
EINFLUSS VON HÜTTENSAND UND ULTRAFEINEM KALKSTEINMEHL AUF DIE HYDRATATION VON JUNGEM SPRITZBETON

INFLUENCE OF BLAST FURNACE SLAG AND ULTRAFINE LIMESTONE ON EARLY HYDRATION OF SPRAYED CONCRETE

Anina **Stauffacher**, Institut für Materialprüfung u. Baustofftechnologie, TU Graz, Österreich

Isabel **Galan**, Institut für Angewandte Geowissenschaften, TU Graz, Österreich

Patrick **Juilland**, Sika Technology AG, Zürich, Schweiz

Maria **Thumann**, Labor für Betontechnologie, OTH Regensburg, Deutschland

Christian **Stenger**, Sika Technology A, Zürich, Schweiz

Andre **Baldermann**, Institut für Angewandte Geowissenschaften, TU Graz, Österreich

Florian **Mittermayr**, Institut für Materialprüfung u. Baustofftechnologie, TU Graz, Österreich

Benedikt **Lindlar**, Sika Services AG, Zürich, Schweiz

Wolfgang **Kusterle**, Labor für Betontechnologie, OTH Regensburg, Deutschland

Hydratationsreaktionen sind von zentraler Bedeutung um die Frühfestigkeitsentwicklung des jungen Spritzbetons zu verstehen. In vorliegender Studie wurden die frühen Hydratationsreaktionen von Spritzbeton untersucht. Die analysierten Rezepturen verfügen durch die Zugabe von Hüttensand und Kalksteinmehl als Mikrofüller über einen reduzierten Klinkergehalt und wurden betreffend Packungsdichte optimiert. Die Spritzversuche erfolgten im Nassspritzverfahren im Labormaßstab, wobei nach dem Spritzvorgang während 24 Stunden kontinuierlich das Schermodul aufgezeichnet wurde. Die Hydratationsreaktionen an den gespritzten Proben wurden mittels Kalorimetrie-, XRD- und Thermogravimetrie-messungen untersucht. Erste Ergebnisse zeigen vielversprechende Möglichkeiten Wärme- und Festigkeitsentwicklung zu korrelieren. Die unterschiedliche Phasenentwicklung in Abhängigkeit der Rezepturzusammensetzung dokumentiert die frühen Hydratationsreaktionen von jungem Spritzbeton.

In this study, we demonstrate how blast furnace slag and ultrafine limestone affect early hydration of sprayed concrete. Samples were studied by a combined approach using Minishot lab-scale spraying and analytical methods such as isothermal calorimetry, thermogravimetry and XRD. These findings are subsequently linked to 24 h continuously recorded shear modulus in order to enhance understanding of the observed early strength development. First attempts correlating heat flow and early strength development show promising results. These results show how the substitution of cement with slag and ultrafine limestone influences hydration kinetics and therefore its reactions and early strength development.

1. Einleitung

Spritzbeton kommt in Tunnelvortrieb, im Untertagebau und bei Instandsetzungen, z.B. auch bei Brücken zum Einsatz. Zentral im Vortrieb ist dabei die schnelle Erhärtung des Spritzbetons innerhalb der ersten Stunden, damit der Arbeitszyklus reibungslos weitergeführt und die Kosteneffizienz sichergestellt werden kann. Hydratationsreaktionen sind von großer Bedeutung für die Frühfestigkeitsentwicklung von „jungem“ Spritzbeton. Die Reaktionsprodukte der Hydratation, z.B. Calcium-Silikat-Hydrate nehmen eine zentrale Rolle als

Hauptfestigkeitsbildner im Spritzbeton ein. Zur Entwicklung von umweltfreundlicheren Betonen wird Zement vermehrt durch geeignete Zusatz- und Füllstoffe ersetzt [1, 2], die Einfluss auf die Hydratation und Frühfestigkeitsentwicklung haben. Gleichzeitig sind Norm- und Leistungsanforderung weiterhin zu erfüllen oder bestenfalls zu optimieren.

