

Lindlar Benedikt Sika Services AG

Jehle Sebastian, Fisogni Melissa Sika Services AG

Stenger Christian, Weibel Martin Sika Technology AG

# Frühfestigkeitsmessung des Spritzbetons - zwischen Handarbeit und Digitalisierung

## Frühfestigkeit des jungen Spritzbetons

Der im Untertagebau überwiegend eingesetzte Nass-Spritzbeton wird heute in der Regel mit Hilfe alkalifreier Beschleuniger appliziert. Durch die Zugabe des Spritzbetonbeschleunigers an der Düse, unmittelbar vor dem Auftrag, wird massiv auf die Lösungsschemie des Ausgangsgemisches eingewirkt. Die wesentlichen aktiven Spezies sind hierbei Verbindungen aus Aluminium- und Sulfationen, welche in wässriger Lösung bzw. Suspension vorliegen. Hierdurch wird eine unmittelbar einsetzende Festigkeitsentwicklung bewirkt, die es ermöglicht, auch über Kopf Spritzbeton aufzutragen, der in der Lage ist, zunächst sein eigenes Gewicht zu tragen und dann in kurzer Zeit die Ausbruchsstelle zu sichern.<sup>1)</sup>

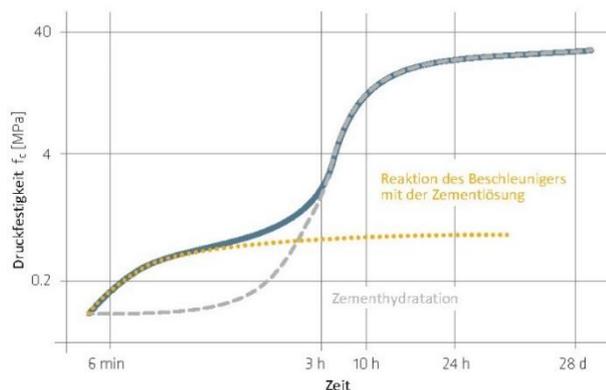


Abb. 1 Schematische Darstellung der Frühfestigkeitsentwicklung des jungen Spritzbetons und deren chemische Ursachen.

Durch die Reaktion der Zementlösung mit dem alkalifreien Spritzbetonbeschleuniger fällt Etringit aus, welches einerseits viel Wasser bindet, einen zusätzlichen Kristallfilz erzeugt und zudem eine sehr große spezifische Oberfläche hat, an der die Zusatzmittel (Fließmittel, Ver-

zögerer) gebunden werden und so nicht mehr auf den Zement bzw. Leim wirken. Die zusätzliche Kristallphase, der Wasserentzug und die wegfallende Verflüssigungswirkung resultieren im unmittelbaren Ansteifen und frühen Erhärten der ersten Stunde (Abb. 1). Je nach eingesetztem Verzögerersystem wird auch dessen Wirkung durch die Beschleunigerreaktion kompensiert, was sich auf die Zementhydratation in den ersten Stunden positiv auswirkt.<sup>2)</sup>

Im Prinzip wird somit durch die Spritzbetonapplikation mit Beschleunigerzugabe massiv auf den Verlauf der Zementhydratation eingewirkt, einerseits zur Erzielung der gewünschten Festigkeitsentwicklung, andererseits aber auch mit der Gefahr verbunden, dass die Hydratation des Zements gestört wird. Beide Aspekte sind in Anbetracht dieser höchst herausfordernden Betonapplikation sicherheitsrelevant und bedürfen zwingend einer reliablen und validen Überprüfungsmethode.

## Messung der Frühfestigkeit

Die zuverlässige Messung der Frühfestigkeit des Spritzbetons wird seit nun 40 Jahren mittels der kombinierten Frühfestigkeitsmessung bewerkstelligt und ist so in verschiedenen Regelwerken beschrieben.

