

**Untersuchung der Tragfähigkeit der
Verbundfuge von Spritzbeton-
ergänzungen im Hinblick auf das
nationale Anwendungsdokument zu
DIN EN 14487 und DIN EN 14488**

T 3320

T 3320

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

2015

ISBN 978-3-8167-9531-5

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

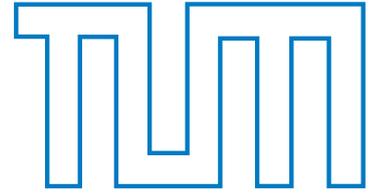
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

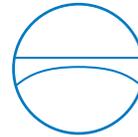
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



Technische Universität München



Ingenieur fakultät
Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Massivbau

Schlussbericht

Untersuchung der Tragfähigkeit der Verbundfuge von Spritzbetonergän- zungen im Hinblick auf das nationale Anwendungsdokument zu DIN EN 14487 und DIN EN 14488

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

Datum: August 2014

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- 7.307-1427/13

Dieser Schlussbericht umfasst insgesamt 111 Seiten, inkl. 52 Seiten Anhang.

Danksagung

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

- **ARGE Tunnel Alaufstieg** (PORR, G.HINTEREGGER, ÖSTU-STETTIN, SWIETELSKY);
Hohenstadt
- **Förderverein Massivbau der TU München e.V.**; München
- **Laumer Bautechnik GmbH**; Massing/Rott
- **Müwatec KG**; Olching

Untersuchung der Tragfähigkeit der Verbundfuge von Spritzbetonergänzungen im Hinblick auf das nationale Anwendungsdokument zu DIN EN 14487 und DIN EN 14488

Im Rahmen der Forschungsarbeit werden experimentelle sowie numerische Betrachtungen zur Tragfähigkeit der Verbundfuge von Spritzbetonergänzungen durchgeführt. Dabei wird der Einfluss der Oberflächenvorbehandlung, der unterschiedlichen Aufrauverfahren und Lage der Auftragsfläche sowie die Art der Applikation des Ergänzungsbetons bei verschiedenen Rautiefen unter Verwendung von zwei verschiedenen, praxisüblichen Spritzbetonmischungen untersucht. Desweiteren werden die zwangsspannungsinduzierenden Schwindverformungen für beide Spritzbetonmischungen ermittelt. Durch statistische Auswertung der Kleinkörperversuche wird gezeigt, dass der Nachweis der Schubkraftübertragung eines Bauteils, dessen nachträglich aufgeraute Oberfläche mit Spritzbeton verstärkt wird, mit den Bemessungsansätzen von (DIN EN 1992-1-1 2011) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) mit der erforderlichen Sicherheit geführt werden kann. Zusätzlich wird ein ergänzender Formulierungsvorschlag für (DIN 18551 2014) unterbreitet.

Investigation of the load-bearing capacity of the composite joint of supplements of sprayed concrete with regard to the National Application Document concerning series 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 composite joint of sprayed concrete supplements. This will include the investigation of the influence of the surface pretreatment methods, of different surface roughening techniques and of coating surface's positions as well as the application of the additional concrete layer for different depths of roughness by the use of two different typical sprayed concrete mixtures. In addition it will be determined what will be the restraint stresses induced by shrinkage deformation for both types of sprayed concrete. A statistical evaluation of the experiments shows that the evidence of the shearforce capacity of an component whose subsequently roughened surface has been reinforced by sprayed concrete can be provided with the design rules of (DIN EN 1992-1-1 2011) in combination with (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) at a sufficient safety level. Additionally, a draft proposal for the national application rule (DIN 18551 2014) is presented herewith.

Vérification de la résistance des joints composites des compléments de béton projeté dans l'optique du document d'application nationale aux normes DIN EN 14487 et DIN EN 14488

Dans le cadre de cette recherche des investigations aussi bien expérimentales que numériques sur la résistance des joints composites des compléments du béton projeté ont été réalisées. L'influence du prétraitement, des différentes méthodes d'obtention de rugosité et de l'emplacement de la surface ainsi que l'application du béton complémentaire sur différentes surfaces rugueuses est étudiée, en utilisant deux différents mélanges de béton projetés usuels. En outre, les retraits induits par contrainte des deux

mélanges du béton projeté sont identifiés. À l'aide d'une évaluation statistique des essais d'éprouvettes, il est démontré que le dimensionnement de la répartition des efforts tranchants d'une structure dont la surface rendue préalablement rugueuse et ultérieurement renforcée par béton projeté, peut être démontrée avec les sécurités requises, en utilisant les méthodes de dimensionnement de (DIN EN 1992-1-1 2011) en combinaison avec (DIN EN 1992-1-1/NA 2013). En outre, une proposition supplémentaire de formulation pour (DIN 18551 2014) est présentée.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Normative Regelungen für schubbeanspruchte Fugen	3
2.1	Nachweis des Verbundes	3
2.2	Konstruktive Regelungen	5
3	Experimentelle Untersuchungen	6
3.1	Versuchsprogramm zur Bestimmung der Verbundfestigkeit	6
3.2	Experimentelle Bestimmung des Schwindverhaltens	9
3.3	Zusammensetzung der verwendeten Betone	11
3.4	Festbetoneigenschaften	12
3.5	Oberflächenrauheiten	15
4	Numerische Untersuchungen	16
4.1	Inverse Analyse der Keilspaltzugversuche	16
4.2	Numerische Untersuchungen zur Strukturbildung des Zementsteins	19
5	Ergebnisse der Untersuchungen	25
5.1	Einfluss der Oberflächenvorbehandlung	26
5.2	Einfluss des Aufrauverfahrens	27
5.3	Einfluss verfahrensspezifischer Parameter	31
5.3.1	Einfluss des Applikationsverfahrens	31
5.3.2	Lage der Spritzkörper	32
5.4	Einfluss des Altbetonalters	34
5.5	Schwindverhalten von Spritzbeton	35
6	Überprüfung des Bemessungsansatzes	39
7	Zusammenfassung	45
	Bezeichnungen	47
	Literaturverzeichnis	50
Anhang		54
A.1	Festbetoneigenschaften	55
A.2	Oberflächenrautiefe nach Kaufmann	59
A.3	Verbundfestigkeiten	85
A.4	Schwindkurven	88
A.5	Umrechnung von Betonkenngrößen	96
A.5.1	Betondruckfestigkeit	96
A.5.2	Betonzugfestigkeit	98
A.5.3	Umrechnung von Festigkeitsgrößen	99

A.6	Auszug Normentexte	100
A.6.1	DIN EN 18551:2014-08	101
A.6.2	DIN EN 1992-1-1:2011-01+ DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04	103
A.6.3	DAfStb Heft 600	105

1 Einleitung

Das nachträgliche Verstärken von Betonbauteilen hat sich als Bauverfahren in der Praxis etabliert. Dabei hängt das Tragverhalten nachträglich ergänzter Bauteile entscheidend von der Schubkraftübertragung über die Verbundfuge des zu verstärkenden Bauteils und des Ergänzungssystems ab. Ein oft angewendetes Verfahren ist die nachträgliche Zugzonenverstärkung durch Anbringen von zusätzlicher Biegezugbewehrung und anschließender Ummantelung mit Spritzbeton. Das quasi monolithische Zusammenwirken des bestehenden Bauteils mit der neu aufgetragenen Spritzbetonschicht, welches für die Bemessung von mit Spritzbeton ergänzten Bauteilen eine wesentliche Grundlage bildet, kann nur erreicht werden, wenn die übertragbare Schubkraft ausreichend groß ist.

Zur Ermittlung der über die Verbundfuge übertragbaren Schubkraft bei Spritzbetonergänzungen gelten in Deutschland seit der Einführung der (DIN 18551 2005) die Nachweisformate der Bemessungsnorm für Stahlbeton. Auch nach bauaufsichtlicher Einführung von (DIN 18551 2014), die als nationales Anwendungsdokument zu (DIN EN 14487-1 2006) und (DIN EN 14487-2 2007) zu verwenden ist, wird für die Verbundfugenbemessung auf (DIN EN 1992-1-1 2011) mit (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) verwiesen. In die darin angegebenen Bemessungsansätze für unbewehrte Betonfugen, die in (Zilch u. Müller 2007) an wenigen, stark streuenden Versuchsergebnissen von Versuchskörpern mit Ortbetoneergänzung kalibriert wurden, gehen mit der Rauheit und der Betonzugfestigkeit nur zwei Parameter direkt ein. Andere Einflüsse, wie zum Beispiel Verschmutzungsgrad und Feuchtegehalt, werden nur indirekt durch die Regelung der Oberflächenvorbehandlung des Altbetons berücksichtigt. Verfahrensspezifische Parameter der Spritzbetonapplikation werden durch den unmittelbaren Verweis auf (DIN EN 1992-1-1 2011) gänzlich vernachlässigt. Die direkte Anwendung der Stahlbetonnorm zur Ermittlung der maximal übertragbaren Schubkraft für Spritzbetonergänzungen wird durch den verfahrensbedingten besseren Verbund als bei Ortbetoneergänzungen begründet. Es wird angenommen, dass durch die energiereiche pneumatische Förderung der Ausgangsmischung, und die daraus resultierenden Aufprallgeschwindigkeiten des Spritzgemisches auf dem Untergrund, weniger Verdichtungsporen in der Verbundzone entstehen als bei nachträglicher, druckloser Aufbetoneergänzung mit herkömmlichen Verdichtungsverfahren. Zudem besteht die Modellvorstellung einer Zementanreicherung in der Verbundzone, welche durch den Rückprall der großen Zuschlagskörner zu Beginn des Spritzbetonauftrags entsteht, die den notwendigen Verbund zwischen altem und neuem Beton zusätzlich verbessert. Experimentelle Untersuchungen zur Verbundtragfähigkeit von Spritzbetoneergänzungen, welche die aktuell geforderten Oberflächenbehandlungsmethoden sowie derzeit praxisübliche Spritzbetonmischungen berücksichtigen, sind jedoch kaum vorhanden.

Zur Quantifizierung der Schubkraftübertragung von Spritzbetonergänzungen werden deshalb aufbauend auf den Arbeiten von (Müller 2009) und (Lenz 2012) an der Technischen Universität München experimentelle Untersuchungen zum Haftverbund von Spritzbetonergänzungen durchgeführt. Dabei werden die Auswirkungen der Altbetonvorbereitung und verfahrenstypische Parameter der Spritzbetonapplikation untersucht, sowie das erreichbare Sicherheitsniveau bei Anwendung der bestehenden Bemessungsformate, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Modellunsicherheiten und Baustoffstreuungen im Vergleich zu Normalbeton, überprüft. Zusätzlich wird das Schwindverhalten von Spritzbeton experimentell ermittelt, um die dadurch entstehenden unterschiedlichen Zwangsspannungen bei Spritzbetoneränzungen und Ortbetonergänzungen, welche durch konstruktive Regelungen abgedeckt werden sollen, zu bewerten.

2 Normative Regelungen für schubbeanspruchte Fugen

2.1 Nachweis des Verbundes

Die Bemessung von schubbeanspruchten Fugen bei Spritzbetonergänzungen erfolgt momentan durch den Verweis von (DIN 18551 2014) auf (DIN EN 1992-1-1 2011) auf Grundlage der Regeln für die Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Das darin enthaltene Nachweisformat geht bei der Verbundfugubemessung von kleinen Verformungen aus. Diese sind im Grenzzustand der Tragfähigkeit vor allem durch einen ausreichenden Haftverbund zu erreichen, dessen Traganteil sich nach folgender Formel ermittelt:

$$v_{Rdi} = c_i \cdot f_{ctd} \quad (2.1)$$

Die maximal über die Verbundfuge übertragbare Schubspannung v_{Rdi} ist dabei lediglich von der Rauheit des Albetons und dem Bemessungswert der Zugfestigkeit des geringer festen Verbundpartners abhängig. Zur Quantifizierung der Rauheit wird die Oberflächenbeschaffenheit des Albetons vereinfachend in die vier Kategorien *sehr glatt*, *glatt*, *rau* und *verzahnt* eingeteilt. Die relevanten

Tabelle 2.1: Oberflächenbeschaffenheit nach (DIN EN 1992-1-1 2011) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) und (Hegger 2012)

Kategorie	Oberflächenbeschaffenheit	c_i
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
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

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

Entscheidungskriterien für die Einteilung in die jeweiligen Rauheitskategorien, sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Dabei sind nur die Rauheitskategorien aufgeführt, die für eine nachträgliche Verstärkung mit Spritzbeton relevant sind.

Die Zuordnung der mittleren Rautiefe nach Kaufmann R_t zu dem Rauheitsbeiwert c_i ist in Bild 2.1 graphisch dargestellt. Dabei stellt die fettgedruckte schwarze Linie den stufenförmigen Verlauf des Rauheitsbeiwertes nach (DIN EN 1992-1-1 2011) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) dar. Wirken Zugspannungen, gleich welcher Höhe, senkrecht zur Fuge, wie dies bei nachträglicher Verstärkung der Zugzone mit Spritzbeton durch dessen Eigengewicht immer der Fall ist, darf nach (DIN EN 1992-1-1 2011) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) für die Rauheitskategorien *glatt* und *rau* kein Haftverbund angesetzt werden. Dies ist in Bild 2.1 durch die blaue, gestrichelte Linie dargestellt. Der Adhäsionsanteil verzahnter Fugen darf jedoch weiterhin unvermindert in voller Höhe angesetzt werden. Für den Vergleich der experimentell ermittelten, maximal übertragbaren Schubspannung mit den Bemessungswerten nach (DIN EN 1992-1-1 2011) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) in Abschnitt 6 wurde auf der sicheren Seite liegend, der Kurvenverlauf des Rauheitsbeiwertes gleichmäßig linear interpoliert (punktierte Linie).

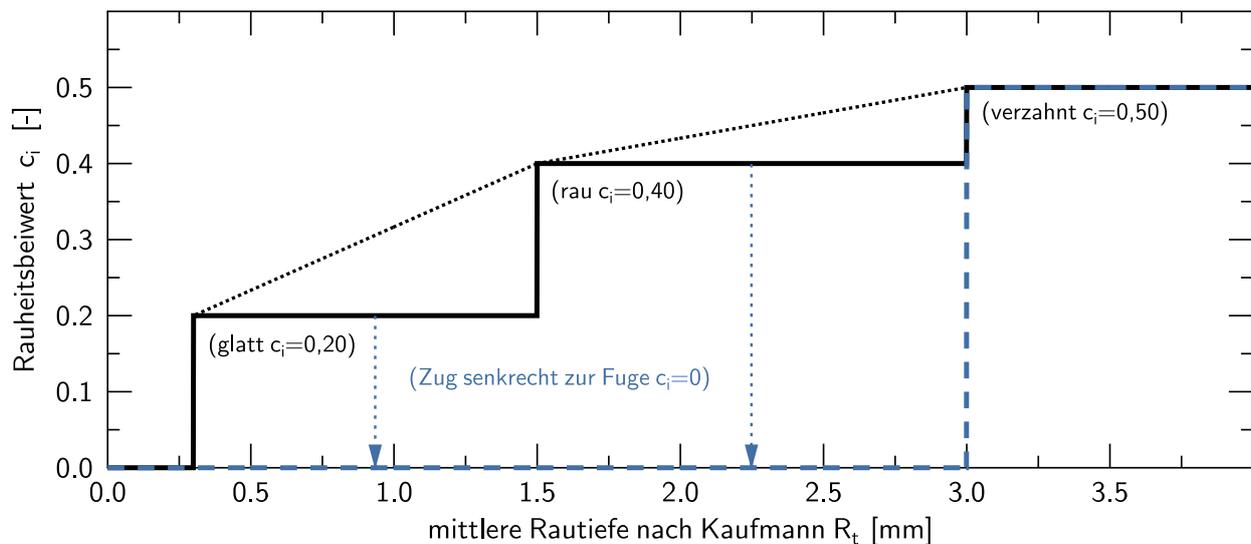


Bild 2.1: Rauheitsbeiwert c_i in Abhängigkeit der mittleren Rautiefe nach Kaufmann; sprungförmiger Verlauf nach EC-2; gleichmäßig linear interpolierter Verlauf als Interpretation für Überprüfung des Sicherheitsniveaus in Abschnitt 6

2.2 Konstruktive Regelungen

Weder in der europäischen spritzbetonspezifischen Normenreihe DIN EN 14487, welche die Anwendung von Spritzbeton regelt, noch in deren nationalem Anwendungsdokument (DIN 18551 2014), welches auch Regeln für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen beinhaltet, ist eine Anrechnung von Zwangsspannungen, wie sie zum Beispiel aus dem unterschiedlichen Schwindverhalten der beiden Verbundpartner resultieren, explizit beschrieben. Auch im Nachweisformat der (DIN EN 1992-1-1 2011) wird eine Berücksichtigung von Zwangsspannungen auf der Einwirkungsseite nicht verlangt, sondern sind durch die Anwendung konstruktiver Maßnahmen abzudecken.

In (DIN EN 1992-1-1 2011) wird im Abschnitt *Zusätzliche Regeln für Bauteile und Tragwerke aus Fertigteilen* durch (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) 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 u. a. 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 u. a. 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 (Schaefer u. Schmidt-Kehle 1996) oder (FIP 1982) entnommen werden.

Wenn der Nachweis der Schubkraftübertragung nach (DIN EN 1992-1-1 2011) ohne Anrechnung von Verbundbewehrung geführt werden kann, muss nach (DIN 18551 2014) 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

Zur Quantifizierung der maximal übertragbaren Verbundspannungen bei Spritzbetonergänzungen werden Kleinkörperversuche in Anlehnung an die Arbeiten von (Müller 2009) und (Lenz 2012) hergestellt. Die Bewertung der Schubfestigkeit der Verbundfuge erfolgt durch die experimentelle Verbundzugfestigkeit anhand von Spaltzugkörpern sowie Keilspaltzugkörpern. Diese kleinformatigen Versuchskörper haben neben dem Vorteil, dass Parameterstudien mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden können, den Vorteil des direkten Bruchvorgangs in der Verbundfuge. Aus den in

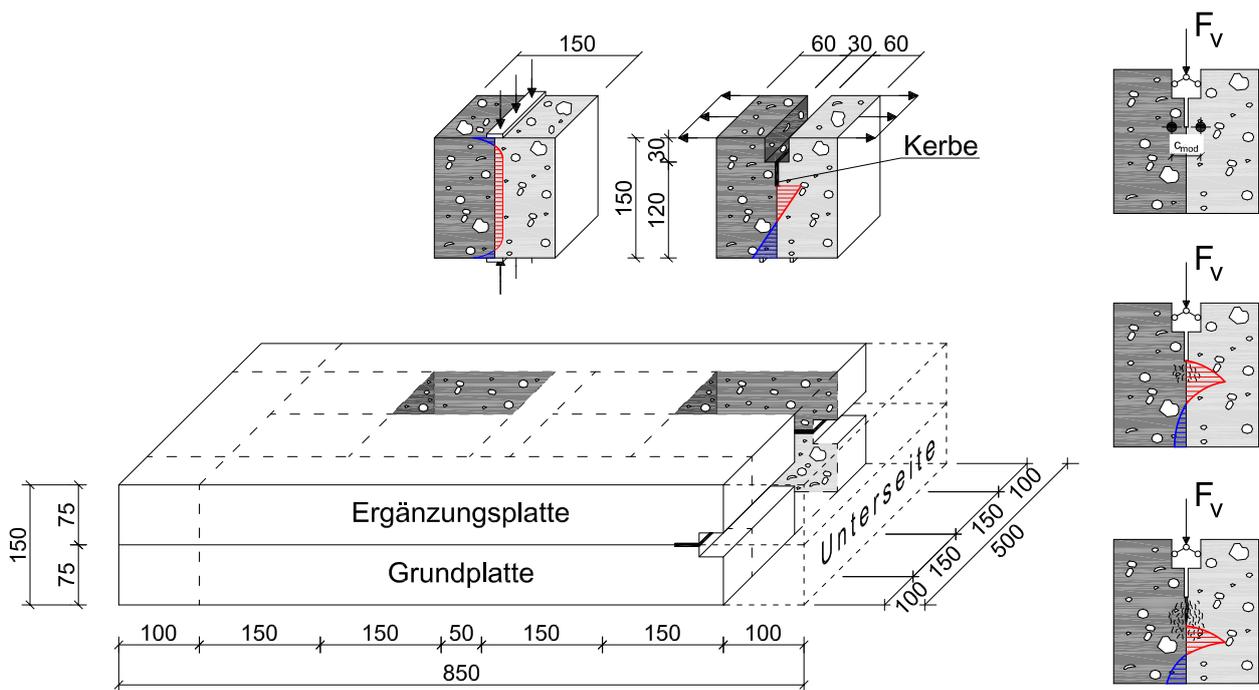


Bild 3.1: Verbundplatten, Spaltzug- und Keilspaltzugkörper

Bild 3.1 dargestellten großformatigen Verbundplatten mit den Abmessungen $850 \times 500 \times 150 \text{ mm}$ werden jeweils sechs Spaltzugwürfel mit einer Kantenlänge 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 Grundplatten der Verbundplatten mit einer Bauteilhöhe von 75 mm und einer Grundfläche von $850 \times 500\text{ mm}$ werden 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 bis zum 7. Tag durch Abdecken mit feuchten Jutesäcken und Folie nachbehandelt und ab dem 8. Tag bei konstantem Klima (20 °C und 65% RF) gelagert. Im Alter von 8 Tagen werden die Grundplatten durch Höchstdruckwasserstrahlen (kurz HDW) bzw. Strahlen mit festen Strahlmitteln (kurz SmS) bis zum Erreichen der geplanten Rauheitskategorien aufgeraut. Nach insgesamt 28 Tagen werden die Grundplatten mit Spritzbeton ergänzt. Die Trockenspritzbetonarbeiten werden im Laboratorium für den konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität München ausgeführt. Die Nassspritzbetonarbeiten erfolgen im Zuge der Arbeiten am Steinbühl tunnel durch die *ARGE Tunnel Alaufstieg* mit einer gegenüber der Erstsicherung verminderten Spritzleistung von ungefähr $8,6\text{ m}^3/\text{h}$. Nach der Ergänzung mit Spritzbeton werden die Verbundplatten 7 Tage mit feuchten Jutesäcken und Folie abgedeckt und anschließend unter Normklima (20 °C und 65% RF) gelagert. Bei Versuchskörpern, welche über Kopf gespritzt werden, erfolgt auch die Lagerung so, dass durch das Eigengewicht des Spritzbetons Zugspannungen in der Verbundfuge entstehen. Um ungewollte Schwindeinflüsse minimal zu halten, werden die Sägearbeiten zur Herstellung der kleinformatigen Versuchskörper erst kurz vor den Festigkeitsprüfungen durchgeführt. 28 Tage nach der Spritzbetonergänzung erfolgt die Bestimmung der Verbundfestigkeit anhand von Spalt- und Keilspaltzugversuchen.

Die Durchführung der Spaltzugprüfungen erfolgt nach (DIN EN 12390-6 2010). Jedoch werden abweichend zu den geometrischen Angaben in (DIN EN 12390-6 2010) Lasteinleitungstreifen mit einer Breite von 10 mm und einer Dicke von 3 mm verwendet, um eine geringere Querkzugbehinderung der vollflächig auf den Würfel aufliegenden Lasteinleitungstreifen zu erhalten. Dies konnte durch Vorversuche bestätigt werden. Die Versuchsdurchführung der Keilspaltzugversuche orientiert sich an (RILEM 1994). Eine genauere Beschreibung der Versuchsdurchführung der Keilspaltzugversuche, sowie deren Auswertung anhand inverser Analyse werden in Abschnitt 4.1 ausführlicher beschrieben.

Wie Tabelle 3.1 entnommen werden kann, werden insgesamt 25 Serien mit jeweils einer Verbundplatte, bestehend aus sechs Spaltzug- und zwei Keilspaltzugkörpern, untersucht. Die insgesamt 25 Verbundplatten setzen sich aus zwölf Verbundplatten mit Trockenspritzbetonergänzung (VP-1 bis VP-12), zehn Verbundplatten mit Nassspritzbetonergänzung (VP-13 bis VP-22) sowie drei Verbundplatten mit Normalbetonergänzung (VP-30 bis VP-33) zusammen. Die weiteren Unterschiede der Versuchsserien ergeben sich durch unterschiedliche Aufrauverfahren, unterschiedliche mittlere Rautiefen, der Fugenvorbehandlung, Lage der Grundplatten beim Spritzvorgang, sowie durch die Betonart der Grundplatte. Insgesamt wird dadurch die Verbundfestigkeit an 150 Spaltzugversuchen

sowie 50 Keilspaltzugversuchen bestimmt.

Zusätzlich zu den Verbundversuchen werden die Festbetoneigenschaften (Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit) des verwendeten Normalbetons sowie des Spritzbetons nach 28 Tagen sowie am Versuchstag ermittelt. Die Ergebnisse der Festbetonprüfungen werden in Abschnitt 3.4 vorgestellt.

Tabelle 3.1: Versuchsserien der Verbundplatten

Serie	Aufrauverfahren	mittlere Rautiefe ¹	Grundbeton	Ergänzungsbeton	Fugenvorbehandlung ²	Lage der Körper
VP-1	HDW	4,18	NB-1	M-1	feucht	vertikal
VP-2	SmS	2,97	NB-1	M-1	feucht	vertikal
VP-3	HDW	1,82	NB-1	M-1	feucht	vertikal
VP-4	HDW	3,60	NB-1	M-1	feucht	vertikal
VP-5	HDW	1,44	NB-2	M-1	trocken	vertikal
VP-6	HDW	4,10	NB-2	M-1	trocken	vertikal
VP-7	HDW	2,77	NB-2	M-1	trocken	vertikal
VP-8	HDW	4,01	NB-2	M-1	feucht	über Kopf
VP-9	SmS	1,64	NB-3	M-1	feucht	vertikal
VP-10	HDW	1,57	NB-3	SB-4	feucht	liegend
VP-11	HDW	1,65	NB-3	M-1	feucht	über Kopf
VP-12	SmS	1,50	NB-3	SB-4	feucht	liegend
VP-13	HDW	1,46	NB-6	M-3	feucht	vertikal
VP-14	HDW	2,67	NB-6	M-3	feucht	vertikal
VP-15	SmS	1,61	NB-6	M-3	feucht	vertikal
VP-16	SmS	2,91	NB-6	M-3	feucht	vertikal
VP-17 ³	HDW	1,60	NB-5	M-3	feucht	vertikal
VP-18 ³	HDW	2,60	NB-5	M-3	feucht	vertikal
VP-19	HDW	1,37	NB-6	M-3	feucht	über Kopf
VP-20	HDW	2,50	NB-6	M-3	feucht	über Kopf
VP-21	-	4,45	M-2	M-3	feucht	vertikal
VP-22	-	4,15	M-2	M-3	trocken	vertikal
VP-30	SmS	1,44	NB-7	NB-8	feucht	liegend
VP-31	SmS	1,58	NB-7	NB-8	feucht	liegend
VP-32	SmS	2,90	NB-7	NB-8	feucht	liegend

¹ rau: $R_t \geq 1,5 \text{ mm}$; verzahnt: $R_t \geq 3,0 \text{ mm}$ (R_t : Rautiefe mittels Sandflächenverfahren nach Kaufmann; Mittelwert aller acht Mesststellen je Verbundplatte)

² feucht: Anfeuchten der Oberfläche mit Schwamm, Oberfläche erscheint vor Spritzbetonergängung matt und feucht ohne schimmernden Wasserfilm
trocken: Lufttrocken; ohne Vornässen

³ Altbeton mit abgeschlossenem Schwinden

3.2 Experimentelle Bestimmung des Schwindverhaltens

Zur Abschätzung der durch die nachträglich aufgebraute Spritzbetonergänzungsschicht induzierten Zwangsspannungen werden Schwindversuche an Platten aus Spritzbeton sowie für Vergleichszwecke aus Normalbeton durchgeführt. Während Schwindmaße meist an Festbeton nach (Bunke 1991) in Verbindung mit (DIN 1045-2 2008) 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. Die Schwindverformungen werden deshalb, wie in (Cornejo-Malm 1995), mit dem in Bild 3.2 gezeigten Versuchsaufbau, in Anlehnung an (Wittmann 1975), gemessen. Neben der Berücksich-

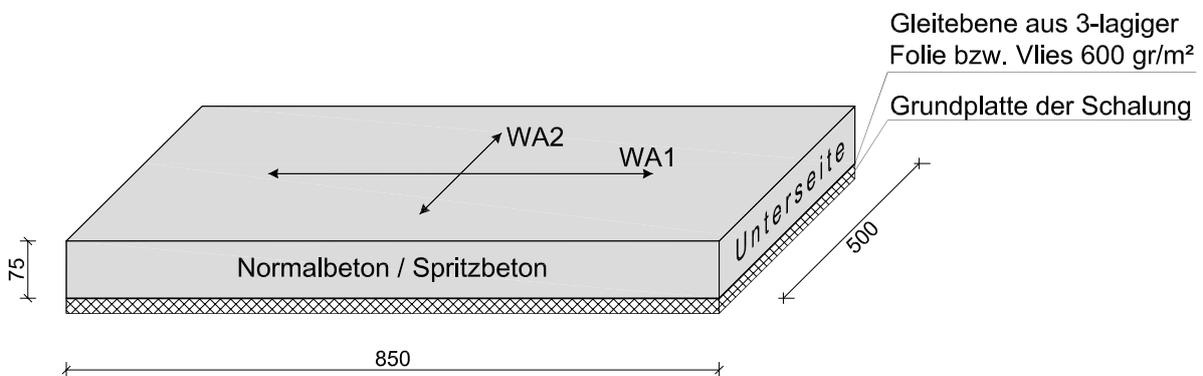


Bild 3.2: Schwindplatten aus Normalbeton bzw. Spritzbeton

tigung der Schwindverformungen des ersten Tages, 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, werden die Schwindplatten aus Normalbeton direkt auf mehrere Lagen eingöelter Folie betoniert. Für die Schwindmessungen an pneumatisch aufgetragenem Spritzbeton, wird, zur Sicherstellung der Haftung des Spritzbetons auf dem Untergrund beim Spritzvorgang auf die vertikal geneigte Spritzfläche, zusätzlich zu den eingöelten 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 3.2) gemessen. Die Basislänge des Dehnungsaufnehmers WA-1 beträgt 500 mm die von WA-2 300 mm. Die Lage ist aus den Bildern 3.2 und 3.3 ersichtlich. Die horizontale sowie vertikale Lagesicherung (Verhindern des Einsinkens der Messinstallation im Frischbeton) 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 mm

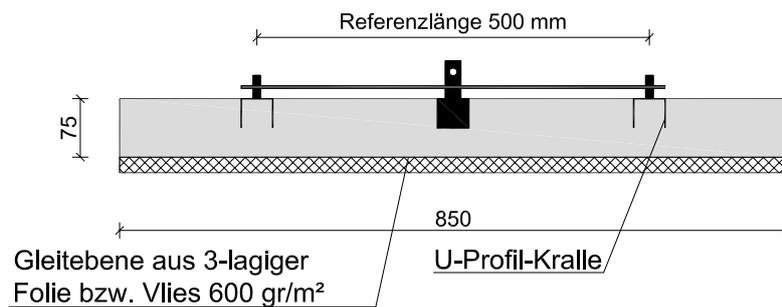


Bild 3.3: Messinstallation der Schwindversuche

werden näherungsweise über die Dickenrichtung mittlere Dehnungen gemessen. Für die Dehnungsmessung kommen wegen ihrer hohen Genauigkeit sowie der geringen Rückstellkraft der Messzunge Dehnungsaufnehmer vom Typ DD1 des Herstellers HBM zum Einsatz. Eine Überprüfung der in Bild 3.3 für die Schwindversuche von Spritzbeton dargestellten Messinstallation fand im Vorfeld durch einen Vergleich der Schwindmaße, die mit dieser Messinstallation an einem Balken mit den Abmessungen $150 \times 150 \times 700 \text{ mm}$ ermittelten wurden, mit den in (Wittmann 1975) ermittelten Werten statt. Insgesamt werden die Schwindverformungen an drei Schwindplatten aus Normalbe-



Bild 3.4: Aufbau der Frühschwindversuche

ton (SP-NB-1, SP-NB-2, SP-NB-3), zwei Schwindplatten der Trockenspritzbetonmischung M-1 (SP-M1-1, SP-M1-2) sowie zwei Schwindplatten der Nassspritzbetonmischung M-3 (SP-M2-1, SP-M2-2) gemessen. Das Ausschalen erfolgt mit dem Erstarren. Die Schwindmessungen werden in der Regel zwei Stunden nach der Betonage gestartet. Bei Messung der Schwindverformungen am Nassspritzbeton M-3 erfolgt der Messbeginn, wegen der zu erwartenden hohen Frühfestigkeiten, schon eine Stunde nach Herstellung der Versuchsplatten. Sämtliche Schwindversuche finden unter einem konstanten Klima von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und 65 \% RF statt.

3.3 Zusammensetzung der verwendeten Betone

Als Beton für die Grundplatten wird aus Vergleichsgründen auf die von (Müller 2009) verwendete Normalbetonmischung zurückgegriffen. Bei den insgesamt sieben benötigten Chargen Normalbeton (NB-1 bis NB-3 und NB-5 bis NB-8; NB=Normalbeton; arabische Ziffern charakterisieren die Chargennummer) ist die Zusammensetzung für alle Chargen gleich und kann Tabelle 3.2 entnommen werden.

