
MINIATURISIERTES LABORSPRITZVERFAHREN FÜR SPRITZBETON – NEUE MÖGLICHKEITEN DER PRODUKTENTWICKLUNG, REZEPTUROPTIMIERUNG UND QUALITÄTSKONTROLLE

MINIATURISED LABORATORY SPRAY METHOD FOR SHOTCRETE – NEW POSSIBILITIES FOR THE PRODUCT DEVELOPMENT, MIX DESIGN OPTIMISATION AND QUALITY CONTROL

Benedikt **Lindlar**, Sika Technology AG, Zürich, Schweiz
Christian **Stenger**, Sika Technology AG, Zürich, Schweiz
Didier **Lootens**, Sika Technology AG, Zürich, Schweiz

Für die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons fehlt bis heute eine schnelle Laborprüfmethode, welche sich für die gegebene Fragestellung eignet sowie eine hohe Genauigkeit der Messungen aufweist. Klassische Mörtel- und Betonprüfverfahren aus dem Laborbereich zur Messung der Erstarrung und des Aushärtens stoßen auf Grund der Besonderheiten im Spritzbeton in der Regel schnell an ihre Grenzen und die Resultate sind dann im Hinblick auf die realen Spritzbetonsysteme wenig hilfreich. Eine solche Methode im Labormaßstab ist also ein höchst interessanter Aspekt der Spritzbetonprüfung. Sie bietet nicht nur verbesserte Möglichkeiten der gezielten Zusatzmittelenwicklung, sondern auch im Hinblick auf die Spritzbetonrezeptur-Optimierung und die kontinuierliche Qualitätsüberwachung des Spritzbetons. Eine solche Qualitätsüberwachung betrifft nicht nur die Zusatzmittel sondern alle reaktiven Rohstoffe des Spritzbetons.

Mit dem Laborsystem MiniShot wird erstmals die Möglichkeiten einer realitätsnahen Probenzubereitung in Kombination mit einer kontinuierlichen, zerstörungsfreien Festigkeitsmessung mittels Ultraschall vorgestellt.

Till now, there is no fast, valid and reliable laboratory testing method available for the different aspects of shotcrete strength development. The current testing methods as typically applied in mortars and concrete, when used in shotcrete, usually prove to be no more valid for this application due to the very specific characteristics of the shotcrete technology. Consequently, the outcome of these laboratory tests is not as helpful regarding predictability on the real system as it would be required. Hence, such a testing method on laboratory scale would be highly interesting. It would not only provide an improved tool for admixture development but also for mix design optimisation and the quality assurance of shotcrete. The latter regarding the admixtures and the accelerator as well as all reactive components of the shotcrete.

With the laboratory system MiniShot, we demonstrate the possibilities of a realistic specimen production in combination with a continuous, non-destructive strength measurement using ultrasound technology.

1. Einleitung

Ein grundsätzliches Problem jeder Produktentwicklung ist die geeignete Prüfung der angestrebten Eigenschaften. Im Falle des Spritzbetons betrifft das sowohl die Ebene der

eingesetzten Rohstoffe wie auch des Spritzbetons selbst, der ja eine weitere Produktstufe darstellt und aus einer komplexen Kombination verschiedener chemischer Reaktionen resultiert. Im Hinblick auf den realen Spritzbeton selbst gibt es eine Reihe valider und auch einigermaßen reliabler Methoden, wie z.B. die Penetrometer- und die Hilti-Bolzen-Prüfung für die früheste und frühe Festigkeitsentwicklung. Diese Methoden werden am Bauobjekt selbst oder an ebendort parallel zur Spritzbetonapplikation produzierten Prüfkörpern angewandt und gewährleisten, ausreichende Grundkenntnisse des Anwenders bezüglich des Spritzbetonverhaltens vorausgesetzt, eine gute Kontrolle der höchst sicherheitsrelevanten Spritzbetoneigenschaften während der Bauausführung.

