
DER EINSATZ EINES NEU ENTWICKELTEN ZUSATZSTOFFES ZUR VERBESSERUNG DER BESCHLEUNIGERWIRKUNG BEI HOCHLEISTUNGSSPRITZBETON

USING ADVANCED ADMIXTURES TO ENHANCE ACCELERATOR PERFORMANCE IN SPRAYED CONCRETE

Ing. Enrico **Dal Negro**, Mapei UTT, Mailand, Italien
Dr. Cristiano **Maltese**, Mapei UTT, Mailand, Italien
Dr.-Ing. Veit **Reinstadler**, Mapei UTT, Mailand, Italien

Zur Zeit sind verschiedene alkalifreie Spritzbetonbeschleuniger mit sehr schnellen Erstarrungszeiten auf dem Markt. Diese Erstarrungsbeschleuniger bewirken eine sehr schnelle Erhärtung des Betons und erlauben so einen Auftrag in größeren Schichtdicken an vertikalen Flächen und auch über Kopf. Die Wirksamkeit dieser Erstarrungsbeschleuniger ist sehr unterschiedlich und hängt von vielen Parametern ab, wie z.B.: dem Zement Typ und seiner chemische Zusammensetzung, den Umgebungsbedingungen (Feuchte, Temperatur), der Betonmischung (W/Z, Gesteinskörnungen...). Dadurch kann es auf der Baustelle zu unterschiedlicher Wirksamkeit der Erstarrungsbeschleuniger kommen. Diese Einflüsse auf die Wirksamkeit können unter extremen Bedingungen sehr gefährlich für die Mineure werden, da es bei schlechter Wirksamkeit zu Ablösungen des Spritzbetons über Kopf kommen kann. Deshalb haben wir in unseren Forschungs- und Entwicklungsabteilungen einen neuen Zusatzstoff entwickelt, der die Wirksamkeit des Beschleunigers erhöhen und stabilisieren kann. Dieser neue pulverförmige Zusatzstoff ist so wirksam auf die Frühfestigkeitsentwicklung des Spritzbetons, dass man den Zementgehalt in der Betongrundrezeptur reduzieren kann.

In dem folgenden Beitrag wollen wir die Wirksamkeit dieser neuen Technologie anhand von Labor- und Baustellenversuchen darlegen. Die Ergebnisse zeigen klar eine Verbesserung der derzeitigen Spritzbetontechnologie. Diese neue Technologie hat viele Vorteile gegenüber der herkömmlichen Technologie: niedrigere Kosten, mehr Sicherheit, weniger CO₂ Emissionen aufgrund des geringeren Zementgehaltes.

Several flash setting alkali free accelerators are commonly available on the market and used for underground constructions. These admixtures cause a very rapid hardening of concrete thus allowing overhead and vertical applications. Their efficiency is very variable and dependent upon several parameters like: cement type and its chemical composition; environmental conditions (humidity; temperature); concrete mix design. Therefore, at job site, significant variations in terms of accelerator performances can occur. These effects can be extremely dangerous for worker safety as they can cause sudden collapses of the sprayed material. A new admixture was developed in our R&D Labs which can stabilize and enhance accelerator performance. This new powder based admixture is so effective in terms of mechanical strength development of the sprayed concrete layer that it can even allow a significant reduction in cement.

In this paper a review is presented of several job site tests where this new technology has been applied. The results clearly show exciting improvements in concrete technology. Underground projects are able to commence with many advantages hitherto unknown in traditional techniques. These improvements include lower cost, higher safety, lower rebound, greater speed and even environmental improvements due to the reduction in CO₂ emissions (lower cement = lower carbon footprint).

