

Objektive Oberflächenbewertung von (P)SCC-Sichtbeton mittels automatisierter Analyse von Bilddaten

U. Schirmer, Weimar/D, F. Kleiner, Weimar/D, A. Osburg, Weimar/D

Ulrike Schirmer, Bauhaus-Universität Weimar, Coudraystr.13, Weimar/D

EINLEITUNG

Sichtbeton ist aufgrund seiner Vielfältigkeit in der Formgebung eines der am meisten verbreiteten Gestaltungsmittel der modernen Architektur und optimal für neue Bauweisen sowie steigende Anforderungen an das Erscheinungsbild öffentlicher Bauwerke geeignet. Die Herstellung qualitativ hochwertiger Sichtbetonoberflächen hängt im hohen Maße von den Wechselwirkungen zwischen Beton und Trennmittel, zwischen Trennmittel und Schalmaterial, sowie von der Applikationsart und -menge des Trennmittels ab. In Laborversuchen wurden diese Einflüsse auf die Sichtbetonoberflächen eines polymermodifizierten selbstverdichtenden Betons (PSCC) im Vergleich zu einem herkömmlichen selbstverdichtenden Beton (SCC) untersucht. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde eine Methode zur Beurteilung der Sichtbetonqualität entwickelt, mit welcher Ausschlusskriterien, wie maximale Porosität und Gleichmäßigkeit, objektiv und automatisiert bestimmt werden können. Veränderungen dieser Werte durch Witterungseinflüsse ließen zudem erste Rückschlüsse auf die Dauerhaftigkeit der Sichtbetonoberflächen zu.

GRENZSCHICHT BETON / TRENNMITTEL

Grundsätzlich gilt bei der Herstellung von Sichtbeton, dass eine gute Benetzung der Schalung mit dem Frischbeton zu einer porenfreien und gleichmäßigen Oberfläche führt. Beim Einsatz von Trennmitteln sind es die Wechselwirkungen zwischen dem Trennmittel und dem Frischbeton, präzise der Porenlösung des Frischbetons, die die spätere Erscheinung der Betonoberfläche maßgeblich beeinflussen. Die Polarität und damit das Benetzungsverhalten der Schalmaterialien spielen bei nichtsaugenden Schalungen, wie den Stahlschalungen und Siebdruckplatten, die zur Herstellung der Musterflächen verwendet wurden, eine untergeordnete Rolle, da die Trennmittelschicht deren Eigenschaften maskiert bzw. sogar umkehrt. Für die Qualität von Sichtbetonoberflächen beim Einsatz von Trennmitteln sind folglich die

Interaktionen zwischen diesen Formulierungen und der Frischbetonporenlösung entscheidend. Beste Ergebnisse hinsichtlich der Oberflächenqualität des Betons werden theoretisch dann erzielt, wenn das Trennmittel eine geringe Grenzflächenspannung zur angrenzenden Porenlösung aufweist.

Bei den verwendeten Trennmitteln handelte es sich um zwei biobasierte Formulierungen, im Folgenden bezeichnet als Trennöl und Trennemulsion. Beide Formulierungen zeichnen sich durch geringfügig negativ wirksame Ladungen von -0,07 C/g bzw. -0,16 C/g aus (bestimmt durch Ladungstitration gegen den isoelektrischen Punkt mittels Particle Charge Detectors der Fa. Mütek), was auf den überwiegend unpolaren Charakter der Trennmittel zurückzuführen ist. Im Vergleich der verwendeten Trennmittel besitzt das Trennöl infolge der geringeren wirksamen Ladung auch eine geringere Grenzflächenspannung zu Wasser, zu gesättigter Calciumhydroxidlösung und zu 10%iger Natriumchloridlösung. Die Ergebnisse (Tab. 1) wurden mit der tensiometrischen Plattenmethode generiert (Tensiometer K100 der Fa. Krüss).

Tab. 1: Grenzflächenspannung der biobasierten Trennmittel in Abhängigkeit vom angrenzenden fluiden Medium

	Grenzflächenspannung [mN/m]	
	Trennöl	Trennemulsion
Wasser	1,8	12,9
NaCl	1,9	15,8
Ca(OH) ₂	0,3	8,4

Die Messung geringer Grenzflächenspannungen der untersuchten Trennmittel auf gesättigter Calciumhydroxidlösung lässt sich auf die Verseifungsreaktion des Calciumhydroxids mit den Fettsäuren der Trennmittel zu Calciumcarboxylat zurückführen. In /1/ wird die Reibungsminderung, basierend auf dieser vor allem für biobasierte Formulierungen typische Reaktion, als zweischichtiges Modell beschrieben, bei dem Estermoleküle aufgrund ihrer Polarität bevorzugt an der Schalung (z. B. Metall) adsorbieren und das Calciumcarboxylat sich zum hydrophilen Beton ausrichtet.

