
EINFLUSS VON LUFTMENGE UND DÜSENABSTAND AUF DIE EIGENSCHAFTEN DES APPLIZIERTEN SPRITZBETONS

INFLUENCE OF AIR CONSUMPTION AND NOZZLE DISTANCE ON PROPERTIES OF APPLIED SPRAYED CONCRETE

Volker **Wetzig**, VersuchsStollen Hagerbach AG, Flums, Schweiz
Peter **Kuhn**henn, VersuchsStollen Hagerbach AG, Flums, Schweiz
Maximilian **Wietek**, VersuchsStollen Hagerbach AG, Flums, Schweiz

Druckluft ist ein wesentliches Element bei der Applikation von Spritzbeton im Trocken- und Nassspritzverfahren. Für eine wirtschaftliche Optimierung des Spritzprozesses ist die Wahl der richtigen Druckluftmenge und damit auch die Wahl der zweckmässigen Installationen auf der Baustelle bzw. den Spritzeinrichtungen entscheidend. Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf Anwendungen im Nassspritzverfahren.

Im Rahmen des von der Europäischen Gemeinschaft geförderten Projektes I²Mine wurden der Einfluss von Druckluftverbrauch und Düsenabstand auf die Qualität des Spritzbetons und des Faserrückpralls untersucht.

Neben Förderluftmenge und Düsenabstand wurden die folgenden Parameter bei den Untersuchungen variiert:

- Betonfördermenge
- Beschleunigerdosierung

Die Untersuchungen erfolgten unter den Randbedingungen eines realen Tunnelumfeldes. Bei einer sehr guten Reproduzierbarkeit wurde nachgewiesen, dass die Spritzbetoneigenschaften als Gesamtheit, die Druckfestigkeit jedoch nur untergeordnet, je nach Randbedingungen unterschiedlich intensiv durch Veränderungen von Förderluftmenge und Düsenabstand beeinflusst werden.

Compressed air is an essential element for the application of sprayed concrete in the dry and wet-mix application process. For an economical optimization of the spraying process the choice of appropriate air consumption and equipment is essential.

In the scope of the European Union funded research project I²Mine, the influence of air consumption and nozzle distance on the properties of sprayed concrete and fiber rebound has been investigated. Next to the air consumption and nozzle distance, the following parameters have been modified:

- *Pump rate of concrete*
- *Dosage of accelerator*

The investigations took place under real tunnel conditions. The reproducibility was excellent. It was shown that the entire technological parameters of sprayed concrete do depend on changes in consumed air and nozzle distance. Compressive strength does that too, but to a lower extent.

1. Einleitung

Die beschriebenen Untersuchungen sind im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten Forschungsprojektes i²Mine [1] ausgeführt worden. Im Rahmen des Forschungsprojektes gilt es, den Prozess der Spritzbetonapplikation zu optimieren, um die Leistungsfähigkeit der Spritzbetonapplikation zu erhöhen und gleichzeitig den Sicherheitsstandard in den Spritzbetonvortrieben zu erhöhen. Dabei gilt es nicht in erster Linie, den Durchsatz der Betonförderpumpe zu erhöhen, sondern das Zusammenspiel der Parameter, die im Spritzprozess zusammenwirken, besser zu verstehen und darauf basierend zu optimieren.

Im Hinblick auf die wirtschaftliche Optimierung der Spritzbetonanwendungen stehen die folgenden Parameter im Vordergrund:

- Förderluftmenge (bei gegebener Förderleitung und Düse)
- Betonrückprall
- Faserrückprall

Dabei hat der Parameter Faserrückprall auch direkten Einfluss auf das Tragverhalten des Systems Faserspritzbeton. Je geringer der Faserrückprall ist, umso höher wird das Tragvermögens des Systems.

In systematischen und mehrfach wiederholten Untersuchungsreihen wurden die Wechselwirkungen zwischen Druckluftverbrauch und Düsenabstand auf Druckfestigkeit und Rückprallwerte untersucht.

