

3

115. Jahrgang März
2020 ISSN 0005-9900
A 1740

Sonderdruck

Beton- und Stahlbetonbau



Konsequenzen aus den Anforderungen der WU-Richtlinie für Elementwände

Rolf-Rainer Schulz
Herbert Kahmer

Konsequenzen aus den Anforderungen der WU-Richtlinie für Elementwände

Herstellung und Nachweis der Rauheit an den Innenoberflächen der Fertigteilschalen

Die neue DAfStb-Richtlinie für Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie) fordert für Betonfertigteile mit Ortbetoneergänzung eine vollflächige kornraue Oberfläche und den Nachweis einer mittleren Rautiefe von nunmehr 1,5 mm statt bisher 0,9 mm. Dies gilt demnach auch für den Bereich der Gitterträger, was sowohl herstellungstechnisch als auch messtechnisch eine besondere Herausforderung darstellt. Bei Elementwänden muss im Rahmen der Erstprüfung sogar an den Innenoberflächen beider Fertigteilschalen geprüft werden. In der laufenden Produktion und auf der Baustelle genügen normalerweise eine Sichtprüfung und der Vergleich mit einer Referenzplatte. In Zweifelsfällen ist jedoch mit dem Sandflächenverfahren oder mit lasergebundenen Verfahren zu prüfen. Die Richtlinie lässt allerdings offen, wie dies in der Praxis umzusetzen ist. Deshalb ist es das Ziel dieses Beitrags, Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

Stichworte Beton-Fertigteile; Elementwände; WU-Bauteile; Weiße Wannen; WU-Richtlinie; Rautiefe; Rauheit; Rauheitsmessung; Sandflächenverfahren; Laser-Profilmessung

Consequences from the directives of the German WU-Guideline for precast twin walls – Manufacturing and proving roughness on the inner surfaces of the precast shells
The new German guideline for waterproof constructions requires that precast twin walls with cast in place concrete completion must have an entirely rough surface with gravelled texture and also an average roughness depth of 1.5 mm in contrast to the former target of 0.9 mm. These requirements apply to the space within the steel lattice girders, too, which is quite a challenge for casting and proving. Initial tests have to be performed even on the inner surfaces of both shells. During current production and also on site visual examination and comparison with a reference slab will be sufficient. But in case of doubt sand patch tests or laser measurements have to be performed. Unfortunately the guideline does not answer the question how this could be realized in practice. Therefore the intention of this paper is to present solutions for this purpose.

Keywords precast concrete elements; precast twin walls; waterproof constructions; guideline for watertight constructions; roughness depth; roughness; roughness measurement; sand patch test; laser profile measurement

1 Ausgangssituation

Mit Erscheinen der WU-Richtlinie, Ausgabe Dezember 2017 [1], werden verschärfte Anforderungen an die Rautiefe von Betonfertigteilen mit Ortbetoneergänzung gestellt. Dabei wird explizit auf die Ermittlung einer mittleren Rautiefe nach DIN EN 1766, Abschnitt 7.2, oder nach dem Kaufmann-Sandflächenverfahren verwiesen. Das Sandverfahren kann aber aus naheliegenden Gründen nicht im Inneren von Wandbauteilen angewandt werden. Insbesondere die viel zu pauschale Beschreibung der Oberflächentopografie stellt die Eignung des Sandflächenverfahrens für die vorliegende Aufgabenstellung infrage. Wesentliche Texturmerkmale, die den Verbund zwischen Betonen unterschiedlichen Alters beeinflussen, werden nicht erfasst. Somit ist die Aussagekraft und Relevanz des Verfahrens für die Bewertung von Verbundeigenschaften zumindest fragwürdig. Diese Erkenntnis ist nicht neu, doch war bisher eine kritische Auseinandersetzung mit dieser einfachen und sehr plausibel erscheinenden Prüfmethode angesichts deren Beliebtheit aber auch mangels baustellengerechter Alternativen schwierig. Erst durch die Markteinführung kostengünstiger, praxisgerechter Laserverfahren wird sich das ändern. Die Richtlinie weist zwar auf die Möglichkeit des Einsatzes von lasergebundenen Verfahren hin, gibt aber keinerlei Hin-

weise, wie diese durchzuführen sind. Diese Lücke möchte dieser Beitrag schließen und in diesem Zusammenhang einige generelle Aspekte der Rauheitsmessung erörtern.

Allerdings können auch diese modernen alternativen Methoden ihre erweiterten Möglichkeiten nicht ausschöpfen, solange sie nur dazu dienen, einen dem Sandflächenverfahren vergleichbaren Rautiefenwert zu ermitteln. Ein wichtiges Anliegen dieses Beitrags ist es deshalb, zu zeigen, warum das herkömmliche Sandverfahren für die Verbundeigenschaften nicht das Maß aller Dinge sein kann und welche Anwendungs- und Bewertungsmöglichkeiten sich im Gegensatz dazu mit elektrooptischen Messverfahren ergeben.

2 Rauheitsanforderungen und die praktische Bedeutung für WU-Elementwände

2.1 Elementwandkonstruktionen

Elementwände stellen eine Weiterentwicklung der bekannten Elementdeckenbauweise dar. Die Elementdecke besteht aus einer Betonfertigteileplatte mit nachträglich auf der Baustelle ergänzter und statisch mitwirkender Ortbetonschicht. Das vorgefertigte Betonelement enthält



Foto: Vollert-Anlagenbau GmbH, Weinsberg

Bild 1 Maschinelles Aufrauen von Deckenplatten mit sogenannten am Betonverteiler befestigten „Messern“, die beim Überfahren in den frischen Beton eindringen und die Rillenstruktur einprägen. Bei der ersten Schale von Elementwänden ist dieses Verfahren allerdings meist nicht anwendbar, da die Gitterträger in der Regel quer zur Produktionsrichtung angeordnet sind.

Machine-roughening of ceiling slabs with so-called ‘knives’, which groove the fresh concrete along with the concrete spreader movement. This procedure is commonly not applicable for the first shell of a concrete twin wall because the lattice girders are usually oriented transverse to the movement direction.



Foto: Progress Maschinen & Automation AG, Brixen

Bild 2 Einwenden der ersten, ausgehärteten Beton-Fertigteilschale in den Frischbeton der zweiten Schale
Turning the already hardened first precast concrete shell into the fresh concrete of the second shell

die für Transport und Montage erforderliche Bewehrung in Form des Gitterträgers (Bild 1). Das vorgefertigte Plattenelement dient während der Bauphase als Schalung und ist nach Aufbringen und Erhärten des Ortbetons als Gesamtquerschnitt tragend. Im Endzustand gibt es hinsichtlich der Tragfähigkeit keine Unterschiede zu einer monolithisch hergestellten Decke.

Für die Elementwand wurde das Prinzip übernommen. Sie besteht aus zwei werkseitig hergestellten Fertigteileplatten, die durch Gitterträger auf Abstand miteinander verbunden sind (Bilder 2 und 3). Der freie Zwischenraum wird nach dem Einbau auf der Baustelle mit Ortbeton verfüllt. Auch hier gibt es statisch keine Unterschiede zu einer monolithischen, in Ortbetonbauweise hergestellten Stahlbetonwand [2].



Bild 3 Bei Elementwänden erfordert die zweite Fertigteilschale (im Bild unten) besondere Maßnahmen für das Aufrauen der Oberfläche.
The second shell of a precast concrete element (see at the bottom of the image) requires special measures for roughening.

