernen ermittelt werden, welche in Anlehnung an (DIN 18551: 2014-08) parallel zur Spritzrichtung und somit senkrecht zur Hauptdruckbelastungsrichtung der Spritzbetonschicht entnommen werden, weisen höhere Werte auf als Druckfestigkeiten die an Bohrkernen ermittelt werden welche senkrecht zur Spritzrichtung entnommen werden. Die in Bild 6.1 dargestellten mittleren Bohrerndruckfestigkeiten parallel zur Spritzrichtung $f_{cm,II}$ sowie die mittleren Bohrerndruckfestigkeiten senkrecht zur Spritzrichtung $f_{cm,⊥}$ ergeben sich aus je sechs Einzelwerten. Da die Entnahme von Bohrkernen senkrecht zur Spritzrichtung nur mit einem sehr hohen Aufwand möglich ist, werden in (Schmidt et al. 2018) Verhältnismerte $f_{cm,⊥}/f_{cm,II}$ zur Berücksichtigung des anisotropen Materialverhaltens ermittelt. Bei Berücksichtigung aller Versuchsergebnisse ergibt sich das Verhältnis der Bohrerndruckfestigkeiten zu $f_{cm,⊥}/f_{cm,II} = 0,91$.

Die Ermittlung der mittleren Zugfestigkeit erfolgt, unabhängig ob Normalbeton oder Spritzbeton maßgebend wird, mit den Umrechnungsformeln nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01)

$$f_{ctm} = \begin{cases} 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} & \text{für } f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2 \\ 2,12 \cdot \ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{10}\right) & \text{für } f_{ck} \geq 50 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \quad (6.3)$$

Die Berechnung des Bemessungswertes der mittleren zentrischen Zugfestigkeit erfolgt wegen des Vergleichs mit den Versuchsergebnissen mit $\alpha_{ct} = 1,0$

$$f_{ctd} = 1,0 \cdot \frac{f_{ctk,0.05}}{\gamma_c} \quad (6.4)$$

unter Annahme von

$$f_{ctk} = 0,7 \cdot f_{ctm} \quad (6.5)$$

6.2 Versuchstyp IV - Traganteil der Adhäsion

Für die Auswertung des Versuchstyps IV wird der Beiwert c_i auf der sicheren Seite liegend gemäß dem in Bild 2.1 dargestellten Kurvenverlauf gleichmäßig linear interpoliert (punktierte Linie). Da in Abschnitt 5.2 bei Verbundplatten mit vorgehärteten und luftgetrockneten Auftragsflächen für beide Rauheitskategorien keine systematischen Unterschiede in der Verbundfestigkeit festgestellt werden können, werden beide Oberflächenvorbereitungsverfahren in den Vergleich miteinbezogen. Zur Beurteilung wird für jeden Versuch das Verhältnis zwischen der experimentell ermittelten Verbundfestigkeit f_{exp} und dem charakteristischen Wert der aufnehmbaren Schubspannung berechnet. Die experimentelle Verbundspaltzugfestigkeit am Würfel wird dabei mit den Beziehungen nach (DIN EN 12390-6:2010-09)

$$f_{ct,spl,cyl} = \frac{1}{1,10} \cdot f_{ct,spl,cube} \quad (6.6)$$

und

$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct,spl,cyl} \quad (6.7)$$

in die zentrische Zugfestigkeit umgerechnet. Der in Bild 6.2 dargestellte Vergleich sämtlicher Verbundbruchspannungen der mit Stahlfaserspritzbeton ergänzten Spaltzugwürfel mit den charakteristischen Werten zeigt, dass die charakteristischen Werte für alle Rauheitskategorien unabhängig vom Betonuntergrund und von der Oberflächenbeschaffenheit von keinem Versuchskörper unterschritten werden.

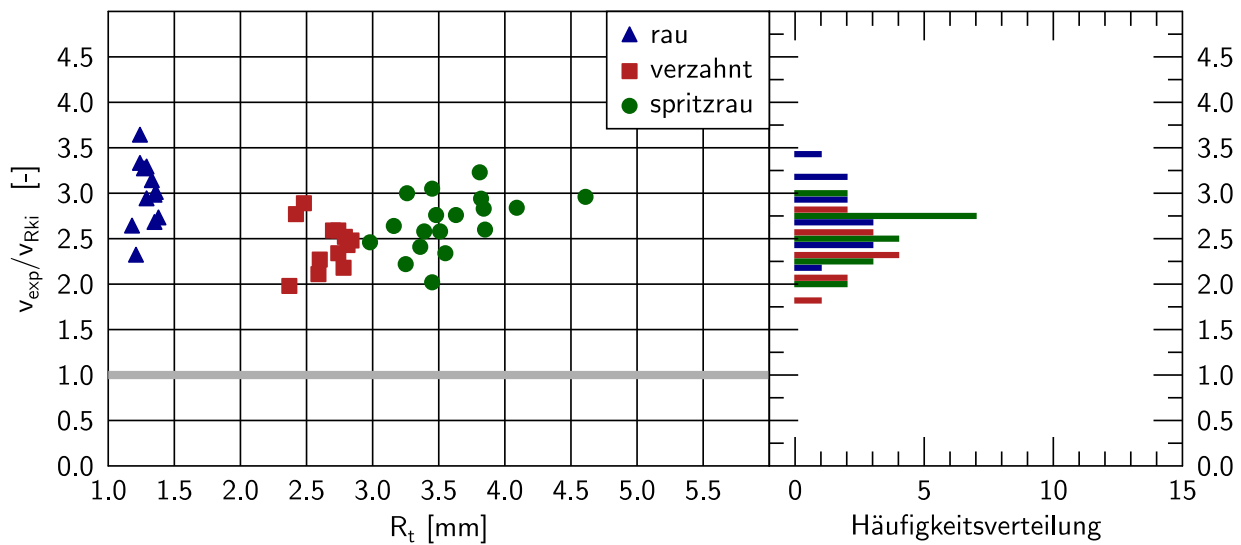


Bild 6.2: Vergleich von experimentellen Festigkeiten mit den charakteristischen Werten für Ergänzungen mit Stahlfaserspritzbeton

Die statistische Auswertung zur Ermittlung eines theoretisch möglichen Beiwerts $c_{i,0.05}^*$, charakterisiert durch den 5 %-Quantil-Wert, erfolgt wie in (Fischer et al. 2014) für die einzelnen Rauheitskategorien nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01) *rau* und *verzahnt* sowie für *spritzraue* Oberflächen getrennt. Dabei werden unter Verwendung des bestehenden Bemessungsmodells für den Traganteil der Adhäsion auf Mittelwertniveau theoretisch mögliche Beiwerte c_i^*

$$v_{exp} = c_i^* \cdot f_{ctm} \quad (6.8)$$

für die einzelnen Versuchskörper jeder Rauheitskategorie berechnet. Wie in (Zilch u. Müller 2007) werden durch Anwendung von (DIBt 1986) unter der Annahme einer logarithmischen Normalverteilung und einem Konfidenzniveau von $P = 1 - \alpha = 0,75$ die 5 %-Quantil-Werte des möglichen Beiwerts c_i^* für die einzelnen Rauheitskategorien berechnet. Anschließend wird durch

$$f_{ctk} = 0,7 \cdot f_{ctm} \quad (6.9)$$

berücksichtigt, dass in Gleichung 2.1 nicht wie in Gleichung 6.8 mit den Mittelwerten sondern mit charakteristischen Werten gerechnet wird. Die so durch die statistische Auswertung der experimentellen Verbundfestigkeitsprüfungen erhaltenen, 5 %-Quantil-Werte des Beiwerts $c_{i,0.05}^*$ für Spritzbetonergänzungen sind in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse von Stahlfaserspritzbetonergänzungen zeigt, dass die in (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) angegebenen Beiwerte c_i nicht unterschritten werden. Die Bemessung von Stahlfaserspritzbetoner-

Tabelle 6.1: Vergleich der momentan nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) gebräuchlichen Beiwerten c_i mit den nach (DIBt 1986) ermittelten 5 %-Quantilwerten $c_{i,0.05}^*$ der Verbundfestigkeitsprüfungen für Stahlfaserspritzbeton

Rauheitskategorie	Anzahl der Versuche	c_i	$c_{i,0.05}^*$
rau	12	0,40	0,83
verzahnt	12	0,50	0,91
spritzrau	18	0,50	1,05

gänzungen an Bauteilen mit Normalbeton, dessen Oberfläche in die beiden Rauheitskategorien *rau* und *verzahnt* eingeordnet werden kann, bzw. an Bauteilen aus Spritzbeton kann somit mit ausreichendem Sicherheitsniveau nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) durchgeführt werden.

Für die Spritzbetonerfüllung spritzrauer Oberflächen wurde in (Fischer et al. 2014) auf Grundlage der Auswertung der Verbundplatten VP-21 und VP-22 Klärungsbedarf festgestellt. Einzelne Verhältniswerte der experimentell ermittelten Verbundbruchspannung mit den charakteristischen Werten zeigten, wie in Bild 6.3 zu sehen ist, dass einzelne Versuchswerte sogar die charakteristischen Werte unterschritten. Die Auswertung des aktuell durchgeführten Verbundversuche an Körpern der Verbundplatte VP-5, bei der der Spritzenergieeintrag durch die feste Montage der Verbundplatte auf eine steife, großformatige Betonplatte sichergestellt wurde, zeigt, dass alle einzelnen Versuchswerte über den charakteristischen Werten liegen. Während in (Fischer et al. 2014) für die Spritzbetoner-

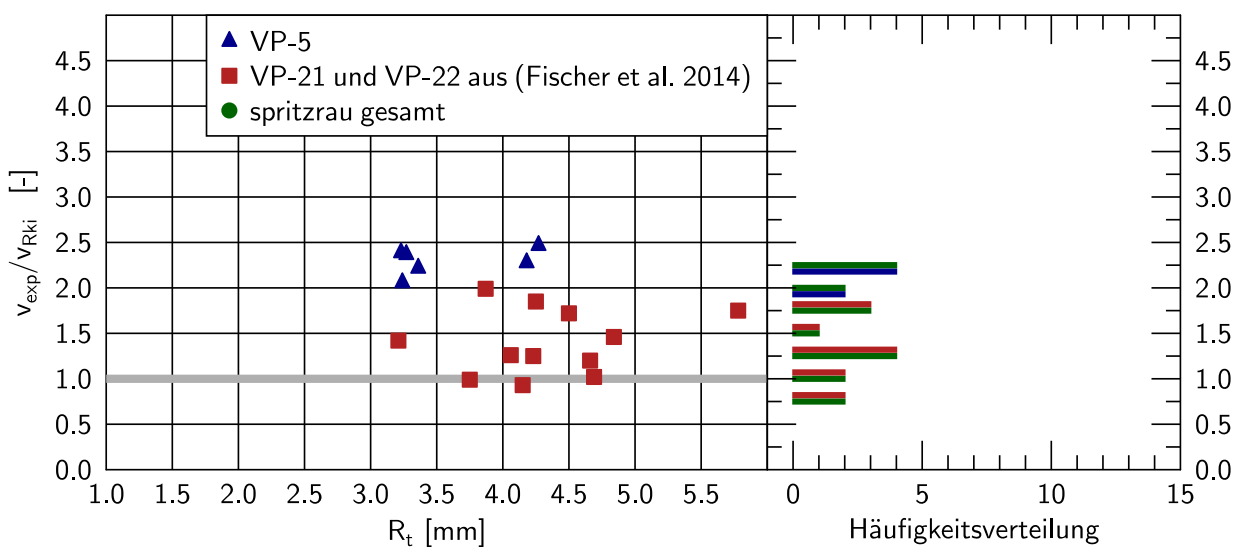


Bild 6.3: Vergleich von experimentellen Festigkeiten mit den charakteristischen Werten für Ergänzungen mit Spritzbeton

Tabelle 6.2: Vergleich der momentan nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) gebräuchlichen Beiwerten c_i mit den nach (DIBt 1986) ermittelten 5 %-Quantilwerten $c_{i,0.05}^*$ der Verbundfestigkeitsprüfungen für Spritzbeton

	Anzahl der Versuche	c_i	$c_{i,0.05}^*$
VP-5	6	0,50	0,98
VP-21 und VP-22 aus (Fischer et al. 2014)	12	0,50	0,40
gesamt	18	0,50	0,43

gänzung von spritzrauen Oberflächen nur ein Beiwert von $c_{i,0.05}^* = 0,40$ erreicht werden konnte, wird mit den Versuchen VP-5 ein Beiwert von $c_{i,0.05}^* = 0,98$ erreicht. Diese Größenordnung wird auch durch Ergebnisse der Verbundfestigkeitsprüfungen von Stahlfaserspritzbetonergänzungen spritzrauer Grundplatten bestätigt. Bei gemeinsamer Auswertung der Verbundspaltzugfestigkeiten von VP-21 und VP-22 aus (Fischer et al. 2014) und VP-5 der aktuellen Versuchsreihe, wird jedoch ein Beiwert von $c_{i,0.05}^* = 0,43$ erreicht der unter den in (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) angegebenen Wert liegt.

6.3 Versuchstyp IIc - Traganteil der Reibung

Die Ergebnisse der Schub-Druckversuche sind in Tabelle A.19 zusammengefasst. Die Spannungen v_{exp} und $\sigma_{n,exp}$ in der Verbundfuge werden entlang der Fuge als konstant angenommen und mit den Formeln 5.2.a und 5.2.b berechnet. Die Rautiefe nach Kaufmann der Versuchskörper des Typs IIc ist der Mittelwert aus den in Anhang A.2 angegeben zugehörigen Einzelwerten. So ermittelt sich beispielsweise die Rautiefe nach Kaufmann für den Versuchskörper VP-10-III-IV aus den in Tabelle A.14 angegebenen Einzelwerten von VP-10-III und VP-10-IV zu $R_t = 0,5 \cdot (3,69 \text{ mm} + 3,57 \text{ mm}) = 3,63 \text{ mm}$.

Tabelle 6.3: Experimentelle Verbundfestigkeiten des Versuchstyps IIc

Probekörper- bezeichnung	R_t [mm]	Mischung	α [°]	$min f_{cm,cyl,100/200}$ [N/mm ²]	$F_{max,exp}$ [kN]	$\sigma_{n,exp}$ [N/mm ²]	v_{exp} [N/mm ²]
VP-10-III-IV	3,63	M-2	60	44,87	484,74	5,44	9,42
VP-10-V-VI	3,78	M-2	60	44,87	595,71	6,78	11,74
VP-10-I-II	3,71	M-2	65	44,87	357,35	3,39	7,27
VP-10-VII-VIII	3,59	M-2	65	44,87	462,80	4,42	9,48
VP-9-I-II	4,05	M-2	70	44,87	359,50	2,75	7,56
VP-9-III-IV	4,15	M-2	70	44,87	421,78	3,21	8,81
VP-9-VI-VIII	3,95	M-2	75	44,87	340,98	1,97	7,37
VP-9-V-VII	3,68	M-2	75	44,87	442,90	2,58	9,64
VP-12-I-II	2,95	M-4	60	40,31	746,52	8,27	14,32
VP-12-III-IV	2,74	M-4	60	40,31	671,84	7,52	13,02
VP-12-VII-VIII	3,47	M-4	65	40,31	488,67	4,62	9,91
VP-12-V-VI	3,65	M-4	65	40,31	490,11	4,60	9,87
VP-11-I-II	3,29	M-4	70	40,31	457,40	3,47	9,53
VP-11-III-V	3,53	M-4	70	40,31	419,50	3,21	8,82
VP-11-IV-VI	3,04	M-4	75	40,31	317,35	1,82	6,79
VP-11-VII-VIII	3,08	M-4	75	40,31	345,65	2,03	7,57

Die Auswertung der Bruchbilder zeigt, dass trotz der großen Fugenneigungswinkel α , und den damit verbundenen großen Verhältnissen von Schub- zu Druckspannung in der Verbundfuge, bei nahezu allen Versuchskörpern des Typs IIc die Verbundfuge keine Schwächung des Verbundquerschnitts darstellt. Stattdessen bildet sich der Riss im monolithischen Bereich der Spritzbetonschicht aus. In Bild 6.4 sind die Ergebnisse der Schub-Druckversuche der Spritzbetonmischung M-2 im Schub-Druckdiagramm sowie der der Mohr'sche Spannungskreis dargestellt. Da die Hauptdruckbelastungsrichtung bei den verwendeten großen Fugenneigungswinkeln senkrecht zur Spritzrichtung