Dazu wird die Kombination zweier sich ergänzenden Eindringnadel-Verfahren genutzt: Während der ersten Stunde nach der Spritzbetonapplikation zunächst die Eindringkraft einer 3 mm-Nadel manuell gemessen. Nach Erreichen einer gewissen Anfangsfestigkeit, in der Regel ab ca. vier Stunden, wird dann die

Eindringtiefe eines Bolzens, der mittels konstanter Kraft eingetrieben wird, in Kombination mit der Auszugskraft gemessen. So kann eine zuverlässige Darstellung der Festigkeit über die ersten 24 Stunden erreicht werden.<sup>3)</sup>

Diese Prüfmethode bzw. deren zu Grunde liegenden physikalischen Messprinzipien werden bis heute unverändert eingesetzt. Verändert haben sich lediglich die Werkzeuge: Anstelle des ursprünglich rein mechanischen Kraftmessgerätes für die Handmessung der Eindringkraft während der ersten Stunde werden inzwischen elektronische Kraftmessgeräte genutzt (Abb. 2).



Abb. 2 Digitales Kraftmessgerät für die Nadelpenetrationsmethode.

Die Setzbolzen für die späteren Prüfzeiten werden aktuell nicht mehr mittels Treibladung eingetrieben, sondern mit Hilfe elektrischer Schussapparate.<sup>2;4)</sup>



Abb. 3 Elektrisches Bolzensetzgerät Hilti BX 3-SCT (Quelle Hilti)

Die am Applikationsort gemessenen Werte werden anschließend per Tabellenkalkulation, basierend auf validierten Korrelationskurven, ausgewertet - sozusagen vom durchweichten Papier zur digitalen Computergrafik.

Bezüglich des Setzbolzenverfahrens ergibt sich die bisher notwendige Praxis der Kombination aus Eindringtiefe und Auszugskraft aus der grossen Streuung der alleinigen Eindringtiefenmessung.

Jüngere Untersuchungen konnten diesbezüglich zudem zeigen, dass eine wesentliche Ursache dafür die, über den Messbereich dieser Methode, veränderliche Schafreibung ist. Für die mit Treibladung betriebene Hilti DX 450-SCT ist im Falle der alleinigen Messung der Eindringtiefe ein unstabiler Kurvenverlauf zwischen 2 – 3 MPa nachweisbar. Eine einzige, durchgehende Korrelationsbeziehung lässt sich mathematisch daher ohne die Auszugsmessung nicht bewerkstelligen, erst durch die Beschreibung mittels zweier Korrelationsbereiche kann auf die Auszugskraft-Messung verzichtet werden (Abb. 4).<sup>5)</sup>

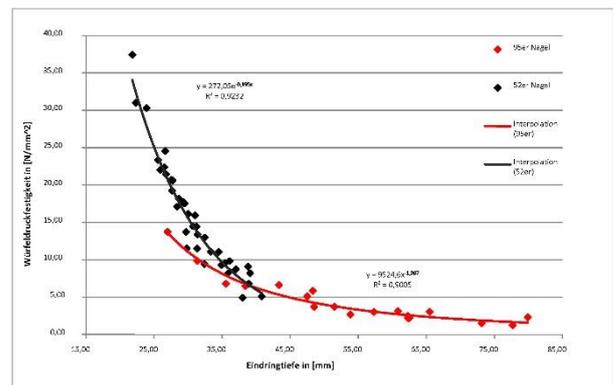


Abb. 4. Korrelation der Nageleindringtiefen mit der Würfelruckfestigkeit für eine gegossene 0-8 mm Spritzbetonmischung (aus 5).

Die Festigkeitskorrelation der neuen, elektrisch betriebenen Hilti BX 3-SCT beruht einzig auf der Eindringtiefenmessung und trägt dem o. g. Sachverhalt ebenfalls durch zwei Korrelationsbereiche Rechnung, welche bei 2.5 MPa wechseln.<sup>4)</sup> Hier spielt neben dem oben beschriebenen Effekt auch der methodische Vorteil des elektrischen Gerätes eine Rolle: die Eintriebskraft wird durch vorgespannte Federn bewirkt, was eine im Vergleich zu den bisher genutzten Treibladungen deutlich homogenere Eintriebskraft gewährleistet.