2.2 Elementwände für WU-Konstruktionen

Die wasserundurchlässige (WU) Betonwand als Ortbetonkonstruktion zählt seit mehreren Jahrzehnten zu den anerkannten Bauweisen. Ihr Prinzip basiert auf der Doppelrolle des Betons, der sowohl die dichtende als auch die statische Funktion des Bauteils übernimmt. Jedoch reicht allein die Verwendung eines wasserundurchlässigen Betons nicht aus, um ein dichtes Bauwerk herzustellen. Vielmehr sind für WU-Bauwerke gemäß WU-Richtlinie [1] eine Reihe von weiteren Maßnahmen erforderlich, die auch die Elementwand betreffen.

Seit über 20 Jahren hat sich die Elementwand für WU-Konstruktionen bewährt [3, 4] und seither eine weite Verbreitung erlangt. Bei dieser Bauart steht die produktionsbedingte Fuge zwischen Fertigteilschale und Kernbetongergänzung im Fokus, da für die Wasserundurchlässigkeit solcher Wände die Innenoberflächen der vorgefertigten Schalen und die einhergehende Verbindung zum Kernbeton eine wichtige Rolle spielen.

Der Verbund zwischen Fertigteilschale und nachträglicher Ortbetongergänzung ist durch unterschiedliche Phänomene zu beschreiben, die sich hinsichtlich der monolithischen Tragwirkung nach EC2 [5, 6] aus Haftung und Reibung sowie dem Stahltraganteil der Gitterträger zusammensetzen. Dabei hat die Rauheit der Oberfläche einen wesentlichen Einfluss. Unterschieden werden vier Kategorien der Rauheit, und zwar sehr glatt, glatt, rau und verzahnt. Bislang fehlt allerdings eine entsprechende Zuordnung der Oberflächenrauheit hinsichtlich deren Wasserundurchlässigkeit. So ermöglicht die Kategorie „verzahnt“ zwar die bestmögliche Schubkraftübertragung, doch ist sie in der Ausführung als Variante (c) (Bild 4) für die abdichtende Wirkung keineswegs optimal, weil sie im Gegensatz zu den Varianten (b) und (d) wenig Kontaktfläche bietet und bei unvollkommener Adhäsion keine verlängerten Umlaufwege für eventuell eindringen-

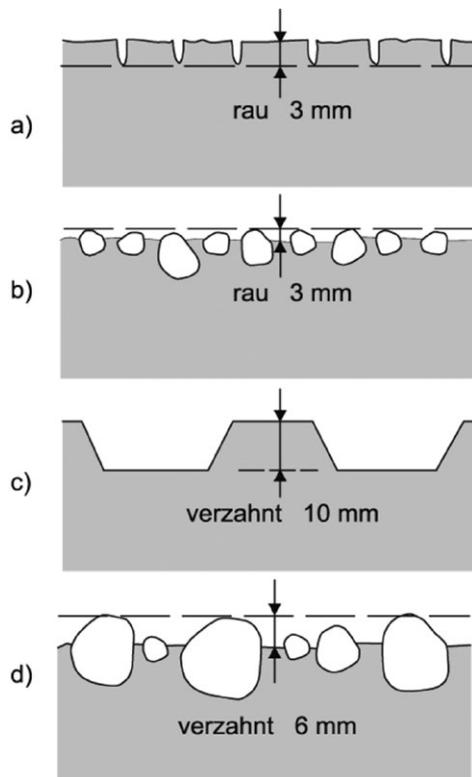


Bild 4 Rauheitskategorien „rau“ und „verzahnt“ nach Heft 600 DAfStb [6]
 Roughness categories 'rough' and 'interleaved' according to [6]

des Wasser. Dies gilt besonders dann, wenn die Profilierung durch in den Frischbeton eingelegte glatte Kunststoffleisten erzeugt wird. Durch die Forderung der WU-Richtlinie nach „kornrauen“ Oberflächen ist diese Variante jedoch ausgeschlossen.

2.3 Anforderungen aus der WU-Richtlinie

Die Ende 2017 erschienene Neufassung der WU-Richtlinie [1] hat über 15 Jahre nach der Erstausgabe [7] mehrere Ansätze postuliert, um die Ausführungsqualität bei Elementwänden in WU-Bauwerken weiter zu heben. Dazu gehört vor allem die Verschärfung der Anforderungen an die Rauheit der Fertigteilplatten-Innenoberflächen. Hier ist man im Abschnitt 11.2.2(2) [1] dem nationalen Anhang des EC2 [5] bzw. den zugehörigen Erläuterungen in Heft 600 DAfStb [6] gefolgt, und hat eine Rautiefe R_t von 1,5 mm nach dem Sandflächenverfahren vorgeschrieben. Dies ist für das Bauen im Grundwasser vorteilhafter als die bisherigen 0,9 mm und deckt sich tendenziell mit der Empfehlung von 1,2 mm, die bereits seit 2008 in der Übergangsphase von der alten Normgeneration auf den EC2 von mehreren Herstellern systematisch in die Praxis umgesetzt wurde und auch in deren Bemessungssoftware für Verbundnachweise eingeflossen ist. Mit dieser Regelung hat man seither für WU-Wände sehr gute Ergebnisse erzielt [3, 8], auch weil die nach dem Einwenden der ersten Fertigteilsschale (Bild 2) schwer zugängliche zweite Fertigteilsschale zumindest am Elementrand zusätzlich mechanisch aufgeraut wird, da die gewünschte Rauheit durch betontechnologische Maßnahmen und Verdich-

tungstechnik bisher nicht immer und überall zielsicher zu realisieren war.

2.4 Praktische Bedeutung der Rauheit und Konsequenzen für die Fertigteilherstellung

Hinsichtlich der Verbundwirkung wird nach [9] zwischen spezifischer und mechanischer Adhäsion unterschieden. Die spezifische Adhäsion beruht auf interatomaren und intermolekularen Bindungskräften. Da zwischen Alt- und Neubeton kaum chemische Reaktionen stattfinden, ist die spezifische Adhäsion entsprechend gering und die Verbundwirkung muss hauptsächlich durch mechanische Adhäsion erfolgen. Dabei verklammern bzw. verzahnen sich die Betone im ausgehärteten Zustand. Während dieser Effekt im Wesentlichen durch eine makroskopische Rauheit des Untergrunds erreicht wird, trägt die mikroskopische Rauheit zur Vergrößerung der Kontaktfläche bei. Dies ist der Grund dafür, dass nach Heft 600 DAfStb [6] bei sehr glatter Oberfläche für die Bemessung der Schubtragfähigkeit keine Adhäsion in Ansatz gebracht werden darf ($c = 0$) und der Adhäsionsbeiwert c mit steigender Rauheitskategorie zunimmt. Es ist davon auszugehen, dass dies in ähnlicher Weise auch für die Erzielung einer ausreichenden Undurchlässigkeit gilt. Deshalb fordert schon die alte WU-Richtlinie [7] eine vollflächige kornraue Verbundfläche. Dies kann, wie oben erwähnt, bei der zuerst hergestellten Fertigteilsschale mehr oder minder zielsicher durch betontechnologische Maßnahmen wie KonsistenzEinstellung und Verdichtungstechnik [4, 10] bzw. mit einem Besenstrich [11] erreicht werden. Der Besenstrich bzw. eine Oberflächenbearbeitung mittels Rechen war jedoch bei der zweiten Fertigteilsschale nur am Rand ausführbar. Zwar kann die Oberfläche des Frischbetons vor dem Einwenden der ersten, ausgehärteten Schale (Bild 2) mechanisch aufgeraut werden, doch ändert sich die eingeprägte Textur durch den anschließenden Verdichtungsvorgang. Während sich nach [12] bisher der Nachweis der Rauheit über das Sandflächenverfahren erübrigte, wenn bei einem Zinkenabstand von maximal 40 mm eine Rautiefe von 3 mm erreicht wird (vgl. Bild 4a), wird dies im DBV-Rundschreiben [13] als nicht mehr ausreichend angesehen, weil bei diesem Verfahren im Bereich der Gitterträger glatte Flächen, sogenannte „Wasser-autobahnen“, verbleiben. Hinzu kommt die Besorgnis (vgl. [6]), dass es wegen zahlreicher Einflussfaktoren auf das Ansteifen des Betons schwierig ist, den richtigen Zeitpunkt für den Einsatz des Rechens (Bild 1) zu wählen. Bei zu früher Anwendung, d.h. zu weicher Konsistenz, besteht die Gefahr, dass die eingezogene Rillenstruktur verläuft. Bei zu spätem Recheneinsatz und einsetzendem Erstarren kann hingegen das Betongefüge in der Randzone durch Herausreißen von Gesteinskörnern nachhaltig gestört werden. Demgegenüber bergen betontechnologische Maßnahmen die Gefahr, dass kleine Störungen im zeitlichen Ablauf zu einem sehr negativen Ergebnis führen.