In vorliegender Studie wurde, in Kombination mit Minishot-Versuchen [3] die Hydratationskinetik von neu entwickelten Spritzbetonrezepturen mit reduziertem Klinkergehalt und optimierter Packungsdichte untersucht. Die Rezepturen setzen sich aus CEM I 52,5 R (CEM Hoch) mit variierenden Gehalten an Hüttensand (HUS4500) und ultrafeinem Kalksteinmehl (CALEGU) zusammen. Für die Minishot-Versuche wurden jeweils ein Kalksteinmehl als Annäherung an den Feinanteil der Gesteinskörnungen, Fließmittel, Verzögerer und ein alkalifreier Erstarrungsbeschleuniger eingesetzt (Tabelle 2).

Die Substitution von Zement durch Hüttensand ist bereits verbreitet und Normzemente z.B. als CEM III marktüblich erhältlich. Der Sekundärstoff Hüttensand wird aufgrund seiner latent-hydraulischen Eigenschaften eingesetzt. Die Zugabe von Hüttensand reduziert die maximale exotherme Hydratationswärme, kann die Hydratation von Portlandzement beschleunigen und führt zu zusätzlichen, später einsetzenden Reaktionen während der Hydratation [4, 5]. Die Verfügbarkeit ist allerdings von der Eisenproduktion abhängig.

Der "Füller-Effekt" beschreibt den beschleunigenden Effekt von mineralischen Zusatzstoffen auf die Zementhydratation. Gemäß Kumar, A. et al. [6] korreliert die Beschleunigung mit der vorhandenen Oberfläche, da der Füller zusätzliche Nukleationsflächen für C-S-H Phasen bietet. Berodier, E. und Scrivener, K. [7] zeigten, dass der Einsatz von Füller zu einer Verminderung der Distanz zwischen den einzelnen Partikeln führt und dadurch die Hydratation der Klinkerphasen beschleunigt wird. Dabei wird die Beschleunigung primär auf die verstärkte Scherbewegung und nicht auf die vergrößerte Oberfläche zurückgeführt. Im Gegensatz zu Quarz, Hüttensand und Flugasche unterstützt Kalkstein die Nukleation von C-S-H Phasen, was die Klinkerhydratation verstärkt beschleunigt [7]. Kumar, A. et al. [6] zeigten, dass unterschiedliche Grenzflächeneigenschaften von Quarz und Kalkstein wenig bis keine Beschleunigung der Hydratation bewirken. Gemäß Matschei, T. et al. [8] verhält sich Kalzit während der Hydratation reaktiv und beeinflusst entsprechend die Mineralogie der Hydratationsreaktionen. Thermodynamische Modellierungen und experimentelle Daten belegen, dass durch die Zugabe von Kalkstein Monokarbonat anstelle von Monosulfat gebildet und so indirekt auch die Ettringitstabilität unterstützt wird [9].

Gemäß weitreichenden Studien der Hydratation von Portlandzement reagieren die Klinkerphasen zu C-S-H Phasen, Portlandit, Ettringit, AFm und Hydrotalkit. Jansen, D. et al. [10] zeigten, dass die exotherme Wärmeentwicklung während der Hydratation von Portlandzement - ohne Berücksichtigung der Anfangsphase - in drei Mechanismen unterteilt werden kann: i) Hydratation von Alit und Bildung von C-S-H Phasen / Portlandit; ii) Hydratation von C_3A ; iii) Bildung von Ettringit. Die Mechanismen i) und iii) zeigen sich in der exothermen Wärmeentwicklung als lokales Silikatreaktions-Maximum. Während dem Sulfatabnahme-Maximum werden alle drei Mechanismen beobachtet.

Spritzbeton unterscheidet sich von üblichem Beton aufgrund des Auftrages im Spritzvorgang und der Zugabe von Beschleuniger. Im Naßspritzverfahren wird Beschleuniger an der Düse zugeführt. Der Einfluss von Zusatzstoffen, Füllern und alkalifreien Beschleuniger auf die Zusammensetzung der Hydratphasen und die Hydratationsreaktionen von "jungem" Spritzbeton ist bis heute wenig erforscht. Salvador, R.P. et al. [11] zeigten, dass der Nassspritzauftrag die Rate der Beschleunigerreaktion bzw. Ettringitbildung beschleunigt und die Morphologie der Hydratphasen beeinflusst. Die Zugabe von Aluminium- und Sulfat-basiertem Beschleuniger führt durch das reichlich vorhandene Aluminium zu einer sofortigen,

verstärkten Bildung von Ettringit [12, 13, 14]. Entstehender Portlandit reagiert zusammen mit Aluminium und Sulfat des Beschleunigers ebenfalls zu Ettringit [12, 13, 14]. Paglia, C. et al. [14] stellten eine verstärkte frühe Hydratation von C_3S , C_3A und $C_2(A,F)$ durch die Zugabe von Aluminium- und Sulfat-basiertem Beschleuniger fest.