2. Versuchsaufbau und Durchführung

Alle Spritzarbeiten wurden im Dichtstromverfahren mit der gleichen Ausrüstung ausgeführt, die aus den folgenden Elementen besteht:

- Suprema Betonspritzmaschine
- 30 m Pumpschlauch
- Düsen- \varnothing 65 mm
- ALIVA Spritzarm

Die Düsenführung erfolgte ferngesteuert durch Mitarbeiter der VersuchsStollen Hagerbach AG. Ziel der Versuchsdurchführung war es, den Applikationsprozess unter möglichst realistischen Rand- und Arbeitsbedingungen durchzuführen und gleichzeitig die Reproduzierbarkeit der Ausführung zu gewährleisten.

Es wurde eine VSH-Standard-Spritzbetonmischung mit der folgenden Rezeptur verarbeitet:

0-8 mm	natürliche Gesteinskörnung (60% / 40% – Sand 0/4, Kies 4/8)
425 kg /m ³	CEM I 42.5 N
0,48	w/z-Wert
	Hochleistungsverflüssiger
6 bzw. 9 %	Beschleuniger
40 kg/m ³	Stahlfasern mit Endhaken (d=0.55 mm, L= 35 mm)
6 kg/m ³	Makro-Synthetik-Fasern, glatt (d=0.50 mm, L= 50 mm)

Zur Vereinheitlichung der Untergrundeigenschaften wurden alle Versuchsmischungen auf Betonplatten appliziert. Damit ist ein immer gleichartiger, vertikal stehender Untergrund

gegeben, und der Düsenabstand hat sich in dieser Anordnung einfach kontrollieren lassen. Der Einfluss der Untergrundrauigkeit ist nur während des Auftragens der ersten Lage Spritzbeton relevant und wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeiten nicht näher berücksichtigt.

Für die Untersuchungen wurden Düsenabstände von der Spritzoberfläche von 0,8 m, 1,5 m und 2,5 m berücksichtigt. Die Förderluftmenge wurde mit 5 m³/min, 10 m³/min und 15 m³/min eingestellt. Alle Parameterkombinationen wurden aus dem gleichen Ausgangsgemisch appliziert, um Einflüsse durch Streuungen im Ausgangsgemisch zu vermeiden. Zur Gewährleistung vergleichbarer Förderrandbedingungen der Spritzmaschine (z. B. Zylinderfüllungsgrad) wurde durch Anpassung der Verflüssigerdosierung eine nahezu gleiche Konsistenz der unterschiedlichen Mischungen eingestellt.

Der Beton wurde bei nahezu allen Prüfungen mit einer Förderleistung von 6 m³/h appliziert. Zum Abschluss der jeweiligen Versuchsreihen wurde die Förderleistung auf 10 m³/h erhöht, um eine erste Orientierung des Einflusses der Betonförderleistung auf die Betoneigenschaften zu erhalten. Weitere Versuche sind erforderlich, um die ermittelten Erkenntnisse auch für grössere Förderleistungen, wie sie auf Baustellen üblich sind, zu verifizieren.

Bei den ersten Untersuchungsreihen wurden nur die Festigkeitseigenschaften des Betons bestimmt. In weiteren Versuchsreihen wurde der Rückprallanteil durch Wägen des auf die Platten aufgetragenen Betons und der Rückprallmengen bestimmt.

Zur Evaluation des Einflusses der Art der Prüfkörpergewinnung wurden Festigkeiten und Betondichten aus Proben, die aus der Wand und aus Spritzkisten entnommen wurden, verglichen. Dies erfolgte bei allen eingestellten Parameterkombinationen. Im weiteren Schritt wurde dieser Vergleich bei unterschiedlichen Beschleunigerdosierungen ausgeführt.

3. Untersuchte Spritzbetoneigenschaften

Zur Beurteilung der Spritzbetonqualität wurde auf die folgenden Parameter fokussiert:

- Bohrkerndruckfestigkeit
- Betonrohddichte
- Rückprallverhalten
- Oberflächeneigenschaften

Die Frühfestigkeit der erwähnten Rezeptur wurde nicht geprüft, da davon ausgegangen wird, dass sich diese in Abhängigkeit von Zementgehalt, Wasser-Zement-Wert und Beschleunigerdosierung einstellen wird. Sofern die Gefügestruktur Einfluss auf die Druckfestigkeit hat, wird diese im Rahmen der Rohddichtebestimmung miterfasst.

