

---

# UNTERSUCHUNGEN ZUM TRAGVERHALTEN DER VERBUNDFUGE VON SPRITZBETONERGÄNZUNGEN – ALLGEMEINE ERKENNTNISSE UND AUSBLICKE FÜR DIE EINSCHALIGE SPRITZBETONBAUWEISE IM TUNNELBAU

---

## **VERIFICATION OF THE BOND STRENGTH OF SPRAYED CONCRETE – GENERAL CONCLUSIONS AND OUTLOOK FOR SINGLE TUNNEL LININGS**

Sebastian **Schmidt**, Technische Universität München, Deutschland  
Gereon **Behnen**, Büchting+Streit AG, München, Deutschland  
Oliver **Fischer**, Technische Universität München, Deutschland

Der Einsatz von Spritzbeton hat sich mittlerweile in den verschiedenen Bereichen des Bauingenieurwesens wie der Verstärkung von bestehenden Tragwerken oder im Tunnelbau etabliert. Wird im Tunnelbau die als Sofortsicherung wirkende Spritzbeton-Außenschale nach Ergänzung mit einer zusätzlichen Spritzbeton-Innenschale als „einschalige Spritzbetonbauweise“ ausgeführt, kommt der im Endzustand angesetzten monolithischen Verbundwirkung der beiden Spritzbetonschalen – wie auch ganz allgemein bei der Spritzbetonverstärkung bestehender Stahlbetonbauteile, eine maßgebliche Bedeutung zu.

Da jedoch nur wenige experimentelle Untersuchungen, welche die aktuell geforderten Oberflächenbehandlungsmethoden berücksichtigen, vorliegen, wurden am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München Untersuchungen zur Tragfähigkeit der Verbundfuge von Spritzbetonergänzungen durchgeführt. Desweiteren wird ein Ausblick auf eine mögliche Verbundfugenbemessung zur Anwendung bei einschaliger Tunnelbauweise gegeben, welche den durch die Dilatationsbehinderung zusätzlich entstehenden Querdruck berücksichtigt und somit die übertragbaren Verbundspannungen besser ausgenutzt werden können.

*By now, the application of sprayed concrete has been established in the different areas of construction such as reinforcing existing structures or in tunneling. If the first outer layer of sprayed concrete in tunneling is constructed with an additional layer of sprayed concrete as single tunnel lining, the bond strength between the two layers becomes of crucial importance – like in reinforcing existing structures with sprayed concrete in general.*

*Since experimental results investigating the currently demanded surface treatment methods are limited, the institute of concrete structures of Technische Universität München has conducted additional research on the bond strength of sprayed concrete. Furthermore an outlook to a possible structural design method of the force transfer in the interface of single tunnel linings is given. This possible structural design method takes into account the lateral pressure induced by the restricted dilation and thus shows ways to make better use of transmittable bond strength.*

## 1. Einleitung

Zur Ermittlung der über die Verbundfuge übertragbaren Schubkraft bei Spritzbetonergänzungen im Hochbau gelten in Deutschland seit der Einführung der DIN 18551:2005-01 die Nachweisformate der Bemessungsnorm für Stahlbeton. Auch nach bauaufsichtlicher Einführung von DIN 18551:2014-08 [1], die als nationales Anwendungsdokument zu DIN EN 14487 und DIN EN 14488 zu verwenden ist, wird für die Verbundfugenbemessung auf DIN EN 1992-1-1:2011-01 [2] mit DIN EN 1992-1-1:2013-04/NA [3] verwiesen. In die darin angegebenen Bemessungsansätze für unbewehrte Betonfugen, die in [4] an Versuchsergebnissen von Versuchskörpern mit Ortbetonergänzung kalibriert wurden, gehen bei Verzicht auf arbeitsintensive Verbundbewehrung mit der Oberflächenrauheit der Auftragsfläche und dem Bemessungswert der zentrischen Betonzugfestigkeit nur zwei Parameter direkt ein. Viele andere Einflussfaktoren, wie z.B. die Art der Vorbehandlungsmethode, verfahrensbedingte Faktoren der Spritzbetonapplikation, oder Zwangsspannungen aus ungleichem Schwinden (resultierend aus dem unterschiedlichen Alter der Betonschichten), gehen nicht in die Berechnung ein.

Während im Hochbau die übertragbare Schubspannung unbewehrter Fugen durch die Zugfestigkeit gut beschrieben werden kann, werden bei der Anwendung der so ermittelten Widerstandskennwerte bei gekrümmten Tunnelschalen die aufnehmbaren Verbundspannungen unterschätzt. Bedingt durch die hohen Rauheiten der spritzrauen Oberfläche und dem somit verbundenen Aufgleiten der beiden Spritzbetonschalen, das jedoch durch die Bogentragwirkung einerseits und dem Gebirge andererseits behindert wird, könnten die Forderungen an die Haftzugfestigkeit in der Verbundfuge abgemindert werden und somit der Aufwand zur Fugenvorbereitung deutlich reduziert werden.