Tabelle 3.2: Zusammensetzung des verwendeten Betons in $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

	NB-1 bis NB-8 in $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	SB-4 ² in $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	M-1 ² in $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	M-2, M-3 ⁶ in $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
CEM I 32,5 R	310,0 ¹	-	-	-
CEM I 52,5 N (sb)	-	374,0 ³	374,0 ³	380,0 ⁷
Kalksandsteinmehl	-	-	-	40,0 ⁸
Sand 0/2	-	-	-	868,0 ⁹
Kies 2/8	-	-	-	871,0 ⁹
Sand 0/4 mm	970,0	-	-	-
Kies 4/8 mm	196,0	-	-	-
Kies 8/16 mm	776,0	-	-	-
Zuschlag, GK 8	-	1826,0	1826,0	-
Fließmittel	-	-	-	4,18 ¹⁰
Beschleuniger	-	-	-	6,2 M. - % ¹¹
Zugabewasser	176,7	190,7 ⁴	205,7 ⁵	190,0 ¹²
w/z-Wert	0,57	0,51 ⁴	0,55 ⁵	0,50 ¹²
Zielfestigkeit	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37

¹ Märker Portlandzement (Märker Zement GmbH)

² SAKRET Spritzbeton SB 8 P (Sakret Trockenbeton München GmbH & Co. KG)

³ Rohrdorfer Portlandzement (Südbayerisches Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH)

⁴ Ermittelt aus Darrversuch einer gespritzten Probe der Mischung M-1

⁵ maximales Zugabewasser bzw. w/z-Wert lt. Angabe Hersteller

⁶ Rezeptur-Nr. 10653602; ARGE Tunnel Alaufstieg

⁷ Heidelberger Portlandzement; Werk Schelklingen (HeidelbergCement AG)

⁸ Allemdingen

⁹ Röhm

¹⁰ Prement L 100 A / BT3

¹¹ Giuliani Gecedral F100A; Angabe in Massenprozent bezogen auf den Zementgehalt

¹² Wasser bzw. w/z-Wert der Grundmischung

Um einen möglichen Einfluss unterschiedlicher Spritzverfahren abzudecken, werden die Verbundplatten mit Trockenspritzbeton (M-1) und mit Nassspritzbeton (M-2, M-3) ergänzt. Für den Trockenspritzbeton kommt die werkgemischte Trockenmischung SB 8 P des Herstellers Sakret als Bereitstellungsgemisch zur Anwendung. Der Beton mit der Bezeichnung SB-4 (SB=Spritzbeton; Chargennummer=4, durch fortlaufende Nummerierung der Betonchargen die in herkömmlicher

Weise hergestellt werden) wird aus der gleichen werkgemischten Trockenmischung, die für M-1 verwendet wird, in herkömmlicher Weise hergestellt. Das dabei verwendete Zugabewasser wird in Darrversuchen der gespritzten Proben der Trockenspritzbetonmischung M-1 ermittelt. Als Nassspritzbeton wird die für die laufende temporäre Gebirgssicherung verwendete Rezeptur-Nr. 10653602 der *ARGE Tunnel Alaufstieg* (M-2, M-3) verwendet. Beide Mischungen für die Spritzbetonarbeiten können aufgrund ihrer Zusammensetzung als praxisübliche Spritzbetone bezeichnet werden.

3.4 Festbetoneigenschaften

Zur Bestimmung ausgewählter Festbetoneigenschaften werden allen Mischungen, die in herkömmlicher Betonage hergestellt werden (NB-1 bis NB-8, SB-4), Proben entnommen und zusätzliche Begleitkörper hergestellt. Die Lagerung erfolgt nach (DIN EN 12390-2/NA 2012). Je Betoncharge wird die Druckfestigkeit an drei Druckzylindern nach (DIN EN 12390-3 2009), das Elastizitätsmodul an drei Zylindern nach (DIN EN 12390-13 2014) mit anschließender Druckprüfung nach (DIN EN 12390-3 2009), sowie die zylindrische Spaltzugfestigkeit an drei Zylindern nach (DIN EN 12390-6 2010) jeweils nach 28 Tagen sowie am Versuchstag (i.d.R. 56 Tage nach Herstellung der Grundplatten) der Verbundkörper geprüft. Die Größe der Zylinder beträgt $\varnothing 150 \times 300 \text{ mm}$. Zusätzlich wird je Betoncharge die Würfelspaltzugfestigkeit an sechs Spaltzugwürfeln nach (DIN EN 12390-6 2010) mit den Abmessungen $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$, sowie die Keilspaltzugfestigkeit in Anlehnung an (RI-LEM 1994) an zwei Keilspaltzugwürfel mit den Abmessungen $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ am Versuchstag geprüft. Die Nachbehandlung sämtlicher Begleitkörper erfolgt wie bei den Verbundplatten.

Die Mittelwerte der jeweiligen Festigkeitsprüfungen für Normalbeton können Tabelle 3.3 entnommen

Tabelle 3.3: Festbetoneigenschaften Beton in herkömmlicher Betonage in $\left[\frac{N}{\text{mm}^2}\right]$

	NB-1	NB-2	NB-3	SB-4	NB-5	NB-6	NB-7	NB-8
$f_{cm,cyl,28}$	30,84	30,43	32,32	44,52	36,07	39,73	38,23	35,94
$f_{cm,cyl,56}$	37,55	35,45	35,83	-	42,28 ¹	41,40	41,06	-
$E_{cm,cyl,28}$	31382	31720	31787	30300	31607	31498	31473	32408
$E_{cm,cyl,56}$	34183	33073	33940	-	33754 ¹	34311	33227	-
$f_{ctm,spl,cyl,28}$	3,35	3,01	3,15	3,33	2,98	3,27	3,12	3,21
$f_{ctm,spl,cyl,56}$	3,54	3,94	3,48	-	3,56	3,39	3,37	-
$f_{ctm,spl,cube,56}$	2,93	3,24	2,97	2,75	3,07	3,45	3,33	3,00
$f_{ctm,kspl,cube,56}$	2,09	2,79	2,61	1,83	4,31	2,28	2,83	2,15

¹ Festigkeitsprüfung im Alter von 105 Tagen

werden. Eine Auflistung sämtlicher Einzelwerte ist in Anhang A.1 enthalten. Die Würfelspaltzugfestigkeiten sowie die Keilspaltzugfestigkeiten, die als monolithische Vergleichswerte zu den geprüften Verbundfestigkeiten verwendet werden, werden dabei nur am Versuchstag der Verbundkörper ermittelt.

Für die Ermittlung der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls der pneumatisch aufgetragenen Betonmischungen (M-1 bis M-3) werden je Spritzbetonauftrag zwei Spritzkisten mit den Abmessungen $850 \times 700 \times 225 \text{ mm}$ hergestellt. Die Nachbehandlung der Prüfplatten für die Begleitkörper erfolgt analog zu den Verbundplatten. Aus den Prüfplatten werden einen Tag vor der Festigkeitsprüfung, wie in Bild 3.5 dargestellt, je drei Zylinder, dessen Abmessungen von $\varnothing 100 \times 200 \text{ mm}$ in Anlehnung an (DIN EN 14487-1 2006) in Verbindung mit (ISO 1920-10 2010) festgelegt wurden, für die Druckfestigkeitsprüfung nach (DIN EN 12390-3 2009), sowie drei Zylinder derselben Abmessung zur Elastizitätsmodulprüfung nach (ISO 1920-10 2010) mit anschließender Druckfestigkeitsprüfung nach (DIN EN 12390-3 2009), gebohrt.

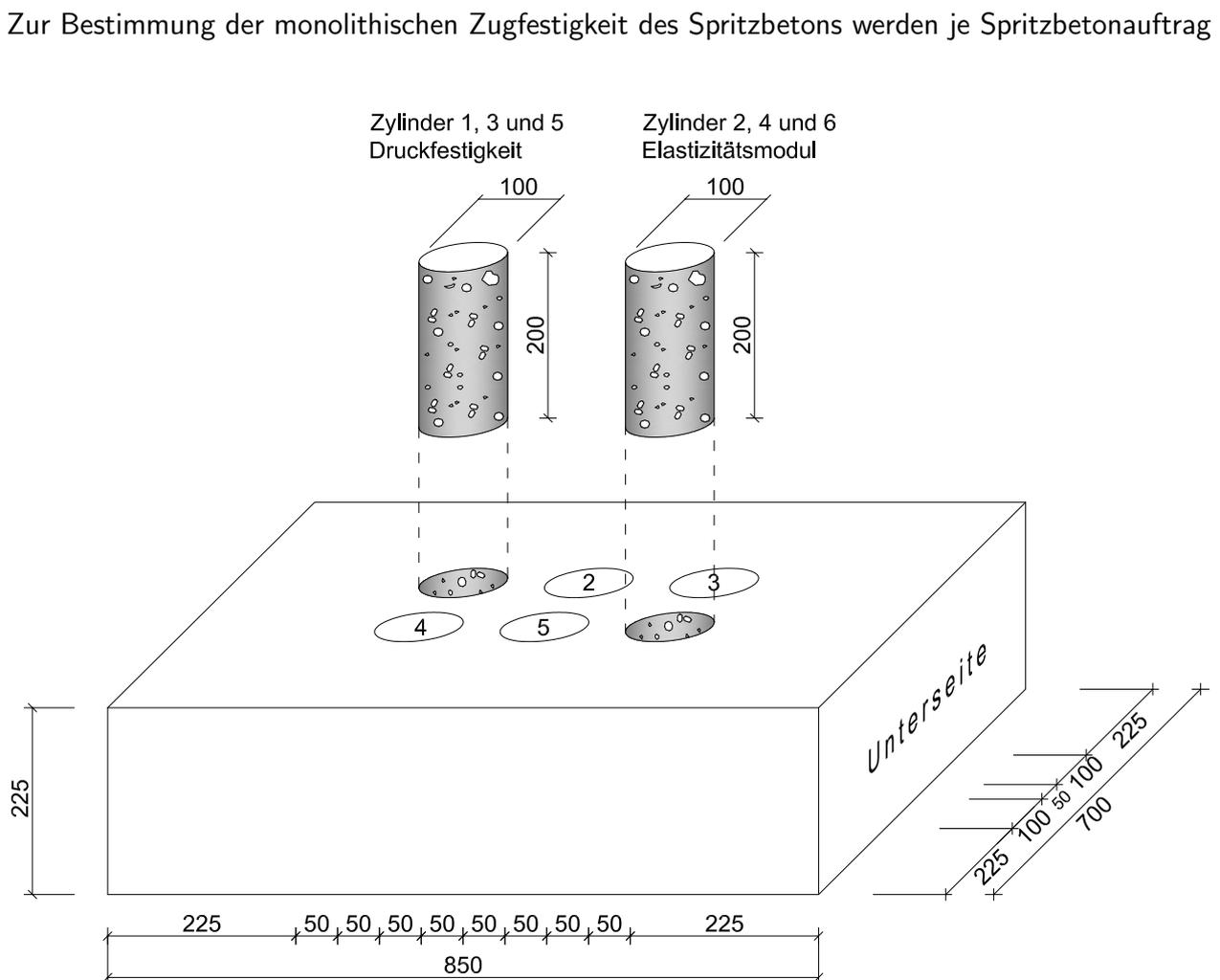


Bild 3.5: Spritzbetonbegleitkörper, Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul

zwei, der in Bild 3.6 gezeigten, Prüfplatten mit den Abmessungen $750 \times 600 \times 150 \text{ mm}$ hergestellt. Die Lagerung der Prüfplatten erfolgt analog zu den Verbundplatten. Einen Tag vor der Spaltzugfestigkeitsprüfung nach (DIN EN 12390-6 2010) werden sechs 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 Prüfplatte unter Einhaltung der Randabstände gesägt.

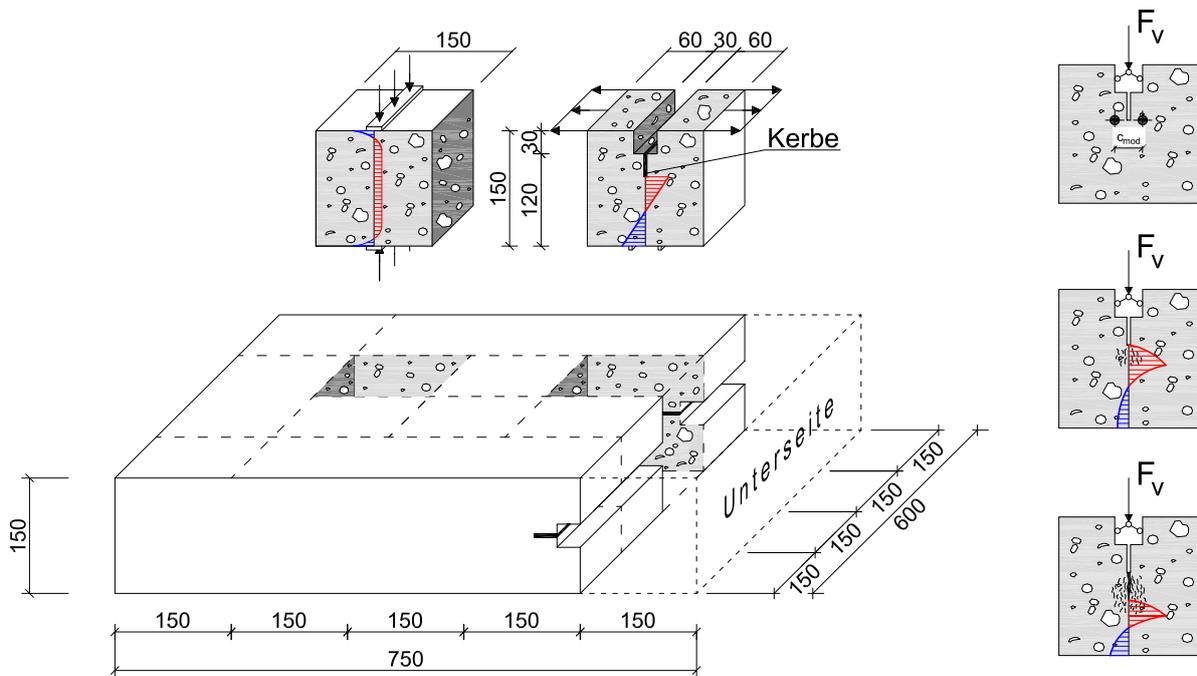


Bild 3.6: Begleitkörper für Spritzbeton, Spaltzug- und Keilspaltzugkörper

Die Mittelwerte der Festbetoneigenschaften für die Spritzbetonmischungen M-1 bis M-3 sind in Tabelle 3.4 aufgeführt. Eine Auflistung sämtlicher Einzelwerte ist in Anhang A.1 enthalten.

Tabelle 3.4: Festbetoneigenschaften Spritzbeton in $\left[\frac{N}{\text{mm}^2}\right]$

	M-1	M-2	M-3
$f_{cm,cyl,28}$	64,56	35,35	44,29
$f_{cm,cyl,56}$	—	37,48 ¹	—
$E_{cm,cyl,28}$	29465	22030	23100
$f_{ctm,spl,cube,28}$	3,32	—	3,29
$f_{ctm,spl,cube,56}$	—	3,58	—
$f_{ctm,kspl,cube,28}$	1,77	—	1,38
$f_{ctm,kspl,cube,56}$	—	1,69	—

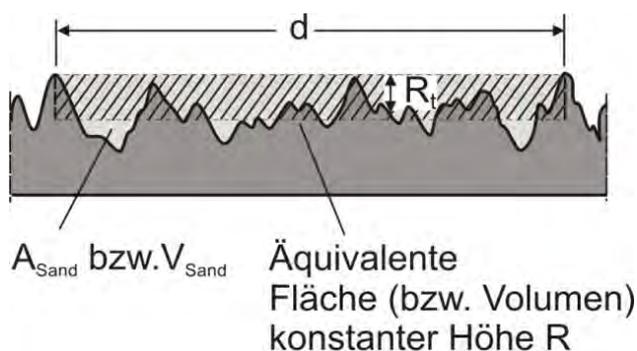
¹ nach Gleichung 3.1 (DIN EN 1992-1-1 2011) mit $s=0,20$ berechnet

3.5 Oberflächenrauheiten

In Ermangelung einer anerkannten, praxistauglichen Methode zur Ermittlung von Rauheitskenngrößen im konstruktiven Betonbau wird das 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

$$R_t = \frac{4V}{\pi \cdot d^2} \quad (3.1)$$

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 3.7: Ermittlung der Rautiefe nach Kaufmann

4 Numerische Untersuchungen

4.1 Inverse Analyse der Keilspaltzugversuche

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.

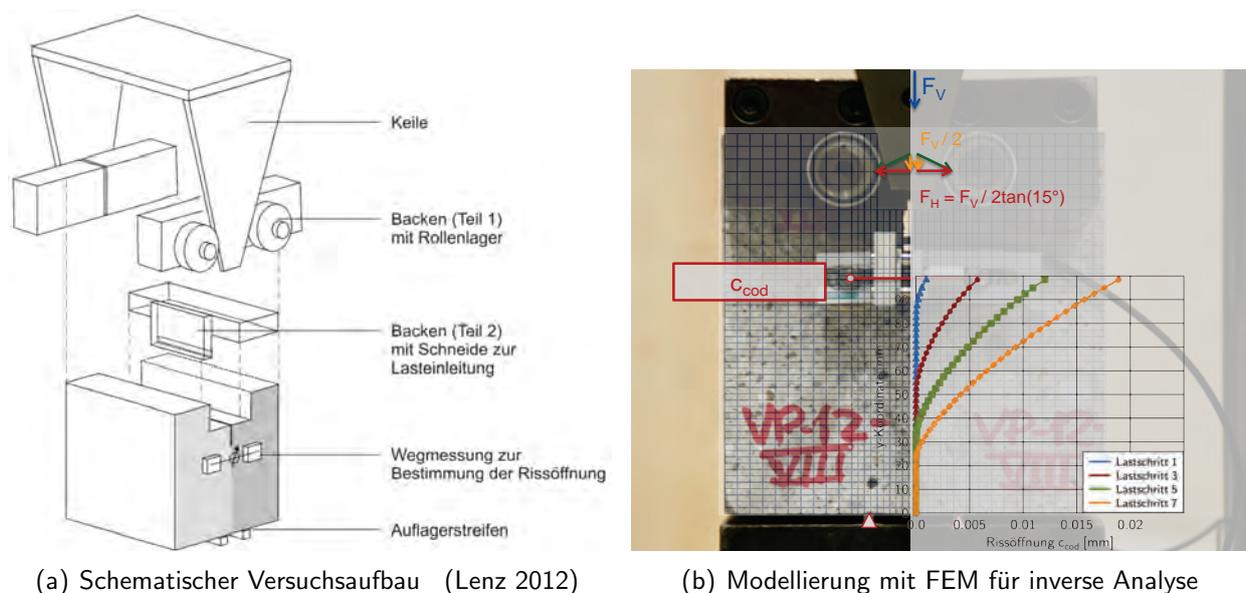


Bild 4.1: Ermittlung der Keilspaltzugfestigkeit

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-

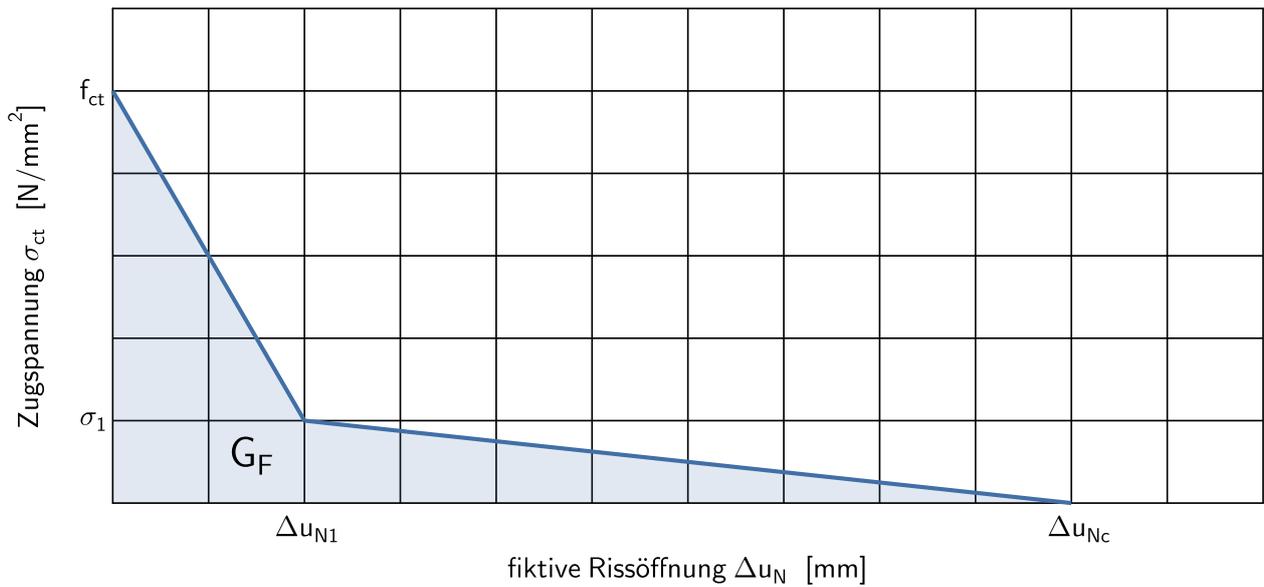


Bild 4.2: Bilineares fiktives Rissmodell nach (fib Model Code 2010)

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. Zur Beschreibung des Rissöffnungsverhaltens entlang der Fuge werden Interfaceelemente unter Anwendung des in (fib Model Code 2010) beschriebenen bilinearen fiktiven Rissmodells angeordnet. Das in Bild 4.2 dargestellte fiktive Rissmodell ist durch

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

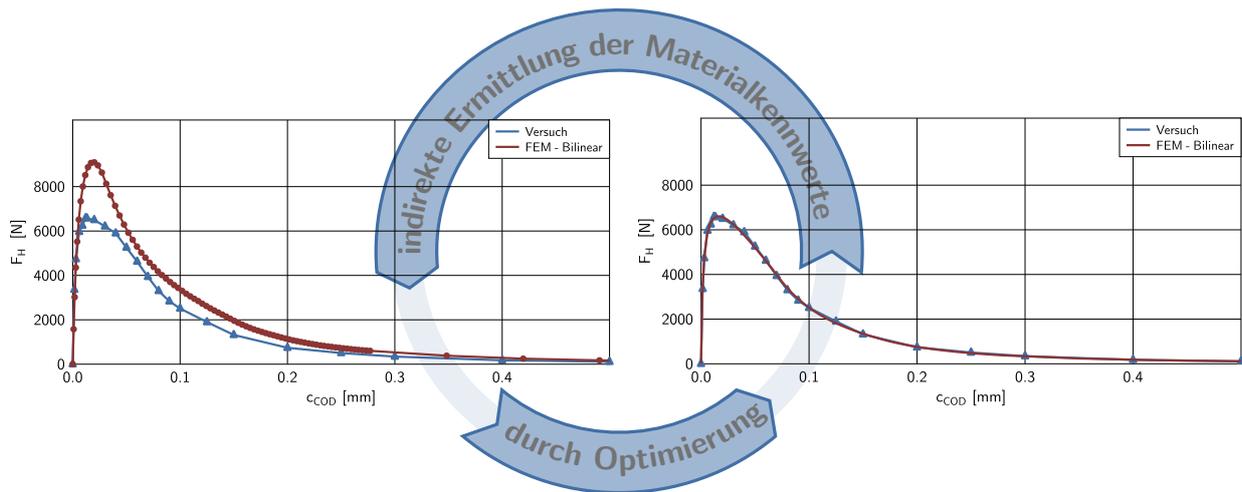
mit

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

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

abschnittsweise definiert. Neben den in (fib Model Code 2010) empfohlenen Werten für die Formparameter des bilinearen Verbundmodells $\alpha_{ft} = 0,20$ und $\alpha_{wc} = 0,20$ 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 numerisch ermittelten Keilspaltzugfestigkeiten $f_{ct,kspl}$ sowie die Bruchenergien G_F sämtlicher monolithischer Versuchskörper sind in Anhang A.1 aufgeführt. Die Mittelwerte der Keilspaltzugfestigkeiten von Normalbeton sind in Tabelle 3.3, die von Spritzbeton in Tabelle 3.4 zusammengefasst. Die Ergebnisse für die Verbundkörper können Anhang A.3 entnommen werden.

4.2 Numerische Untersuchungen zur Strukturbildung des Zementsteins

Der Porenraum von Beton und Zementstein ist wesentlich für deren mechanische Eigenschaften. Viele Vorgänge, welche die Materialeigenschaften prägen, laufen im kapillarporösen Raum ab. Die numerische Simulation der Strukturbildung des Zementsteins während des Hydratationsverlaufs und die daraus ermittelte Porositätsverteilung im Zementstein, kann eine zusätzliche Erklärung für die makroskopischen Eigenschaften eines Bauteils liefern. Neben einer Vielzahl an Hydratationsmodellen steht mit dem am amerikanischen Nist¹ entwickelten *CEMHYD3D* ein weitgehend anerkanntes Hydratationsmodell als unkommerzielles Programmsystem zur Beschreibung der Strukturbildung des Zementsteins während der Hydratation zur Verfügung. Es basiert auf einer computergestützten Darstellung des Zementsteingefüges in Pixeln (zweidimensional) oder den sogenannten Voxeln (dreidimensional). Ein Voxel ist ein diskretes Volumenelement, welche in einem zwei- oder dreidimensionalen Gitter, die unterschiedlichen Phasenbestandteile des Zementes und der Hydrationsprodukte über den Hydratationsverlauf darstellt. Die Bestandteile des Zementes sowie der Feinstoffe werden zu Beginn einer Simulation zufällig in einem virtuellen Würfel mit der Kantenlänge $100\ \mu\text{m}$ verteilt. Die dafür notwendigen Partikelgrößenverteilungen der im Rahmen

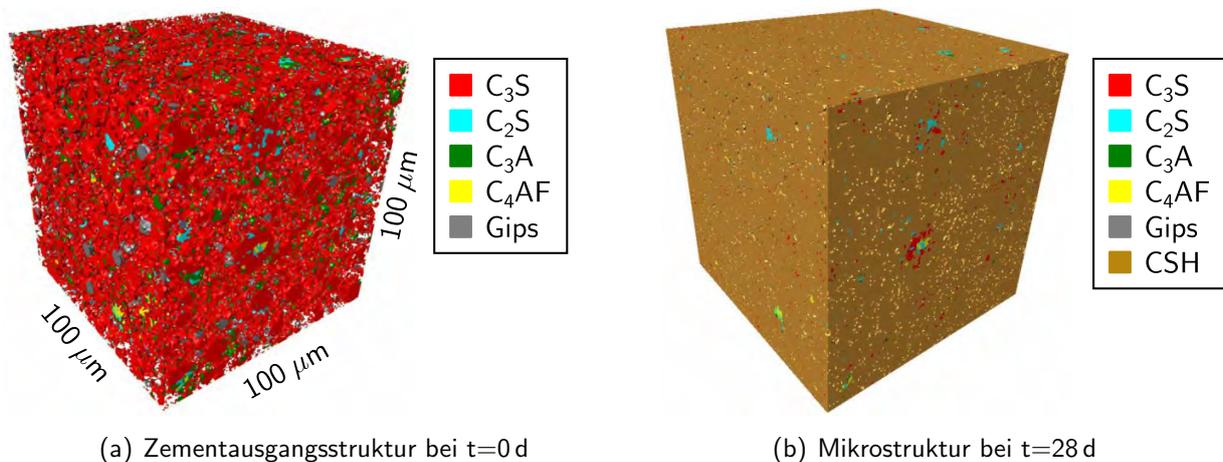


Bild 4.4: Phasenverteilung des Zementes im virtuellen dreidimensionalen Würfel nach (Koster 2007); Kantenlänge von $100\ \mu\text{m}$, Auflösung des Gittermodells $1\ \text{Voxel} = 1\ \mu\text{m}^3$

dieser Arbeit verwendeten Zemente sowie des Kalksteinmehls der Grundmischung für den Nassspritzbeton M-2 und M-3 werden mittels Lasergranulometrie bestimmt und sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Wie auch im kumulativen Durchgang der Partikelgrößenverteilungslinie in Bild 4.5 erkennbar, wird die für Spritzbeton benötigte Frühfestigkeit unter anderem durch die

¹National Institute of Standards and Technology

Tabelle 4.1: Partikelgrößenverteilung der Feinstoffe in [M. –%]

Partikel- durchmesser [μm]	CEM I 32,5 R Märker Portlandzement	CEM I 52,5 N (sb) Rohrdorfer Portlandzement	CEM I 52,5 N (sb) Heidelberger Portlandzement	KSM Röh m
1	4,63	6,50	7,10	9,32
2	8,89	14,60	16,10	23,58
3	13,12	19,60	21,60	34,50
4	17,36	25,20	25,80	41,91
6	23,28	35,20	33,40	47,38
8	29,21	46,50	40,80	56,47
12	36,55	63,20	54,40	62,42
16	42,13	77,80	66,20	66,10
24	51,14	93,40	83,60	71,31
32	58,76	100,00	92,37	75,03
48	70,68	100,00	99,30	80,69
64	79,37	100,00	100,00	85,40
96	89,39	100,00	100,00	93,84
128	94,12	100,00	100,00	98,73
192	97,50	100,00	100,00	100,00
250	98,59	100,00	100,00	100,00
500	99,91	100,00	100,00	100,00
Blaine-Wert in [$\frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$]	3400	5021	4537	6798

erhöhte Mahlfineinheit erreicht. Die Zemente, die für die Spritzbetonergänzung zur Anwendung kommen, weisen einen wesentlich höheren Anteil an kleinen Partikelbestandteilen auf, als der für Normalbeton verwendete CEM I 32,5 R. Dies wird auch an der massebezogenen Oberfläche nach Blaine, die üblicherweise als Maß für die Mahlfineinheit des Zementes verwendet wird, ersichtlich. Der in (DB Netz AG 2011) geforderte Mindestwert von 3500 g/cm^2 wird von beiden Zementsorten der Klasse CEM I 52,5 N deutlich überschritten. Auf Grundlage der Partikelgrößenverteilung der Feinstoffe wird, unter Berücksichtigung des w/z-Wertes, der Dichte des Wassers und des Zementes, die absolute Anzahl der im diskretisierten Rechenvolumen von $100 \times 100 \times 100 \mu\text{m}^3$ enthaltenen Teilchen der verschiedenen Partikeldurchmesser, sowie die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zementteilchen Gips sein kann, festgelegt. Die minimale Partikelgröße ist durch die Kantenlänge eines Volumenelementes (Voxel) von $1 \mu\text{m}$ begrenzt. Da die Mittelpunkte der Zementteilchen Mittelpunkte von Voxeln sein müssen, können nur ungeradzahlige Durchmesser auftreten. Voxel die nicht durch Feststoffe belegt sind, werden mit Wasser aufgefüllt. Da die Anordnung der Feststoffe durch die Aussenabmessungen des virtuellen Würfels gewissen Grenzen unterliegt, erfolgt die Umsetzung des gewünschte w/z-Wertes iterativ. Die Bestandteile eines Partikels, die ausserhalb

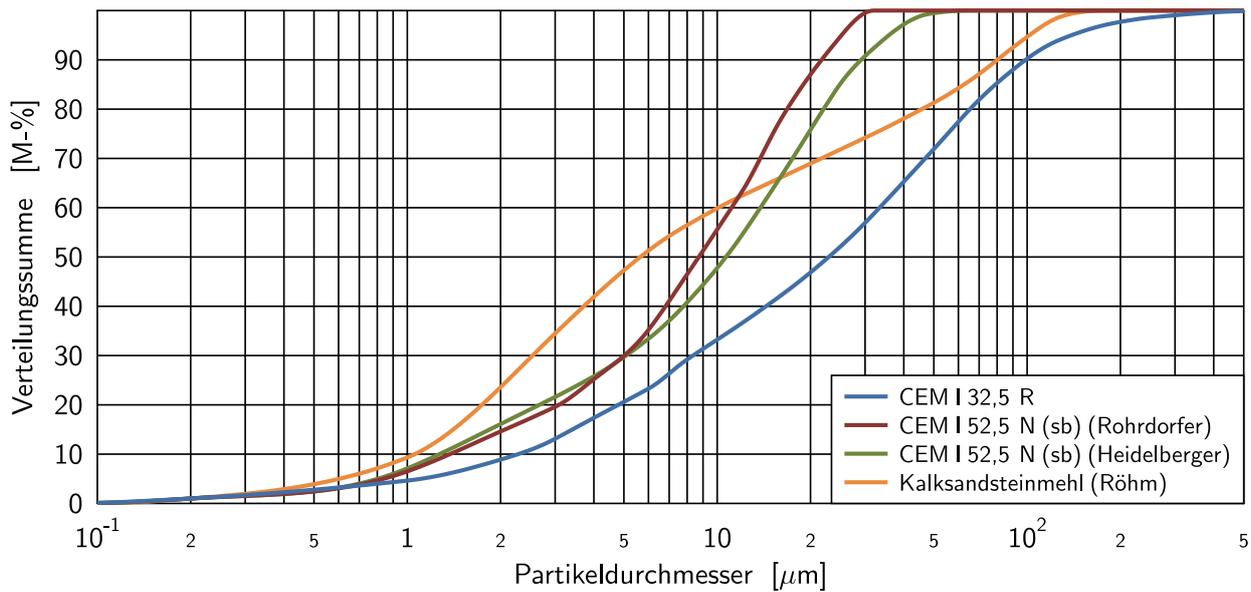


Bild 4.5: Partikelgrößenverteilung der Feinstoffe als kummulierter Durchgang

des Würfels liegen, werden auf den gegenüberliegenden Seiten nach innen orientiert angeordnet. Anschließend werden die Zementpartikel in die vier Hauptklinkerphasen unterteilt. Als Grundlage für das dreidimensionale Verteilungsmuster werden zweidimensionale Elektronenmikroskop Aufnahmen verwendet, in der die Hauptklinkerphasen detektiert und quantifiziert werden. Die Auswahl des Verteilungsmusters erfolgt aus einer vorhandenen Zementdatenbank (Bentz). Dabei wird ein Zement aus der Datenbank gewählt dessen Anteil an Hauptklinkerphasen dem der tatsächlich im verwendeten Zement vorhandenen Hauptklinkerphasen entspricht.