## **Papierlose Datenübertragung und -auswertung**

In einer Zeit, in der nahezu jeder mit einem portablen elektronischen Gerät mit beachtlicher Rechenleistung und Konnektivität ausgestattet ist, liegt es nahe, durchaus Bewährtes hinsichtlich der Nutzerfreundlichkeit zu hinterfragen: Papier und Stift weichen der unmittelbaren Datenübertragung, idealerweise unmittelbar per Bluetooth, und die Auswertung der Festigkeitskurve ist für das Smartphone dann nur noch eine Kleinigkeit. Die spätere Eingabe der pro Experiment über 50 Messwerte in Excel erübrigen sich damit. Wenn dann noch der Zollstock einem Bluetooth-Messschieber weicht, wird sogar das Bolzensetzgerät zum quasi-digitalen Messgerät. Darüber hinaus erweist sich das Organisationstalent des Mobiltelefons, ab einer gewissen Anzahl paralleler Experimente den vielen zu beobachtenden Stoppuhren überlegen und deutlich weniger fehleranfällig. Genau diese Möglichkeiten vereint die Shotcrete-App:

- Planung der Experimente (Parameter, Prüfzeiten, automatischer Aufruf der fälligen Messungen parallellaufender Versuche)
- Bluetooth-Datenübertragung von den Messgeräten und deren Aufzeichnung & Auswertung (digitales Penetrometer, BT-Messschieber für Hilti-Setzbolzen)
- Auswertung und graphische Darstellung der Resultate (individuelles Experiment mit sämtlichen Einzelmessungen sowie beliebigen Vergleichen)

## **Datenanalyse**

Was zunächst einmal eine erfreuliche handwerkliche Verbesserung ist, birgt durchaus noch weitere Vorteile. Durch eine vorgegebene Daten- und Auswertungsplattform anstelle von Excel-Tabellen wird

die Datenübersicht einfacher, insbesondere historische Daten sind gut verfügbar und das Ganze steht damit einer zielführenden Datenanalyse zur Verfügung. Naheliegenderweise betrifft das die unmittelbare Qualitätsüberwachung des Spritzbetons, darüber hinaus tun sich jedoch weitere Analysemöglichkeiten auf. Die Einbindung und Kombination der Informationen aus der kompletten Lieferkette, von den Betonrohstoffen, Zusatzmitteln und wesentlichen Verarbeitungsparametern dient der potenziellen Optimierung auf allen Ebenen. In diesem Zusammenhang ist die Einbindung der Shotcrete-App in einen Komplex verschiedener Beton-Apps wichtig:

- Sika® Sand App  
Siebkurven-Analyse mittels der Smartphone-Kamera inklusive Formparametern. Diese Daten können unmittelbar für die Berechnung der Siebkurve im Beton-Mixdesign genutzt werden.
- Sika® Mixdesign App  
Mischungsberechnung und Rezeptoptimierung (technisch, preislich, LCA-Rechner).
- Sika® Shotcrete App  
Experimentplanung und Organisation der Durchführung, BT-Datenübertragung/ -protokollierung sowie unmittelbare Versuchsauswertung.

Die jeweiligen Resultate, insbesondere aus der Sand-App, können unmittelbar in den anderen Anwendungen genutzt werden oder in anderen Formaten (CSV, PDF) exportiert werden.

## **Zerstörungsfrei und automatisiert messen**

Insbesondere im Laborbereich haben sich inzwischen verschiedene Prüfverfahren für das Abbinden und Erhärten von Baustoffen etabliert, bei welchen mittels Ultraschall

zerstörungsfrei und über einen definierten Zeitraum automatisch gemessen wird.