Neben der Ermittlung der Grenzflächenspannung zur Einschätzung der Reibungsminderung wurden kolloidchemische Untersuchungen mittels Elektroakustik und Spektralphotometrie, entsprechend der Methodenbeschreibung in /2/, durchgeführt. Die Untersuchungen nichtmodifizierter und mit anionisch stabilisierter Styrenacrylat(SA)-

Copolymerdispersion modifizierter Zementleime (Tab. 2) gaben erste Anhaltspunkte, inwiefern die Polymermodifizierung, die Verwendung eines PCE-basierten Fließmittels und die Interaktion dieser Additive mit den mineralischen Bestandteilen des Zementleimes die Oberflächenqualität der konzipierten Sichtbetone beeinflusst. Basierend auf den in Abb. 1 und 2a dargestellten Untersuchungsergebnissen ist davon auszugehen, dass die in den finalen Rezepturen (Tab. 2) enthaltene Fließmittelmenge vollständig auf den Zementpartikeln adsorbiert und somit keinen nennenswerten Einfluss auf die Grenzschicht Porenlösung/Trennmittel hat. Hingegen liegen die SA-Copolymerpartikel zu frühen Zeitpunkten der Hydratation (bis drei Stunden) zu wenigstens 40 % kolloidal in der Porenlösung verteilt vor. Eine lokale Anreicherung dieser Partikel in der Grenzschicht könnte sich negativ auf die Gleichmäßigkeit der Oberfläche auswirken.

Tab. 2: Zusammensetzungen der untersuchten Zementleime und der finalen Sichtbetonrezepturen des SCCs und des PSCCs

	Sichtbetone		Zementleime	
	SCC	PSCC	SCC _{Leim}	PSCC _{Leim}
w/z	0,51	0,47	0,51	0,51
p/z	-	0,1	-	0,1
KSM/z	0,66	0,66	0,66	0,66
PCE/z	0,014	0,006	0,01	0,01

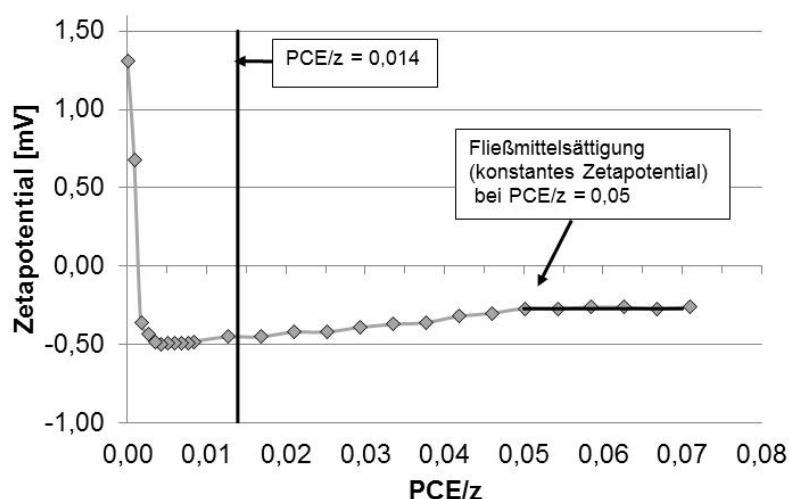


Abb. 1: Elektroakustische Ermittlung des Fließmittel/Zement-Sättigungsverhältnisses und Kennzeichnung des maximalen Fließmittel/Zement-Verhältnisses der konzipierten Sichtbetone

Weiterhin legen Untersuchungen der Porenlösungen modifizierter und nichtmodifizierter Zementleime mittels Atomemissionsspektrometrie (Abb. 2b) nahe, dass eine Komplexierung von Calciumionen durch nichtadsorbierte Polymere und stabilisierende Bestandteile der Polymerdispersion stattfindet. Die komplexierten Ionen stehen nicht mehr für eine Calciumcarboxylat-Bildung zur Verfügung, was einen erhöhten Reibungswiderstand und somit eine erhöhte Porosität der Sichtbetonoberflächen zur Folge hat, wenn nicht ausreichend Calciumionen nachgelöst werden.