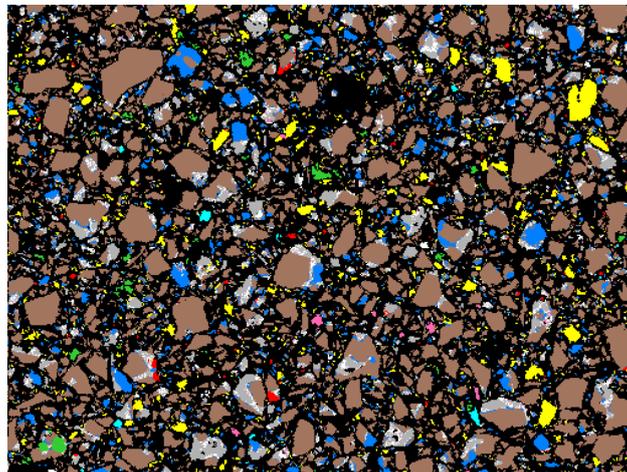
Tabelle 4.2: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Zemente in [M. –%]

Bestandteile	CEM I 32,5 R Märker Portlandzement	CEM I 52,5 N (sb) Rohrdorfer Portlandzement	CEM I 52,5 N (sb) Heidelberger Portlandzement
SiO_2	19,36	19,53	18,90
Al_2O_3	5,17	5,76	5,20
Fe_2O_3	3,07	2,96	3,00
CaO	64,58	63,14	62,30
SO_3	3,16	3,47	3,80
CO_2	2,30	0,53	0,90
MgO	1,15	3,05	2,10
K_2O	0,64	0,82	0,80
Na_2O	0,09	0	0,70
TiO_2	0	0	0
Glühverlust	0,48	0,74	2,30

Tabelle 4.3: Hauptklinkerphase der verwendeten Zemente in [V. –%]

Hauptklinkerphasen	CEM I 32,5 R Märker Portlandzement	CEM I 52,5 N (sb) Rohrdorfer Portlandzement	CEM I 52,5 N (sb) Heidelberger Portlandzement
C_3S	76,00	63,40	69,90
C_2S	4,90	15,50	10,20
C_3A	10,10	12,30	10,70
C_4AF	9,00	8,80	9,20

Die Ergebnisse der chemischen Analyse der Zemente, welche in Tabelle 4.2 zusammengestellt sind, zeigen, dass die Massenanteile der Hauptbestandteile aller drei verwendeten Portlandzemente der Zusammensetzung typischer Portlandzemente folgt. Die Umrechnung der chemischen Zementbestandteile in die Volumenanteile der Hauptklinkerphasen wird mithilfe der Rechenformeln nach *Bogue*, unter Berücksichtigung der jeweiligen Dichte, durchgeführt (sh. Tabelle 4.3) und mit den Werten aus der Zementdatenbank abgeglichen. Die Bezeichnung der vier Hauptklinkerphasen folgt der in der Zementchemie gängigen Abkürzungspraxis für Alit (Trikalziumsilikat: $CaCSiO_5$, kurz C_3S), Belit (Dikalziumsilikat: $CaSiO_4$, kurz C_2S), Trikalziumaluminat ($Ca_3Al_2O_6$, kurz C_3A) und Kalziumaluminatferrit (Ca_2AlFeO_5 , kurz C_4AF). Bei den eigenen Berechnungen wird ausschließlich ein Verteilungsmuster auf Basis des in der Zementdatenbank vorhandenen Verteilungsmusters des Zementes *cement152*, sh. Bild 4.6, verwendet.

**Bild 4.6:** Mittels Bildanalyse bearbeitete REM-EDX-Aufnahme des Zementes *cement152* (Bentz)

Die Simulation der Strukturbildung während des Hydratationsverlaufes erfolgt auf Basis eines zellulären Automaten, d.h. während eines jeden Lösungszyklusses führen alle Oberflächenvoxel der Zementkörner eine zufällige Bewegung mit 1-Voxel-Schrittweite in einer der sechs Raumrichtungen aus. Wenn ein Voxel dabei in einem Porenraum landet und die Zementphase des wandernden

Voxels momentan löslich ist, findet eine chemische Reaktion statt. Im ersten Lösungszyklus sind von den Klinkerphasen nur C_3A , C_4AF sowie Gips löslich. Im weiteren Verlauf werden auch C_3S und C_2S löslich. Die Anzahl an chemischen Reaktionen, die bei potentieller vorliegender Löslichkeit tatsächlich ausgeführt werden, wird durch eine Lösungswahrscheinlichkeit gesteuert. Die bei der Reaktion entstehenden Voxel werden am Ort ihrer Entstehung angeordnet.

Von wesentlicher Bedeutung für die Verbundfestigkeit ist die Auswirkung des Übergangsbereichs von Zementstein zu Zuschlagskorn. Bedingt durch das Größenverhältnis von Zuschlagskorn und Zementkorn führt diese lokale, örtliche Zwangsbedingung, die unter dem Namen *Wall Effect* bekannt ist, zu einer weniger dichten Kornverteilung des Zementes. Während des Hydratationsvorgangs kommt es in diesem Bereich, unter der Annahme eines inerten Zuschlagkorns, nur zu einem einseitigem Kristallwachstum und es bildet sich eine Übergangszone (Interfacial Transition Zone, kurz ITZ), die sich durch eine gegenüber dem restlichen Zementstein höhere Porosität und somit geringere Festigkeit auszeichnet. Die beschriebene Ausbildung einer ITZ kann auch auf den Übergang von Altbeton zu nachträglich ergänztem Beton übertragen werden.

Zur Untersuchung der Auswirkungen der ITZ auf die Porosität werden numerische Berechnungen für die Normalbetonmischung (CEM I 32,5 R) sowie für die Nassspritzbetonmischungen M-2 bzw. M-3 (CEM I 52,5 N) angestellt. Die Simulationen finden unter isothermen Verhältnissen als abgeschlossenes System (freie Voxel die durch chemisches Schwinden entstanden sind werden nicht mit Wasser wiederaufgefüllt) statt. Die Summe aller luft-, sowie mit freiem Wasser gefüllten Voxel bezogen auf das diskretisierte Rechenvolumen wird als Porosität bezeichnet. Bild 4.7 zeigt die

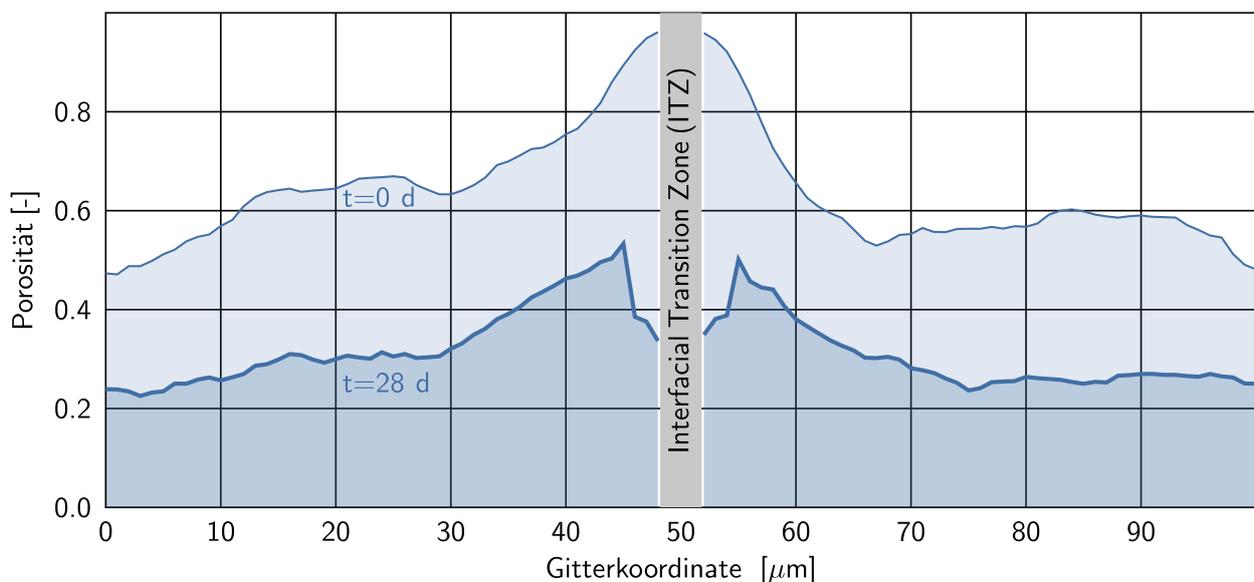


Bild 4.7: Ermittelte Porositätsverteilung der Hydratationsmodellierung der Normalbetonmischung (CEM I 32,5 R; Märker) mit *CEMHYD3D* unter Berücksichtigung einer Grenzzone (ITZ) zu Beginn der Hydratation und nach 28 Tagen

Porositätsverteilung für die Normalbetonmischung entlang eines Schnittes durch den virtuellen Würfel unter Vorgabe einer Grenzzone. Zu Beginn, Zeitpunkt $t = 0 d$, zeigt sich direkt an der Grenzzone, bedingt durch den *Wall Effect*, die höchste Porosität. Mit zunehmendem Hydrationsverlauf nimmt die Porosität ab. Aufgrund einer verstärkten Anreicherung an Portlanditkristallen bzw. $Ca(OH)_2$ -Bestandteilen an der ITZ, stellt sich zum Zeitpunkt $t = 28 d$, in einem Abstand von ca. $4 \mu m$ zur Grenzzone die höchste Porosität ein. Die Auswertung der Porosität entlang eines Schnittes durch die Grenzzone für die Nassspritzbetonmischungen M-2 und M-3 offenbart im Vergleich zum Normalbeton eine geringere maximale Porosität. Diese resultiert aus dem geringeren w/z-Wert der Grundmischung.

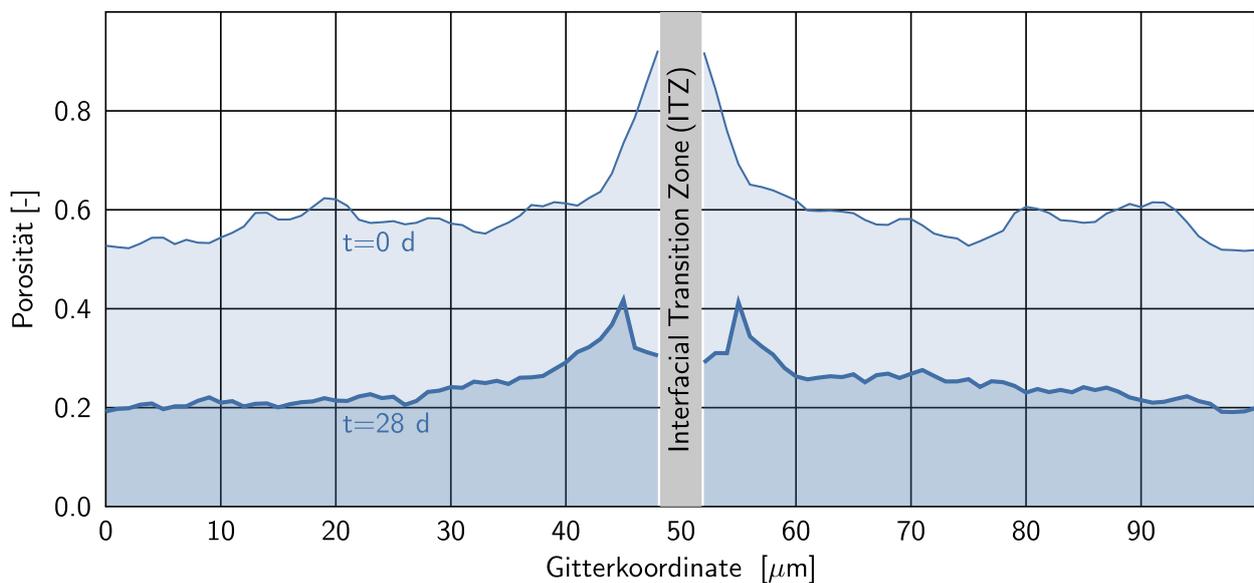


Bild 4.8: Ermittelte Porositätsverteilung der Hydrationsmodellierung der beschleunigten Nassspritzbetonmischungen M-2 und M-3 (CEM I 52,5 N; Heidelberger) mit *CEMHYD3D* unter Berücksichtigung einer Grenzzone (ITZ) zu Beginn der Hydratation und nach 28 Tagen

5 Ergebnisse der Untersuchungen

Die Auswertung der Spaltzugwürfel erfolgt trotz abweichender Abmessung der Lasteinleitungstreifen mit der vereinfachten Formel nach (DIN EN 12390-6 2010)

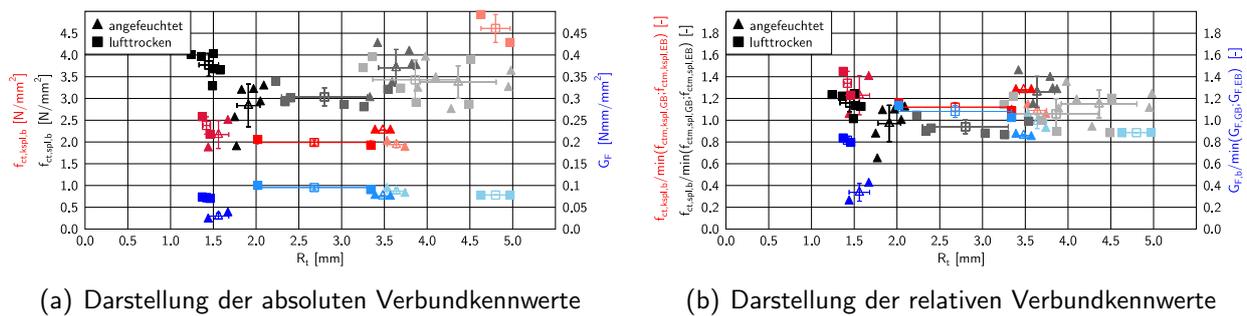
$$f_{ct,spl} = \frac{2 \cdot F_{max}}{\pi \cdot b \cdot h} \quad (5.1)$$

unter Vernachlässigung der Formfunktionen, die den Einfluss des Geometrieverhältnisses von Lasteinleitungstreifen zu Probekörperabmessung berücksichtigen. Die mechanischen Kennwerte der Keilspaltzugwürfel werden anhand der in Abschnitt 4.1 gezeigten inversen Analyse ermittelt. Im Folgenden werden die experimentell ermittelten Verbundkennwerte als absolute und als relative Einzel- sowie Mittelwerte in Abhängigkeit der mittleren Rautiefe nach Kaufmann dargestellt. Bei der Ermittlung der Mittelwerte der Spaltzugfestigkeiten werden zur Mittelwertbildung der Rauheit nur die sechs Messtellen je Verbundplatte verwendet aus denen Spaltzugkörper geschnitten werden. Für die Berechnung der Mittelwerte der Keilspaltzugfestigkeiten bzw. der Bruchenergien wird analog verfahren. Die relativen Festigkeitskennwerte sind auf den geringeren monolithischen Festigkeitskennwert, 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 in vertikaler Richtung dargestellt. Die Ermittlung der Standardabweichung erfolgt unter Annahme einer Normalverteilung.

Zur Darstellung der Ergebnisse werden die mechanischen Kennwerte in Abhängigkeit der Rautiefe, die neben dem Bemessungswert der Zugfestigkeit durch den Rauheitsbewert c_i in den momentan gültigen Bemessungsansatz eingeht, dargestellt. Der Festigkeitseinfluss wird durch die Umrechnung in relative Festigkeiten teilweise berücksichtigt. Um die Auswirkung verschiedener Einflussfaktoren aufzeigen zu können, werden die Verbundkennwerte ausgehend von der normgerechten Ausgangskombination der Einflussfaktoren (Aufrauen durch HDW, Anfeuchten der Fuge, vertikale Lage der Versuchskörper beim Spritzvorgang) verglichen. Eine Abweichung der Einflussfaktoren von dieser Ausgangskombination wird, falls vorhanden, explizit erwähnt. Die Aufzählung der in den Diagrammen dargestellten Verbundplatten erfolgt, zur einfacheren Zuordnung, in aufsteigender Reihenfolge der Rautiefen nach Kaufmann geordnet. Die Farbintensität der Marker in den Diagrammen nimmt mit steigender Rautiefe nach Kaufmann ab.

5.1 Einfluss der Oberflächenvorbereitung

Das Vornässen der gesäuberten Auftragsfläche, wie dies nach (DIN 18551 2014) bei der Instandsetzung und Verstärkung von Tragwerken sowie bei der Erstellung freistehender Konstruktionen gefordert wird, führt bei Ergänzung der stark aufgerauten Auftragsflächen ($R_t \geq 1,5 \text{ mm}$) mit Trockenspritzbeton der Mischung M-1 zu keiner nennenswerten Festigkeitssteigerung. Die monolithische Festigkeit wird, wie in Bild 5.1(b) ersichtlich, von fast allen Versuchskörpern quasi erreicht.



(a) Darstellung der absoluten Verbundkennwerte

(b) Darstellung der relativen Verbundkennwerte

Bild 5.1: Mechanische Verbundkennwerte für Verbundkörper mit angefeuchteter (VP-3, VP-4, VP-1) und luftgetrockneter Grundplattenoberfläche (VP-5, VP-7, VP-6)

Auch bei der Serie VP-7, dessen bezogener Mittelwert mit 0,94 am niedrigsten ist, wird das Versagen nicht durch die Fuge sondern durch die Festigkeit des Altbetons bestimmt, was anhand der Bruchbilder bestätigt werden kann. Beispielhaft für alle Versuchskörper der Verbundplatte VP-7 ist dies für den Spaltzugwürfel VP-7-VI in Bild 5.2 illustriert. Der relative Festigkeitswert von ≤ 1 kann auf die Streuungen der Festigkeiten zurückgeführt werden.



(a) Vorderansicht bezogen auf Lasteinleitung



(b) Bruchfläche des Verbundkörpers

Bild 5.2: Riss verläuft in der Grundplatte von VP-7

5.2 Einfluss des Aufrauverfahrens

Für einen Vergleich welches der beiden gängigen Verfahren zur Vorbereitung der Auftragsfläche zu bevorzugen ist, werden die Versuchsserien deren Altbetonoberfläche durch Höchstdruckwasserstrahlen aufgeraut wurde, denen gegenübergestellt, die durch Strahlen mit festen Strahlmitteln behandelt wurden. Aus den in Bild 5.3 dargestellten Ergebnissen ist ersichtlich, dass die höchst- druckwassergestrahlten Versuchsserien die monolithische Festigkeit erreichen. Auch die geringer durch Strahlen mit festen Strahlmitteln aufgeraute Serie VP-9 erreicht die monolithische Festigkeit. In der stark durch Strahlen mit festen Strahlmitteln aufgerauten Versuchsserie VP-2

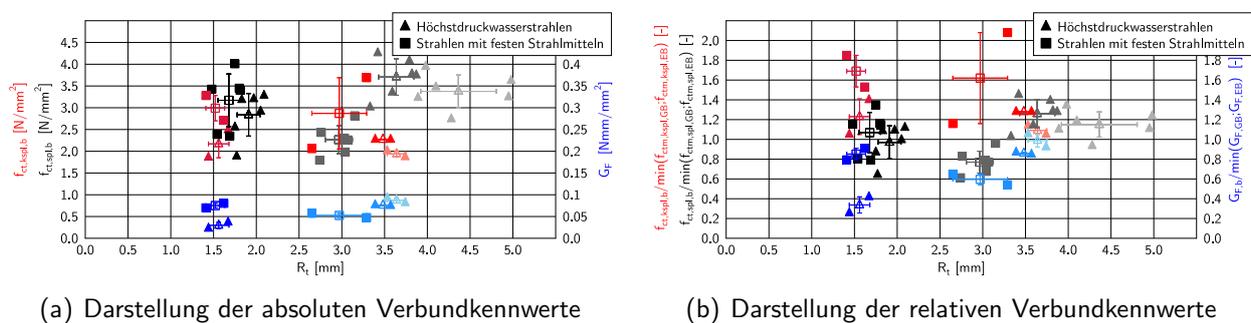


Bild 5.3: Mechanische Verbundkennwerte für Verbundkörper deren Grundplatten durch Höchst- druckwasserstrahlen (VP-3, VP-4, VP-1) und durch Strahlen mit festen Strahlmitteln aufgeraut wurden (VP-9, VP-2)

erreicht kein Spaltzugkörper die monolithische Festigkeit. Dies bestätigt auch die Betrachtung der Bruchkörper. Der Riss verläuft gänzlich entlang der Verbundfuge. Die Bruchfläche entspricht dem Negativabdruck der Auftragsfläche, sh. Bild 5.4. Die Vermutung einer höheren Schädigung



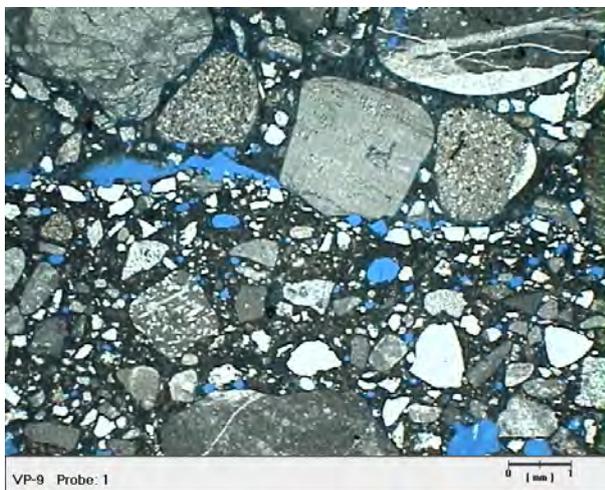
(a) Auftragsfläche vor Spritzbetoner- gänzung



(b) Bruchfläche nach Spaltzugver- such

Bild 5.4: Vergleich Auftragsfläche und Bruchfläche von VP-2

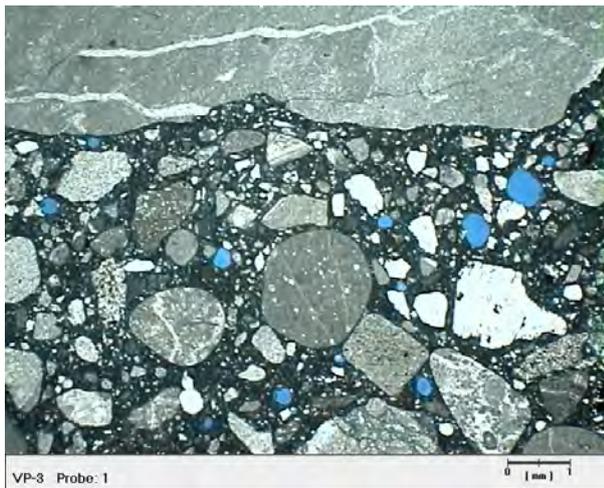
der Altbetonoberfläche verzahnter Fugen, bedingt durch Steigerung der Intensität und Dauer der Einwirkung, die zum Erreichen einer verzahnten Fuge durch Strahlen mit festen Strahlmitteln nötig ist, als bei rauen Fugen, kann durch die in Bild 5.5 dargestellten Durchlichtmikroskopieaufnahmen der Verbundzone nicht bestätigt werden. Die Dünnschliffe sind aus den Mittelbereichen zwischen den Versuchskörpern der Verbundplatten entnommen. Poren sind blau eingefärbt. Beim Vergleich der Verbundzone der Serie VP-9, sh. Bild 5.5(a) die bis zur Rauheitskategorie *rau* aufgeraut wurde, und der Serie VP-2, sh. Bild 5.5(b) deren Rauheit als *verzahnt* einzustufen ist, kann anhand der Durchlichtmikroskopie keine Schädigung durch Mikrorisse, die durch den impulsartigen Eintrag der festen Strahlmittel verursacht sein könnte, erkannt werden. Jedoch zeigt sich bei beiden



(a) leichter durchgängiger Porenhorizont in der Verbundzone von VP-9



(b) starker durchgängiger Porenhorizont in der Verbundzone von VP-2



(c) dichtes Zementsteingefüge in der Verbundzone von VP-3



(d) dichtes Zementsteingefüge in der Verbundzone von VP-4

Bild 5.5: Durchlichtmikroskopie der Verbundzone von mit festen Strahlmitteln gestrahlten bzw. mit höchstdruckwasserstrahlten Auftragsflächen

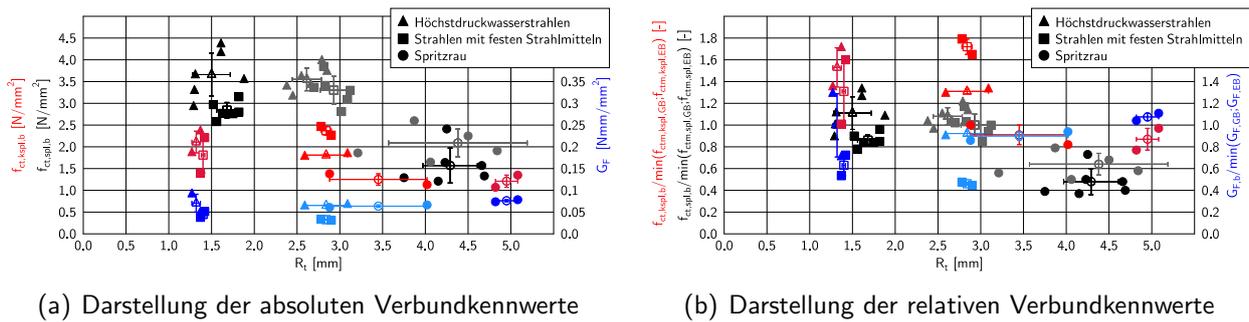
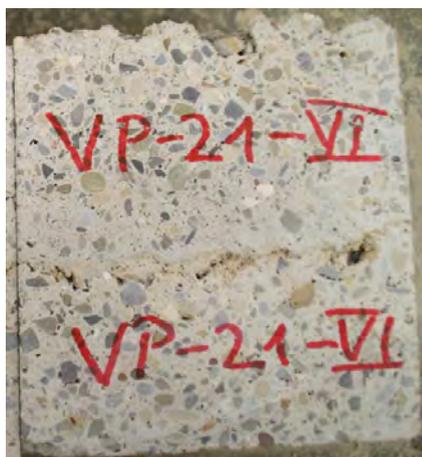
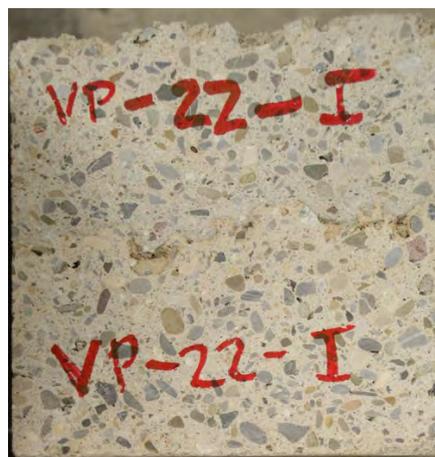


Bild 5.6: Mechanische Verbundkennwerte für Verbundkörper deren Grundplatten durch Höchstdruckwassergestrahlen (VP-13, VP-14), durch Strahlen mit festen Strahlmitteln aufgeraut (VP-15, VP-16) oder spritzrau belassen wurden (VP-21, VP-22)

Versuchsserien ein durchgängiger Porenhorizont in der Verbundzone, der mit größerer Rautiefe stärker ausgeprägt scheint. Bei höchstdruckwassergestrahnten Versuchskörpern, deren Verbundzone in den Bildern 5.5(c) und (d) dargestellt ist, ist das Zementsteingefüge in der Verbundzone wesentlich dichter. Der durchgängige Porenhorizont bei den durch Strahlen mit festen Strahlmitteln aufgerauten Versuchskörpern könnte als Anzeichen vorhandener kleiner Mikrorisse interpretiert werden, die anhand der Durchlichtmikroskopie nicht detektiert werden können. Bei Ergänzung der Grundplatten mit der Nassspritzbetonmischung M-3 erreichen die durch HDW aufgerauten Verbundkörper ihre zugehörige monolithische Festigkeit. Auch die stark durch Strahlen mit festen Strahlmitteln aufgeraute Serie erreicht, im Gegensatz zu VP-15, die monolithische Festigkeit. Der Verbund Spritzbeton auf Spritzbeton, bei spritzrau belassener Oberfläche, zeigt trotz verhältnismäßig hoher Rautiefe, eine deutlich geringere Verbundfestigkeit als Spritzbetonergänzungen von nachträglich aufgerauten Normalbetonoberflächen. Die bezogene Verbundfestigkeit beträgt



(a) VP21-VI



(b) VP-22-I

Bild 5.7: Spritzschatten in der Verbundfuge bei spritzrauen Oberflächen

nur 0,48 bzw. 0,64. Begründet ist dies, wie in Bild 5.7 zu sehen ist, durch nicht vollständig eingespritzten Spritzbetonspitzen des Grundbetons, durch die sich die potentielle Adhäsionsfläche verringert. Die Anzahl der durchschnittlichen „Fehlstellen“ ist in der Serie VP-21 größer als in Serie VP-22 was sich auch in den Festigkeitskennwerten widerspiegelt. Die Unterschiede können damit nicht unmittelbar auf eine festigkeitsteigernde Wirkung des Vornässens, was einem Entzug des Hydratwasser vorbeugen soll, zurückgeführt werden. Ob diese „Fehlstellen“ auch bei höheren Spritzleistungen als die verwendete von $8,6 \text{ m}^3/h$ entstehen, kann anhand der durchgeführten Untersuchungen nicht geklärt werden.

Dass eine lufttrockene bzw. nicht ausreichend vorgehästete Auftragsfläche zu geringeren Verbundfestigkeiten führen kann, kann durch numerische Simulationsberechnungen mit dem in Abschnitt 4.2 beschriebenen Mikrostrukturmodell *CEMHYD3D* bestätigt werden. Die in Abschnitt 4.2 vorgestellten Berechnungen werden um zusätzliche Randbedingungen erweitert, um den Einfluss einer saugenden Auftragsfläche zu berücksichtigen. Dazu wird dem System zu Beginn eine festgesetzte Menge von 5,2 % Wasser entzogen. Dies führt nach einer Hydratationsdauer von 28 Tagen bei der verwendeten Normalbetonmischung sowie bei der Spritzbetonmischung um einem 12 % höheren Porenanteil als bei wassergesättigten, nicht saugenden Altbetonoberflächen.

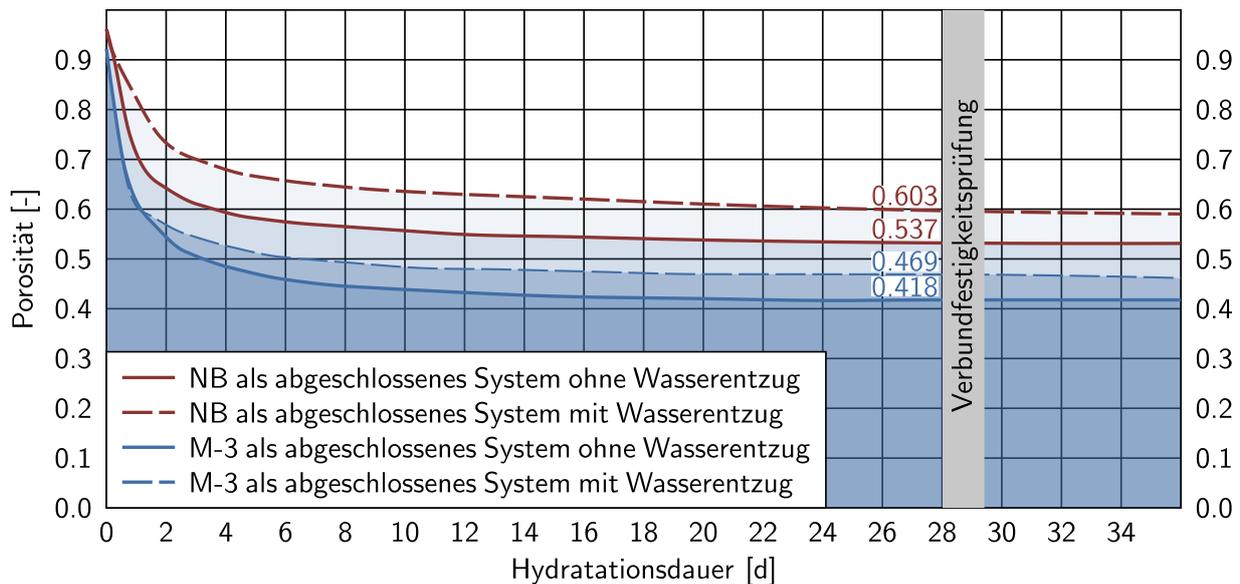
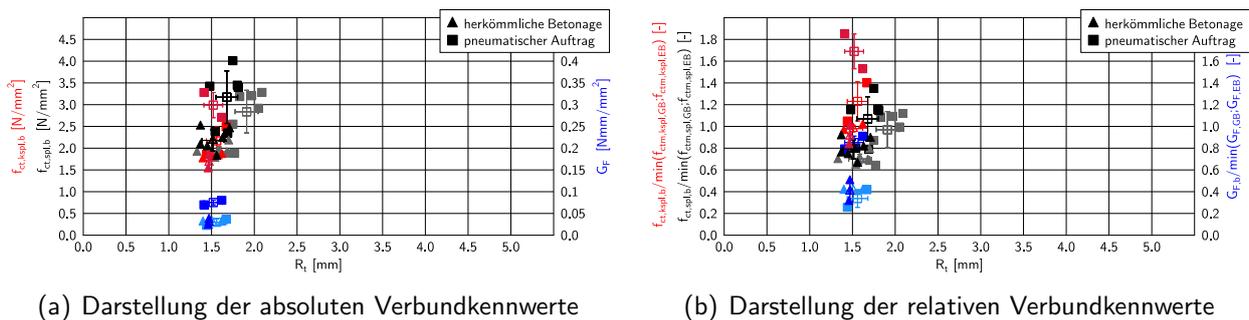


Bild 5.8: Zeitliche Entwicklung der Porosität bei Wasserentzug

5.3 Einfluss verfahrensspezifischer Parameter

5.3.1 Einfluss des Applikationsverfahrens

Die Annahme eines verfahrensbedingten besseren Verbundes von Betoneergänzungen die pneumatisch aufgetragen werden im Vergleich zu herkömmlich hergestellten Aufbetoneergänzungen, kann durch die durchgeführten Versuche bestätigt werden. Wie in Bild 5.9 dargestellt, erreichen die Ver-



(a) Darstellung der absoluten Verbundkennwerte

(b) Darstellung der relativen Verbundkennwerte

Bild 5.9: Mechanische Verbundkennwerte für Verbundkörper mit herkömmlichen (VP-12, VP-10) und pneumatischen Auftrag der Ergänzungsplatte (VP-9, VP-3)

bundkennwerte der Versuchskörper, die im Spritzverfahren aufgebracht werden, bei in etwa gleicher Oberflächenbeschaffenheit, höhere Verbundfestigkeiten als Verbundkörper die mit der gleichen werkgemischten Trockenspritzbetonmischung mittels herkömmlicher Betonage hergestellt werden. Der w/z -Wert für die Aufbetoneergänzung entspricht dem durch Darrversuche ermittelten w/z -Wert der pneumatisch aufgetragenen Ergänzungs-schicht. Die Versuchskörper der beiden Versuchsreihen mit pneumatischem Auftrag erreichen mittlere Spaltzugfestigkeiten bzw. Standardabweichungen von $f_{ctm,spl,b} = 2,84 \pm 0,49 \text{ N/mm}^2$ und $f_{ctm,spl,b} = 3,17 \pm 0,60 \text{ N/mm}^2$. Die Versuchskörper hingegen, bei denen die gleiche Betonmischung auf herkömmliche Art und Weise mit anschließender Verdichtung auf dem Rütteltisch hergestellt wurden, erreichen nur mittlere Spaltzugfestigkeiten bzw. Standardabweichungen von $f_{ctm,spl,b} = 1,91 \pm 0,12 \text{ N/mm}^2$ und $f_{ctm,spl,b} = 2,18 \pm 0,24 \text{ N/mm}^2$. Bei Betrachtung der Bruchoberfläche, sh. Bild 5.10, kann bei den Versuchskörpern der Serien die durch Aufbeton ergänzt sind eine größere Porosität beobachtet werden als bei den Bruchoberflächen der Versuchskörper dessen Ergänzungs-beton pneumatisch aufgetragen wird. Die These, dass durch die energiereiche pneumatische Förderung der Ausgangsmischung und die daraus resultierenden Aufprallgeschwindigkeiten des Spritzgemisches auf dem Untergrund, weniger Verdichtungsporen in der Verbundzone entstehen als bei nachträglicher, druckloser Aufbetoneergänzung mit herkömmlichen Verdichtungsverfahren, kann durch die durchgeführten Versuche bestätigt werden.