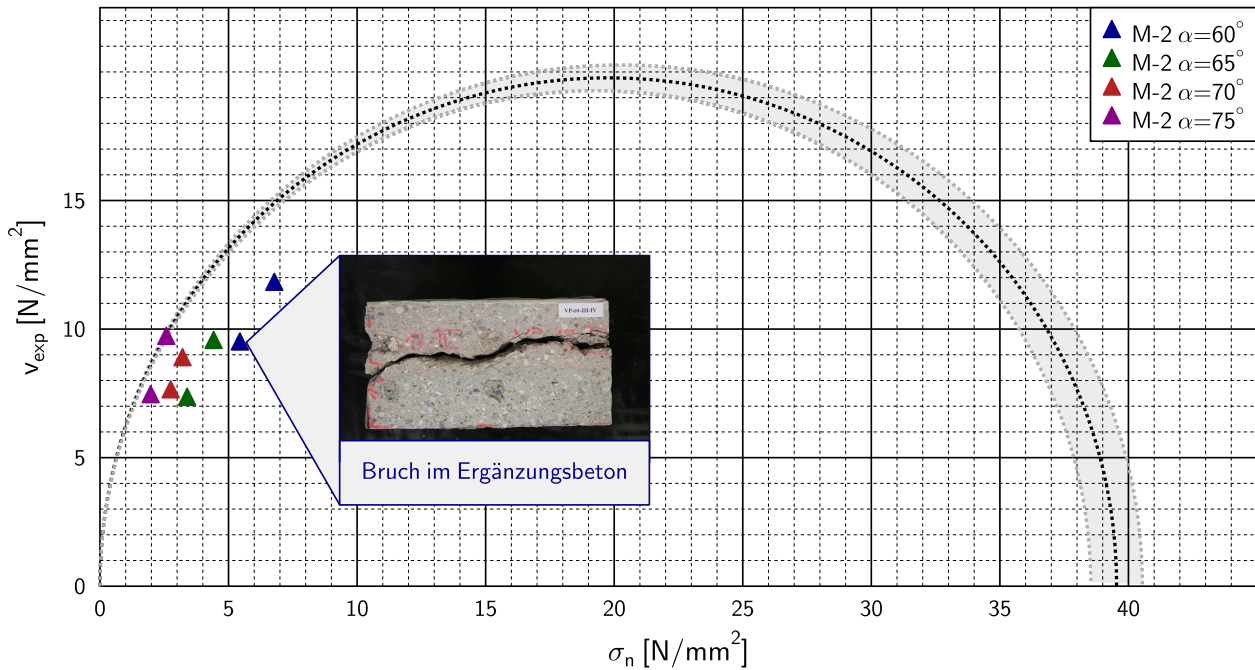


Bild 6.4: Ergebnisdarstellung der Schub-Druckversuche der Mischung M-2

liegt, wird die für den Mohr'schen Spannungskreis verwendete einachsiale Druckfestigkeit durch Berücksichtigung des anisotropen Materialverhaltens von Spritzbeton mit dem in (Schmidt et al. 2018) ermittelten Verhältniswert der Bohrkerndruckfestigkeiten $f_{cm,\perp}/f_{cm,II} = 0,91$ ermittelt und mit Gleichung 6.2 auf die verwendete Probekörpergeometrie umgerechnet. Zusätzlich sind die experimentell ermittelten oberen und unteren Grenzwerte der Betondruckfestigkeit $f_{c,0.95}$ bzw. $f_{c,0.05}$ als Streubereich mit eingetragen. Obwohl die Bruchspannungskombinationen der Schub-Druckkörper in Bild 6.4 innerhalb des Mohr'schen Spannungskreises liegen, zeigen die Bruchbilder einen Scherbruch im monolithischen Bereich des Spritzbetons. Selbst der Versuchskörper VP-10-III-IV, der im Schub-Druckdiagramm am weitesten vom Mohr'schen Spannungskreis entfernt ist, zeigt wie in Bild 6.4 zu sehen ist, einen Scherbruch im Ergänzungsбетон. Unter Berücksichtigung der wesentlich geringeren Belastungsgeschwindigkeit der Schub-Druckversuche im Vergleich zu den Druckfestigkeitsversuchen nach (DIN EN 12390-3:2009-07) sowie den in Bild 3.3 links oben angedeuteten realen Spannungsverlauf versagen die Verbundkörper jedoch schon unter geringeren Lasten, als unter Anwendung des Mohr'schen Bruchkriteriums zu erwarten wäre. Die in Bild 6.5 dargestellten Ergebnisse der Schub-Druckversuche der Spritzbetonmischung M-4 im Schub-Druckdiagramm liegen alle in der Nähe des Mohrschen Spannungskreises und bestätigen die Auswertung der Bruchbilder, die einen Scherbruch in einer der beiden Spritzbetonschichten zeigen.

Da bei nahezu allen Schub-Druckkörpern die Verbundfuge keine Schwächung darstellt, kann auf Basis der durchgeführten Versuche keine Aussage zum Reibbeiwert für Ergänzungen von

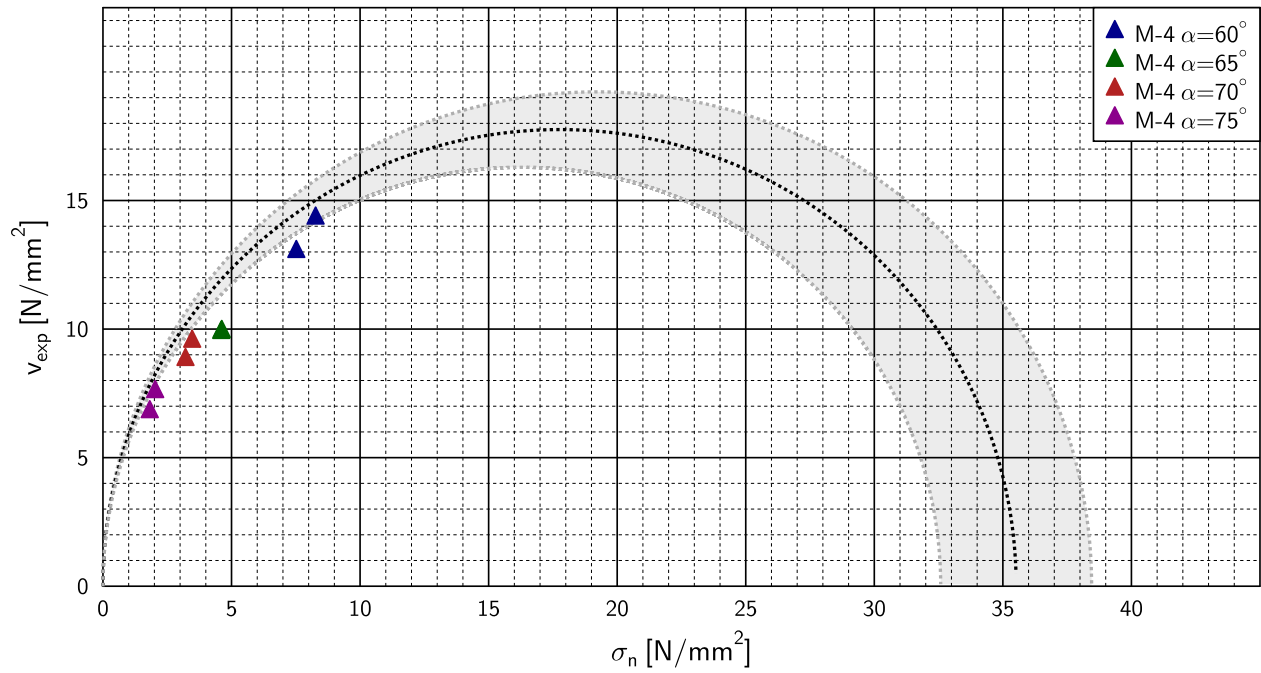


Bild 6.5: Ergebnisdarstellung der Schub-Druckversuche der Mischung M-4

Stahlfaserspritzbeton mit Stahlfaserspritzbeton gemacht werden. Für die Anwendung von (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) für Stahlfaserspritzbetoneergänzungen sind weitere Untersuchungen, die auch das anisotrope Materialverhalten von Spritzbeton berücksichtigen, empfehlenswert.

7 Zusammenfassung

Die Bemessung von Bauteilen, die mit Spritzbeton ergänzt werden, erfolgt nach Einführung von (DIN 18551:2014-08), soweit in (DIN 18551:2014-08) keine zusätzlichen Angaben gemacht werden, mit den Nachweisformaten der Bemessungsnorm für Stahlbeton (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04). Hinsichtlich der Bemessung von Stahlfaserspritzbeton, dessen Eigenschaften, Anwendung und Ausführung in (DIN 18551:2014-08) mit (DIN EN 14487-1:2006-03) und (DIN EN 14487-2:2007-01) geregelt sind, wird lediglich durch die Ergänzung des Abschnitts 5.1 der (DIN EN 14487-1:2006-03) mit Abschnitt 5.1.3 der (DIN 18551:2014-08) der Hinweis „*Sofern die Tragwirkung von Stahlfasern in Ansatz gebracht werden soll, sind über diese Norm hinausgehende Nachweise erforderlich*“ gegeben. Weitere Angaben zur Bemessung von Stahlfaserspritzbeton sind in den aktuellen Normen nicht enthalten. Durch die bauaufsichtliche Einführung von (DAfStb Rili Stahlfaserbeton 2012), die als Ergänzung zu (DIN EN 1992-1-1:2011-01) die Bemessung von Stahlfaserbeton regelt, deren Anwendung für Stahlfaserspritzbeton jedoch explizit ausgeschlossen ist, und der nahezu gleichzeitigen Rücknahme von (DBV 2001 a) existieren in Deutschland aktuell somit keine gültigen Bemessungsregeln für Stahlfaserspritzbeton. Die in (DIN 18551:2014-08) bei Ansatz der Tragwirkung von Stahlfaserspritzbeton geforderten, über die Norm hinausgehenden Nachweise, gewährleisten kein einheitliches Sicherheitsniveau. Aus diesem Anlass wurden punktuelle Verbundfestigkeitsversuche zur Ermittlung des vorhandenen Sicherheitsniveaus bei Anwendung der Bemessungsgleichungen von (DIN 18551:2014-08) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1:2011-01) und (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) für unbewehrte Stahlfaserspritzbetonerhöhungen durchgeführt. Die Bewertung der Schubfestigkeit der unbewehrten Verbundfuge erfolgte durch kleinformatische Probekörper ohne Fugennormalspannung (Versuchstyp IV - Spaltzugversuche) und mit Fugennormalspannung (Versuchstyp IIc - Schub-Druckversuche). Dabei wurde der Einfluss der Oberflächenvorbehandlung, des Betonuntergrundes und des Fasergehaltes bei verschiedenen Rautiefen unter Verwendung von verschiedenen, praxisüblichen Spritzbetonmischungen untersucht.

Die in (Fischer et al. 2014) bei Verbundkörpern mit spritzrauen Auftragsoberflächen beobachteten sehr niedrigen Verbundfestigkeiten konnten durch die gezielt durchgeführten Ergänzungsversuche der Verbundplatte VP-5, bei der der Spritzenergieeintrag durch die feste Montage der Verbundplatte auf eine steife großformatige Betonplatte sichergestellt wurde, relativiert werden. Die spritzraue Oberfläche wurde bei einer im Tunnelbau üblichen Betonförderleistung von ca. $20 \text{ m}^3/\text{h}$ vollständig eingespritzt und sämtliche Verbundkörper der Verbundplatte VP-5 versagten quasi monolithisch. Für die durchgeführten Kleinkörperversuche ohne Fugennormalspannung ließ sich bei Ergänzung von Normalbetonoberflächen mit Rauheitskategorien *rau* und *verzahnt* kein nennenswerter tragfähigkeitssteigernder Einfluss auf die Adhäsionsfestigkeit durch ausreichendes Vornässen

der Auftragsfläche feststellen. Der Vergleich der Verbundfestigkeiten von Verbundkörpern mit Stahlfaserspritzbetonergänzung auf verzahnter Normalbetonoberfläche (VP-2, VP-4) mit Stahlfaserspritzbetonergänzung auf spritzrauer Stahlfaserspritzbetonoberfläche (VP-6) zeigte keinen Unterschied. Auch bei höheren Fasergehalten konnte keine Auswirkung des Fasergehaltes auf die Adhäsionsfestigkeit festgestellt werden.

Die experimentellen Untersuchungen der freien Schwindverformungen von Spritzbeton im jungen Betonalter zeigen unabhängig vom Fasergehalt im Vergleich zu Normalbeton größere freie Schwindverformungen die auf den höheren Gehalt an Zement, Wasser und Feinkornbestandteilen zurückgeführt werden können. Da die aus der Zusammensetzung des Betons resultierenden Einflüsse auf das Schwindverhalten in (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) nur durch die Betondruckfestigkeit und die Zementklasse berücksichtigt werden, wird den unterschiedlichen Schwindmaßen nicht ausreichend Rechnung getragen. Eine weitergehende Untersuchung der daraus entstehenden Zwangsspannungen bzw. deren Abdeckung durch konstruktive Regelungen ist somit zwingend erforderlich.

Die statistische Auswertung der im Rahmen dieses Forschungsberichtes durchgeführten Kleinkörperversuche ohne Fugennormalspannung brachte zum Vorschein, dass mit den Bemessungsansätzen der Adhäsionstragfähigkeit nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) für Bauteile, die nachträglich mit Spritzbeton bzw. Stahlfaserspritzbeton ergänzt werden, unter sorgfältiger Nachbehandlung ein ausreichendes Sicherheitsniveau für Fugen der Rauheitskategorie *rau*, *verzahnt* und *spritzrau* erreicht wird.

Eine Bewertung des Sicherheitsniveaus der Bemessungsansätze nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04) für den Traganteil Reibung kann anhand der durchgeführten Kleinkörperversuchen mit Fugennormalspannung nicht getroffen werden. Durch das festgestellte anisotrope Tragverhalten von Spritzbeton ist eine weitergehende Untersuchung der mehrachsialen Festigkeit von Spritzbeton sowie deren Auswirkung auf die betreffenden Tragfähigkeitsnachweise nötig.

In Bezug auf die Verbundfestigkeitskennwerte, die im Rahmen dieses Versuchsprogramms experimentell ermittelt wurden, wird nachdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Werte unter Laborbedingungen an Kleinkörperversuchen ermittelt wurden und somit als optimale Werte zu sehen sind, die nur bei sorgfältiger Oberflächenvor- sowie nachbehandlung erreicht werden können, und die Ergebnisse nicht uneingeschränkt auf andere Fasergeometrien bzw. Fasertypen übertragen werden können. Zwangsspannungen wie sie z.B. durch differentielles Schwinden bei Großkörperversuchen entstehen, sind nicht berücksichtigt. Eine Erhöhung der Verbundfugentragfähigkeit wird ohne zusätzliche Großkörperversuche sowie notwendiger Untersuchungen zu den entstehenden Zwangsspannungen nicht empfohlen.

Bezeichnungen

Vorbemerkung

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Bezeichnungen lehnen sich weitestgehend an die Notation nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01) an. Soweit im Text nicht näher erläutert, gelten folgende Abkürzungen und Bezeichnungen:

Abkürzungen

FCM	Fictitious Crack Model
RF	Relative Feuchte
SmS	Strahlen mit festen Strahlmitteln
SP	Schwindplatte
UHPC	Ultrahochfester Beton
VP	Verbundplatte
WA	Dehungsaufnehmer

Große lateinische Buchstaben

A	Fläche
C	Gehalt
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft
G	Energie
P	Konfidenzniveau
R	Rautiefe
V	Volumen, Variationskoeffizient

Kleine lateinische Buchstaben

b	Breite
c	Beiwert
d	Durchmesser
f	Festigkeit
h	Höhe
s	vom Zementtyp abhängiger Beiwert zur zeitlichen Extrapolation von Betonkenngrößen
t	Zeit
u	fiktive Rissöffnung
v	Schubtragfähigkeit

Griechische Buchstaben

α	Formparameter, Festigkeitsbeiwert
γ	Teilsicherheitsbeiwert
ϵ	Dehnung
μ	Reibbeiwert
ν	Abminderungsbeiwert für die Betonfestigkeit
σ	Normalspannung, Standardabweichung
Δ	Differenz

Hochzeiger

*	theoretisch möglicher Wert
---	----------------------------

Indizes

b	Verbund
c	Beton, Druck
cod	crack opening displacement
ct	Beton, Zug
$cube$	Würfel
cyl	Zylinder
d	Bemessungswert
exp	experimentell ermittelte Größe
i	Interface
k	charakteristischer Wert
$kspl$	Keilspaltzug
m	Mittelwert
max	maximaler Wert
min	minimaler Wert
s	Schwinden
spl	Spaltzug
t	Zugfestigkeit
u	Bruchzustand
E	Beanspruchung
F	Bruch
H	Horizontal
R	Widerstand
0	Ausgangszustand
28	nach 28 Tagen
56	nach 56 Tagen
0.05	5%-Quantil

0.95 95%-Quantil

Große lateinische Buchstaben mit Indizes

C_f	Stahlfasergehalt
E_c	E-Modul Beton (Sekante)
F_H	Horizontalkraft
F_V	Vertikalkraft
G_F	Bruchenergie
R_p	Profilkuppenhöhe
R_t	mittlere Rautiefe nach Kaufmann

Kleine lateinische Buchstaben mit Indizes

c_i	Beiwert der Verbundfuge
f_c	Betondruckfestigkeit (Zylinder)
f_{ct}	Betonzugfestigkeit (zentrisch)
$f_{ct,spl}$	Spaltzugfestigkeit
$f_{ct,kspl}$	Keilspaltzugfestigkeit
$f_{R,j}$	residuelle Biegezugfestigkeit für j = 1, 2, 3 oder 4
$f_{ct,Lf}$	Proportionalitätsgrenze
h_{sp}	Abstand zwischen der Spitze der Einkerbung und der Oberseite des Probekörpers in Feldmitte
t_0	time zero
v_{exp}	experimentelle Schubtragfähigkeit
v_{Rdi}	Bemessungswert der Schubtragfähigkeit
v_{Rki}	charakteristischer Wert der Schubtragfähigkeit

Große griechische Buchstaben mit Indizes

Δf_c	Konformitätsmaß
Δu_N	fiktive Rissöffnung
Δu_{N1}	Formparameter des FCM
Δu_{Nc}	Formparameter des FCM

Kleine griechische Buchstaben mit Indizes

α_{ct}	Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen auf die Betonzugfestigkeit und von ungünstigen Auswirkungen durch die Art der Beanspruchung
α_{ft}	Formbeiwert FCM
α_{wc}	Formbeiwert FCM
γ_c	Teilsicherheitsbeiwert für Beton
ϵ_{cs}	Schwinddehnung von Beton
$\dot{\epsilon}_{cs}$	zeitliche Änderung der Schwinddehnung von Beton
μ_i	Reibbeiwert der Verbundfuge
σ_{ct}	fiktive Spannung im FCM
σ_n	Normalspannung senkrecht zur Verbundfuge
σ_1	Formbeiwert FCM

Literaturverzeichnis

Austin et al. 1997

Austin, S.; Peaston, C. u. Robins, P.: *Material and fibre losses with fibre reinforced sprayed concrete*. In: *Construction and Building Materials* 11, Nr. 5–6, S. 291–298. 1997.

Banthia et al. 1994

Banthia, N.; Trottier, J.-F.; Beaupré, D. u. Wood, D.: *Properties of steel fiber reinforced shotcrete*. In: *Canadian Journal of civil engineering* 21, Nr. 4, S. 564–575. April 1994.

Bindiganavile u. Banthia 12.–16. September 2006

Bindiganavile, V. u. Banthia, N.: *Fiber Reinforced Shotcrete: The Effect of the Spraying Process*. Hrsg.: Morgan, D. u. Parker, H.: In: *Shotcrete for Underground Support X*. American Society of Civil Engineers (ASCE): Whistler, British Columbia, USA, 12.–16. September 2006, S. 158–175.

Bischof u. Possart 1983

Bischof, C. u. Possart, W.: *Adhäsion - Theoretische und experimentelle Grundlagen*. Akademie Bau + Technik Verlag: 1983.