Im Hinblick auf die Entwicklung der einzelnen Komponenten des Spritzbetons, insbesondere Zement und Spritzbetonbeschleuniger, fehlte für deren optimale Kombination sowie kontinuierliche Kontrolle allerdings eine solche Methode, welche in der Lage ist, die chemischen und mechanischen Verhältnisse im Spritzbeton sinnvoll im Labormassstab zu abstrahieren. Im Folgenden wird das neue Laborsystem MiniShot im Kontext der klassischen Laborfestigkeitsmessungen beschrieben. Neben der eigentlichen Eigenschaftsmessung mittels Ultraschallspektrometrie spielt dabei die Probenapplikation eine zentrale Rolle. Es gilt, den Besonderheiten des Spritzbetons im Vergleich zu „klassischem“ Beton oder Mörtel Rechnung zu tragen, was im Falle der klassischen Labormethoden nicht gegeben ist.

2. Labormessmethoden für zementöse Materialien und Spritzbeton

Die üblichen Labormessmethoden, welche im Zusammenhang mit zementösen Baustoffen eingesetzt werden, z.B. Penetrationsnadelverfahren [1, 2], wurden nicht dezidiert für die Spritzbeton-Anwendungstechnik entwickelt. Schon alleine aus dieser Tatsache resultiert das Risiko, falsche Schlüsse aus diesen Resultaten zu ziehen, auch wenn die Aussagekraft dieser Methoden bezüglich der Druckfestigkeit grundsätzlich gut belegt werden kann [3].

Es stellt sich also die Frage, weshalb Laborresultate zu Spritzbetonfestigkeiten, Druckfestigkeiten an Prüfprismen eingeschlossen, in der Regel keine oder nur eine sehr geringe Aussagekraft zu Spritzbetonresultaten in Feldversuchen haben [4]. Der Unterschied zwischen normalen Applikationsmethoden zementöser Baustoffe und Spritzbeton ist offensichtlich: Die Mischung der reaktiven Komponenten erfolgt üblicherweise bei der Betonproduktion durch einfaches Mischen der unterschiedlichen festen Fraktionen Zement, Sand und Kies mit dem Wasser und ggf. Zusatzmitteln. Im Falle eines typischen Nass-Spritzbetons werden die Komponenten des Frischbetons zunächst in selber Weise gemischt, jedoch erfolgt dann die Zugabe des Beschleunigers erst im Zuge der eigentlichen Spritz-Applikation direkt in der Düse.

Betrachtet man Strömungsverhältnisse, Geometrie und Geschwindigkeiten in einer Spritzbetondüse im Vergleich zu einem Mischer, so zeigt sich, dass die Scherkräfte, welche während des Betonspritzens auf die Materialien wirken, um fünf bis sechs Größenordnungen höher sind als in einem Labor- oder Betonmischer [4]. Die mechanischen Kräfte auf die Materialien sind im Spritzbeton also um einen Faktor 100'000 bis 1'000'000 grösser als im Falle der Beton- und Mörtel-Produktion. Mit Hilfe kontinuierlicher Ultraschallspektrometrie konnte gezeigt werden, dass diese mechanischen Kräfte während des Spritzvorganges schon im unbeschleunigten Zement-Wasser-System einen signifikanten Einfluss auf die gesamte Kaskade der chemischen Reaktionen während der frühen Festigkeitsentwicklung haben. Folgerichtig trifft der an der Düse injizierte Beschleuniger im Spritzbeton von Anfang an auf eine andere chemische Umgebung als wenn man ihn in einem Mischer zugibt [4]. Von daher ist es dann wenig überraschend, wenn die Resultate aus diesen Labormethoden nicht mit der Realität übereinstimmen, da die Probenpräparation Prüfmaterialien mit unterschiedlichen chemischen Reaktionssystemen erzeugt.

Diese aus der Probenpräparation resultierende Problematik, im Labor ein anderes chemisches System zu betrachten als im Feld, trifft grundsätzlich auf alle Labormethoden zu, solange es nicht gelingt, die physikalischen Bedingungen des Spritzens im Labormassstab nachzubilden. Das heisst, es ist zunächst einmal unwesentlich, welche Messtechnik angewandt wird, d.h. ob man Nadelpenetration, Druckfestigkeitsprüfung oder Wärmetönung beobachtet.

Kalorimetrische Methoden liefern anhand der zeitlich aufgelösten Wärmetönung einen gut messbaren Eindruck der exothermen chemischen Reaktionen im Probengemisch. Sie bergen allerdings die Unsicherheit, den Energiefluss in der Regel, mangels Wissen um die eigentliche Natur der korrespondierenden Reaktion, nicht interpretieren, geschweige denn einer Festigkeit als Resultat eben dieser chemischen Reaktion zuordnen zu können [5].