1. Einleitung

Alkalifreie Spritzbetonerstarrungsbeschleuniger sind relativ neue flüssige Betonzusatzmittel, die im Untertagebau angewendet werden [1, 2, 3, 4, 5]. Aus arbeitshygienischen und technologischen Gründen haben diese Zusatzstoffe andere klassische alkalihaltige Erstarrungsbeschleuniger, wie z.B. Natrium-Aluminat oder Natrium-Silikat aus dem europäischen Markt verdrängt. Zusätzlich wird durch den Einsatz dieser neuen alkalifreien Beschleuniger eine höhere Endfestigkeit und Dauerhaftigkeit des Bauwerkes erreicht [6]. Diese alkalifreien Zusatzmittel bewirken ein schnelles „Erstarren“ des Betons; dadurch ist es möglich den Spritzbeton mit dickeren Schichtstärken im Tunnelgewölbe zu applizieren. Durch die Spritzbetonschale entsteht ein Schutzschild, durch die der Tunnel gestützt wird und die Tunnelkonvergenzen können kontrolliert werden [7]. Aufgrund des Gebirgsdruckes ist es wichtig, dass der Spritzbeton eine definierte, rasche Druckfestigkeitszunahme aufweist, vor allem in den ersten 24 Stunden.

Verschiedene alkalifreie Spritzbetonbeschleuniger sind auf den Markt erhältlich. Prinzipiell kann man Sie in zwei Hauptgruppen einteilen, wobei beide Gruppen Aluminium-Sulfat Komplexe enthalten, aber entweder mit anorganischen (Flusssäure) oder organischen Säuren (Ameisensäure) stabilisiert werden [8]. Die Haftung des Spritzbetons am Tunnelgewölbe hängt vor allem von der Wirksamkeit der Reaktion zwischen Erstarrungsbeschleuniger und hydratisierendem Zement ab. Diese Reaktion wird normalerweise im Labor über die Messung der Erstarrungszeiten und der Frühfestigkeitsentwicklungen des beschleunigten Zementleimes oder Mörtels beurteilt [9,10]. Diese Reaktion wird durch verschiedene Parameter wie zum Beispiel Beschleunigertyp und dessen Zusammensetzung (z. B. Feststoffgehalt...), Zementart und dessen Zusammensetzung (z.B. Zumahlstoffe), Erstarrungsregler im Zement, Umgebungsbedingungen, Betonzusammensetzung und -temperatur, Betonzusatzmittel und Gesteinskörnungen beeinflusst.

Diese Einflüsse auf die Reaktion von Erstarrungsbeschleuniger mit Zement können bei schlechter Abstimmung sehr gefährlich für die Mineure werden, da es zum Ablösungen des Spritzbetons über kopf kommen kann. Um die Frühfestigkeitsentwicklung und die Erstarrung des Spritzbetons zu verbessern, muss die Dosierung des Erstarrungsbeschleunigers und des Zementes im Beton erhöht werden, was sich in den Kosten generell und in der Spritzbetonqualität auswirkt (z.B. erhöhte Rissbildung im Beton, Dauerhaftigkeit, Endfestigkeiten...).

Speziell ein hoher Zementgehalt wirkt sich negativ auf die Umwelt aus, da die Portlandzementproduktion trotz großer Anstrengungen zur Verbesserung mit einer großen Umweltbelastung einhergeht. Zum Beispiel braucht man für die Herstellung einer Spritzbetonschale mit einer mittleren Dicke von 30 cm eines kleinen Tunnels (Durchmesser 7 m, Länge 1000 m) ca. 1630 to Zement (abhängig vom Zementgehalt im Spritzbeton); bei der Produktion dieser Menge Zements entstehen ca. 1076 to CO₂.

Aus diesem Grunde wurde ein neues Zusatzmittel entwickelt, welches die Wirkung des Erstarrungsbeschleunigers stabilisiert und erhöht. Zusätzlich ist dieses neue, mineralische, pulverförmige Zusatzmittel so wirkungsvoll in bezug auf die Frühfestigkeitsentwicklung und Enddruckfestigkeit des Spritzbetons, dass man durch den Einsatz dieses neuen Zusatzes den Zementgehalt im Beton merklich reduzieren kann.

In folgender Abhandlung wird die Wirksamkeit dieses pulverförmigen Zusatzmittels - genannt **AAA (Accelerator Aid Agent)** - in Bezug auf die Erstarrung und die Frühfestigkeit des Spritzbetons dargestellt.