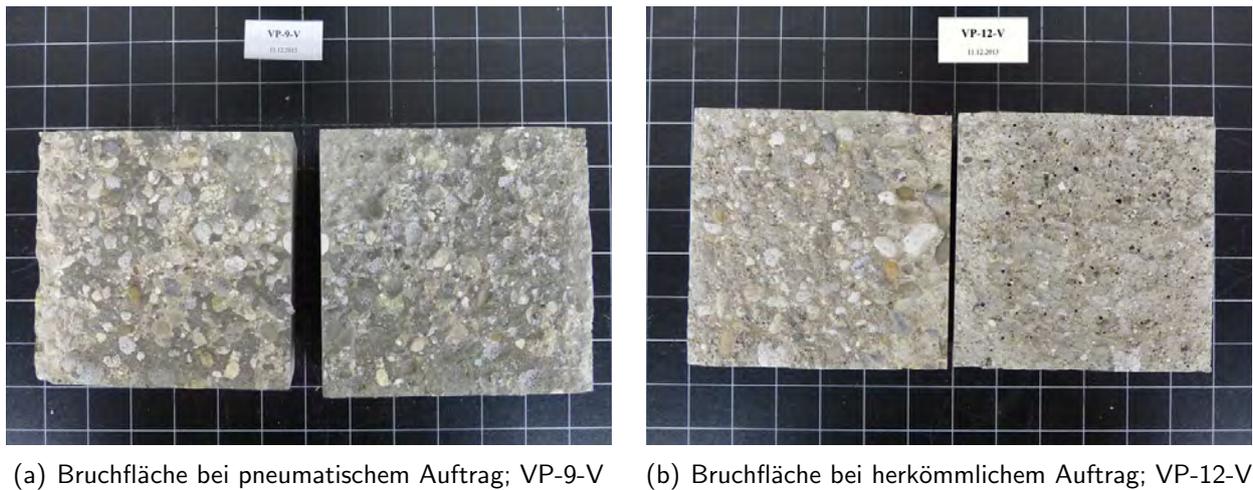


Bild 5.10: Erhöhte Porosität in der Grenzzone bei herkömmlicher Betonage

5.3.2 Lage der Spritzkörper

Bei den für Spritzbetonergänzungen relevanten Rautiefen der Auftragsflächen zeigt sich bei den durchgeführten Versuchen keine Verringerung der Verbundfestigkeit durch Zugspannungen die aus dem Eigengewicht des Spritzbetons resultieren. Die Festigkeiten der Spaltzug- sowie der Keilspaltzugversuche erreichen bei vertikaler Lage der Spritzfläche sowie bei über Kopf liegender Auftragsfläche die monolithische Tragfähigkeit des geringeren Verbundpartners. Die Bildung eines

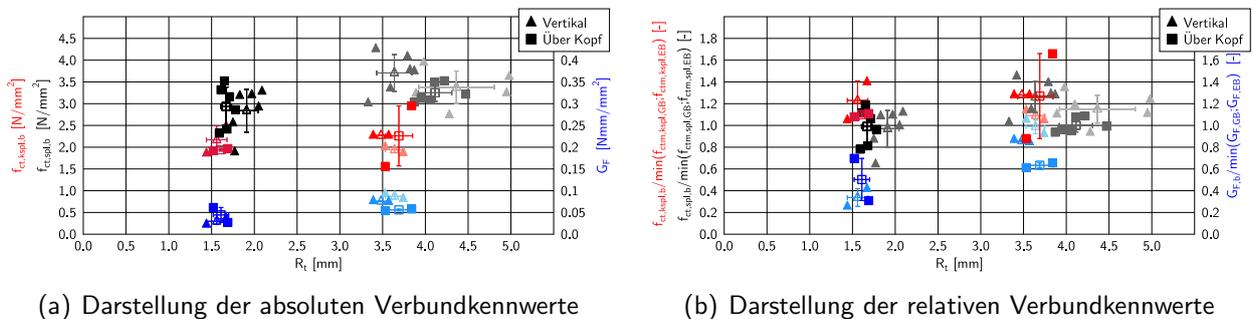
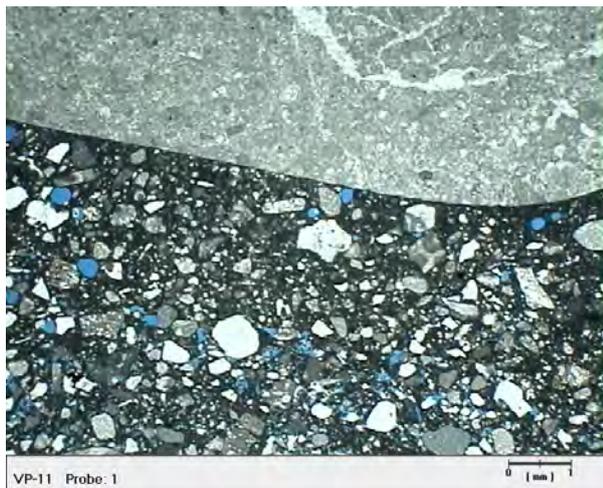
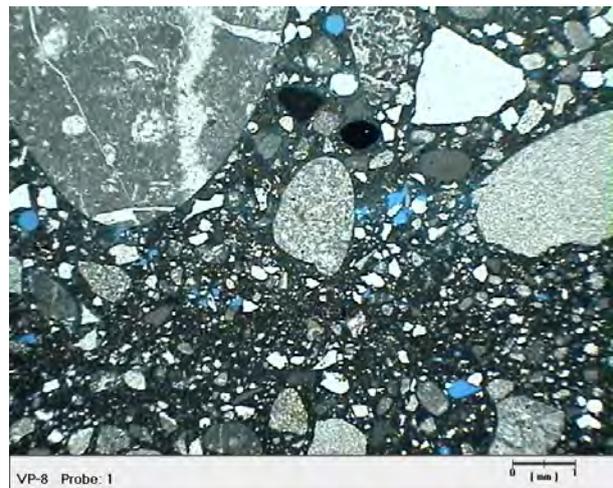
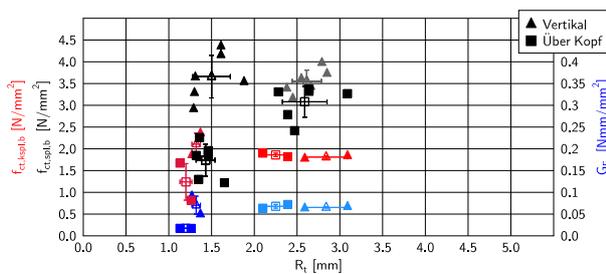


Bild 5.11: Mechanische Verbundkennwerte für Verbundkörper mit vertikaler Spritzflächenneigung (VP-3, VP-4, VP-1) und Auftrag über Kopf (VP-11, VP-8)

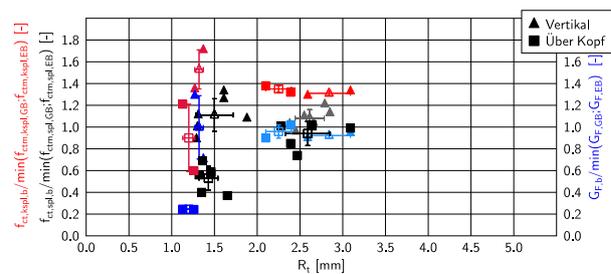
parallel zur Fuge verlaufenden Risses bei über Kopf gespritzten Versuchskörpern, der sich durch ungenügende Haftung ergeben könnte oder durch größeres Schwinden aufgrund der erhöhten Zementanreicherung an der Verbundfuge, kann in den Dünnschliffen in Bild 5.12 nicht festgestellt werden. Es ist ein ähnlich dichtes Gefüge im Spritzbeton zu erkennen wie auch bei den vertikal gespritzten, durch Höchstdruckwasserstrahlen aufgerauten Verbundserien.

(a) VP-11; $R_t = 1,65$ (b) VP-8; $R_t = 4,01$ **Bild 5.12:** Durchlichtmikroskopie der Verbundzone von über Kopf gespritzten Verbundplatten

Auch bei Ergänzung mit der Nassspritzbetonmischung M-3 erreichen die beiden Serien mit vertikaler Spritzflächenneigung die monolithischen Festigkeitskennwerte. Die über Kopf ergänzte Serie VP-20 kann im Rahmen der Versuchsstreuungen als monolithisch angesehen werden. Die sehr niedrigen Verbundfestigkeiten der Serie VP-19 sind auf eine partielle Überdosierung des Beschleunigers, erkennbar an der Gelbfärbung der verbundfugennahen Schicht (sh. Bild 5.14), zurückzuführen und sind daher aus der Auswertung auszuschließen.



(a) Darstellung der absoluten Verbundkennwerte



(b) Darstellung der relativen Verbundkennwerte

Bild 5.13: Mechanische Verbundkennwerte für Verbundkörper mit vertikaler Spritzflächenneigung (VP-13, VP-14) und Auftrag über Kopf (VP-19, VP-20)



Bild 5.14: Partielle Überdosierung des Beschleunigers in den ersten Zentimetern der Ergänzungsschicht

5.4 Einfluss des Altbetonalters

Abweichend zum normalen Herstellungsprozess der Verbundplatten, Aufbringen der Ergänzungsschicht 28 Tage nach Herstellung der Grundplatte, wurden zwei Grundplatten unterschiedlicher Rautiefe erst 105 Tage nach Herstellung der Grundplatten mit Spritzbeton der Mischung M-3 ergänzt. Das damit induzierte größere differentielle Schwinden scheint bei den vorliegenden Rautiefe, Probekörpergeometrien und Betonfestigkeiten nicht ausreichend zu sein um ein verbundminderndes Verhalten beobachten zu können. Sämtliche Probekörper erreichen, wie in Bild 5.15 zu sehen ist, die monolithische Festigkeit.

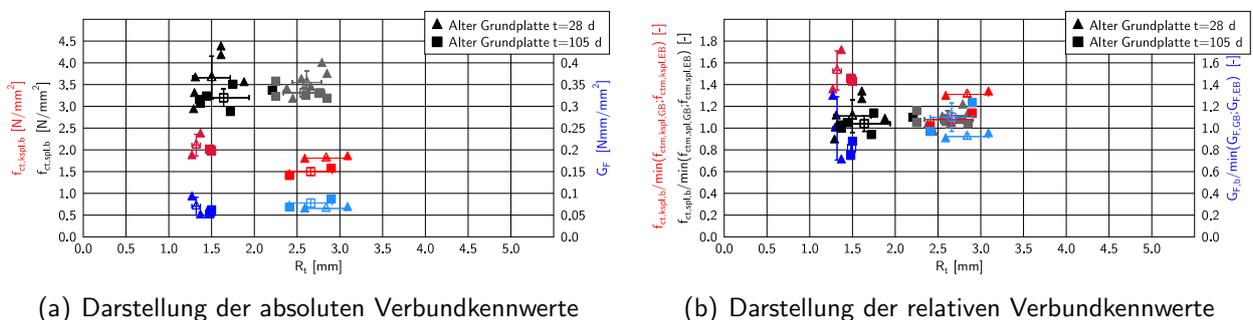


Bild 5.15: Mechanische Verbundkennwerte für Verbundkörper deren Grundplatten im Alter von 28 Tagen (VP-13, VP-14) und im Alter von 105 d ergänzt wurde (VP-17, VP-18)

5.5 Schwindverhalten von Spritzbeton

Mit der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Messinstallation werden durch den frühen Messbeginn (1 h bzw. 2 h nach Betonage) bereits Verformungen gemessen, bevor die Erstarrung begonnen hat. 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

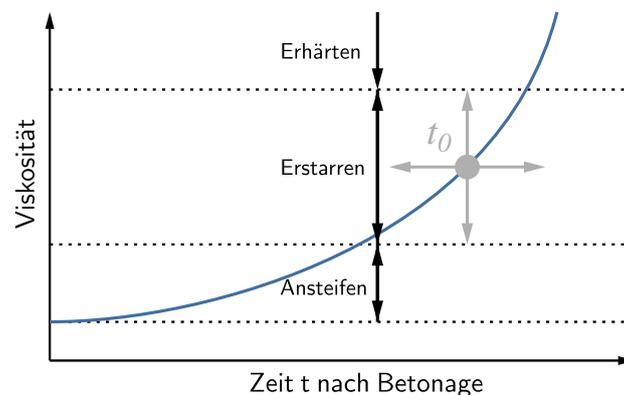


Bild 5.16: Festlegung von *time-zero* t_0 zur Bestimmung effektiver Schwindverformungen

Zeitpunkt t_0 , der oft als *time zero* bezeichnet wird, nicht einheitlich für verschiedene Betonzusammensetzungen festgelegt werden kann, schlägt (Fontana 2007) die Dehnrates 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 Dehnrates 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 Dehnrates fest. Für die Auswertung der eigenen Schwindversuche erfolgt die Festlegung von t_0 , wie bei den experimentellen Untersuchungen zum Schwindverhalten von Normalbeton in (Lenz 2012), anhand der Abnahme der Verformungsgeschwindigkeit. Dabei wird von (Lenz 2012) das Abfallen der Dehnrates nach Erhärtungsbeginn auf Werte unter $0,320 \frac{mm}{m \cdot d}$ als Grenzwert gewählt. Das schematische Vorgehen ist in Bild 5.17 illustriert.

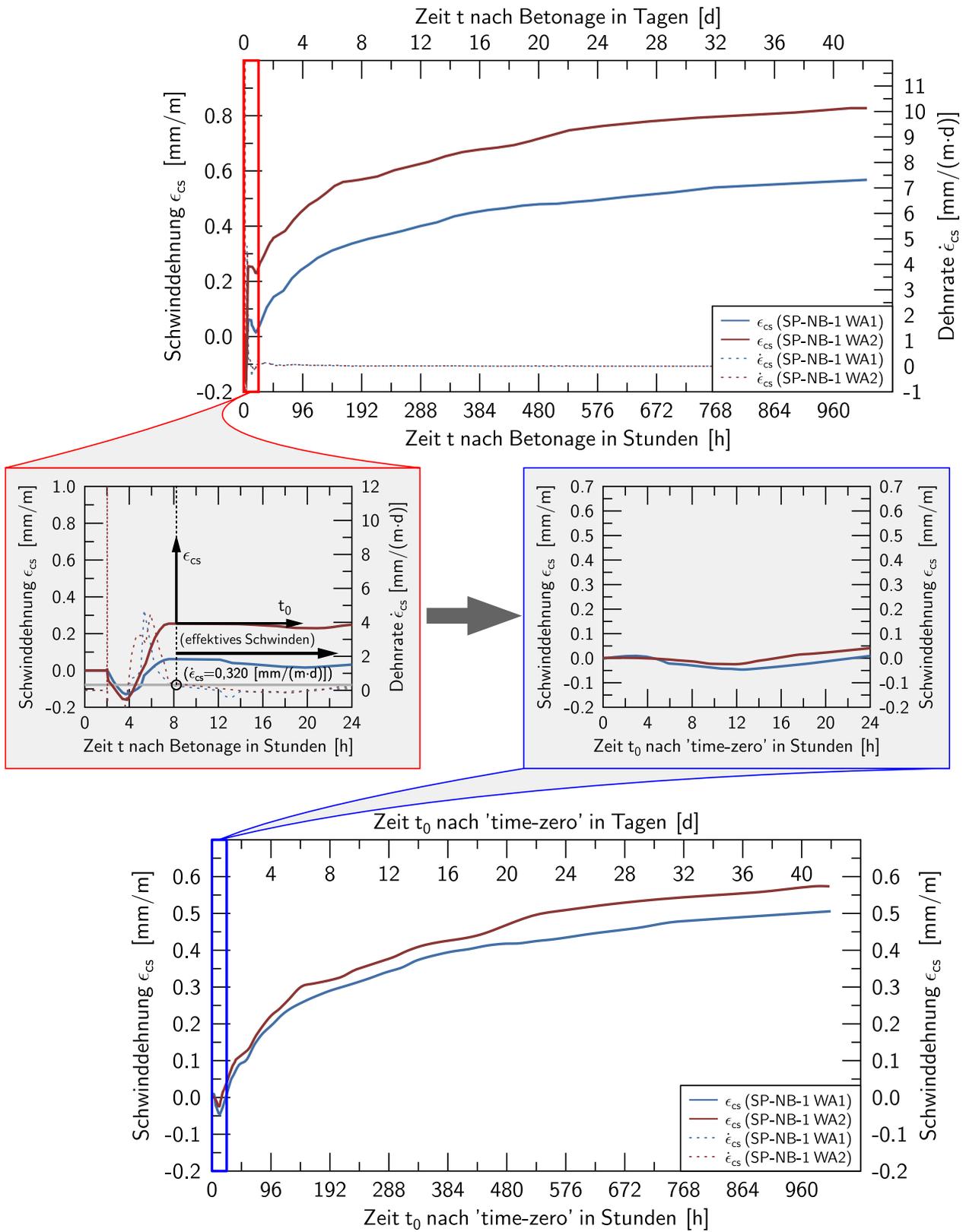


Bild 5.17: Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrates $\dot{\epsilon}_{cs}$

Die Auswertung der einzelnen Schwindversuche sind in Anhang A.4 aufgeführt. Der Schwindverlauf der einzelnen Versuchskörper sowie das arithmetische Mittel der Schwindverläufe für Normalbeton, Trockenspritzbeton und Nassspritzbeton sind in Bild 5.18 dargestellt. Dabei erreichen die beiden Spritzbetone bei einer annähernd gegen Null gehenden Dehnrate mit $\epsilon_{cs} = 1,24 \text{ mm/m}$ für Trockenspritzbeton und $\epsilon_{cs} = 1,14 \text{ mm/m}$ für den Nassspritzbeton im Mittel mehr als doppelt so hohe Schwindverformungen wie Normalbeton $\epsilon_{cs} = 0,54 \text{ mm/m}$. Bei Vergleich der Verformungen nach 25 Tagen sind die Schwinddehnungen von Spritzbeton nahezu doppelt so groß wie die hygrischen Dehnungen von Normalbeton.

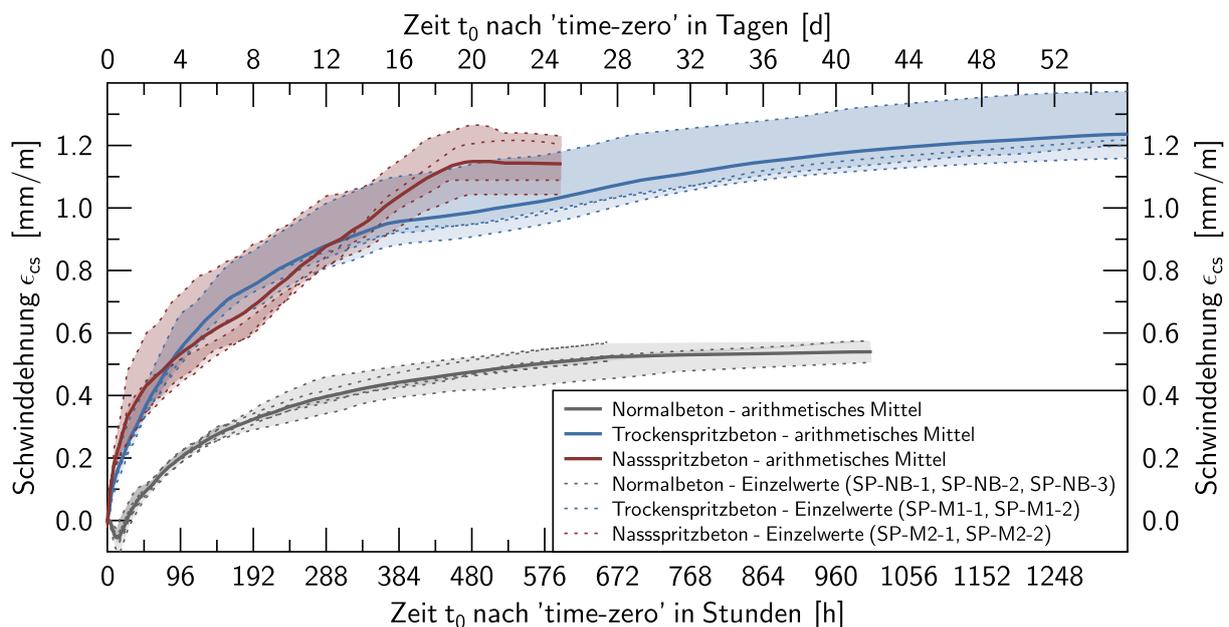


Bild 5.18: Schwindverlauf von Normalbeton, Trockenspritzbeton und Nassspritzbeton bei 20 °C und 65 % RF

Für Normalbeton geht (Lenz 2012) davon aus, dass der Schädigung der Verbundfuge durch zwangsspannungsreduzierende Schwindverformungen im wesentlichen zwei Effekte entgegenwirken. Aus den an Schwindrinnen bestimmten freien Schwindverformungen und nach (Bunke 1991) ermittelten Kriechverformungen zu unterschiedlichem Belastungsbeginn folgert (Lenz 2012), dass die Schwindspannungen durch das Kriechen kompensiert werden können. Dies ist insbesondere ab einem Alter des Ergänzungsbetons von mehr als zwei Tagen der Fall. Damit das Kriechen das Schwinden auch bei einem Belastungsbeginn von weniger als zwei Tagen deutlich übersteigt, soll das Schwindmaß im jungen Beton reduziert werden, damit Zwangsspannungen effektiv durch Kriechen abgebaut werden können (Lenz 2012). Zusätzlich durchgeführte Versuche zur Bestimmung der Zwangsspannungen an Versuchen mit Verbundplatten zeigten nach (Lenz 2012) weder ein „Aufschlüsseln“ des Neubetons noch ein reines Schubversagen in der Fuge. (Lenz 2012) folgert aus den experimentell bestimmten Verformungsverläufen, dass neben der schwindkompensierenden

Wirkung des Betonkriechens bei ausreichender Verbundfestigkeit der Zwang durch die Ausbildung senkrecht zur Fugenebene verlaufender Risse abgebaut werden kann. Dieses an wenigen Experimenten festgestellte Verhalten wurde von (Lenz 2012) jedoch nicht weitergehend untersucht, und die entstehenden Zwangsspannungsverläufe entlang der Verbundfuge weder qualitativ noch quantitativ bestimmt.

6 Überprüfung des Bemessungsansatzes

Für die Überprüfung, ob das geforderte Sicherheitsniveau bei Anwendung des Verbundfugennachweises nach (DIN EN 1992-1-1 2011) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) auch für Spritzbetongänzungen eingehalten wird, werden die experimentellen Verbundfestigkeiten wie in (Zilch u. Müller 2007) mit den Bemessungswerten nach (DIN EN 1992-1-1 2011) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) verglichen. Da die Anzahl der Verbundfestigkeitsprüfungen an Spaltzugkörpern wesentlich größer ist als die Anzahl der Keilspaltzugkörper, wird das Sicherheitsniveau anhand der Spaltzugkörper überprüft. 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 u. a. 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. Die Verwendung der reduzierten Abminderung der mittleren Druckfestigkeit kann durch die maximale Standardabweichung der Druckfestigkeit von $\leq 2 N/mm^2$ ($f_{ck} = f_{cm} - 1,645 \cdot 2 = f_{cm} - 3,29$), die sich im Rahmen dieser Arbeit für Druckfestigkeitsprüfungen von Normalbeton und Spritzbeton einstellt, bei Annahme einer normalverteilten Druckfestigkeit bestätigt werden. 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. Wird der pneumatisch aufgetragene Spritzbeton für die Bemessung der Verbundfugentragfähigkeit maßgebend, wird, wegen der Prüfkörpergeometrie der Druckfestigkeitszylinder ($\varnothing 200/100 \text{ mm}$), die Zylinderdruckfestigkeit des Spritzbetons nach (Reineck u. a. 2012) 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) 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/NA 2012) trocken gelagert werden, mit dem für Würfel geltenden Wert 0,92 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 aktuellen Bemessungswert und Versuch führen und läge damit bei der Überprüfung des Sicher-

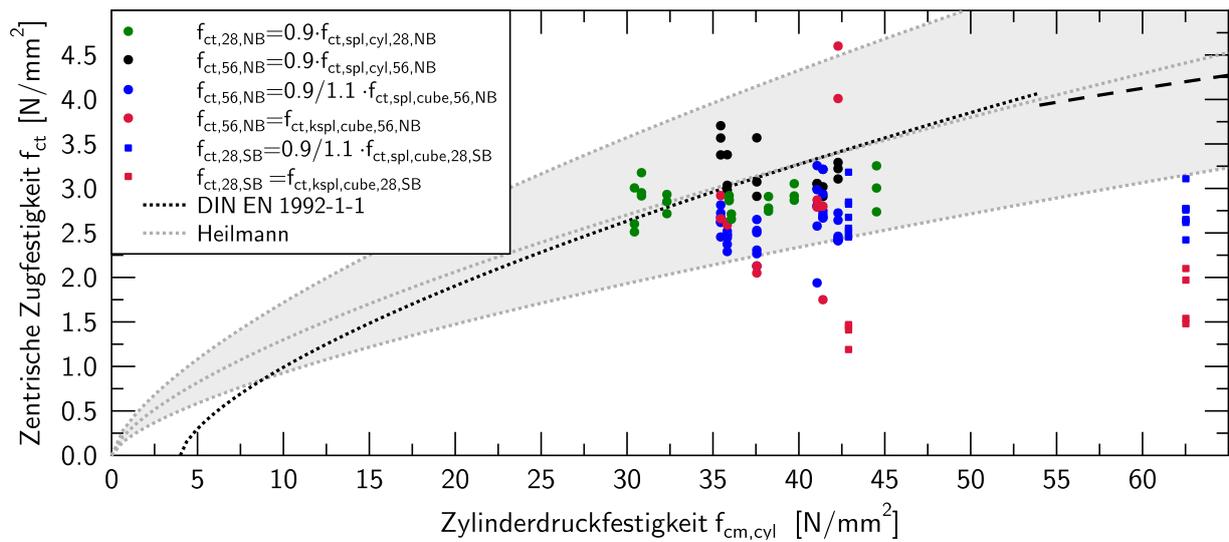


Bild 6.1: Korrelation für Umrechnung von Druck in Zugfestigkeit

heitsniveaus auf der unsicheren Seite. Die Ergebnisse der in (Manns u. a. 1987) durchgeführten Druckfestigkeitsversuche an Bohrkernen zeigen keinen systematischen Einfluss der Lagerungsbedingungen. Die Ermittlung der mittleren Zugfestigkeit erfolgt, unabhängig ob Normalbeton oder Spritzbeton maßgebend wird, mit den Umrechnungsformeln nach (DIN EN 1992-1-1 2011)

$$f_{ctm} = \begin{cases} 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} & \text{für } f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2 \\ 2,12 \cdot \ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{10}\right) & \text{für } f_{ck} \geq 55 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \quad (6.3)$$

Bei der Auswertung der durchgeführten Festigkeitsversuche zeigt Bild 6.1 ein unterproportionales Verhalten der Korrelation von Druckfestigkeit zu Zugfestigkeit für Spritzbeton im Vergleich zu den Umrechnungsformeln 6.3. Auch bei Betrachtung der Streubreite die (Heilmann 1969) anhand von im Labor hergestellten Probekörpern für die Umrechnung der Druckfestigkeit zur zentralen Zugfestigkeit ermittelt hat, liegt der höherfeste Spritzbeton ausserhalb der Streubreite. Die untere Grenze stellt nach (Heilmann 1969) in etwa das 5%-Quantil dar. Die experimentell ermittelten Zylinderspaltzugfestigkeiten in Bild 6.1 sind mit der Näherungsformel nach (DIN EN 1992-1-1 2011)

$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct,spl,cyl} \quad (6.4)$$

in mittlere zentrische Zugfestigkeiten umgerechnet. Die von (Heilmann 1969) angegebenen Umrechnungsformeln gelten für unter Laborbedingungen hergestellte Druckfestigkeitswürfel mit einer Kantenlänge von 200 mm und bis zu einer Zylinderdruckfestigkeit von $f_{c,cyl} \leq 55 \text{ N/mm}^2$. Eine Erweiterung für auf Baustellen erreichbare charakteristische Festigkeiten ist in (Rüsch 1975)

hergeleitet.

Die für die Umrechnung auf SI-Einheiten sowie auf Zylinderdruckfestigkeiten nötigen Umrechnungsformeln für die Korrelationsbeiwerte sind in Anhang A.5 zusammengefasst. Der Sprung in der Kurve nach (DIN EN 1992-1-1 2011) (schwarze gepunktete Linie zu schwarz strichliert) erfolgt durch das verminderte Vorhaltemaß von $\Delta f_c = 4 \text{ N/mm}^2$. Eine Gegenüberstellung von experimenteller Spaltzugfestigkeit, die ebenfalls in (Heilmann 1969) ausgewertet wurde, zu Druckfestigkeit verdeutlicht das unterproportionale Verhalten der Zugfestigkeit zur Druckfestigkeit bei Spritzbeton (s. Bild 6.2).