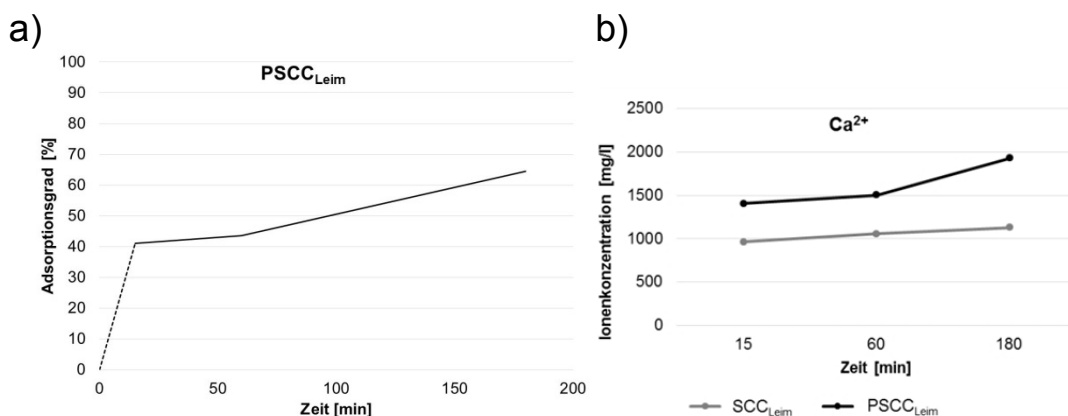


Abb. 2: a) Adsorption der SA-Copolymerpartikel an den festen Phasen des Zementleimes in Abhängigkeit von der Zeit, b) Anstieg der Calciumionenkonzentration in der Zementleimporenlösung in Gegenwart von SA-Copolymerpartikeln

SICHTBETONBEWERTUNG

Zur Beurteilung der Oberflächenqualität der Sichtbetone ergab sich die Notwendigkeit der Entwicklung einer objektiven Oberflächen- und Strukturanalyse. Der entwickelte computergestützte Algorithmus ist zur teilautomatisierten Analyse und Auswertung von Sichtbetonoberflächen gedacht, wobei die Bildanalyse auf Fiji / ImageJ 1.52d basiert und die Auswertung mittels eines Pythonscriptes erfolgt. Für die Bildvorverarbeitung und die Bildverwaltung wurde die Open Source Software Darktable 2.4 verwendet, ein Programm, welches die Stapelverarbeitung von Bildern ermöglicht.

Im Ergebnis der Bildanalyse von Sichtbetonoberflächen waren Aussagen zur Gleichmäßigkeit und zur Oberflächenporosität möglich. Zur Bestimmung der Gleichmäßigkeit wurden die Bilder in Graustufen (0 - 255) konvertiert, die Oberfläche definiert gerastert und der mittlere Grauwert jedes Segmentes bestimmt (Abb. 3a). Im Anschluss erfolgte die Berechnung der Grauwertabweichungen ΔN_{xy} zwischen den

Segmenten (Abb. 3b). Die Analyse der Porosität erfolgte über die Binarisierung an einem Grenzwert. Grauwerte, die unterhalb dieses Grenzwertes liegen, werden der Kategorie „Pore“ zugeordnet.

