
KONTINUIERLICHE MESSUNG DER FESTIGKEITSENTWICKLUNG VON SPRITZBETON

CONTINUOUS MONITORING OF STRENGTH EVOLUTION OF SHOTCRETE

Luka **Oblak** MSc, Sika Technology AG., Zürich, Schweiz
Dr. sc. nat. Benedikt **Lindlar**, Sika Technology AG., Zürich, Schweiz
Dr. Ing. Didier **Lootens**, Sika Technology AG., Zürich, Schweiz

Die Überwachung der Festigkeitsentwicklung des jungen Spritzbetons ist ein wesentlicher Aspekt zur Gewährleistung der Sicherheit im Tunnelbau. Stand der Technik ist der Einsatz mehrerer, nacheinander eingesetzter Messmethoden: Druckfestigkeitsmessungen werden mit Hilfe von Penetrationsnadel- und Setzbolzenverfahren sowie anhand von Bohrkernen bestimmt. Jede dieser Methoden verfügt allerdings nur über einen eingeschränkten Messbereich. Messungen dieser Methoden korrelieren mit Scher- bzw. Kompressions-Modulen des Spritzbetons. Dennoch wäre eine einzige, kontinuierliche Messmethode über den gesamten Messbereich von Vorteil. Die Ultraschall-Spektrometrie bietet sich in diesem Zusammenhang an. Ein portables US-Spektrometer wurde für die Spritzbetonkontrolle, bzw. zur Kontrolle hydraulischer Werkstoffe generell, entwickelt. Damit ist es nun möglich, die Entwicklung des Spritzbetons über den gesamten Zeitraum seiner Festigkeitsentwicklung zu messen, dies nicht nur im Labor sondern auch auf der Baustelle. Die Korrelation der klassischen Messresultate mit dem Schermodul aus US-Messungen wird dargestellt.

Monitoring of strength evolution in young shotcrete, is needed to ensure the safety in tunnelling business. Presently, this is performed using several subsequently applied test methods as: Proctometer, Hilti bolt and compression tests. Any of these methods can only be applied for a narrow time or performance range. Measurements from these methods relate to shear and compression modulus the shotcrete. However, monitoring could be beneficially performed using just one single and continuous measurement technique, e.g. ultrasonic spectrometry.

A portable ultrasound spectrometer has been developed by our company to follow the entire shear modulus evolution of hydraulic material over time. Thus, it is possible to follow the evolution of the shotcrete property using solely one instrument over the entire shotcrete curing period. Furthermore, this method can be applied either in the laboratory or in the job site. The quantitative correlation is shown for shear modulus evolution and strength development measured with the standard techniques.

1. Messung der Frühst- und Frühfestigkeitsentwicklung von Spritzbeton

Unmittelbar nach der Applikation des Spritzbetons werden dessen mechanischen Eigenschaften mit Hilfe verschiedener Penetrationsnadelverfahren gemessen, um das Ansteifen und frühe Aushärten zu beobachten [1]. Bei diesen Techniken wird entweder die Eindringkraft gemessen, welche nötig ist, mit einer Messnadel um eine definierte Länge in das Prüfmaterial einzudringen, oder aber die Eindringtiefe einer Nadel, welche mit definierter Kraft in das Prüfmaterial getrieben wird. Neuere Arbeiten konnten die Korrelation dieser Messtechniken, Penetrationsnadelverfahren und Setzbolzenverfahren, mit dem Schermodul

des Prüfmateriales aufzeigen: Solange die Krafteinwirkung auf das Prüfmaterial größer als ein kritischer Wert ist, dringt die Nadel kontinuierlich in den Prüfkörper ein, sobald die Nadel stoppt, ist die Krafteinwirkung gleich dem Wert, welcher von der kritischen Deformation des Materials abhängt [2].

In diesem Artikel wird die Kalibrierung der klassischen Spritzbeton-Messmethoden im Hinblick auf die Korrelation ihrer Messwerte mit der Druckfestigkeit und den in Bild 1 gezeigten Druckfestigkeitsbereichen beschrieben. Nach der Österreichischen Spritzbetonrichtlinie wird der junge Spritzbeton in drei Festigkeitsklassen eingeteilt [1]. J2-Spritzbeton wird üblicherweise für Tunnelapplikationen mit Schichtstärken um ca. 200 mm eingesetzt, J3-Spritzbeton ist für schwierigere Bedingungen, wie schlechten Untergrund oder bei eindringendem Wasser, erforderlich.