Zur Quantifizierung der Schubkraftübertragung von Spritzbetonergänzungen wurden deshalb an der Technischen Universität München experimentelle Untersuchungen zum Haftverbund von Spritzbetonergänzungen durchgeführt. Zusätzlich wird das Schwindverhalten von Spritzbeton experimentell ermittelt, sowie theoretische Untersuchungen für einen weitergehenden Ansatz zur Ermittlung der über die Verbundfuge übertragbaren Schubkraft angestellt, bei dem zusätzliche Tragreserven, des durch Dilatationsbehinderung entstehenden Querdrucks auf die Verbundfuge bei einschaliger Tunnelbauweise, berücksichtigt werden.

## 2. Bemessungsregeln für die Verbundfugenbemessung

Das aktuelle Bemessungskonzept von [2] in Verbindung mit [3] sieht zur Berechnung der maximal über die Verbundfuge übertragbaren Schubspannung  $V_{Rdi}$  einen additiven Ansatz der drei Traganteile Adhäsion, Reibung und Bewehrung vor.

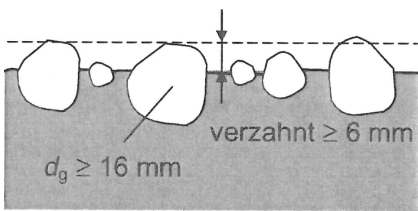
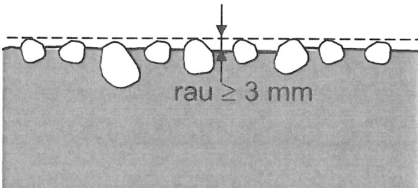
$$V_{Rdi} = c_i \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_N + \rho \cdot f_{yd} (1,2\mu \cdot \sin\alpha + \cos\alpha) < 0,50 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (1)$$

Dabei ist:

- $c_i$ : Rauheitsbeiwert;
- $f_{ctd}$ : Bemessungswert der Betonzugfestigkeit;
- $\mu$ : Reibbeiwert;
- $\sigma_N$ : Spannung infolge der minimalen Normalkraft rechtwinklig zur Fuge;
- $\rho$ : Bewehrungsgrad der Schubfuge;
- $f_{yd}$ : Bemessungswert der Streckgrenze des Betonstahls;
- $\alpha$ : Neigungswinkel der Verbundbewehrung;
- $v$ : Festigkeitsabminderungsbeiwert für die Fugenrauheit;
- $f_{cd}$ : Bemessungswert der Betondruckfestigkeit.

Bei Verzicht auf arbeitsintensive Verbundbewehrung kommt dem Adhäsionsanteil eine verstärkte Rolle zu, da sich bei üblicher Anwendung im Hochbau (statisch bestimmte Systeme, Ergänzung im Zugbereich) kein Reibwiderstand aufbauen kann. Der Adhäsionsanteil der zulässigen Schubspannung wird durch den Bemessungswert der Betonzugfestigkeit des geringer festen Verbundpartners  $f_{ctd}$  und einem Beiwert für die Rauheit  $c_i$  beschrieben. Zur Quantifizierung der Rauheit wird die Oberflächenbeschaffenheit des Altbetons vereinfachend in die vier Kategorien „sehr glatt“, „glatt“, „rau“ und „verzahnt“ eingeteilt. Die relevanten Entscheidungskriterien für die Einteilung in die jeweiligen Rauheitskategorien sind in Tabelle 1 aufgeführt. Dabei sind nur die Rauheitskategorien aufgeführt, die für eine nachträgliche Verstärkung mit Spritzbeton relevant sind.

Tab. 1: Oberflächenbeschaffenheit der Auftragsfläche nach [2] in Verbindung mit [3] und [5]

Kategorie	Oberflächenbeschaffenheit		$c_i$
verzahnt	mindestens 6 mm Freilegen der Gesteinskörnungen bei Verwendung einer Gesteinskörnung mit $d_g \geq 16$ mm; $R_t \geq 3,0$ mm bzw. $R_p \geq 2,2$ mm		0,50
rau	mindestens 3 mm Freilegen der Gesteinskörnungen; $R_t \geq 1,5$ mm bzw. $R_p \geq 1,1$ mm		0,40 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> In den Fällen, in denen die Fuge infolge Einwirkungen rechtwinklig zur Fuge unter Zug steht, ist  $c_i = 0$  zu setzen.  $R_t$ : mittlere Rautiefe gemessen mit dem Sandflächenverfahren nach Kaufmann;  $R_p$ : Profilkuppenhöhe