4. Untersuchungsergebnisse

4.1 Festigkeitsergebnisse unbewehrter Beton

In einem ersten Untersuchungsschritt wurde unbewehrter Beton mit einer Beschleunigerdosierung von 6 % verarbeitet. Die Resultate sind in Bild 1 summarisch dargestellt. Die detaillierte Darstellung der Resultate findet sich in [2]. Auffallend ist die vergleichsweise geringe Streuung der Festigkeitsergebnisse bei der Variation der Spritzparameter Düsenabstand und Luftmenge.

Die höchsten Druckfestigkeiten werden bei einem Düsenabstand von 1,5 m erzielt, der in der Literatur als optimaler Wert angegeben wird. Die geringsten Festigkeiten werden bei kleinem

Düsenabstand (0,8 m) und grosser Förderluftmenge (15 m³/min) festgestellt. Weniger signifikant kleiner gegenüber den maximalen Festigkeiten sind die Druckfestigkeiten bei grossem Düsenabstand (2,5 m) und kleiner Luftmenge (5 m³/min). Mit Streuungen der Druckfestigkeiten über weite Bereiche der Parameterstudie von nur 4 % zeigen sich die Spritzbetoneigenschaften bei dieser Beschleunigerdosierung wenig sensibel gegenüber Veränderungen der Spritzparameter.

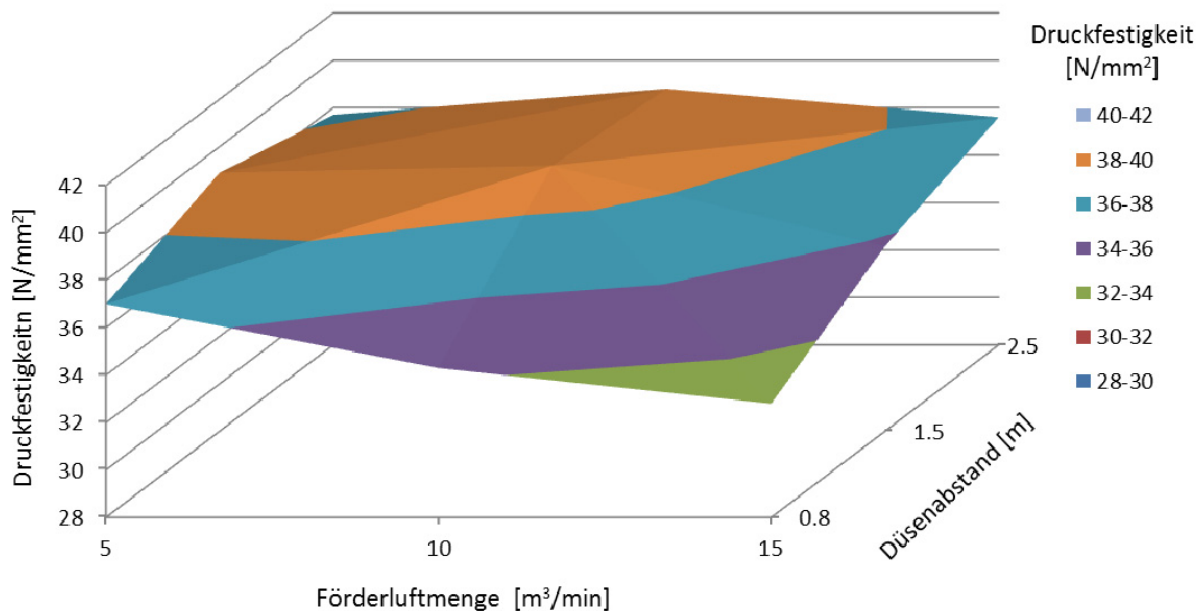


Bild 1: Druckfestigkeit als Funktion von Luftmenge und Düsenabstand, 6% EB [2]

4.2 Einfluss der Beschleunigerdosierung auf die Spritzbetondruckfestigkeiten

Die Resultate aus früheren Untersuchungen ohne Faserzugabe [2] wurden bei den aktuellen Prüfungen mit Faserzugaben bestätigt. Dies sowohl bezüglich der absoluten Höhe der Festigkeitswerte als auch bezüglich des Einflusses von Förderluftmenge [m³/h] und Düsenabstand. Es wurde kein signifikanter Einfluss der Art der Fasern auf die Druckfestigkeitswerte festgestellt.