Mit den von $R_t = 0,9$ mm auf 1,5 mm gestiegenen Rauheitsanforderungen genügt auch ein Besenstrich nicht

mehr, um eine entsprechende Texturtiefe zu erzielen. Deshalb sah sich die Industrie zur Entwicklung neuer Technologien für die Herstellung und für den Nachweis der geforderten Rautiefen veranlasst. So lässt sich die geforderte vollflächige Rauheit mithilfe eines neu entwickelten Teleskoprechs sogar im Bereich der Gitterträger erreichen.

3 Prüfmethoden

3.1 Das Sandflächenverfahren

3.1.1 Aussagekraft

Bewährt hat sich die mit dem Sandflächenverfahren ermittelte Rautiefe R_t [14, 15] für die Bestimmung von Verbrauchsmengen bei Spachtelmassen und Beschichtungen sowie zur Ermittlung von Schichtdickenzuschlägen nach [16–18]. Auch der Verdrängungsraum bei gleitmittelbelasteten Fußböden kann damit abgeschätzt werden. Schließlich handelt es sich um eine volumetrische Methode [19]. Nicht gerechtfertigt ist jedoch der Referenzstatus des Sandverfahrens für die Beurteilung von Verbundeigenschaften, wie ihn die WU-Richtlinie [1], Heft 600 DAfStb [6] und der Gelbdruck der Instandhaltungsrichtlinie [17] vorsehen. Bild 5 [20] verdeutlicht, dass das Sandvolumen in den Vertiefungen keinerlei Aussage über den tatsächlichen Charakter der Oberfläche liefert. Für die mechanische Adhäsion, also für das Eindringen und Verklammern des aufzutragenden Stoffes, ist die Mikro- und Makrotopografie des Untergrunds jedoch von entscheidender Bedeutung. Was den Verbund betrifft, sind mit dem Rautiefen-Kennwert R_t sogar völlig inakzeptable Fehlinterpretationen möglich. Wie Bild 6 veranschaulicht, ergeben sich bei einer geringen Anzahl von Noppen und entsprechend geringer Verbundfläche größere Rautiefen als bei der größeren Zahl gleich hoher Noppen. Solche Verhältnisse (extrem positive Texturen) können beim Aufrauen von Betonen mit der Sieblinie C entstehen, weil darin nur verhältnismäßig wenige grobe Körner enthalten sind, die beim Aufrauen die Rauspitzen bilden. Im Gegensatz dazu wird das 3 mm tiefe Aufrauen mittels Rechen bei einem Zinkenabstand von 40 mm (Bild 4a) mit dem Sandverfahren grundsätzlich zu ungünstig beurteilt (vgl. [8]). Die mittlere Rautiefe R_t ist offenbar bei sehr

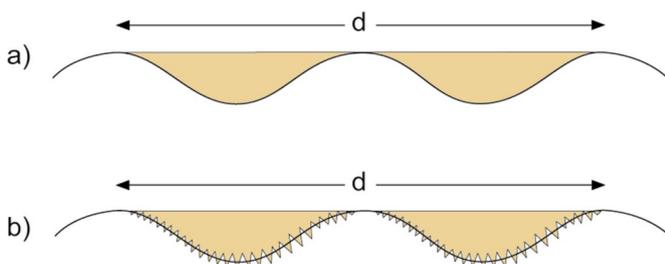


Bild 5 Gleiche mittlere Rautiefe R_t trotz unterschiedlicher Rauheit und Verbundeigenschaften [20]
Same average roughness depth R_t despite different roughness and composite properties [20]

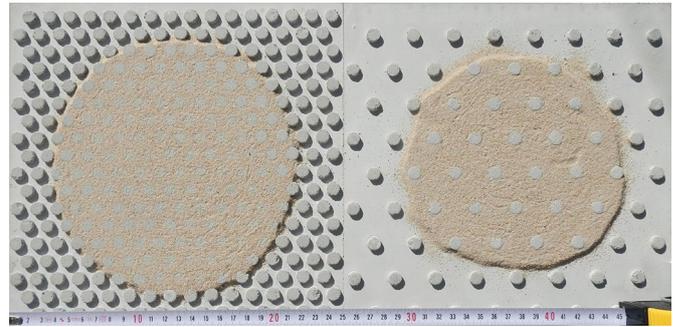


Bild 6 Modellversuch zur Erläuterung des Einflusses nichtneutraler Texturen: Trotz gleicher Noppenhöhe (3,2 mm) bei unterschiedlicher Anzahl von Noppen, stark differierende mittlere Rautiefen: links $R_t = 1,95$ mm, rechts $R_t = 2,77$ mm
Model test to explain the effects of non-neutral textures: Despite the same height of the knobs (3.2 mm) widely differing average roughness depths depending on varying amounts of knobs: $R_t = 1.95$ mm on the left, $R_t = 2.77$ mm on the right

positiven oder sehr negativen Texturen, bei denen Erhebungen und Vertiefungen nicht in einem ausgewogenen Verhältnis stehen, kein geeignetes Bewertungskriterium. Dies geht auch aus einem Hinweis in DIN EN 13036-1 [19] hervor, wonach das Verfahren keine komplette Bewertung der Merkmale einer Oberflächentextur liefert und insbesondere bei der Interpretation von Prüfergebnissen an porösen plateauartigen Oberflächen und Oberflächen mit tiefen Rillen Vorsicht geboten ist.