Cengiz u. Turanli 2004

Cengiz, O. u. Turanli, L.: *Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test*. In: *Cement and Concrete Research* 34, Nr. 8, S. 1357–1364. August 2004.

Cornejo-Malm 1995

Cornejo-Malm, G.: *Schwinden von Spritzbeton*. Forschungsbericht. IBETH 077/91. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich: Zürich, Mai 1995.

DAfStb Heft 372

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 372 (1. Aufl.). Daschner, F.: *Versuche zur notwendigen Schubbewehrung zwischen Betonfertigteilen und Ortbeton*. Ernst & Sohn: Berlin, 1986.

DAfStb Heft 422

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 422 (1. Aufl.). Bunke, N.: *Prüfung von Beton, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048*. Beuth Verlag: Berlin, 1991.

DAfStb Heft 456

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 456 (1. Aufl.). Schäfer, H. u. Schmidt-Kehle, W.: *Zum Schubtragverhalten von Fertigplatten mit Ortbetoneergänzung*. Beuth Verlag: Berlin, 1996.

DAfStb Heft 597

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 597 (1. Aufl.). Reineck, K.-H.; Kuchma, D. A. u. Fitik, B.: *Erweiterte Datenbanken zur Überprüfung der Querkraftbemessung für Konstruktionsbauteile mit und ohne Bügel*. Beuth Verlag: Berlin, 2012.

DAfStb Heft 600

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 600 (1. Aufl.). Hegger, J.: *Erläuterung zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2)*. Beuth Verlag: Berlin, 2012.

DAfStb Rili Stahlfaserbeton 2012

DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (DAfStb) u. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (DAfStb). Beuth Verlag. Berlin, November 2012.

DBV 1977

DBV Merkblatt-Stahlfaserspritzbeton. Deutscher Beton-Verein e.V (DBV). Beton-Verlag. In: *beton* 27, Nr. 2, S. 66–68. Düsseldorf, Februar 1977.

DBV 1984

DBV Merkblatt-Stahlfaserspritzbeton. Deutscher Beton-Verein e.V (DBV). Ernst & Sohn. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 79, Nr. 5, S. 134–136. Berlin, Februar 1984.

DBV 1992

DBV Merkblatt-Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau. Faserbeton. Deutscher Beton-Verein e.V (DBV). Wiesbaden, September 1992.

DBV 1992

DBV Merkblatt-Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfaserspritzbetons. Faserbeton. Deutscher Beton-Verein e.V (DBV). Wiesbaden, August 1992.

DBV 2001

Stahlfaserbeton - Beispielsammlung zur Bemessung nach DBV-Merkblatt - DBV Heft Nr. 7. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (DBV). Berlin, 2001.

DBV 2001

DBV Merkblatt-Stahlfaserbeton. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (DBV). Berlin, Oktober 2001.

De Rivaz 12.–13. Januar 2012

De Rivaz, B.: *Prüfung von Faserspritzbeton zur Ermittlung von Bemessungsgrößen*. Hrsg.: Kusterle, W.: In: *Spritzbetontagung*. Alpbach, Österreich, 12.–13. Januar 2012.

DIBt 1986

Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt). Berlin, Mai 1986.

DIN 1045-2:2008-08

Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), August 2008.

DIN 4760:1982-06

Gestaltabweichung. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), Juni 1982.

DIN 18551:1979-07

Spritzbeton - Herstellung und Güteüberwachung. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), Juli 1979.

DIN 18551:1992-03

Spritzbeton - Herstellung und Güteüberwachung. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), März 1992.

DIN 18551:2010-02

Spritzbeton - Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN 14487 und Regeln für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), Februar 2010.

DIN 18551:2014-08

Spritzbeton - Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN 14487 und Regeln für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung, August 2014.

DIN EN 206:2014-07

Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), Juli 2014.

DIN EN 206:2017-01

Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), Januar 2017.

DIN EN 1504-10:2004-04

Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität. Teil 10: Anwendung von Stoffen und Systemen auf der Baustelle, Qualitätsüberwachung der Ausführung; Deutsche Fassung EN 150410:2003. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), April 2004.

DIN EN 1992-1-1:2011-01

Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), Januar 2011.

DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), April 2013.

DIN EN 12350-5:2009-08

Prüfung von Frischbeton. Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5:2009. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), August 2009.

DIN EN 12390-2:2009-08

Prüfung von Festbeton. Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung EN 12390-2:2009. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), August 2009.

DIN EN 12390-2/Ber 1:2012-02

Prüfung von Festbeton. Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung EN 12390-2:2009, Berichtigung zu DIN EN 12390-2:2009-08. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), Februar 2012.

DIN EN 12390-3:2009-07

Prüfung von Festbeton. Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), Juli 2009.

DIN EN 12390-6:2010-09

Prüfung von Festbeton. Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-6:2009. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), September 2010.

DIN EN 12390-13:2014-06

Prüfung von Festbeton. Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul); Deutsche Fassung EN 12390-13:2013. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), Juni 2014.

DIN EN 12878:2014-07

Pigmente zum Einfärben von zement- und/oder kalkgebundenen Baustoffen. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), Juli 2014.

DIN EN 13791:2008-05

Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen; Deutsche Fassung EN 13791:2007. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), Mai 2008.

DIN EN 14487-1:2006-03

Spritzbeton. Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität; Deutsche Fassung EN 14487-1:2005. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), März 2006.

DIN EN 14487-2:2007-01

Spritzbeton. Teil 2: Ausführung; Deutsche Fassung EN 14487-2:2006. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), Januar 2007.

DIN EN 14488-1:2005-11

Prüfung von Spritzbeton. Teil 1: Probenahme von Frisch- und Festbeton; Deutsche Fassung EN 14488-1:2005. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), November 2005.

DIN EN 14488-3:2006-09

Prüfung von Spritzbeton. Teil 3: Biegefestigkeiten (Erstriss-, Biegezug- und Restfestigkeit) von faserverstärkten balkenförmigen Betonprüfkörpern; Deutsche Fassung EN 14488-3:2006. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), September 2006.

DIN EN 14488-5:2006-08

Prüfung von Spritzbeton. Teil 5: Bestimmung der Energieabsorption bei faserverstärkten plattenförmigen Prüfkörpern; Deutsche Fassung EN 14488-5:2006. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), August 2006.

DIN EN 14488-7:2006-08

Prüfung von Spritzbeton. Teil 7: Fasergehalt von faserverstärktem Beton; Deutsche Fassung EN 14488-7:2006. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), August 2006.

DIN EN 14651:2007-12

Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), Dezember 2007.

DIN EN ISO 4287:2010-07

Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 4287:1998 + AC:2008 + A1:2009. Beuth Verlag: Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), Juli 2010.

EFNARC 1996

European Specification for Sprayed Concrete. EFNARC. 1996.

EFNARC 1997

Europäische Richtlinie für Spritzbeton. EFNARC. 1997.

EFNARC 2011

EFNARC Three Point Bending Test on Square Panel with Notch - Flexural tensile strength of fibre concrete on sprayed test specimen. EFNARC. 2011.

Everling 1962

Everling, G.: *Zur Definition der Schubfestigkeit.* In: *Glückauf* 98, Nr. 18, S. 1110–1117. 1962.

Feix 1993

Feix, J.: *Kritische Analyse und Darstellung der Bemessung für Biegung mit Längskraft, Querkraft und Torsion nach Eurocode 2 Teil 1.* Dissertation. Technische Universität München: München, November 1993.

fib Model Code 2010

fib Model Code for Concrete Structures 2010. fédération internationale du béton (fib). Wilhelm Ernst & Sohn Verlag. Berlin, 2010.

Fiebrich 1987

Fiebrich, M.: *Zur Adhäsion zwischen polymeren Bindemitteln und Beton unter besonderer Berücksichtigung von Wassereinwirkungen.* Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen: Aachen, 1987.

Fingerloos et al. 2012

Fingerloos, F.; Hegger, J. u. Zilch, K.: *Eurocode 2 für Deutschland - Kommentierte Fassung.*

Hrsg.: Bundesvereinigung der Prüferingenieure für Bautechnik; Deutscher Beton- und Betontechnik-Verein; Institut für Stahlbetonbewehrung u. Verband Beratender Ingenieure. Ernst und Sohn, Beuth: Berlin, Oktober 2012.

FIP 1982

Shear at the Interface of Precast and in Situ Concrete (Guide to good practice). Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP). Wexham Springs, Slough, England, Januar 1982.

Fischer et al. 2014

Fischer, O.; Niedermeier, R. u. Schmidt, S.: *Untersuchung der Tragfähigkeit der Verbundfuge von Spritzbetonergänzungen im Hinblick auf das nationale Anwendungsdokument zu DIN EN 14487 und DIN EN 14488*. Forschungsbericht T 3320. DIBt P 52-5- 7.307-1427/13. Technische Universität München: München, August 2014.

Fontana 2007

Fontana, P.: *Einfluss der Mischungszusammensetzung auf die frühen autogenen Verformungen der Bindemittelmatrix von Hochleistungsbetonen*. Dissertation. Technische Universität Braunschweig: Braunschweig, April 2007.

Grubbs u. Beck 1972

Grubbs, F. E. u. Beck, G.: *Extension of Sample Sizes and Percentage Points for Significance Tests of Outlying Observations*. In: *Technometrics* 14, Nr. 4, S. 847–854. November 1972.

Heere et al. 21.–22. Januar 1999

Heere, R.; Morgan, D. R.; McAskill, N. u. Chan, C.: *Duktilität von stahlmatten- und faserbewehrten Spritzbetonen*. Hrsg.: Kusterle, W.: In: *Spritzbetontagung*. Innsbruck-Igls, Österreich, 21.–22. Januar 1999, S. 171–182.

Hegger et al. 1999

Hegger, J.; Görtz, S.; Beutel, R.; Koenig, G.; Schenck, G.; Kliver, J.; Dehn, F.; Zilch, K.; Staller, M. u. Reineck, K.-H.: *Überprüfung und Vereinheitlichung der Bemessungsansätze für querkraftbeanspruchte Stahlbeton- und Spannbetonbauteile aus normalfesten und hochfesten Beton nach DIN 1045-1*. Forschungsbericht. DIBt IV 1-5-786/98. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Technische Universität München, Universität Leipzig, Universität Stuttgart: Dezember 1999.

Heilmann 1969

Heilmann, H. G.: *Beziehungen zwischen Zug- und Druckfestigkeit des Betons*. In: *beton* 19, Nr. 2, S. 68–70. Februar 1969.

ISO 1920-10:2010-09

Testing of concrete. Teil 10: Determination of static modulus of elasticity in compression. International Organization for Standardization (ISO): Genf, Schweiz, September 2010.

Kaufmann et al. 2013

Kaufmann, J.; Frech, K.; Schuetz, P. u. Münch, B.: *Rebound and orientation of fibers in wet*

sprayed concrete applications. In: *Construction and Building Materials* 49, S. 15–22. Dezember 2013.

Koenning 1991

Koenning, R.: *Untersuchung von Verbundfuge einschaliger Tunnelsicherungen unter Berücksichtigung der Einbaubedingungen*. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum: Bochum, Januar 1991.

Kusterle et al. 2014

Kusterle, W.; Jäger, J.; John, M.; Neumann, C. u. Röck, R.: *Spritzbeton im Tunnelbau*. Hrsg.: Bergmeister, K.; Fingerloos, F. u. Wörner, J.-D. In: *Beton Kalender 2014*. Ernst und Sohn: 2014. Kap. 9, S. 303–390.

Lenz 2012

Lenz, P.: *Beton-Beton-Verbund Potenziale für Schubfugen*. Dissertation. Technische Universität München: München, November 2012.

Löfgren et al. 2007

Löfgren, I.; Stang, H. u. Olesen, J. F.: *The WST method, a fracture mechanics test method for FRC*. In: *Materials and Structures* 41, Nr. 1, S. 197–211. März 2007.

ÖVBB Rili Spritzbeton 2009

Richtlinie Spritzbeton. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB). Wien, Österreich, Dezember 2009.

Reinecke 2004

Reinecke, R.: *Haftverbund und Rissverzahnung in unbewehrten Betonschubfugen*. Dissertation. Technische Universität München: München, September 2004.

RILEM 1994

Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials; AAC 13.1 Specific fracture energy and strain softening. Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux, Systemes de Construction et Ouvrages (RILEM). E&FN SPON. Cachan Cedex, Frankreich, April 1994.

Schmidt et al. 2018

Schmidt, S.; Feuerecker, J.; Niedermeier, R. u. Fischer, O.: *Ableitung mechanischer Kennwerte von Spritzbeton anhand der Druckfestigkeit*. In: *n.a.* in Vorbereitung. 2018.

Schmidt et al. 21. November 2014

Schmidt, S.; Fischer, O. u. Niedermeier, R.: *Überprüfung des Sicherheitsniveaus der Verbundfugentbemessung nach EC-2 bei Anwendung auf Spritzbetonergänzungen*. Hrsg.: Fischer, O.: In: *Münchner Massivbau Seminar*. Bd. 18. München, 21. November 2014, S. 47–54.

Thomee 2005

Thomee, B.: *Physikalisch nichtlineare Berechnung von Stahlfaserbetonkonstruktionen*. Dissertation. Technische Universität München: München, Juni 2005.

VDZ 2002

Zementtaschenbuch. e.V., V. D. Z. Verlag Bau+Technik. Duesseldorf, Mai 2002.

Weiss 2003

Weiss, J.: *Experimental Determination of the „Time Zero“ t_0 (Maturity-Zero M_0)*. Hrsg.: Bentur, A.: In: *Early Age Cracking in Cementitious Systems, RILEM Report 25 of TC 181-EAS*. Bagneux: RILEM Publications: 2003, S. 195–206.

Wittmann September–Oktober 1975

Wittmann, F. H.: *Zur Ursache der sogenannten Schrumpfrisse*. In: *Zement und Beton*, Nr. 85/86, S. 10–15. September–Oktober 1975.

Wolfram 1958

Wolfram, A.: *Die Festigkeit der Arbeitsfuge im Beton: Ein Beitrag mit Hilfe experimenteller und theoretischer Untersuchungen*. Dissertation. Technische Hochschule München: München, März 1958.

Zilch u. Müller 2007

Zilch, K. u. Müller, A.: *Grundlagen und Anwendungsregeln der Bemessung von Fugen nach EN 1992-1-1*. Forschungsbericht. Technische Universität München: München, April 2007.

Anhang

A.1 Festbetoneigenschaften

Tabelle A.1: Einzelwerte der Festbetoneigenschaften der Grundplatten

			Grundplatten			
			M-0	M-1	M-2	M-4
			15.10.2015	15.10.2015	15.10.2015	15.10.2015
Zylinderdruckfestigkeit 28 Tage	$f_{c,cyl,100/200,28}$	$[N/mm^2]$	34.54	45.83	44.10	44.70
			35.18	43.57	40.74	47.16
			35.93	47.01	45.82	44.22
			34.71	43.08	44.40	45.59
			34.45	43.65	46.03	45.92
	$f_{cm,cyl,100/200,28}$	$[N/mm^2]$	35.16	44.54	44.46	45.29
$\sigma_{fcm,cyl,100/200,28}$	$[N/mm^2]$	0.66	1.41	1.81	1.06	
Zylinderdruckfestigkeit 56 Tage	$f_{c,cyl,100/200,56}$	$[N/mm^2]$	36.77	49.53	51.03	49.96
			35.42	48.69	50.33	46.28
			35.12	45.65	45.31	48.46
			36.19	46.38	51.16	46.88
			38.63	49.34	52.65	43.82
	$f_{cm,cyl,100/200,56}$	$[N/mm^2]$	36.48	47.78	49.82	47.25
$\sigma_{fcm,cyl,100/200,56}$	$[N/mm^2]$	1.14	1.49	2.37	1.93	
Elastizitätsmodul 28 Tage	$E_{c,cyl,100/200,28}$	$[N/mm^2]$	33038	22180	23498	21525
	$E_{cm,cyl,100/200,28}$	$[N/mm^2]$	32905	22363	22999	21850
	$\sigma_{Ecm,cyl,100/200,28}$	$[N/mm^2]$	32421	24329	23091	21671
Elastizitätsmodul 56 Tage	$E_{c,cyl,100/200,56}$	$[N/mm^2]$	32726	24060	25073	23669
	$E_{cm,cyl,100/200,56}$	$[N/mm^2]$	32748	22535	24624	23927
	$\sigma_{Ecm,cyl,100/200,56}$	$[N/mm^2]$	32966	22862	23602	23961
Zylinderspaltzugfestigkeit 28 Tage	$f_{ct,spl,cyl,100/100,28}$	$[N/mm^2]$	3.28	4.24	4.54	5.02
	$f_{ctm,spl,cyl,100/100,28}$	$[N/mm^2]$	3.11	4.13	4.46	5.01
	$\sigma_{fctm,spl,cyl,100/100,28}$	$[N/mm^2]$	3.48	4.20	4.60	5.13
Zylinderspaltzugfestigkeit 56 Tage	$f_{ct,spl,cyl,100/100,56}$	$[N/mm^2]$	3.18	5.02	4.72	5.14
	$f_{ctm,spl,cyl,100/100,56}$	$[N/mm^2]$	3.42	4.75	5.26	5.16
	$\sigma_{fctm,spl,cyl,100/100,56}$	$[N/mm^2]$	3.30	4.73	4.93	5.32
Würfelspaltzugfestigkeit 56 Tage	$f_{ct,spl,cube,56}$	$[N/mm^2]$	3.81	3.21	4.35	3.46
	$f_{ctm,spl,cube,56}$	$[N/mm^2]$	3.54	3.73	3.76	2.69 ¹
			3.87	3.90	4.23	4.09
3.35			3.38	4.12	4.30	
$\sigma_{fctm,spl,cube,56}$	$[N/mm^2]$	3.64	3.55	4.12	3.95	
Keilspaltzugfestigkeit 56 Tage	$f_{ct,kspl,cube,56}$	$[N/mm^2]$	0.21	0.27	0.22	0.35
	$f_{ctm,kspl,cube,56}$	$[N/mm^2]$	-	2.27	1.70	1.87
	$\sigma_{fctm,kspl,cube,56}$	$[N/mm^2]$	1.60	1.28	1.44	2.29
Bruchenergie	$G_{F,56}$	$[Nmm/mm^2]$	-	0.0943	0.5016	1.4294
	$G_{Fm,56}$	$[Nmm/mm^2]$	0.1249	0.0964	0.4588	1.6640
	$\sigma_{GFm,56}$	$[Nmm/mm^2]$	0.1249	0.0954	0.4802	1.5467
			0.0000	0.0010	0.0214	0.1173