Die über die Verbundfuge zu übertragende Schubspannung  $v_{Edi}$  ist durch den Bemessungswert der maximal zulässigen Schubspannung  $v_{Rdi}$  abzudecken. Die einwirkende Schubspannung  $v_{Edi}$  ist im Hochbau in der Regel am gerissenen Querschnitt, unter der Annahme, dass keine Schubspannungen über den Riss übertragen werden können, durch

$$v_{Edi} = \beta \cdot V_{Ed} / (z \cdot b_i) \quad (2)$$

mit:

- $\beta$ : Verhältnis der Normalkraft in der Betonegänzung und der Gesamtnormalkraft in der Druck- bzw. Zugzone im betrachteten Querschnitt;
- $V_{Ed}$ : Bemessungswert der einwirkenden Querkraft;
- $z$ : Hebelarm des zusammengesetzten Querschnitts;
- $b_i$ : Breite der Fuge;

zu ermitteln. Eine Anrechnung von Zwangsspannungen, wie sie zum Beispiel durch das unterschiedliche Schwindverhalten der beiden Verbundpartner hervorgerufen wird, ist nicht explizit beschrieben und ist in der Regel durch konstruktive Maßnahmen abzudecken.

Für Tunnel mit permanenter Spritzbetonschale wurde für den Nachweis der Verbundfuge zwischen Außen- und Innenschale von Schwarz [6] ein vereinfachtes Rechenmodell vorgeschlagen, welches auf Arbeiten von Kupfer/Kupfer [7] und basiert. Hiernach werden die in der Verbundfuge tangential wirkenden Schubspannungen  $v_{Edi}$  und die radial gerichteten Querkzugspannungen  $\sigma_{Edi,r}$  unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren zu einer fiktiven

Fugengesamtspannung  $\Sigma\sigma_{Edi}$  addiert und diese pauschal der in Versuchen gewonnenen einachsialen Fugenzugfestigkeit  $f_{ct,b}$  gegenübergestellt. Einzelheiten des vereinfachten Bemessungsmodells können [7], [6] oder der zusammenfassenden Darstellung in [8] entnommen werden.

### 3. Experimentelle Untersuchungen

Zur experimentellen Untersuchung der Verbundfestigkeit von Spritzbetonergänzungen wurden an, aus einer großformatigen Verbundplatte herausgesägten, Kleinkörpern Festigkeitsversuche durchgeführt, um mit vertretbarem Aufwand die Einflüsse des Aufrauverfahrens, der Rauheit, der Feuchtigkeit, der Spritzflächenneigung der Probekörper beim Spritzvorgang zur Horizontalen sowie des Applikationsverfahrens auf die Verbundfestigkeit von Spritzbeton quantifizieren zu können. Die in Bild 1 dargestellten Spaltzug- bzw. Keilspaltzugkörper, deren Verbundzugfestigkeit  $f_{ct,b}$  zur Bewertung der Verbundfestigkeit verwendet werden, bieten den Vorteil eines gezielten Versagens in der Verbundfuge und somit der direkten Quantifizierung der Verbundzugfestigkeit. Die aus Normalbeton bestehenden Grundplatten wurden im Alter von 8 Tagen aufgeraut. Wie die spritzrau belassenen Grundplatten aus Spritzbeton wurden die Grundplatten aus Normalbeton in der Regel im Alter von 28 Tagen durch eine 75 mm dicke Spritzbetonschicht