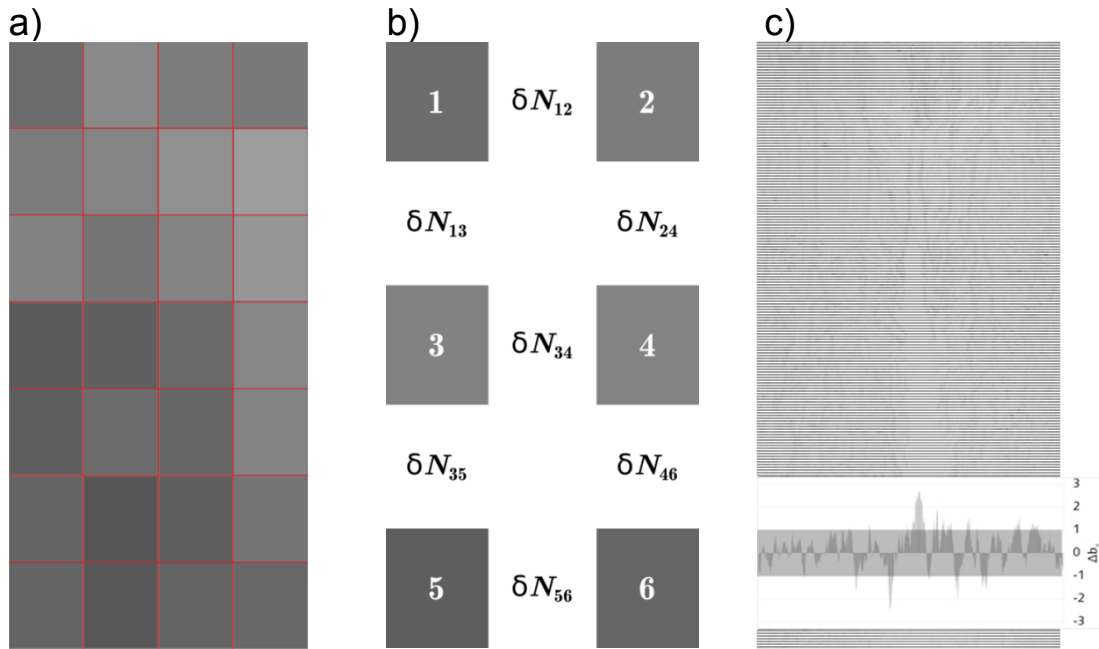


Abb. 3: a) Segmentgrauwerte, b) Grauwertabweichung δN_{xy} , c) vertikale Strukturierung durch Ablaufbahnen bei Trennmittelüberdosierung – y-reihenweise gemittelte Grauwerte der Pixel

Als Annahmekriterien für die Eignung der untersuchten Betone und Materialkombinationen als qualitativ hochwertige Sichtbetone wurden zwei Grenzwerte festgelegt, die maximale Oberflächenporosität (entsprechend Qualitätsstufe 4 des DBV/VDZ-Merkblatts „Sichtbeton“ /3/) $p < 0,3 \%$ und die maximal tolerierbare Grauwertabweichung nach 28-tägiger Lagerung $\delta N_{xy} < 2$. Diese Parameter beschreiben im Mittel die Qualität von vier Mesteroberflächen einer Materialkombination.

Ein weiterer Haupteinflussfaktor auf die Qualität der Sichtbetonoberfläche ist die Applikationsart und -menge der Trennmittel. In /4/ wurde die Ermittlung der „wirksamen Trennmittelmenge“ als wesentlicher Bestandteil der Sichtbetonkonzeptionierung herausgearbeitet. Es wird „davon ausgegangen, dass sich bei einer zu hohen Trennmittelmenge die Porenlösung mit dem Trennmittel vermischt und so der Zementleim an der Grenzfläche Trennmittel/Schalhaut verarmt und dadurch stärker an der Schalhaut anhaftet.“ Das Resultat ist eine erhöhte Anzahl an Poren an der Sichtbetonoberfläche. Gegebenenfalls gehen mit der Vermischung des Zementleimes mit der Porenlösung auch lokale

Verfärbungen einher. Die Applikationstechnik zum Aufbringen des Trennmittels und die Trennmittelmenge wurden mit Hilfe einer Strukturierungsanalyse iterativ optimiert. Ungewollte Strukturierungen, die aus einer Trennmittelüberdosierung resultierten, wurden durch die y-reihenweise Mittelung der Pixelgrauwerte und deren Auftrag in x-Richtung (Δb_x in Abb. 3c) erfasst und das Verfahren bzw. die Trennmittelmenge soweit angepasst, dass die auf ± 1 festgelegte Abweichung vom mittleren Grauwert der gesamten Oberfläche nicht mehr überschritten wurde.

Im Ergebnis der Projektierung bzw. Optimierung erfüllten alle untersuchten Materialkombinationen die Anforderungen hinsichtlich der maximalen Porosität (Abb. 4a). Grenzwertüberschreitungen gab es hinsichtlich der Grauwertabweichungen. So wird beim Einsatz der Trennemulsion zur Herstellung von PSCC-Oberflächen der festgelegte Grenzwert von 2 aufgrund lokaler Verfärbungen überschritten (Abb. 4b). Auch bei Verwendung des Trennöls kam es bei zwei der vier untersuchten PSCC-Musterflächen zur Grenzwertüberschreitung. Die lokalen optischen Beeinträchtigungen sind auf das Vorhandensein nichtadsorbierter SA-Partikel in der Grenzschicht Porenlösung/Trennmittel zurückzuführen.