¹ Werte als Ausreißer nicht berücksichtigt

Tabelle A.2: Einzelwerte der Festbetoneigenschaften der Ergänzungsplatten

			Ergänzungsplatten				
			M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
			12.11.2015	12.11.2015	12.11.2015	12.11.2015	23.03.2016
Zylinderdruckfestigkeit 28 Tage	$f_{c,cyl,100/200,28}$	$[N/mm^2]$	40.49	33.98	42.82	32.75	48.92
			41.29	30.10 ¹	38.51	34.25	47.90
			36.26	35.63	40.84	41.70	48.14
			39.79	37.20	39.58	34.72	46.87
			44.73	36.24	39.23	36.95	45.21
			40.64	36.91	37.67	40.71	47.18
	$f_{cm,cyl,100/200,28}$	$[N/mm^2]$	40.53	35.99	39.78	36.85	47.37
	$\sigma_{fcm,cyl,100/200,28}$	$[N/mm^2]$	2.48	1.14	1.67	3.33	1.17
Zylinderdruckfestigkeit 56 Tage	$f_{c,cyl,100/200,56}$	$[N/mm^2]$	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-
	$f_{cm,cyl,100/200,56}$	$[N/mm^2]$	-	-	-	-	-
	$\sigma_{fcm,cyl,100/200,56}$	$[N/mm^2]$	-	-	-	-	-
Elastizitätsmodul 28 Tage	$E_{c,cyl,100/200,28}$	$[N/mm^2]$	24330	23277	21557	19403	22792
			24526	22610	20759	20911	21694
			23074	24039	20400	20570	23011
			23977	23309	20905	20295	22499
	$E_{cm,cyl,100/200,28}$	$[N/mm^2]$	643	584	484	646	576
Elastizitätsmodul 56 Tage	$E_{c,cyl,100/200,56}$	$[N/mm^2]$	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-
	$E_{cm,cyl,100/200,56}$	$[N/mm^2]$	-	-	-	-	-
	$\sigma_{Ecm,cyl,100/200,56}$	$[N/mm^2]$	-	-	-	-	-
Zylinderspaltzugfestigkeit 28 Tage	$f_{ct,spl,cyl,100/100,28}$	$[N/mm^2]$	4.56	4.32	4.70	5.08	5.29
			4.40	4.65	5.32	4.46	5.20
			4.52	4.18	4.97	4.72	4.43
	$f_{ctm,spl,cyl,100/100,28}$	$[N/mm^2]$	4.49	4.38	4.99	4.75	4.97
	$\sigma_{fctm,spl,cyl,100/100,28}$	$[N/mm^2]$	0.07	0.20	0.25	0.25	0.39
Zylinderspaltzugfestigkeit 56 Tage	$f_{ct,spl,cyl,100/100,56}$	$[N/mm^2]$	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-
	$f_{ctm,spl,cyl,100/100,56}$	$[N/mm^2]$	-	-	-	-	-
	$\sigma_{fctm,spl,cyl,100/100,56}$	$[N/mm^2]$	-	-	-	-	-
Würfelspaltzugfestigkeit 28 Tage	$f_{ct,spl,cube,28}$	$[N/mm^2]$	3.23	3.52	3.47	3.97	3.71
			3.40	3.70	3.82	4.39	3.64
			3.21	3.80	3.71	4.53	3.56
			3.59	3.71	4.11	4.72	3.79
			3.36	3.68	3.78	4.40	3.68
	$f_{ctm,spl,cube,28}$	$[N/mm^2]$	0.15	0.10	0.23	0.28	0.09
Keilspaltzugfestigkeit 28 Tage	$f_{ct,kspl,cube,28}$	$[N/mm^2]$	1.23	1.52	1.91	1.18	1.29
			1.33	1.64	-	1.24	1.27
			1.28	1.58	1.91	1.21	1.28
	$f_{ctm,kspl,cube,28}$	$[N/mm^2]$	0.05	0.06	0.00	0.03	0.01
	$\sigma_{fctm,kspl,cube,528}$	$[N/mm^2]$	0.05	0.06	0.00	0.03	0.01
Bruchenergie	$G_{F,28}$	$[Nmm/mm^2]$	0.1046	0.8800	1.6496	2.6648	1.0600
			0.0957	0.3362	-	5.4066	0.5738
			0.1001	0.6081	1.6496	4.0357	0.8169
	$G_{Fm,28}$	$[Nmm/mm^2]$	0.0045	0.2719	0.0000	1.3709	0.2431
	$\sigma_{GFm,28}$	$[Nmm/mm^2]$	0.0045	0.2719	0.0000	1.3709	0.2431

¹ Werte als Ausreißer nicht berücksichtigt

Tabelle A.3: Biegezugfestigkeiten nach (DIN EN 14651:2007-12)

			Grundplatten			Ergänzungsplatten			
			M-2	M-3	M-4	M-2	M-3	M-4	M-5
			15.10.2015	15.10.2015	15.10.2015	12.11.2015	12.11.2015	12.11.2015	23.03.2016
Proportionalitätsgrenze (LOP)	$f_{ct,L}^f$	[N/mm ²]	6.20	6.01	5.93	5.79	5.97	4.13	4.48
			5.66	5.56	5.60	5.39	5.79	5.13	4.71
			6.70	5.61	5.32	3.83	5.19	5.45	4.28
			6.18	5.50	4.82	4.01	5.52	5.70	4.24
			5.44	6.20	5.71	4.88	5.58	5.24	4.93
	4.33	5.77	5.87	5.99	5.59	5.43	5.11		
	$f_{ctm,L}^f$	[N/mm ²]	5.75	5.78	5.54	4.98	5.61	5.18	4.63
$\sigma_{fctm,L}^f$	[N/mm ²]	0.75	0.25	0.38	0.83	0.24	0.50	0.32	
$V_{fctm,L}^f$	[-]	0.13	0.04	0.07	0.17	0.04	0.10	0.07	
residuelle Biegezugfestigkeit bei CMOD=0,50mm	$f_{R,1}$	[N/mm ²]	1.49	2.70	3.76	2.53	3.77	3.36	2.94
			1.40	1.65	2.64	1.89	2.63	4.13	2.37
			3.16	1.37	2.94	1.93	3.00	4.12	1.93
			1.88	2.34	2.51	2.16	2.31	4.12	2.47
			2.11	2.03	2.12	2.52	3.94	5.15	1.34
	1.35	1.96	2.30	2.16	4.10	6.60	2.19		
	$f_{Rm,1}$	[N/mm ²]	1.90	2.01	2.71	2.20	3.29	4.58	2.21
$\sigma_{fRm,1}$	[N/mm ²]	0.63	0.43	0.53	0.25	0.68	1.04	0.49	
$V_{fRm,1}$	[-]	0.33	0.22	0.20	0.12	0.21	0.23	0.22	
residuelle Biegezugfestigkeit bei CMOD=1,50mm	$f_{R,2}$	[N/mm ²]	1.50	2.62	3.66	2.45	3.11	3.15	2.87
			1.31	1.65	2.33	1.73	2.65	3.89	2.27
			3.09	1.23	2.59	1.96	2.96	3.86	1.87
			1.85	2.37	2.30	2.01	2.26	3.92	2.43
			2.02	2.05	1.85	2.19	4.12	4.87	1.08
	1.13	1.90	1.96	1.99	4.13	6.66	2.04		
	$f_{Rm,2}$	[N/mm ²]	1.82	1.97	2.45	2.06	3.21	4.39	2.09
$\sigma_{fRm,2}$	[N/mm ²]	0.64	0.46	0.59	0.22	0.70	1.13	0.55	
$V_{fRm,2}$	[-]	0.35	0.23	0.24	0.11	0.22	0.26	0.26	
residuelle Biegezugfestigkeit bei CMOD=2,50mm	$f_{R,3}$	[N/mm ²]	1.51	2.51	3.30	2.35	2.79	2.91	2.62
			1.24	1.54	2.12	1.61	2.54	3.38	2.02
			3.08	0.20	2.29	1.60	2.93	3.45	1.76
			1.76	2.19	1.98	1.94	2.08	3.44	2.37
			1.94	1.86	1.85	1.91	3.76	4.29	1.01
	0.99	1.71	1.89	1.74	3.85	6.18	1.93		
	$f_{Rm,3}$	[N/mm ²]	1.75	1.67	2.24	1.86	2.99	3.94	1.95
$\sigma_{fRm,3}$	[N/mm ²]	0.67	0.73	0.50	0.26	0.63	1.08	0.51	
$V_{fRm,3}$	[-]	0.38	0.44	0.22	0.14	0.21	0.27	0.26	
residuelle Biegezugfestigkeit bei CMOD=3,50mm	$f_{R,4}$	[N/mm ²]	1.44	2.34	3.00	2.17	2.31	2.56	2.39
			1.10	1.60	1.86	1.44	2.30	2.97	1.72
			2.76	1.04	1.99	1.39	2.84	3.04	1.58
			1.56	2.01	1.76	1.77	1.74	2.76	2.07
			1.67	1.59	1.70	1.68	3.44	3.75	0.87
	0.88	1.23	1.70	1.41	3.54	5.58	1.72		
	$f_{Rm,4}$	[N/mm ²]	1.57	1.64	2.00	1.64	2.70	3.44	1.73
$\sigma_{fRm,4}$	[N/mm ²]	0.60	0.44	0.46	0.28	0.65	1.02	0.47	
$V_{fRm,4}$	[-]	0.38	0.27	0.23	0.17	0.24	0.30	0.27	

Tabelle A.4: Biegezugfestigkeiten nach (EFNARC 2011)

			Grundplatten			Ergänzungsplatten			
			M-2	M-3	M-4	M-2	M-3	M-4	M-5
			15.10.2015	15.10.2015	15.10.2015	12.11.2015	12.11.2015	12.11.2015	23.03.2016
Proportionalitätsgrenze (LOP)	$f_{ct,L}^f$	$[N/mm^2]$	5.93	5.52	6.58	5.42	5.98	5.81	4.41
			4.70	5.03	5.55	-	5.83	5.34	4.78
			4.59	3.83	6.38	4.41	5.98	5.64	5.41
			5.43	3.88	6.40	5.11	5.91	5.43	4.40
	$f_{ctm,L}^f$	$[N/mm^2]$	5.16	4.57	6.23	4.98	5.93	5.56	4.75
$\sigma_{fctm,L}^f$	$[N/mm^2]$	0.55	0.73	0.40	0.42	0.06	0.18	0.41	
$V_{fctm,L}^f$	$[-]$	0.11	0.16	0.06	0.08	0.01	0.03	0.09	
residuelle Biegezugfestigkeit bei CMOD=0,50mm	$f_{R,1}$	$[N/mm^2]$	1.72	2.49	3.70	1.95	5.35	3.30	1.84
			1.83	1.97	3.00	-	2.50	3.99	2.36
			1.95	2.41	2.83	1.84	4.02	4.89	2.59
			2.09	2.39	2.73	2.07	3.07	5.30	2.14
	$f_{Rm,1}$	$[N/mm^2]$	1.90	2.32	3.07	1.95	3.74	4.37	2.23
$\sigma_{fRm,1}$	$[N/mm^2]$	0.14	0.20	0.38	0.09	1.08	0.78	0.28	
$V_{fRm,1}$	$[-]$	0.07	0.09	0.12	0.05	0.29	0.18	0.12	
residuelle Biegezugfestigkeit bei CMOD=1,50mm	$f_{R,2}$	$[N/mm^2]$	1.69	2.33	3.59	1.89	5.33	3.16	1.69
			1.63	1.86	2.97	-	2.47	3.93	2.22
			1.79	2.07	2.80	1.69	3.92	4.86	2.50
			2.13	2.07	2.65	2.00	2.99	5.08	2.04
	$f_{Rm,2}$	$[N/mm^2]$	1.81	2.08	3.00	1.86	3.68	4.26	2.11
$\sigma_{fRm,2}$	$[N/mm^2]$	0.19	0.17	0.36	0.13	1.09	0.77	0.29	
$V_{fRm,2}$	$[-]$	0.11	0.08	0.12	0.07	0.30	0.18	0.14	
residuelle Biegezugfestigkeit bei CMOD=2,50mm	$f_{R,3}$	$[N/mm^2]$	1.54	2.10	3.22	1.71	2.21	2.95	1.54
			1.50	1.74	2.81	-	2.33	3.77	2.05
			1.63	1.88	2.61	1.54	3.57	4.46	2.22
			2.05	1.88	2.43	1.84	2.70	4.64	1.87
	$f_{Rm,3}$	$[N/mm^2]$	1.68	1.90	2.77	1.70	2.70	3.96	1.92
$\sigma_{fRm,3}$	$[N/mm^2]$	0.22	0.13	0.29	0.12	0.53	0.66	0.25	
$V_{fRm,3}$	$[-]$	0.13	0.07	0.11	0.07	0.20	0.17	0.13	
residuelle Biegezugfestigkeit bei CMOD=3,50mm	$f_{R,4}$	$[N/mm^2]$	1.36	1.89	2.79	1.49	-	2.65	1.38
			1.36	1.53	2.56	-	2.15	3.42	1.78
			1.52	1.71	2.34	1.38	3.20	3.97	1.88
			1.85	1.65	2.14	1.66	2.33	4.05	1.64
	$f_{Rm,4}$	$[N/mm^2]$	1.52	1.70	2.46	1.51	2.56	3.52	1.67
$\sigma_{fRm,4}$	$[N/mm^2]$	0.20	0.13	0.24	0.12	0.46	0.56	0.19	
$V_{fRm,4}$	$[-]$	0.13	0.08	0.10	0.08	0.18	0.16	0.11	

A.2 Oberflächenrautiefe nach Kaufmann

Die Bezeichnung sämtlicher Versuchskörper die aus den Verbundplatten herausgesägt wurden erfolgte gemäß dem Schema in Bild A.1. Dabei gibt die römische Endziffer die Lage des Versuchskörpers innerhalb der Verbundplatte an.

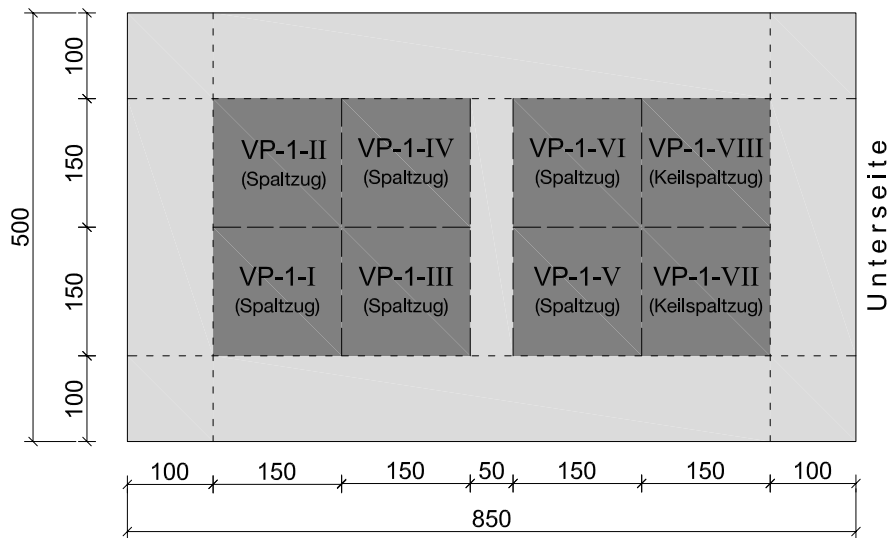


Bild A.1: Bezeichnung der Versuchskörper

Tabelle A.5: Rauheitswerte VP-1

	Messung	Volumen	Durchmesser				Rautiefe	
		$V [cm^3]$	$\phi_1 [cm]$	$\phi_2 [cm]$	$\phi_3 [cm]$	$\phi_m [cm]$	$R_t [mm]$	$R_{tm} [mm]$
VP-1-I	a	27.00	16.06	15.21	15.90	15.72	1.39	
	b	27.00	16.19	14.78	16.43	15.80	1.38	1.35
	c	27.00	16.78	15.77	16.58	16.38	1.28	
VP-1-II	a	27.00	16.12	18.26	15.70	16.69	1.23	
	b	27.00	16.16	16.98	16.35	16.50	1.26	1.24
	c	27.00	17.21	16.87	16.32	16.80	1.22	
VP-1-III	a	27.00	16.55	16.09	16.17	16.27	1.30	
	b	27.00	16.21	16.32	16.87	16.47	1.27	1.27
	c	27.00	16.17	16.58	16.91	16.55	1.25	
VP-1-IV	a	27.00	16.58	16.56	16.80	16.65	1.24	
	b	27.00	15.53	16.45	16.01	16.00	1.34	1.29
	c	27.00	16.90	16.12	16.14	16.39	1.28	
VP-1-V	a	27.00	15.90	17.80	16.91	16.87	1.21	
	b	27.00	17.30	16.41	15.81	16.51	1.26	1.24
	c	27.00	16.63	16.27	17.03	16.64	1.24	
VP-1-VI	a	27.00	15.98	16.44	16.17	16.20	1.31	
	b	27.00	15.82	15.00	16.07	15.63	1.41	1.36
	c	27.00	15.38	16.54	15.67	15.86	1.37	
VP-1-VII	a	27.00	17.57	15.93	16.91	16.80	1.22	
	b	27.00	16.36	18.06	17.52	17.31	1.15	1.17
	c	27.00	17.63	16.99	17.45	17.36	1.14	
VP-1-VIII	a	27.00	15.62	16.34	16.31	16.09	1.33	
	b	27.00	15.86	16.25	16.29	16.13	1.32	1.30
	c	27.00	15.91	17.75	16.03	16.56	1.25	