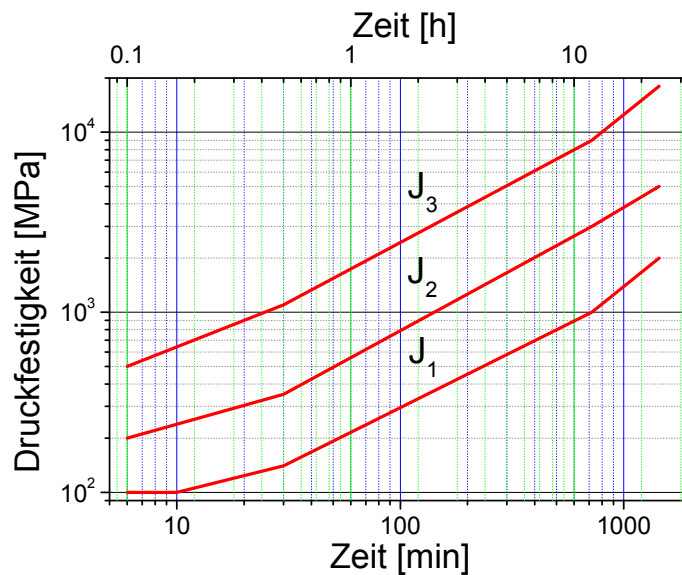


Bild 1: Frühfestigkeitsklassen für Spritzbeton nach der ÖVBB-Richtlinie „Spritzbeton“ [1].

Aus diesem Diagramm ist ersichtlich, dass sich die mechanische Entwicklung des Spritzbetons vom Zeitpunkt seiner Applikation bis zur Aushärtung über vier Größenordnungen erstreckt. Diese Entwicklung kann insgesamt nur durch die Kombination verschiedener Methoden verfolgt werden, welche in Bild 2 in Abhängigkeit des zu beobachtenden Schermodul dargestellt sind. Jede dieser Methoden ist nur für einen individuell eingeschränkten Schermodul-Bereich geeignet. Folglich werden alle diese Methoden zur Beobachtung der Modul-Entwicklung, vom flüssigen bis zum ausgehärteten Zustand, benötigt. Die Penetrationsmethoden (Proktormeter, Hilti) kommen beim frisch applizierten Spritzbeton zum Einsatz, später wird dann die Druckfestigkeit direkt gemessen.

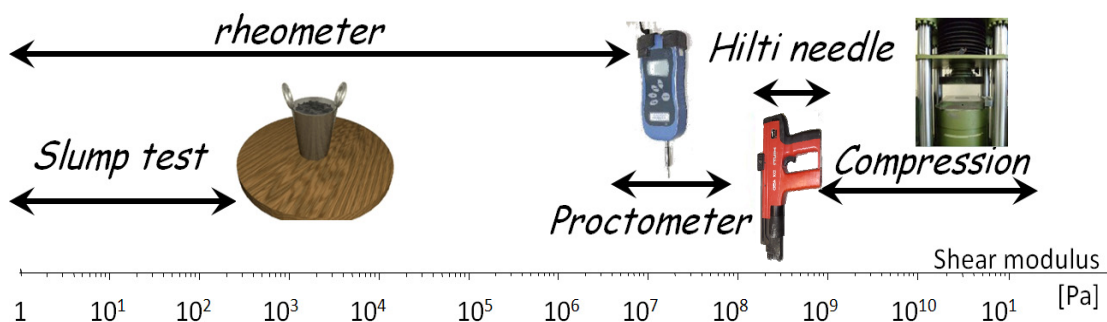


Bild 2: Messmethoden und ihre Anwendungsbereiche

2. Korrelation der Messmethoden

Das Messprinzip des zunächst für die Messung der Frühstfestigkeiten eingesetzten Penetrationsnadelverfahrens, so wie in Bild 2 dargestellt, beruht auf einer Prüfnadel, mit welcher der Eindringwiderstand in die Probe über eine Eindringtiefe von 15 mm gemessen wird. Der Durchmesser der Nadel ist 3 mm und die Spitze ist mit 60° konisch zugespitzt. Die Kraft auf die Nadel wird über eine Druckmesszelle registriert.

