
Lagenbildung - Teil 1: UNTERSUCHUNGEN ZUR FÖRDERUNG VON NASS- MISCHGUT UND ZUR LAGENBILDUNG IM AUFGETRAGENEN SPRITZBETON

INVESTIGATIONS ON THE PUMPING OF WET-MIX SHOTCRETE AND LAYER FORMATION IN APPLIED SHOTCRETE

Joachim **Juhart**, Institut für Materialprüfung u. Baustofftechnologie, TU Graz, Österreich
Marlene **Sakoparnig**, Institut für Materialprüfung u. Baustofftechnologie, TU Graz, Österreich
Rudolf **Röck**, Institut für Konstruktion u. Materialwissenschaften, Uni Innsbruck, Österreich
Maria **Thumann**, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Deutschland
Johannes **Flotzinger**, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Deutschland
Benedikt **Lindlar**, Sika Services AG, Zürich, Schweiz
Florian **Mittermayr**, Institut für Materialprüfung u. Baustofftechnologie, TU Graz, Österreich
Wolfgang **Kusterle**, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Deutschland

Im Zuge des ÖBV-FFG-Forschungsprojekts „Entwicklung neuer dauerhafter und nachhaltiger Spritzbetone (ASSpC)“ wurden neue Spritzbetonrezepturen entwickelt. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Auswirkung der Frischbetoneigenschaften und der Pumpvorgänge an der Spritzmaschine auf die Spritzbarkeit und Lagenbildung im aufgetragenen Spritzbeton. Neben den Frischbetoneigenschaften bzw. rheologischen Eigenschaften des Betons (Mischgut) wurden die diversen Förderströme an der Spritzmaschine untersucht. Es wurden dazu Messungen der Drücke in den verschiedenen Förderleitungen für Beton, Erstarungsbeschleuniger (EB) und Druckluft durchgeführt. Außerdem wird über Erkenntnisse aus Zeitlupenaufnahmen des Spritzstrahls berichtet. Der EB wurde mit einem Markierstoff versetzt, um schlussendlich seine Verteilung im aufgetragenen Spritzbeton zu dokumentieren. Es zeigte sich, dass - richtige Düsenführung vorausgesetzt - die Lagenbildung im Spritzbeton stark von Maschinen bedingten Einflüssen des Pump- und Spritzvorgangs abhängt. Sie geht mit einer unerwünschten Ungleichverteilung des EB im Beton einher, die weitreichende negative Folgen auf die Spritzbetoneigenschaften hat. Über die Visualisierung der optisch sichtbaren und optisch nicht sichtbaren Inhomogenität wird in einem zugehörigen weiteren Beitrag (Lagenbildung – Teil 2) berichtet. Abgeleitet von den gezeigten Ergebnissen, eröffnet sich ein großes Entwicklungspotenzial für Geräte und Verfahren.

In the ÖBV-FFG funded research project "Advanced and sustainable sprayed concrete (ASSpC)" new shotcrete mix designs were developed. This paper deals with the effect of the fresh concrete properties and the pumping processes at the spraying machine on the sprayability and layer formation in the applied shotcrete. In addition to the fresh concrete properties and rheological properties of the concrete, the various pumping flows at the spraying machine were investigated (measurements of the pressures in the various delivery lines for concrete, accelerator and compressed air were carried out). Furthermore, findings from slow-motion pictures of the spray jet are reported. A marking agent was added to the accelerator to finally document its distribution in the applied shotcrete. It was shown that - assuming correct nozzle technique - the formation of layers in the shotcrete depends strongly on the machine-related influences of the pumping and spraying process. It is accompanied by an unwanted uneven distribution of the accelerator in the concrete, which has far-reaching negative consequences on the shotcrete properties. The visualization of the optically visible and optically invisible inhomogeneities is reported in a related further article (Layer Formation - Part 2). Derived from the results shown, a large development potential for devices and processes is opened up.

1. Einleitung: Förderung von Nassmischgut und Auftrag von Spritzbeton

Der Einbau moderner Nassspritzbetone erfolgt, wenn große Mengen aufgebracht werden sollen, im Allgemeinen im Dichtstromverfahren [1]. Bei dieser Applikationstechnik erfolgen die Förderung des Mischguts, der Druckluft und des Erstarrungsbeschleunigers (EB) jeweils separat zur Spritzdüse. Der Frischbeton wird hydraulisch durch die Förderleitungen gepumpt, der Beschleuniger mit Schnecken- oder Schlauchquetschpumpen. Letzterer wird vor der Düse in Druckluft eingebracht und das entstandene Aerosol in den Betonstrom eingemischt. Das Aerosol reißt den Betonstrom in der Düse auf, vermischt so den EB mit dem Beton und das Gemisch wird zu einem Spritzstrahl geformt. Dieser muss mit Hilfe des vom Düsenführer ferngesteuerten Spritzarms gezielt und mit der richtigen Auftragstechnik an der Einbaustelle aufgetragen werden. Der hohe Druck und ein gezielter, gleichmäßiger Auftrag sollen für gut verdichteten, homogenen Spritzbeton sorgen [1][2], siehe auch Kapitel 2.3 bzw. Bild 5.

In der Praxis zeigt sich oft, dass der aufgetragene Spritzbeton in seiner Zusammensetzung ungleichmäßig ist, also zum Beispiel Stellen unterschiedlicher Dichte, Porosität bzw. Zusammensetzung zeigt. Oft spricht man von Spritzfehlern und Lagenbildung. Als mögliche Ursachen für eine solche Lagenbildung werden in der Literatur [1][3][4][5][6] genannt:

- Ungenügend verarbeitbarer (zu steifer) Frischbeton (Grundmischung bzw. Mischgut)
- Mangelhafte, unsachgemäße Düsenführung
- Einspritzen von Rückprall
- Inhomogenität im geförderten Mischgut
- Pulsationen in den Materialströmen
- Ungleichmäßige Dosierung beim Umschalten der Betonpumpe

Die ÖBV-Richtlinie für Spritzbeton [7] verweist in diesem Zusammenhang darauf, dass der Auftrag des Spritzbetons (i) durch qualifiziertes Personal zu erfolgen hat und (ii) so, dass ein homogenes, dichtes Spritzbetongefüge und eine geschlossene, ebenflächige Oberfläche erreicht werden (Insbesondere bei der höchsten Spritzbetonklasse, SpC III).

Nassspritzbeton muss so zusammengesetzt sein, dass er gut förderbar und spritzbar ist, d.h. mit geringem Widerstand, entmischungsfrei über die erforderliche Strecke in einer Pumpleitung transportiert und ohne die Düse zu blockieren aufgetragen werden kann (d.h. ohne „Stopfer“ gespritzt werden kann). Zur Spezifikation entsprechender Eigenschaften des Mischgutes wird gemäß dem Stand der Technik lediglich eine sehr weiche Konsistenz gefordert [7] (das empfohlene Ausbreitmaß gemäß ÖBV Richtlinie Spritzbeton beträgt 60 ± 5 cm bzw. mind. 52 cm am Ende der Verarbeitungszeit am Einbauort) und die visuell am Ausbreitmaß zu beurteilende Entmischungsfreiheit. Diese Spezifizierung ist nach aktuellem Stand des Wissens aber unzureichend, u.a. da für die Viskosität der Mischung und die Entmischungsneigung keine quantifizierten Parameter angegeben werden [11]. Zudem braucht das Mischgut des Spritzbetons in der Praxis je nach den Anforderungen des Tunnelbaufortschritts und der Transportstrecke vom Mischwerk bis zum Einbauort (z. Bsp. an der Ortsbrust) eine lange Verarbeitungszeit. Zum Erreichen langer Verarbeitungszeiten bei ausreichender Konsistenz werden diverse Zusatzmittel mit Verzögerungswirkung von mehreren Stunden (3-24h) eingesetzt. Große Konsistenzänderungen des Mischgutes bedingen Änderungen des Füllungsgrades der Förderzylinder der Betonpumpe am Spritzgerät, was u.a. wiederum zu Änderungen in der Förderleistung im Nassspritzverfahren führt, wie später noch näher ausgeführt wird.

Der Förderung von Frischbeton in einer Pumpleitung kann in erster Näherung die Modellvorstellung nach Kaplan zugrunde gelegt werden [12]. Im Praxis-relevanten Bereich niedriger Betonfördergeschwindigkeiten bildet sich demgemäß im Inneren einer Rohrleitung

ein Betonpfropfen aus, der sich durch den aufgetragenen Pumpendruck als Ganzes fortbewegt, während eine dünne Gleitschicht an der Wandung als „Schmierfilm“ fungiert, der geschert wird. Zur Ausbildung dieser Gleitschicht werden Feinanteile und Wasser (Bindemittelleim) aus dem Betoninneren abgesondert. Ihre rheologischen Eigenschaften (Viskosität μ_g , Fließgrenze τ_{0g}) gehen neben der Rohrleitungslänge L und dem Rohrdurchmesser R sowie dem Füllgrad mit Beton k als Proportionalitätskonstanten in den näherungsweise linearen Zusammenhang zwischen Pumpendruck P und Fördermenge Q ein (siehe Bild 1).