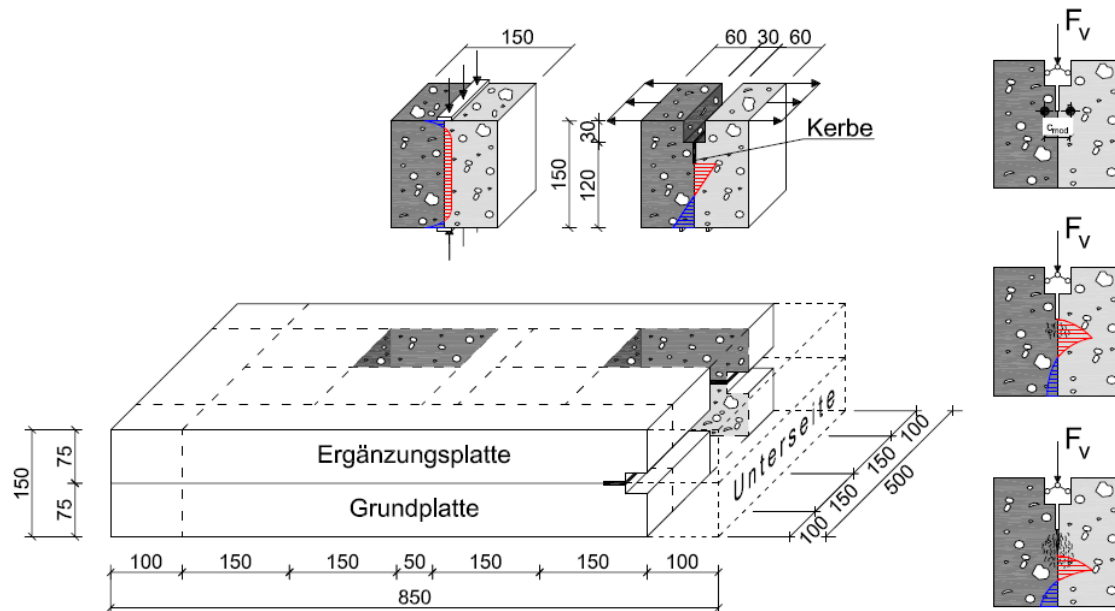


Bild 1: Versuchskörper und Versuchsaufbau

im Trockenspritz- bzw. Nassspritzverfahren ergänzt und nach 7 Tagen Abdeckung mit feuchten Jutesäcken und Folie für weitere 21 Tage unter Normbedingungen bei 65%RF und 20°C gelagert. Bei der Herstellung der Verbundplatten wurden die in Tabelle 2 angegebenen Untersuchungsparameter variiert. Um ungewollte Schwindeinflüsse minimal zu halten, wurden die Sägearbeiten erst kurz vor den Festigkeitsprüfungen durchgeführt. Zur Vermeidung von Spritzschatten wurde dabei ein umlaufender Randabstand der Versuchskörper von 100 mm bei einer Spritzbetonauftragsdicke von 75 mm eingehalten. 28 Tage nach der Spritzbetonergänzung erfolgte die Bestimmung der Verbundfestigkeit anhand von Spalt- und Keilspaltzugprüfungen. Zusätzlich zu den Verbundversuchen wurden die Festbetoneigenschaften (Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit) des verwendeten Normalbetons sowie des Spritzbetons nach 28 Tagen und am Versuchstag ermittelt.

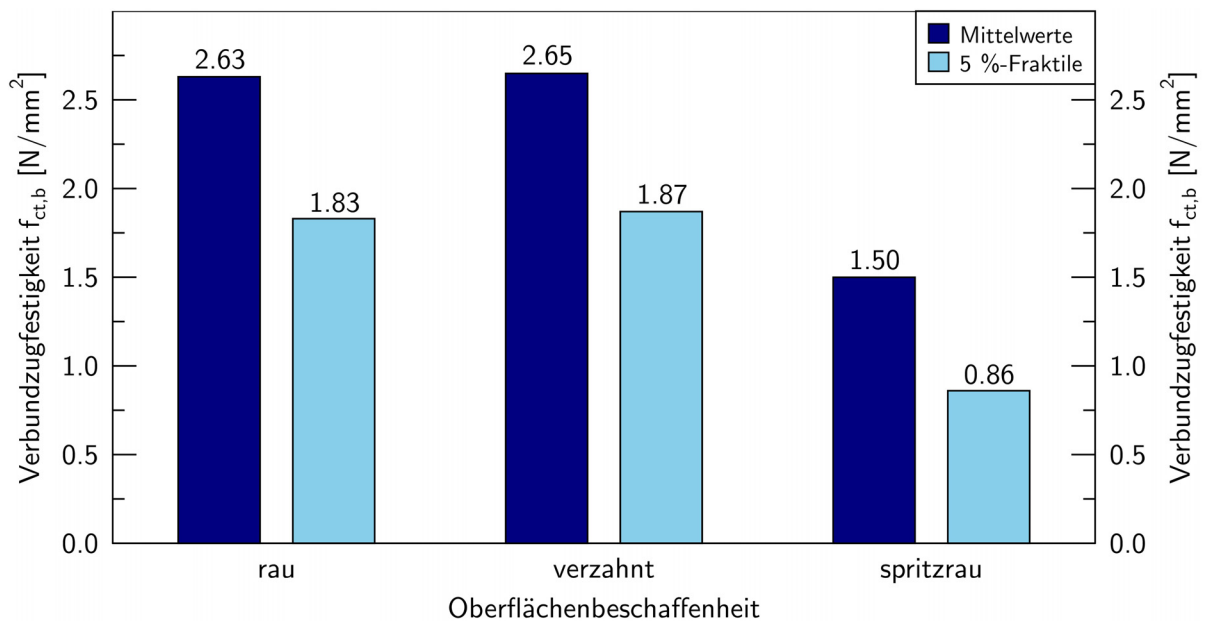
Tab. 2: Variation der Untersuchungsparameter