Die Messwerte dieser Methode lassen sich empirisch mit der Druckfestigkeit approximieren:

$$C_s = \frac{F + 35}{690}$$

mit der Druckfestigkeit C_s und der gemessenen Kraft F . Lootens et al [2] haben für diese Testmethode die Messungen des Eindringwiderstandes mit der Fließgrenze approximiert:

$$\tau_0 = \frac{F}{\pi R \sqrt{R^2 + h_2^2} + 2\pi R h}$$

Darin ist R der Durchmesser, h die Höhe des zylindrischen Teils und h_2 die Höhe des konischen Teils der Nadel. Die so erhaltenen Werte korrelieren gut mit den gemessenen Resultaten der Druckfestigkeiten [2].

Bei dem im weiteren Verlauf der Spritzbetonaushärtung eingesetzten Hilti-Setzbolzen-Verfahren wird ein Bolzen mit definierter Kraft in die Probe geschossen und die Eindringtiefe zur Bestimmung der Druckfestigkeit bestimmt. Der Bolzendurchmesser ist 3.7 mm, die Spitze ist konisch und die Länge variiert zwischen 52 und 95 mm. Die eingesetzte Kraft wird durch die Wahl der Treibladung bestimmt. Abhängig von der individuellen Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons dienen die kürzeren Bolzen der Festigkeitsbestimmung von ca. zwei bis neun Stunden alten Prüfkörpern und die kurzen werden ab neun bis 24 Stunden eingesetzt. Der Messbereich dieser Methode liegt zwischen ca. zwei und 20 MPa. Die gemessenen Daten liefern anhand der Bracher-Tabelle [2] die Druckfestigkeit anhand der folgenden empirischen Gleichung:

$$C_s = C_{s_0} + C_{s_1} \exp\left(-\frac{P}{P_0}\right)$$

mit $C_{s_0} = 5 \cdot 10^3 \text{ Pa}$, $C_{s_1} = 6 \cdot 10^7 \text{ Pa}$, $P_0 = 25.7 \text{ mm}$ und der Eindringtiefe P . Eine andere Beziehung zwischen der Eindringtiefe und der Druckfestigkeit wurde von Lootens abgeleitet [2]. Diese basiert auf der zu Beginn wirkenden kinetischen Energie der Nadel, welche über die auftretenden Reibungskräfte während des Eindringens abgebaut wird:

$$\tau_0 = \frac{E_0}{\pi R H^2}$$

Es kann angenommen werden, dass die Druckfestigkeit, wie sie nach ASTM C39/C39M-04a gemessen wird, mit der kritischen Spannung korreliert, da beide mit derselben kritischen Deformation beim Versagen der Probe zusammenhängen. Die Druckfestigkeit kann daher mit nur einem Parameter bestimmt werden:

$$C_s = \frac{A}{H^2}$$

mit $A = 18000 \text{ MPa mm}^2$ und der Eindringtiefe H .

Druckfestigkeitsmessungen können sinnvoller Weise für Spritzbeton erst durchgeführt werden, wenn der Spritzbeton eine Festigkeit von ca. 20 MPa direkt erreicht hat. Diese Methode beruht darauf, dass auf einen Prüfzylinder solange ein kontinuierlich ansteigender Druck ausgeübt wird, bis die Probe versagt. Prüfkörper für diese Methode können insbesondere wegen des Rückpralls nicht direkt gespritzt werden, weshalb stattdessen Bohrkern aus dem Spritzbeton genommen werden [3]. Idealerweise haben diese Bohrkern einen Radius von 100 mm und eine Höhe/Durchmesser-Verhältnis von eins. Hinsichtlich des Bohrens der Prüfkörper ist zu beachten, dass bei noch zu jungem Spritzbeton die Bohrkern durch das zum Bohren notwendige Wasser oberflächlich beschädigt werden und somit die Prüfergebnisse durch die Probennahme signifikant beeinflusst werden.