Man kann also zusammenfassen, dass die üblichen Labormethoden, insbesondere Nadelpenetration und Druckfestigkeitsmessung, grundsätzlich geeignet wären, die mechanischen Eigenschaften von Spritzbeton-artigen Mischungen im Labor zu bestimmen. Auf Grund der sehr speziellen physikalischen Gegebenheiten während der Spritzapplikation scheitern aber alle diese Methoden schon an einer geeigneten Präparation der Prüfmateriale. Diese Problematik war der zentrale Ausgangspunkt dieser Arbeit zu einem miniaturisierten Laborspritzverfahren für Spritzbeton.

3. Prüfmateriale

Ein Nassspritzbeton mit einem Grösstkorn von 8 mm ist für ein miniaturisiertes Laborverfahren auf Grund des groben Zuschlags natürlich kein geeignetes Prüfmaterial. Eine Modellprobe sollte allerdings alle für die Festigkeitsentwicklung relevanten Aspekte realistisch widerspiegeln. Labormessungen zielen dabei in erster Linie auf die besonderen chemischen Reaktionen im Spritzbeton ab. Insofern kann man die einzelnen Komponenten und Parameter des Spritzbetons näherungsweise in zwei Kategorien einteilen:

1. Diejenigen, welche die Festigkeit physikalisch beeinflussen und deren Beitrag über die Zeit im Wesentlichen konstant bleibt. Das sind Sand, Kies, Siebkurve und das im üblichen Beobachtungszeitraum der Frühst- und Frühfestigkeit als konstant annehmbare Wasser-Zement-Verhältnis.
2. Chemisch reaktive Anteile des Gemisches, welche an der sich im zeitlichen Verlauf verändernden Festigkeit chemischen Anteil haben, insbesondere Zement, Hydratationswasser, Feinstanteile, Zusatzmittel, Beschleuniger, sowie die Mischmechanik und Umgebungstemperatur.

Hinsichtlich der Skalierung des Spritzbetons für Labor-Festigkeitsmessungen sind die ersten Komponenten und Parameter vernachlässigbar, es sind vielmehr die im zweiten Punkt genannten, welche für die Spritzbeton-Chemie verantwortlich und wesentlich sind. Diese Anteile der Rezeptur stellen daher die Grundlage der zwingend in der Labormessung zu verwendenden Bestandteile dar, da ebendiese die veränderbaren Einflussgrößen für die Frühfestigkeitsentwicklung sind. Was in diesem Zusammenhang vernachlässigt wird, sind weitere physikalische Beiträge zur Festigkeitsänderung, welche z.B. aus der sich verändernden Haftung des Zementleims am Zuschlag resultieren.

Eine Prüfmischung, welche derart auf die chemisch relevanten Aspekte reduziert ist, führt zu einer dramatischen Verringerung der Stoffmengen, ist fein genug, um auch mit kleinem Gerät verarbeitet werden zu können, und fokussiert den experimentellen Blick auf die Chemie des Spritzbetons durch ein deutlich konzentrierteres Zement-System. Es ist allerdings zu beachten, dass durch diese Konzentrierung die Wärmetönung der Zementhydratation und



Bild 1: Das MiniShot-Laborsystem zur realistischen Prüfung des Abbindens und Erhärtens von Spritzbeton anhand einer äquivalenten Zementpaste. Links das Applikationsgerät MiniShot, rechts eine gespritzte Probe und eine leere Messzelle des Ultraschall-Spektrometers Pulsment.

Beschleunigerreaktion im Vergleich zum realen Spritzbeton überbetont wird. Durch eine geeignete Prüfkörperdimensionierung muss diesem Effekt entgegengewirkt werden. Im praktischen Laborexperiment stellt die Begrenzung der Prüfkörpererwärmung auf 3 – 5°C dabei eine zwar willkürliche aber sinnvolle Näherung dar.

4. Labor-Prüfsystem

Das miniaturisierte Laborspritzsystem für Spritzbeton besteht aus dem eigentlichen Spritzgerät MiniShot und einem Ultraschallspektrometer Pulsment für die Festigkeitsprüfung (Bild 1).