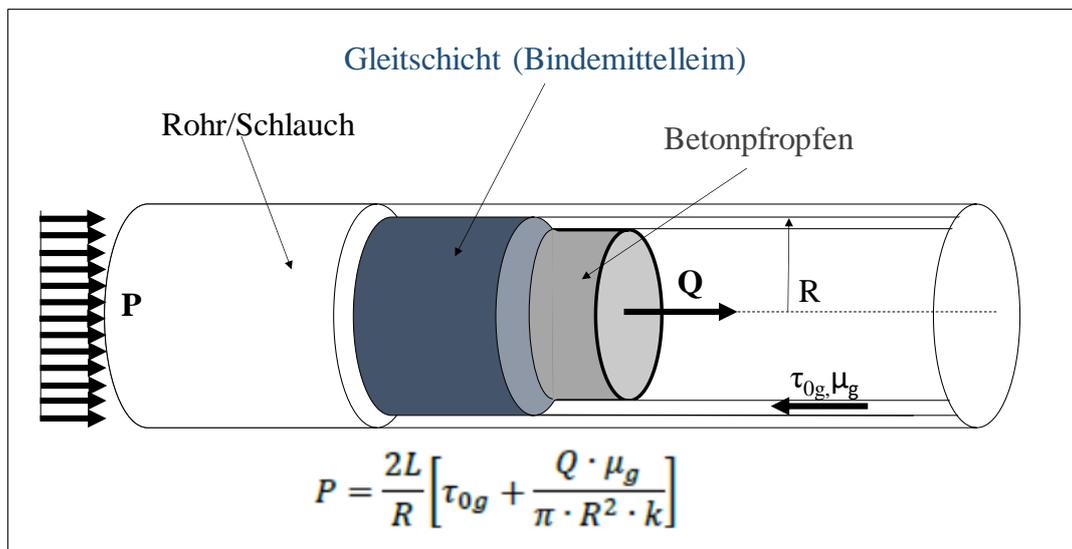


Bild 1: Schema der Förderung von Beton in einer Pumpleitung: Ein Betonpfropfen gleitet an einer mit Bindemittelleim angereicherten Schicht an der Rohrwandung in Richtung der Austragsdüse nach [12] und [13]

Für die rheologischen Eigenschaften der Gleitschicht ist insbesondere ihre Zusammensetzung von Bedeutung, die hauptsächlich vom Leimvolumen, Mehlkorngelalt und W/B-Wert des Nassmischgutes abhängt [14][15]. Die Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen kann z.B. mit einem Tribometer oder einem Gleitrohr-Rheometer untersucht werden [15][17][18][23]. Diese Prüfverfahren berücksichtigen die Wechselwirkung zwischen der Rohrwandung und der Gleitschicht oder simulieren den Pumpvorgang im Labormaßstab. Die Ergebnisse ermöglichen Vergleiche unterschiedlicher Mischungen und ergeben Kennwerte für die Fließgrenze und Viskosität der Gleitschicht. Für weiterführende Aussagen wie zum Beispiel Pumpprognosen müssen zusätzliche Einflüsse berücksichtigt werden (Kurven und Reduktionen in realen Förderleitungen, Pumphöhen u.a. [11]).

Ein weiterer Aspekt, welcher bei der Beurteilung der Pumpbarkeit berücksichtigt werden muss, ist die Stabilität der Mischung. Eine ausreichende Stabilität ist erforderlich, damit es während der Förderung in der Rohrleitung weder zur Entmischung noch zur Blockade kommt. Für die Beurteilung eignen sich Prüfverfahren, welche die Blutwassermenge einer Betonprobe unter Druck bestimmen [18][19][20]. Übliche Konsistenzprüfverfahren alleine, z.B. das Ausbreitmaß oder das Setzmaß, sind nicht geeignet um Prognosen über die Pumpbarkeit von Betonmischungen zu erstellen [14][21][22][13][16].

In folgendem Beitrag wird gezeigt, wie die Förderung von Nassmischgut im Dichtstromverfahren und der Auftrag von Spritzbeton im Rahmen von Großspritzversuchen im Projekt ASSpC in Bezug auf Ursachen für Inhomogenität hin untersucht wurde.

2. Mischgut und Untersuchungsmethoden

2.1 Mischgut, Betonherstellung und Betoneigenschaften

Im Zuge des bereits erwähnten Forschungsprojektes ASSpC wurden u.a. die Pumpbarkeit und Spritzbarkeit in großmaßstäblichen Versuchen unter Praxis ähnlichen Bedingungen getestet [28]. Tab. 1 gibt die Zusammensetzung und Eigenschaften des Mischgutes von 2 typischen Rezepturen („Bsp.1“ und „Bsp.2“) für den Großspritzversuch „KAT3“ wieder, über die beispielhaft in diesem Beitrag berichtet wird. In beiden Rezepturen wurde ein neu entwickeltes Bindemittel eingesetzt, mit dem gute Verarbeitbarkeit, hohe Frühfestigkeiten, ein reduziertes Versinterungspotenzial und verbesserte Nachhaltigkeit erzielt werden kann [27], [28]. Dafür wurde ein relativ geringer Gehalt an reinem Portlandzement CEM I mit einem speziellen AHWZ („premium AHWZ“) in der Mischanlage kombiniert. Das AHWZ enthält eine Zusatzstoffkombination aus 63 M.% fein gemahlenem Hüttensand (spezifische Oberfläche von 4900 cm²/g nach Blaine), 23 M.% feinstem Kalksteinmehl (> 20000 cm²/g) und 14 M.% feinem Metakaolin (> 27600 cm²/g). Die planmäßige EB Dosierung beim Spritzvorgang betrug jeweils 7% bezogen auf das Gesamt-Bindemittel (M.%).

Tab. 1: Mischgutzusammensetzung beim Großspritzversuch „KAT3“ (2 Beispiele mit unterschiedlichem W/B-Wert bei gleichem Leimvolumen)

Mischung (Beton)	CEM I 52,5 R	Premium AHWZ	Gesteinskörng.	Mehlkorn	Leimvol. inkl. Luft	W/B	Fließmittel	Verzögerer	LP-Bildner
	kg/m ³				l/m ³	-	M.% /BM		
Bsp.1	281	140	1712	507	442	0,45	0,90	0,75	0,07
Bsp.2	261	128	1691	474	463	0,52	0,40	0,81	0,07

Die Gesteinskörnung (Jauntaler Kies) wurde aus Fraktionen von 70% 0/4 RK und 30% 4/8 RK zusammengesetzt und enthielt 5% Feinanteile < 0,125 mm. Der angegebene Mehlkorngelinhalt errechnet sich aus der Summe von Zement, AHWZ und Feinanteilen der Gesteinskörnung < 0,125 mm. Das Leimvolumen wurde als Summe der Volumina von Zement, AHWZ, Feinanteilen der Gesteinskörnung < 0,125 mm sowie Wasser, Zusatzmittel und Frischbetonluftgehalt (siehe Tab. 2) berechnet. In den Großspritzversuchen wurde mit den in Tab. 1 angegebenen Rezepturen eine gute Pumpbarkeit des Nassmischgutes erreicht. Die Mischungen waren auch unter Druck in der Förderleitung stabil.

2.2 Frischbetoneigenschaften

Für die Versuche wurde Beton in einer Transportbetonmischanlage nahe dem Versuchsort mittels Doppelwellenmischer gemischt und ein Fahrmischer mit einer Menge von mindestens 2 m³ befüllt. Direkt aus dem Fahrmischer wurde noch an der Mischanlage eine Betonprobe entnommen und Frischbetonprüfungen durchgeführt. Wie für eine Erstprüfung am Mischgut nach der Richtlinie Spritzbeton [7] vorgesehen, wurden Ausbreitmaß (am Ausbreittisch nach ÖNORM EN 12350-5 [8], siehe Bild 2), Frischbetonrohichte und Luftgehalt (nach ÖNORM EN 12350-7 [9]) an einer dem Fahrmischer rd. 10 min nach der Wasserzugabe entnommenen Probe geprüft. Zudem wurden das Fließmaß - geprüft am Ausbreittisch ohne Verdichtungsschläge – sowie weitere rheologische Eigenschaften von Frischbeton und seine Stabilität mit folgenden Methoden geprüft.

2.2.1 Prüfung der Trichterauslaufzeit

Ein Kennwert für die Viskosität von fließfähigem Frischbeton ist die Trichterauslaufzeit (TLZ), eine für selbstverdichtende Betone genormte Prüfung gemäß EN 12350-9 [10]. Sie kann auch gut als Kennwert der „Viskosität“ von Nass-Mischgut herangezogen werden [26]. Dabei wird

die Zeit in Sekunden gemessen, die ein bestimmte Menge Beton braucht, um aus einem V-förmigen Trichter auszulaufen (Bild 2). Je länger sie ist, desto höher ist die Viskosität des Frischbetons.



Bild 2: Ausbreitmaß von Nassmischgut und Messgerät für die Prüfung der Trichterauslaufzeit

2.2.2 Prüfung mit dem Gleitrohr-Rheometer

Die Beurteilung der Pumpbarkeit von Beton bzw. der Rheologie der Gleitschicht zwischen Beton und Rohrwand wurde mit dem Gleitrohr-Rheometer „Sliper“ (Sliding Pipe Rheometer) durchgeführt [17]. Das Gleitrohr-Rheometer besteht aus einem aufgeständerten Kolben und einem Rohr, das entlang des Kolbens geführt wird (Bild 3).