3.1.2 Einflussfaktoren

Zu bemängeln ist auch die Unschärfe des Sandflächenverfahrens. Die Ungenauigkeiten beginnen bereits bei der Auswahl und Bezeichnung der Prüfvorschrift. Es wird häufig von Prüfung „nach“ Kaufmann gesprochen, obwohl meist nur „in Anlehnung“ an das Verfahren von Kaufmann [21] geprüft wird. Das Originalverfahren erfordert jedoch als Prüfmedium mit dem Normsand fein eine spezielle Sandsieblinie, die sich von den Körnungen der gängigeren Durchführungsvarianten nach DAfStb Instandsetzungsrichtlinie [16] und ZTV-ING [18] nennenswert unterscheidet. Wie in [14] und [15] dargelegt, weichen auch die Ergebnisse nach den beiden letztgenannten Prüfvorschriften im Rautiefenbereich unterhalb von $R_t = 0,7$ mm deutlich voneinander ab. Die WU-Richtlinie [1] bringt mit DIN EN 1766 [22] eine Prüfvorschrift ins Spiel, die sich durch ein extrem feines Quarzmehl (0,05–0,1 mm) sowie durch eine größere Verteilerscheibe ($\varnothing 65$ mm statt $\varnothing 50$ mm) besonders deutlich von den vorgenannten Verfahren abhebt. Da die genannte Körnung in Deutschland nicht oder nur schwer zu beschaffen ist und auch die entsprechenden Siebe ungebrauchlich bzw. nur selten vorhanden sind, werden Praktiker voraussichtlich auf benachbarte handelsübliche Korngruppen ausweichen. Abweichungen sind somit vorprogrammiert. Hinzu kommt, dass mit zunehmender Feinheit der Quarzmehle der Gehalt an lungengängigem Material steigt und dass deshalb bei längerer Exposition entsprechende Staubschutzmaßnahmen vorzusehen sind.

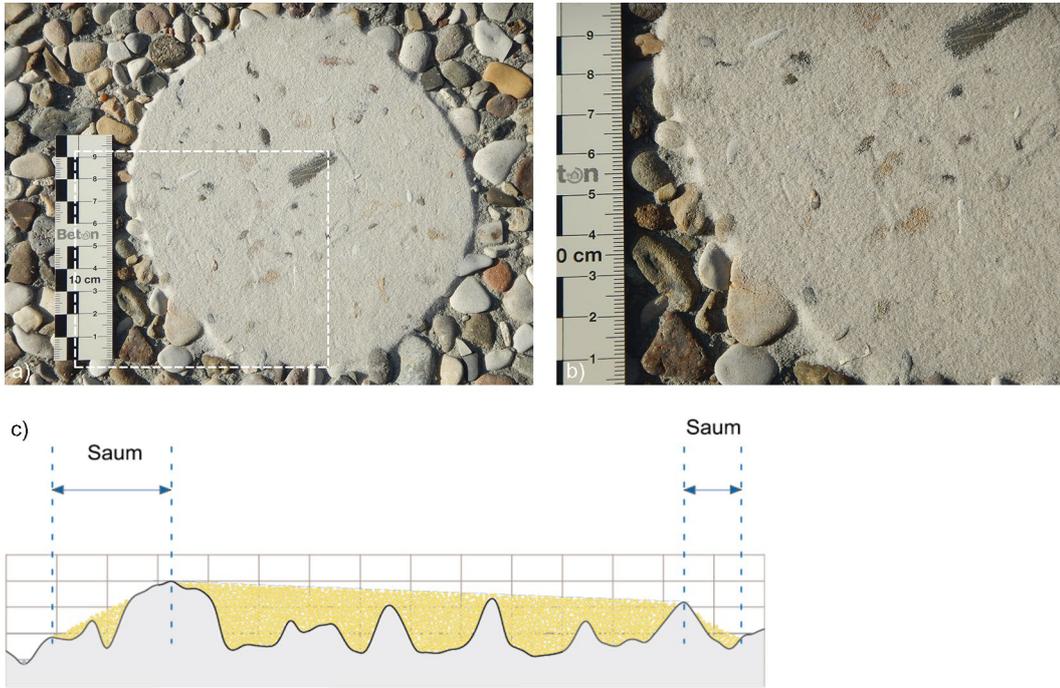


Bild 7 a) Schwierigkeiten bei der Durchmesserbestimmung durch auslaufende Ränder; b) vergrößerter Ausschnitt aus Bild 7a; c) auslaufende Ränder eines Sandflecks, die die Durchmesserbestimmung bei zunehmender Rauheit erschweren und zu erhöhten Messunsicherheiten führen
 a) Difficult diameter measuring due to indefinite seams; b) enlarged section of figure 7a; c) indefinite seams of a sand patch which complicate diameter measurements and provoke increased measurement uncertainties

Zu empfehlen wäre deshalb die Festlegung auf das Verfahren nach dem Gelbdruck der Instandhaltungsrichtlinie [17]. Hierbei handelt es sich um eine präzisierte Version der Prüfvorschrift in [16]. Die darin vorgeschriebene Körnung ist nicht so grob wie diejenige in ZTV-ING [18] und daher besser für geringe Rautiefen geeignet. Die Verfügbarkeit des Prüfmediums ist gegeben und außerdem wird die Einheitlichkeit (Systemkonformität) innerhalb der Richtlinien des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton gewahrt.

Ein weiteres Manko ist, dass die Prüfergebnisse beim Sandverfahren sehr stark streuen, besonders, wenn diese von unterschiedlichen Prüfpersonen ermittelt werden. Denn die Intensität und Dauer, mit der der Sand verteilt wird, aber auch die Sorgfalt bei der Bestimmung des Sandfleckdurchmessers, liegen im Ermessen der Prüfperson. Außerdem genügt es bei starken Abweichungen von der Kreisform nicht, sich auf zwei rechtwinklig zueinander liegende Durchmesserbestimmungen zu beschränken. Auch das eingesetzte Sandvolumen wirkt sich signifikant auf die Streuungen aus. Die Vorgaben liegen je nach Prüfvorschrift zwischen 5 und 50 ml. Da man mit zunehmender Rauheit einen zerfaserten, schwer zu definierenden und daher nicht mehr eindeutig ablesbaren Rand des Sandflecks erhält, bestehen Ableseunsicherheiten innerhalb eines etwa 5 mm bis 10 mm breiten Saums (Bilder 7 a bis c). Die daraus abgeleiteten prozentualen Messunsicherheiten (Bilder 8 und 9) hängen von der Größe des Sandflecks ab und errechnen sich aus dem Unterschied zwischen den mittleren Rautiefen bei Durchmesserbestimmung am Innen- und Außenrand des Saums. Sie wirken sich umso stärker auf das Messergebnis aus, je klei-

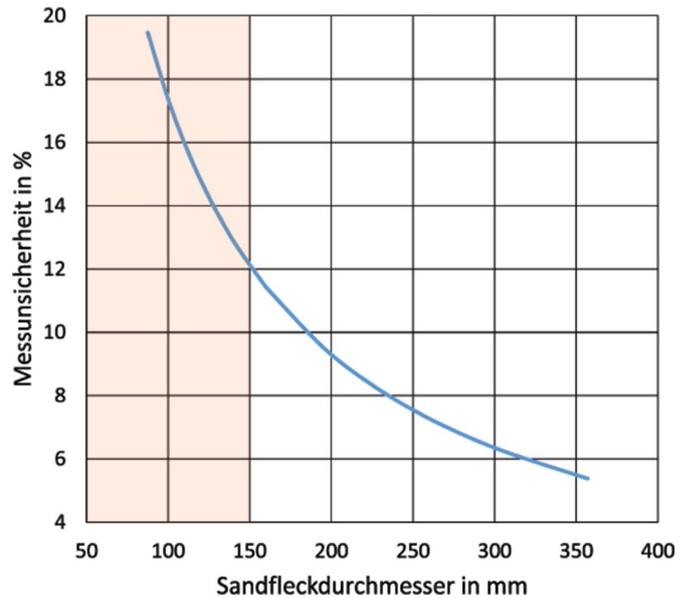


Bild 8 Stark ansteigende Messunsicherheit bei Sandfleckdurchmessern unter 150 mm und einer angenommenen Saumbreite von 5 mm
 Rapidly rising measurement uncertainties with diameters lower than 150 mm and an assumed seam width of 5 mm

ner das eingesetzte Sandvolumen und der daraus entstehende Sandfleckdurchmesser sind. Daher sollte das Sandvolumen so gewählt werden, dass der Sandfleckdurchmesser im Minimum 15 cm beträgt. Bild 9 lässt erkennen, wie ein zunehmendes Volumen des Prüfmediums die Messunsicherheit für R_t bei einer angenommenen Saumbreite von 5 mm bei größer werdenden Rautiefen verringert. Oft ist der Saum sogar breiter und der positive Effekt eines größeren Sandvolumens wäre noch deutlicher.