Die Druckfestigkeit wird aus der maximalen Kraft F_{\max} dividiert durch die Querschnittsfläche S ermittelt [4].

$$C_s = \frac{F_{\max}}{S}$$

Proktometer und Hilti-Setzbolzenverfahren sind Messmethoden, die für diskrete Aushärtezeiten Festigkeitswerte ergeben. Bei beiden Methoden ergeben sich Abweichungen der Messwerte um +/- 50 % (Bild 3). Grund für diese Abweichungen sind methodenimmanent und z.B. abhängig davon, ob (i) die Nadel auf Sand/Kies oder nur auf Zementleim/Paste trifft oder (ii) unter welchem Winkel und mit welcher Geschwindigkeit in die Probe eindringt. Um einen sinnvollen Mittelwert zu erhalten sind daher viele Einzelmessungen pro Messpunkt notwendig.

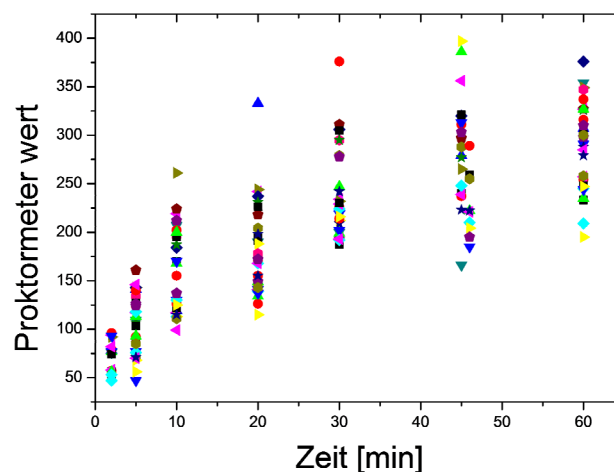


Bild 3: Penetrationsnadel-Messpunkte in Abhängigkeit vom Probenalter

Diese beiden Penetrationsmethoden, mit deren Hilfe sich die mechanischen Eigenschaften des Spritzbetons zufriedenstellend bestimmen lassen, bedürfen einerseits, auch auf Grund der heterogenen Beschaffenheit des Spritzbetons, eines größeren manuellen Aufwandes und liefern andererseits lediglich diskrete Messpunkte der Festigkeitsentwicklung.

Im Hinblick auf eine geeignete Labormessmethode sind diese Methoden zudem weder für Messungen an Zementpasten entwickelt noch geeignet. Dies liegt daran, dass für diese Art Messungen Probenkörper von mindestens 100 mm Dicke benötigt werden, was im Falle von Proben aus Zementpaste zu einer sehr hohen Eigenerwärmung über 100°C führen würde. Eine sinnvolle Übertragung dieser Methoden zur Darstellung von Spritzbetoneigenschaften im verkleinerten Labormaßstab ist also nicht möglich. Alternativ bietet sich hier die Messung der Ultraschallausbreitung im Probenkörper an. Eine solche Methode erlaubt die kontinuierliche und quantitative Bestimmung der Festigkeitsentwicklung während des gesamten Hydratationsprozesses, unabhängig von der Beschaffenheit und Dimension der Prüfkörper.

3. Ultraschall Messung

Mit Hilfe der Ultraschall Messmethode kann die Entwicklung der rheologischen und mechanischen Eigenschaften von Materialien kontinuierlich gemessen werden. Wie in Bild 2 ersichtlich ist dies mittels dieser Methode im Vergleich zu klassischen Messmethoden über einen sehr viel weiteren Messbereich des Moduls möglich. Dabei kann diese Methode sowohl für Messungen des Schermoduls G wie auch des Kompressionsmoduls K eingesetzt werden.