Untersuchungsparameter	Aufrauverfahren	Höchstdruckwasserstrahlen Strahlen mit festen Strahlmitteln
	Oberflächenbeschaffenheit	rau verzahnt spritzrau
	Oberflächenvorbehandlung	lufttrocken angefeuchtet
	Spritzflächenneigung der Probekörper zur Horizontalen	0° 90°
	Applikationsverfahren	Spritzverfahren herkömmliche Betonage
	Alter der Grundplatte	28 Tage 105 Tage

Als Beton für die Grundplatten aus Normalbeton wurde ein Beton der Festigkeitsklasse C30/37 verwendet. Für die Grundplatten aus Spritzbeton sowie für die Ergänzungsschicht kam eine Nassspritzbetonmischung der Festigkeitsklasse C30/37 zur Anwendung. Desweiteren wurden mehrere Verbundplatten mit einer werkgemischten Trockenspritzbetonmischung der Festigkeitsklasse C30/37 ergänzt.

Bei Auswertung der repräsentativen Verbundfestigkeitsprüfungen ergeben sich für Auftragsflächen aus Normalbeton, die bis zur Oberflächenbeschaffenheit „rau“ (Definition nach [2] in Verbindung mit [3]) aufgeraut wurden, eine mittlere zentrische Verbundzugfestigkeit von  $f_{ctm,b} = 2,63 \text{ N/mm}^2$  sowie eine charakteristische zentrische Verbundzugfestigkeit von  $f_{ctk,b,0.05} = 1,83 \text{ N/mm}^2$  (sh. Bild 2). Eine Steigerung der Verbundfugenfestigkeit bei intensiverem aufrauen bis zu Kategorie „verzahnt“ lieferte keine systematische Steigerung der Verbundfestigkeiten, da schon die meisten Verbundkörper mit rauher Oberfläche die monolithische Festigkeit erreichten. Eine detaillierte Betrachtung der Verbundfestigkeitsprüfungen für Trockenspritzbetonergänzungen sowie ein Vergleich zwischen experimenteller Verbundtragfähigkeit und Bemessungswert nach EC-2 kann in [9] nachgelesen werden. 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 mittlere zentrische Verbundzugfestigkeit betrug nur  $f_{ctm,b} = 1,50 \text{ N/mm}^2$ . Die charakteristische zentrische Verbundzugfestigkeit ergab sich zu  $f_{ctk,b,0.05} = 0,86 \text{ N/mm}^2$ . Die Verbundkörper mit spritzrauer Grundplatte wurden im Nassspritzverfahren mit einer Spritzleistung von ca.  $8,6 \text{ m}^3/\text{h}$  hergestellt. Dabei wurden nicht alle Spitzen des Grundbetons vollständig eingespritzt. Der Abfall der Verbundfestigkeiten bei den Versuchskörpern mit spritzrauen Oberflächen kann somit durch die potentielle verringerte Adhäsionsfläche begründet werden.

Die Ermittlung der 5 %-Fraktile erfolgte unter der Annahme einer logarithmischen Normalverteilung und einem Konfidenzniveau von  $P = 1 - \alpha = 0,75$ . Eine statistische Überprüfung des Sicherheitsniveaus der Verbundfugenbemessung nach EC-2 bei Anwendung auf Spritzbetonergänzungen anhand der Verbundfestigkeitsprüfungen der Spaltzugkörper ist [10] zu entnehmen.



*Bild 2: Experimentell ermittelte Mittelwerte bzw. 5%-Fraktile der Verbundzugfestigkeit*

Neben der Ermittlung der maximalen Fugentragfähigkeit wurden die freien Schwindverformungen der verwendeten Betone ermittelt. Während Schwindmaße meist an Festbeton nach DAfStb Heft 422 ermittelt werden, wurden zur Erfassung sämtlicher Zwangsspannungen verursachender Schwindverformungen, diese wie in [11], mit dem in Bild 3 gezeigten Versuchsaufbau, in Anlehnung an [12], gemessen. Neben der Berücksichtigung der Schwindverformungen des ersten Tages wird, durch die Geometrie der 75 mm hohen Platte, dem Austrocknungsverhalten sowie dem Ablauf der Hydratationswärme den in der Praxis vorhandenen Randbedingungen Rechnung getragen. Insgesamt werden die Schwindverformungen an drei Schwindplatten aus Normalbeton ( $w/z = 0,57$ ;  $\rho = 310 \text{ kg/m}^3$ ), zwei Schwindplatten aus Trockenspritzbeton ( $w/z = 0,51$ ;  $\rho = 374 \text{ kg/m}^3$ ) sowie zwei Schwindplatten aus Nassspritzbeton ( $w/z = 0,50$ ;  $\rho = 380 \text{ kg/m}^3$ ) geprüft.