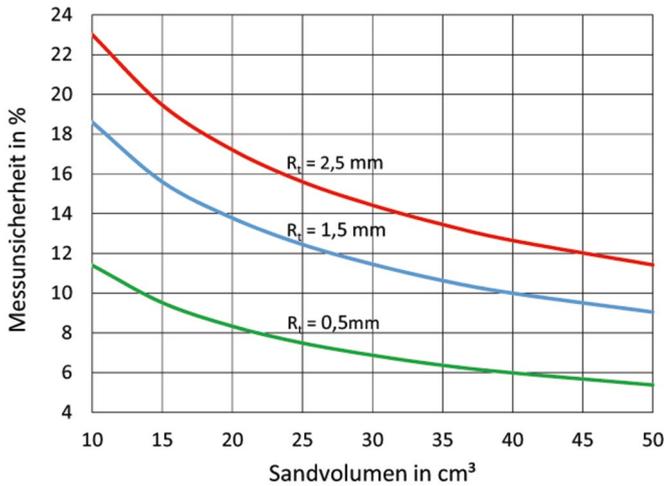


Bild 9 Messunsicherheit in Abhängigkeit vom verwendeten Sandvolumen bei einer angenommenen Saumbreite von 5 mm
Measurement uncertainties depending on the volume of sand, calculated with an assumed seam width of 5 mm

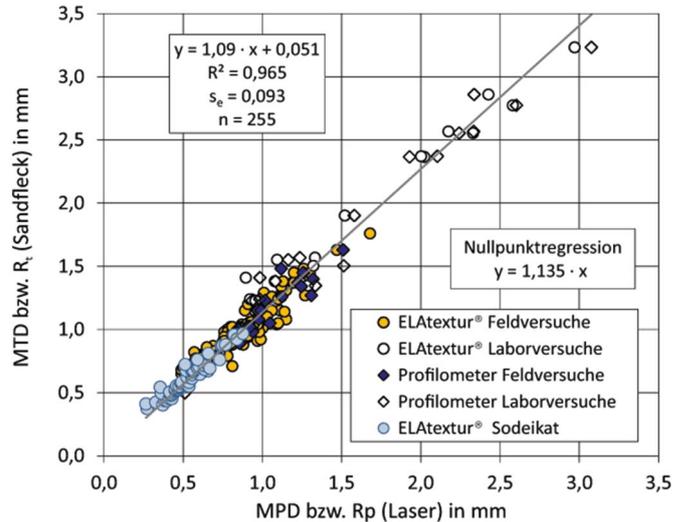


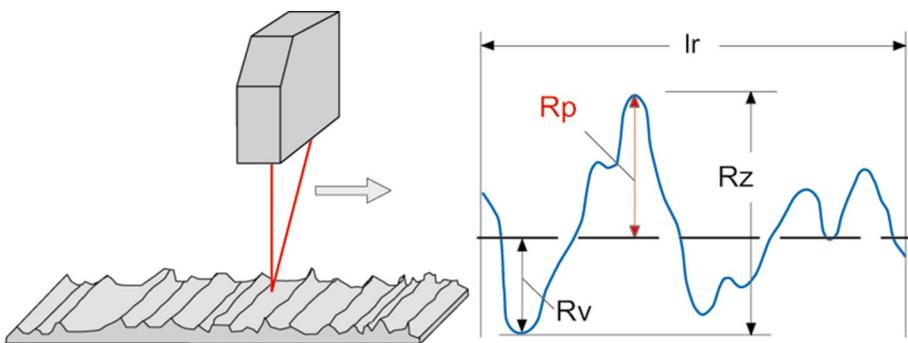
Bild 10 Korrelation zwischen R_p (Laser) und R_t (Sandfleck), eigene Messwerte (vgl. [14, 15]) ergänzt durch Daten aus [29]
Correlation between R_p (laser) and R_t (sand patch), own measurement results (cf. [14, 15]), supplemented by data from [29]

3.2 Laser-Profilmessverfahren

3.2.1 Geräte und Vergleichsmessungen

Laserabstandssensoren für den Nahbereich sind weit verbreitete, sehr ausgereifte und zuverlässige Hilfsmittel in der industriellen Messtechnik. Sie erlauben in Verbindung mit schrittmotorgesteuerten Positionierungseinrichtungen eine sehr genaue berührungslose Aufnahme von Oberflächenprofilen. Linienlaser können diese Aufgabe besonders schnell auch ohne mechanischen Antrieb bewältigen, weil sie in einem Arbeitsgang eine ganze Profillinie erfassen [14, 15, 23, 24]. Bei stochastischen Oberflächen, wie sie auf dem Rütteltisch entstehen oder wie sie durch Strahlen oder Auswaschen erzeugt werden können, genügt eine ausreichende Anzahl solcher gleichmäßig über den Prüfbereich verteilter Profillinien, um die Oberfläche statistisch hinreichend abgesichert zu beschreiben. Bei gerillter Textur sollen die Profillinien möglichst quer zu den Rillen verlaufen.

Inzwischen liegen zahlreiche Messergebnisse vor, die eine gute Korrelation (Bild 10) des entsprechenden Profilparameters R_p (Bild 11) mit der mittleren Rautiefe R_t des Sandflächenverfahrens belegen, wenn die Prüfung nach DIN EN ISO 13473-1 [25] erfolgt und die Messgeräte die Anforderungen nach DIN ISO 13473-3 [26] erfüllen. Eigene Versuche mit sehr unterschiedlichen Betonoberflächen ergaben auf eine Dezimalstelle gerundet eine Umrechnung von Laserergebnissen in Sandfleckresultate mit $R_t = R_p \cdot 1,1$. Die derzeit gültige Fassung von DIN EN ISO 13473-1 [25] sieht zwar mit $R_t = 0,8 \cdot R_p + 0,2$ einen kleineren Umrechnungsfaktor vor, doch wird dieser in der Entwurfsfassung der DIN EN ISO 13473-1 von 2017-08 [27] aufgrund neuerer Erfahrungen korrigiert und mit 1,1 nun der gleiche Umrechnungsfaktor empfohlen, den die eigenen Ergebnisse geliefert haben. Dadurch und durch umfangreiche Literaturdaten ist hinreichend belegt, dass die Umrechnung gemäß Heft 600 DAfStb [6] unzutreffend ist und nicht mehr angewandt werden soll-



- R_p = Höhe der größten Profilspitze (Mittel aus R_{p1}, R_{p2}, \dots)
- R_v = Tiefe des größten Profiltales (Mittel aus R_{v1}, R_{v2}, \dots)
- R_z = größte Höhe (Höhendifferenz) des Profils (Mittel aus R_{z1}, R_{z2}, \dots)
- l_r = Einzelmessstrecke (je nach Norm Mittel aus 2 l_r oder 5 l_r)

Bild 11 Definition der Parameter R_z , R_p und R_v nach DIN EN ISO 4287 [28]
Definition of the parameters R_z , R_p and R_v according to DIN EN ISO 4287 [28]



Bild 12 SL-Laser-Profilometer, neues mobiles Messsystem
SL-Laser-Profilometer, a new mobile measurement device

te, zumal diese nur auf einer sehr geringen Zahl von Laborergebnissen beruht, die mit heute nicht mehr üblichen Auswertemethoden gewonnen wurden. Eine Anpassung ist vor allem deshalb dringend erforderlich, weil das Umrechnungsverhältnis mit 1,36 (Tabelle H6.1 in [6]) deutlich auf der unsicheren Seite liegt.