4.1 MiniShot - Spritzgerät

Die Verkleinerung der Spritzbetonapplikation auf den Labormassstab bedingt die Lösung zweier Problemfelder. Einerseits galt es, das eigentliche Ziel dieser Skalierung zu erreichen, dass die mechanischen Gegebenheiten in der Spritzdüse realitätsnah im Labor nachgebildet werden. Neben den grundlegenden technischen Aspekten heisst das im Wesentlichen, die Abmessungen und Volumenströme so aufeinander abzustimmen, dass für eine sehr kurze Zeit eine Scherrate von etwa $10^5 - 10^6 \text{ s}^{-1}$ auf die Prüfmaterialien wirkt. Im Zuge des Düsendesigns ergab sich dabei die zusätzliche Hürde, dass durch die extreme Verkleinerung des Düsendurchmessers die Homogenisierung der Spritzmischung über die Spritzfläche je nach Düsengeometrie stark schwankt.

Das zweite Problemfeld ist der durch die Skalierung stark ansteigende relative Dosierungsfehler eines solchen Spritzgerätes. Aus diesem Grunde wurden im MiniShot sowohl zur Förderung der Zementpaste wie auch für den Beschleuniger Kolbenpumpen mit frequenzgesteuerten Linearmotoren gewählt. In Kombination mit der fortlaufenden Darstellung des Motorenstroms am Monitor wird so sichergestellt, dass eine maximale Dosiergenauigkeit erreicht wird und einfach kontrolliert werden kann, damit die beiden Pumpen während des Experimentes gleichmässig arbeiten. In Bild 2 sind die Kallibrationsmessungen der Fördermengen am MiniShot dargestellt. Die gemessenen Fördermengen liegen dabei sowohl für die Zementpaste als auch den Beschleuniger im angestrebten Volumenbereich sehr gut beim eingestellten Wert.

4.2 Pulsment – Festigkeitsprüfung mittels Ultraschallspektrometrie

Wie bereits in Abschnitt 3 erwähnt, resultiert aus dem Weglassen des Sandes bzw. der Konzentration des Zementes in der Prüfpaste, verglichen mit realem Spritzbeton, eine sehr viel stärkere Erwärmung des Materials. Eine unrealistisch hohe Erwärmung des Prüfkörpers wiederum würde dazu führen, dass man eher den Beschleunigungseffekt der Temperatur anstelle der Beschleunigerchemie messen würde.

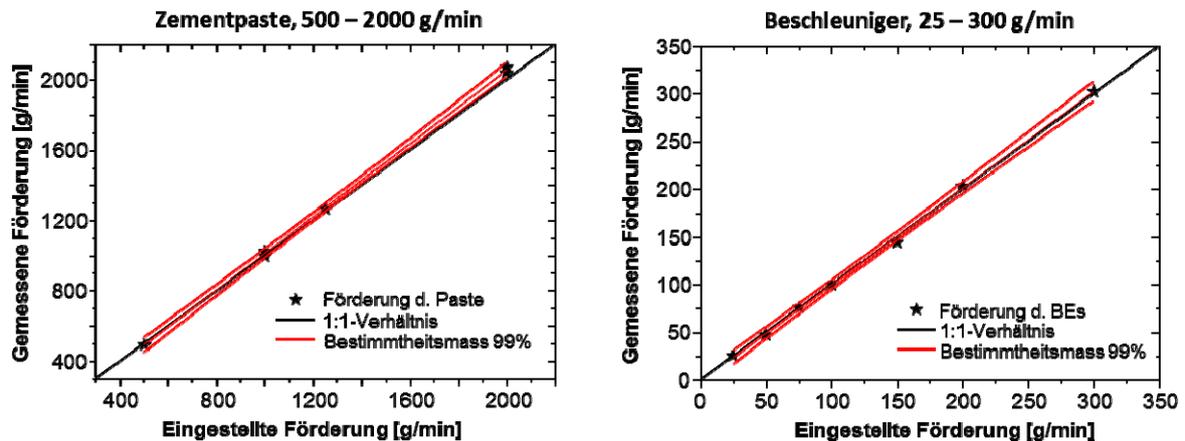


Bild 2: Messungen der Fördergenauigkeit des MiniShot-Gerätes für die Zementpaste (links) und den Beschleuniger (rechts), für die jeweiligen angestrebten Fördermengen-Bereiche.