Für diese Messungen werden Messfühler eingesetzt, welche Ultraschall-Pulse im Bereich von 0.1 bis 10 MHz erzeugen. Je nachdem, ob der Kompressions- oder der Schermodul gemessen werden soll, werden Longitudinalwellen oder Transversalwellen emittieren. Das Ultraschallsignal wird durch einen definierten Wellenleiter auf die Grenzfläche zur Probe geleitet, von der es teilweise wieder reflektiert wird, der zweite Teil der ursprünglichen Welle wird dann zusätzlich noch an der Grenzfläche zwischen Probe und Luft reflektiert. Gemessen und ausgewertet wird die Zeitdauer von der Wellenerzeugung bis zur Detektion des ersten Reflexes, welcher an der Grenzfläche von Wellenleiter und Probe entsteht. Diese Zeitdauer hängt von den mechanischen Eigenschaften der Probe ab. Wesentlich für die Geometrie dieses experimentellen Aufbaus ist, dass im Reflexionsmodus gemessen wird. Dadurch ist die Anbindung der Probe an die Messzellenoberfläche sichergestellt und das Problem der Entkopplung minimiert. Zudem ist die Messung im Wesentlichen unabhängig von der aufgetragenen Probenstärke, je nach Probenmixture kann diese adäquat an die thermischen Gegebenheiten angepasst werden.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle durch den Wellenleiter hängt stark von der Temperatur des Wellenleiters ab, gleiches gilt für die Hydrationskinetik der Probe. Folglich spielt die Umgebungs- wie die Probentemperatur für diese Messmethode eine wichtige Rolle und unsere Messapparatur misst während der laufenden Messungen kontinuierlich die Temperatur [6].

Unsere Messapparatur ist in Bild 4 schematisch dargestellt.

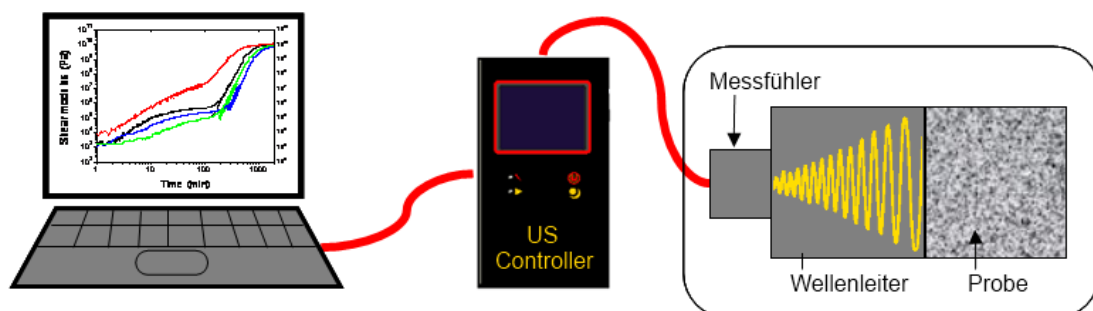


Bild 4: Schematischer Aufbau unseres Ultraschall-Spektrometers

Das Messprinzip der Ultraschallmessung basiert auf der Theorie der Schallausbreitung in Stoffen und der Korrelation mit deren mechanischen Eigenschaften. Wenn eine Transversalwelle auf ein viskoelastisches Material trifft, wird die Amplitude deutlich gedämpft und ein Teil der Welle reflektiert. Dieser Reflex wird am Messfühler detektiert. Mit zunehmendem Aus härten des Materials wird die Verringerung der Amplitude immer stärker. Aus der relativen Amplitudenverring erung r kann der Schermodul gemäß folgender Gleichung berechnet werden:

$$G^* = \frac{Z_s^2}{\rho} = \frac{Z_G^2}{\rho} \left(\frac{1-r}{1+r} \right)^2$$

Mit $r(t) = \frac{A(t)}{A(0)}$, der akustischen Impedanz Z_s der Probe and der Impedanz Z_G des Wellenleiters.

Die theoretische Korrelation der Penetrationsmessungen mit dem Ultraschal-Spektrometer basiert auf der Annahme, dass (i) die kritische Verformung der zementösen Materialien während der Hydratation im Wesentlichen konstant bleibt und dass (ii) die Penetrationsmethoden vom Schermodul abhängen. Die Fließgrenze hängt mit dem Schermodul und der kritischen Deformation wie folgt zusammen:

$$\tau_0 = G \cdot \gamma_0$$

Diese Korrelationen sind für Messungen mittels Penetrationsnadelverfahren für Proben aus Zementpaste in der Bild 5 dargestellt. Ein universeller Faktor wurde anhand von Ultraschallmessungen aus dem Produkt des Schermodules und der kritischen Deformation (0.005) bestimmt [2].