Bei Prüfungsdurchführung und -auswertung nach DIN EN ISO 13473-1 [25] in Verbindung mit DIN ISO 13473-3 [26] ist es möglich, auch mit verschiedenen Lasersensoren vergleichbare Resultate zu erzielen (Bilder 14 und 15). Das gelingt unter anderem dadurch, dass die Geräte nach DIN ISO 13473-3 [26] bestimmte Mindestanforderungen erfüllen müssen und weil die nach DIN EN ISO 13473-1 [25] anzuwendenden Filtermethoden zur Rauschunterdrückung etwaige Unterschiede im Mikrometerbereich egalisieren. Auf diese Weise wird zwar die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Geräte verbessert, doch gehen dabei auch Informationen über die Mikrotextur der Oberfläche verloren. Soll diese beispielsweise zur Abschätzung der Größe der Kontaktfläche zusätzlich erfasst werden, sind von der Norm abweichende Vorgehensweisen erforderlich. Zu beachten ist, dass an sehr steilen Kanten oder Profilelementen Abschattungseffekte auftreten können, die den reflektierten Laserstrahl unterbrechen. Dies verursacht punktuell ungültige Messwerte, die bei der Auswertung erkannt und von der Software eliminiert oder egalisiert werden müssen. Durch Anordnung des Lasers quer zur Bewegungsrichtung (vgl. Bilder 11 und 12) lassen sich allerdings solche Störeinflüsse minimieren. Weitere Störfaktoren sind starke Fremdlichteinwirkungen, Nässe sowie stark reflektierende (z.B. Glimmer) oder durchscheinende Partikel an der Oberfläche. Die Messungen sollten an möglichst trockenen Oberflächen erfolgen, da Feuchte das Ergebnis beeinflussen kann.

3.2.2 Erweiterte Auswertemöglichkeiten beim Laser-Profilmessverfahren

Durch Zwischenauswertungen unmittelbar vor Ort und durch den Vergleich von R_p und R_v bzw. über das Ver-

hältnis von R_p/R_z (Bild 11) ist es schon im Laufe der Untersuchungen möglich, wichtige Zusatzinformationen zu gewinnen und ggf. auf Besonderheiten z.B. durch zusätzliche Messungen und/oder besonders sorgfältige Inaugenscheinnahme zu reagieren. R_z beschreibt z.B. die Strahl-, Auswasch- bzw. Ausbürsttiefe im untersuchten Bereich. Das Verhältnis von R_p/R_v oder von R_p/R_z liefert zum Beispiel Informationen darüber, ob es sich um eine neutrale oder positive bzw. negative Textur handelt. Bei extremen Unterschieden zwischen R_p und R_v ist die Textur einer gesonderten Beurteilung zu unterziehen. So ist zum Beispiel festzustellen, ob eine vermeintlich günstige Rautiefe allein durch einzelne exponierte Körner zustande kommt und in keiner Relation zu der zu erwarteten Verbundwirkung steht (vgl. Bild 6). Im Gegensatz dazu können die mit den herkömmlichen Parametern R_t bzw. R_p zu ungünstig beurteilten Oberflächen mit tiefen Rillen oder Poren (vgl. Bild 4a) mithilfe der Zusatzinformationen angemessener interpretiert werden. Bei weitergehenden nachträglichen Auswertungen ist vor allem der Parameter R_{mr} nach [28] für das Schubtragverhalten von Interesse, weil er Auskunft über die Traganteile der Textur gibt.

4 Rauheitsmessung in Elementwänden

4.1 Lichter Raum zwischen den Gitterträgern

Für die vorliegende Aufgabenstellung „Rauheitsmessung im Inneren von Elementwänden“ waren die bisher verfügbaren Geräte allein wegen der Baugröße oder wegen des erforderlichen Messabstands ungeeignet. Es musste deshalb ein neues, besonders kompaktes und schlankes Gerät konzipiert werden, welches auch auf der Baustelle unter räumlich sehr beengten Verhältnissen einsetzbar ist. Linienlaser kamen wegen des dafür erforderlichen großen Messabstands leider nicht in Betracht. Zudem wäre deren hoher Gerätepreis kontraproduktiv für die Akzeptanz und Verbreitung dieses Messverfahrens. Mit dem in Bild 12 gezeigten Prototyp einer Neuentwicklung wurde die gewünschte Mobilität und Einsetzbarkeit für den vorgesehenen Zweck erreicht. Inzwischen werden bereits mehrere Exemplare in Fertigteilwerken unter Praxisbedingungen erprobt.

Das Konzept konnte durch Verlängerung des Aluprofils so ergänzt werden, dass Messungen innerhalb von Hohlräumen bis in mehrere Meter Tiefe möglich sind. Die Bilder 13a und b zeigen die Durchführung von Rauheitsmessungen im Inneren von Elementwänden. Dabei befindet sich der Linearantrieb für den Lasersensor im vorderen Teil eines 2 m langen Aluprofils. Zu den Voraussetzungen gehört, dass der lichte Abstand zwischen den Fertigteil-schalen mindestens 10 cm beträgt und die Freifläche zwischen den Gitterträgern mindestens 15 cm breit ist. Die Auswertung kann menügesteuert unmittelbar nach jeder Einzelmessung oder nach einer Prüfserie vor Ort erfolgen. Es werden dabei über den Mikrocomputer in der Mess- und Steuerkonsole die Parameter R_z , R_p , R_v

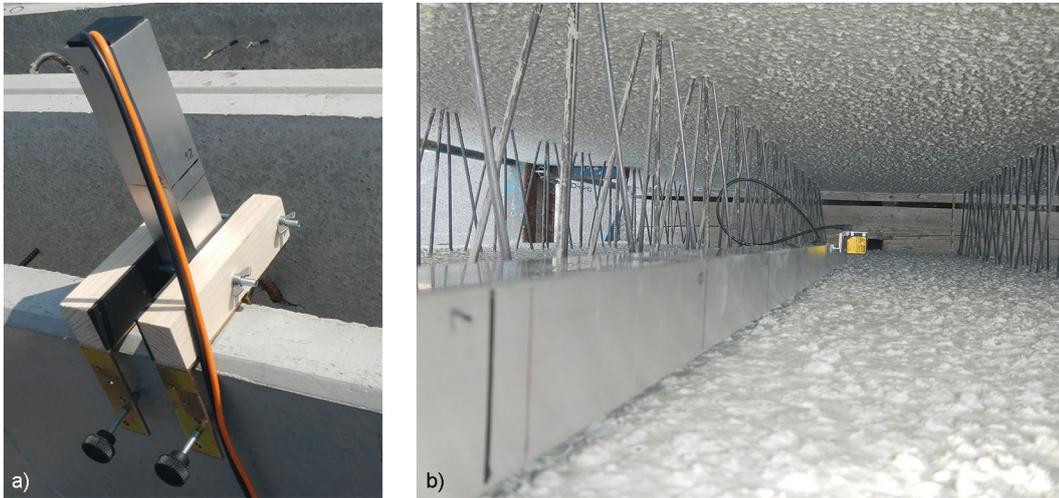


Bild 13 a) Führung und Haltevorrichtung für das verlängerte Aluprofil; b) Laser-Profilmessungen im Inneren einer Elementwand
 a) Guide and mounting for the lengthened aluminium beam; b) Laser profile measurements on the inner surfaces of the precast concrete twin walls