Wird bei gleichem Ausgangsgemisch die Beschleunigerdosierung auf 9 % erhöht, ergeben sich Festigkeitswerte und Verteilungen wie in Bild 2 dargestellt. Die Aussagen zu den generellen Relationen bezüglich des Einflusses von Förderluftmenge und Düsenabstand bleiben unverändert. Die besten Festigkeitsresultate und auch höchsten Dichtewerte werden bei den oben erwähnten und auch in der sonstigen Fachliteratur genannten Parameterkombinationen von 1,5 m Düsenabstand und 10 m³/h Förderluftmenge erzielt.

Für die „idealen“ Parameter-Kombinationen von Förderluftmenge und Düsenabstand erreichen die ermittelten Druckfestigkeitswerte nahezu identische Werte. Bei Proben aus der Spritzkiste werden bei der erhöhten Beschleunigerdosierung geringfügig niedrigere Festigkeiten ermittelt, bei den Proben aus der Wand liegen die Werte bei der geringeren Beschleunigerdosierung geringfügig höher. Diese Variationen werden als nicht signifikant erachtet.

Es fällt jedoch auf, dass die absoluten Festigkeitswerte bei extrem ausfallenden Parametern deutlich niedrigere Werte als das „Optimum“ aufweisen. Während bei den Resultaten mit niedriger (6 %) Beschleunigerdosierung mit Ausnahme der Prüfkörper, die mit extrem

kleinem Düsenabstand (0,8 m) erstellt wurden, nur geringe Differenzen in den Festigkeitswerten bestehen (4 %), ergeben sich bei der hohen (9 %) Beschleunigerdosierung beim Abweichen von den optimalen Spritzparametern Festigkeitseinbußen von deutlich über 10 %. Diese sind bei der hohen Beschleunigerdosierung und bei den kleinen Düsenabständen am höchsten (20 %). Jedoch sind signifikante Festigkeitseinbußen auch bei den grösseren Düsenabständen und nicht idealen Förderluftmengen zu verzeichnen.

Mit zunehmender Beschleunigerdosierung reagiert das System Spritzbeton empfindlicher auf Abweichungen von den idealen Spritzparametern.