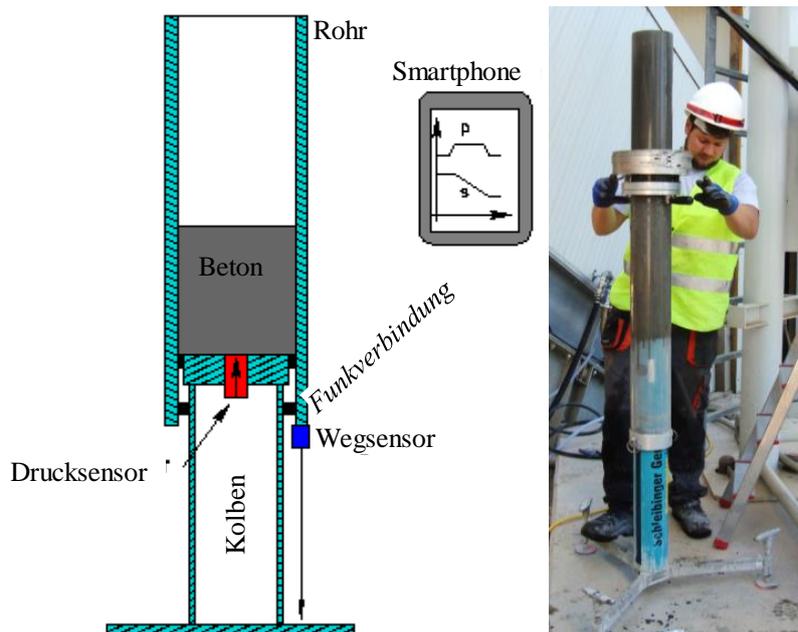


Bild 3: Gleitrohr-Rheometer „sliper“, links schematisch gemäß [17], rechts im praktischen Einsatz. Beschreibung siehe Text.

Das Rohr wird mit ca. 6 l Frischbeton befüllt, verdichtet und der überschüssige Beton abgezogen. Am Kopf des Kolbens befindet sich ein Druckaufnehmer und am Fuß ein Wegaufnehmer, um den Druck im Rohrquerschnitt und die Geschwindigkeit des Rohres bei der Bewegung entlang des Kolbens aufzuzeichnen („Schergeschwindigkeit“). Mithilfe von zwei Handgriffen wird das Rohr in die obere Position gebracht und arretiert. Nach Lösen der Arretierung bewegt sich das Rohr aufgrund der Schwerkraft nach unten und sowohl Druck als auch Geschwindigkeit werden aufgezeichnet. Eine Messung besteht aus mehreren (15)

Hüben. Bei jedem Hub werden durch Variation von Gewichten (3 x 1,6 kg und 3 x 4,8 kg), die außen am Rohr angebracht werden, unterschiedliche Geschwindigkeiten und Drücke erreicht. Die Messdaten werden automatisch auf ein Smartphone übertragen und grafisch dargestellt. Über den näherungsweise linearen Zusammenhang zwischen Betonförderdruck und Schergeschwindigkeit sowie einer Berücksichtigung des Einflusses der Geometrie erhält man die Kennwerte sliper-Fließgrenze („Beiwert a“ [mbar]) bzw. sliper-Viskosität („Beiwert b“ [10-6 bar*h/m]) [17], siehe Bild 3 und Bild 7 im Kapitel 3.1.

2.2.3 Prüfung der Stabilität gegen Entmischung mit der Betonfilterpresse

Nassmischgut für Spritzbeton muss gegen Entmischung während des Transportes bzw. des Förderns in Pumpleitungen stabil sein. Blockaden in den Förderleitungen können auftreten, wenn sich der Bindemittel-Leim aufgrund des hohen Drucks von den Gesteinskörnungen absondert. Bei der Beurteilung der Frischbetonstabilität in Bezug auf Entmischung unter Druck kann die Prüfung mit der Betonfilterpresse nach ÖVBB-Merkblatt „Weiche Betone, 2009“ [25] herangezogen werden. Die Stabilität der Mischungen wird über die Menge an Filtratwasser, die unter Druck abgegeben wird, definiert. Ein Behälter mit einem Volumen von 10 l wird mit Frischbeton gefüllt und mit einem konstanten Prüfdruck von 3 bar beaufschlagt. Filtrat, das durch ein Filtervlies austritt, wird aufgefangen und seine Menge nach 15 min und 60 min bestimmt, Bild 4.

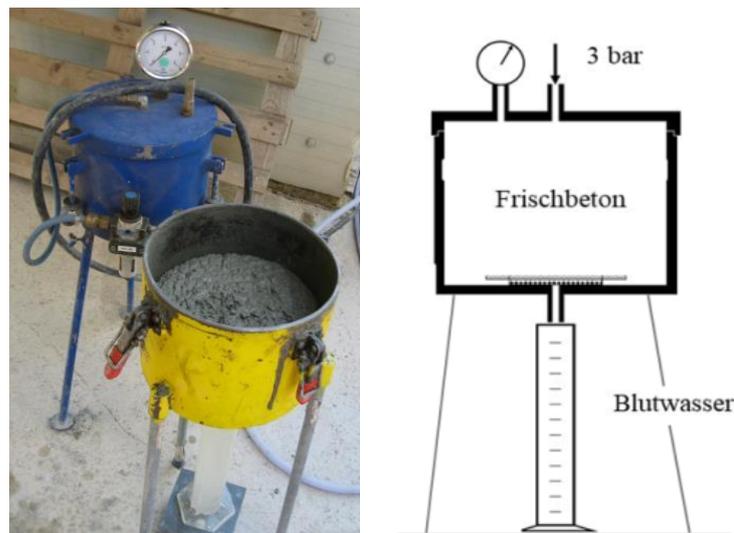


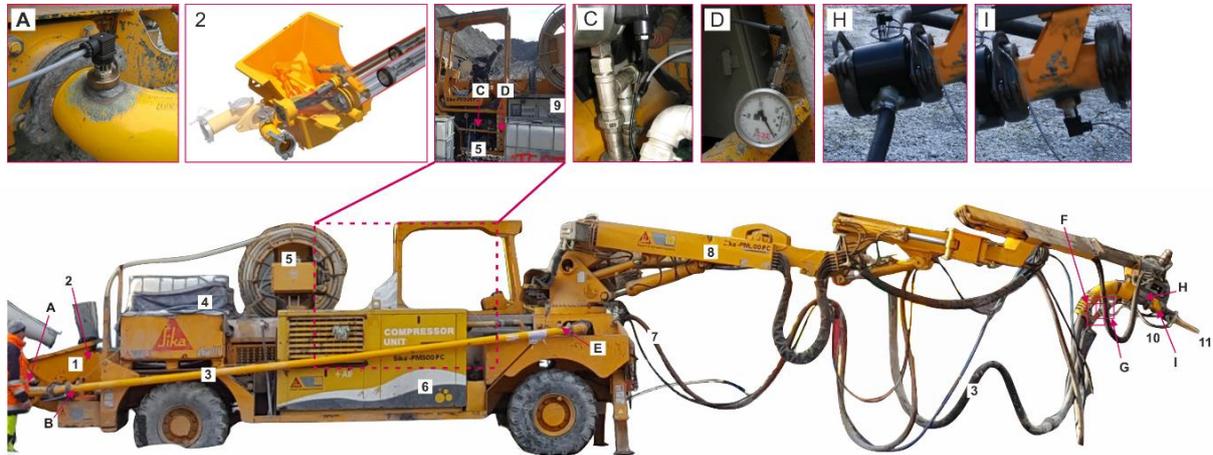
Bild 4: Filterpresse gemäß ÖVB Merkblatt "Weiche Betone" 2009

2.3 Spritzmobil und Sensorik sowie Spritzvorgang

Das beim Versuch eingesetzte Spritzmobil (SIKA PM 500) wurde mit Sensoren ausgestattet, die den Druckverlauf während des Spritzvorganges in Förderleitungen an mehreren Positionen kontinuierlich aufzeichnen (Sensoren A bis I gemäß Bild 5). So kann der Druck in der Hydraulik der Betonpumpe und in der Pumpleitung des Betons an mehreren Stellen gemessen werden. Zudem wird der Druck in der Pumpleitung des Erstarrungsbeschleunigers an 2 Stellen sowie in der Druckluftzufuhr vor der Spritzdüse und an der Mischkammer vor der Spritzdüse (=Aerosol-Konverter) erfasst.

Im Allgemeinen werden für das Pumpen von Transportbeton Doppelkolbenpumpen eingesetzt, nur in der Betoninstandsetzung oder der Fertigteileproduktion eignen sich auch Schneckenpumpen und andere Systeme (z. Bsp. Schlauchquetschpumpen). An einem Spritzgerät bzw. Spritzmobil, wie in Bild 5 dargestellt, werden auch in der Regel Doppelkolbenpumpen (2) eingesetzt, die Frischbeton aus einem Aufgabetrichter (1) in die

Pumpleitung (3) fördern. Die beiden Förderkolben (2) sind über Antriebszylinder hydraulisch miteinander verbunden. Der rücklaufende Förderkolben erzeugt einen Unterdruck, der durch das in den Zylinder einfließende Medium (=Frischbeton) ausgeglichen wird. Gleichzeitig drückt der vorlaufende Förderkolben den Zylinderinhalt in die Förderleitung. Am Hubende schaltet die Pumpe um und die Förderkolben kehren ihre Bewegungsrichtung um. Gleichzeitig schwenkt eine Rohrweiche vor den zweiten, mittlerweile gefüllten Förderzylinder, der im Gegenteil seinen Inhalt abgibt.