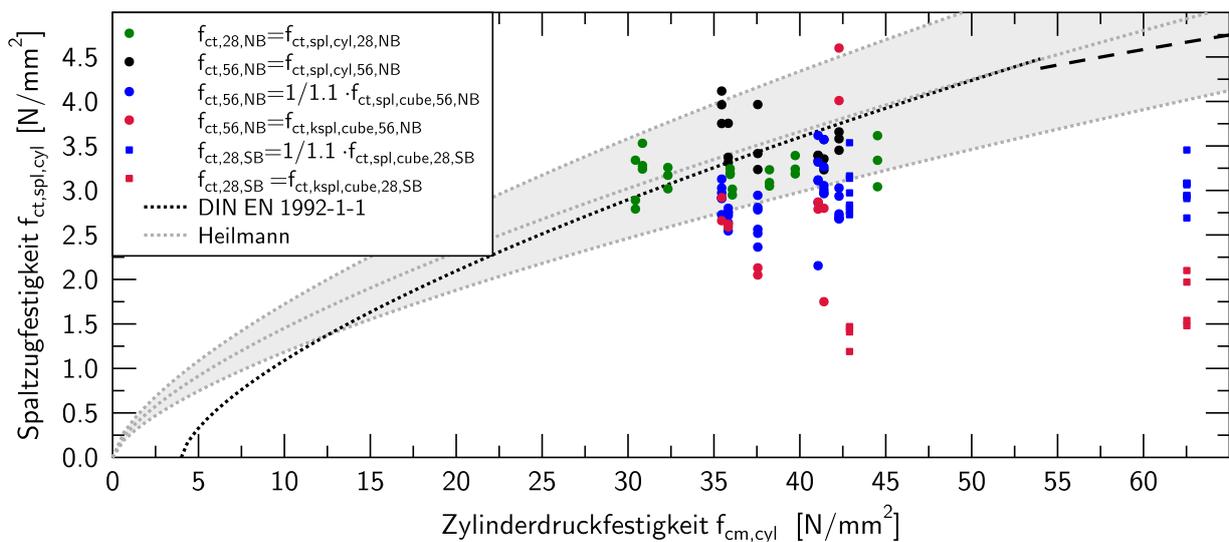


Bild 6.2: Korrelation für Umrechnung von Druck in Zugfestigkeit

Für den folgenden Vergleich von experimentellen Verbundfestigkeiten mit den Bemessungswerten wird in Ermangelung geeigneter Umrechnungsformeln für Spritzbeton zur Bestimmung der Zugfestigkeit aus der Druckfestigkeit auf Gleichung 6.3 der (DIN EN 1992-1-1 2011) zurückgegriffen. Die Berechnung des Bemessungswertes der mittleren zentrischen Zugfestigkeit erfolgt wegen des Vergleichs mit den Versuchsergebnissen mit $\alpha_{ct} = 1,0$

$$f_{ctd} = 1,0 \cdot \frac{f_{ctk,0.05}}{\gamma_c} \quad (6.5)$$

unter Annahme von

$$f_{ctk,0.05} = 0,7 \cdot f_{ctm} \quad (6.6)$$

Der Rauheitsbeiwert c_i wird auf der sicheren Seite liegend gemäß dem in Bild 2.1 dargestellten Kurvenverlauf des Rauheitsbeiwertes gleichmäßig linear interpoliert (punktierter Linie). Da bei Verbundplatten mit vorgewässerten und lufttrockenen Auftragsflächen für die vorhandenen Rau-

heiten keine systematischen Unterschiede in der Verbundfestigkeit festgestellt werden können, werden beide Oberflächenvorbereitungsverfahren in den Vergleich miteinbezogen. Bei über Kopf gespritzten Versuchskörpern wird, trotz Zugspannungen quer zur Fuge, die unverminderte Adhäsionstragfähigkeit angesetzt. Auch zwischen den Versuchsserien mit unterschiedlichen Betonalter konnte keine signifikante Veränderung der Tragfähigkeit festgestellt werden, sodass deshalb auch diese zur Auswertung herangezogen werden. Somit werden lediglich die Versuchsserien VP-10 und VP-12 (herkömmliche Betonage) und VP-19 (partiell zu viel Beschleuniger) aus der Auswertung ausgeschlossen. Zur Beurteilung wird für jeden Versuch das Verhältnis zwischen der experimentell ermittelten Verbundfestigkeit v_{exp} und dem Bemessungswert der aufnehmbaren Schubspannung berechnet. Die experimentelle Verbundspaltzugfestigkeit am Würfel wird dabei mit den Beziehungen nach (DIN EN 12390-6 2010)

$$f_{ct,spl,cyl} = \frac{1}{1,10} \cdot f_{ct,spl,cube} \quad (6.7)$$

und Gleichung 6.4 nach (DIN EN 1992-1-1 2011) in die zentrische Zugfestigkeit umgerechnet. Für den in Bild 6.3 dargestellten Vergleich sind die Bemessungswerte mit dem Materialsicherheitsbeiwert $\gamma_c = 1,5$ auf der Widerstandsseite multipliziert und deshalb mit v_{Ri} bezeichnet. Ein Vergleich der

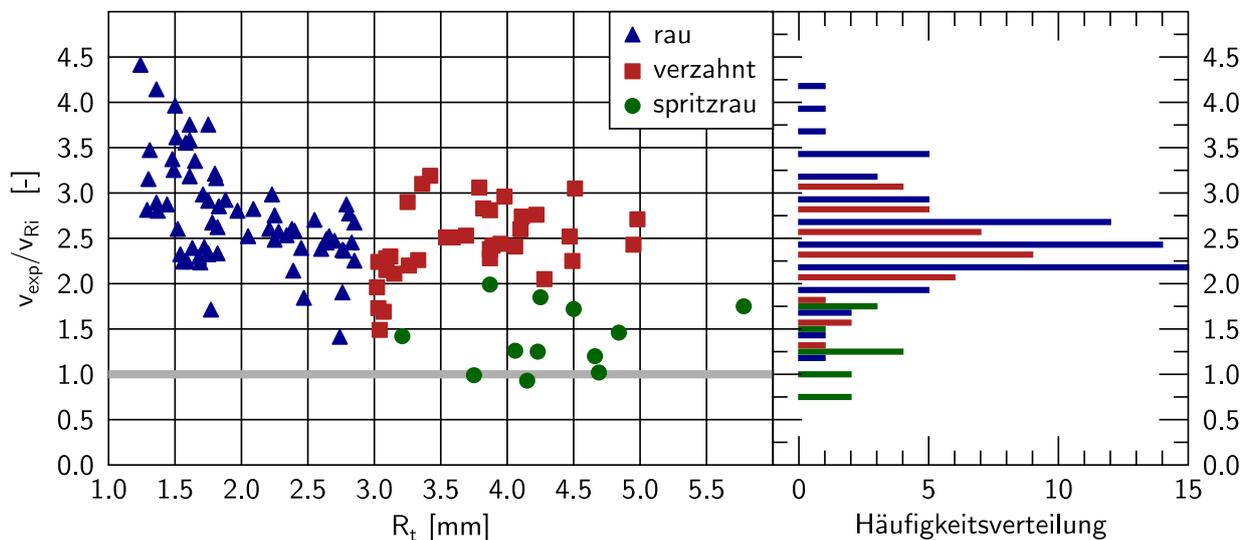


Bild 6.3: Vergleich von experimentellen Festigkeiten mit den um γ_c bereinigten Bemessungswerten

Verhältniszahlen sämtlicher experimentell ermittelter Verbundbruchspannungen der mit Spritzbeton ergänzten Spaltzugwürfel mit den um γ_c bereinigten Bemessungswerten zeigt, wie in Bild 6.3 dargestellt, dass die Bemessungswerte der Rauheitskategorien *rau* und *verzahnt* zwar durch keinen Einzelwert der durchgeführten Spaltzugversuche unterschritten wird, jedoch aufgrund der großen Streuung der Versuchsergebnisse eine statistische Auswertung nötig ist.

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

Rauheitskategorie	Anzahl der Versuche	c_i	$c_{i,0.05}^*$
rau	67	0,40	0,84
verzahnt	35	0,50	0,87
spritzrau	12	0,50	0,40

Diese erfolgt für die einzelnen Oberflächenkategorien nach (DIN EN 1992-1-1 2011) *rau* und *verzahnt* sowie für *spritzraue* Oberflächen getrennt. Dabei werden unter Verwendung des bestehenden Bemessungsmodells (Gleichung 2.1) auf Mittelwertniveau theoretisch mögliche Rauheitsbeiwerte

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

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 Rauheitsbeiwertes berechnet und anschließend durch

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

berücksichtigt, dass in Gleichung 2.1 nicht mit den Mittelwerten sondern mit charakteristischen Werten gerechnet wird. Die so unter Verwendung eines Materialteilsicherheitsbeiwertes von $\gamma_c = 1,5$ durch die statistische Auswertung der experimentellen Verbundfestigkeitsprüfungen erhaltenen, 5 %-Quantil-Werte des Rauheitsbeiwertes $c_{i,0.05}^*$ für Spritzbetoneergänzungen sind in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Für die Bemessung von Spritzbetoneergänzungen an Bauteilen mit Normalbeton, dessen Oberfläche in die beiden Rauheitskategorien *rau* und *verzahnt* eingeordnet werden kann, besteht auf Basis der durchgeführten Versuche kein Handlungsbedarf. Die möglichen Rauheitsbeiwerte liegen für beide Rauheitskategorien über den in (DIN EN 1992-1-1 2011) empfohlenen Werten. Bei statistischer Auswertung der Versuche durch das in (DIN EN 1990 2010) Anhang D beschriebene Verfahren ergeben sich für die Rauheitskategorien *rau* und *verzahnt*, bei einem Bezugszeitraum von 50 Jahren und Zugrundelegung eines Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 3,8$ unter Verwendung von $\alpha_R = 0,8$ als Wichtungsfaktor für die Widerstandsfunktion, geringfügig kleinere mögliche Rauheitsbeiwerte von $c_{i,0.05}^*$ als in Tabelle 6.1 angegeben. Der geforderte Sicherheitsabstand ist jedoch bei Verwendung der in (DIN EN 1992-1-1 2011) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) empfohlenen Rauheitsbeiwerte c_i für die Rauheitskategorien *rau* und *verzahnt* trotzdem eingehalten.

Die statistische Auswertung der zusätzlich durchgeführten Tastversuche von Spritzbetonergänzungen auf *spritzraue* Oberflächen zeigen nach (DIN EN 1990 2010) sowie nach (DIBt 1986) unmittelbaren Handlungsbedarf. Auf Basis der durchgeführten Verbundfestigkeitsversuche an spritzrauen Oberflächen, die gemäß ihrer mittleren Rautiefe nach Kaufmann in die Kategorie verzahnt eingeordnet werden könnten, ergibt sich bei statistischer Auswertung nach (DIBt 1986) ein theoretisch möglicher Rauheitsbeiwert von $c_{i,0.05}^* = 0,40$. Der nach (DIN EN 1992-1-1 2011) ansetzbare Bemessungswert der Schubtragfähigkeit ist somit um 25 % größer als der experimentell ermittelte 5 %-Quantilwert der Schubtragfähigkeit.

7 Zusammenfassung

Der Nachweis der Schubkraftübertragung von Bauteilen, die mit Spritzbeton verstärkt werden, erfolgt momentan wegen des unmittelbaren Verweises von (DIN 18551 2014) auf (DIN EN 1992-1-1 2011) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) auf Grundlage von Bemessungsansätzen die an Versuchskörpern mit Ortbetoneergänzung ermittelt wurden. Aus diesem Anlass wurden punktuelle Versuche zur Ermittlung der Adhäsionsfestigkeit von Spritzbetoneergänzungen durchgeführt um den Nachweis der Schubkraftübertragung auch für Spritzbetoneergänzungen mit der erforderlichen Sicherheit führen zu können. Die Bewertung der Schubfestigkeit der Verbundfuge erfolgte durch kleinformative Spaltzugversuche und Keilspaltzugversuche. Dabei wurde der Einfluss der Oberflächenvorbehandlung, der unterschiedlichen Aufrauverfahren und Lage der Auftragsfläche sowie die Art der Applikation des Ergänzungsbetons bei verschiedenen Rautiefen unter Verwendung von zwei verschiedenen, praxisüblichen Spritzbetonmischungen untersucht.

Für die durchgeführten Kleinkörperversuche ließ sich bei den vorhandenen Rautiefen der Kategorien *rau*, *verzahnt* sowie *spritzrau* kein tragfähigkeitssteigernder Einfluss bei ausreichendem Vornässen der Auftragsfläche feststellen, da die Verbundtragfähigkeit bei sämtlichen Versuchen die monolithische Festigkeit erreichte. Bei Betrachtung unterschiedlicher Aufrauverfahren zeigten vereinzelte Versuchskörper dessen Grundbetonoberfläche stark durch Strahlen mit festen Strahlmitteln aufgeraute wurden einen erhöhten Porenhorizont entlang der Verbundfuge. Dieser ging mit einer verringerten Verbundfestigkeit gegenüber Verbundkörpern mit Höchstdruckwasserstrahl behandelte Oberfläche einher. Eine systematische Verringerung der Verbundtragfähigkeit durch Aufrauen der Oberfläche mittels Strahlen mit festen Strahlmitteln gegenüber Höchstdruckwasserstrahl konnte nicht gefunden werden. Bei Verbundkörpern mit spritzrauer Auftragsoberfläche wurden, bedingt durch die großen Hinterschnitte in der Auftragsfläche die von dem nachträglich aufgetragenen Spritzbeton nicht vollständig ausgefüllt werden konnten, beträchtlich geringere Verbundfestigkeiten erreicht als bei nachträglich aufgerauten Auftragsflächen. Ob dies auch bei höheren Spritzleistungen als $8,6 \text{ m}^3/\text{h}$ der Fall ist, konnte im Rahmen dieser Arbeit wegen der begrenzten Versuchsanzahl nicht geklärt werden. Durch den direkten Vergleich der Verbundfestigkeiten von Verbundkörpern deren Ergänzungsbeton in herkömmlicher Betonage (drucklos) aufgebracht wurde mit der Fugentragfähigkeit von Verbundkörpern dessen Ergänzungsschicht pneumatisch aufgetragen wurde, konnte der festigkeitssteigernde Einfluss des energiereichen Auftrags eindeutig bestätigt werden. Die Lage der Auftragsflächen (vertikal, über Kopf) zeigte ebenso wie die unterschiedlichen Spritzbetonmischungen bzw. die Art des Spritzverfahrens bei den vorhandenen Rautiefen keinen erkennbaren Einfluss auf die Verbundfestigkeit. Bei Bewertung der absoluten Festigkeitskennwerte die im Rahmen dieses Versuchsprogramms experimentell ermittelt wurden wird eindrücklich 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 Zwangsspannungen wie sie z.B. durch differentielles Schwinden bei Großkörperversuchen entstehen, nicht berücksichtigt sind.

Die experimentelle Untersuchungen der freien Schwindverformungen im jungen Betonalter zeigen im Vergleich zu Normalbeton nahezu doppelt so große freie Schwindverformungen. 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 brachte zum Vorschein, dass mit den Bemessungsansätzen nach (DIN EN 1992-1-1 2011) in Verbindung mit (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) für Bauteile aus Normalbeton die nachträglich mit Spritzbeton ergänzt werden unter sorgfältiger Einhaltung der nach (DIN 18551 2014) geforderten Oberflächenvorbehandlung ein ausreichendes Sicherheitsniveau für Fugen der Rauheitskategorie *rau* und *verzahnt* erreicht wird. Spritzbetoneränzungen auf *spritzrauen* Oberflächen unterschritten das erforderliche Sicherheitsniveau. Eine Erhöhung der Verbundfugentragfähigkeit bei Ergänzung von Auftragsflächen der Rauheitskategorie *rau* und *verzahnt* wird ohne zusätzliche Großkörperversuche sowie notwendiger Untersuchungen zu den entstehenden Zwangsspannungen nicht empfohlen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden dass die Empfehlungen in (DIN 18551 2014) ergänzt werden sollten. Unter Berücksichtigung praxisüblicher Schichtdicken bei der Verstärkung von Bauteilen aus Normalbeton wird demzufolge folgende Änderung vorgeschlagen:

DIN 18551:2014-08

5.3.2 Nachweis des Verbundes

Die entsprechenden Nachweise sind nach DIN EN 1992-1-1:2011-01, 6.2.5 unter Berücksichtigung von DIN EN 1992-1-1 /NA zu führen. **Der Einfluss des Eigengewichts der Spritzbetonverstärkung auf die Spannungen in der Fuge kann bei Schichtdicken kleiner 90 mm vernachlässigt werden.** Die Breite der Kontaktfläche b ist bei der Verstärkung von Balken nach Bild 1 zu ermitteln.

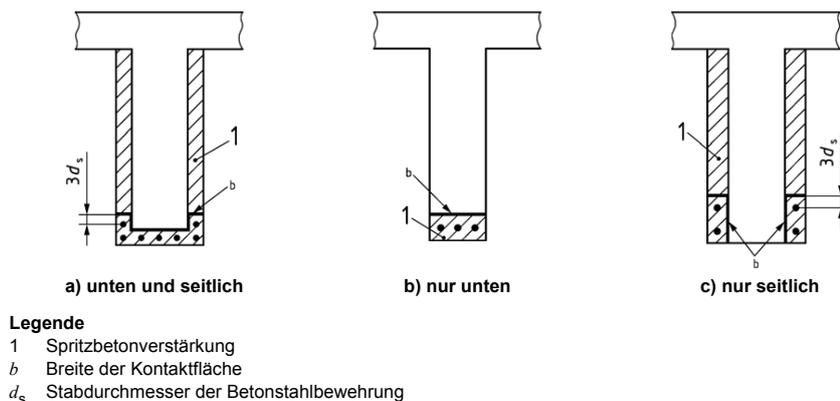


Bild 1 — Breite der Kontaktfläche b bei der Verstärkung von Balken

Bezeichnungen

Vorbemerkung

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

Große lateinische Buchstaben

A	Fläche
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft
G	Energie
P	Konfidenzniveau
R	Rautiefe
V	Volumen

Kleine lateinische Buchstaben

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

Abkürzungen

EB	Ergänzungsbeton
FCM	Fictitious Crack Model
GB	Grundbeton
HDW	Höchstdruckwasserstrahlen
ITZ	Interfacial Transition Zone
NB	Normalbeton
SB	Spritzbeton
SmS	Strahlen mit festen Strahlmitteln
SP	Schwindplatte
VP	Verbundplatte
WA	Dehungsaufnehmer

Griechische Buchstaben

α	Formparameter, Festigkeitsbeiwert
γ	Teilsicherheitsbeiwert
ϵ	Dehnung

σ Normalspannung, Standardabweichung

Δ Differenz

Fußzeiger

* möglicher Wert

Fußzeiger

b Verbund

c Beton, Druck

d Bemessungswert

g Größtkorn

i Interface

k charakteristischer Wert

m Mittelwert

s Schwinden

t Zugfestigkeit

u Bruchzustand

cod crack opening displacement

$cube$ Würfel

cyl Zylinder

exp experimentell ermittelte Größe

max maximaler Wert

min minimaler Wert

E Beanspruchung

F Bruch

H Horizontal

R Widerstand

V Vertikal

EB Ergänzungsbeton

GB Grundbeton

NB Normalbeton

SB Spritzbeton

0 Ausgangszustand

28 nach 28 Tagen

56 nach 56 Tagen

0.05 5%-Quantil

0.95 95%-Quantil

Große lateinische Buchstaben mit Indizes

E_c E-Modul Beton (Sekante)

F_H Horizontalkraft

F_V Vertikalkraft

G_F Bruchenergie

R_{cp} Profilkuppenhöhe

R_t mittlere Rautiefe nach Kaufmann

Kleine lateinische Buchstaben mit Indizes

d_g Größtkorndurchmesser

f_c Betondruckfestigkeit (Zylinder)

f_{ct} Betonzugfestigkeit (zentrisch)

$f_{ct,spl}$ Spaltzugfestigkeit

$f_{ct,kspl}$ Keilspaltzugfestigkeit

t_0 time zero

v_{exp} experimentelle Schubtragfähigkeit

v_{Rdi}	Bemessungswert der Schubtragfähigkeit
v_{Ri}	Bemessungswert der Schubtragfähigkeit ohne Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes für Beton

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_e	Teilsicherheitsbeiwert für Beton
ϵ_{cs}	Schwinddehnung von Beton
$\dot{\epsilon}_{cs}$	zeitliche Änderung der Schwinddehnung von Beton
σ_{ct}	fiktive Spannung im FCM
σ_1	Formbeiwert FCM

Literaturverzeichnis

Bentz

Bentz, D. P.: *Cement images and PSD database*. <http://ciks.cbt.nist.gov/bentz/phpct/database/images/>

Bunke 1991

DAfStb Heft 422: Prüfung von Beton, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048, In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Berlin : Beuth Verlag, 1991

Cornejo-Malm 1995

Cornejo-Malm, G.: Schwinden von Spritzbeton . Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. – Forschungsbericht. Zürich, Mai 1995

DB Netz AG 2011

RIL 853: Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten. Technologiemanagement Fahrwegtechnik, Konstruktiver Ingenieurbau (I.NVT 42), Februar 2011

DIBt 1986

Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffe, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, Mai 1986

DIN 1045-2 2008

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

DIN 18551 2005

Spritzbeton - Anforderungen, Herstellung, Bemessung und Konformität. Berlin: Deutsches Institut für Normung, Januar 2005

DIN 18551 2014

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

DIN EN 12390-13 2014

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

DIN EN 12390-2 2009

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

DIN EN 12390-2/NA 2012

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. Berlin: Deutsches Institut für Normung, Februar 2012

DIN EN 12390-3 2009

Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009. Berlin: Deutsches Institut für Normung, Juli 2009

DIN EN 12390-6 2010

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

DIN EN 13791 2008

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

DIN EN 14487-1 2006

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

DIN EN 14487-2 2007

Spritzbeton – Teil 2: Ausführung; Deutsche Fassung EN 14487-2:2006. Berlin: Deutsches Institut für Normung, Januar 2007

DIN EN 1990 2010

Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010. Berlin: Deutsches Institut für Normung, Dezember 2010

DIN EN 1992-1-1 2011

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. Berlin: Deutsches Institut für Normung, Januar 2011

DIN EN 1992-1-1/NA 2013

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

Feix 1993

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

fib Model Code 2010

Model Code 2010, Volume 1, bulletin 55. Lausanne: Fédération Internationale du béton, März 2010

Fingerloos u. a. 2012

Fingerloos, F. ; Hegger, J. ; Zilch, K. ; Bundesvereinigung der Prüfm Ingenieure für Bautechnik (Hrsg.) ; Deutscher Beton- und Betontechnik-Verein (Hrsg.) ; Institut für Stahlbetonbewehrung (Hrsg.) ; Verband Beratender Ingenieure (Hrsg.): *Eurocode 2 für Deutschland - Kommentierte Fassung*. Berlin : Ernst und Sohn, Beuth, 2012

FIP 1982

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

Fontana 2007

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

Hegger 2012

DAfStb Heft 600: Erläuterung zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2), In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Berlin : Beuth Verlag, 2012

Hegger u. a. 1999

Hegger, J. ; Görtz, S. ; Beutel, R. ; König, G. ; Schenck, G. ; Kliver, J. ; Dehn, F. ; Zilch, K. ; Staller, M. ; Reineck, K.-H.: Überprüfung und Vereinheitlichung der Bemessungsansätze für Querkraftbeanspruchte Stahlbeton- und Spannbetonbauteile aus normalfesten und hochfesten Beton nach DIN 1045-1 . Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Technische Universität München, Universität Leipzig, Universität Stuttgart. – Abschlußbericht. 1999

Heilmann 1969

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

ISO 1920-10 2010

Testing of concrete — Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression. Genf: International Organization for Standardization, September 2010

Koster 2007

Koster, Matthias: *Mikrostrukturbasierte Simulation des Feuchtetransports in Zement- und Sandstein*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, Mai 2007

Lenz 2012

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

Manns u. a. 1987

Manns, Wilhelm ; Neubert, Bernd ; Zimbelmann, Ruprecht: Spritzbeton im Test - Festigkeitsentwicklung und Verformungsverhalten. In: *beton* 37 (1987), August, Nr. 8, S. 317–319

Müller 2009

Müller, Andreas J.: *Zum Zug- und Schubtragverhalten von Betonfugen*. München, Technische Universität München, Dissertation, März 2009

Reineck u. a. 2012

DAfStb Heft 597: Erweiterte Datenbanken zur Überprüfung der Querkraftbemessung für Konstruktionsbauteile mit und ohne Bügel, In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Berlin : Beuth Verlag, 2012

RILEM 1994

RILEM: *Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials; AAC 13.1 Specific fracture energy and strain softening*. International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Construction, April 1994

Rüsch 1975

Rüsch, H.: Die Ableitung der charakteristischen Werte der Betonzugfestigkeit. In: *beton* (1975), Februar, Nr. 2, S. 55–58

Schaefer u. Schmidt-Kehle 1996

DAfStb Heft 456: Zum Schubtragverhalten von Fertigplatten mit Ortbetonergänzung, In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, 1996

Weiss 2003

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

Wittmann 1975

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

Zilch u. Müller 2007

Zilch, Konrad ; Müller, Andreas: Grundlagen und Anwendungsregeln der Bemessung von Fugen nach EN 1992-1-1 . Technische Universität München. – Forschungsbericht. München, April 2007

Anhang

A.1 Festbetoneigenschaften

Tabelle A.1: Einzelwerte der Normalbetoneigenschaften der Grundplatten

			Grundplatten					
			NB-1	NB-2	NB-3	NB-5 ¹	NB-6	NB-7
			Normalbeton	Normalbeton	Normalbeton	Normalbeton	Normalbeton	Normalbeton
			15.10.2013	15.10.2013	16.10.2013	28.11.2013	14.01.2013	20.05.2014
Zylinderdruckfestigkeit 28 Tage	$f_{c,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	30.69	28.61	30.68	37.12	40.12	37.98
			29.47	30.80	33.01	36.32	40.59	38.92
			27.44	30.60	33.69	35.54	38.40	38.20
			32.91	31.24	33.39	34.86	39.70	37.20
			32.41	29.34	31.72	36.46	40.00	39.27
	32.11	32.00	31.41	36.10	39.61	37.81		
	$f_{cm,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	30.84	30.43	32.32	36.07	39.73	38.23
	$\sigma_{fcm,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	1.91	1.14	1.11	0.72	0.67	0.69
Zylinderdruckfestigkeit 56 Tage	$f_{c,cyl,56}$	$[N/mm^2]$	36.11	34.73	37.00	41.41	39.68	41.13
			38.42	35.54	35.31	42.33	41.50	40.87
			36.92	34.86	36.40	43.02	41.89	41.51
			38.53	35.51	36.92	41.78	42.32	40.49
			37.17	36.22	34.52	43.10	40.16	42.12
	38.14	35.87	34.85	42.02	42.88	40.24		
	$f_{cm,cyl,56}$	$[N/mm^2]$	37.55	35.45	35.83	42.28	41.40	41.06
	$\sigma_{fcm,cyl,56}$	$[N/mm^2]$	0.88	0.52	0.99	0.62	1.14	0.63
Elastizitätsmodul 28 Tage	$E_{c,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	32213	32113	31318	31713	31765	31748
			30756	32321	32180	31158	31639	32452
			31177	30725	31862	31949	31091	30218
	$E_{cm,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	31382	31720	31787	31607	31498	31473
	$\sigma_{Ecm,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	612	708	356	332	293	933
Elastizitätsmodul 56 Tage	$E_{c,cyl,56}$	$[N/mm^2]$	34085	32486	35103	33627	33917	33648
			33834	34408	32586	34086	34778	32898
			34631	32325	34132	33548	34237	33136
	$E_{cm,cyl,56}$	$[N/mm^2]$	34183	33073	33940	33754	34311	33227
	$\sigma_{Ecm,cyl,56}$	$[N/mm^2]$	333	946	1036	237	355	313
Zylinderspaltzugfestigkeit 28 Tage	$f_{ct,sp,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	3.24	2.79	3.17	2.95	3.24	3.23
			3.28	3.34	3.26	3.01	3.19	3.09
			3.53	2.89	3.02	-	3.39	3.05
	$f_{ctm,sp,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	3.35	3.01	3.15	2.98	3.27	3.12
	$\sigma_{fctm,sp,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	0.13	0.24	0.10	0.03	0.09	0.08
Zylinderspaltzugfestigkeit 56 Tage	$f_{ct,sp,cyl,56}$	$[N/mm^2]$	3.24	4.12	3.75	3.58	3.35	3.33
			3.97	3.96	3.31	3.45	3.57	3.40
			3.41	3.75	3.37	3.66	3.23	3.39
	$f_{ctm,sp,cyl,56}$	$[N/mm^2]$	3.54	3.94	3.48	3.56	3.39	3.37
	$\sigma_{fctm,sp,cyl,56}$	$[N/mm^2]$	0.31	0.15	0.20	0.09	0.14	0.03
Würfelspaltzugfestigkeit 56 Tage	$f_{ct,sp,cube,56}$	$[N/mm^2]$	3.06	3.44	3.04	2.95	3.93	3.65
			3.09	3.20	2.80	2.98	3.59	3.42
			2.77	3.33	3.08	2.95	3.36	2.37
			3.24	3.00	2.90	3.01	3.31	3.15
			2.60	3.21	2.99	3.33	3.27	3.43
	2.82	3.27	3.02	3.23	3.26	3.98		
	$f_{ctm,sp,cube,56}$	$[N/mm^2]$	2.93	3.24	2.97	3.07	3.45	3.33
	$\sigma_{fctm,sp,cube,56}$	$[N/mm^2]$	0.22	0.13	0.09	0.15	0.24	0.50
Keilspaltzugfestigkeit 56 Tage	$f_{ct,ksp,cube,56}$	$[N/mm^2]$	2.05	2.66	2.62	4.01	1.75	2.79
			2.13	2.92	2.59	4.60	2.80	2.87
			2.09	2.79	2.61	4.31	2.28	2.83
	$\sigma_{fctm,ksp,cube,56}$	$[N/mm^2]$	0.04	0.13	0.02	0.30	0.53	0.04
Bruchenergie	$G_{F,56}$	$[Nmm/mm^2]$	0.1493	0.0770	0.1010	0.0764	0.0797	0.1103
			0.0917	0.1084	0.0840	0.0690	0.0658	0.0875
			0.1205	0.0927	0.0925	0.0727	0.0727	0.0989
	$G_{FM,56}$	$[Nmm/mm^2]$	0.0288	0.0157	0.0085	0.0037	0.0070	0.0114

¹ Festigkeitsprüfungen abweichend erst nach 105 Tagen anstelle 56 Tagen

Tabelle A.2: Einzelwerte der Normalbetoneigenschaften der Ergänzungsplatten

			Ergänzungsplatten				Grundplatten	
			M-1		M-3		M-2	
			Trockenspritzbeton		Nassspritzbeton		Nassspritzbeton	
			12.11.2013		11.02.2014		14.01.2014	
Zylinderdruckfestigkeit 28 Tage	$f_{c,cyl,28}$	[N/mm ²]	68.22	66.55	45.06	44.36	33.49	-
			64.29	62.68	43.65	44.10	32.63	-
			66.37	61.29	45.62	43.48	37.08	-
	$f_{cm,cyl,28}$	[N/mm ²]	66.29	61.68	-	42.61	36.22	-
			67.60	63.88	-	44.76	37.06	-
			64.81	61.04	-	43.46	35.61	-
$\sigma_{fcm,cyl,28}$	[N/mm ²]	66.26	62.85	44.78	43.80	35.35	-	
		64.56		44.29		35.35		
		1.39	1.91	0.83	0.70	1.71	-	
		1.65		0.77		1.71		
Elastizitätsmodul 28 Tage	$E_{c,cyl,28}$	[N/mm ²]	30670	28650	-	23303	22068	-
			30816	28178	-	22848	22153	-
	$E_{cm,cyl,28}$	[N/mm ²]	30218	28258	-	23148	21869	-
			30568	28362	-	23100	22030	-
		29465		23100		22030		
		255	206	-	189	119	-	
		230		189		119		
Würfelspaltzug- festigkeit 28 Tage	$f_{ct,spl,cube,28}$	[N/mm ²]	3.23	3.24	3.04	3.12	-	-
			2.96	3.37	3.89	3.09	-	-
			3.20	3.39	3.48	3.00	-	-
	$f_{ctm,spl,cube,28}$	[N/mm ²]	3.80	3.39	3.27	3.45	-	-
			3.30	3.35	3.42	3.17	-	-
			3.32		3.29		-	-
$\sigma_{fctm,spl,cube,28}$	[N/mm ²]	0.31	0.06	0.32	0.17	-	-	
		0.19		0.24		-		
Würfelspaltzug- festigkeit 56 Tage	$f_{ct,spl,cube,56}$	[N/mm ²]	-	-	-	-	3.76	3.78
			-	-	-	-	3.25	3.95
			-	-	-	-	3.50	3.43
	$f_{ctm,spl,cube,56}$	[N/mm ²]	-	-	-	-	3.37	3.62
			-	-	-	-	3.47	3.70
			-	-	-	-	0.19	0.19
$\sigma_{fctm,spl,cube,56}$	[N/mm ²]	-	-	-	-	0.19	0.19	
		-	-	-	-	0.19	0.19	
Keilspaltzug- festigkeit 28 Tage	$f_{ct,kspl,cube,28}$	[N/mm ²]	1.97	2.10	1.19	1.47	-	-
			1.54	1.48	1.45	1.41	-	-
	$f_{ctm,kspl,cube,28}$	[N/mm ²]	1.76	1.79	1.32	1.44	-	-
			1.77		1.38		-	-
$\sigma_{fctm,kspl,cube,28}$	[N/mm ²]	0.22	0.31	0.13	0.03	-	-	
		0.26		0.08		-		
Bruchenergie	$G_{F,28}$	[Nmm/mm ²]	0.0952	0.1070	0.1403	0.0835	-	-
			0.0742	0.0765	0.0744	0.0876	-	-
	$G_{Fm,28}$	[Nmm/mm ²]	0.0847	0.0917	0.1073	0.0856	-	-
			0.0882		0.0965		-	-
$\sigma_{GFm,28}$	[Nmm/mm ²]	0.0105	0.0153	0.0329	0.0020	-	-	
		0.0129		0.0175		-		
Keilspaltzug- festigkeit 56 Tage	$f_{ct,kspl,cube,56}$	[N/mm ²]	-	-	-	-	2.00	1.58
			-	-	-	-	1.60	1.58
	$f_{ctm,kspl,cube,56}$	[N/mm ²]	-	-	-	-	1.80	1.58
			-	-	-	-	1.69	
$\sigma_{fctm,kspl,cube,56}$	[N/mm ²]	-	-	-	-	0.20	0.00	
		-	-	-	-	0.10		
Bruchenergie	$G_{F,56}$	[Nmm/mm ²]	-	-	-	-	0.0693	0.0738
			-	-	-	-	0.0562	0.0838
	$G_{Fm,56}$	[Nmm/mm ²]	-	-	-	-	0.0628	0.0788
			-	-	-	-	0.0708	
$\sigma_{GFm,56}$	[Nmm/mm ²]	-	-	-	-	0.0065	0.0050	
		-	-	-	-	0.0058		

Tabelle A.3: Einzelwerte der Spritzbetoneigenschaften

			Ergänzungsplatten	
			SB-4	NB-8
			Spritzbeton	Normalbeton
			12.11.2013	17.06.2014
Zylinderdruckfestigkeit 28 Tage	$f_{c,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	44.97	36.92
			42.44	36.38
			46.36	35.31
			46.77	35.28
			42.54	35.72
	$f_{cm,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	44.52	35.94
$\sigma_{fcm,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	1.69	0.58	
Zylinderdruckfestigkeit 56 Tage	$f_{c,cyl,56}$	$[N/mm^2]$	-	-
			-	-
	$f_{cm,cyl,56}$	$[N/mm^2]$	-	-
			$\sigma_{fcm,cyl,256}$	$[N/mm^2]$
Elastizitätsmodul 28 Tage	$E_{c,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	29464	32242
			30631	32831
			30804	32151
			30300	32408
$E_{cm,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	595	301	
		-	-	
		-	-	
Elastizitätsmodul 56 Tage	$E_{c,cyl,56}$	$[N/mm^2]$	-	-
			-	-
			-	-
Zylinderspaltzug- festigkeit 28 Tage	$f_{ct,spl,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	3.34	3.18
			3.04	3.24
			3.62	3.20
			3.33	3.21
$f_{ctm,spl,cyl,28}$	$[N/mm^2]$	0.23	0.03	
		-	-	
		-	-	
Zylinderspaltzug- festigkeit 56 Tage	$f_{ct,spl,cyl,56}$	$[N/mm^2]$	-	-
			-	-
			-	-
$f_{ctm,spl,cyl,56}$	$[N/mm^2]$	-	-	
		-	-	
		-	-	
Würfelspaltzugfestigkeit 28 Tage	$f_{ct,spl,cube,28}$	$[N/mm^2]$	3.00	3.04
			2.72	3.14
			3.08	3.04
			2.57	2.89
			2.49	2.96
			2.62	2.96
$f_{ctm,spl,cube,28}$	$[N/mm^2]$	2.75	3.00	
$\sigma_{fctm,spl,cube,28}$	$[N/mm^2]$	0.22	0.08	
Keilspaltzug- festigkeit 28 Tage	$f_{ct,kspl,cube,28}$	$[N/mm^2]$	1.81	2.13
			1.85	2.16
			1.83	2.15
$f_{ctm,kspl,cube,28}$	$[N/mm^2]$	0.02	0.02	
		$\sigma_{fctm,kspl,cube,528}$	$[N/mm^2]$	0.02
Bruchenergie	$G_{F,28}$	$[Nmm/mm^2]$	0.0952	0.1148
			0.0872	0.1910
			0.0912	0.1529
$G_{Fm,28}$	$[Nmm/mm^2]$	0.0912	0.1529	
		$\sigma_{GfM,28}$	$[Nmm/mm^2]$	0.0040

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.