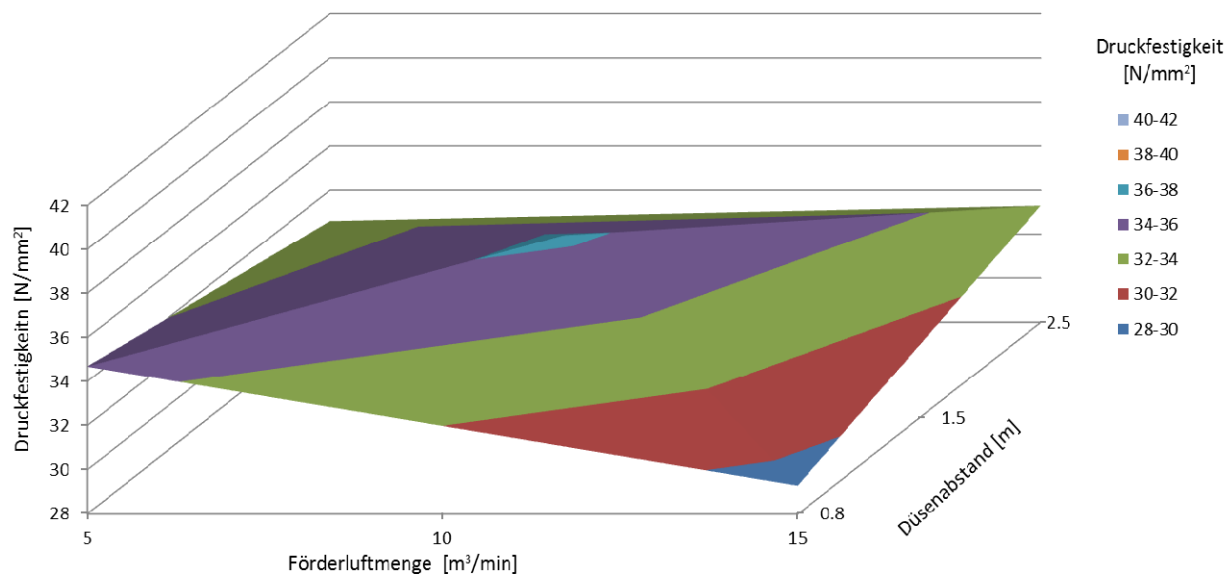


Bild 2: Druckfestigkeit als Funktion von Förderluftmenge und Düsenabstand bei 9 % Beschleunigerdosierung an der Wand

Die Versuchsergebnisse mit einer Erhöhung der Betonförderleistung von 6 auf 10 m³/h bei einer Beschleunigerdosierung von 6 % zeigen sowohl in der Spritzkiste als auch bei den Proben an der Wand einen Festigkeitsrückgang. Parallel zum Festigkeitsrückgang nehmen auch die Dichten der untersuchten Betonproben ab. Da zur Beurteilung des Einflusses der Fördermenge noch nicht ausreichende Resultate vorliegen, wird auf eine Darstellung der Einzelwerte verzichtet.

4.3 Festigkeitsresultate bei Proben aus Spritzkisten

Die Spritzbetoneigenschaften, die aus den Spritzkisten bestimmt wurden, zeigen prinzipiell die gleiche Charakteristik wie die Proben aus der Wand. Auffallend ist jedoch der deutliche Abfall der Festigkeiten und Dichtewerte bei kleinen Düsenabständen und grossen Förderluftmengen. Die Festigkeitswerte liegen bis zu 25 % (30 N/mm² gegenüber 40 N/mm²) unter den Werten, die mit optimalen Spritzparametern erzielt werden.

Diese Situation wird oftmals bei der Probengewinnung auf Spritzbetonbaustellen angetroffen. Die Spritzkisten werden am Parament aufgestellt und mit nahezu unveränderten Einstellungen der Spritzeinrichtung gefüllt. Wird der Düsenabstand dabei gegenüber dem Produktionsprozess verringert, ist zu erwarten, dass die Festigkeitswerte in der Spritzkiste deutlich niedriger ausgewiesen werden, als dies der Qualität des Spritzbetons am Objekt entspricht. Auf Grund der geringen Streuung der Festigkeitswerte sind keine signifikanten Inhomogenitäten im Spritzbeton zu erwarten.