- Geräteteile:**
- 1... Aufgabetrichter für Frischbeton (Übergabe aus Fahrmaschine)
 - 2... Doppelkolben- Betonpumpe mit entsprechender Hydraulik
 - 3... Betonförderleitung (Metallrohr + flexibles Rohr)
 - 4... Reservoir für EB
 - 5... EB Pumpe & EB Förderleitung
 - 6... Kompressor
 - 7... Druckluftleitung
 - 8... Spritz(roboter)arm
 - 9... Steuereinheit
 - 10... Aerosol-Konverter
 - 11... (Spritz-) Düse

- Position der Sensoren:**
- A... Betonpumpenauslass
 - B... Betonförderleitung (1)
 - C... Beschleunigerpumpe
 - D... Hydraulikdruckleitung (+Manometer)
 - E... Betonförderleitung (2)
 - F... Druckluftleitung
 - G... Beschleunigerzuleitung Spritzdüse
 - H... Aerosol-Konverter
 - I... Betonförderleitung vor Aerosol-Konverter

Bild 5: Spritzmobil mit Bezeichnung der Hauptkomponenten und Sensorpositionen (Schema Doppelkolbenpumpe (2) aus [24])

Die Pumpe saugt also in zeitlich versetzten Kolbenhüben Frischbeton in ihre Förderkolben ein und treibt ihn über die Rohrweiche abwechselnd aus den beiden Zylindern in die Pumpleitung „voran“. Beim Umschaltvorgang von einem Zylinder auf den anderen kommt es zu einer Betonförderunterbrechung, auf deren Auswirkungen später noch näher eingegangen wird. Flüssiger EB (4) wird in der Regel durch eine Dosierpumpe (5) annähernd kontinuierlich mittels Schlauchquetschpumpe (oder Schneckenpumpe) zu einer Mischkammer vor der Spritzdüse (=Aerosol Konverter, 10) gefördert, mit Druckluft zerstäubt und so in den Mischgutstrom dosiert. Die EB-Dosierung ist an die eingestellte Förderleistung der Spritzmaschine gekoppelt. Für das Nassspritzverfahren haben sich EB-Pumpen bewährt, die in das Hydrauliksystem der Betonpumpe integriert sind.

Die üblichen Spritzgeräte erlauben zur Optimierung des Pumpvorgangs und Verringerung der Förderunterbrechung beim Umschalten eine sogenannte Kompensation einzustellen (= kurzzeitig volle Kolbengeschwindigkeit nach dem Umschaltvorgang). Zudem kann zur genaueren Einstellung der Dosierung des Erstarrungsbeschleunigers der Füllgrad der Kolben definiert und voreingestellt werden. Eine gänzliche Füllung der Kolben allein durch Unterdruck ist nämlich schwer möglich.

Bei jedem Spritzvorgang wurden zunächst Kisten (rd. 15*60*40 cm mit schrägen Wänden und einer Öffnung nach unten) für Betonprüfungen vollgespritzt, die gegen die in geneigter Position in einer Höhe von etwa 1,00 m an der Böschung vor dem Versuchsstollen aufgestellt waren (Bild 6). Der Abstand der Düse zur Auftragsfläche beim Spritzen der Kisten betrug 2 bis 2,5 m. Um weitere Erkenntnisse zu gewinnen, wurden einige Versuche mit 3 unterschiedlichen Leistungsstufen der Betonpumpe durchgeführt (Förderleistung 12, 18, 24 m³/h).

2.4 Videoaufnahmen & Tracer im EB

Der Spritzstrahl wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt (Bildfrequenz 1000 fps/frames per second, Bild 6). Die kurzen Filme können in Zeitlupenwiedergabe bzw. in Einzelfotos sehr gute Infos über die Gleichmäßigkeit des Spritzstrahls liefern. Dem Erstarrungsbeschleuniger wurde Uranin als „tracer“ zugegeben, um seine Verteilung im Frisch- und Festbeton nachweisen zu können. Uranin ist „das wasserlösliche Natriumsalz des Fluoresceins (Summenformel C₂₀H₁₀Na₂O₅). Es wurden 0,1 M% bezogen auf den EB zu dosiert, was dem EB eine intensive gelb-orange Farbe verleiht. Unter UV- und Tageslicht ist Uranin ein grün fluoreszierender Farbstoff.



Bild 6: Filmen des Spritzstrahls mit Hochgeschwindigkeitskamera und Spritzen von Kisten

2.5 Beurteilung von unerwünschten Spritzlagen

Zur visuellen, „makroskopischen“ Beurteilung von unerwünschten Spritzlagen, also Inhomogenitäten im aufgetragenen Spritzbeton, die durch nicht fachgerechte Düsenführung oder die in diesem Beitrag diskutierten weiteren Einflüsse entstehen können, werden in der Regel Bohrkerne gewonnen. Sie werden am besten beim Austrocknen beobachtet, sodass sich Hohlräume bzw. Poren, sichtbare Grenzlinien zwischen aufgetragenen Spritzlagen und Zonen erhöhter Porosität zeigen (siehe Bild 13 in Kapitel 3.4). In ACI 506-2 [26] finden sich Bilder von Musterkernen, die zur Beurteilung herangezogen werden können, sodass Bohrkerne nach dem Schulnotensystem in die Klassen 1-5 (core grades) eingeteilt werden.

Über die Möglichkeiten, die Inhomogenität von aufgetragenem Spritzbeton in weiterer Hinsicht, nämlich auch mikroskopisch zu untersuchen und zu visualisieren, berichtet der Beitrag „Lagenbildung – Teil 2: Visualisierung von Inhomogenitäten in aufgetragenem Spritzbeton“ dieser Tagung [29].

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Frischbetoneigenschaften

Die ermittelten Frischbetoneigenschaften der beiden beispielhaften Mischungen sind Tab. 2 zu entnehmen. Das Fließmaß und das Ausbreitmaß des Betons „Bsp.1“ sind deutlich größer als die Maße des Betons „Bsp.2“. Bei konstantem Leimvolumen weist Beton-Bsp.1 einen niedrigeren W/B-Wert aber eine höhere Fließmitteldosierung als Beton-Bsp.2 auf (Tab. 1). Der Luftgehalt war hoch (8 bzw. 10%), was die Pumpfähigkeit beider Mischungen günstig beeinflusste.

Tab. 2: Ergebnisse der Frischbetonprüfungen beim Großspritzenversuch „KAT3“ (2 Beispiele mit unterschiedlichem W/B-Wert und Fließmittelgehalt bei gleichem Leimvolumen)

Mischung (W/B)	Frischbetonrohddichte	LP-Gehalt	Fließmaß, 10 min	Ausbreitmaß, 10 min	Sliper-b, 10 min	Filtratmenge, 15 min	Filtratmenge, 60 min	TLZ
	kg/m ³	%	mm	mm	10 ⁻⁶ bar·h/m	ml	ml	sec
Bsp. 1 (0,45)	2212	8	515	635	4,8	10	22	10
Bsp. 2 (0,52)	2124	10	420	585	1,2	26	48	3,5

In Bild 7 ist die Auswertung der Prüfung mit dem Gleitrohrreometer dargestellt. Charakteristisch für die Viskosität des Nassmischgutes ist die Steigung der Geraden, der Kennwert sliper-b. Es zeigt sich, dass Beton-Bsp.1 ein deutlich höheres b aufweist als Beton-Bsp.2 (4,8 vs. 1,2·10⁻⁶ bar·h/m). Auch die Trichterauslaufzeit TLZ von Beton-Bsp.1 ist höher als von Beton-Bsp.2 (10 sec vs. 3,5 sec.). Der Fließwiderstand von Beton-Bsp.1 in einer Pumpe ist dementsprechend höher als jener von Beton-Bsp.2, trotz des größeren Ausbreitmaßes (63,5 cm vs. 58,5 cm). Ein Ausbreitmaß von 63,5 cm würde gemäß gängiger Beton-Normen als „fließfähige Konsistenz“ bezeichnet werden, während das Maß von 58,5 cm lediglich als „sehr weiche Konsistenz“ eingestuft wird. Der größere Pumpwiderstand von Beton-Bsp. 1 im Vergleich zu Beton-Bsp. 2 trotz des höheren Ausbreitmaßes wird dabei nicht berücksichtigt.

Die Filtratmengen beider Mischungen waren unbedenklich, sodass keine Entmischung während des Pumpvorgangs beobachtet wurde (siehe auch die Darstellung von sliper-b und Filtratmenge als „Verarbeitungsfenster“ für Nassmischgut in [11]).