2. Versuchsergebnisse

2.1 Laborergebnisse

Zwei Mischungen von Zementleim sind mit einem Portlandzement Typ CEM I 42,5 R, Wasser / Zementwert 0,35 und einem Polycarboxylat Fließmittel hergestellt worden. Eine der Zementleimmischungen enthielt nur Zement, Wasser und Fließmittel, in der anderen hat man zusätzlich einen Teil des Zementes durch **AAA** ausgetauscht (12,5 % der Gesamtmenge). Die Menge des Fließmittels wurde so gewählt, dass dieselbe Konsistenz (gemessen mit dem Marshtrichter) für beide Mischungen erreicht wurde. Nachdem man durch Rühren eine homogene Zementschlämpe gemischt hatte und eine Temperaturkonstanz erreicht hatte, wurde ein handelsüblicher Erstarrungsbeschleuniger auf Basis von Aluminiumsulfat (Al/S Molverhältnis 1,03) dazugegeben, wobei verschiedene Dosierungen des Beschleunigers getestet wurden. Die Erstarrungszeiten (Erstarrungsbeginn und -ende) wurden gemäß Vicat Methode (EN 196/3) gemessen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass für die sichere Applikation eines Spritzbetons im Tunnel, im Labor ein Erstarrungsende von unter 2 min notwendig ist. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Erstarrungszeit des Zementleimes mit einem CEM I 42,5 R

| Ausgangsstoffe | Mischung 1 (g) | Mischung 2 (g) |
|---------------------------------------|----------------|----------------|
| Zement | 100 | 87,5 |
| AAA | 0 | 12,5 |
| Polycarboxylat Fließmittel | 0,70 | 0,87 |
| Wasser | 35 | 30,6 |
| EB Dosierung (M-% bezogen auf Zement) | 8 | 6 |
| Erstarrungsende | 4 min | 3 min 10 sec |
| EB Dosierung (M-% bezogen auf Zement) | 9 | 7 |
| Erstarrungsende | 1 min 40 sec | 1 min 50 sec |

Im Labor wurde auch die Frühfestigkeitsentwicklung von Zementmörteln, mit und ohne **AAA**, gemischt mit einem handelsüblichen Erstarrungsbeschleuniger auf Basis von Aluminiumsulfat, ermittelt. Die Zusammensetzung des Zementmörtels ist in Tabelle 2 aufgeführt. Die Zementmörtel wurden gemäß EN 196/1 hergestellt. **AAA** ist dem Zement beigemischt worden. Als letzte Komponente wurde der alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger im Mischer zugegeben und der Mörtel noch weitere 10 sec. gemischt. Danach wurden die Mörtel in Prismen 40x40x160 mm eingeschlagen. Die ersten Frühfestigkeiten wurden bis zum Erreichen der Ausschalfestigkeiten mit einer digitalen Penetrationsnadel (gemäß ÖVBB-Richtlinie Spritzbeton) gemessen und sind in N angegeben. Diese Werte sind Vergleichswerte und sind nicht genormt. Später sind die Festigkeiten an den Prismen gemäß EN 196/1 ermittelt worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tab. 2: Mörtelrezepturen zur Ermittlung der Festigkeiten

| Ausgangsstoffe | Mischung 3 (kg/m ³) | Mischung 4 (kg/m ³) |
|--|---------------------------------|---------------------------------|
| CEM IV/A-P 42,5 N (in Italien üblicher Spritzzement) | 480 | 431 |
| AAA | 0 | 54 |
| Fließmittel (Polycarboxylat) | 2 | 7 |
| Alkalifreier Spritzbetonbeschleuniger | 29 | 26 |
| Normensand (0-2,5 mm) | 1449 | 1454 |
| Wasser | 217 | 194 |

Tab. 3: Frühfestigkeitsentwicklung

| Mischung | Eindringwiderstand Penetrationsnadel (N) Festigkeiten (N/mm ²) | | | | | | |
|----------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | 0,5 h | 1 h | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 24 h |
| 3 | 12 N | 37 N | 54 N | 67 N | 75 N | 100 N | 11,0 N/mm ² |
| 4 | 155 N | 0,5 N/mm ² | 1,2 N/mm ² | 3,3 N/mm ² | 4,1 N/mm ² | 5,3 N/mm ² | 10,8 N/mm ² |