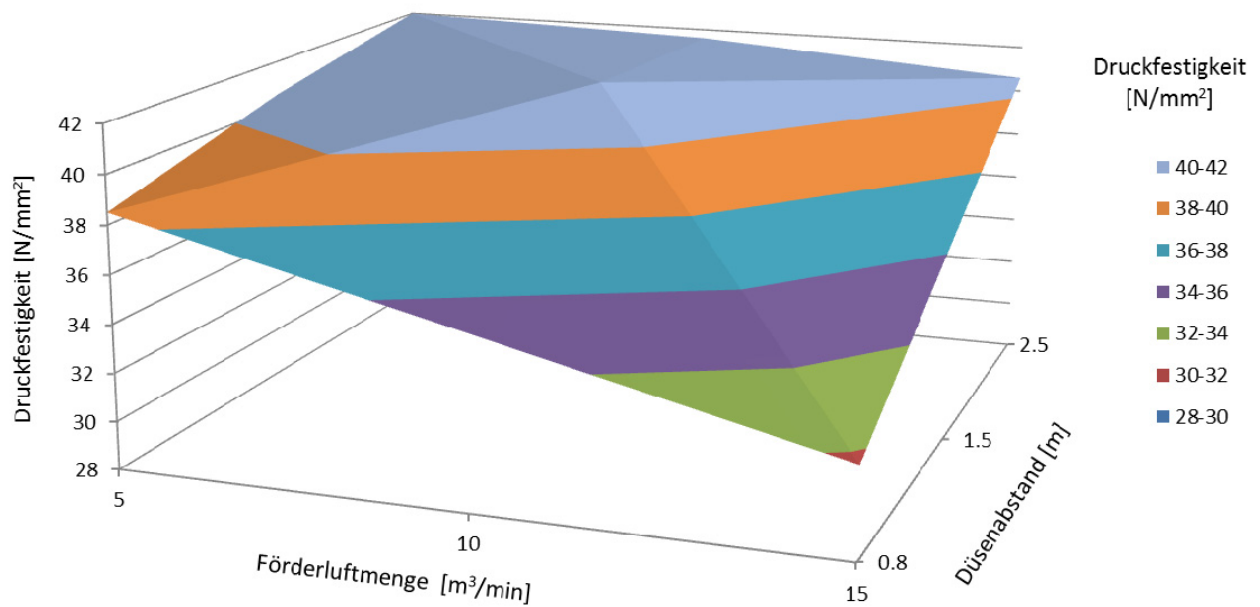


Bild 3: Druckfestigkeit als Funktion von Förderluftmenge und Düsenabstand bei 9 % Beschleunigerdosierung an Spritzkiste

4.4 Beurteilung der Spritzbetonoberfläche

Neben den quantifizierten Grössen wie Druckfestigkeit und Dichte ist auch die Beschaffenheit der Betonoberfläche zu beachten. Diese hat Einfluss auf die Homogenität der Spritzbetonschale sowie auf den Aufwand für allfällige Vorbereitungen für weitere Applikationen wie z. B. den Einbau von Abdichtungssystemen.

In Bild 4 sind im linken Bild die Spritzfelder von allen 9 möglichen Parameterkombinationen von Förderluftmenge und Düsenabstand dargestellt. Dabei sind die Felder 2, 6, und 9 mit einem Düsenabstand von 0,8 m erstellt worden. Das rechte Bild in Abbildung 3 zeigt die Oberfläche eines Spritzbetons, der mit grossem Düsenabstand und grosser Luftmenge erstellt wurde. Bezüglich der Oberflächeneigenschaften sind die genannten Muster inakzeptabel, da entweder der Aufbau einer homogenen Struktur nicht möglich ist oder die Rauigkeit zu hoch ist und vor weiteren Arbeiten Korrekturmassnahmen erfordert.

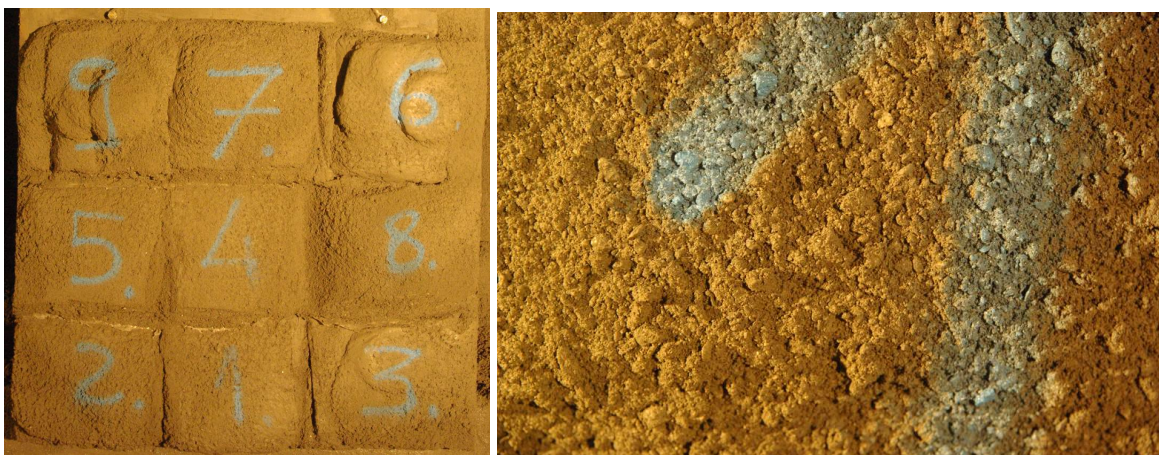


Bild 4: Oberflächeneigenschaften von Spritzbeton für unterschiedliche Spritzparameter.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die ausgeführten Untersuchungen zeigen eine Vielzahl von Einflussparametern auf den Spritzprozess und die Eigenschaften des Betons.