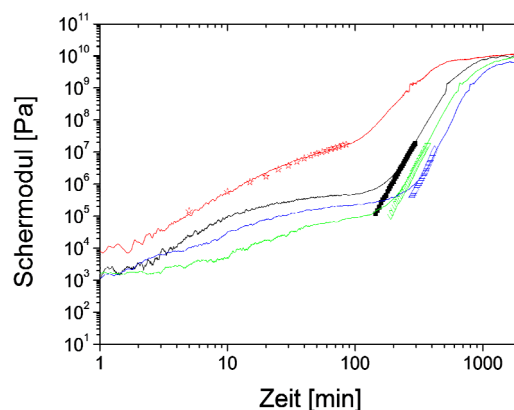


Bild 5: Entwicklung des Schermodules, gemessen an Zementpasten mit Beschleuniger (linke Kurve) und verschiedenen Verzögererkonzentrationen. Die durchgehenden Linien sind US-Messungen, die Punkte die entsprechenden Penetrationsnadel-Messungen.

Penetrationsnadel-Messungen an Spritzbeton unterliegen der Näherung, dass die Fließgrenze proportional der Druckfestigkeit gemäß ASTM C39/C39M-04a ist, da beide von der kritischen Deformation beim Versagen der Probe abhängen [2]. Wenn die kritische Verformung d_0 beliebig gesetzt wird, so kann für C_s oder die Fließgrenze τ_0 angenommen werden, dass sie ein Maximum der Spannungs-Dehnungs-Kurve sind.

$$\tau_0 = C_s = E \cdot d_0$$

Der Linearitätskoeffizient ist hierin der Elastizitätsmodul E , welcher mittels Ultraschall direkt gemessen werden kann. Es müssen hierzu jedoch sowohl Longitudinal- wie auch Trans-

versalwellen gemessen werden, da der Schermodul nur durch die Amplitudendämpfung der Transversalwellen über den Elastizitätsmodul mit Hilfe des Poisson-Verhältnisses bestimmt werden kann, welches beim Erhärten von Beton konstant bleibt [5]. Der Vergleich der gemessenen Werte mit Ultraschall-Daten ist in Bild 6 dargestellt. Hier wurde eine angenommene Poissonzahl von 0,186 eingesetzt und eine kritische Deformation von 7×10^{-4} [5]:

$$G = \frac{\tau_0}{2(1+\nu)d_0} = \frac{\tau_0}{2(1+0,186)0,0007}$$

Aus dieser Darstellung ist die Korrelation der verschiedenen Daten ersichtlich. Die Messdaten aus Proktormeter-, Hilti- und Druckfestigkeitsmessungen stimmen für den Nullbeton gut mit den Ultraschalldaten überein. Ähnliche Korrelationen für Spritzbeton und eine gepulverten Zement-Schlämme stehen noch aus.

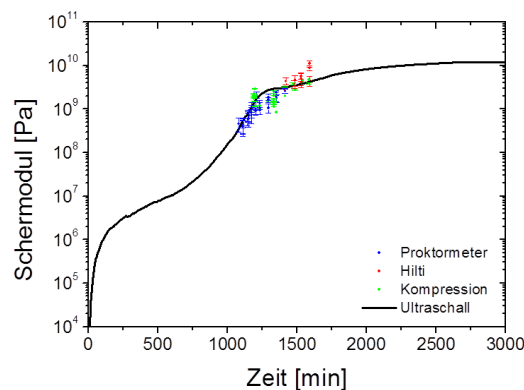


Bild 6: Korrelation zwischen verschiedenen Penetrations- und Ultraschalldaten für nicht beschleunigten Nullbeton

Die Ultraschallmessungen für eine dem Spritzbeton äquivalente Zementpaste sind in Bild 7 dargestellt. Einerseits für unterschiedliche Dosierungen eines Beschleunigers (links) und andererseits für unterschiedliche Beschleunigerrezepturen (rechts). Für den unterschiedlich dosierten Beschleuniger ergibt sich mit steigender Dosierung einerseits eine frühere Abbindereaktion und andererseits steigt insgesamt der Schermodul. Beim Vergleich der verschiedenen Beschleuniger zeigt sich, dass die Beschleuniger je unterschiedliche Bereiche der Festigkeitsentwicklung verbessern. So beschleunigt *Beschleuniger 1*, welcher Nanopartikel enthält, sowohl die Aluminatreaktion (vertikaler Pfeil) wie auch die Silikatreaktion (horizontaler Pfeil). Die beiden anderen Beschleuniger wirken demgegenüber jeweils nur auf eine der beiden Hydratationsphasen.