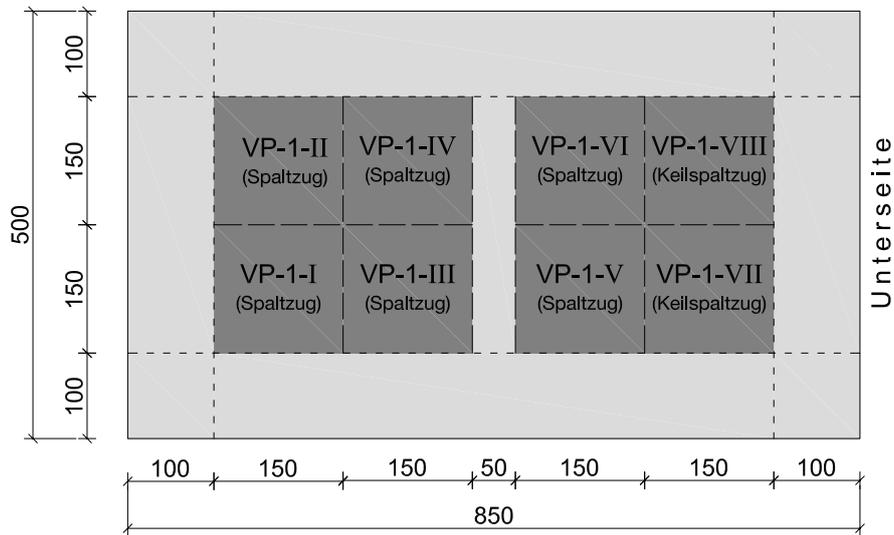


Bild A.1: Bezeichnung der Versuchskörper

Tabelle A.4: 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	54.00	12.33	12.79	13.10	12.74	4.24	4.28
	b	54.00	12.66	12.47	12.76	12.63	4.31	
	c	54.00	12.21	12.67	13.09	12.66	4.29	
VP-1-II	a	54.00	12.38	11.93	12.32	12.21	4.61	4.95
	b	54.00	11.55	12.16	11.89	11.87	4.88	
	c	54.00	11.81	10.94	11.25	11.33	5.35	
VP-1-III	a	54.00	12.26	13.20	12.42	12.63	4.31	4.10
	b	54.00	13.27	13.62	13.13	13.34	3.86	
	c	54.00	12.82	13.01	12.94	12.92	4.12	
VP-1-IV	a	54.00	11.14	11.75	12.28	11.72	5.00	4.98
	b	54.00	12.58	11.54	10.92	11.68	5.04	
	c	54.00	12.50	11.94	11.12	11.85	4.89	
VP-1-V	a	54.00	12.87	13.07	13.29	13.08	4.02	3.98
	b	54.00	14.63	13.00	12.89	13.51	3.77	
	c	54.00	13.22	13.02	12.40	12.88	4.14	
VP-1-VI	a	54.00	14.18	12.41	13.10	13.23	3.93	3.89
	b	54.00	13.72	12.50	13.48	13.23	3.93	
	c	54.00	13.49	13.44	13.34	13.42	3.82	
VP-1-VII	a	54.00	15.01	13.63	13.40	14.01	3.50	3.53
	b	54.00	13.89	14.04	14.19	14.04	3.49	
	c	54.00	13.06	13.92	14.45	13.81	3.61	
VP-1-VIII	a	54.00	12.89	13.86	13.86	13.54	3.75	3.74
	b	54.00	13.80	12.99	13.93	13.57	3.73	
	c	54.00	13.14	13.67	13.91	13.57	3.73	

Tabelle A.5: 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	15.86	15.31	15.08	15.42	2.89	
	b	54.00	17.00	14.94	16.06	16.00	2.69	2.74
	c	54.00	17.26	14.95	16.21	16.14	2.64	
VP-2-II	a	54.00	15.69	16.37	15.00	15.69	2.79	
	b	54.00	15.80	17.31	15.11	16.07	2.66	2.76
	c	54.00	14.95	16.12	15.70	15.59	2.83	
VP-2-III	a	54.00	15.14	14.38	15.06	14.86	3.11	
	b	54.00	15.41	15.75	13.90	15.02	3.05	3.04
	c	54.00	15.70	14.84	15.28	15.27	2.95	
VP-2-IV	a	54.00	15.25	15.67	14.56	15.16	2.99	
	b	54.00	14.94	14.81	15.08	14.94	3.08	3.03
	c	54.00	14.86	15.86	14.46	15.06	3.03	
VP-2-V	a	54.00	14.48	15.28	14.78	14.85	3.12	
	b	54.00	14.53	14.68	15.00	14.74	3.17	3.15
	c	54.00	14.76	14.79	14.63	14.73	3.17	
VP-2-VI	a	54.00	14.75	16.14	15.01	15.30	2.94	
	b	54.00	14.56	15.46	14.71	14.91	3.09	3.07
	c	54.00	14.88	14.52	14.73	14.71	3.18	
VP-2-VII	a	54.00	14.99	13.94	14.19	14.37	3.33	
	b	54.00	15.10	13.78	14.44	14.44	3.30	3.29
	c	54.00	15.13	13.98	14.59	14.57	3.24	
VP-2-VIII	a	54.00	16.59	16.10	15.03	15.91	2.72	
	b	54.00	16.98	15.37	15.33	15.89	2.72	2.65
	c	54.00	17.52	16.34	15.78	16.55	2.51	

Tabelle A.6: 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	13.76	14.47	14.38	14.20	1.70	1.83
	b	27.00	13.17	13.39	13.13	13.23	1.96	
	c	27.00	13.36	13.86	14.03	13.75	1.82	
VP-3-II	a	27.00	12.27	12.31	12.29	12.29	2.28	1.75
	b	27.00	14.83	14.86	15.76	15.15	1.50	
	c	27.00	15.05	15.38	15.22	15.22	1.48	
VP-3-III	a	27.00	13.30	11.55	13.39	12.75	2.12	2.09
	b	27.00	12.60	13.55	13.17	13.11	2.00	
	c	27.00	11.60	13.41	12.88	12.63	2.16	
VP-3-IV	a	27.00	13.08	13.39	13.58	13.35	1.93	1.97
	b	27.00	12.06	12.85	13.91	12.94	2.05	
	c	27.00	12.71	13.69	13.69	13.36	1.93	
VP-3-V	a	27.00	15.03	15.04	14.16	14.74	1.58	1.77
	b	27.00	13.33	12.71	13.64	13.23	1.97	
	c	27.00	15.23	13.53	13.22	13.99	1.76	
VP-3-VI	a	27.00	12.79	12.45	13.01	12.75	2.11	2.05
	b	27.00	12.23	13.47	13.36	13.02	2.03	
	c	27.00	13.73	12.78	12.67	13.06	2.02	
VP-3-VII	a	27.00	15.68	15.70	15.43	15.60	1.41	1.44
	b	27.00	15.39	14.91	16.03	15.44	1.44	
	c	27.00	15.38	15.39	15.29	15.35	1.46	
VP-3-VIII	a	27.00	14.39	15.86	15.03	15.09	1.51	1.67
	b	27.00	13.53	13.27	14.52	13.77	1.81	
	c	27.00	13.85	15.03	13.95	14.28	1.69	

Tabelle A.7: 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	14.24	15.12	14.02	14.46	3.29	3.33
	b	54.00	14.19	14.47	14.29	14.32	3.35	
	c	54.00	14.71	14.15	14.08	14.31	3.36	
VP-4-II	a	54.00	13.47	13.64	13.81	13.64	3.70	3.79
	b	54.00	13.34	13.60	13.49	13.48	3.79	
	c	54.00	13.33	13.35	13.24	13.31	3.88	
VP-4-III	a	54.00	13.17	13.18	13.38	13.24	3.92	3.87
	b	54.00	13.42	12.78	13.20	13.13	3.99	
	c	54.00	13.81	13.28	13.77	13.62	3.71	
VP-4-IV	a	54.00	14.06	14.84	14.57	14.49	3.27	3.42
	b	54.00	14.40	14.61	14.11	14.37	3.33	
	c	54.00	13.74	13.80	13.59	13.71	3.66	
VP-4-V	a	54.00	13.04	13.41	13.88	13.44	3.80	3.82
	b	54.00	13.75	14.00	13.33	13.69	3.67	
	c	54.00	13.30	12.89	13.17	13.12	3.99	
VP-4-VI	a	54.00	14.25	14.16	13.60	14.00	3.51	3.59
	b	54.00	14.25	13.24	14.10	13.86	3.58	
	c	54.00	13.67	13.90	13.45	13.67	3.68	
VP-4-VII	a	54.00	14.33	13.44	14.05	13.94	3.54	3.57
	b	54.00	14.10	13.96	14.21	14.09	3.46	
	c	54.00	14.02	13.61	13.30	13.64	3.69	
VP-4-VIII	a	54.00	14.42	14.22	14.10	14.25	3.39	3.39
	b	54.00	13.86	14.09	14.24	14.06	3.48	
	c	54.00	14.31	14.34	14.59	14.41	3.31	

Tabelle A.8: 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	27.00	16.19	15.94	15.04	15.72	1.39	1.36
	b	27.00	15.41	16.05	16.69	16.05	1.33	
	c	27.00	16.47	16.00	15.51	15.99	1.34	
VP-5-II	a	27.00	17.41	17.67	16.14	17.07	1.18	1.24
	b	27.00	15.89	16.86	16.35	16.37	1.28	
	c	27.00	16.72	17.77	15.33	16.61	1.25	
VP-5-III	a	27.00	15.46	14.26	14.96	14.89	1.55	1.58
	b	27.00	14.23	15.46	14.25	14.65	1.60	
	c	27.00	14.40	15.02	14.75	14.72	1.59	
VP-5-IV	a	27.00	15.63	14.80	14.70	15.04	1.52	1.50
	b	27.00	15.86	14.26	15.47	15.20	1.49	
	c	27.00	15.69	14.43	15.30	15.14	1.50	
VP-5-V	a	27.00	15.77	14.19	13.49	14.48	1.64	1.51
	b	27.00	15.56	16.23	15.21	15.67	1.40	
	c	27.00	14.79	15.20	15.39	15.13	1.50	
VP-5-VI	a	27.00	14.56	15.07	15.20	14.94	1.54	1.49
	b	27.00	15.09	15.29	15.54	15.31	1.47	
	c	27.00	15.14	15.08	15.60	15.27	1.47	
VP-5-VII	a	27.00	16.10	16.33	15.51	15.98	1.35	1.37
	b	27.00	16.03	16.29	15.73	16.02	1.34	
	c	27.00	15.35	15.70	15.64	15.56	1.42	
VP-5-VIII	a	27.00	15.03	15.86	15.16	15.35	1.46	1.46
	b	27.00	15.93	15.42	14.79	15.38	1.45	
	c	27.00	15.21	15.31	15.31	15.28	1.47	

Tabelle A.9: 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	12.14	12.53	12.38	12.35	4.51	
	b	54.00	11.77	12.88	12.19	12.28	4.56	4.49
	c	54.00	12.09	12.82	12.60	12.50	4.40	
VP-6-II	a	54.00	12.89	11.93	11.93	12.25	4.58	
	b	54.00	12.99	12.50	11.75	12.41	4.46	4.51
	c	54.00	12.46	12.39	12.24	12.36	4.50	
VP-6-III	a	54.00	13.64	13.06	12.68	13.13	3.99	
	b	54.00	12.78	14.08	12.86	13.24	3.92	3.87
	c	54.00	12.49	14.90	13.57	13.65	3.69	
VP-6-IV	a	54.00	13.76	13.90	13.62	13.76	3.63	
	b	54.00	13.96	13.31	13.64	13.64	3.70	3.69
	c	54.00	13.74	13.55	13.45	13.58	3.73	
VP-6-V	a	54.00	13.85	14.11	14.23	14.06	3.48	
	b	54.00	13.49	14.68	14.61	14.26	3.38	3.36
	c	54.00	14.23	14.67	14.91	14.60	3.22	
VP-6-VI	a	54.00	14.26	14.42	14.55	14.41	3.31	
	b	54.00	14.49	14.28	14.79	14.52	3.26	3.25
	c	54.00	14.26	15.63	14.14	14.68	3.19	
VP-6-VII	a	54.00	11.98	12.19	12.03	12.07	4.72	
	b	54.00	11.89	13.42	12.04	12.45	4.44	4.63
	c	54.00	11.83	12.11	12.17	12.04	4.75	
VP-6-VIII	a	54.00	12.05	11.62	11.15	11.61	5.10	
	b	54.00	11.53	11.95	11.84	11.77	4.96	4.97
	c	54.00	11.92	11.55	12.26	11.91	4.85	

Tabelle A.10: 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	27.00	10.32	10.68	10.39	10.46	3.14	3.03
	b	27.00	10.53	10.62	10.62	10.59	3.07	
	c	27.00	10.96	10.71	11.11	10.93	2.88	
VP-7-II	a	27.00	12.64	12.14	11.88	12.22	2.30	2.34
	b	27.00	12.49	12.10	12.11	12.23	2.30	
	c	27.00	11.83	12.09	11.89	11.94	2.41	
VP-7-III	a	27.00	10.25	10.42	10.42	10.36	3.20	3.26
	b	27.00	10.56	10.55	10.31	10.47	3.13	
	c	27.00	10.22	10.10	9.59	9.97	3.46	
VP-7-IV	a	27.00	12.18	12.75	12.22	12.38	2.24	2.23
	b	27.00	12.51	12.33	12.47	12.44	2.22	
	c	27.00	11.98	12.54	12.83	12.45	2.22	
VP-7-V	a	27.00	9.94	9.40	10.26	9.87	3.53	3.54
	b	27.00	10.47	10.11	10.12	10.23	3.28	
	c	27.00	9.62	9.80	9.14	9.52	3.79	
VP-7-VI	a	27.00	12.71	11.80	12.11	12.21	2.31	2.40
	b	27.00	12.37	11.69	12.08	12.05	2.37	
	c	27.00	12.21	11.81	11.04	11.69	2.52	
VP-7-VII	a	27.00	9.53	9.66	10.02	9.74	3.63	3.34
	b	27.00	10.01	10.95	10.60	10.52	3.11	
	c	27.00	10.56	10.28	9.78	10.21	3.30	
VP-7-VIII	a	27.00	12.33	13.00	13.49	12.94	2.05	2.02
	b	27.00	14.49	13.62	12.36	13.49	1.89	
	c	27.00	13.01	12.65	12.64	12.77	2.11	

Tabelle A.11: 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	12.51	13.12	13.24	12.96	4.10	3.95
	b	54.00	13.50	13.28	12.82	13.20	3.95	
	c	54.00	12.93	13.73	13.66	13.44	3.81	
VP-8-II	a	54.00	11.27	12.59	12.59	12.15	4.66	4.47
	b	54.00	12.24	13.16	12.46	12.62	4.32	
	c	54.00	12.11	12.33	12.85	12.43	4.45	
VP-8-III	a	54.00	13.22	13.11	14.02	13.45	3.80	3.87
	b	54.00	13.29	12.77	13.39	13.15	3.98	
	c	54.00	13.61	12.74	13.86	13.40	3.83	
VP-8-IV	a	54.00	12.06	13.65	12.85	12.85	4.16	4.11
	b	54.00	12.80	13.84	12.18	12.94	4.11	
	c	54.00	12.34	13.36	13.26	12.99	4.08	
VP-8-V	a	54.00	13.01	12.76	12.54	12.77	4.22	4.22
	b	54.00	12.90	12.32	12.94	12.72	4.25	
	c	54.00	13.32	12.14	12.90	12.79	4.21	
VP-8-VI	a	54.00	12.24	12.51	12.96	12.57	4.35	4.06
	b	54.00	12.78	12.99	13.86	13.21	3.94	
	c	54.00	13.38	13.20	13.28	13.29	3.89	
VP-8-VII	a	54.00	13.83	12.58	13.02	13.14	3.98	3.84
	b	54.00	14.22	12.79	13.46	13.49	3.78	
	c	54.00	13.88	13.02	13.59	13.50	3.77	
VP-8-VIII	a	54.00	13.62	14.52	14.31	14.15	3.43	3.53
	b	54.00	13.52	13.19	14.76	13.82	3.60	
	c	54.00	13.72	13.89	14.10	13.90	3.56	

Tabelle A.12: 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	27.00	15.30	14.14	13.17	14.20	1.70	
	b	27.00	13.41	13.20	13.30	13.30	1.94	1.80
	c	27.00	14.33	14.18	13.49	14.00	1.75	
VP-9-II	a	27.00	16.21	15.19	14.39	15.26	1.48	
	b	27.00	15.59	15.14	14.65	15.13	1.50	1.48
	c	27.00	14.93	15.55	15.40	15.29	1.47	
VP-9-III	a	27.00	13.77	14.85	14.00	14.21	1.70	
	b	27.00	14.23	14.57	14.64	14.48	1.64	1.69
	c	27.00	13.64	14.19	14.42	14.08	1.73	
VP-9-IV	a	27.00	15.06	15.02	14.89	14.99	1.53	
	b	27.00	15.09	14.52	15.00	14.87	1.55	1.54
	c	27.00	14.57	15.30	15.04	14.97	1.53	
VP-9-V	a	27.00	13.36	13.87	14.37	13.87	1.79	
	b	27.00	12.83	13.91	13.96	13.57	1.87	1.81
	c	27.00	14.21	13.57	13.91	13.90	1.78	
VP-9-VI	a	27.00	14.23	13.90	13.66	13.93	1.77	
	b	27.00	13.94	13.95	14.15	14.01	1.75	1.75
	c	27.00	13.54	14.52	14.10	14.05	1.74	
VP-9-VII	a	27.00	14.43	14.60	14.00	14.34	1.67	
	b	27.00	14.41	14.58	14.91	14.63	1.61	1.62
	c	27.00	14.67	14.51	15.08	14.75	1.58	
VP-9-VIII	a	27.00	16.09	15.31	15.44	15.61	1.41	
	b	27.00	16.53	15.42	14.08	15.34	1.46	1.41
	c	27.00	16.68	14.40	16.40	15.83	1.37	

Tabelle A.13: 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	27.00	16.95	16.32	15.44	16.24	1.30	
	b	27.00	16.25	16.26	16.03	16.18	1.31	1.33
	c	27.00	15.40	15.38	16.82	15.87	1.37	
VP-10-II	a	27.00	14.88	14.79	15.28	14.98	1.53	
	b	27.00	15.23	15.93	14.56	15.24	1.48	1.54
	c	27.00	14.42	14.49	15.08	14.66	1.60	
VP-10-III	a	27.00	16.00	14.83	14.74	15.19	1.49	
	b	27.00	15.27	14.25	15.14	14.89	1.55	1.57
	c	27.00	14.51	14.26	14.27	14.35	1.67	
VP-10-IV	a	27.00	14.52	14.92	13.42	14.29	1.68	
	b	27.00	14.11	14.26	14.11	14.16	1.71	1.68
	c	27.00	14.50	14.34	14.53	14.46	1.64	
VP-10-V	a	27.00	13.18	13.91	14.65	13.91	1.78	
	b	27.00	14.18	14.91	14.17	14.42	1.65	1.70
	c	27.00	14.82	14.15	14.02	14.33	1.67	
VP-10-VI	a	27.00	14.17	14.50	13.93	14.20	1.70	
	b	27.00	13.59	15.23	13.68	14.17	1.71	1.70
	c	27.00	14.09	14.45	14.16	14.23	1.70	
VP-10-VII	a	27.00	16.01	15.26	15.95	15.74	1.39	
	b	27.00	16.28	15.89	16.02	16.06	1.33	1.40
	c	27.00	15.38	15.13	15.24	15.25	1.48	
VP-10-VIII	a	27.00	13.87	14.95	14.33	14.38	1.66	
	b	27.00	15.08	14.39	14.78	14.75	1.58	1.62
	c	27.00	14.19	14.85	14.52	14.52	1.63	

Tabelle A.14: 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	27.00	13.97	14.06	13.36	13.80	1.81	
	b	27.00	13.79	14.40	13.90	14.03	1.75	1.78
	c	27.00	14.06	13.90	13.55	13.84	1.80	
VP-11-II	a	27.00	14.06	14.87	14.02	14.32	1.68	
	b	27.00	14.61	14.88	14.09	14.53	1.63	1.71
	c	27.00	13.65	13.65	13.85	13.72	1.83	
VP-11-III	a	27.00	14.23	14.56	14.41	14.40	1.66	
	b	27.00	14.58	14.33	13.84	14.25	1.69	1.68
	c	27.00	14.13	14.42	14.27	14.27	1.69	
VP-11-IV	a	27.00	14.72	13.96	14.19	14.29	1.68	
	b	27.00	14.67	14.47	14.57	14.57	1.62	1.61
	c	27.00	15.45	14.71	14.78	14.98	1.53	
VP-11-V	a	27.00	14.64	14.31	14.07	14.34	1.67	
	b	27.00	13.93	14.31	14.87	14.37	1.66	1.65
	c	27.00	14.07	14.44	15.09	14.53	1.63	
VP-11-VI	a	27.00	14.70	14.12	14.73	14.52	1.63	
	b	27.00	14.70	14.30	14.85	14.62	1.61	1.59
	c	27.00	14.91	14.91	15.22	15.01	1.53	
VP-11-VII	a	27.00	14.58	14.45	13.49	14.17	1.71	
	b	27.00	15.29	14.59	13.67	14.52	1.63	1.69
	c	27.00	14.56	14.54	13.31	14.14	1.72	
VP-11-VIII	a	27.00	14.98	14.99	14.51	14.83	1.56	
	b	27.00	14.69	15.23	14.63	14.85	1.56	1.52
	c	27.00	14.34	15.53	16.39	15.42	1.45	

Tabelle A.15: 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	27.00	14.97	14.25	14.50	14.57	1.62	1.63
	b	27.00	15.14	14.53	14.12	14.60	1.61	
	c	27.00	14.43	14.31	14.31	14.35	1.67	
VP-12-II	a	27.00	14.72	13.89	14.02	14.21	1.70	1.71
	b	27.00	13.46	14.19	14.37	14.01	1.75	
	c	27.00	14.45	14.36	14.16	14.32	1.68	
VP-12-III	a	27.00	16.04	15.51	15.95	15.83	1.37	1.37
	b	27.00	16.15	15.40	15.46	15.67	1.40	
	c	27.00	15.87	15.50	16.50	15.96	1.35	
VP-12-IV	a	27.00	15.02	15.10	14.66	14.93	1.54	1.56
	b	27.00	14.65	15.24	14.62	14.84	1.56	
	c	27.00	15.11	14.37	14.99	14.82	1.56	
VP-12-V	a	27.00	15.05	16.61	15.34	15.67	1.40	1.37
	b	27.00	16.41	15.47	16.10	15.99	1.34	
	c	27.00	16.42	16.31	15.02	15.92	1.36	
VP-12-VI	a	27.00	14.74	15.70	16.01	15.48	1.43	1.45
	b	27.00	15.88	15.50	14.32	15.23	1.48	
	c	27.00	14.19	16.90	15.28	15.46	1.44	
VP-12-VII	a	27.00	15.15	15.55	15.13	15.28	1.47	1.47
	b	27.00	15.17	14.89	15.90	15.32	1.46	
	c	27.00	15.16	14.98	15.87	15.34	1.46	
VP-12-VIII	a	27.00	15.72	14.97	15.41	15.37	1.46	1.46
	b	27.00	14.57	15.15	15.60	15.11	1.51	
	c	27.00	16.36	15.48	14.65	15.50	1.43	

Tabelle A.16: Rauheitswerte VP-13

	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-13-I	a	27.00	17.60	15.60	15.60	16.27	1.30	1.29
	b	27.00	17.00	15.40	17.10	16.50	1.26	
	c	27.00	15.90	15.90	16.70	16.17	1.32	
VP-13-II	a	27.00	15.30	13.70	15.30	14.77	1.58	1.61
	b	27.00	15.50	14.20	14.70	14.80	1.57	
	c	27.00	14.00	14.40	14.60	14.33	1.67	
VP-13-III	a	27.00	16.00	17.20	16.50	16.57	1.25	1.31
	b	27.00	16.40	15.80	15.40	15.87	1.37	
	c	27.00	16.60	15.70	16.00	16.10	1.33	
VP-13-IV	a	27.00	13.60	14.40	15.10	14.37	1.67	1.61
	b	27.00	14.00	15.50	14.70	14.73	1.58	
	c	27.00	15.00	14.50	14.80	14.77	1.58	
VP-13-V	a	27.00	15.60	16.20	17.00	16.27	1.30	1.30
	b	27.00	16.00	14.80	16.90	15.90	1.36	
	c	27.00	17.70	16.20	15.90	16.60	1.25	
VP-13-VI	a	27.00	16.30	14.80	14.70	15.27	1.47	1.88
	b	27.00	16.00	14.30	14.40	14.90	1.55	
	c	27.00	15.30	4.90	14.20	11.47	2.61	
VP-13-VII	a	27.00	17.40	15.90	15.90	16.40	1.28	1.27
	b	27.00	17.20	16.40	16.50	16.70	1.23	
	c	27.00	16.30	16.80	15.70	16.27	1.30	
VP-13-VIII	a	27.00	15.50	15.10	14.90	15.17	1.49	1.37
	b	27.00	16.90	15.40	17.00	16.43	1.27	
	c	27.00	16.20	15.80	15.80	15.93	1.35	

Tabelle A.17: Rauheitswerte VP-14

	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-14-I	a	54.00	16.60	16.20	15.80	16.20	2.62	
	b	54.00	16.40	16.40	16.90	16.57	2.51	2.55
	c	54.00	17.30	15.60	16.70	16.53	2.52	
VP-14-II	a	54.00	16.10	15.00	15.50	15.53	2.85	
	b	54.00	16.40	15.80	15.20	15.80	2.75	2.85
	c	54.00	15.20	14.80	15.80	15.27	2.95	
VP-14-III	a	54.00	17.40	16.80	16.10	16.77	2.45	
	b	54.00	16.90	17.40	16.10	16.80	2.44	2.45
	c	54.00	17.20	16.60	16.20	16.67	2.48	
VP-14-IV	a	54.00	16.80	16.70	17.20	16.90	2.41	
	b	54.00	16.20	17.00	18.60	17.27	2.31	2.38
	c	54.00	16.20	17.40	16.90	16.83	2.43	
VP-14-V	a	54.00	14.90	16.40	15.60	15.63	2.81	
	b	54.00	15.80	15.70	16.40	15.97	2.70	2.79
	c	54.00	14.70	16.90	14.90	15.50	2.86	
VP-14-VI	a	54.00	16.80	16.80	16.00	16.53	2.52	
	b	54.00	16.30	15.80	15.70	15.93	2.71	2.66
	c	54.00	16.10	15.70	15.50	15.77	2.77	
VP-14-VII	a	54.00	15.20	13.80	15.50	14.83	3.12	
	b	54.00	15.00	15.70	14.10	14.93	3.08	3.09
	c	54.00	15.60	14.20	15.20	15.00	3.06	
VP-14-VIII	a	54.00	16.00	17.40	16.80	16.73	2.46	
	b	54.00	16.00	16.40	15.10	15.83	2.74	2.59
	c	54.00	15.90	16.20	17.00	16.37	2.57	

Tabelle A.18: Rauheitswerte VP-15

	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-15-I	a	27.00	14.20	15.50	14.60	14.77	1.58	1.56
	b	27.00	14.80	14.60	14.60	14.67	1.60	
	c	27.00	15.60	15.40	14.30	15.10	1.51	
VP-15-II	a	27.00	15.80	15.10	14.40	15.10	1.51	1.52
	b	27.00	14.20	15.40	15.80	15.13	1.50	
	c	27.00	13.60	16.10	14.80	14.83	1.56	
VP-15-III	a	27.00	13.90	14.30	14.30	14.17	1.71	1.75
	b	27.00	13.30	14.20	14.20	13.90	1.78	
	c	27.00	13.70	14.50	13.60	13.93	1.77	
VP-15-IV	a	27.00	13.70	13.70	13.30	13.57	1.87	1.82
	b	27.00	14.40	14.00	14.20	14.20	1.70	
	c	27.00	13.40	13.90	13.30	13.53	1.88	
VP-15-V	a	27.00	14.70	13.90	12.90	13.83	1.80	1.82
	b	27.00	14.40	13.60	13.10	13.70	1.83	
	c	27.00	14.50	13.30	13.30	13.70	1.83	
VP-15-VI	a	27.00	14.70	14.30	15.00	14.67	1.60	1.63
	b	27.00	15.00	14.40	14.10	14.50	1.64	
	c	27.00	14.30	14.90	14.00	14.40	1.66	
VP-15-VII	a	27.00	15.60	16.40	14.90	15.63	1.41	1.42
	b	27.00	14.50	16.80	15.50	15.60	1.41	
	c	27.00	14.90	16.20	15.20	15.43	1.44	
VP-15-VIII	a	27.00	16.10	15.70	15.30	15.70	1.39	1.37
	b	27.00	15.80	15.30	16.20	15.77	1.38	
	c	27.00	15.90	15.90	16.30	16.03	1.34	

Tabelle A.19: Rauheitswerte VP-16

	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-16-I	a	54.00	15.50	16.10	15.70	15.77	2.77	2.70
	b	54.00	16.40	15.60	15.60	15.87	2.73	
	c	54.00	16.40	17.10	15.20	16.23	2.61	
VP-16-II	a	54.00	14.90	15.90	15.40	15.40	2.90	2.83
	b	54.00	15.90	15.30	15.60	15.60	2.83	
	c	54.00	15.10	16.50	15.80	15.80	2.75	
VP-16-III	a	54.00	15.40	15.90	16.00	15.77	2.77	2.81
	b	54.00	16.40	15.60	15.20	15.73	2.78	
	c	54.00	15.80	15.40	15.20	15.47	2.87	
VP-16-IV	a	54.00	15.40	14.20	15.40	15.00	3.06	3.09
	b	54.00	13.60	15.20	15.90	14.90	3.10	
	c	54.00	13.90	15.70	15.00	14.87	3.11	
VP-16-V	a	54.00	14.30	15.60	13.90	14.60	3.23	3.12
	b	54.00	16.00	14.70	14.30	15.00	3.06	
	c	54.00	15.50	14.80	14.50	14.93	3.08	
VP-16-VI	a	54.00	14.10	15.20	15.70	15.00	3.06	3.02
	b	54.00	14.40	15.70	14.90	15.00	3.06	
	c	54.00	14.70	15.60	15.60	15.30	2.94	
VP-16-VII	a	54.00	15.10	16.40	14.60	15.37	2.91	2.90
	b	54.00	15.30	15.30	15.30	15.30	2.94	
	c	54.00	15.20	15.80	15.50	15.50	2.86	
VP-16-VIII	a	54.00	14.60	16.40	14.70	15.23	2.96	2.78
	b	54.00	16.20	15.70	16.60	16.17	2.63	
	c	54.00	15.80	15.40	16.30	15.83	2.74	

Tabelle A.20: Rauheitswerte VP-17

	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-17-I	a	27.00	15.00	13.70	13.30	14.00	1.75	
	b	27.00	14.50	14.10	14.60	14.40	1.66	1.72
	c	27.00	13.50	13.50	15.10	14.03	1.75	
VP-17-II	a	27.00	16.30	16.30	15.70	16.10	1.33	
	b	27.00	16.00	15.40	16.10	15.83	1.37	1.37
	c	27.00	16.20	14.90	15.60	15.57	1.42	
VP-17-III	a	27.00	12.60	12.60	12.60	12.60	2.17	
	b	27.00	12.00	12.70	12.40	12.37	2.25	2.21
	c	27.00	12.10	12.80	12.50	12.47	2.21	
VP-17-IV	a	27.00	13.60	14.10	13.90	13.87	1.79	
	b	27.00	14.20	14.30	13.90	14.13	1.72	1.75
	c	27.00	14.00	14.40	13.80	14.07	1.74	
VP-17-V	a	27.00	15.00	15.60	15.40	15.33	1.46	
	b	27.00	16.50	16.70	14.30	15.83	1.37	1.36
	c	27.00	17.50	16.30	16.30	16.70	1.23	
VP-17-VI	a	27.00	16.70	14.60	15.50	15.60	1.41	
	b	27.00	15.80	15.10	14.60	15.17	1.49	1.44
	c	27.00	14.90	16.30	15.40	15.53	1.42	
VP-17-VII	a	27.00	14.30	17.20	13.90	15.13	1.50	
	b	27.00	14.70	15.20	14.50	14.80	1.57	1.50
	c	27.00	14.10	15.50	16.80	15.47	1.44	
VP-17-VIII	a	27.00	14.80	16.60	15.20	15.53	1.42	
	b	27.00	14.80	14.80	15.90	15.17	1.49	1.48
	c	27.00	15.50	14.60	15.10	15.07	1.51	