Das im MiniShot Laborprüfsystem genutzte Pulsment misst die Amplituden-änderung eines reflektierten Ultraschallsignals.<sup>6)</sup> Diese für den Labormaßstab sehr gut geeignete Messmethode lässt sich tatsächlich nicht an die statistischen Rahmenbedingungen eines Feldversuchs adaptieren. Hier scheint alternativ die Korrelation der Schallgeschwindigkeit mit der Frühfestigkeit der sinnvolle Lösungsansatz. Diese Messdaten sind zudem hinsichtlich der Einbindung in die oben beschriebenen Softwarelösungen ideal. Insbesondere für große Tunnelbaustellen bietet eine solche automatisierte Messmethode die Chance einer engmaschigeren Qualitätsüberwachung.

Eine Art „digitale Spritzkiste“, welche vor Ort über 24 Stunden komplett autonom die Frühfestigkeit misst und diese Messungen durch eine Online-Anbindung kabellos an dieselbe IT-Infrastruktur der klassischen Methoden überträgt, hat sich in Vorversuchen als vielversprechender Lösungsansatz erwiesen.

Gleichwohl waren und sind hier, wie schon früher formuliert, noch „Hausaufgaben“ zu machen.<sup>7)</sup> Es sind dabei ganz pragmatische Aspekte, z. B. die Vereinbarkeit relativ sensibler, elektronischer Geräte mit der sehr herausfordernden Baustellenumgebung bei der Spritzbetonanwendung, aber auch methodenspezifische Fragestellungen der Datenkorrelation, welche nach wie vor eingehenderer Untersuchungen bedürfen.

## **Fazit**

Auch mit 40 Jahren ist die kombinierte Frühfestigkeitsmessung für Spritzbeton die Methode der Wahl, wenn es um die Sicherstellung der Spritzbeton-Qualität geht. Im

Laufe der Jahre hat sich an dem physikalischen Messprinzip nichts geändert und ihre Verlässlichkeit für die Sicherheit im Spritzbetonalltag ist durch die inzwischen sehr gute Datenlage unübertroffen.

Die aktuellen digitalen Möglichkeiten und insbesondere mobile Endgeräte spielten in diesem Kontext bisher noch keine Rolle, hier liegt ein großes Potenzial. Einerseits im Hinblick auf die Arbeitseffizienz, was am Beispiel der Shotcrete-App gezeigt wird, darüber hinaus bietet ein breiter angelegter Digitalisierungs-Ansatz insbesondere mit Hilfe einer besseren Datenanalyse neue Möglichkeiten des Kenntniserwerbs, der Qualitätssicherung, der Problemlösung auf der Baustelle, bis hin zu einer zielgerichteten Produktentwicklung.

Eine zerstörungsfreie, automatische Messung der Frühfestigkeit, z. B. mittels Ultraschall bietet das Potenzial für eine zukünftige, technologisch neue Ära der Frühfestigkeitsmessung von Spritzbeton im Untertagebau.

## **Literatur**

1. EN 14487-1, Spritzbeton – Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität.
2. Lindlar, Jahn, Schlumpf: Sika Sprayed Concrete Handbook, Kap. 4.5.2 (2020)
3. Kusterle: Ein kombiniertes Verfahren zur Beurteilung der Frühfestigkeit von Spritzbeton. Beton- und Stahlbetonbau (1984)
4. Hilti: Bestimmung der Frühfestigkeit von Spritzbeton mit dem Hilti BX 3-SCT Setzbolzenverfahren (2021)
5. Steiner: Validierung einer vereinfachten Messmethode zur Ermittlung der Frühfestigkeit von Spritzbeton. Masterarbeit KIT (2016)

6. Lindlar, Stenger, Lootens: Miniaturisiertes Laborprüfverfahren für Spritzbeton – Neue Möglichkeiten der Produktentwicklung, Rezeptoptimierung und Qualitätskontrolle (2015)
7. Kusterle: Spritzbeton-Frühfestigkeitsmessungen – Festlegung, Bestimmung, Interpretation (2015)