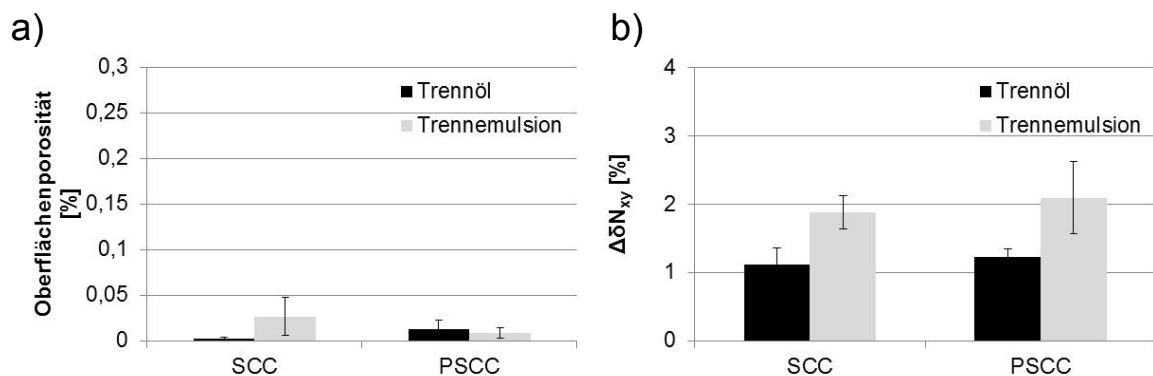


Abb. 4: a) Oberflächenporosität und b) Grauwertabweichung δN_{xy} von SCC- und PSCC-Oberflächen bei Verwendung von Trennöl bzw. Trennemulsion auf Stahl

Eine Auswahl sehr guter SCC- und PSCC-Musterflächen, welche durch den Einsatz des Trennöls erzielt wurden, wurde in einer ersten Versuchsreihe zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften einer definierten Klimawechsellaagerung, angelehnt an mitteleuropäisches Klima, ausgesetzt. Die Lagerungsbedingungen sind in der Abbildung 5 dargestellt. Nach 24 Zyklen wurden wiederum die Porosität (Abb. 6a) und die

Grauwertabweichung δN_{xy} (Abb. 6a) erfasst. Beide Werte liegen nach der Beanspruchung weiterhin unterhalb der festgelegten Grenzwerte für sehr gute Sichtbetonoberflächen. Wie repräsentativ die Ergebnisse dieser ersten Versuchsreihe sind, wird derzeit im Rahmen systematisch angelegter Lagerungsversuche untersucht.