*Bild 3: Schwindversuche an Spritzbeton; Frühschwinden + Trocknungsschwinden*

Um reibungsbedingte Verfälschungen des Schwindmaßes zu minimieren, werden die Schwindplatten aus Normalbeton direkt auf mehrere Lagen eingöhlter 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 eingöhlten Folien eine Lage Vlies mit den Seitenwänden der Schalung eingespannt. Nach dem Spritzvorgang und dem Wegklappen der seitlichen Schalung kann sich die Schwindplatte wieder frei verformen. Das Ausschalen erfolgt mit dem Erstarren. Die Schwindmessungen werden in der Regel zwei Stunden nach der Betonage gestartet. Bei Messung der Schwindverformungen am Nassspritzbeton erfolgt der Messbeginn, wegen der beschleunigten Mischung, schon eine Stunde nach Herstellung der Versuchsplatten. Sämtliche Schwindversuche finden unter einem konstanten Klima von 20°C und 65%RF statt.

Die Ergebnisse der experimentell ermittelten Schwindverformungen der verschiedenen Betone sind in Bild 4 dargestellt. Die Versuchsergebnisse sind zur Vereinheitlichung der Ergebnisse auf einen von der Dehnrate der Schwindverformungen abhängigen Zeitpunkt  $t_0$  bezogen. Dabei erreichten die beiden Spritzbetone bei einer annähernd zu Null gehenden Dehnrate mit  $\epsilon_{cs} = 1,24\text{‰}$  für Trockenspritzbeton und  $\epsilon_{cs} = 1,14\text{‰}$  für den Nassspritzbeton im Mittel mehr als doppelt so hohe Schwindverformungen wie Normalbeton  $\epsilon_{cs} = 0,54\text{‰}$ . Selbst bei Vergleich der Verformungen nach 25 Tagen sind die Schwinddehnungen von Spritzbeton nahezu doppelt so groß wie die hygrischen Dehnungen von Normalbeton.

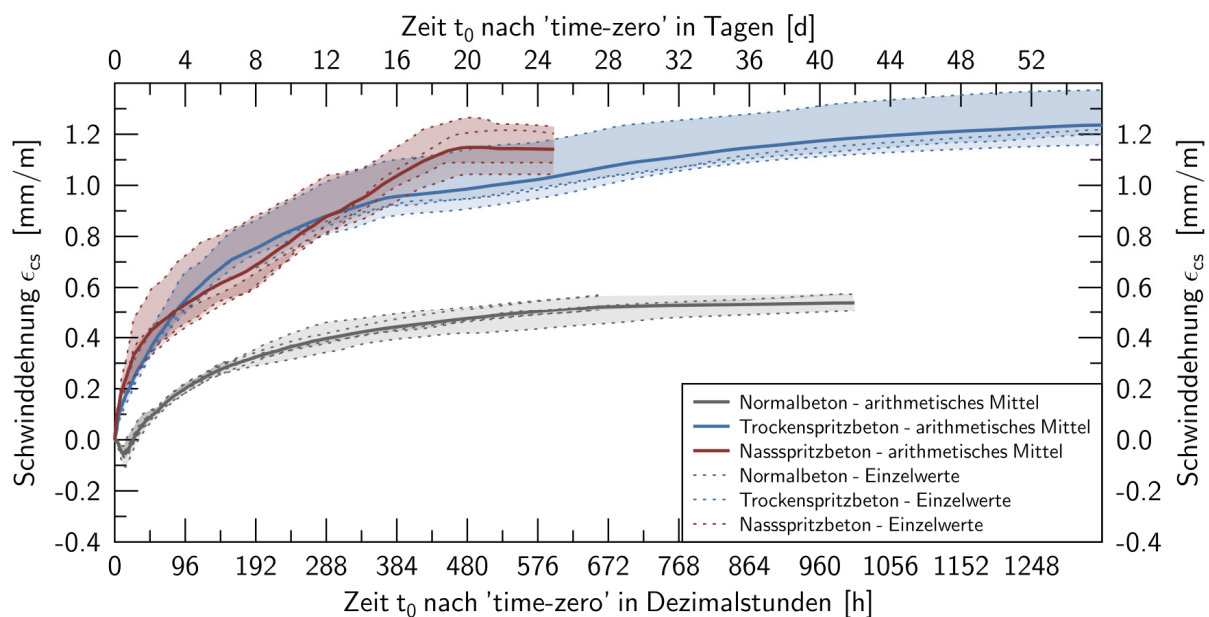


Bild 4: Einzelwerte sowie gemittelte Schwindverformungen der verschiedenen Betone