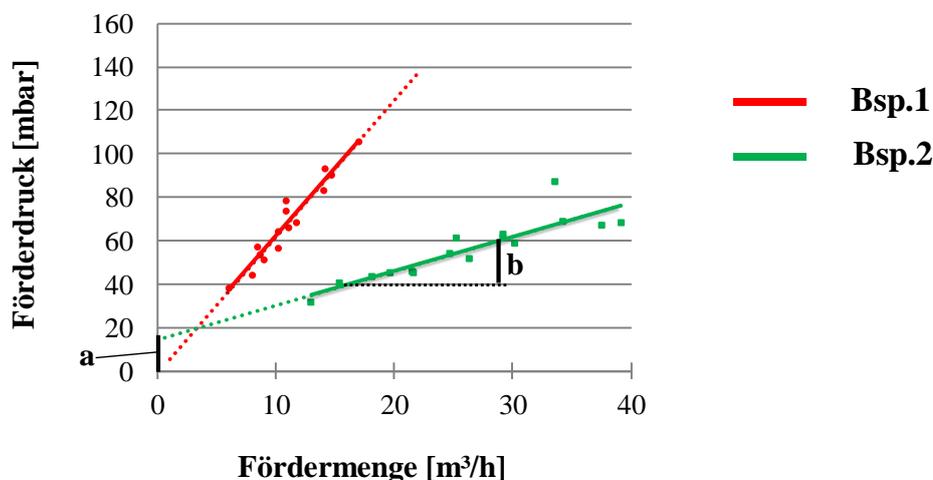


Bild 7: Ergebnisse der Prüfungen mit dem Gleitrohrreometer

In diesem Zusammenhang möchten die Autoren nochmals auf die für die Pumpbarkeit erforderliche Gleitschicht zwischen Beton und Rohrwand hinweisen. Im Zuge eines weiteren Großspritzversuchs („Zams II“) wurde das Vorhandensein dieser Schicht an einer Stichprobe nachgewiesen. Die dabei untersuchte Mischung hatte eine Rezeptur, die den oben vorgestellten Mischungen Bsp.1 und Bsp.2 sehr ähnlich war (410 kg/m³ Bindemittel mit der optimierten Zusatzstoffkombination, GK 8 mm, W/B = 0,48, Leimvolumen 417 l/m³ inklusive Luftgehalt 4%, Mehlkorngesamt 538 kg/m³; Ausbreitmaß 46 cm) und sie war einwandfrei pumpbar. Unmittelbar nach einem Pumpversuch wurde ein Stück der Schlauchleitung in gefülltem Zustand abgenommen, sodass der Beton darin erhärten konnte. Vom ausgehärteten Beton wurden Stücke mit Diamantkreissäge herausgeschnitten. An der polierten Schnittfläche eines solchen Stückes ließ sich eine ausgeprägte Schicht von erhärtetem Bindemittelleim zwischen Schlauchwand und der homogenen Betonmasse im Inneren unter dem Auflichtmikroskop gut erkennen. Diese Schicht (i.e. Gleitschicht) ist mit Feinteilen (i.e. Mehlkorn) angereichert und weist hier eine Dicke von 0,15 – 0,17 mm auf, siehe Bild 8.

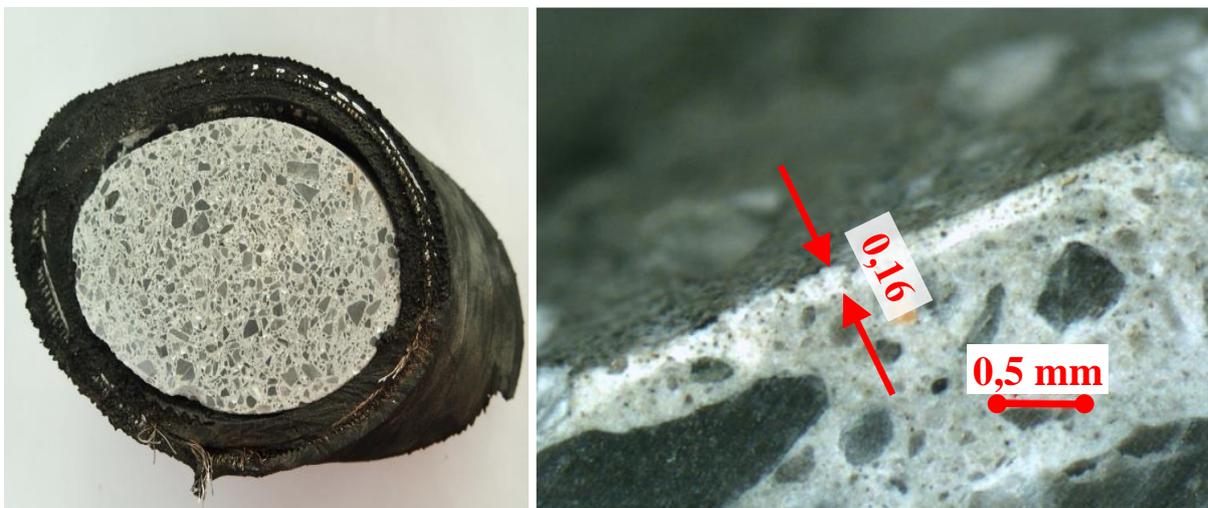


Bild 8: links: Querschnitt durch den Pumpschlauch, rechts: Ausschnitt im Auflichtmikroskop mit erkennbarer Gleitschicht (i.M. 0,16 mm dicker heller Streifen)

3.2 Messungen der Pumpendrucke und Erkenntnisse über die Förderströme von Beton und Erstarrungsbeschleuniger

Im folgenden Abschnitt soll vor allem auf die Wechselwirkung von Betonförderung und EB-Förderung eingegangen werden. Die Fördermengen sind gemäß dem in Kapitel 1 Gesagten näherungsweise dem Druck in der jeweiligen Förderleitung proportional (Bild 1). Allerdings ändern sich die Fördermengen nicht ganz synchron mit dem Druck, vielmehr ist der zeitliche Verlauf von weiteren Faktoren wie u.a. von der im Frischbeton enthaltenen Luft abhängig (diese wird zunächst am Beginn des Pumpenhubes komprimiert und am Ende der Ausstoßphase wieder entspannt). In Bild 9 ist der Druckverlauf in der Leitung unmittelbar am Auslass der Betonpumpe (Sensorposition A) während dreier Beton-Pumpzyklen gemeinsam mit dem Verlauf des Hydraulikdrucks und des Drucks am Auslass der EB-Pumpe (Sensor C) während eines normalen Spritzvorgangs (mit moderater Spritzleistung von 12 m³/h) dargestellt. Der Druck in der Betonförderleitung und der Hydraulikdruck haben qualitativ denselben Verlauf. Der Druck und damit der Förderstrom des Betons und des EB steigen hingegen mit ganz unterschiedlicher Frequenz an und fallen wieder ab. Zu Beginn einer Pumpphase der Betonpumpe wird dementsprechend wenig Beton gefördert, der Druck und damit in erster Näherung die Menge steigt langsam an und erreicht nach etwa ¼ des Pumpzyklus einen konstant bleibenden, hohen Wert. Der EB wird während der ungleichmäßigen Betonförderung annähernd kontinuierlich bzw. in kurzen Stößen in

konstanter Menge zugeführt. Das hat zur Folge, dass am Beginn des Beton-Pumpzyklus bei nur geringer Betonfördermenge die gleich hohe Menge an EB zudosiert wird wie im weiteren Verlauf des Beton-Pumpzyklus bei weitaus größerer Fördermenge von Beton. Somit ändert sich das Verhältnis von EB-Menge zu Betonmenge bzw. EB- zu Bindemittelmenge während des Pumpvorganges, was wie später gezeigt wird negative Folgen für die Qualität des Spritzbetons hat. Es treten Phasen einer EB-Überdosierung bezogen auf die Bindemittelmenge am Beginn jedes Beton-Pumpzyklus auf. Das aus der Spritzdüse austretende Gemisch ist folglich über die Zeit inhomogen.

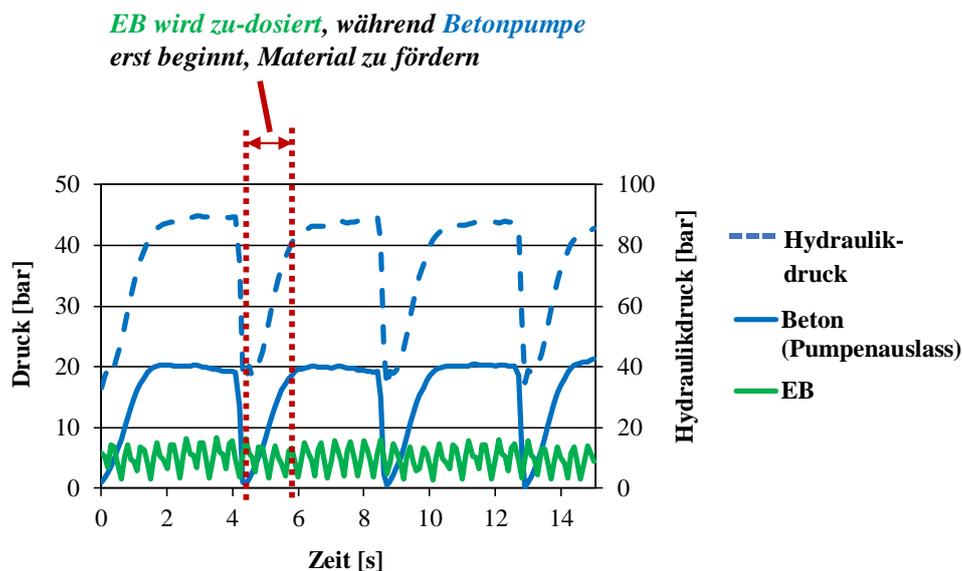


Bild 9: Druck der Betonförderleitung (Pumpenauslass), der Hydraulik und in der EB-Leitung.