2.2 Baustellenergebnisse

Es wurden auf vier Baustellen Spritzbetonversuche mit vier verschiedenen Zementen (speziell deutsche Spritzzemente) durchgeführt, um den Einfluss von **AAA** auf die Frühfestigkeitsentwicklung zu untersuchen. Alle diese Spritzbetone wurden mit demselben handelsüblichen alkalifreien Spritzbetonbeschleuniger, aber einmal ohne und dann mit **AAA** getestet. Es wurden je nach Baustelle 2 verschiedene Spritzgeräte (Meyco Potenza, Putzmeister PM 500) verwendet. Die Zusammensetzung der Betone ist der Tabelle 4 zu entnehmen. Die Betone wurden gemäß der Norm EN 480-1 gemischt. Die Frühfestigkeiten der Spritzbetone wurden gemäß EN 14887 und EN 14888-2 geprüft (bis 1 N/mm² wurden die Festigkeiten mit einem Proctor Penetrometer und ab 2 N/mm² mit dem Hilti Bolzensetzverfahren gemäß ÖVBB-Richtlinie Spritzbeton gemessen).

Tab. 4: Zusammensetzungen der Spritzbetone

| Ausgangsstoffe | Mischung | | | | | | | |
|--|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 5 | 5a | 6 | 6a | 7 | 7a | 8 | 8a |
| | kg/m ³ | | | | | | | |
| Cem II/A-S 42.5 R (Rohrdorfer) | 420 | 380 | / | / | / | / | / | / |
| Cem I 52.5 R (Deuna) | / | / | 380 | 340 | / | / | / | / |
| Cem I 52.5 R (Heidelberger) | / | / | / | / | 380 | 340 | / | / |
| Cem II/B-M 52.5 N (Holcim) | / | / | / | / | / | / | 400 | 360 |
| AAA | / | 20 | / | 20 | / | 20 | / | 20 |
| Polycarboxylat Fließmittel | 2,9 | 3,4 | 3,4 | 3,8 | 3 | 3,7 | 4 | 4,3 |
| Gesteinskörnungen (silikatisch und porphyrisch) (0-8 mm) | | | X | X | X | X | X | X |
| Gesteinskörnungen (Kalkstein) (0-8 mm) | X | X | | | | | | |
| Alkalifreier Erstarrungsbeschleuniger | 25,2 | 22,8 | 19 | 17 | 20,9 | 18,7 | 28,0 | 25,2 |
| Wasser | 191 | 175 | 192 | 170 | 189 | 173 | 199 | 182 |
| Wasser/Zement Wert | 0,46 | 0,46 | 0,50 | 0,49 | 0,50 | 0,51 | 0,50 | 0,50 |

Im Bild 1 sind die Ausbreitmaße der Spritzbetone ohne und mit **AAA** ersichtlich. Wie man sieht, ist im Ausgangsgemisch kein signifikanter Unterschied zu erkennen.



Bild 1: Ausbreitmaß der Mischungen 6 (links) und 6a (rechts)

Als Applikationsbeispiel sieht man auf Bild 2 das Spritzen der Mischung 6a.



Bild 2: Spritzen von der Mischung 6a

Die Ergebnisse der Frühfestigkeitsmessungen der verschiedenen Spritzbetone sind aus den Bildern 3-6 ersichtlich.