Tabelle A.21: Rauheitswerte VP-18

	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-18-I	a	54.00	18.10	17.20	17.00	17.43	2.26	
	b	54.00	17.10	18.00	17.30	17.47	2.25	2.25
	c	54.00	17.00	17.40	18.10	17.50	2.25	
VP-18-II	a	54.00	17.90	18.30	16.50	17.57	2.23	
	b	54.00	17.30	16.70	18.10	17.37	2.28	2.25
	c	54.00	17.80	18.20	16.40	17.47	2.25	
VP-18-III	a	54.00	16.10	15.90	14.70	15.57	2.84	
	b	54.00	16.30	15.50	14.60	15.47	2.87	2.85
	c	54.00	16.10	14.90	15.80	15.60	2.83	
VP-18-IV	a	54.00	16.40	16.70	15.40	16.17	2.63	
	b	54.00	16.80	16.80	15.60	16.40	2.56	2.60
	c	54.00	16.70	15.80	16.30	16.27	2.60	
VP-18-V	a	54.00	16.40	15.80	15.30	15.83	2.74	
	b	54.00	15.10	15.60	16.30	15.67	2.80	2.76
	c	54.00	15.30	16.50	15.80	15.87	2.73	
VP-18-VI	a	54.00	17.20	14.90	15.30	15.80	2.75	
	b	54.00	14.80	15.30	17.10	15.73	2.78	2.77
	c	54.00	14.80	17.10	15.30	15.73	2.78	
VP-18-VII	a	54.00	15.60	15.00	15.60	15.40	2.90	
	b	54.00	15.50	15.30	15.10	15.30	2.94	2.90
	c	54.00	15.20	15.60	15.80	15.53	2.85	
VP-18-VIII	a	54.00	15.90	17.20	17.00	16.70	2.47	
	b	54.00	17.30	17.00	16.30	16.87	2.42	2.41
	c	54.00	17.20	17.50	16.70	17.13	2.34	

Tabelle A.22: Rauheitswerte VP-19

	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-19-I	a	27.00	16.70	16.30	16.40	16.47	1.27	1.32
	b	27.00	16.90	15.70	15.40	16.00	1.34	
	c	27.00	16.20	16.20	15.70	16.03	1.34	
VP-19-II	a	27.00	15.60	15.40	15.60	15.53	1.42	1.36
	b	27.00	15.90	15.50	16.20	15.87	1.37	
	c	27.00	16.20	16.70	16.10	16.33	1.29	
VP-19-III	a	27.00	15.90	15.80	15.80	15.83	1.37	1.35
	b	27.00	17.20	15.00	16.20	16.13	1.32	
	c	27.00	16.40	15.60	15.80	15.93	1.35	
VP-19-IV	a	27.00	16.20	14.70	14.20	15.03	1.52	1.46
	b	27.00	16.50	15.50	15.30	15.77	1.38	
	c	27.00	16.00	15.30	14.70	15.33	1.46	
VP-19-V	a	27.00	15.30	13.60	14.80	14.57	1.62	1.65
	b	27.00	14.00	15.00	14.40	14.47	1.64	
	c	27.00	13.50	15.20	14.10	14.27	1.69	
VP-19-VI	a	27.00	15.00	15.00	15.80	15.27	1.47	1.46
	b	27.00	15.00	16.00	16.10	15.70	1.39	
	c	27.00	15.50	14.60	15.20	15.10	1.51	
VP-19-VII	a	27.00	17.30	18.00	16.90	17.40	1.14	1.26
	b	27.00	15.50	17.00	16.00	16.17	1.32	
	c	27.00	15.60	16.60	16.20	16.13	1.32	
VP-19-VIII	a	27.00	18.70	17.90	16.60	17.73	1.09	1.13
	b	27.00	19.00	17.00	17.00	17.67	1.10	
	c	27.00	18.20	16.40	16.50	17.03	1.18	

Tabelle A.23: Rauheitswerte VP-20

	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-20-I	a	54.00	16.60	15.80	15.80	16.07	2.66	
	b	54.00	16.40	16.40	15.20	16.00	2.69	2.64
	c	54.00	16.70	16.30	16.20	16.40	2.56	
VP-20-II	a	54.00	16.60	15.80	17.30	16.57	2.51	
	b	54.00	18.00	17.50	16.80	17.43	2.26	2.39
	c	54.00	16.90	16.50	17.50	16.97	2.39	
VP-20-III	a	54.00	15.40	15.30	14.20	14.97	3.07	
	b	54.00	15.00	15.00	14.70	14.90	3.10	3.09
	c	54.00	15.10	14.80	14.80	14.90	3.10	
VP-20-IV	a	54.00	17.50	18.30	16.20	17.33	2.29	
	b	54.00	15.90	16.90	17.30	16.70	2.47	2.47
	c	54.00	16.30	16.40	15.50	16.07	2.66	
VP-20-V	a	54.00	16.80	16.60	16.20	16.53	2.52	
	b	54.00	16.20	16.90	15.00	16.03	2.67	2.64
	c	54.00	15.80	15.40	16.30	15.83	2.74	
VP-20-VI	a	54.00	17.80	16.40	16.60	16.93	2.40	
	b	54.00	18.20	16.40	17.60	17.40	2.27	2.28
	c	54.00	18.30	17.50	17.70	17.83	2.16	
VP-20-VII	a	54.00	17.30	16.40	17.30	17.00	2.38	
	b	54.00	17.70	15.80	18.00	17.17	2.33	2.39
	c	54.00	16.20	17.80	16.30	16.77	2.45	
VP-20-VIII	a	54.00	18.30	16.70	19.30	18.10	2.10	
	b	54.00	19.30	17.30	18.20	18.27	2.06	2.10
	c	54.00	17.70	18.00	18.10	17.93	2.14	

Tabelle A.24: Rauheitswerte VP-21

	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-21-I	a	81.00	15.40	13.00	14.60	14.33	5.02	
	b	81.00	16.90	14.40	16.50	15.93	4.06	4.23
	c	81.00	18.70	14.60	17.40	16.90	3.61	
VP-21-II	a	81.00	16.60	16.50	15.90	16.33	3.87	
	b	81.00	17.30	16.80	15.50	16.53	3.77	3.75
	c	81.00	16.70	17.20	16.80	16.90	3.61	
VP-21-III	a	81.00	17.30	15.40	14.60	15.77	4.15	
	b	81.00	16.80	14.90	15.70	15.80	4.13	4.15
	c	81.00	17.10	15.30	14.80	15.73	4.17	
VP-21-IV	a	81.00	13.00	13.90	13.60	13.50	5.66	
	b	81.00	17.60	15.40	15.40	16.13	3.96	4.69
	c	81.00	15.70	14.80	15.20	15.23	4.44	
VP-21-V	a	81.00	12.10	14.20	13.70	13.33	5.80	
	b	81.00	17.50	16.30	13.60	15.80	4.13	4.66
	c	81.00	15.80	15.10	16.90	15.93	4.06	
VP-21-VI	a	81.00	15.70	14.80	15.90	15.47	4.31	
	b	81.00	16.70	14.30	16.80	15.93	4.06	4.25
	c	81.00	14.30	15.70	16.00	15.33	4.39	
VP-21-VII	a	81.00	14.20	13.70	13.80	13.90	5.34	
	b	81.00	14.80	14.00	13.90	14.23	5.09	5.08
	c	81.00	15.10	15.00	13.80	14.63	4.82	
VP-21-VIII	a	81.00	13.70	12.60	13.50	13.27	5.86	
	b	81.00	14.60	15.30	15.90	15.27	4.42	4.82
	c	81.00	16.60	15.50	15.10	15.73	4.17	

Tabelle A.25: Rauheitswerte VP-22

	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-22-I	a	81.00	13.60	14.70	13.30	13.87	5.36	
	b	81.00	14.70	14.00	14.10	14.27	5.07	4.84
	c	81.00	14.70	16.70	16.20	15.87	4.10	
VP-22-II	a	81.00	14.90	15.20	14.80	14.97	4.60	
	b	81.00	16.10	14.80	15.30	15.40	4.35	4.50
	c	81.00	15.90	14.90	14.40	15.07	4.54	
VP-22-III	a	81.00	15.40	16.30	15.30	15.67	4.20	
	b	81.00	17.10	15.80	16.20	16.37	3.85	4.06
	c	81.00	14.20	17.00	16.20	15.80	4.13	
VP-22-IV	a	81.00	12.60	12.80	12.60	12.67	6.43	
	b	81.00	13.90	13.80	14.30	14.00	5.26	5.78
	c	81.00	14.00	13.70	12.80	13.50	5.66	
VP-22-V	a	81.00	15.10	17.00	15.60	15.90	4.08	
	b	81.00	17.60	14.30	16.80	16.23	3.91	3.87
	c	81.00	15.60	18.40	16.60	16.87	3.63	
VP-22-VI	a	81.00	18.60	17.20	17.60	17.80	3.26	
	b	81.00	18.80	17.10	16.80	17.57	3.34	3.21
	c	81.00	17.70	19.50	18.10	18.43	3.04	
VP-22-VII	a	81.00	18.60	18.60	20.10	19.10	2.83	
	b	81.00	19.30	19.80	18.90	19.33	2.76	2.88
	c	81.00	18.20	16.90	20.00	18.37	3.06	
VP-22-VIII	a	81.00	15.80	15.10	15.20	15.37	4.37	
	b	81.00	17.30	14.90	15.70	15.97	4.05	4.02
	c	81.00	16.60	17.10	16.80	16.83	3.64	

Tabelle A.26: Rauheitswerte VP-30

	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-30-I	a	27.00	16.20	14.80	15.00	15.33	1.46	
	b	27.00	16.20	15.70	15.40	15.77	1.38	1.41
	c	27.00	16.10	15.30	15.70	15.70	1.39	
VP-30-II	a	27.00	15.20	15.50	15.70	15.47	1.44	
	b	27.00	16.70	15.50	15.60	15.93	1.35	1.39
	c	27.00	16.80	15.30	15.50	15.87	1.37	
VP-30-III	a	27.00	15.10	15.80	15.40	15.43	1.44	
	b	27.00	15.60	14.60	15.30	15.17	1.49	1.47
	c	27.00	15.40	15.50	14.90	15.27	1.47	
VP-30-IV	a	27.00	15.80	15.10	15.30	15.40	1.45	
	b	27.00	14.90	15.60	15.70	15.40	1.45	1.47
	c	27.00	15.30	14.80	15.00	15.03	1.52	
VP-30-V	a	27.00	15.40	14.80	15.00	15.07	1.51	
	b	27.00	14.90	15.30	15.10	15.10	1.51	1.51
	c	27.00	14.70	15.00	15.60	15.10	1.51	
VP-30-VI	a	27.00	16.50	14.00	15.30	15.27	1.47	
	b	27.00	15.80	14.20	15.20	15.07	1.51	1.49
	c	27.00	15.90	15.10	14.80	15.27	1.47	
VP-30-VII	a	27.00	17.40	15.20	14.80	15.80	1.38	
	b	27.00	14.50	17.00	15.80	15.77	1.38	1.37
	c	27.00	15.80	17.00	15.10	15.97	1.35	
VP-30-VIII	a	27.00	16.30	14.90	15.40	15.53	1.42	
	b	27.00	16.30	14.90	15.00	15.40	1.45	1.42
	c	27.00	16.00	15.80	15.20	15.67	1.40	

Tabelle A.27: Rauheitswerte VP-31

	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-31-I	a	27.00	14.70	14.80	15.00	14.83	1.56	
	b	27.00	14.60	14.50	15.10	14.73	1.58	1.58
	c	27.00	14.80	15.00	14.30	14.70	1.59	
VP-31-II	a	27.00	14.10	14.60	14.80	14.50	1.64	
	b	27.00	14.90	13.30	14.00	14.07	1.74	1.67
	c	27.00	14.40	14.10	15.00	14.50	1.64	
VP-31-III	a	27.00	15.50	14.60	14.80	14.97	1.53	
	b	27.00	14.30	14.80	15.20	14.77	1.58	1.56
	c	27.00	15.00	14.90	14.70	14.87	1.56	
VP-31-IV	a	27.00	14.60	14.10	15.00	14.57	1.62	
	b	27.00	13.40	14.00	14.70	14.03	1.75	1.71
	c	27.00	14.00	13.70	14.10	13.93	1.77	
VP-31-V	a	27.00	14.60	14.00	15.00	14.53	1.63	
	b	27.00	14.20	14.90	15.10	14.73	1.58	1.60
	c	27.00	14.40	14.80	15.00	14.73	1.58	
VP-31-VI	a	27.00	15.10	14.00	15.30	14.80	1.57	
	b	27.00	14.30	13.90	15.10	14.43	1.65	1.60
	c	27.00	15.00	15.20	13.90	14.70	1.59	
VP-31-VII	a	27.00	15.30	15.50	15.70	15.50	1.43	
	b	27.00	16.00	14.90	15.30	15.40	1.45	1.42
	c	27.00	15.50	15.70	16.00	15.73	1.39	
VP-31-VIII	a	27.00	14.90	15.50	15.20	15.20	1.49	
	b	27.00	14.90	15.30	15.10	15.10	1.51	1.51
	c	27.00	15.00	15.10	14.80	14.97	1.53	

Tabelle A.28: Rauheitswerte VP-32

	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-32-I	a	54.00	16.40	17.50	16.50	16.80	2.44	2.60
	b	54.00	16.10	15.70	16.40	16.07	2.66	
	c	54.00	16.50	16.00	15.40	15.97	2.70	
VP-32-II	a	54.00	16.00	15.50	16.10	15.87	2.73	2.78
	b	54.00	16.10	15.90	16.00	16.00	2.69	
	c	54.00	16.00	14.70	15.30	15.33	2.92	
VP-32-III	a	54.00	15.10	15.80	15.00	15.30	2.94	2.85
	b	54.00	15.90	15.60	15.00	15.50	2.86	
	c	54.00	15.10	16.30	16.00	15.80	2.75	
VP-32-IV	a	54.00	14.50	14.70	14.50	14.57	3.24	3.17
	b	54.00	14.80	14.70	15.10	14.87	3.11	
	c	54.00	15.10	14.50	14.70	14.77	3.15	
VP-32-V	a	54.00	15.00	15.00	15.30	15.10	3.02	3.02
	b	54.00	14.80	15.20	15.40	15.13	3.00	
	c	54.00	14.90	15.30	15.00	15.07	3.03	
VP-32-VI	a	54.00	14.50	14.40	15.10	14.67	3.20	3.20
	b	54.00	14.70	14.20	14.80	14.57	3.24	
	c	54.00	14.60	14.70	15.00	14.77	3.15	
VP-32-VII	a	54.00	16.20	15.60	15.40	15.73	2.78	2.81
	b	54.00	15.70	15.60	15.20	15.50	2.86	
	c	54.00	16.40	15.30	15.30	15.67	2.80	
VP-32-VIII	a	54.00	15.60	15.90	14.80	15.43	2.89	2.81
	b	54.00	16.00	15.30	15.90	15.73	2.78	
	c	54.00	16.30	15.60	15.40	15.77	2.77	

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.29: Einzelwerte der Verbundfestigkeiten; VP-1 bis VP-5

			VP-1	VP-2	VP-3	VP-4	VP-5
			NB-1	NB-1	NB-1	NB-1	NB-2
			M-1	M-1	M-1	M-1	M-1
Würfelspaltzugfestigkeit	$f_{ct,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	2.74	1.80	3.18	3.01	3.97
			3.25	2.43	2.55	4.08	4.01
			3.48	1.98	3.28	3.75	3.65
			3.62	2.30	3.20	4.26	4.03
			3.95	2.82	1.89	3.78	3.68
			3.23	2.26	2.92	3.36	3.29
	$f_{ctm,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	3.38	2.27	2.84	3.71	3.77
	$\sigma_{fctm,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	0.37	0.32	0.49	0.42	0.26
Würfelkeilspaltzugfestigkeit	$f_{ct,k spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	2.01	3.69	1.86	2.27	2.58
			1.87	2.06	2.49	2.27	2.18
			1.94	2.87	2.17	2.27	2.38
	$\sigma_{fctm,k spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	0.07	0.82	0.32	0.00	0.20
Bruchenergie	G_F	$[Nmm/mm^2]$	0.0930	0.0478	0.0226	0.0748	0.0739
			0.0814	0.0573	0.0369	0.0767	0.0702
			0.0872	0.0526	0.0297	0.0758	0.0720
	G_{Fm}	$[Nmm/mm^2]$	0.0058	0.0048	0.0072	0.0010	0.0019

Tabelle A.30: Einzelwerte der Verbundfestigkeiten; VP-6 bis VP-10

			VP-6	VP-7	VP-8	VP-9	VP-10
			NB-2	NB-2	NB-2	NB-3	NB-3
			M-1	M-1	M-1	M-1	SB-4
Würfelspaltzugfestigkeit	$f_{ct,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	2.87	2.86	3.12	3.45	1.90
			3.90	2.92	3.22	3.43	1.76
			2.91	2.81	3.04	2.35	1.89
			3.24	3.40	3.50	2.39	1.89
			3.96	3.21	3.53	3.40	1.86
			3.71	3.01	3.08	4.01	2.16
	$f_{ctm,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	3.43	3.04	3.25	3.17	1.91
	$\sigma_{fctm,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	0.45	0.21	0.19	0.60	0.12
Würfelkeil-spaltzugfestigkeit	$f_{ct,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	4.93	1.93	2.95	2.71	1.75
	$f_{ctm,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	4.29	2.06	1.56	3.28	1.85
	$\sigma_{fctm,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	0.32	0.06	0.69	0.29	0.05
Bruchenergie	G_F	$[Nmm/mm^2]$	0.0780	0.0904	0.0578	0.0803	0.0299
	G_{Fm}	$[Nmm/mm^2]$	0.0783	0.1003	0.0540	0.0700	0.0298
	σ_{GFm}	$[Nmm/mm^2]$	0.0782	0.0954	0.0559	0.0751	0.0299
			0.0001	0.0049	0.0019	0.0052	0.0001

Tabelle A.31: Einzelwerte der Verbundfestigkeiten; VP-11 bis VP-15

			VP-11	VP-12	VP-13	VP-14	VP-15
			NB-3	NB-3	NB-6	NB-6	NB-6
			M-1	SB-4	M-3	M-3	M-3
Würfelspaltzugfestigkeit	$f_{ct,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	2.86	2.22	2.92	3.61	2.58
			3.16	2.44	4.36	3.73	2.97
			2.42	2.50	3.65	3.16	2.76
			3.32	1.81	4.16	3.39	3.15
			3.52	2.07	3.29	3.98	2.80
			2.32	2.03	3.54	3.43	2.77
	$f_{ctm,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	2.93	2.18	3.66	3.55	2.84
	$\sigma_{fctm,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	0.45	0.24	0.49	0.26	0.18
Würfelkeil-spaltzugfestigkeit	$f_{ct,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	1.92	1.52	1.86	1.84	2.21
	$f_{ctm,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	1.97	1.83	2.36	1.78	1.40
	$\sigma_{fctm,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	1.94	1.86	2.11	1.81	1.81
			0.03	0.16	0.25	0.03	0.41
Bruchenergie	G_F	$[Nmm/mm^2]$	0.0615	0.0224	0.0913	0.0670	0.0513
	G_{Fm}	$[Nmm/mm^2]$	0.0272	0.0363	0.0500	0.0637	0.0378
	σ_{GFm}	$[Nmm/mm^2]$	0.0444	0.0294	0.0706	0.0653	0.0446
			0.0171	0.0070	0.0206	0.0016	0.0068

Tabelle A.32: Einzelwerte der Verbundfestigkeiten; VP-16 bis VP-20

			VP-16	VP-17	VP-18	VP-19	VP-20
			NB-6	NB-5	NB-5	NB-6	NB-6
			M-3	M-3	M-3	M-3	M-3
Würfelspaltzugfestigkeit	$f_{ct,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	3.37	2.88	3.58	1.85	3.32
			3.41	3.07	3.23	2.26	2.79
			3.85	3.37	3.19	1.30	3.27
			3.09	3.51	3.26	1.96	2.42
			3.30	3.15	3.31	1.22	3.37
			2.81	3.24	3.31	1.87	3.31
			3.30	3.20	3.31	1.74	3.08
$\sigma_{fctm,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	0.32	0.20	0.13	0.37	0.35	
Würfelkeil-spaltzugfestigkeit	$f_{ct,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	2.27	1.98	1.58	0.82	1.82
			2.47	2.02	1.41	1.67	1.90
	$f_{ctm,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	2.37	2.00	1.50	1.24	1.86
	$\sigma_{fctm,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	0.10	0.02	0.08	0.42	0.04
Bruchenergie	G_F	$[Nmm/mm^2]$	0.0316	0.0623	0.0873	0.0172	0.0722
			0.0337	0.0530	0.0686	0.0174	0.0637
	G_{Fm}	$[Nmm/mm^2]$	0.0326	0.0577	0.0779	0.0173	0.0679
	σ_{GFm}	$[Nmm/mm^2]$	0.0010	0.0046	0.0093	0.0001	0.0043

Tabelle A.33: Einzelwerte der Verbundfestigkeiten; VP-21 bis VP-32

			VP-21	VP-22	VP-30	VP-31	VP-32
			M-2	M-2	NB-7	NB-7	NB-7
			M-3	M-3	NB-8	NB-8	NB-8
Würfelspaltzugfestigkeit	$f_{ct,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	1.64	1.91	3.32	3.12	3.40
			1.29	2.25	3.19	3.09	3.11
			1.21	1.65	2.84	3.14	3.17
			1.33	2.29	3.46	3.19	3.90
			1.57	2.60	3.46	3.34	3.65
			2.41	1.86	3.61	3.44	3.53
			1.57	2.09	3.31	3.22	3.46
$\sigma_{fctm,spl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	0.40	0.32	0.25	0.13	0.27	
Würfelkeil-spaltzugfestigkeit	$f_{ct,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	1.35	1.38	1.52	1.82	2.13
			1.07	1.13	1.90	2.11	1.81
	$f_{ctm,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	1.21	1.25	1.71	1.86	1.86
	$\sigma_{fctm,kspl,cube,b}$	$[N/mm^2]$	0.14	0.13	0.19	0.14	0.16
Bruchenergie	G_F	$[Nmm/mm^2]$	0.0785	0.0608	0.0610	0.1080	0.0828
			0.0737	0.0665	0.0696	0.0500	0.0612
	G_{Fm}	$[Nmm/mm^2]$	0.0761	0.0637	0.0653	0.0790	0.0720
	σ_{GFm}	$[Nmm/mm^2]$	0.0024	0.0029	0.0043	0.0290	0.0108

A.4 Schwindkurven

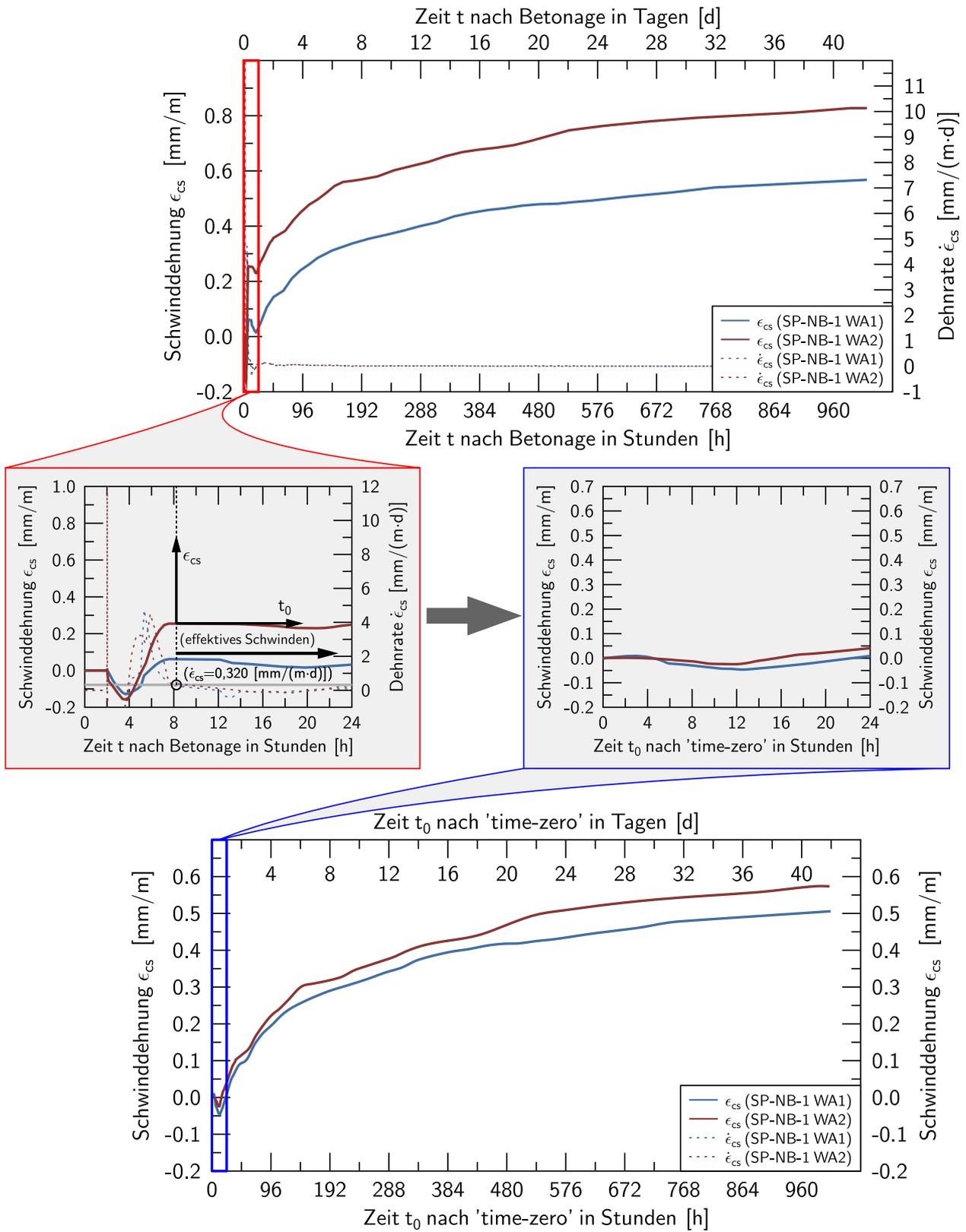


Bild A.2: Schwindverlauf von SP-NB-1; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrates $\dot{\epsilon}_{cs}$

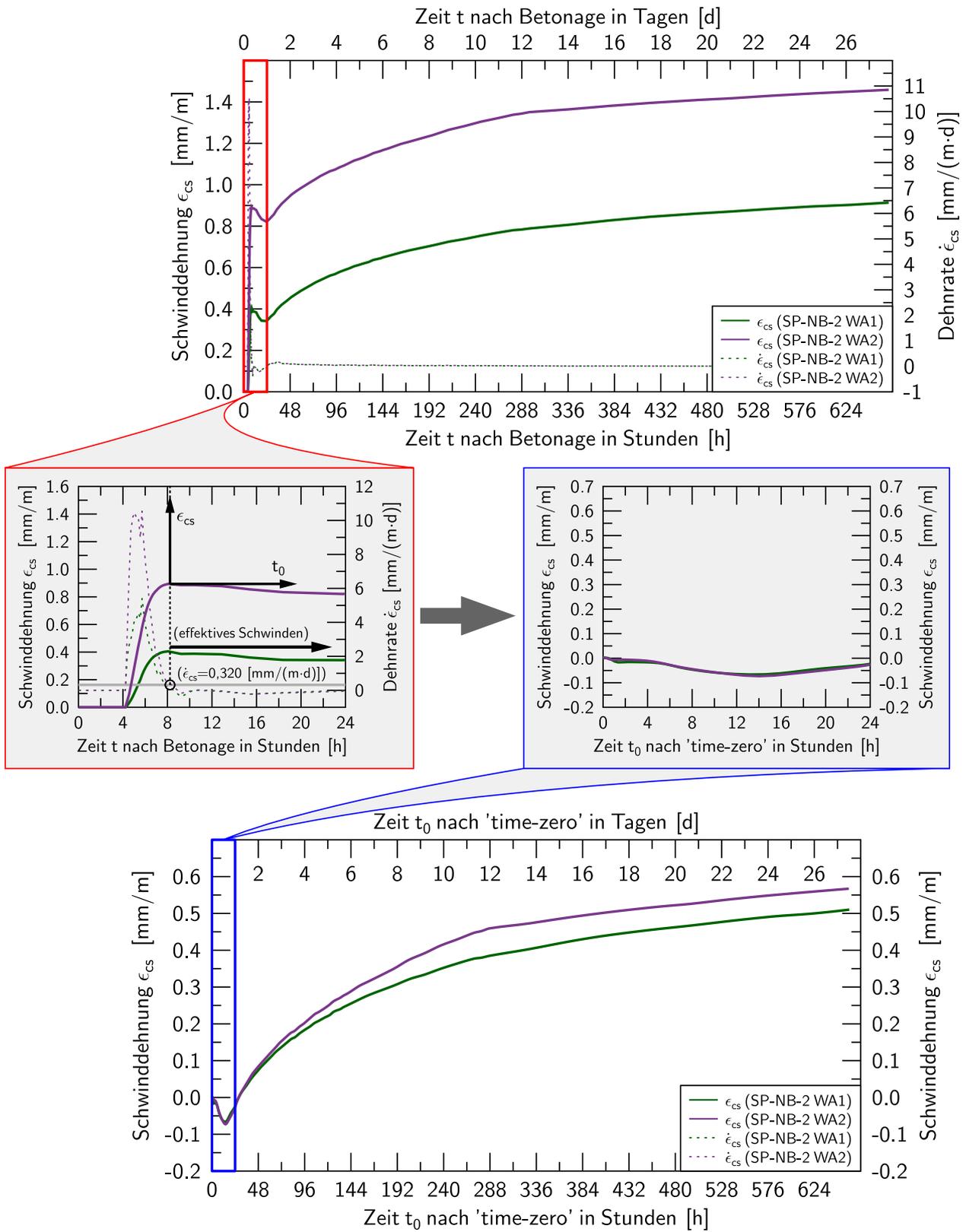


Bild A.3: Schwindverlauf von SP-NB-2; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrates $\dot{\epsilon}_{cs}$

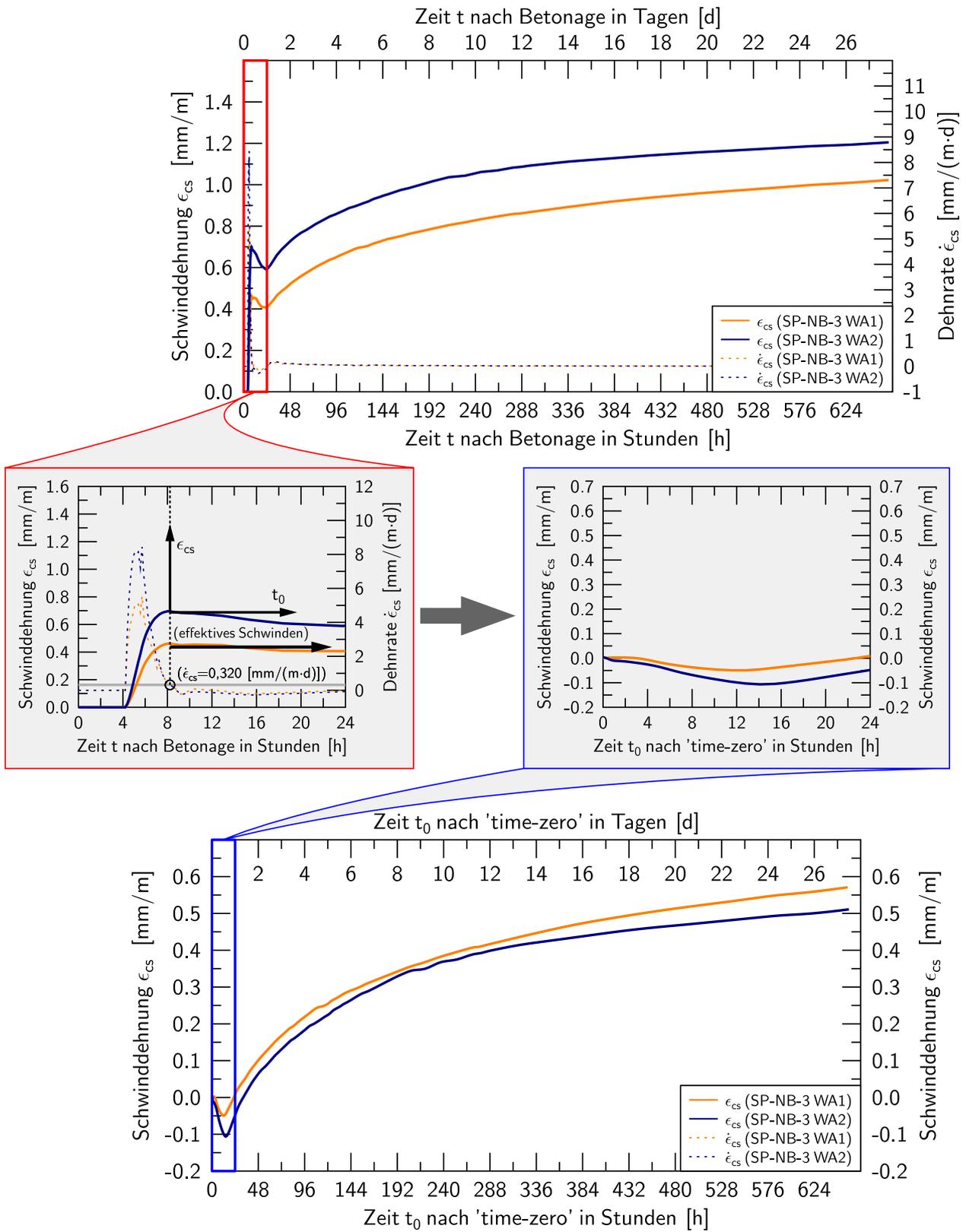


Bild A.4: Schwindverlauf von SP-NB-3; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrates $\dot{\epsilon}_{cs}$