Die in der Literatur vielfach genannten optimalen Parameterkombinationen von Düsenabstand und Förderluftmenge bestätigen sich. Ein nicht optimaler Düsenabstand kann nicht durch die Anpassung der Förderluftmenge kompensiert werden.

Abweichungen von den Idealwerten führen nicht immer zu signifikanten Abweichungen bei den Festigkeitswerten des Spritzbetons. Insbesondere bei niedrigen Beschleunigerdosierungen und damit relativ langsamen Reaktionsverhalten des Spritzbetons sind die Auswirkungen auf die Festigkeiten gering.

Es zeigt sich jedoch, dass nur geringe Veränderungen am Spritzprozess – hier die Erhöhung der Beschleunigerdosierung von 6 % auf 9 % - die Sensibilität des Spritzvorganges deutlich steigern. Die Erhöhung der Beschleunigerdosierung führt zu einer schnelleren Reaktion des Spritzbetons, die sich augenscheinlich in deutlich niedrigen Festigkeiten manifestiert, wenn der Spritzbeton nicht unter idealen Randbedingungen appliziert wird.

Die Untersuchungen zeigen weiterhin, dass der Herstellung von „Spritzkisten“ besondere Beachtung zu schenken ist, da bei unsachgemässer Applikation des Spritzbetons in die Spritzkisten die Festigkeiten des Spritzbetons massiv unterschätzt werden können.

In weiteren Untersuchungsreihen sollen die folgenden Randbedingungen auf die Eigenschaften des Spritzbetons näher betrachtet werden:

- Förderleistung der Betonpumpe
- Orientierung der Spritzrichtung , speziell Applikationen über Kopf

6. Literatur

- [1] www.i2mine.eu
- [2] Reinhold, M.; Wetzig, V.: Influence of air-flow and nozzle-distance on sprayed concrete properties, In: Beck, T., Woldemo, O.; Engen, S. (Eds.): 7th International Symposium on Sprayed concrete, Sandefjord, Norway, 2014.
- [3] Maidl, B.: Handbuch für Spritzbeton, Verlag Ernst & Sohn Berlin, 1992.
- [4] Maidl, B.: Stahlfaserspritzbeton, Verlag Ernst & Sohn Berlin, 1991.
- [5] Melbye, T.: Spritzbeton für die Felssicherung, Zürich, 1994
- [6] Kusterle, W., Jäger, J., John, M., Neumann, Ch., Röck, R.: Spritzbeton im Tunnelbau. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F., Wörner, J-D. (Hrsg.): Unterirdisches Bauen, Grundbau, Eurocode 7. BetonKalender 2014, 103. Jahrgang, Ernst & Sohn, Berlin, 2014.

Zu den Autoren

Dipl.-Ing. Volker Wetzig
Bergbauingenieur (TU Clausthal), Projektleiter für Grossversuche der VersuchsStollen Hagerbach AG,
seit 2009 Mitglied der Geschäftsleitung
vwetzig@hagerbach.ch

Dipl.-Ing. (FH) Peter Kuhnhenh

Bauingenieur (FH Aachen), Prüfstellenleiter im Zentralen Labor für Baustofftechnik bei der Bilfinger Berger AG, Bereichsleiter Produktentwicklung bei Dorner Electronic, seit 2014 Ingenieur bei VSH
pkuhnhenh@hagerbach.ch

Dipl.-Ing. Maximilian Wietek

Bauingenieur (TU Innsbruck), Projektleiter I²Mine, Geschäftsbereichsleiter bei VSH
mwietek@hagerbach.ch