Tabelle A.6: Rauheitswerte VP-2

	Messung	Volumen	Durchmesser				Rautiefe	
		$V [cm^3]$	$\phi_1 [cm]$	$\phi_2 [cm]$	$\phi_3 [cm]$	$\phi_m [cm]$	$R_t [mm]$	$R_{tm} [mm]$
VP-2-I	a	54.00	16.31	16.65	16.35	16.44	2.54	
	b	54.00	15.99	16.17	15.88	16.01	2.68	2.60
	c	54.00	16.36	16.28	16.35	16.33	2.58	
VP-2-II	a	54.00	15.47	16.38	15.29	15.71	2.78	
	b	54.00	16.09	15.62	15.56	15.76	2.77	2.79
	c	54.00	15.66	15.43	15.78	15.62	2.82	
VP-2-III	a	54.00	15.47	15.60	16.43	15.83	2.74	
	b	54.00	16.15	14.96	15.67	15.59	2.83	2.81
	c	54.00	15.02	15.24	16.21	15.49	2.87	
VP-2-IV	a	54.00	15.92	15.58	15.39	15.63	2.81	
	b	54.00	15.72	16.13	15.69	15.85	2.74	2.84
	c	54.00	15.42	14.79	15.50	15.24	2.96	
VP-2-V	a	54.00	15.99	15.98	16.40	16.12	2.64	
	b	54.00	15.62	15.70	15.49	15.60	2.82	2.74
	c	54.00	16.30	15.70	15.51	15.84	2.74	
VP-2-VI	a	54.00	16.14	15.99	16.18	16.10	2.65	
	b	54.00	15.97	16.22	16.38	16.19	2.62	2.70
	c	54.00	15.71	15.81	15.32	15.61	2.82	
VP-2-VII	a	54.00	16.48	16.80	16.73	16.67	2.47	
	b	54.00	15.83	15.93	16.37	16.04	2.67	2.60
	c	54.00	16.54	15.54	16.26	16.11	2.65	
VP-2-VIII	a	54.00	16.88	17.17	17.01	17.02	2.37	
	b	54.00	16.19	17.87	17.73	17.26	2.31	2.38
	c	54.00	16.35	17.27	16.58	16.73	2.46	

Tabelle A.7: Rauheitswerte VP-3

	Messung	Volumen	Durchmesser				Rautiefe	
		$V [cm^3]$	$\phi_1 [cm]$	$\phi_2 [cm]$	$\phi_3 [cm]$	$\phi_m [cm]$	$R_t [mm]$	$R_{tm} [mm]$
VP-3-I	a	27.00	17.10	17.44	16.84	17.13	1.17	
	b	27.00	16.88	17.20	16.81	16.96	1.19	1.18
	c	27.00	17.31	17.68	16.45	17.15	1.17	
VP-3-II	a	27.00	17.29	17.08	16.59	16.99	1.19	
	b	27.00	16.83	17.00	16.31	16.71	1.23	1.21
	c	27.00	17.13	16.67	16.51	16.77	1.22	
VP-3-III	a	27.00	15.91	15.76	16.08	15.92	1.36	
	b	27.00	15.63	15.66	16.14	15.81	1.38	1.38
	c	27.00	16.23	15.50	15.34	15.69	1.40	
VP-3-IV	a	27.00	16.27	16.65	15.86	16.26	1.30	
	b	27.00	16.97	16.08	16.01	16.35	1.29	1.29
	c	27.00	16.41	16.51	16.13	16.35	1.29	
VP-3-V	a	27.00	15.57	16.27	16.76	16.20	1.31	
	b	27.00	16.33	15.33	16.11	15.92	1.36	1.33
	c	27.00	16.13	15.76	16.50	16.13	1.32	
VP-3-VI	a	27.00	15.72	16.02	16.82	16.19	1.31	
	b	27.00	15.74	15.91	16.58	16.08	1.33	1.35
	c	27.00	15.78	15.03	16.12	15.64	1.40	
VP-3-VII	a	27.00	15.77	16.55	17.34	16.55	1.25	
	b	27.00	16.12	16.87	15.89	16.29	1.29	1.28
	c	27.00	16.54	16.61	15.98	16.38	1.28	
VP-3-VIII	a	27.00	15.98	15.24	16.91	16.04	1.34	
	b	27.00	17.49	16.35	16.65	16.83	1.21	1.26
	c	27.00	16.78	17.01	16.47	16.75	1.22	

Tabelle A.8: Rauheitswerte VP-4

	Messung	Volumen	Durchmesser				Rautiefe	
		$V [cm^3]$	$\phi_1 [cm]$	$\phi_2 [cm]$	$\phi_3 [cm]$	$\phi_m [cm]$	$R_t [mm]$	$R_{tm} [mm]$
VP-4-I	a	54.00	17.30	17.05	16.96	17.10	2.35	
	b	54.00	16.95	17.51	17.33	17.26	2.31	2.37
	c	54.00	16.60	16.90	16.74	16.75	2.45	
VP-4-II	a	54.00	16.65	16.20	16.21	16.35	2.57	
	b	54.00	17.47	16.83	16.97	17.09	2.35	2.42
	c	54.00	17.42	16.88	17.26	17.19	2.33	
VP-4-III	a	54.00	16.02	15.63	16.23	15.96	2.70	
	b	54.00	16.30	16.98	17.01	16.76	2.45	2.59
	c	54.00	16.24	15.75	16.65	16.21	2.62	
VP-4-IV	a	54.00	17.33	16.22	17.01	16.85	2.42	
	b	54.00	16.62	15.88	16.98	16.49	2.53	2.48
	c	54.00	17.03	16.07	16.60	16.57	2.51	
VP-4-V	a	54.00	16.18	15.52	15.40	15.70	2.79	
	b	54.00	15.39	16.01	16.49	15.96	2.70	2.78
	c	54.00	15.67	15.46	15.41	15.51	2.86	
VP-4-VI	a	54.00	15.54	16.88	15.63	16.02	2.68	
	b	54.00	15.54	15.71	16.41	15.89	2.72	2.74
	c	54.00	16.35	15.54	14.96	15.62	2.82	
VP-4-VII	a	54.00	15.40	16.07	15.10	15.52	2.85	
	b	54.00	15.01	15.69	14.92	15.21	2.97	2.89
	c	54.00	16.08	14.72	15.80	15.53	2.85	
VP-4-VIII	a	54.00	15.14	14.92	14.45	14.84	3.12	
	b	54.00	15.10	15.40	15.02	15.17	2.99	2.97
	c	54.00	15.79	15.85	15.29	15.64	2.81	

Tabelle A.9: Rauheitswerte VP-5

	Messung	Volumen	Durchmesser				Rautiefe	
		$V [cm^3]$	$\phi_1 [cm]$	$\phi_2 [cm]$	$\phi_3 [cm]$	$\phi_m [cm]$	$R_t [mm]$	$R_{tm} [mm]$
VP-5-I	a	54.00	14.09	15.50	13.94	14.51	3.27	
	b	54.00	13.99	14.76	14.86	14.54	3.25	3.23
	c	54.00	14.21	14.79	15.11	14.70	3.18	
VP-5-II	a	54.00	14.22	14.17	14.80	14.40	3.32	
	b	54.00	13.80	14.85	14.50	14.38	3.32	3.36
	c	54.00	13.68	15.26	13.57	14.17	3.43	
VP-5-III	a	54.00	14.05	15.27	13.79	14.37	3.33	
	b	54.00	13.40	15.24	15.71	14.78	3.15	3.24
	c	54.00	14.06	14.80	14.77	14.54	3.25	
VP-5-IV	a	54.00	14.45	14.85	15.16	14.82	3.13	
	b	54.00	14.00	14.34	14.86	14.40	3.32	3.27
	c	54.00	13.76	14.77	14.32	14.28	3.37	
VP-5-V	a	54.00	12.51	12.57	13.28	12.79	4.20	
	b	54.00	12.92	12.86	12.31	12.70	4.27	4.18
	c	54.00	13.13	12.80	13.01	12.98	4.08	
VP-5-VI	a	54.00	12.96	12.51	12.26	12.58	4.35	
	b	54.00	12.56	12.71	12.51	12.59	4.34	4.27
	c	54.00	12.88	13.53	12.26	12.89	4.14	
VP-5-VII	a	54.00	13.06	13.72	11.31	12.70	4.27	
	b	54.00	12.21	12.64	12.16	12.33	4.52	4.37
	c	54.00	12.41	12.92	12.46	12.60	4.33	
VP-5-VIII	a	54.00	12.65	11.73	11.24	11.87	4.88	
	b	54.00	11.94	12.32	12.39	12.21	4.61	4.87
	c	54.00	11.31	11.58	11.83	11.57	5.13	

Tabelle A.10: Rauheitswerte VP-6

	Messung	Volumen	Durchmesser				Rautiefe	
		$V [cm^3]$	$\phi_1 [cm]$	$\phi_2 [cm]$	$\phi_3 [cm]$	$\phi_m [cm]$	$R_t [mm]$	$R_{tm} [mm]$
VP-6-I	a	54.00	12.78	13.62	13.02	13.14	3.98	
	b	54.00	13.12	13.68	13.45	13.42	3.82	3.85
	c	54.00	12.87	13.99	13.81	13.55	3.74	
VP-6-II	a	54.00	15.13	14.80	15.10	15.01	3.05	
	b	54.00	15.14	14.65	15.49	15.09	3.02	2.98
	c	54.00	15.63	15.43	15.33	15.46	2.88	
VP-6-III	a	54.00	12.63	14.14	15.03	13.93	3.54	
	b	54.00	13.26	13.64	14.32	13.74	3.64	3.63
	c	54.00	13.84	12.97	14.13	13.64	3.69	
VP-6-IV	a	54.00	14.18	15.28	13.68	14.38	3.33	
	b	54.00	13.97	14.66	14.15	14.26	3.38	3.36
	c	54.00	13.76	15.29	13.86	14.30	3.36	
VP-6-V	a	54.00	15.02	15.17	15.16	15.12	3.01	
	b	54.00	14.03	14.81	14.56	14.47	3.29	3.16
	c	54.00	14.36	14.18	15.64	14.72	3.17	
VP-6-VI	a	54.00	11.65	12.59	12.52	12.26	4.58	
	b	54.00	11.12	12.46	13.22	12.27	4.57	4.61
	c	54.00	11.06	12.64	12.60	12.10	4.70	
VP-6-VII	a	54.00	14.98	15.34	14.98	15.10	3.02	
	b	54.00	15.46	14.49	14.87	14.94	3.08	2.99
	c	54.00	15.43	15.95	15.14	15.50	2.86	
VP-6-VIII	a	54.00	14.31	14.42	13.52	14.09	3.47	
	b	54.00	14.90	14.38	13.62	14.30	3.36	3.37
	c	54.00	14.66	14.85	13.89	14.47	3.29	

Tabelle A.11: Rauheitswerte VP-7

	Messung	Volumen	Durchmesser				Rautiefe	
		$V [cm^3]$	$\phi_1 [cm]$	$\phi_2 [cm]$	$\phi_3 [cm]$	$\phi_m [cm]$	$R_t [mm]$	$R_{tm} [mm]$
VP-7-I	a	54.00	13.46	12.78	13.52	13.25	3.91	
	b	54.00	12.62	12.56	13.00	12.72	4.25	4.09
	c	54.00	13.37	12.73	12.72	12.94	4.11	
VP-7-II	a	54.00	13.56	14.39	13.85	13.93	3.54	
	b	54.00	13.38	14.60	13.32	13.76	3.63	3.55
	c	54.00	13.38	14.83	14.01	14.07	3.47	
VP-7-III	a	54.00	13.60	13.81	13.13	13.51	3.77	
	b	54.00	13.71	13.52	13.53	13.59	3.72	3.82
	c	54.00	12.60	13.79	13.05	13.15	3.98	
VP-7-IV	a	54.00	14.70	14.42	14.67	14.60	3.23	
	b	54.00	14.35	13.36	13.62	13.78	3.62	3.48
	c	54.00	14.15	13.64	13.64	13.81	3.60	
VP-7-V	a	54.00	14.61	14.07	13.87	14.18	3.42	
	b	54.00	14.54	13.99	14.20	14.24	3.39	3.39
	c	54.00	14.72	13.62	14.53	14.29	3.37	
VP-7-VI	a	54.00	13.88	14.10	13.07	13.68	3.67	
	b	54.00	14.67	14.02	14.23	14.31	3.36	3.51
	c	54.00	14.14	13.84	14.09	14.03	3.50	
VP-7-VII	a	54.00	13.93	13.13	13.61	13.56	3.74	
	b	54.00	13.32	13.47	13.38	13.39	3.84	3.73
	c	54.00	13.74	13.52	14.18	13.81	3.60	
VP-7-VIII	a	54.00	12.43	12.95	13.53	12.97	4.09	
	b	54.00	14.08	13.33	13.07	13.49	3.78	3.87
	c	54.00	14.11	13.49	13.09	13.56	3.74	

Tabelle A.12: Rauheitswerte VP-8

	Messung	Volumen	Durchmesser				Rautiefe	
		$V [cm^3]$	$\phi_1 [cm]$	$\phi_2 [cm]$	$\phi_3 [cm]$	$\phi_m [cm]$	$R_t [mm]$	$R_{tm} [mm]$
VP-8-I	a	54.00	14.33	13.76	14.80	14.30	3.36	
	b	54.00	13.42	14.28	14.43	14.04	3.49	3.45
	c	54.00	13.57	14.20	14.26	14.01	3.50	
VP-8-II	a	54.00	14.80	15.53	14.15	14.83	3.13	
	b	54.00	14.32	14.98	13.89	14.40	3.32	3.26
	c	54.00	13.95	15.47	13.71	14.38	3.33	
VP-8-III	a	54.00	15.49	15.10	14.18	14.92	3.09	
	b	54.00	14.54	14.34	13.95	14.28	3.37	3.25
	c	54.00	14.51	14.55	14.30	14.45	3.29	
VP-8-IV	a	54.00	13.25	14.33	13.75	13.78	3.62	
	b	54.00	12.97	14.00	13.81	13.59	3.72	3.81
	c	54.00	12.31	13.28	13.30	12.97	4.09	
VP-8-V	a	54.00	13.63	14.29	13.45	13.79	3.62	
	b	54.00	14.13	14.51	14.24	14.29	3.37	3.45
	c	54.00	13.93	14.78	14.21	14.31	3.36	
VP-8-VI	a	54.00	13.49	13.40	13.29	13.39	3.83	
	b	54.00	12.81	13.73	13.32	13.29	3.90	3.84
	c	54.00	14.03	13.88	12.54	13.48	3.78	
VP-8-VII	a	54.00	13.58	13.71	13.23	13.50	3.77	
	b	54.00	13.24	13.73	13.53	13.50	3.77	3.64
	c	54.00	14.34	14.50	13.90	14.25	3.39	
VP-8-VIII	a	54.00	12.36	12.18	11.86	12.13	4.67	
	b	54.00	12.58	12.15	12.78	12.51	4.40	4.51
	c	54.00	12.08	12.27	12.93	12.43	4.45	

Tabelle A.13: Rauheitswerte VP-9

	Messung	Volumen		Durchmesser			Rautiefe	
		$V [cm^3]$	$\phi_1 [cm]$	$\phi_2 [cm]$	$\phi_3 [cm]$	$\phi_m [cm]$	$R_t [mm]$	$R_{tm} [mm]$
VP-9-I	a	54.00	12.15	12.41	12.56	12.37	4.49	
	b	54.00	13.18	13.17	12.87	13.07	4.02	4.14
	c	54.00	12.95	13.17	13.69	13.27	3.90	
VP-9-II	a	54.00	13.56	12.89	13.28	13.24	3.92	
	b	54.00	13.90	13.57	12.55	13.34	3.86	3.97
	c	54.00	12.63	12.49	13.66	12.93	4.11	
VP-9-III	a	54.00	13.36	14.39	13.41	13.72	3.65	
	b	54.00	11.68	13.05	12.99	12.57	4.35	4.00
	c	54.00	12.63	13.85	12.87	13.12	4.00	
VP-9-IV	a	54.00	12.39	11.77	12.91	12.35	4.50	
	b	54.00	12.28	12.93	12.59	12.60	4.33	4.30
	c	54.00	12.50	13.03	13.45	12.99	4.07	
VP-9-V	a	54.00	13.74	13.34	14.17	13.75	3.64	
	b	54.00	14.37	13.77	14.45	14.20	3.41	3.50
	c	54.00	14.09	13.85	14.34	14.09	3.46	
VP-9-VI	a	54.00	11.76	13.52	13.37	12.88	4.14	
	b	54.00	12.73	12.57	12.68	12.66	4.29	4.15
	c	54.00	12.68	13.29	13.24	13.07	4.03	
VP-9-VII	a	54.00	13.21	14.00	12.48	13.23	3.93	
	b	54.00	13.38	12.74	13.43	13.18	3.96	3.86
	c	54.00	13.38	13.68	13.82	13.62	3.70	
VP-9-VIII	a	54.00	13.18	13.95	13.38	13.50	3.77	
	b	54.00	13.90	13.20	14.12	13.74	3.64	3.75
	c	54.00	13.56	13.22	13.32	13.37	3.85	

Tabelle A.14: Rauheitswerte VP-10

	Messung	Volumen	Durchmesser				Rautiefe	
		$V [cm^3]$	$\phi_1 [cm]$	$\phi_2 [cm]$	$\phi_3 [cm]$	$\phi_m [cm]$	$R_t [mm]$	$R_{tm} [mm]$
VP-10-I	a	54.00	12.76	13.52	13.13	13.14	3.99	
	b	54.00	12.46	13.30	13.28	13.01	4.06	4.04
	c	54.00	12.81	13.23	12.98	13.01	4.07	
VP-10-II	a	54.00	13.46	14.06	14.91	14.14	3.44	
	b	54.00	14.25	14.45	14.95	14.55	3.25	3.38
	c	54.00	13.60	14.46	14.24	14.10	3.46	
VP-10-III	a	54.00	13.68	13.90	13.66	13.75	3.64	
	b	54.00	13.18	13.39	13.04	13.20	3.95	3.69
	c	54.00	13.54	14.57	14.00	14.04	3.49	
VP-10-IV	a	54.00	12.70	14.80	13.94	13.81	3.60	
	b	54.00	12.78	14.08	14.76	13.87	3.57	3.57
	c	54.00	13.39	14.92	13.54	13.95	3.53	
VP-10-V	a	54.00	13.03	13.14	13.18	13.12	4.00	
	b	54.00	13.67	13.58	13.23	13.49	3.78	3.81
	c	54.00	13.86	14.55	12.80	13.74	3.64	
VP-10-VI	a	54.00	14.04	13.86	13.86	13.92	3.55	
	b	54.00	13.01	13.78	13.20	13.33	3.87	3.75
	c	54.00	13.69	13.52	12.92	13.38	3.84	
VP-10-VII	a	54.00	14.38	13.03	13.66	13.69	3.67	
	b	54.00	12.33	12.69	13.04	12.68	4.27	3.93
	c	54.00	13.22	13.18	13.66	13.35	3.86	
VP-10-VIII	a	54.00	14.45	13.71	14.09	14.08	3.47	
	b	54.00	14.81	15.37	15.44	15.21	2.97	3.25
	c	54.00	14.70	14.40	14.10	14.40	3.32	