2. Material und Methoden

2.1 Charakterisierung Ausgangsstoffe

Für die Rezepturen wurde ein CEM I 52,5 R (CEM Hoch) verwendet. Um den Klinkergehalt zu reduzieren wurde der Zement schrittweise durch Hüttensand (HUS4500) und ultrafeines Kalksteinmehl (CALEGU) ersetzt. Die Zusammensetzung der Bindemittelkomponenten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Bestandteile des Bindemittels (CEMI 52,5 R CEM Hoch, Hüttensand HUS 4500 und ultrafeines Kalksteinmehl CALEGU). n.b. = nicht bestimmt

	CEM I 52,5 R CEM Hoch	Hüttensand HUS4500	Ultrafeines Kalksteinmehl CALEGU	Nekafill 15
Dichte (g/cm^3)	3.2	2.9	2.7	n.b.
d_{50} (μm)	7.1	8.6	1.2	n.b.
Na ₂ O	0.5	0.4	0.1	-
MgO	4.0	8.7	1.5	2.6
Al ₂ O ₃	5.4	12.0	0.1	0.4
SiO ₂	20.0	39.8	1.1	1.0
P ₂ O ₅	0.1	< 0.1	< 0.1	-
SO ₃	3.0	1.7*	< 0.1	-
*davon S	-	0.7	-	-
K ₂ O	1.0	1.0	< 0.1	-
CaO	61.6	34.9	54.6	51.6
TiO ₂	0.2	0.6	< 0.1	-
MnO	< 0.1	1.4	< 0.1	-
Fe ₂ O ₃	2.8	0.4	0.1	0.1
LOI	1.3	< 0.1	42.6	n.b.
<i>Normative Phasenzusammensetzung</i>				
Kalzit			95.5	91.9
Dolomit			3.9	5.4
Anhydrit	3.8			
Bassanit	1.8			
C ₃ S M3	59.4	0.6		
β -C ₂ S	10.1			
C ₃ A _c	2.5			
C ₃ A _o	9.3			
C ₄ AF	7.9			
Arkanit	1.1			
Periklas	4.1			
Quarz			0.6	
Gehlenit		1.6		

Für die Minishot-Versuche wurde das Kalksteinmehl Nekafill15 als Annäherung an die Feinfraktion der Aggregate eingesetzt. Als Fließmittel, Verzögerer und Beschleuniger wurden marktübliche Produkte verwendet. Der W/B-Wert sowie der Anteil an alkalifreiem Beschleuniger und Verzögerer wurden bei allen Mischungen konstant gehalten, die Menge an PCE-basiertem Fließmittel wurde jeweils angepasst, so dass die Verarbeitbarkeit für die Minishot-Versuche sichergestellt war.

Tabelle 2: Feinmörtel-Zusammensetzung der gespritzten Referenzmischungen und Rezepturen mit reduziertem Klinkeranteil. W/B-Wert ohne Berücksichtigung des Wassers in Fließmittel, Verzögerer und Beschleuniger.

	CEM Hoch (kg/m ³)	HUS 4500 (kg/m ³)	CALEGU (kg/m ³)	Nekafill (kg/m ³)	H ₂ O (kg/m ³)	Fließmittel (kg/m ³)	Verzögerer (kg/m ³)	Beschleuniger (kg/m ³)	W/B
CEM Hoch	1097	-	-	352	516	11	5	66	0.47
CEM Hoch + 5%CALEGU	1039	-	55	352	514	10	5	66	0.47
CEM Hoch + 15%CALEGU	924	-	163	352	511	13	5	65	0.47
CEM Hoch + 50%HUS4500	557	521	-	362	507	5	3	65	0.47
CEM Hoch + 45%HUS4500 + 5%CALEGU	558	470	49	363	506	4	3	65	0.47
CEM Hoch + 35%HUS4500 + 15%CALEGU	560	366	146	365	504	5	3	64	0.47

2.2 Methoden und Vorgehen

Die Minishot-Spritzversuche erfolgten im Nassspritzverfahren im Labormaßstab (Bild 1). Nach dem Spritzvorgang wurde die Entwicklung des Schermoduls über 24 Stunden aufgezeichnet. Der zeitliche Verlauf der Hydratationsreaktionen an den gespritzten Proben wurde mittels Kalorimetrie-, Röntgendiffraktometrie (RDA)- und Thermogravimetrie-Messungen untersucht.