Grösse und Form des Probenkörpers sind so enge Grenzen gesetzt und dadurch z.B. Nadelpenetrationsprüfungen ausgeschlossen, da hierfür eine deutlich zu grosse Probenkörperdicke benötigt würde. Im MiniShot-System kommt stattdessen das Ultraschallspektrometer Pulsment zum Einsatz. Die Probendicke kann für diese Messmethode frei gewählt werden, so dass sich Wärmetönung und Wärmeübertragung an der Oberfläche realitätsnah ausgleichen und die Probenerwärmung in einem realistischen Bereich von 3 – 5 °C begrenzt bleibt. Neben diesem methodischen Vorteil bietet die Ultraschallspektrometrie zudem den Vorteil, dass man automatische, kontinuierliche Messungen des Schermoduls erhält, was den messtechnischen Aufwand und die Fehleranfälligkeit verringert.

In Bild 1 ist auf dem rechten Foto die Ultraschall-Messzelle abgebildet: Die eigentliche Probe wird auf einem Acrylglasträger appliziert. An dessen Unterseite sind neben den drei Ultraschallsensoren (dunkle Quadrate) auch zwei Temperaturfühler (kleiner Kreis) angebracht. In Bild 3 sind dazu der schematische Aufbau im Schnitt einer solchen Messzelle und das Messprinzip dargestellt. Pro Messzelle werden während des Experimentes mittels der drei Ultraschall-Sensoren drei parallele Messungen durchgeführt. Hierdurch können einerseits eventuelle Fehlmessungen (Ablösen der Probe oder versehentliche Luft einschlüsse) sehr gut detektiert und korrigiert werden, zudem wird durch die Mittelung dieser drei Messungen eine bessere Reproduzierbarkeit erreicht.

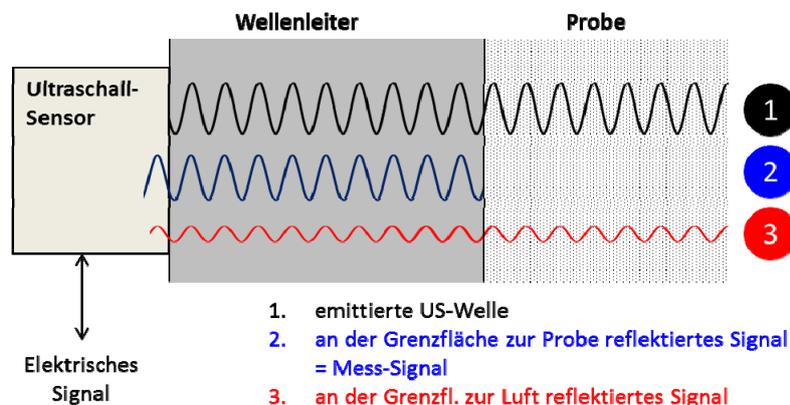


Bild 3: Schematischer Aufbau und Messprinzip der Ultraschall-Messzelle

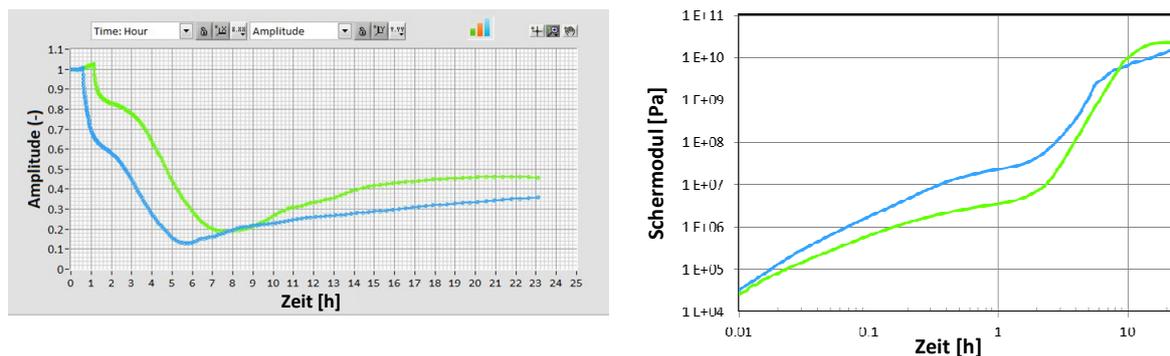


Abb. 4: Exemplarische Ultraschall-Messung eines MiniShot-Experimentes. Links die noch unkalibrierten Rohdaten der Amplituden-Änderung, rechts die daraus abgeleiteten Kurven der Schermodule.