Tabelle A.15: Rauheitswerte VP-11

	Messung	Volumen	Durchmesser				Rautiefe	
		$V [cm^3]$	$\phi_1 [cm]$	$\phi_2 [cm]$	$\phi_3 [cm]$	$\phi_m [cm]$	$R_t [mm]$	$R_{tm} [mm]$
VP-11-I	a	54.00	13.67	14.13	14.32	14.04	3.49	
	b	54.00	13.38	13.66	13.67	13.57	3.73	3.59
	c	54.00	13.99	13.76	14.09	13.94	3.54	
VP-11-II	a	54.00	15.25	15.29	15.06	15.20	2.98	
	b	54.00	15.02	15.29	15.22	15.18	2.99	3.00
	c	54.00	15.29	15.15	14.62	15.02	3.05	
VP-11-III	a	54.00	14.34	13.62	14.24	14.06	3.48	
	b	54.00	14.31	13.68	14.66	14.21	3.40	3.41
	c	54.00	14.57	14.13	14.25	14.31	3.36	
VP-11-IV	a	54.00	16.65	15.82	16.93	16.47	2.54	
	b	54.00	16.29	16.20	16.76	16.42	2.55	2.56
	c	54.00	16.59	16.93	15.29	16.27	2.60	
VP-11-V	a	54.00	13.59	13.80	13.96	13.78	3.62	
	b	54.00	13.10	13.33	13.63	13.35	3.86	3.66
	c	54.00	13.61	13.71	14.77	14.03	3.49	
VP-11-VI	a	54.00	14.16	14.31	13.58	14.01	3.50	
	b	54.00	14.45	14.95	13.43	14.28	3.37	3.51
	c	54.00	13.92	14.03	13.12	13.69	3.67	
VP-11-VII	a	54.00	15.76	14.81	14.94	15.17	2.99	
	b	54.00	15.14	15.62	14.39	15.05	3.04	3.03
	c	54.00	15.27	13.75	16.01	15.01	3.05	
VP-11-VIII	a	54.00	15.29	14.81	14.52	14.87	3.11	
	b	54.00	14.49	14.40	14.80	14.56	3.24	3.13
	c	54.00	15.80	14.66	14.61	15.02	3.05	

Tabelle A.16: Rauheitswerte VP-12

	Messung	Volumen		Durchmesser			Rautiefe	
		$V [cm^3]$	$\phi_1 [cm]$	$\phi_2 [cm]$	$\phi_3 [cm]$	$\phi_m [cm]$	$R_t [mm]$	$R_{tm} [mm]$
VP-12-I	a	54.00	14.83	15.12	14.83	14.93	3.09	
	b	54.00	14.54	14.64	14.17	14.45	3.29	3.17
	c	54.00	14.93	14.58	14.94	14.81	3.13	
VP-12-II	a	54.00	15.03	16.68	15.07	15.60	2.83	
	b	54.00	15.54	16.86	15.88	16.09	2.65	2.73
	c	54.00	15.61	16.10	16.09	15.94	2.71	
VP-12-III	a	54.00	14.32	15.65	16.31	15.43	2.89	
	b	54.00	14.48	15.51	15.15	15.04	3.04	2.98
	c	54.00	15.08	15.20	15.01	15.10	3.02	
VP-12-IV	a	54.00	16.43	16.32	17.41	16.72	2.46	
	b	54.00	15.53	16.77	18.24	16.85	2.42	2.49
	c	54.00	16.27	15.84	16.84	16.32	2.58	
VP-12-V	a	54.00	14.51	14.03	13.83	14.12	3.45	
	b	54.00	13.00	13.12	13.49	13.20	3.94	3.68
	c	54.00	13.22	14.08	13.95	13.75	3.64	
VP-12-VI	a	54.00	14.60	13.69	14.27	14.18	3.42	
	b	54.00	13.87	12.66	13.92	13.48	3.78	3.62
	c	54.00	14.07	13.29	13.82	13.72	3.65	
VP-12-VII	a	54.00	14.05	14.61	12.96	13.87	3.57	
	b	54.00	14.11	14.09	13.59	13.93	3.54	3.51
	c	54.00	13.64	14.80	14.11	14.18	3.42	
VP-12-VIII	a	54.00	14.85	13.70	13.92	14.16	3.43	
	b	54.00	15.17	14.20	14.77	14.71	3.18	3.43
	c	54.00	13.28	13.93	13.82	13.68	3.68	

A.3 Verbundfestigkeiten

Die zeilenweise Reihenfolge der Angabe der Einzelwerte der Verbundfestigkeiten je Verbundplatte der nachfolgenden Tabellen erfolgt aufsteigend gemäß deren Lagebezeichnung durch römische Ziffern (sh. Bild A.1).

Tabelle A.17: Einzelwerte der Verbundfestigkeiten; VP-1 bis VP-5

			VP-1	VP-2	VP-3	VP-4	VP-5		
			M-0	M-0	M-0	M-0	M-1		
			M-5	M-5	M-5	M-5	M-1		
Würfelspaltzugfestigkeit	$f_{ct,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	2.90	2.81	2.38	2.37	3.31		
			3.08	3.19	2.11	3.34	3.07		
			3.07	3.09	2.69	2.60	2.85		
			2.79	3.17	3.12	3.52	3.28		
			3.37	2.95	3.03	2.77	3.15		
			2.95	3.24	2.60	3.27	3.42		
			3.03	3.08	2.66	2.98	3.18		
$f_{ctm,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	0.18	0.15	0.35	0.42	0.19			
Würfelkeilspaltzugfestigkeit	$f_{ct,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	1.00	1.46	1.00	1.04	1.71		
			1.03	1.30	1.03	-	1.56		
			1.01	1.38	1.01	1.04	1.64		
Bruchenergie	$\sigma_{fctm,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	0.01	0.08	0.01	0.00	0.08		
			G_F	$[Nmm/mm^2]$	0.0848	0.0737	0.0602	0.0581	0.0855
			G_{Fm}	$[Nmm/mm^2]$	0.0523	0.0979	0.0505	-	0.0770
Bruchenergie	σ_{GFm}	$[Nmm/mm^2]$	0.0162	0.0121	0.0048	0.0000	0.0042		

Tabelle A.18: Einzelwerte der Verbundfestigkeiten; VP-6 bis VP-8

			VP-6	VP-7	VP-8		
			M-2	M-2	M-2		
			M-2	M-3	M-4		
Würfelspaltzugfestigkeit	$f_{ct,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	3.29	3.87	3.93		
			3.11	3.18	3.86		
			3.50	4.00	2.86		
			3.05	3.77	4.16		
			3.34	3.52	2.60		
			3.75	3.52	3.64		
			3.34	3.64	3.51		
$f_{ctm,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	0.23	0.27	0.58			
Würfelkeilspaltzugfestigkeit	$f_{ct,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	1.22	1.33	1.30		
			1.78	1.44	1.54		
			1.50	1.39	1.42		
Bruchenergie	$\sigma_{fctm,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	0.28	0.05	0.12		
			G_F	$[Nmm/mm^2]$	0.1812	0.3276	0.1757
			G_{Fm}	$[Nmm/mm^2]$	0.1910	0.1346	0.2375
Bruchenergie	σ_{GFm}	$[Nmm/mm^2]$	0.0049	0.0965	0.0309		

Tabelle A.19: Experimentelle Verbundfestigkeiten des Versuchstyps IIc

Probekörper- bezeichnung	R_t [mm]	Mischung	α [°]	$\min f_{cm,cyl,100/200}$ [N/mm ²]	$F_{max,exp}$ [kN]	$\sigma_{n,exp}$ [N/mm ²]	v_{exp} [N/mm ²]
VP-10-III-IV	3,63	M-2	60	44,87	484,74	5,44	9,42
VP-10-V-VI	3,78	M-2	60	44,87	595,71	6,78	11,74
VP-10-I-II	3,71	M-2	65	44,87	357,35	3,39	7,27
VP-10-VII-VIII	3,59	M-2	65	44,87	462,80	4,42	9,48
VP-9-I-II	4,05	M-2	70	44,87	359,50	2,75	7,56
VP-9-III-IV	4,15	M-2	70	44,87	421,78	3,21	8,81
VP-9-VI-VIII	3,95	M-2	75	44,87	340,98	1,97	7,37
VP-9-V-VII	3,68	M-2	75	44,87	442,90	2,58	9,64
VP-12-I-II	2,95	M-4	60	40,31	746,52	8,27	14,32
VP-12-III-IV	2,74	M-4	60	40,31	671,84	7,52	13,02
VP-12-VII-VIII	3,47	M-4	65	40,31	488,67	4,62	9,91
VP-12-V-VI	3,65	M-4	65	40,31	490,11	4,60	9,87
VP-11-I-II	3,29	M-4	70	40,31	457,40	3,47	9,53
VP-11-III-V	3,53	M-4	70	40,31	419,50	3,21	8,82
VP-11-IV-VI	3,04	M-4	75	40,31	317,35	1,82	6,79
VP-11-VII-VIII	3,08	M-4	75	40,31	345,65	2,03	7,57

A.4 Belastungsregime Keilspaltzugversuch

Tabelle A.20: Belastungsregime Keilspaltzugversuch

Belastungsabschnitt	Geschwindigkeit
0 – 500 [N]	50 [$\frac{N}{s}$]
bis 0,05 [mm]	0,01 [$\frac{mm}{min}$]
0,05 – 0,1 [mm]	0,05 [$\frac{mm}{min}$]
0,1 – 0,2 [mm]	0,1 [$\frac{mm}{min}$]
0,2 – 1 [mm]	0,4 [$\frac{mm}{min}$]
1 – 5 [mm]	1 [$\frac{mm}{min}$]

A.5 Schwindkurven

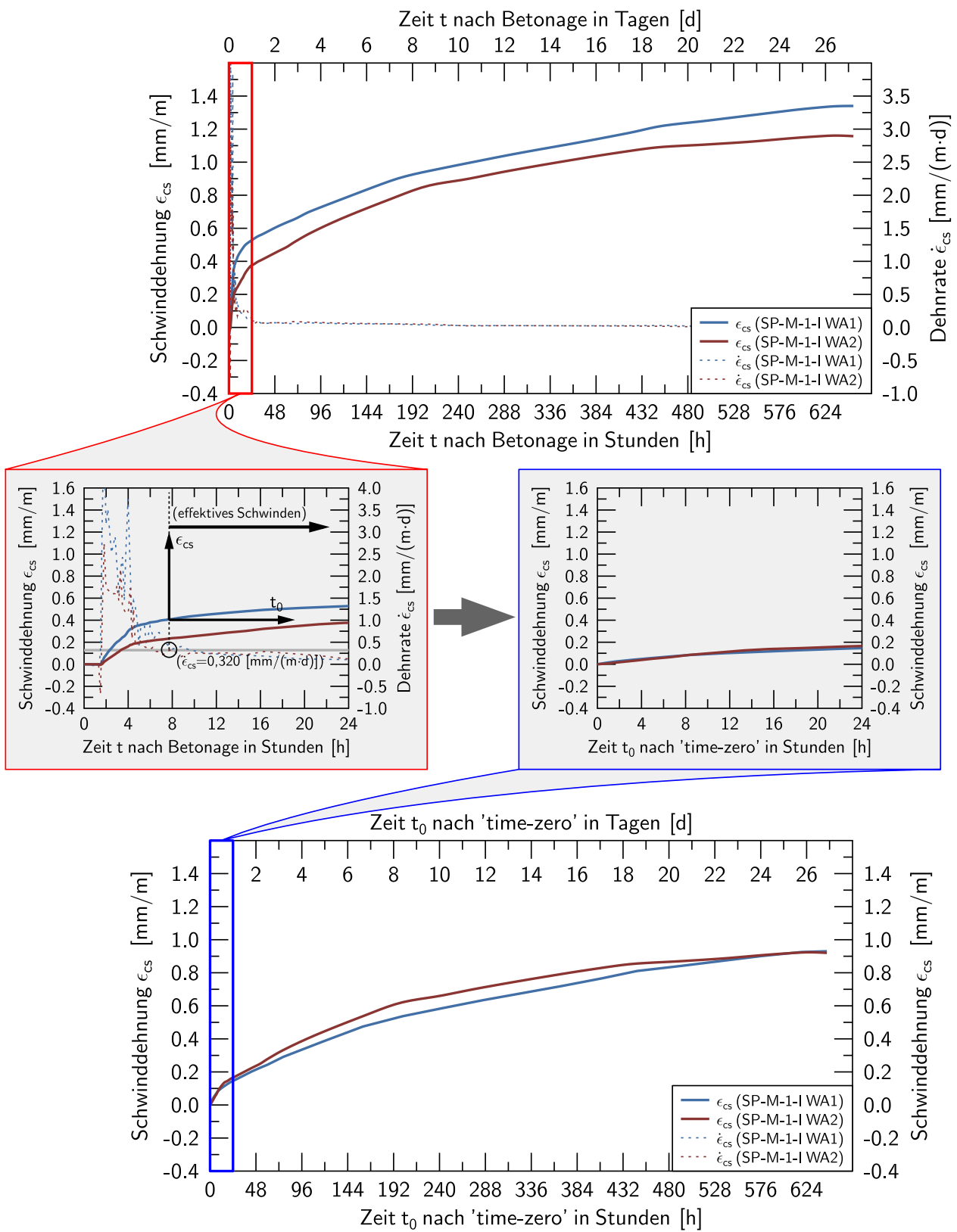


Bild A.2: Schwindverlauf von SP-M-1-I; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrate $\dot{\epsilon}_{cs}$

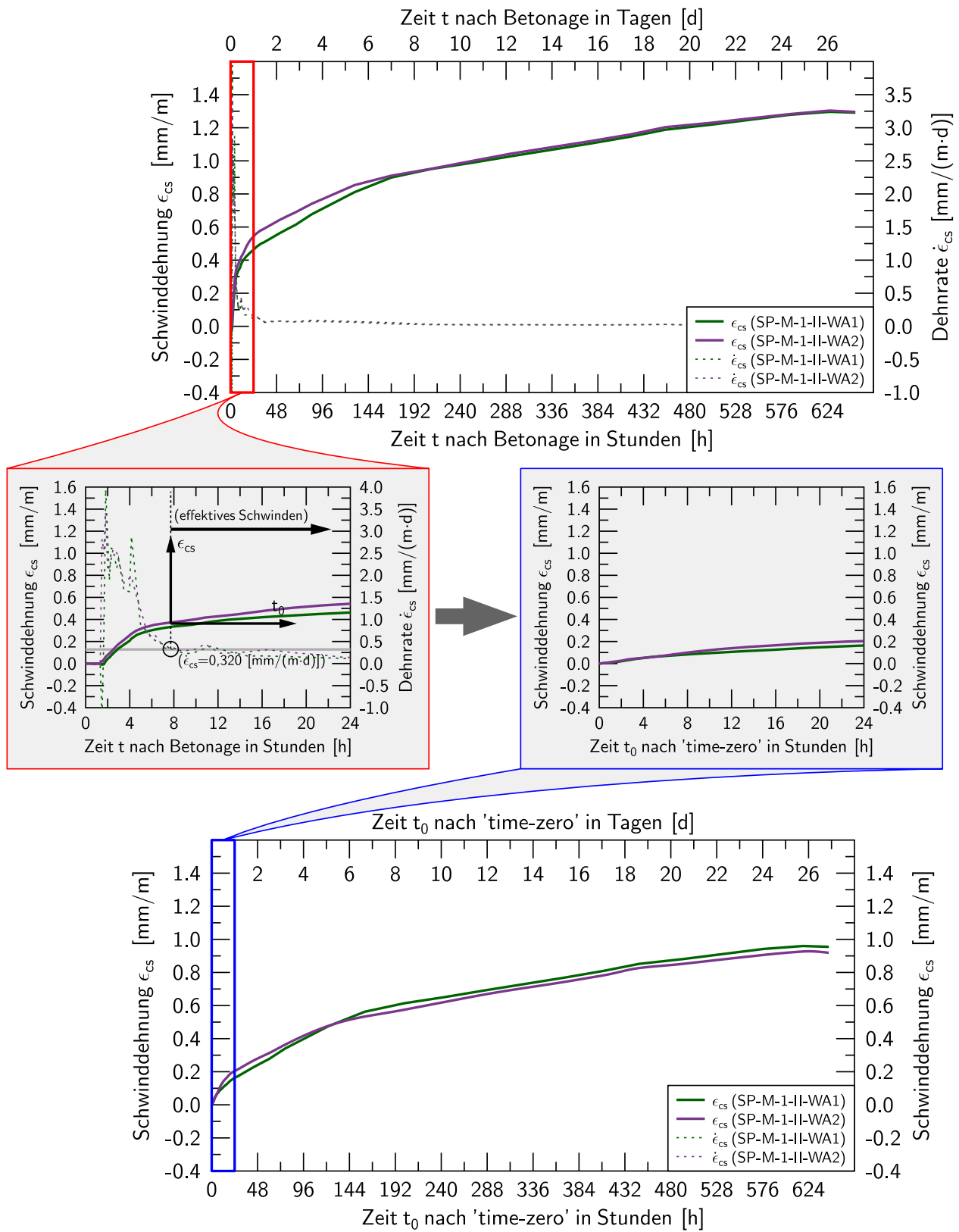


Bild A.3: Schwindverlauf von SP-M-1-II; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrate $\dot{\epsilon}_{cs}$