#### 4. Weitergehendes Bemessungsmodell für die Verbundfuge für die Anwendung im einschaligen Tunnelbau

Während im Hochbau die übertragbare Schubbeanspruchung unbewehrter Fugen durch die Zugfestigkeit gut beschrieben werden kann, werden bei der Anwendung der so ermittelten Widerstandskennwerte bei gekrümmten Tunnelschalen die aufnehmbaren Verbundspannungen unterschätzt. Bedingt durch die hohen Rauheiten der spritzrauen Oberfläche führt eine Scherbeanspruchung der Verbundfuge zu einem Aufgleiten der beidseitigen Spritzbeton-Verbundpartner, wobei infolge der Krümmung diese Dilatation durch die Bogentragwirkung einerseits und das Gebirge andererseits behindert wird (Bild 5). Durch die Dilatationsbe-

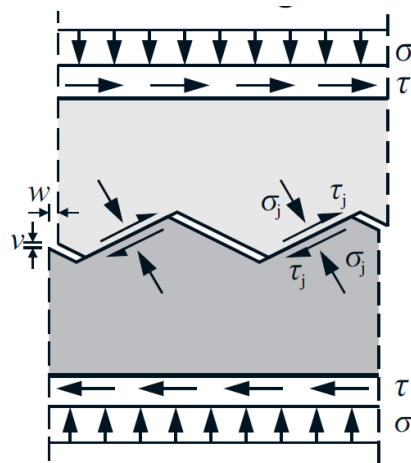


Bild 5: Aktivierung eines Reibwiderstandes durch Dilatationsbehinderung [13]

hinderung werden Druckspannungen senkrecht zur Fuge induziert. Dieser Vorgang kann als Aktivierung eines Reibwiderstands interpretiert werden. Aufgrund dieser Randbedingungen ist zu erwarten, dass im Tunnelbau eine Scherfestigkeit der unbewehrten, spritzrauen Verbundfuge selbst dann noch vorhanden ist, wenn die Fuge keine besondere Vorbehandlung erfahren hat und demzufolge nur eine geringe bzw. keine Adhäsionstragfähigkeit vorhanden ist. Eine rechnerische Ermittlung der Größe der induzierten Querdruckspannung und somit der Steigerung der Fugentragfähigkeit ist jedoch nicht ohne weiteres möglich.

In einer weitergehenden Studie sollen deshalb die in der Verbundfuge einer Tunnelschale wirkenden Spannungsverhältnisse untersucht und somit in einem weitergehenden Bemessungsmodell die maximal zulässigen Schubspannungen detaillierter erfasst werden.

Zur Quantifizierung einer möglichen Tragfähigkeitssteigerung werden Parameterstudien unter baupraktischen Bodenverhältnissen sowie unterschiedlichen Querschnittsgeometrien und Laststellungen an einem FEM-Modell durchgeführt. Dabei werden die Außenschale und die Innenschale des Tunnels mit zweidimensionalen Schalenelementen im ebenen Dehnungszustand modelliert. Die Berücksichtigung der Kraftübertragung über die Verbundfuge erfolgt durch nichtlineare Federn, die in radialer sowie tangentialer Richtung angeordnet werden (Bild 6). Über die Ergebnisse dieser Studie und die Auswirkungen auf die Bemessung wird im Vortrag berichtet.

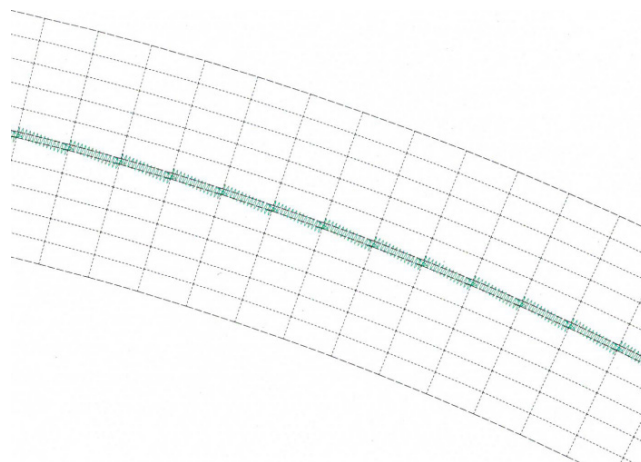


Bild 6: FEM-Modell mit Koppelfedern zwischen Innen- und Außenschale



## 5. Zusammenfassung

Der Nachweis der anzusetzenden Verbundzugfestigkeiten von Spritzbetonergänzungen wird im Hochbau mit den Bemessungsansätzen für Ortbeton des EC-2 geführt. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen der Verbundfestigkeit von Spritzbetonergänzungen zeigen, dass eine Oberflächenvorbereitung bis zur Rauheitskategorie „rau“ ausreichend ist. Ein systematischer Einfluss der Aufräumethode (HDW oder Strahlen mit festen Strahlmitteln) konnte nicht festgestellt werden. Eine weitere Steigerung der Rautiefe führte im Gegensatz zu mit Ortbeton ergänzten Verbundkörpern zu keiner Steigerung der Verbundfestigkeiten, da die Tragfähigkeit der Verbundkörper mit rauer Oberfläche bereits durch die monolithische Festigkeit begrenzt wurde. Dies kann durch die beobachtete Steigerung der Verbundfestigkeit, welche durch den pneumatischen Auftrag der Ergänzungsschicht begründet ist, erklärt werden.