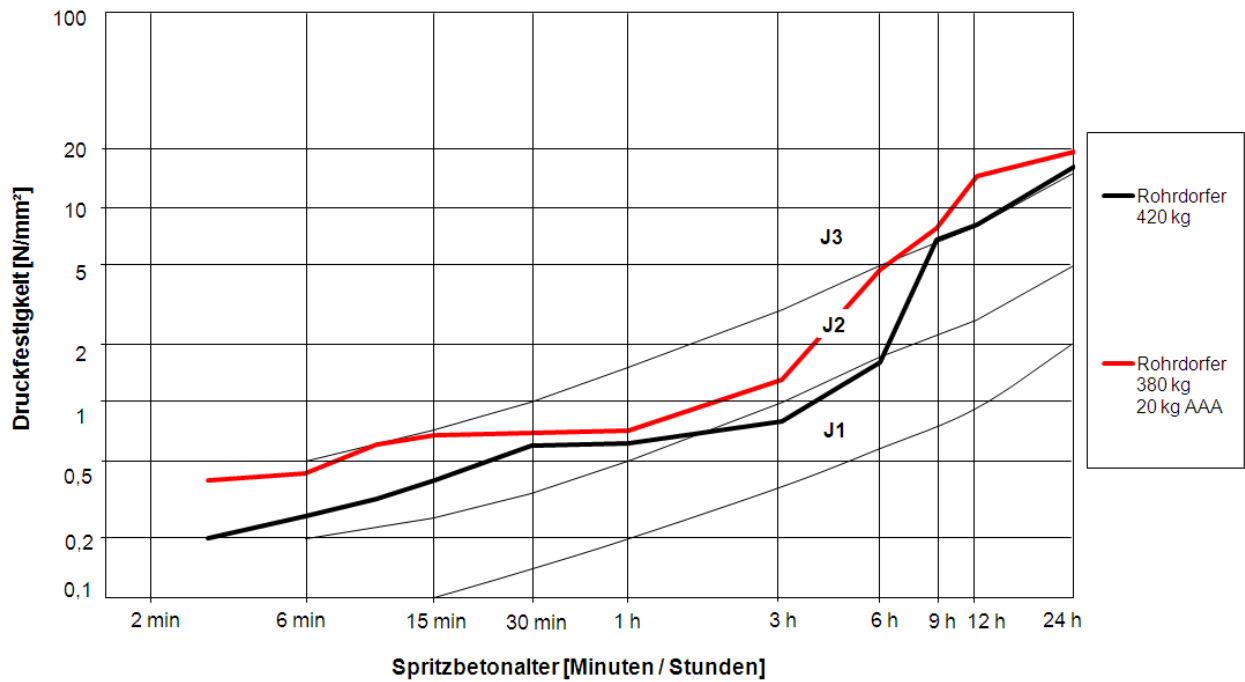


Bild 3: Frühfestigkeitsentwicklung der Mischungen 5 und 5a

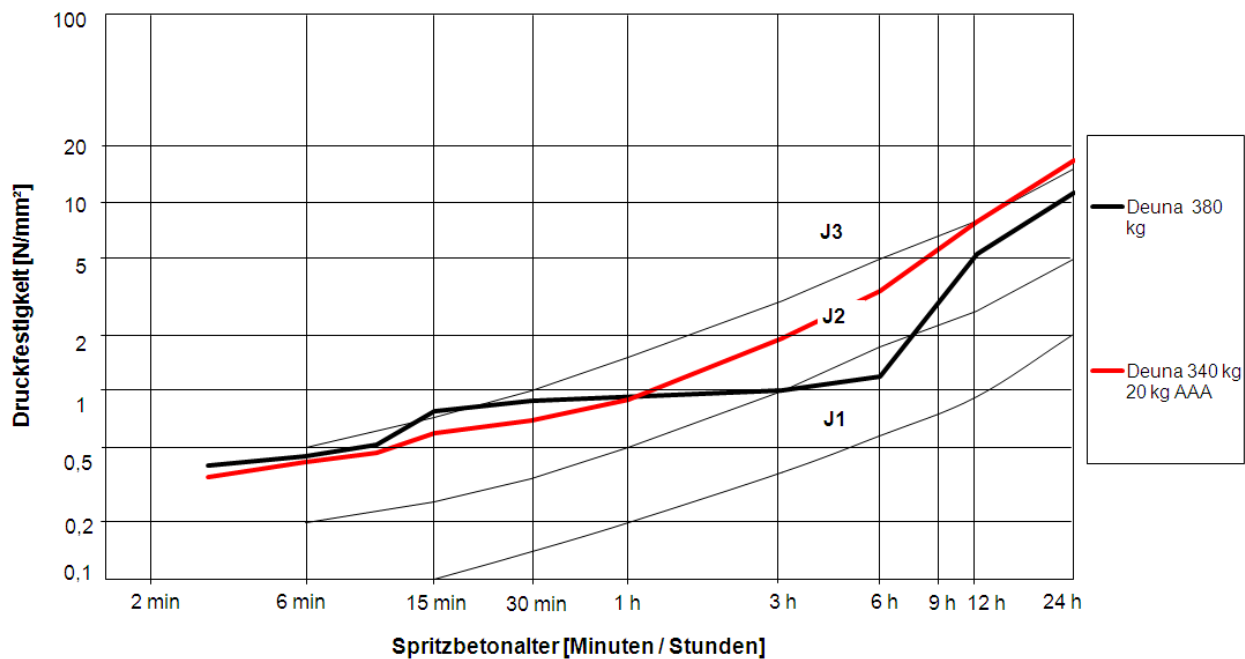


Bild 4: Frühfestigkeitsentwicklung der Mischungen 6 und 6a

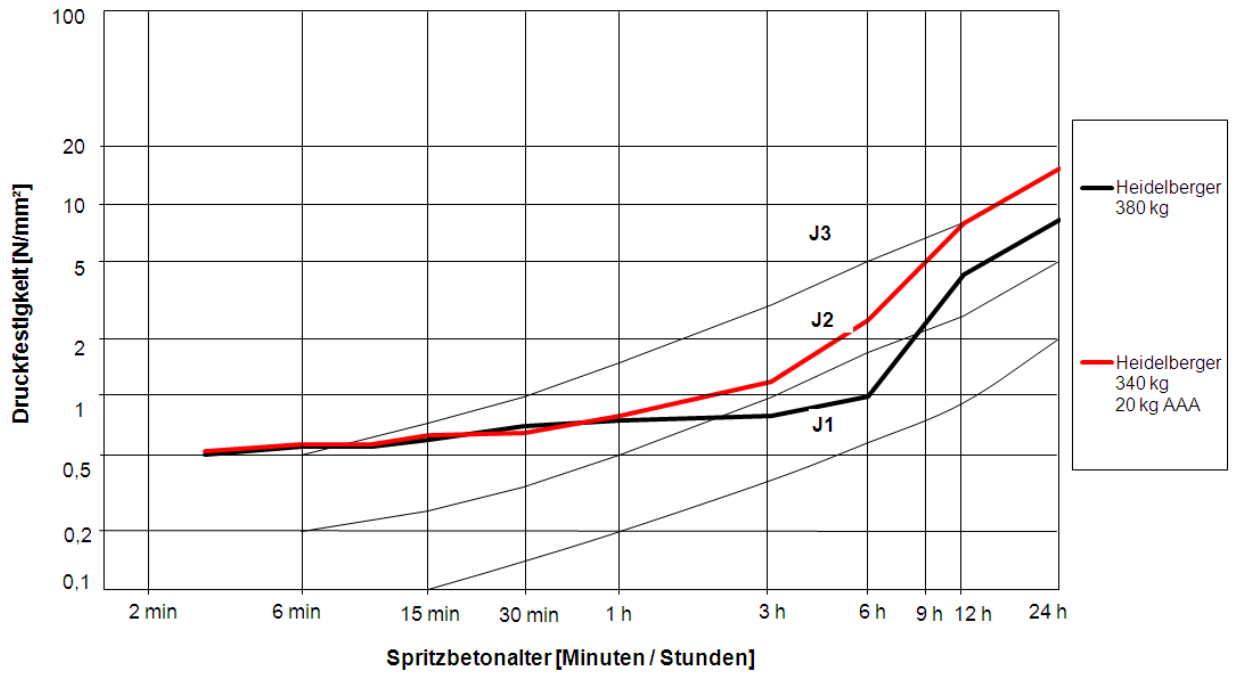


Bild 5: Frühfestigkeitsentwicklung der Mischungen 7 und 7a

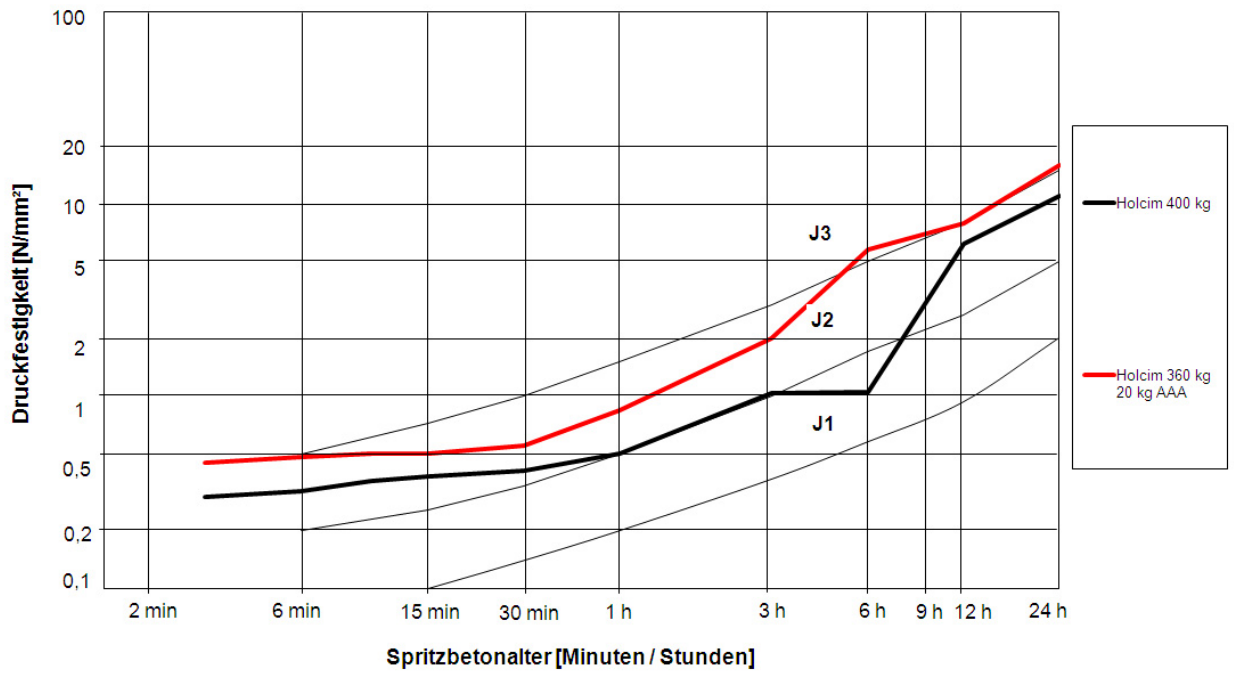


Bild 6: Frühfestigkeitsentwicklung der Mischungen 8 und 8a

3. Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse in Tabelle 1 (Zementleim) zeigen deutlich, dass Mischung 2, welche **AAA** enthält, für ein Erstarrungsende