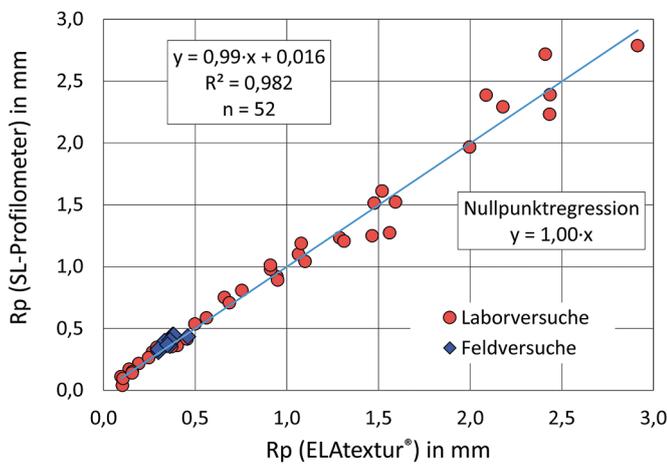


Bild 14 Korrelation zwischen den Messergebnissen des ELAtextur®-Gerätes und des SL-Profilometers
 Correlation between the measurement results of the ELAtextur® laser device and the SL-Profilometer

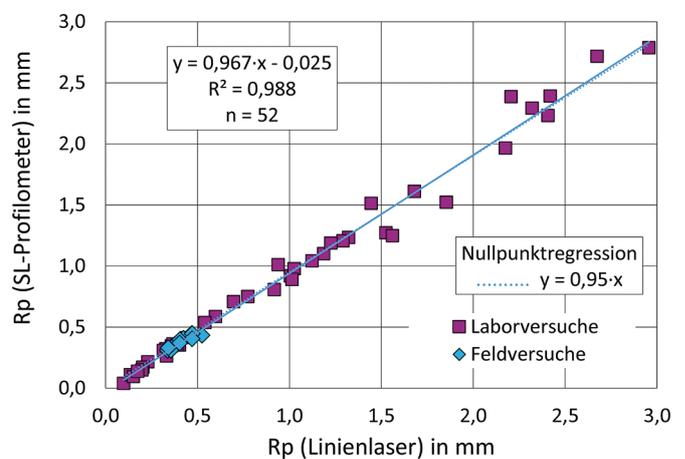


Bild 15 Korrelation zwischen den Messergebnissen des Linienlasers und des SL-Profilometers
 Correlation between the measurement results of a line laser and the SL-Profilometer

(Bild 11) und R_a berechnet und statistisch ausgewertet. Die Berechnung weiterer für den Verbund interessanter Parameter wie z.B. R_{mr} (Materialanteil) ist mit den gespeicherten Daten und externer Software möglich. Nach DIN EN ISO 13473-1 [25] sind für einen Prüfbereich wenigstens zehn Einzelmessungen von mindestens 100 mm Länge je Prüfabschnitt erforderlich, was bei der vorhandenen Messlänge von 200 mm mindestens fünf Einzelmessungen entspricht. Insbesondere bei sehr heterogenen Oberflächen empfiehlt es sich jedoch, die Anzahl der Messungen mindestens zu verdoppeln. Anhand der Standardabweichung bzw. anhand des Variationskoeffizienten kann schon während des Messdurchgangs entschieden werden, ob der Stichprobenumfang ausreichend ist oder erhöht werden sollte. Wie den Bildern 14 und 15 zu entnehmen, stimmen die mit diesem Messgerät gewonnenen Resultate sehr gut mit denen anderer Messgeräte überein. Auch die Korrelation mit der Rautiefe R_t nach dem Sandflächenverfahren liefert ein hohes Bestimmtheitsmaß (Bild 16) und bestätigt das Umrechnungsverhältnis von $R_t = R_p \cdot 1,1$. Bei diesen aktuellen, in Bild 10

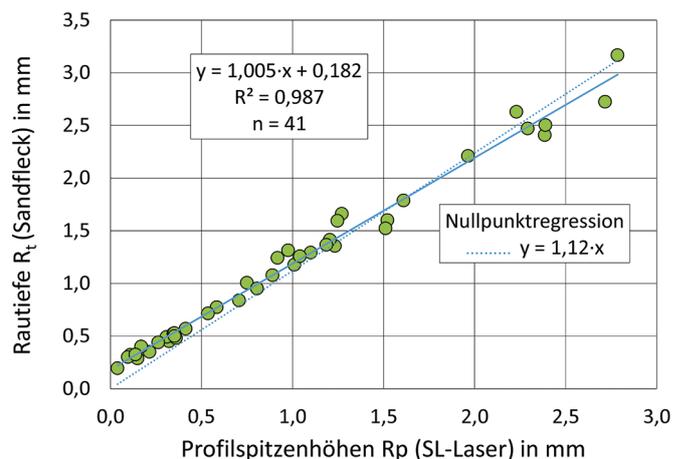


Bild 16 Korrelation zwischen R_p (SL-Profilometer) und R_t (Sandfleck)
 Correlation between R_p (SL-Profilometer) and R_t (sand patch), new measurements

noch nicht berücksichtigten Versuchen wurden für das Sandflächenverfahren alle bekannten Optimierungsmöglichkeiten genutzt, um die Streuungen so niedrig wie

möglich zu halten. Dazu gehörten unter anderem vier Durchmesserbestimmungen je Sandfleck und Sandvolumina, die Sandfleckdurchmesser von mindestens 15 cm ergaben (vgl. Abschn. 3.1.2).

4.2 Bereich unter den Gitterträgern

Von der Forderung nach vollflächiger kornrauer Oberfläche ist auch der Bereich unter den Gitterträgern betroffen. Damit soll vermieden werden, dass dort unbehandelte glatte Flächen verbleiben, die im schlimmsten Fall als „Wasserautobahnen“ wirken. Allerdings war die Umsetzung dieser Forderung bisher problematisch, weil die betreffenden Flächen für das manuelle Aufräumen schwer erreichbar waren. Ähnliches galt bisher auch für die Prüfung, die sich deshalb auf visuelle Kontrollen und den Vergleich mit Referenzflächen beschränken musste. Mit dem zuvor beschriebenen Messgerät kann jedoch auch dieses Problem gelöst werden. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten: Einerseits ist das System so schlank, dass es auch zwischen die Gitterstäbe passt, andererseits kann ein schräg gestellter, dicht neben den Gitterstäben geführter Lasersensor das Oberflächenprofil auch unter den Gitterträgern abtasten. Während bei der ersten Variante das Einfädeln des Linearantriebs etwas umständlich ist und mit größer werdender Distanz von der Oberkante der Wand schwieriger wird, unterscheidet sich die zweite Variante kaum von der im vorigen Abschnitt beschriebenen Anwendung im lichten Raum zwischen den Gitterträgern. Die dabei zwangsläufig miterfassten Gitterstäbe stellen in den Profildaten Unstetigkeiten dar und können mithilfe des Auswerteprogramms verhältnismäßig gut er-

kannt und eliminiert werden. Entsprechendes gilt auch für die Berücksichtigung der Schrägstellung des Lasers.