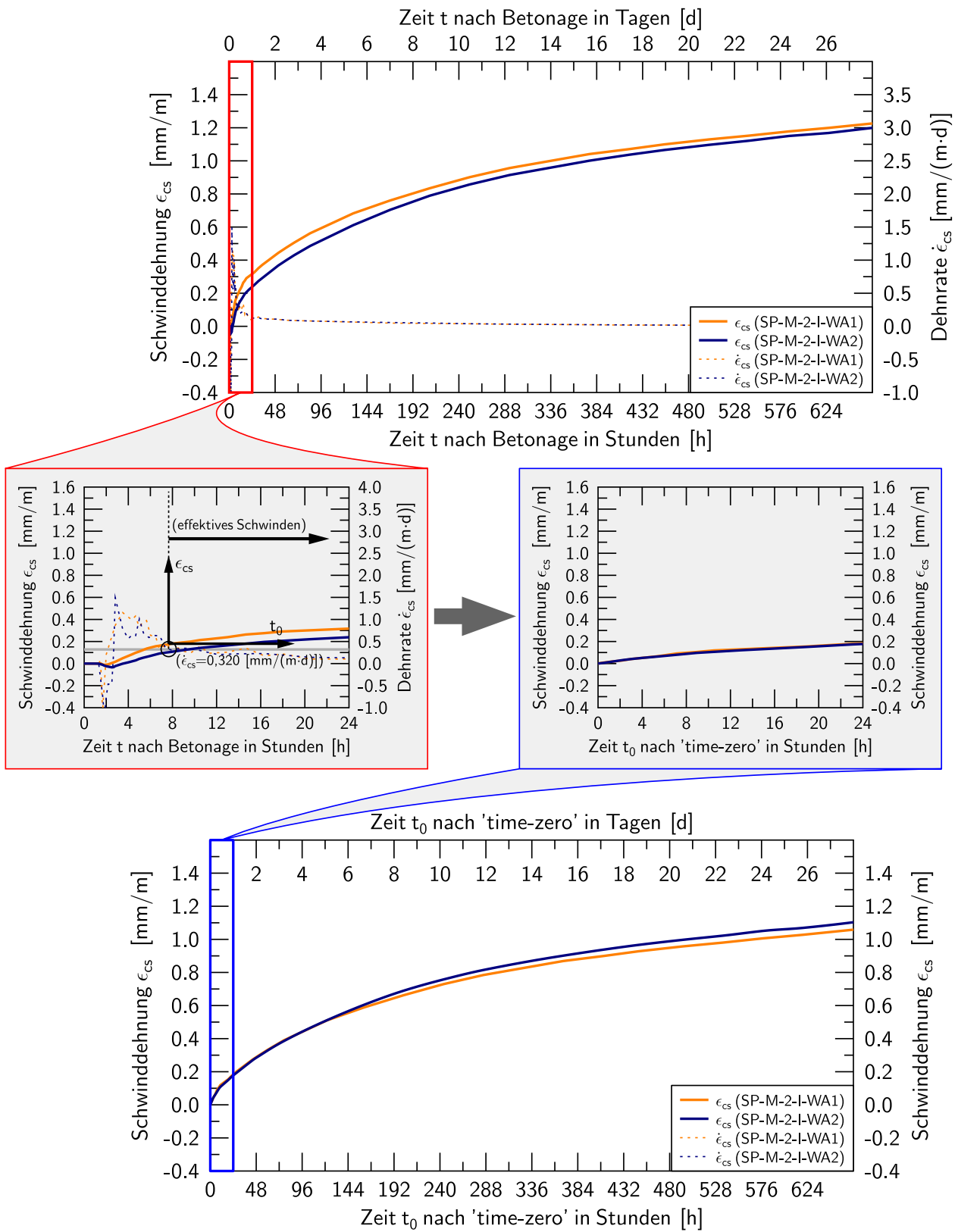


Bild A.4: Schwindverlauf von SP-M-2-I; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrate $\dot{\epsilon}_{cs}$

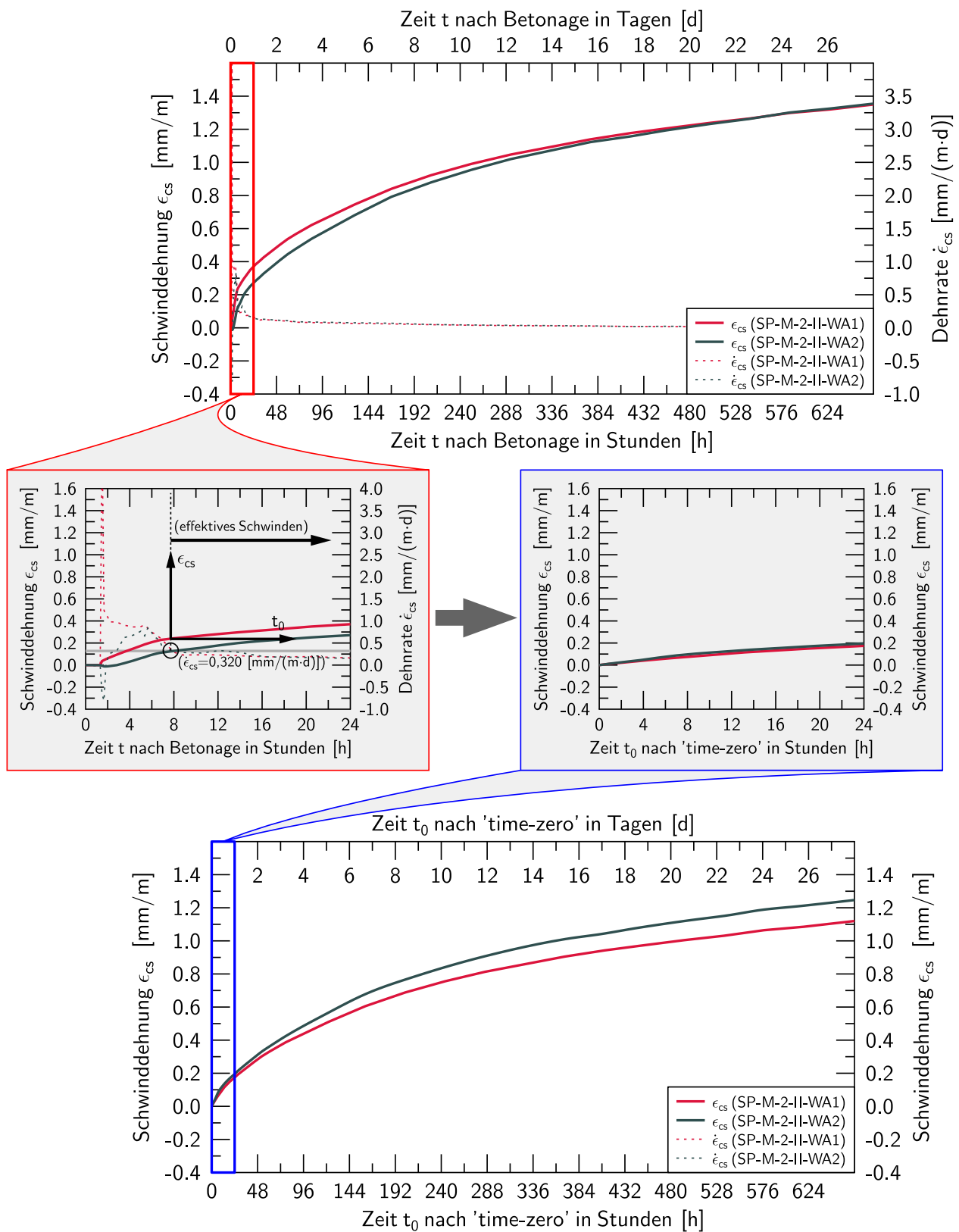


Bild A.5: Schwindverlauf von SP-M-2-II; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrate $\dot{\epsilon}_{cs}$

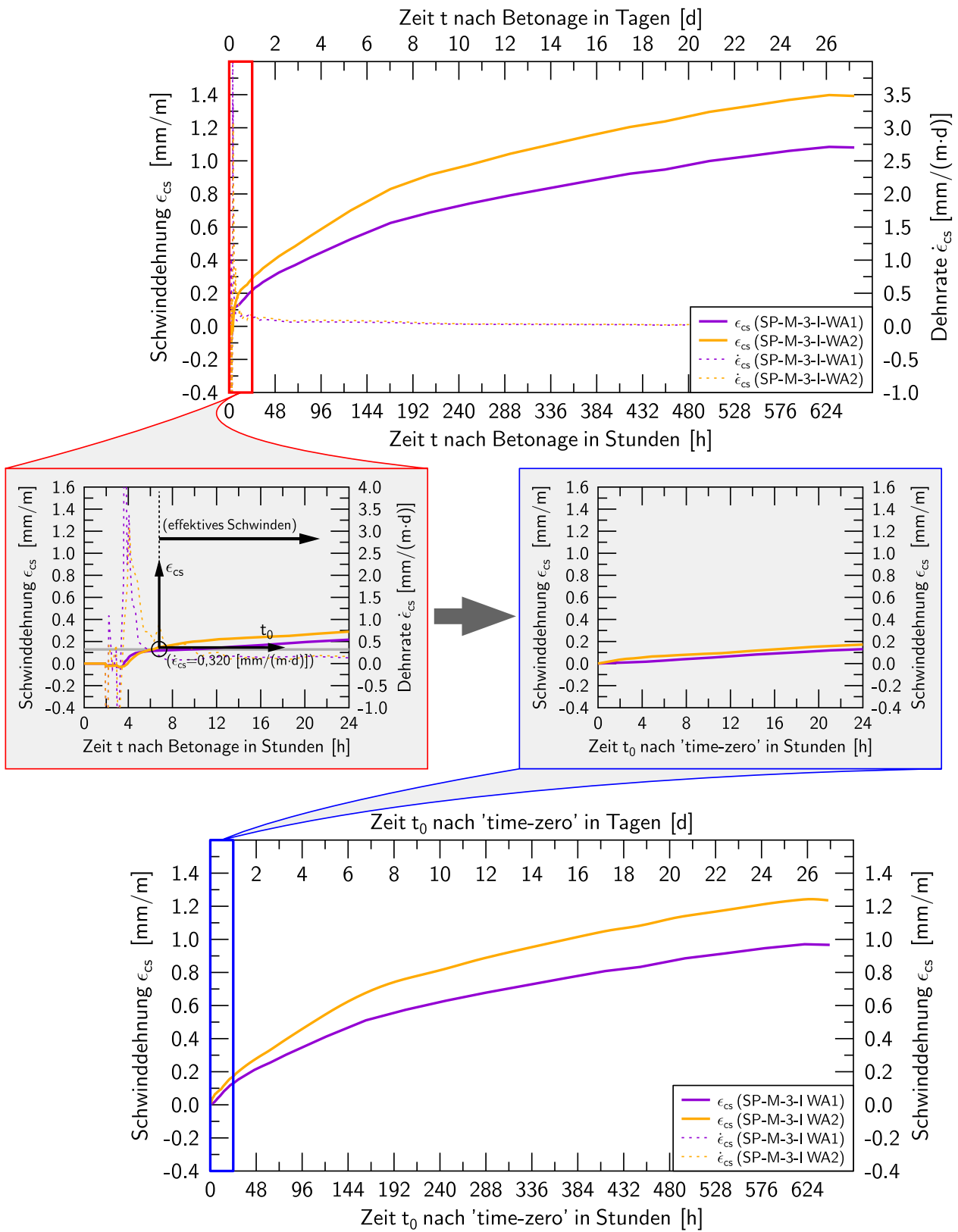


Bild A.6: Schwindverlauf von SP-M-3-I; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrate $\dot{\epsilon}_{cs}$

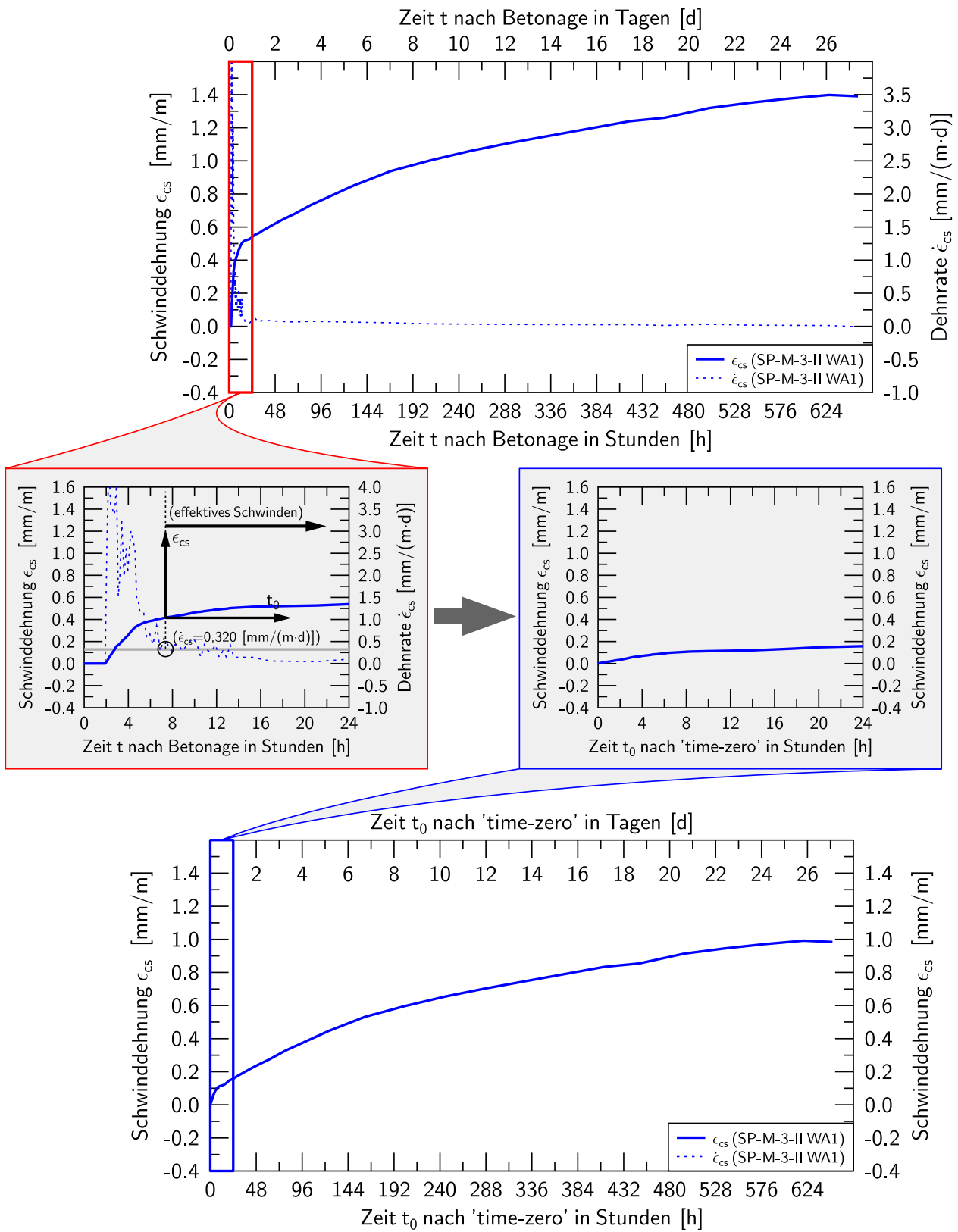


Bild A.7: Schwindverlauf von SP-M-3-II; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrate $\dot{\epsilon}_{cs}$

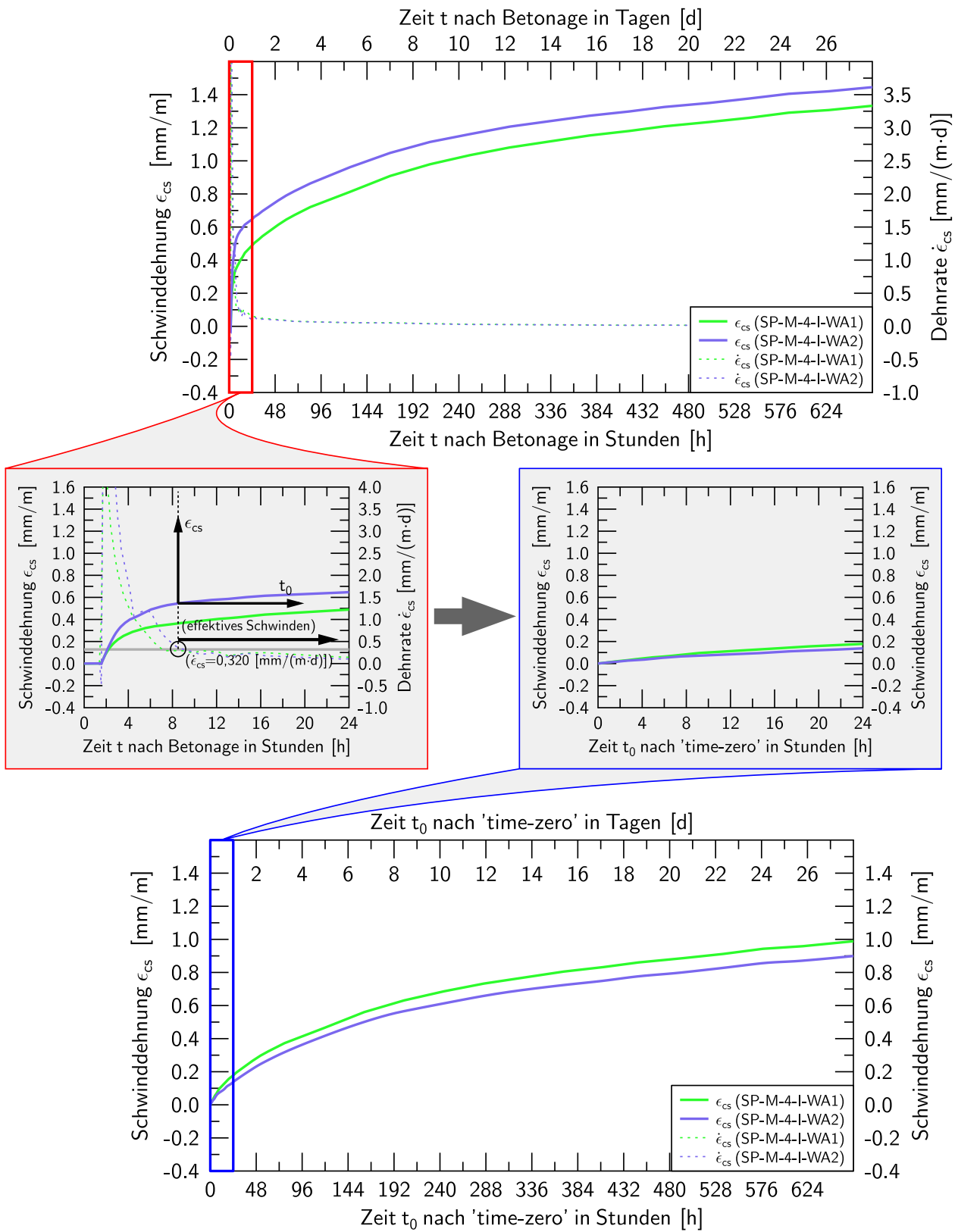


Bild A.8: Schwindverlauf von SP-M-4-I; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrate $\dot{\epsilon}_{cs}$