von 2 Minuten eine Erstarrungsbeschleunigerdosierung von 7 % (bezogen auf den Zementgehalt) benötigt, anstatt wie die Mischung 1 ohne **AAA** 9 %. Dies bedeutet, dass mit dem niedrigeren Zement- und Beschleunigergehalt das bessere Ergebnis erzielt wurde.

Die Ergebnisse der Mörtelprüfungen zeigen, dass die Mischung 4 (gemischt mit AAA, weniger Zement und weniger Erstarrungsbeschleuniger) eine viel höhere Frühfestigkeitsentwicklung aufweist, als die Mischung 3 ohne **AAA**.

Auch die Ergebnisse der Feldversuche bestätigen diese höheren Frühfestigkeitsentwicklungen (Bilder 3-6). Die Spritzbetone 5a, 6a, 7a und 8a gemischt mit **AAA** und weniger Zement zeigen bei Zugabe von weniger Beschleuniger (da der Beschleuniger auf den Zementgehalt dosiert wurde) die besseren oder zumindest dieselben Ergebnisse, verglichen mit den Mischungen ohne diesen neuen pulverigen Zusatzstoff.

Die Ausbreitmaße der Betone bis 90 Minuten wurde bei den Baustellenversuchen ebenfalls gemessen und man hat gesehen, dass der neue pulverige Zusatzstoff **AAA** keinen negativen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit der Betone hat.

4. Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen klar, dass durch die Anwendung dieser neuen Technologie für Spritzbeton und Spritzmörtel in Verbindung mit einem alkalifreien Erstarrungsbeschleuniger eine deutliche Reduzierung von Zement und flüssigen Erstarrungsbeschleuniger bei gleichzeitiger Erhöhung der Frühfestigkeiten möglich ist. Diese Reduzierung von Zement und Beschleuniger bewirkt eine Senkung der Kosten und der negativen Umwelteinflüsse bei der Herstellung der Bauwerke. Zusätzlich wird durch die Einsparung von Zement die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes erhöht, da es zu geringerer Bildung von Schwindrissen kommt. Die Wirkung des Erstarrungsbeschleunigers wird gleichmäßiger und dadurch nicht mehr so abhängig von äußeren Einflüssen; der Tunnelvortrieb wird, vor allem für die Mineure, sicherer und effektiver. **AAA** ist auch mit alkalifreien Erstarrungsbeschleunigern mit geringem Aluminium-Sulfat Gehalt einsetzbar und sehr wirksam, was den Sulfatangriffswiderstand des Spritzbetons erhöht.

Die Wirksamkeit dieser neuen Technologie ist in diesem Artikel eindeutig gezeigt worden, aber es sind gewiss noch weitere Studien nötig um das genaue chemische Zusammenspiel zwischen Zement, Erstarrungsbeschleuniger und AAA zu erforschen.

5. Literatur

- [1] Myrdal, R.:
Modern chemical admixtures for shotcrete. In Barton et al. (Ed.): Proceedings of 3rd International Symp. on Sprayed Concrete. September 1999, Gol, Norway, 375-382.
- [2] Leikauf, B., Oppliger, M.:
Alkali-free accelerators for sprayed concrete. *Chimia* 52, 1998, pp. 222-224.
- [3] Dal Negro, E., Maltese, C., Pistolesi, C.:
Use of advanced alkali-free accelerators for high performance concrete. *Gallerie e Grandi Opere Sotteranee* 70, 2003, pp. 51-58.
- [4] Paglia, C., Wombacher, F., Böhni, H.:
The influence of alkali free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems. *Cem. Con. Res.* 31, 2001, pp. 913-918.

- [5] Sharrocks, D.:
Investing in new accelerators. *Concrete Engineering International* 2, 1998, pp. 14-15.
- [6] Zampini, D., Walliser, A., Oppliger, M., Melbye, T., Maltese, C., Pistolesi, C., Tansini, G., Portigliatti, E., Dal Negro, E.:
Liquid based set accelerating admixtures for sprayed concrete: a comparison between alkali-free and alkali-rich accelerators. *Gallerie e Grandi Opere Sotteranee*, 72 2004 pp. 30-40.
- [7] Hoek, E.:
Practical Rock Engineering. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, 2000.
- [8] Maltese, C., Pistolesi, C., Bravo, A., Cerulli, T., Salvioni, D., Squinzi, M.:
Formation of nanocrystals of Aft phase during the reaction between alkali-free accelerators and hydrating cement: a key factor for setting and hardening of sprayed concretes. In proceedings of 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction, 13-16 November 2005, Bilbao, Spain.
- [9] Cerulli, T., Dal Negro, E., Hansen, R., Maltese, C., Pistolesi, C., Wilberg, J.:
Physical mechanical analysis of concrete sprayed with two different accelerators: morphological and chemical implications. In Berg, K. et al.(Ed.): 4th International Symposium on Sprayed Concrete, Davos, Switzerland, 22-26 September 2002, 58-72.
- [10] De Belie, N., Grosse, C. U., Kurz, J., Reinhardt, H. W.:
Ultrasound monitoring of the influence of different accelerating admixtures and cement types for shotcrete on setting and hardening behaviour. *Cem. Con. Res.* 35 2005 pp. 2087-2094.

Zu den Autoren

Ing. Enrico Dal Negro

Ingenieurstudium (Bauwesen) in Domodossola, seit 1999 Direktor Mapei UTT, Mailand

e.dalnegro@utt.mapei.com

Dr. Cristiano Maltese

Chemie- und Physikstudium an der Universität Pavia, 1995 Master of Science Abschluss an der Universität Kent in Canterbury (UK), seit 1997 tätig in der Forschungs- und Entwicklungsabteilung für Baumaterialien bei Mapei, Mailand

c.maltese@utt.mapei.com

Dr.-Ing. Veit Reinstadler

Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Innsbruck, seit 2001 Mapei UTT, Mailand

v.reinstadler@utt.mapei.com