Infolge des weitergehenden Nachweiskonzeptes könnte bei der einschaligen Spritzbetonbauweise in vielen Fällen eine aufwendige Fugenvorbereitung mit Hochdruckwasserstrahl entbehrlich werden, so dass die Wirtschaftlichkeit der Bauweise erhöht wird. Stattdessen könnte durch die Berücksichtigung des zusätzlichen Widerstands eine vereinfachte Fugenvorbereitung mit üblichen Maßnahmen (z.B. Entfernen loser Betonteile und von Rückprall, Druckluftreinigen, Vorbefeuchten) ausreichend sein, wenn nicht besondere Verunreinigungen (zum Beispiel Rußschichten aus längerdauerndem Fahrzeugverkehr) vorliegen.

## 6. Literatur

- [1] DIN 18551:2014-08:  
Spritzbeton – Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN 14487 und Regeln für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen. Berlin, 2014.
- [2] DIN EN 1992-1-1:2011-01:  
Eurocode 2, Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Berlin, 2011.
- [3] DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04:  
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter - Eurocode 2, Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Berlin, 2013.
- [4] Zilch, K.; Müller, A.:  
Grundlagen und Anwendungsregeln der Bemessung von Fugen nach EN 1992-1-1. Forschungsbericht, Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München, München, 2007.
- [5] DAfStb Heft 600:  
Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Heft 600, Beuth Verlag, Berlin, 2012.
- [6] Schwarz, J.:  
Statische Berechnung und Qualitätssicherung der Verbundfuge bei der Einschaligen Spritzbetonbauweise. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Tagungsband Spritzbeton – Technologie, Innsbruck-Igls, 1999.
- [7] Kupfer, H.; Kupfer, H.:  
Statische Wirkungsweise und Verbundverhalten der Spritzbetonschichten des einschaligen Tunnelbaus. In: Lukas, W.; Kusterle, W. (Hrsg.): Tagungsband Spritzbeton – Technologie, Innsbruck-Igls, 1990.
- [8] Behnen, G.:  
Entwicklung der einschaligen Spritzbetonbauweise. In: Schwarz, J. (Hrsg.): Nachhaltigkeit und Innovation in Baubetrieb und Tunnelbau, Band 3 der Schriftenreihe des Instituts für Baubetrieb, Universität der Bundeswehr, München, 2014.

- [9] Fischer, O.; Schmidt, S; Niedermeier, R.:  
Zur Schubkraftübertragung von Trockenspritzbetoneergänzungen. In: Massivbau im Wandel - Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger, Lehrstuhl für Massivbau der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2014.
- [10] Schmidt, S; Fischer, O.; Niedermeier, R.:  
Überprüfung des Sicherheitsniveaus der Verbundfugenbemessung nach EC-2 bei Anwendung auf Spritzbetoneergänzungen. In: Fischer, O. (Hrsg.): Tagungsband 18. Münchener Massivbau Seminar, Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München, München, 2014.
- [11] Cornejo-Malm, G.:  
Schwinden von Spritzbeton. Forschungsbericht, Institut für Bauplanung und Baubetrieb an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Zürich, 1995.
- [12] Wittmann, F.:  
Zur Ursache der sogenannten Schrumpfrisse. Zement und Beton, Nr. 85/86 (1975), 61 – 67.
- [13] Wingenfeld, D.:  
Fügetechnische Konstruktionslösung für Bauteile aus ultrahochfesten Beton (UHPC). Dissertation an der Technischen Universität München, München 2013.

### Zu den Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Schmidt, M.Sc.

Studium des Bauingenieurwesens an der FH Regensburg und der Technischen Universität Braunschweig; 2007-2009 Bauleitung, seit 2012 wiss. Mitarbeiter am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München

*sebastian\_schmidt@tum.de*

Dipl.-Ing. Gereon Behnen

Tätigkeit in den Technischen Büros der Firmen Dywidag, Walter Bau-AG und Bilfinger Berger AG als Planungsleiter internationaler Großprojekte, seit 2013 bei Büchting + Streit AG, München

*gereon.behnen@buechting-streit.de*

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

Studium Bauingenieur (TUM); wiss. Assistent, Universität der Bundeswehr München, Promotion 1994; Bilfinger Berger AG, verschiedene Fach- und Führungspositionen, ab 2002 Gesamtleitung Technisches Büro; seit 10/2009 Ordinarius für Massivbau (TUM), ab 2011 Vorstand der Büchting+Streit AG

*oliver.fischer@tum.de*