5 Fazit

Laser-Profilmessverfahren ermöglichen nicht nur eine genauere, objektivere und reproduzierbarere Beurteilung von Betonoberflächen als volumetrische Methoden, sondern sind auch unter schwierigen räumlichen Bedingungen einsetzbar. Das hier vorgestellte extrem schlanke Gerät macht Rauheitsmessungen sogar an den Innenseiten von Elementwandschalen und im Bereich der Gitterträger möglich. Obwohl mit dem Gel-Sand-Verfahren inzwischen eine auch an vertikalen Flächen oder über Kopf funktionierende Variante des herkömmlichen Sandflächenverfahrens existiert [30], sind solche Aufgaben damit nicht lösbar. Unabhängig von Details der Prüfungsdurchführung bleibt die volumetrisch bestimmte mittlere Rautiefe R_t ein viel zu pauschales und ungeeignetes Kriterium für das Verbundverhalten, mit dem bei unausgewogenen Texturen sogar gravierende Fehlbeurteilungen möglich sind. Entsprechend wird der mit R_t vergleichbare Profilparameter R_p erst in Verbindung mit weiteren Rauheitskenngrößen aussagekräftig. Wenn dennoch eine Umrechnung dieses Profilparameters in die mittlere Rautiefe R_t gewünscht wird, sollte dies mit $R_t = R_p \cdot 1,1$ erfolgen. Das Umrechnungsverhältnis gemäß Heft 600 DAfStb [6] ist durch eine Vielzahl neuerer Untersuchungsergebnisse widerlegt und liegt außerdem auf der unsicheren Seite. Als geeignete Referenz für die elektrooptischen Profilmessverfahren kommen CNC-gefertigte oder im 3D-Druckverfahren hergestellte Kalibrieroberflächen aus Kunststoff in Betracht.

Literatur

- [1] DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauteile aus Beton (WU-Richtlinie). Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb). Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2017.
- [2] Positionspapier der Fachvereinigung Betonbauteile mit Gitterträgern (BmG) e.V., der Qualitätsgemeinschaft Doppelwand Bayern und der Syspro-Gruppe Betonbauteile e.V. zur Anwendung der DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie). Ausgabe Dezember 2017. Erschienen am 29. Juni 2018.
- [3] Kahmer, H.: *Dichtigkeit mit Garantie*. Baugewerbe (2002), H. 8, S. 18–22.
- [4] Hohmann, R.: *Elementwände im drückenden Grundwasser*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2016.
- [5] DIN EN 1992-1-1/NA: 2013-04: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2.
- [6] DAfStb-Heft 600: Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2). Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [7] DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauteile aus Beton (WU-Richtlinie). Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb). Berlin: Beuth Verlag, November 2003.
- [8] Kahmer, M. (Hrsg.): SySpro-Gruppe Betonbauteile e.V.: *Die Technik zu Decke und Wand*. Eigenverlag der SySpro-Gruppe, 3. Auflage 2013.
- [9] Sasse, H.-R.; Fiebrich, M.: *Bonding of polymer materials to concrete*. Materials and Structures, 16 (1983), H. 94, S. 293–301.
- [10] Alfes, C.; Fingerloos, F.; Flohrer, C.: *Hinweise und Erläuterungen zur Neuauflage der DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“*. Betonkalender 2018, Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2018, S. 174–226.
- [11] DAfStb Heft 555: Erläuterungen zur DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“. Berlin: Beuth Verlag, 2006.
- [12] Furche, J.; Bauermeister, U.: *Elementbauweise mit Gitterträgern nach Eurocode 2*. Betonkalender 2018, Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2016, S. 469–635.
- [13] Kiltz, D.; Lindorf, A.; Schwabach, E.; Fingerloos, F.: *Elementwände nach neuer WU-Richtlinie – erste Erfahrungen*. DBV-Rundschreiben 260 – April 2019.
- [14] Schulz, R.-R.: *Fortschritte bei der Rauheitsbewertung von Betonoberflächen*. beton 66 (2016), H. 12, S. 502–510.
- [15] Schulz, R.-R.: *Laser schlägt Sand*. B+B Bautenschutz und Bausanierung 40 (2017), H. 4, S. 44–48.
- [16] DAfStb-Richtlinie Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie). Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb). Berlin: Beuth Verlag, Okt. 2001.

- [17] DAfStb-Richtlinie Instandhaltung von Betonbauteilen (Instandhaltungs-Richtlinie), Gelbdruckentwurf (Stand: 2018-06-08). Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb). Berlin: Beuth Verlag.
- [18] ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Bundesanstalt für Straßenwesen, Stand 2018.
- [19] DIN EN 13036-1: 2010-10: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Teil 1: Messung der Makrotexturtiefe der Fahrbahnoberfläche mithilfe eines volumetrischen Verfahrens.
- [20] Feix, J.; Andreatta, A.: *Vortrag „Verstärkung von Brückentragwerken mittels Aufbeton ohne Verdübelung“*. Brückenmanagementtagung Innsbruck 8.5.2008.
- [21] Kaufmann, N.: *Das Sandflächenverfahren. Ein einfaches Verfahren zur Messung und Beurteilung der Textur von Fahrbahnoberflächen*. Straßenbau-Technik 1971, H. 3, S. 131–135.
- [22] DIN EN 1766: 2017-05: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Referenzbetone für Prüfungen.
- [23] Vogler, N.; Gluth, G.; Oppat, K.; Kühne, H.-C.: *Charakterisierung von Bauteiloberflächen – Rautiefenbestimmung mittels konventioneller und laserbasierter Verfahren*. Bauingenieur 92 (2017), H. 3, S. 97–104.
- [24] Wieneke, K.; Herbrand, M.; Vogler, N.; Schwermann, R.; Blankenbach, J.: *Messverfahren zur Bestimmung der Rautiefe von Betonoberflächen*. Bauingenieur 93 (2018), H. 9, S. 365–372.
- [25] DIN EN ISO 13473-1: 2004-07: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen, Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe.
- [26] DIN ISO 13473-3: 2004-07: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen. Teil 3: Anforderungen an und Einteilung von Profilmessern.
- [27] DIN EN ISO 13473-1: 2017-08: (Entwurf) Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen, Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe.
- [28] DIN EN ISO 4287: 2010-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit.
- [29] Persönliche Mitteilung der Messdaten von Prof. Ch. Sodeikat am 22.03.2017. Ingenieurbüro Schiessl, Gehlen, Sodeikat.
- [30] Steinhoff, A.; Schulte Holthausen, R.; Raupach, M.: *Entwicklung eines Pastenverfahrens zur Bestimmung der Rautiefe an vertikalen Flächen*. Raupach, M. (Hrsg.): Tagungshandbuch zum 6. Kolloquium Erhaltung und Instandsetzung am 22. und 23. Januar 2019, S. 141–146.

Autoren



Prof. Dr.-Ing. Rolf-Rainer Schulz (Korrespondenzautor)
rrschulz@fb1.fra-uas.de
Brahmsstraße 21
61267 Neu-Anspach
(vormals Frankfurt University of Applied Sciences, inzwischen im Ruhestand)



Dr.-Ing. Herbert Kahmer
gf@syspro.org
SySpro-Gruppe Betonbauteile e. V.
Postfach 90 11 53
63420 Hanau

Zitieren Sie diesen Beitrag

Schulz, R.-R.; Kahmer, H. (2020) *Konsequenzen aus den Anforderungen der WU-Richtlinie für Elementwände – Herstellung und Nachweis der Rauheit an den Innenoberflächen der Fertigteilschalen*. Beton- und Stahlbetonbau 115, H. 3, S. 188–197.
<https://doi.org/10.1002/201900083>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 22. Oktober 2019; angenommen: 5. Dezember 2019.