Für die Messung wird eine Ultraschall-Transversalwelle von 800 kHz (Bild 3, schwarze Welle) durch den definierten Acrylglas-Wellenleiter auf die Grenzfläche der zu messenden Probe emittiert. Hier wird die Messwelle erstmals reflektiert und diese reflektierte Welle (Bild 3, blaue Welle) wird durch denselben Sensor, an dem die Ausgangswelle erzeugt wurde, detektiert. Dieser erste Reflex dient der eigentlichen Messung des Schermoduls. Zeitlich verzögert erfolgt dann noch eine zweite Reflexion des ursprünglichen Signals an der Grenzfläche zur Luft (Bild 3, rote Welle), welches in diesem Versuchsaufbau wegen der geringen Intensität aber nicht zur Messung herangezogen wird.

Der an den Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlichen akustischen Eigenschaften erzeugte Reflex des Ultraschallsignals weist eine spezifisch gedämpfte Amplitude auf. Es konnte gezeigt werden, dass diese Amplitudenänderung direkt mit den Schermodulen der involvierten Materialien, in unserem Falle Acrylglas und zementöse Probe, korreliert [6]. Aus der gemessenen Amplitudenveränderung kann daher, im Falle des Reflexes an der Wellenleiter-Probe-Grenzfläche, der Schermodul der Probe berechnet werden. Der Schermodul ist dabei ein direktes Mass der Festigkeitsentwicklung und es wurde gezeigt, dass damit eine direkte Korrelation zur Druckfestigkeit der Probe möglich ist [3].

Exemplarisch sind in Bild 4 unkalibrierte Messkurven der Amplitudenveränderung und deren Auswertung dargestellt. Der Vorteil dieser zerstörungsfreien und kontinuierlichen Messmethode wird hier unmittelbar sichtbar. Einerseits sind durch den komplett darstellbaren Kurvenverlauf Fehlinterpretationen evtl. Trends ausgeschlossen und andererseits werden ggf. interessante Details durch Messlücken nicht übersehen. Spezifische Vorteile einzelner Produktkombinationen lassen sich dadurch sehr gut unterscheiden und für den jeweiligen Einsatz optimieren.

Während der Messung durchläuft jede Messkurve zwei konstante Punkte, einmal zu Beginn bzw. bevor die Probe gespritzt wird, wenn gegen Luft gemessen wird, und dann, wenn der Schermodul denselben Wert wie den der Wellenleiter durchläuft. Beide Werte werden automatisch bei jeder Messung zur Kalibration der Messzellen bzw. der einzelnen Sensoren benutzt, so dass eine maximale Sicherheit bezüglich der Messgenauigkeit erreicht wird.

Resultate aus MiniShot-Experimenten liefern mit dem Schermodul eine Messung der Probenviskosität, welche sich in Abhängigkeit von den ablaufenden chemischen Reaktionen der modellhaften Zementpaste kontinuierlich ändert. Mit der Zementpaste betrachten wir den Anteil des Spritzbetons, welcher darin den über die Zeit veränderlichen, wesentlichen Festigkeitsanteil darstellt. Insofern korreliert das im MiniShot-Experiment gemessene Schermodul, im Rahmen der oben genannten Modellannahmen, gut mit der zeitlichen