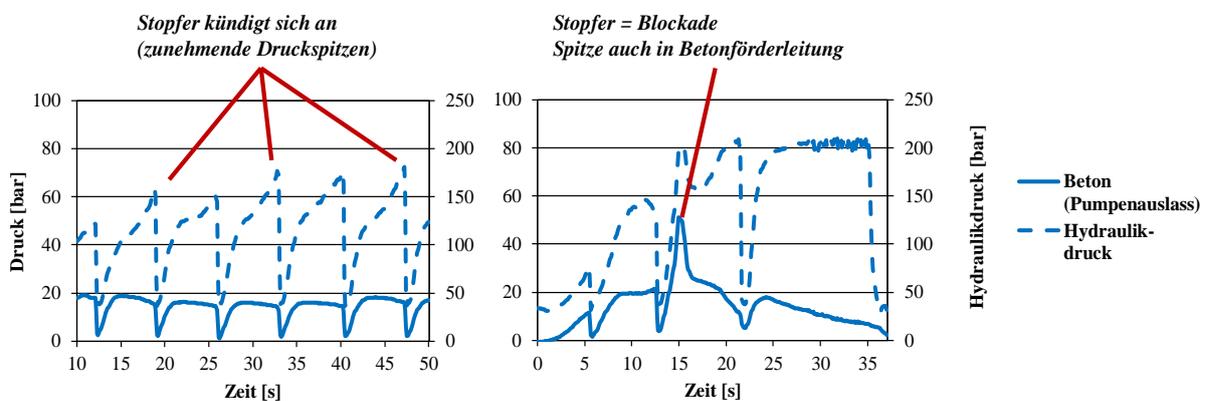


Bild 10: Ankündigung einer Blockade, sichtbar am Druckanstieg in der Betonförderleitung und an der Hydraulik der Betonpumpe bis hin zum „Stopfer“

In Bild 10 wird die Indikation für einen „Stopfer“ angezeigt, also eine Blockade in der Förderleitung meist kurz vor der Düse. Zu erkennen ist der schnelle und hohe Anstieg des Drucks am Beginn des Pumpzyklus in der Betonförderleitung und anhand des hohen Hydraulikdrucks.

Der Füllgrad k der Betonpumpenzylinder beträgt bei guter Füllung etwa 85%, was gemäß Herstellerempfehlung meist als konstanter Standardwert zur Ermittlung der EB-Dosierung am Gerät voreingestellt wird. Er schwankt jedoch beim Spritzvorgang hauptsächlich abhängig von

2 Faktoren (i) der Spritzleistung und (ii) der Viskosität des Frischbetons. Bei theoretisch großer Spritzleistung (bis zu 24 m³/h bei hoher Leistung des Spritzmobils) kann der Füllgrad des Zylinders auf einen niedrigen, aber in der Regel unbekanntem Wert sinken, vor allem dann, wenn der Beton eine zähe Konsistenz hat und entsprechend schwer und langsam in den Zylinder hineingesaugt werden kann. Weil das i.d.R. unzureichend berücksichtigt wird, beträgt die tatsächliche Spritzleistung oft weniger als die voreingestellte theoretische (z. Bsp. nur 2/3 nach Erfahrungsberichten [31]) und die EB-Dosierung ist im Verhältnis zur Betonmenge dann zu hoch.

Bild 11 zeigt Pumpendrucke der beiden beispielhaften Mischungen, die sich an der Betonpumpe trotz gleicher Spritzleistung (12 m³/h) stark unterscheiden. Der höhere Druck in der Betonpumpe der Mischung Bsp.1 ist auf ihre höhere Viskosität (sliper Beiwert $b=4,8 \cdot 10^{-6}$ bar·h/m) im Vergleich zu Bsp.2 ($b=1,2 \cdot 10^{-6}$ bar·h/m) zurückzuführen. Es sei nochmals angemerkt, dass Beton-Bsp.1 ein höheres Ausbreitmaß (63,5 cm) hat als Beton-Bsp.2 (58,5 cm), was nicht auf deren höheren Pumpwiderstand schließen lässt. Die Druckunterschiede zwischen den beiden Mischungen sind nahe der Düse (Aerosol Konverter) geringer als in der Leitung am Betonpumpenauslass. Die Schwankungen (Pulsationen) in der Leitung beim Aerosol-Konverter sind bei Beton-Bsp.1 mit höherer Viskosität höher als bei Beton-Bsp.2 mit niedrigerer.

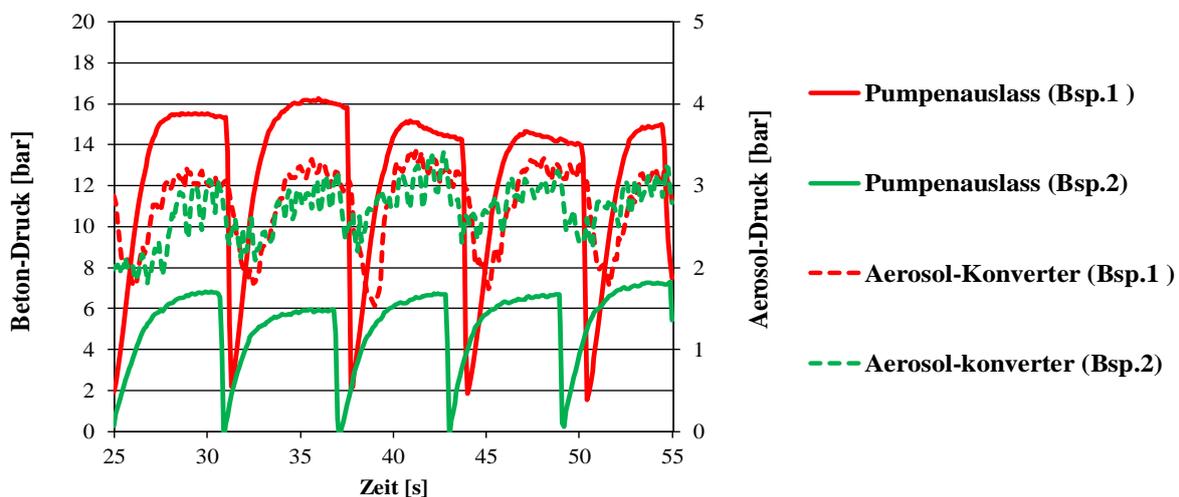


Bild 11: Druck am Auslass der Betonpumpe und am Aerosol-Konverter bei gleicher Spritzleistung (12 m³/h) von 2 Mischungen, die sich in ihrer Viskosität unterscheiden. Beton-Bsp. 1 hat hohe, Beton-Bsp. 2 niedrigere Viskosität (=sliper Beiwert b).

3.3 Videoaufnahmen

In Zeitlupenaufnahmen des Spritzstrahls ist zu erkennen, dass dieser über den Zeitraum eines Beton-Pumpzyklus inhomogen erscheint. In Bild 12 ist eine Serie von Einzelbildern aus solchen Videoaufnahmen von mit einem Tracer versetztem EB im Betonmischgut zu sehen, der den EB gelb-orange einfärbt. Der Spritzstrahl erscheint grau, solange er aus Beton-Nassmischgut mit gut eingemischtem EB besteht. Er wird zunehmend heller bzw. gelblich verfärbt, je weniger Frischbeton und je mehr EB er enthält. In entsprechenden Pumpphasen (am Beginn eines Betonpumpzyklus wie oben beschrieben) tritt praktisch nur EB aus der Düse aus. Zudem sind in Bild 12 Phasen zu erkennen, in denen der Spritzstrahl kompakt ist und Phasen, in denen er streut. In den letzteren tritt Mischgut stoßartig aus der Düse aus („Pulsationen“).