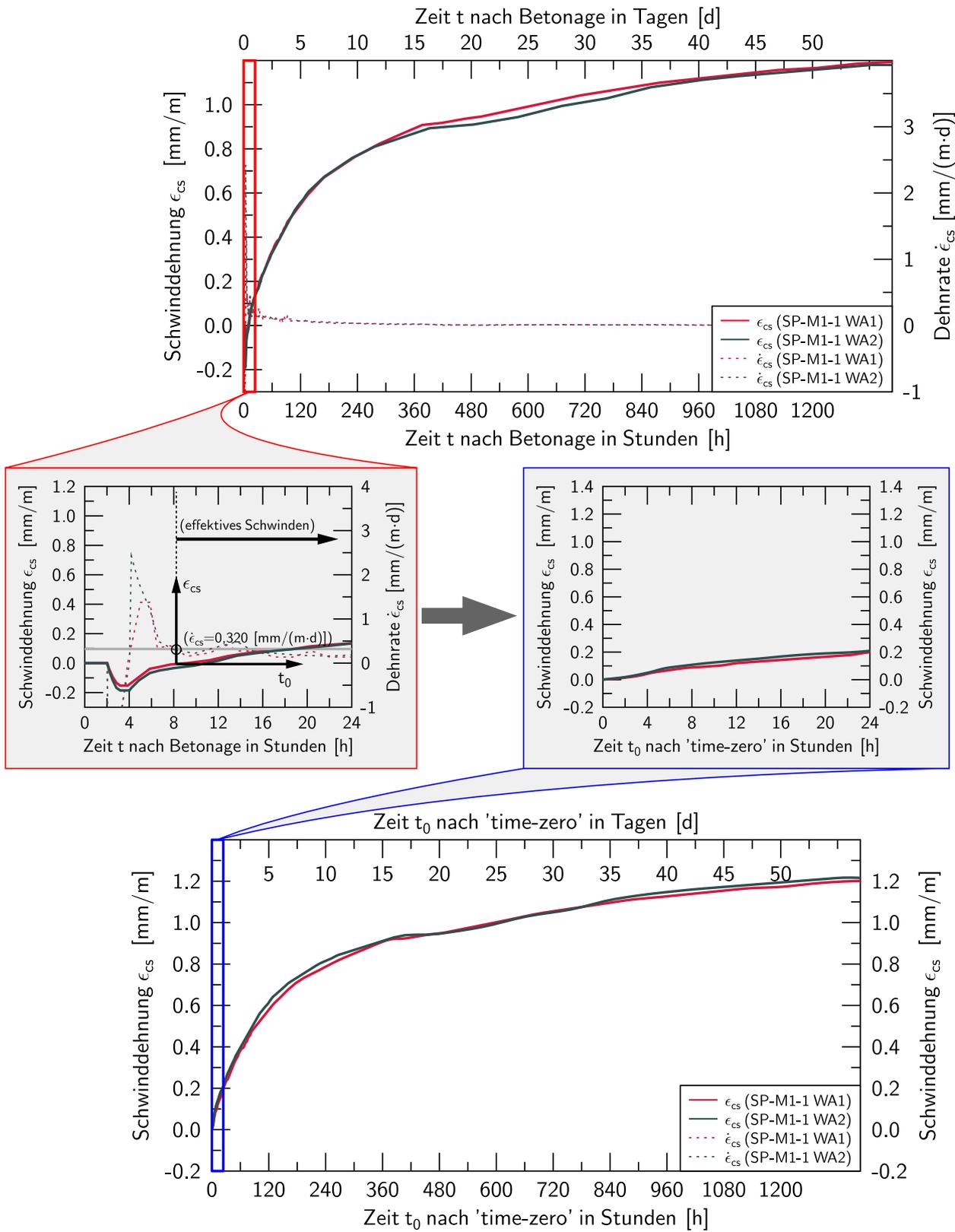


Bild A.5: Schwindverlauf von SP-M1-1; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrates $\dot{\epsilon}_{cs}$

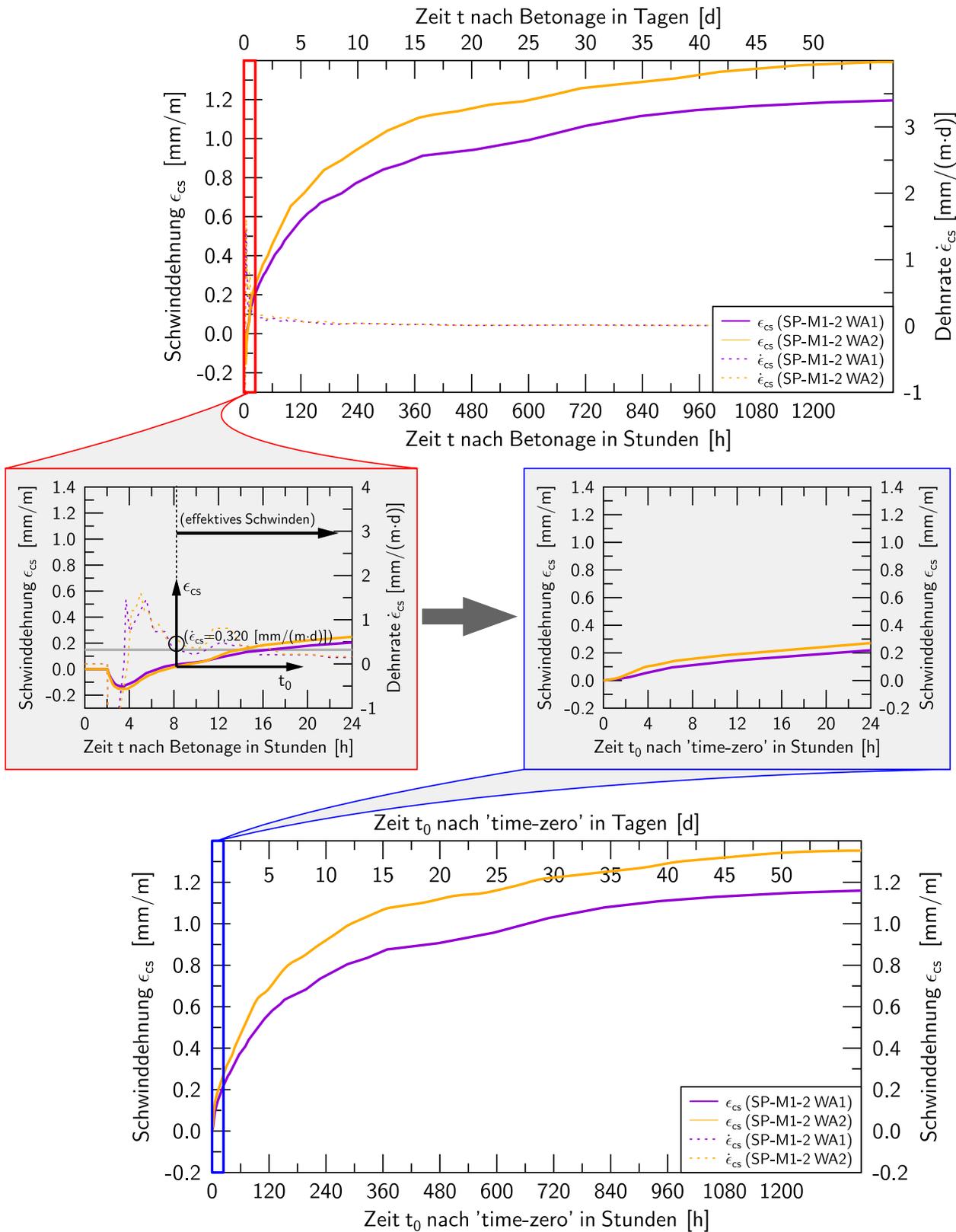


Bild A.6: Schwindverlauf von SP-M1-2; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrates $\dot{\epsilon}_{cs}$

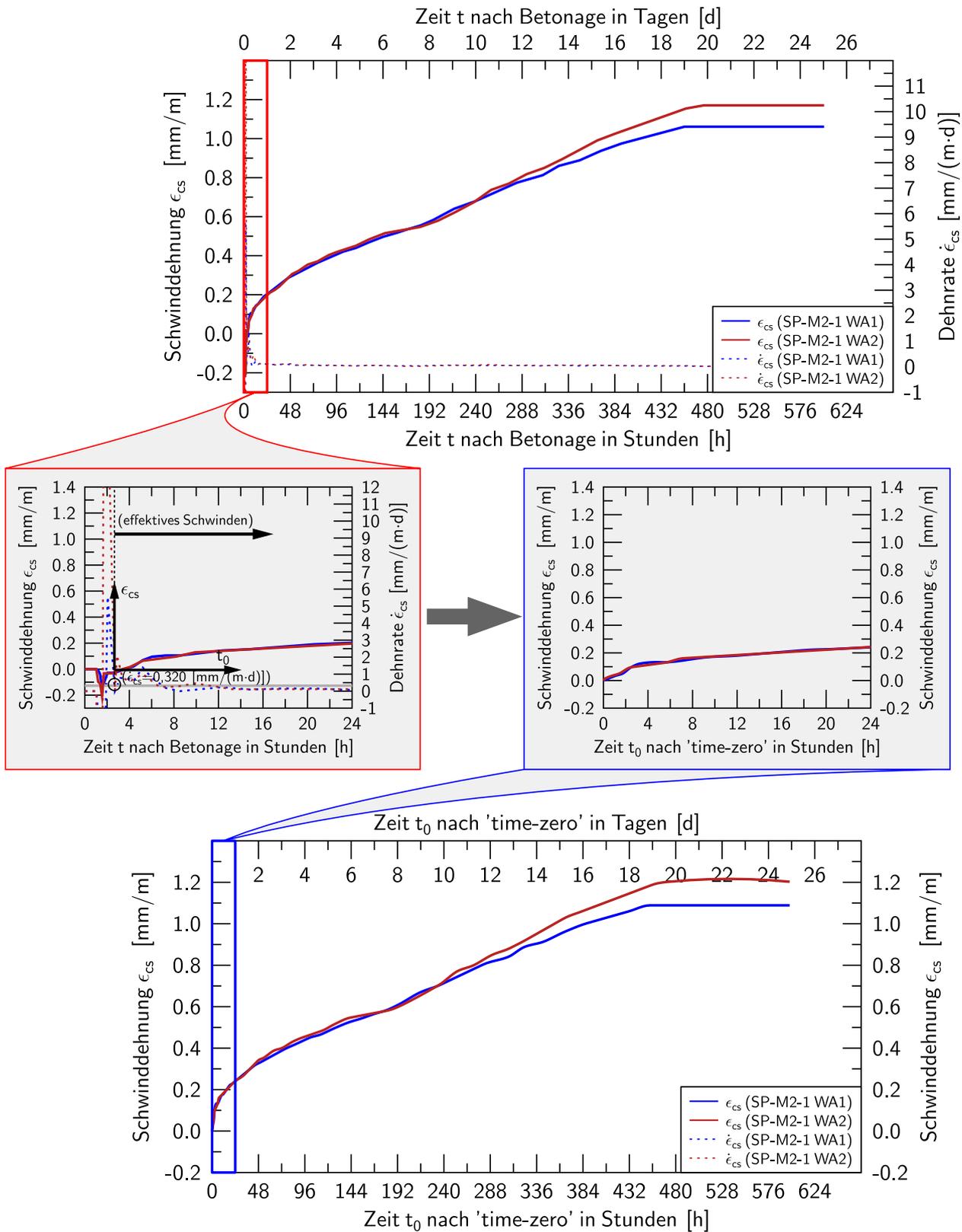


Bild A.7: Schwindverlauf von SP-M2-1; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrate $\dot{\epsilon}_{cs}$

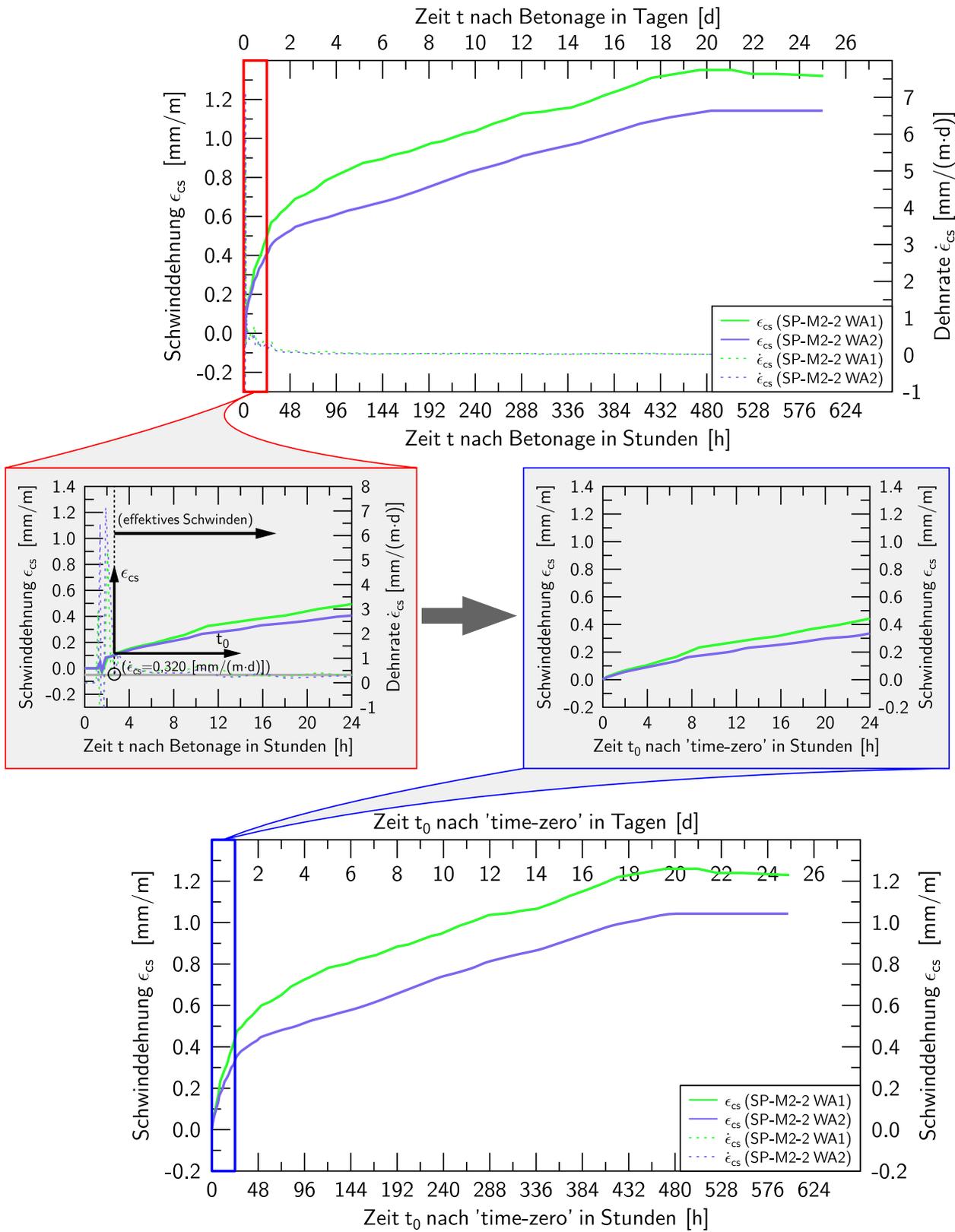


Bild A.8: Schwindverlauf von SP-M2-2; Bestimmung von *time-zero* t_0 anhand der Dehnrates $\dot{\epsilon}_{cs}$

A.5 Umrechnung von Betonkenngrößen

A.5.1 Betondruckfestigkeit

Kenngrößen

$f_{c,cube}$	Betondruckfestigkeit, ermittelt an einem Würfel der Kantenlänge 150 mm; Lagerung nach (DIN EN 12390-2 2009) (Feuchtlagerung bis zur Prüfung)
$f_{c,cube,dry}$	Betondruckfestigkeit, ermittelt an einem Würfel der Kantenlänge 150 mm; Lagerung nach (DIN EN 12390-2/NA 2012) (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) (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) (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) (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) (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) (Feuchtlagerung bis zur Prüfung)

Einflussgrößen und Umrechnung

- Einfluss der Probekörpergröße auf die Würfeldruckfestigkeit nach (Reineck u. a. 2012)

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

- Einfluss der Probekörpergröße auf die Zylinderdruckfestigkeit nach nach (Reineck u. a. 2012)

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

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

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

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

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

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

$$f_{c,cube} = \begin{cases} 0,92 \cdot f_{c,dry,cube} & \text{für } f_{c,cyl} \leq 50 \text{ N/mm}^2 \\ 0,95 \cdot f_{c,dry,cube} & \text{für } f_{c,cyl} \geq 55 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

A.5.2 Betonzugfestigkeit

Kenngößen

f_{ct}	einachsiale, zentrische Zugfestigkeit; Bezeichnung nach (DIN EN 1992-1-1 2011)
f_{ctm}	Mittelwert der einachsialen zentrischen Zugfestigkeit; Bezeichnung nach (DIN EN 1992-1-1 2011)
$f_{ct,spl}$	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)

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

A.5.3 Umrechnung von Festigkeitsgrößen

Einflussgrößen und Umrechnung

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

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

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

$$f_{ctm} = \begin{cases} 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} & \text{für } f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2 \\ 2,12 \cdot \ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{10}\right) & \text{für } f_{ck} \geq 55 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

- 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)

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

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

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

A.6 Auszug Normentexte

A.6.1 DIN EN 18551:2014-08

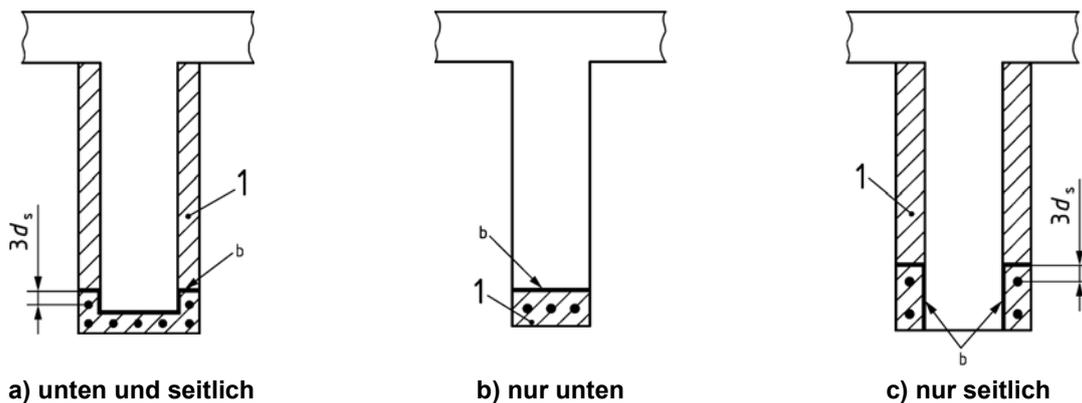
5.3 Zusammenwirken zwischen alten Betonbauteilen und neuem Spritzbeton

5.3.1 Allgemeines

Bei Verstärkungsmaßnahmen sind die Eigenschaften der alten Betonbauteile exakt zu erfassen. Gegebenenfalls sind dazu Proben am Bauteil zu entnehmen und zu untersuchen. Wird ein Zusammenwirken zwischen alten Bauteilen und neuem Spritzbeton in Rechnung gestellt, so darf bei der Bemessung so vorgegangen werden, als ob der Gesamtquerschnitt von Anfang an einheitlich hergestellt worden wäre. Voraussetzung hierfür ist, dass die unter dieser Annahme in der Fuge wirkenden Schubkräfte aufgenommen werden können. Weisen alte Betonbauteile und Spritzbeton im gleichen Querschnitt unterschiedliche Festigkeiten auf, so darf für die Bemessung näherungsweise die geringste Festigkeit für den Gesamtquerschnitt angenommen werden, wenn nicht das unterschiedliche Tragverhalten nach 5.3.3 berücksichtigt wird. Kann die Spritzbetonverstärkung nicht über das Auflager geführt werden, so ist für die Querkraftbemessung im Auflagerbereich nur der unverstärkte Querschnitt anzusetzen.

5.3.2 Nachweis des Verbundes

Die entsprechenden Nachweise sind nach DIN EN 1992-1-1:2011-01, 6.2.5 unter Berücksichtigung von DIN EN 1992-1-1 /NA zu führen. Die Breite der Kontaktfläche b ist bei der Verstärkung von Balken nach Bild 1 zu ermitteln.



Legende

- 1 Spritzbetonverstärkung
- b Breite der Kontaktfläche
- d_s Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung

Bild 1 — Breite der Kontaktfläche b bei der Verstärkung von Balken

5.3.3 Berücksichtigung des unterschiedlichen Tragverhaltens

Die Spannungsdehnungslinien mit den zugehörigen maximalen Dehnungen sind bei den Nachweisen für jeden der zusammenwirkenden Betone sowie alle Betonstähle und Spannstähle einzuhalten. Dabei sind die aus Einwirkungen zum Zeitpunkt der Verstärkung in den Bemessungsquerschnitten resultierenden Dehnungen möglichst exakt zu erfassen und als Vorverformungen bei der Bemessung zu berücksichtigen. Ferner sind Umlagerungen aus Kriechen und Schwinden bei der Bemessung anzusetzen.

5.4 Verbundmittel zwischen bestehenden Bauteilen und Spritzbeton

5.4.1 Allgemeines

Die Verbundmittel können aus vorhandener oder zusätzlich eingebauter Bewehrung oder z. B. aus Dübeln oder anderen stahlbaumäßigen Elementen bestehen.

5.4.2 Bemessung

(1) Kann der Nachweis der Schubkraftübertragung nach DIN EN 1992-1-1:2011-01, 6.2.5 unter Berücksichtigung von DIN EN 1992-1-1/NA ohne Berücksichtigung einer Verbundbewehrung geführt werden, so darf bei Platten auf Verbundmittel verzichtet werden, siehe jedoch 5.7, Absatz (6). Bei Balken sind in diesem Fall in den Endbereichen konstruktive Verbundbewehrungen vorzusehen.

5.7 Bauliche Durchbildung

(1) Der Abstand gleichlaufender Bewehrungsstäbe muss mindestens 50 mm betragen.

(2) Für zusätzlich eingelegte Bewehrung muss der Mindestabstand zum Betonuntergrund 20 mm betragen.

(3) Bezüglich der Betondeckung gilt DIN EN 1992-1-1:2011-01, Abschnitt 4 unter Berücksichtigung von DIN EN 1992-1-1/NA. Bei spritzrau belassenen Oberflächen sind die Mindest- und Nennmaße um 5 mm zu erhöhen.

(4) Eine Abminderung des Vorhaltemaßes ist nicht zulässig.

(5) Bei Auftragsdicken über 50 mm ohne zusätzliche rechnerische Bewehrung ist eine konstruktive Bewehrung anzuordnen.

(6) Bei der Verstärkung von flächenartigen Bauteilen, z. B. Platten und plattenartigen Bauteilen, ist die Bewehrung im vorhandenen Beton mit mindestens 4 Stahldübeln M8 je m² zu verankern.

A.6.2 DIN EN 1992-1-1:2011-01 + DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04

6.2.5 Schubkraftübertragung in Fugen

(1) Die Schubkraftübertragung in Fugen zwischen zu unterschiedlichen Zeitpunkten hergestellten Betonierabschnitten ist in der Regel zusätzlich zu den Anforderungen aus 6.2.1 bis 6.2.4 wie folgt nachzuweisen:

$$v_{Edi} \leq v_{Rdi} \quad (6.23)$$

v_{Edi} ist der Bemessungswert der Schubkraft in der Fuge. Er wird ermittelt durch:

$$v_{Edi} = \beta \cdot V_{Ed} / (z \cdot b_i) \quad (6.24)$$

Dabei ist

β das Verhältnis der Normalkraft in der Betonerfüllung und der Gesamtnormalkraft in der Druck- bzw. Zugzone im betrachteten Querschnitt;

V_{Ed} der Bemessungswert der einwirkenden Querkraft;

z der Hebelarm des zusammengesetzten Querschnitts;

b_i die Breite der Fuge (siehe Bild 6.8);

v_{Rdi} der Bemessungswert der Schubtragfähigkeit in der Fuge mit:

$$v_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (6.25)$$

Dabei ist

c und μ je ein Beiwert, der von der Rauigkeit der Fuge abhängt (siehe (2));

f_{ctd} der Bemessungswert der Betonzugfestigkeit nach 3.1.6 (2)P;

σ_n die Spannung infolge der minimalen Normalkraft rechtwinklig zur Fuge die gleichzeitig mit der Querkraft wirken kann (positiv für Druck mit $\sigma_n < 0,6f_{cd}$ und negativ für Zug). Ist σ_n eine Zugspannung, ist in der Regel $c \cdot f_{ctd}$ mit 0 anzusetzen;

$$\rho = A_s / A_i;$$

A_s die Querschnittsfläche der die Fuge kreuzenden Verbundbewehrung mit ausreichender Verankerung auf beiden Seiten der Fuge einschließlich vorhandener Querkraftbewehrung;

A_i die Fläche der Fuge, über die Schub übertragen wird;

α der Neigungswinkel der Verbundbewehrung nach Bild 6.9 mit einer Begrenzung auf $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$;

v ein Festigkeitsabminderungsbeiwert, siehe 6.2.2 (6).

NCI Zu 6.2.5 (1)

Für den inneren Hebelarm darf $z = 0,9d$ angesetzt werden. Ist die Verbundbewehrung jedoch gleichzeitig Querkraftbewehrung, muss die Ermittlung des inneren Hebelarms nach NCI zu 6.2.3 (1) erfolgen.

Gleichung (6.25): Der Traganteil der Verbundbewehrung aus der Schubreibung in Gleichung (6.25) darf auf $\rho f_{yd} (1,2 \mu \sin \alpha + \cos \alpha)$ erhöht werden.

ANMERKUNG Die Übertragung von Spannungen aus teilweise vorgespannten Bauteilen infolge Kriechen und Schwinden über die Verbundfuge ist bei der einwirkenden Schubkraft v_{Edi} zu berücksichtigen.

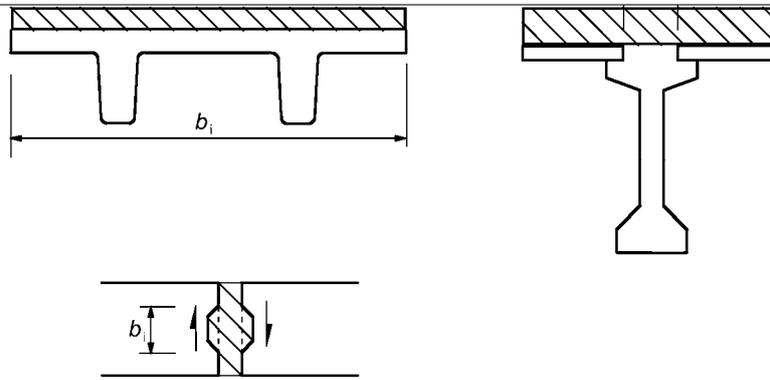
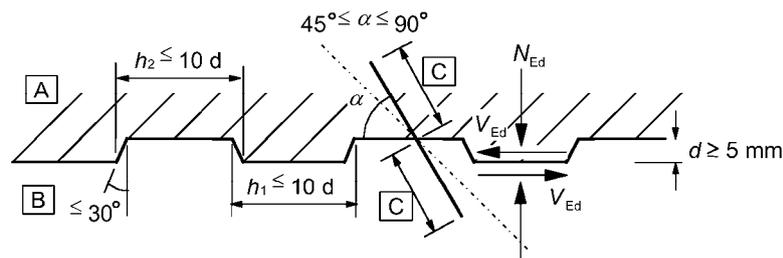


Bild 6.8 — Beispiele für Fugen



[A] — 1. Betonabschnitt, [B] — 2. Betonabschnitt, [C] — Verankerung der Bewehrung

Bild 6.9 — Verzahnte Fugenausbildung

(2) Fehlen genauere Angaben, dürfen Oberflächen in die Kategorien sehr glatt, glatt, rau oder verzahnt entsprechend folgender Beispiele eingeteilt werden:

[AC]

- Sehr glatt: die Oberfläche wurde gegen Stahl, Kunststoff oder speziell geglättete Holzschalungen betoniert: $0,025 \leq c \leq 0,10$ und $\mu = 0,5$;
- Glatt: die Oberfläche wurde abgezogen oder im Gleit- bzw. Extruderverfahren hergestellt, oder blieb nach dem Verdichten ohne weitere Behandlung: $c = 0,20$ und $\mu = 0,6$;
- Rau: eine Oberfläche mit mindestens 3 mm Rauigkeit, erzeugt durch Rechen mit ungefähr 40 mm Zinkenabstand, Freilegen der Gesteinskörnungen oder andere Methoden, die ein äquivalentes Verhalten herbeiführen: $c = 0,40$ und $\mu = 0,7$; [AC]
- Verzahnt: eine verzahnte Oberfläche gemäß Bild 6.9: $c = 0,50$ und $\mu = 0,9$.

NCI Zu 6.2.5, Bild 6.9

Es gilt zusätzlich: $0,8 \leq h_1 / h_2 \leq 1,25$. Die Zahnhöhe muss abweichend vom Bild 6.9 $d \geq 10$ mm betragen.

NCI Zu 6.2.5 (2)

Im Allgemeinen ist für sehr glatte Fugen der Rauigkeitsbeiwert $c = 0$ zu verwenden. Höhere Beiwerte müssen durch entsprechende Nachweise begründet sein.

Unbehandelte Fugenoberflächen sollten bei der Verwendung von Beton (1. Betonierabschnitt) mit fließfähiger bzw. sehr fließfähiger Konsistenz ($\geq F5$) als sehr glatte Fugen eingestuft werden.

Bei rauen Fugen muss die Gesteinskörnung mindestens 3 mm tief freigelegt werden (d. h. z. B. mit dem Sandflächenverfahren bestimmte mittlere Rautiefe mindestens 1,5 mm).

Wenn eine Gesteinskörnung mit $d_g \geq 16$ mm verwendet und diese z. B. mit Hochdruckwasserstrahlen mindestens 6 mm tief freigelegt wird (d. h. z. B. mit dem Sandflächenverfahren bestimmte mittlere Rautiefe mindestens 3 mm), darf die Fuge als verzahnt eingestuft werden.

In den Fällen, in denen die Fuge infolge Einwirkungen rechtwinklig zur Fuge unter Zug steht, ist bei glatten oder rauen Fugen $c = 0$ zu setzen.

A.6.3 DAfStb Heft 600

Tabelle H6.2 – Rauigkeitskategorien der Fugenoberflächen

1		2		3	
Kategorie		Oberflächenbeschaffenheit			
1	sehr glatt	<ul style="list-style-type: none"> - gegen Stahl, Kunststoff oder glatte Holzschalung betoniert, - unbehandelt bei Beton im ersten Betonierabschnitt mit fließfähiger bzw. sehr fließfähiger Konsistenz (Ausbreitmaßklasse $\geq F5$). 		<p>sehr glatt, fließfähiger Beton</p>	
2	glatt	<ul style="list-style-type: none"> - abgezogen, - im Gleit- bzw. Extruderverfahren hergestellt, - nach dem Verdichten ohne weitere Behandlung. 		<p>glatt < 3 mm, oder unbehandelter Beton</p>	
3	rau	<ul style="list-style-type: none"> - mindestens 3 mm durch Rechen erzeugte Rauigkeit mit ca. 40 mm Zinkenabstand, - mindestens 3 mm Freilegen der Gesteinskörnungen, - andere Methoden, die ein äquivalentes Tragverhalten herbeiführen. <p>→ $R_t \geq 1,5$ mm bzw. $R_p \geq 1,1$ mm ¹⁾.</p>		<p>rau ≥ 3 mm</p> <p>rau ≥ 3 mm</p>	
4	verzahnt	<ul style="list-style-type: none"> - Verzahnung mit Geometrie nach Bild 6.9, - mindestens 6 mm Freilegen der Gesteinskörnungen bei Verwendung einer Gesteinskörnung mit $d_g \geq 16$ mm, - andere Methoden, die ein äquivalentes Tragverhalten herbeiführen. <p>→ $R_t \geq 3,0$ mm bzw. $R_p \geq 2,2$ mm ¹⁾.</p>		<p>≥ 10 mm</p> <p>verzahnt ≥ 6 mm</p> <p>$d_g \geq 16$ mm</p>	

¹⁾ Die Rauigkeitsparameter sollten als Mittelwerte von mindestens drei Messungen nachgewiesen werden.

Tabelle H6.3 – Beiwerte c , μ und ν nach NA für die definierten Rauigkeitskategorien nach 6.2.5 (2)

	1	2	3	4
Rauigkeitskategorie	c	μ	ν	
1 sehr glatt	0 ¹⁾	0,5	0	
2 glatt	0,20 ²⁾	0,6	0,20	
3 rau	0,40 ²⁾	0,7	0,50	
4 verzahnt	0,50	0,9	0,70	

¹⁾ Höhere Werte müssen durch entsprechende Nachweise begründet sein.
²⁾ Bei Zug rechtwinklig zur Fuge und bei dynamischer oder Ermüdungsbeanspruchung gilt: $c = 0$.