Änderung der Druckfestigkeit im Spritzbeton. Ein qualitativer Vergleich, z.B. für verschiedene Beschleuniger in einer vorgegebenen Spritzbetonrezeptur, führt folglich zu einer guten qualitativen Aussage der im entsprechenden Feldversuch zu erwartenden Resultate. Dies konnte auch anhand vergleichender Messungen gezeigt werden, welche im Versuchsstollen Hagerbach, Schweiz, und in unserem MiniShot-Labor in Zürich durchgeführt wurden. In beide Versuchsreihen wurden dieselben Materialien eingesetzt, d.h. Zement, alle verwendeten Feinstanteile, inklusive denen aus Sand und Kies, und Zusatzmittel wurden an der Betonanlage des Versuchsstollens beprobt und für die MiniShot-Versuche benutzt. In Bild 5 sieht man die sehr gute Korrelation zwischen Labormessungen und Feldversuchen für den qualitativen Vergleich verschiedener Beschleuniger. Anhand des un stetigen Kurvenverlaufs zeigt sich hier zudem die starke Streuung der Messwerte, welche den in Feldversuchen benutzten Messmethoden, Penetrometer und Hilti-Bolzenseitzverfahren, inhärent ist. Im Laborversuch ist die Datenstreuung dagegen vernachlässigbar.

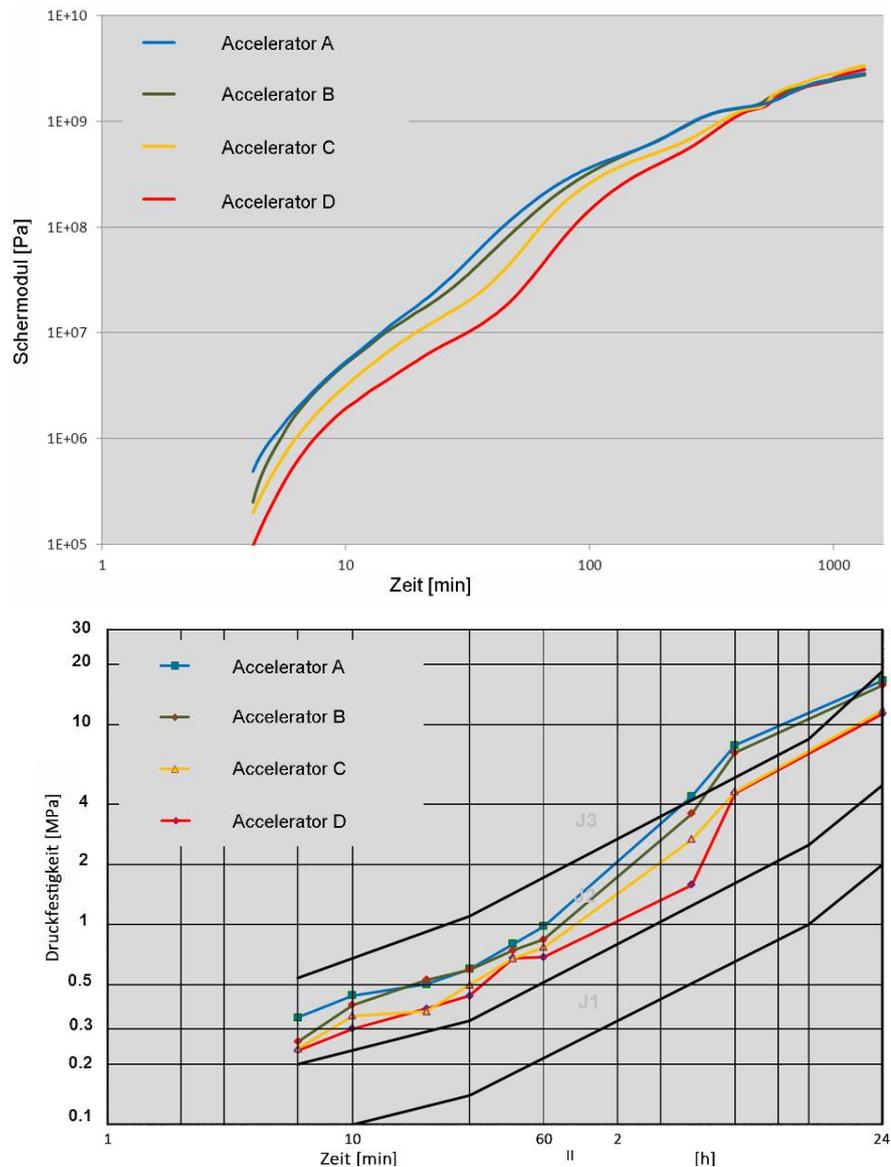


Bild 5: Vergleichende Versuche mittels Zementpaste im MiniShot-Labor (oben) und Spritzbeton im Feldversuch (unten). Für die MiniShot-Versuche wurden die reaktiven Bestandteile der originalen Spritzbetonrezeptur verwendet.