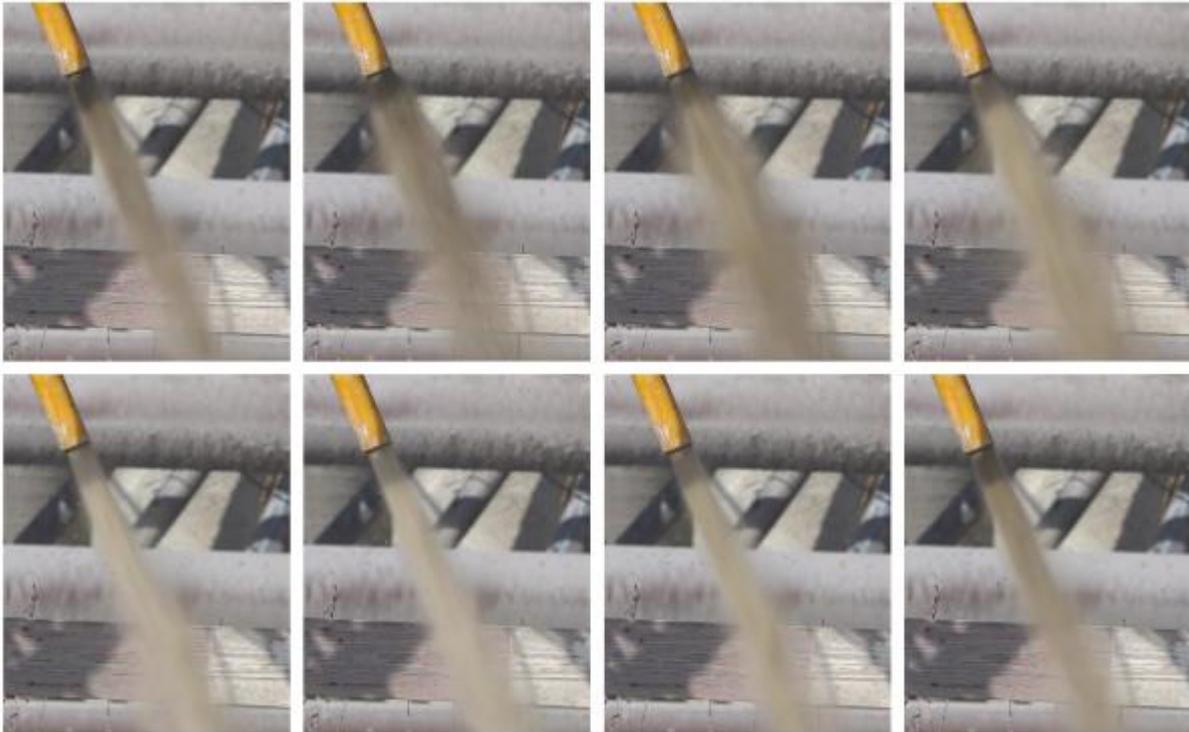


Bild 12: Spritzstrahl im Zeitabschnitt von einem Beton-Pumpzyklus und seine Veränderung in der Zusammensetzung: zunächst enthält er mehr Beton-Nassmischgut (dunkelgrau), dann zunehmend EB mit Tracer (gelblich gefärbter Strahl), zuletzt wieder mehr Beton-Mischgut

Es liegt nahe, dass die Inhomogenität des Mischgutes, das in einem Beton-Pumpzyklus aus der Düse austritt, auch Inhomogenitäten im aufgetragenen Spritzbeton verursacht.

3.4 Unerwünschte Spritzlagen

Im Zuge jedes Großversuches, wurden aus den Spritzbetonkisten im Alter von rund 24 h eine Reihe von Bohrkernen (BK, in der Regel $DM = 100$ bis 150mm und $H = 200$ bis 450mm) gezogen und visuell auf Inhomogenität hin untersucht. Als Richtschnur wurde die Skala des ACI 506-2 [26] zur Beurteilung der Güte von BK nach dem Schulnotensystem herangezogen und zusätzlich beschrieben, welche Art von Fehlern die BK aufweisen: Hohlräume, sichtbare Grenzlinien zwischen aufgetragenen Spritzlagen, Zonen erhöhter Porosität. Einige Beispiele sind in Bild 13 dargestellt.



Bild 13: Unerwünschte Lagigkeit von Bohrkernen, die an oberflächlich trockenen, im Inneren bzw. in den Fehlstellen noch feuchten Proben sichtbar wird.

Im zweiten Teil des Beitrags wird eingehend über die Visualisierung von Inhomogenitäten im aufgetragenen Spritzbeton berichtet und dabei auf makroskopisch sichtbare und mikroskopische Inhomogenitäten („Lagen“) eingegangen [29]. Eine ungleichmäßige Verteilung des mit epifluoreszierendem Tracer versetzten EB ist zu beobachten, welche sich sehr gut mit Lagen korrelieren lässt. Es wird nachgewiesen, dass das auf das oben beschriebene, Maschinen-bedingt schwankende Verhältnis von EB-Menge zu Bindemittelmenge beim Auftragen des Spritzbetons zurückzuführen ist.

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes „ASSpC“ wurde eine Reihe von Großspritzversuchen mit einem Spritzmobil durchgeführt, das mit Drucksensoren zur Messung der Druckverläufe in den Förderleitungen beim Spritzvorgang (von der Betonpumpe bis zur Spritzdüse, EB-Pumpe sowie Druckluft) ausgestattet war. Begleitend wurden die Frischbetoneigenschaften, nämlich das Ausbreitmaß sowie die Viskosität mit dem Gleitrohrreometer und die Filtratwassermenge mit der Filterpresse, geprüft und hier beispielhaft 2 Mischungen gleichen Leimvolumens aber unterschiedlichem W/B-Wertes und Fließmittelgehaltes miteinander verglichen. Zudem wurden Videoaufnahmen des Spritzstrahls mit einer Hochgeschwindigkeitskamera analysiert. Der Erstarrungsbeschleuniger wurde mit einem Markierstoff (Uranin-Tracer) versetzt, sodass seine Verteilung im Spritzstrahl und später im aufgetragenen Spritzbeton sichtbar gemacht werden konnte, wie im Beitrag „Lagenbildung - Teil 2: Visualisierung von Inhomogenitäten in aufgetragenem Spritzbeton“ [29] nachgelesen werden kann.

Es zeigte sich, dass bei richtiger Düsenführung die Bildung unerwünschter Lagen im Spritzbeton stark von Maschinen bedingten Einflüssen des Pump- und Spritzvorgangs abhängt. Dazu wurden die Drücke in den Förderströmen von vielen Versuchen ausgewertet und mit Zeitlupenfilmen verglichen. Außerdem beeinflusst die Viskosität der Gleitschicht, die sich mit der jeweiligen Mischung ausbildet, die Pumpeigenschaften und darüber hinaus beeinflusst die Viskosität der Mischung den Pumpenfüllungsgrad. Erstere kann mittels Gleitrohrreometer gemessen (Beiwert b), aber nicht alleine mit dem herkömmlichen Ausbreitmaß erfasst werden. Für die Viskosität der ganzen Mischung gibt die Trichterauslaufzeit gute Kennwerte. Für eine Beurteilung der Pumpbarkeit muss zudem die Stabilität des Nassmischgutes gegen Entmischung (in der Pumpleitung) mit Hilfe des Kennwertes „Filtratwassermenge“ mittels Betonfilterpresse eingeschätzt werden (siehe dazu auch das „Verarbeitungsfenster“ für Nassmischgut in [8]). Mithilfe der Mikroskopie eines Querschnitts einer erhärteten Betonprobe aus einem Pumpschlauch wurde aufgezeigt, dass sich tatsächlich eine „schmierfähige“ Gleitschicht mit einer Dicke von 0,16 mm ausbildet. Diese Schicht ist reich an Feinteilen, das bedeutet, dass die Mischungen einen ausreichenden Mehlkorngelbalt und ein entsprechendes Leimvolumen aufweisen sollten, um gut pumpbar zu sein. In den in diesem Beitrag beschriebenen Fällen gut pumpbarer Mischungen betrug der Mehlkorngelbalt wenigstens 507 kg/m^3 , das Leimvolumen inklusive Frischbetonluft wenigstens 417 l/m^3 und die Gleitschicht wies entsprechende rheologische Eigenschaften auf (wie oben beschrieben, siehe auch [8]).

Die Lagenbildung geht nicht nur mit makroskopisch sichtbaren Trenn- und Fehlstellen, sondern auch mit einer unerwünschten Ungleichverteilung des Erstarrungsbeschleunigers (EB) im Beton bzw. deren Folgen auf die Hydratation (Bindemittelerhärtung) einher. Die resultierende Inhomogenität hat weitreichende negative Folgen auf die Spritzbetoneigenschaften. Fehlerhafte Zonen im Beton haben nicht die planmäßige bzw. geforderte Qualität hinsichtlich Festigkeit und Dauerhaftigkeit [29]. Die Anforderungen an die Herstellung von Spritzbeton gemäß ÖVBB-Richtlinie [7] können mit der zurzeit verfügbaren Maschinenteknik gerade hinsichtlich der homogenen Einmischung von EB nicht hinreichend eingehalten

werden. Das dort unter Pkt. 6.1 geforderte homogene Gefüge und die unter Pkt. 6.4 geforderte perfekte Synchronisation zwischen Betonfluss und EB-Zugabe, kann derzeit vielfach nicht eingehalten werden.

Abgeleitet von den gezeigten Ergebnissen, eröffnet sich ein großes Entwicklungspotenzial für Geräte und Verfahren. Dafür ist es nötig, die Ursachen für die Lagenbildung (Pulsation, Einspritzen von Rückprall, Inhomogenität im geförderten Beton, Beschleunigerüberdosierung beim Umschalten der Pumpe etc.) noch genauer zu analysieren und Lösungsvorschläge zur Verbesserung der Maschinen- bzw. Pumptechnologie auszuarbeiten. Asynchrone Pumpvorgänge von Beton- und EB-Pumpe sollten zukünftig vermieden werden bzw. eine Vergleichmäßigung der Spritzbetonqualität durch verbesserte Steuerungsprozesse erfolgen. Alternative Pumptechnologien, neue Steuerungslösungen sowie eine gezielte Automatisierung wären denkbar. Eine Reduktion von Maschinen-bedingten Inhomogenitäten des Mischguts würde zur besseren Ausnutzung der Baustoffe, weniger EB-Verbrauch, darüber hinaus zu besseren technologischen Eigenschaften und vor allem zu deutlich verbesserter Dauerhaftigkeit führen.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des FFG-ÖBV-Forschungsprojektes ASSpC von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG 871055) und industriellen Partnern gefördert. Die Autoren möchten sich bei allen Partnern für die Unterstützung bedanken.