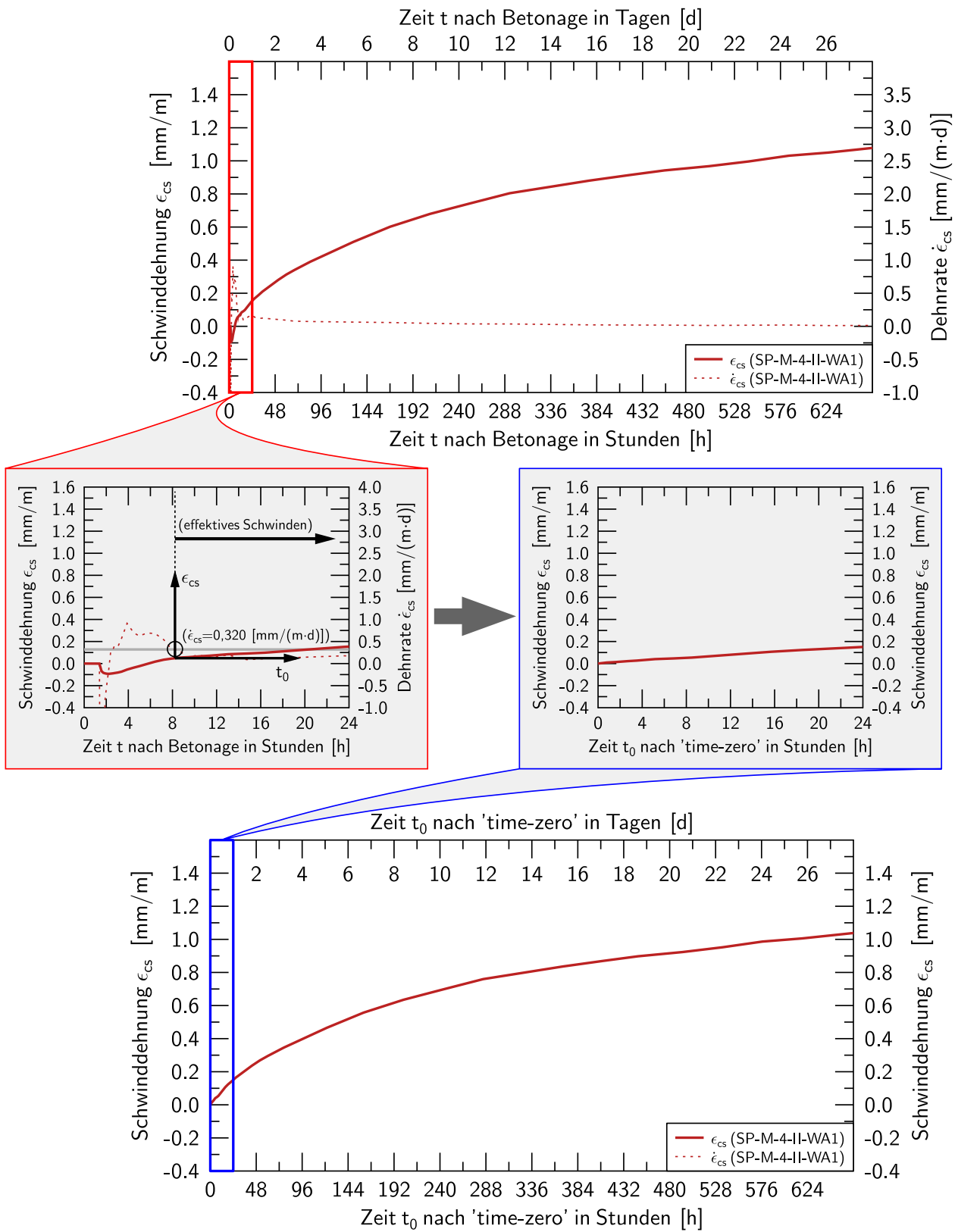


Bild A.9: Schwindverlauf von SP-M-4-II; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrate $\dot{\epsilon}_{cs}$

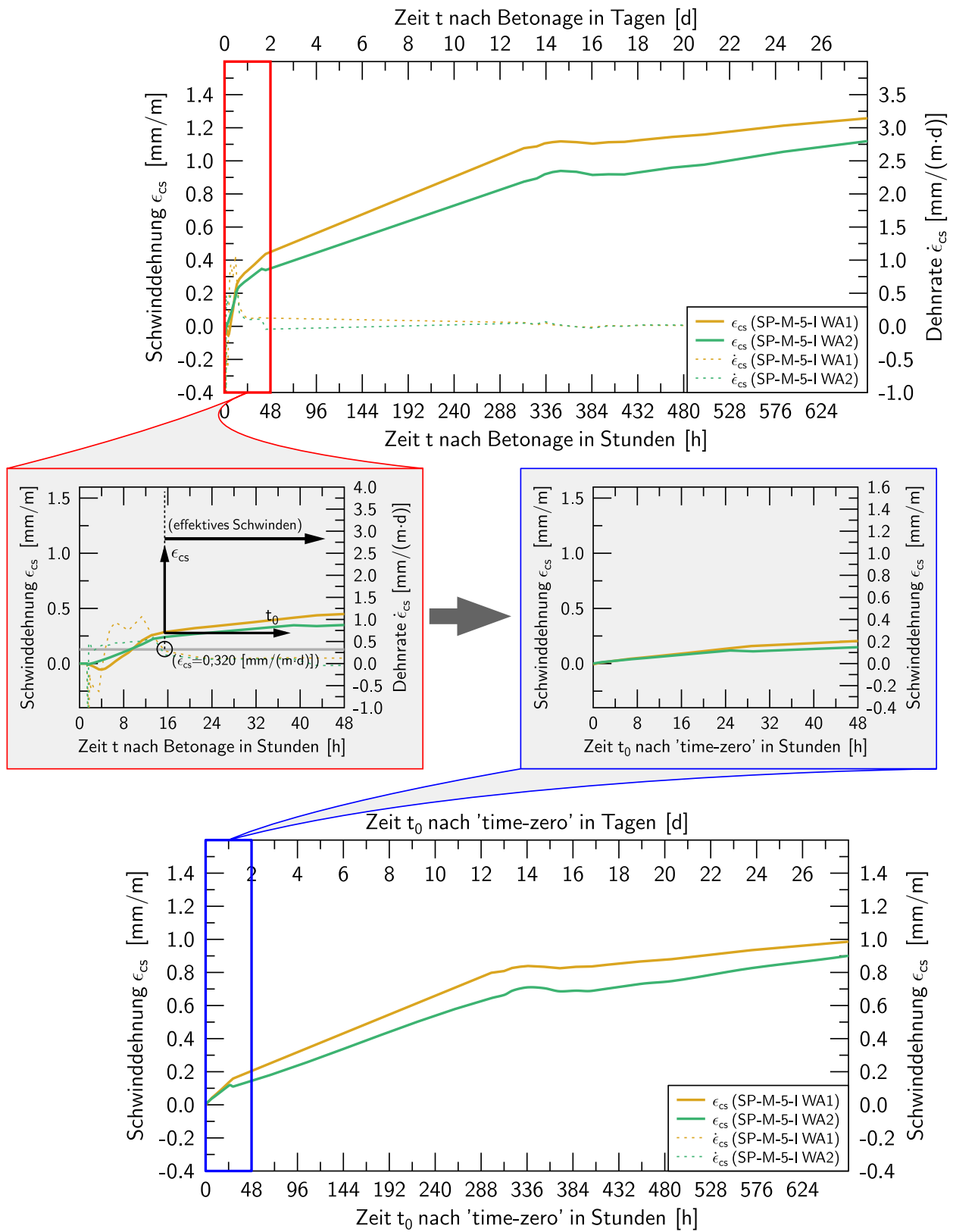


Bild A.10: Schwindverlauf von SP-M-5-I; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrate $\dot{\epsilon}_{CS}$

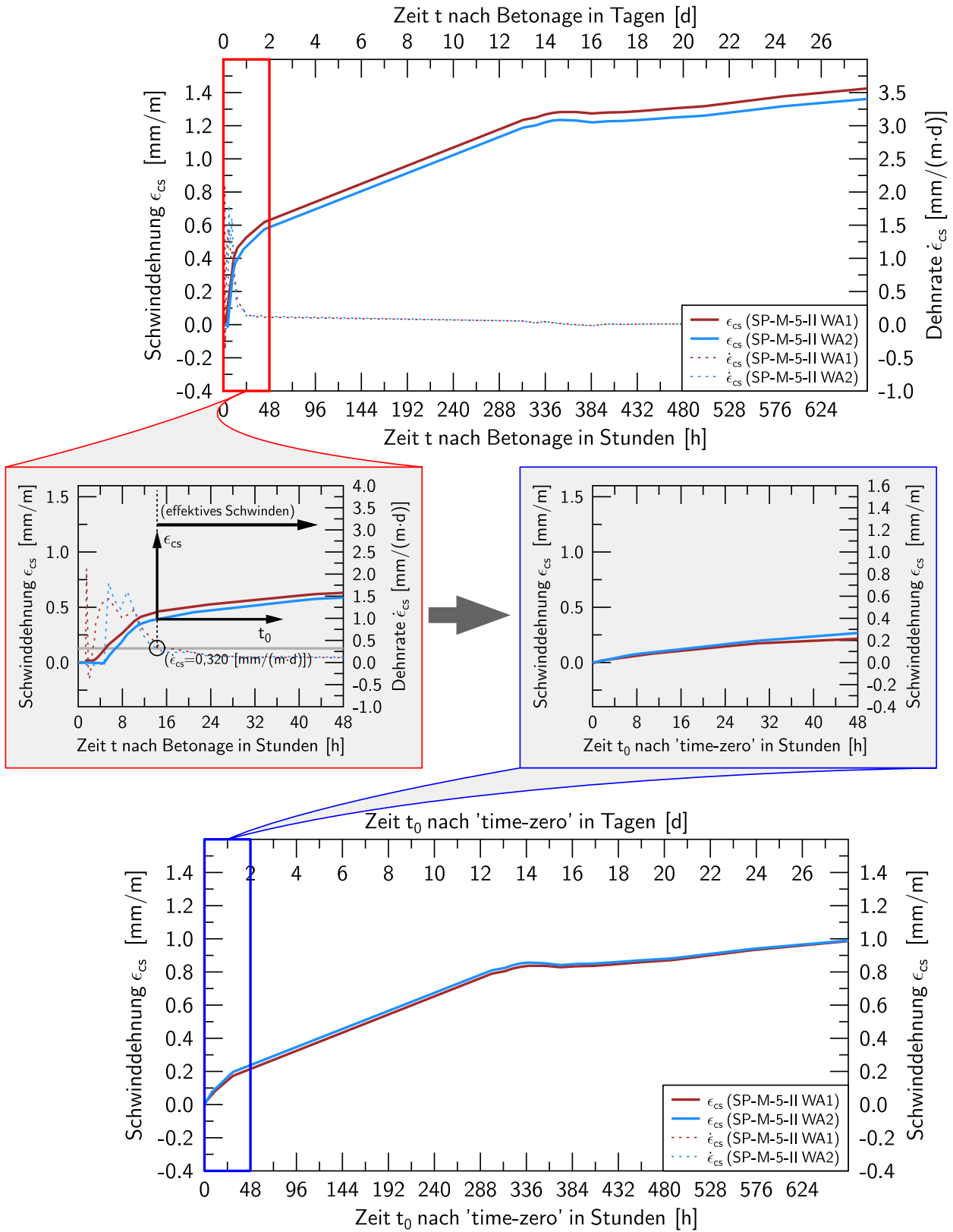


Bild A.11: Schwindverlauf von SP-M-5-II; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrate $\dot{\epsilon}_{cs}$

A.6 Umrechnung von Betonkenngrößen

A.6.1 Betondruckfestigkeit

Kenngrößen

$f_{c,cube}$	Betondruckfestigkeit, ermittelt an einem Würfel der Kantenlänge 150 mm; Lagerung nach (DIN EN 12390-2:2009-08) (Feuchtlagerung bis zur Prüfung)
$f_{c,cube,dry}$	Betondruckfestigkeit, ermittelt an einem Würfel der Kantenlänge 150 mm; Lagerung nach (DIN EN 12390-2/Ber 1:2012-02) (7 Tage Feuchtlagerung; anschließend Lagerung im Normklima)
$f_{c,cube,200}$	Betondruckfestigkeit, ermittelt an einem Würfel der Kantenlänge 200 mm; Lagerung nach (DIN EN 12390-2:2009-08) (Feuchtlagerung bis zur Prüfung)
$f_{c,cyl}$	Betondruckfestigkeit, ermittelt an einem Zylinder mit $d/h = 150 \text{ mm}/300 \text{ mm}$; Lagerung nach (DIN EN 12390-2:2009-08) (Feuchtlagerung bis zur Prüfung)
$f_{c,cyl,100/200}$	Betondruckfestigkeit, ermittelt an einem Zylinder mit $d/h = 100 \text{ mm}/200 \text{ mm}$; Lagerung nach (DIN EN 12390-2:2009-08) (Feuchtlagerung bis zur Prüfung)
$f_{c,cyl,Bohrkern}$	Betondruckfestigkeit, ermittelt an einem zylindrischen Bohrkern; Herstellung und Lagerung unter Laborbedingungen
f_{ck}	charakteristischer Wert (5%-Quantil) der an einem Zylinder mit $d/h = 150 \text{ mm}/300 \text{ mm}$ ermittelten Druckfestigkeit; Lagerung nach (DIN EN 12390-2:2009-08) (Feuchtlagerung bis zur Prüfung)
$f_{ck,cube}$	charakteristischer Wert (5%-Quantil) der an einem Würfel der Kantenlänge 150 mm ermittelten Druckfestigkeit; Lagerung nach (DIN EN 12390-2:2009-08) (Feuchtlagerung bis zur Prüfung)

Einflussgrößen und Umrechnung

- Einfluss der Probekörpergröße auf die Würfeldruckfestigkeit nach (DAfStb Heft 597)

$$f_{c,cube} = 1,05 \cdot f_{c,cube,200} \quad (\text{A.1})$$

- Einfluss der Probekörpergröße auf die Zylinderdruckfestigkeit nach (DAfStb Heft 597)

$$f_{c,cyl} = \frac{0,92}{0,95} \cdot f_{c,cyl,100/200} \quad (\text{A.2})$$

- Einfluss der Probekörpergestalt; Umrechnung von Würfel- auf Zylinderdruckfestigkeit nach (Feix 1993) unter Voraussetzung der Lagerung nach (DIN EN 12390-2:2009-08)

$$f_{c,cyl} = 0,83 \cdot f_{c,cube} \quad (\text{A.3})$$

- Einfluss der Probekörpergewinnung; Umrechnung von Bohrkerndruckfestigkeit zu geschalter Zylinderdruckfestigkeit nach (DIN EN 13791:2008-05)

$$f_{c,cyl} = f_{c,cyl,Bohrkern} \quad (\text{A.4})$$

- Einfluss der Lagerungsbedingungen auf die Würfeldruckfestigkeit nach (DIN 1045-2:2008-08)

$$f_{c,cube} = \begin{cases} 0,92 \cdot f_{c,dry,cube} & \text{für } f_{c,cyl} \leq 50 \text{ N/mm}^2 \\ 0,95 \cdot f_{c,dry,cube} & \text{für } f_{c,cyl} \geq 50 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

A.6.2 Betonzugfestigkeit

Kenngrößen

f_{ct}	einachsiale, zentrische Zugfestigkeit; Bezeichnung nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01)
f_{ctm}	Mittelwert der einachsialen, zentrischen Zugfestigkeit; Bezeichnung nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01)
$f_{ct,spl}$	Spaltzugfestigkeit; ermittelt an Zylindern $d/h = 150 \text{ mm}/300 \text{ mm}$

Einflussgrößen und Umrechnung

- Einfluss der Probekörpergeometrie auf die Spaltzugfestigkeit nach (DIN EN 12390-6:2010-09)

$$f_{ct,spl,cyl} = \frac{1}{1,10} \cdot f_{ct,spl,cube} \quad (\text{A.6})$$

A.6.3 Umrechnung von Festigkeitsgrößen

Einflussgrößen und Umrechnung

- Einfluss der Art der Zugfestigkeitsprüfung auf die zentrische Zugfestigkeit nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01)

$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct,spl,cyl} \quad (\text{A.7})$$

- Umrechnung der charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit in die zentrische Zugfestigkeit nach (DIN EN 1992-1-1:2011-01)

$$f_{ctm} = \begin{cases} 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} & \text{für } f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2 \\ 2,12 \cdot \ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{10}\right) & \text{für } f_{ck} \geq 50 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

- Umrechnung der mittleren Zylinderdruckfestigkeit in die zentrische Zugfestigkeit nach (Heilmann 1969)

$$f_{ct,min} = 0,20 \cdot f_{cm}^{2/3} \quad (\text{A.9})$$

$$f_{ctm} = 0,28 \cdot f_{cm}^{2/3} \quad (\text{A.10})$$

$$f_{ct,max} = 0,37 \cdot f_{cm}^{2/3} \quad (\text{A.11})$$

- Umrechnung der mittleren Zylinderdruckfestigkeit in die Spaltzugfestigkeit nach (Heilmann 1969)

$$f_{ct,min} = 0,26 \cdot f_{cm}^{2/3} \quad (\text{A.12})$$

$$f_{ctm} = 0,31 \cdot f_{cm}^{2/3} \quad (\text{A.13})$$

$$f_{ct,max} = 0,37 \cdot f_{cm}^{2/3} \quad (\text{A.14})$$