5. Einsatzmöglichkeiten - Ausblick

Mit Hilfe des MiniShot-Laborsystems ist es möglich, im Labormassstab realitätsnahe Festigkeitsprüfungen an Spritzbeton-Bindersystemen durchzuführen, welche unmittelbare Aussagen zur Wechselwirkung der verschiedenen, chemisch reaktiven Komponenten im Spritzbeton zulassen. In erster Linie erhält man so einen relativen Vergleich verschiedener Proben, seien es Zemente, Binder-Mischungen oder Zusatzmittel, welche eine qualitative Aussage zu den korrespondierenden Spritzbetonen ermöglichen. Wegen der grossen möglichen Anzahl durchführbarer Experimente, bietet dieses System ideale Möglichkeiten für Screening-Untersuchungen. Neben dem ursprünglichen Projektziel, die Entwicklung einer validen, reliablen Labormethode für die Zusatzmittelentwicklung, kann das MiniShot auch projektbezogen genutzt werden: einerseits für eine geeignete Produkt-Vorauswahl, andererseits zur Qualitätssicherung über die gesamte Projektdauer. Letzteres ist nicht auf die Zusatzmittel beschränkt, sondern schliesst alle chemisch reaktiven Komponenten des Spritzbetons ein: Zement, Zusatzstoffe, Feinstanteil, Zusatzmittel, Wasserqualität, Rezepturänderungen u.a.m. Die hohe Reproduzierbarkeit der Experimente sowie die gute, kontinuierliche Darstellung des Schermoduls über einen beliebigen Zeitraum, in der Regel bis 24 Stunden, machen selbst leichte Auswirkungen von eventuellen Produktschwankungen deutlich sichtbar.

Zurzeit ist zudem eine mobile Variante des Pulsmeters in der Erprobungsphase. Ein solches Prüfgerät, direkt am Objekt eingesetzt, ermöglicht die unmittelbare Überprüfung des frischen Spritzbetons unter exakt den Bedingungen, welche am Bauwerk auf den Spritzbeton wirken.

6. Literatur

- [1] EN 480-2:
Admixtures for concrete, mortar and grout – Test methods – Part 2: Determination of setting time. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2006
- [2] ASTM C1398-07:
Standard Test Method for the Laboratory Determination of the Time of Setting of Hydraulic-Cement Mortars Containing Additives for Shotcrete by the Use of Gillmore Needle. 2007.
- [3] Lootens, D.; Jousset, P.; Martini, L.; Roussel, N.; Flatt R.:
Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests. *Cement and Concrete research*, 2009, 39: 401 – 408.
- [4] Lootens, D; Flatt, R.; Lindlar, B.:
Shotcrete Accelerator Testing – Predictability from the Laboratory to the Job Site. Proc. 5th Int. Symp. Sprayed Concrete, Lillehammer, Norway, 2008, 262 – 268.
- [5] Lindlar, B.; Oblak, L.; Lootens, D.; Stenger, C.:
From Tunnel to Laboratory: Scaling of Shotcrete Testing. Proc. 7th Int. Symp. Sprayed Concrete, Sandefjord, Norway, 2014, 282 – 286.
- [6] L.; Lootens, D.; Hansson, M.; Oblak, L.; Lindlar, B.:
Ultrasonic Wave Propagation for Strength Measurements: Application in Shotcrete. Proc. 7th Int. Symp. Sprayed Concrete, Sandefjord, Norway, 2014, 287 – 293.

Zu den Autoren

Dr. sc. nat. Benedikt Lindlar

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

lindlar.benedikt@ch.sika.com

Dipl. phil. nat. Christian Stenger

Studium der Chemie an der Universität Bern, Forschung am Departement für Radio- und Umweltchemie der Universität Bern und am PSI Villigen, seit 2005 Sika Technology AG, Projektleiter Spritzbeton.

stenger.christian@ch.sika.com

Dr. Ing. Didier Lootens

Studium der Physik und der Chemie an der Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris (ESPCI), Dissertation an der Universität Paris IV, seit 2004 Sika Technology AG, Abteilungsleiter Material Physics.

lootens.didier@ch.sika.com