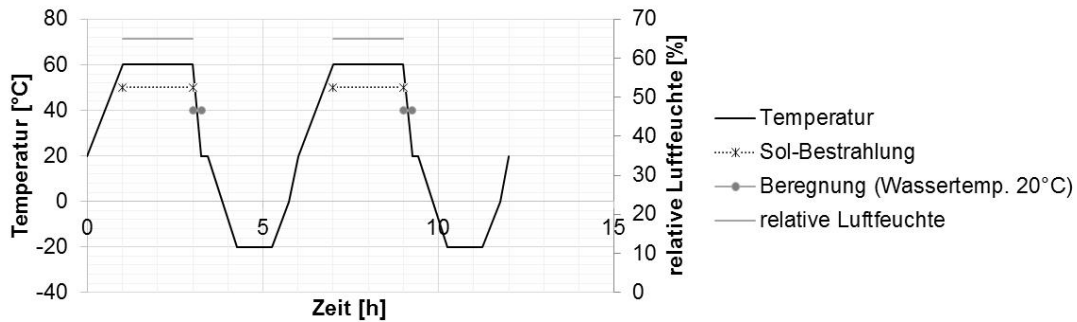


Abb. 5: Klimawechsellagerungsprogramm mit Sonnensimulation (Sol) und Beregnung

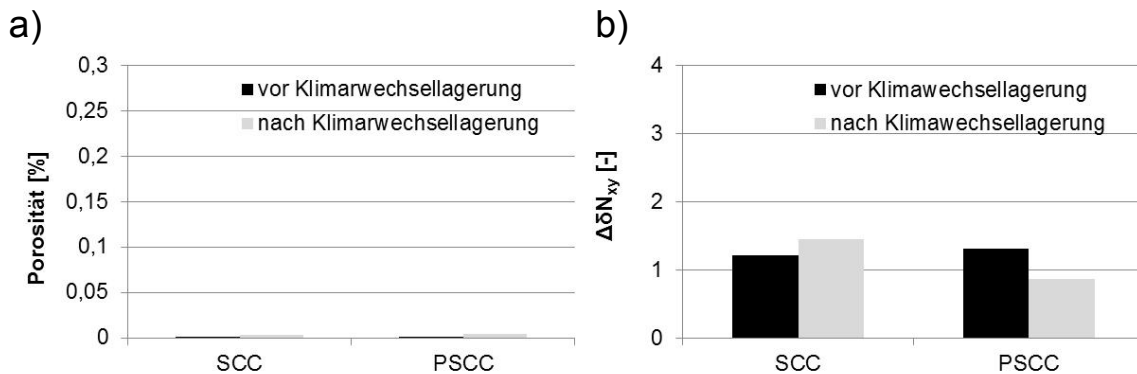


Abb. 6: a) Oberflächenporosität und b) Grauwertabweichung δN_{xy} ausgewählter SCC- und PSCC-Oberflächen (Trennöl auf Stahl) vor und nach der Klimawechsellagerung

ERKENNTNISSE

Basierend auf den zuvor beschriebenen Experimenten und dem derzeitigen Stand der Wissenschaft ließ sich schlussfolgern, dass eine geringe Grenzflächenspannung zwischen Porenlösung und Trennmittel allein nicht ausschlaggebend für die Qualität der resultierenden Oberflächen ist. Als Haupteinflussfaktoren wurden weitestgehend formulierungsunabhängig die Art der Applikation und vor allem die verwendete Trennmittelmenge identifiziert. Bei Unterschreitung der optimalen Trennmittelmenge steigt die Porosität.

Passiert dies lokal begrenzt, ändert sich auch der Homogenitätskennwert, die Grauwertabweichung. Bei Überschreitung der optimalen Trennmittelmenge wird die homogene Helligkeitswirkung der Oberfläche durch Ablauffahnen oder lokale Verfärbungen gestört. Mit Hilfe der teilautomatisierten Bildanalyse ließ sich die optimale Trennmittelmenge für jedes System im iterativen Prozess bestimmen.

Der Einsatz von SA-Copolymerdispersion zur Optimierung der Verarbeitungs-, Haftzug- und Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons (PSCC) wirkte sich insbesondere bei Verwendung der Trennemulsion auf die Gleichmäßigkeit der Sichtbetonoberflächen aus. Verfärbungen aufgrund lokaler Polymeranreicherungen in der Grenzschicht Porenlösung/Trennmittel führten zur Überschreitung des Grenzwertes. Folglich empfiehlt sich eine Anpassung des p/z-Wertes, mit dem Ziel, den Adsorptionsgrad zu erhöhen. Hinsichtlich der Oberflächenporosität gab es keine Beeinträchtigung durch die Polymermodifizierung.

Im Rahmen der bisher durchgeführten Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Oberflächenqualität sehr guter Sichtbetonmusterflächen gab es ebenfalls keine Hinweise auf einen negativen Einfluss der Polymermodifizierung. Die charakterisierenden Grenzwerte wurden nach der Klimawechsellagerung weiterhin eingehalten.

Systematisch angelegte Studien, die eine Mindestprobenanzahl von vier Musterflächen je Materialkombination und eine längere Lagerungsdauer vorsehen, zielen darauf ab, die bisherigen Ergebnisse statistisch zu sichern und eine möglichst realistische Beanspruchung der Sichtbetonoberflächen zu simulieren.

LITERATURANGABEN

- /1/ C. Djelal, et. al.: "Comprehension of demoulding mechanisms at the formwork/oil/concrete interface" J. Mater. Struct (2007) 41, 571-581
- /2/ U. Schirmer: "Die Adsorption von Dispersionspartikeln und Schutzkolloiden an Oberflächen von Zementphasen und Phasen der Zusatzstoffe" Dissertation Bauhaus-Universität Weimar (2018), 93-99
- /3/ Merkblatt Sichtbeton, DBV und VDZ (2015)
- /4/ AiF-DBV-Verbundforschungsprojekt "Neue Sichtbetontechnik: Integration der Erkenntnisse zu Wechselwirkungen zwischen Schalungshaut, Trennmittel und Betonoberfläche in die Prozesskette beim Sichtbeton" Kurzfassung des Schlussberichtes, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft (2011), S. 3