5. Literatur

- [1] Kusterle et al.:
Kapitel IX, Spritzbeton im Tunnelbau. In: Bergmeister, K.: Beton-Kalender 2014. Wiley-VCH. Weinheim, 2014.
- [2] Ginouse, N., Jolin, M.:
Mechanisms of placement in sprayed concrete. *Tunnelling and Underground Space Technology* 58, 2016, pp. 177-185.
- [3] Uomoto, T. (Ed.):
JSCE Guidelines for Concrete, No.8 Recommendations for Shotcreting (draft). 2006.
- [4] Warner, J.:
Understanding Shotcrete. *Concrete International* 1995, In: Springenschmid, R.: *Betontechnologie für die Praxis*. Bauwerk, 2007.
- [5] Jolin, M.; Thomassin, M.; Nehasil, J.:
Shotcrete Education and Nozzlemen Certification in North America. In: Kusterle, W. (Hrsg.): *Spritzbeton-Technologie 2012, Proc. der Tagung, 12.1. + 13.1.20 12, Alpbach*.
- [6] ACI 506.5R-09: Guide for Specifying Underground Shotcrete.
- [7] Österreichische Bautechnik Vereinigung:
Richtlinie Spritzbeton. Wien, 2009.
- [8] ÖNORM EN 12350-5:2019 08 15: Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß.
- [9] ÖNORM EN 12350-7:2019 11 15: Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren.
- [10] ÖNORM EN 12350-9:2010 10 15: Prüfung von Frischbeton - Teil 9: Selbstverdichtender Beton – Auslauftrichterversuch.
- [11] Thumann, M.:
Anpassung der Verarbeitungseigenschaften von Frischbetonmischungen für die Entwicklung von Spritzbetonen mit reduziertem Versinterungspotential. Ruhr-Universität Bochum, Dissertation 2019.
- [12] Kaplan D., Larrard F.D., Sedran, T.:
Design of concrete pumping circuit. *ACI Mater. J.* 102, 2005, pp- 110-117.

- [13] Kasten, K.:
Gleitrohr-Rheometer. Ein Verfahren zur Bestimmung der Fließeigenschaften von Dickstoffen in Rohrleitungen. Dissertation. TU-Dresden 2009.
- [14] Secrieru, E.; Mechtcherine, V.:
Zur Prüfung der Pumpbarkeit von Beton. Beton (2016), Heft 1+2, S. 18-23.
- [15] Secrieru, E.; Shirin, F.; Schröfl, C. et al.:
Study on concrete pumpability combining different laboratory tools and linkage to rheology. Construction and Building Materials 114 (2017).
- [16] Ngo, T.T.; Kadri, E.H.; Bennacer, R. et al.:
Use of tribometer to estimate interface friction and concrete boundary layer composition during the fluid concrete pumping. Construction and Building Materials (2010), Heft 24, S. 1253-1261.
- [17] Schleibinger Testing Systems: Rheologie, URL:
http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Rheologie:Sliper_bestimmt_die_Pumpfaehigkeit_von_Beton. Zugriff 9.10.2020.
- [18] Kaplan, D.; Larrard, F. de; Sedran, T.:
Avoidance of Blockages in Concrete Pumping Pro-cess. ACI Materials Journal 102 (2005), Heft 3, S. 183-191.
- [19] Browne, R.; Bamforth, P.:
Tests to Establish Concrete Pumpability. ACI Journal 74 (1977), Heft 5, S. 193-203.
- [20] Cotardo, D.; Lohaus, L.; Begemann, C.:
Zum Entwässerungsverhalten von Beton unter hohem Druck - Einfluss der Fließgrenze des Feinstmörtels. In: Tue; N.V.; Krüger, M. et al. (Hrsg.): 4. Grazer Betonkolloquium. TU Graz, Graz, 2018, S. 193-200.
- [21] Secrieru, E.; Butler, M.; Mechtcherine, V.:
Prüfen der Pumpbarkeit von Beton - Vom Labor in die Praxis. Bautechnik 91 (2014), Heft 11, S. 797-811.
- [22] Reinhold, M.:
Methoden zur zielsicheren Vorhersage der Pumpbarkeit von Betonen mit nicht idealer Gesteinskörnungs-Sieblinie. BetonWerk International (2014), Heft 1, S. 56-59.
- [23] Ngo, T.T.; Kadri, E.H.; Cussigh, F. et al.:
Relationship between concrete composition and boundary layer composition to optimise concrete pumpability. European Journal of Environmental and Civil Engineering 16 (2012), Heft 2, S. 157-177.
- [24] Putzmeister Holding GmbH:
Technologie im Detail. URL: http://www.putzmeister-solid-pumps.de/documents/20152/8876826/Global_STransferTube_01_1000x500.jpg/7202e926-2dd7-4d39-e890-204ae2afb5d7?t=1550044075555; Zugriff 26.10.2020.
- [25] Österreichische Bautechnik Vereinigung:
Merkblatt "Weiche Betone" - Inklusive ergänzender Klarstellungen, 2009.
- [26] ACI 506-2: Specifications for shotcrete, 1995.
- [27] Juhart, J., Briendl, L., Mittermayr, F., Röck, R., Thumann, M., Kusterle, W.:
Mischungsentwicklung von nachhaltigem Spritzbeton mit kombinierten Zusatzstoffen. In: Nguyen, V.T.; Krüger, M.; Freytag, B.; Baldermann, C.; Schuster, D. (Hrsg.): 4. Grazer Betonkolloquium, Verlag der Technischen Universität Graz, 2018.
- [28] Kusterle et al.:
ASSpC – ein Forschungsprogramm für den Spritzbeton von Morgen. In: ÖBV (Hrsgb.) Bautechnik 2019. URL: https://www.bautechnik.pro/download/Bautechnik_2019.pdf Zugriff am 8.10.2020.
- [29] Sakoparnig, M. et al.:
Lagenbildung Teil 2: Visualisierung und Untersuchung von Inhomogenitäten im Spritzbeton. In: Galler, R., Goger, G., Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Technologie 2021, Alpbach, öbv, Wien.
- [30] Nobile, A.S.:
Verarbeitbarkeit von Spritzbeton inklusive Durchführung von Frischbetonprüfungen auf Baustellen. Masterarbeit OTH Regensburg, 2017.
- [31] Aldrian, W.:
Erfahrungsbericht im Rahmen des ÖBV-Seminars „Spritzbeton im Holhraumbau“. Zentrum am Berg / Erzberg, 1.10.2020.

Zu den Autoren

Dipl.-Ing. Dr. techn. Joachim Juhart

Studium des Bauingenieurwesens und Doktorat an der TU Graz, Mitarbeit im Ingenieurbüro, Mitarbeiter im Baulabor der FH Kärnten, aktuell stv. Leiter des Inst. für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz mit angeschlossener Zertifizierungs-, Überwachungs- und Prüfstelle

joachim.juhart@tugraz.at

Marlene Sakoparnig, MSc

Studium der Erdwissenschaften (Hydrogeologie und Hydrogeochemie) an der Karl-Franzens-Universität Graz, seit 2017 Universitätsassistentin am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie an der TU Graz

m.sakoparnig@tugraz.at

Dr.-Ing. Maria Thumann

Studium des Bauingenieurwesens an der OTH Regensburg, 2013 bis 2019 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Ostbayerischen Technischen Hochschule in Regensburg.

maria.thumann@gmx.de

Johannes Flotzinger, M.Eng.

Studium des Bauingenieurwesens an der OTH Regensburg, 2019 bis 2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der OTH, seit 2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität der Bundeswehr München

johannes.flotzinger@hotmail.de

Dr. sc. nat. Benedikt Lindlar

Studium der Chemie und der Germanistik an der Universität Konstanz, Dissertation an der ETH Zürich, Forschung am Lehrstuhl der Universität Konstanz, seit 2002 Sika Technology AG

lindlar.benedikt@ch.sika.com

Dr. Rudolf Röck

Studium Chemie und Physik an der Uni Innsbruck; Leiter F&E im Zementwerk Schretter&Cie; Postdoc Uni Innsbruck am Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

rudolf.roeck@uibk.ac.at

Dr. Florian Mittermayr

Studium der Geowissenschaften an der Universität Innsbruck, Doktorat an der TU Graz am Institut für Angewandte Geowissenschaften, seit 2013 am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie an der TU Graz

f.mittermayr@tugraz.at

Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Kusterle

Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Innsbruck, Mitarbeit im Ingenieurbüro (Brückenbau), Dozent an der Universität Innsbruck. Beratungstätigkeit für Spritzbeton, Baustoffe im Tunnelbau, Betoninstandsetzung, Faserbetone, Brandschutz im Tunnelbau und Betontechnologie. 2001 bis 2020 Prof. an der OTH Regensburg

wolfgang@kusterle.net