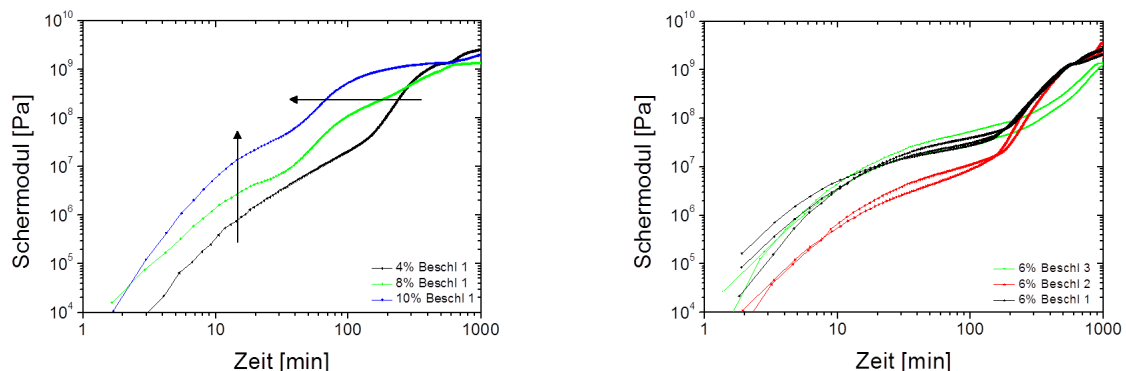


Bild 7: Schermodul einer beschleunigten Zementpaste für verschiedenen Beschleunigerdosierungen (links) und in Abhängigkeit von der Beschleunigerrezeptur (rechts).

4. Zusammenfassung

Eine auf die Evaluierung von Spritzbeton bzw. Spritzbeton-äquivalenten Zementpasten zugeschnittene Ultraschall-Messmethode erlaubt eine kontinuierliche und quantitative Festigkeitsbestimmung von gespritzten Probenkörpern. Die kontinuierliche Messung unmittelbar von der Applikation bis zum ausgehärteten Material sowie die Korrelation mit den derzeit gängigen Messmethoden, Proktormeter, Hilti-Setzbolzen und Druckfestigkeit, erlaubt die präzise Charakterisierung und Quantifizierung der Auswirkung von Beschleunigern bzw. generell von allen Zusatzmitteln auf die Spritzbetoneigenschaften. Dies konnte am Beispiel der neuen Suspensionsbeschleuniger für die verschiedenen Aushärtungsphasen im Spritzbeton demonstriert werden.

5. Literatur

- [1] ÖVBB:
Richtlinie Spritzbeton. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Wien, 12/2009.
- [2] 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.
- [3] ASTM C1604/C1604M:
Standard test method for obtaining and testing drilled cores of shotcrete, 2005.
- [4] ASTM C39/C39M:
Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. 2010.
- [5] Carmichael R.P.:
Relationships between Young's modulus, compressive strength, Poisson's ratio and time for early age concrete. Department of Engineering, Swartmore College, 2009.
- [6] Lootens, D.; Brühwiler, A. and Schmid, M.:
Entwicklung eines mobilen industriellen Ultraschall Handmessgerätes. *Megalink*. 3.09. 14-16. 2009.

Zu den Autoren

Luka Oblak MSc

Studium Chemical Engineering an der Universität Ljubljana, Master in Chemical Engineering, seit 2010 Sika Technology AG, Projektleiter Material Physics.

oblak.luka@ch.sika.com

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

Dr.-Ing. Didier Lootens

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

lootens.didier@ch.sika.com