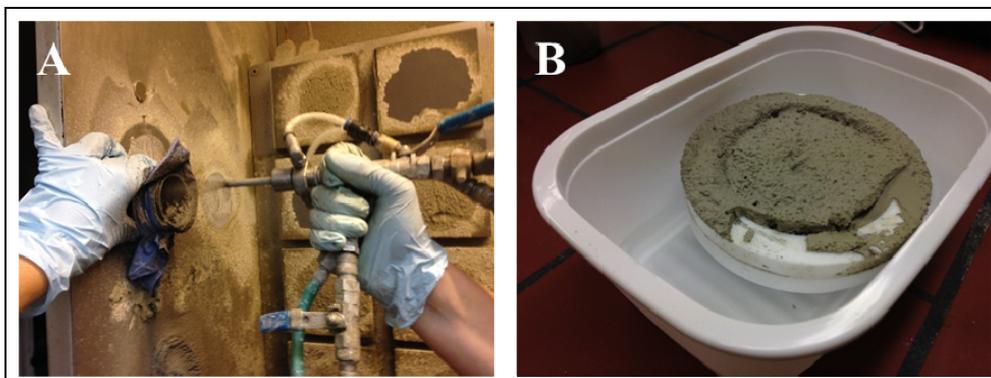


Bild 1: A) Auftragen des Spritzbetons im Nassspritzverfahren für die anschließende Kalorimetriemessung. Dargestellt ist der Versuchsaufbau der Minishot-Anlage der SIKA Technology AG, Zürich. B) Gespritzte Probe in Feuchtlagerung. Zur Untersuchung der Hydratationsentwicklung wurde die Hydratation jeweils nach 0, 3, 6 und 24 Stunden abgestoppt. (Bild: Stauffacher, A., 2017)

Die kontinuierliche Messung der Kalorimetrie startete ca. 3 Minuten nach dem Spritzvorgang und erfolgte über einen Zeitraum von 24 Stunden bei $23 \pm 1^\circ\text{C}$ mit Hilfe des isothermischen Kalorimeters ical8000 von Calmetrix. Eine gespritzte Probe wurde ab einer Stunde nach dem Spritzvorgang in Feuchtlagerung aufbewahrt (Bild 1). Nach 0, 3, 6 und 24 Stunden wurden jeweils 5 g dieser Probe mit gekühltem Isopropanol behandelt, um die Hydratation vollständig abzustoppen; anschließend wurde das Probenmaterial zentrifugiert, in einem Achatmörser aufgemahlen und die Probe bei 35% relativer Luftfeuchtigkeit unter Stickstoff-

atmosphäre getrocknet. Die Thermogravimetrie-Analyse erfolgte an einem NETZSCH TG209 F1 Libra im Temperaturbereich von 25 bis 1000 °C bei einer Aufheizrate von 20 °C/min und unter 10 ml/min N₂-Fluss. Die RDA-Messungen wurden an einem PANanalytical Diffraktometer (Co-K α) von 7° - 80° mit einer Schrittweite von 0.017 und 100 Sek/Schritt durchgeführt. Die Auswertung der Röntgendiffraktogramme erfolgte mit Hilfe der High-ScorePlus Software.

3. Resultate und Diskussion

3.1 Hydratationskinetik des ungespritzten Feinmörtels

Zur Herstellung der ungespritzten Feinmörtelproben wurden die Mischungen gemäß Tabelle 2 mit Wasser im Hobart-Mischer gemischt, ohne Zugabe von Fließmittel, Verzögerer und Beschleuniger. Eine unterschiedliche Hydratationskinetik in Abhängigkeit der Mischungszusammensetzung ist bereits bei der Mischung im Hobart-Mischer mit Wasser – noch ohne Zugabe von Fließmittel, Verzögerer oder Beschleuniger – eindeutig ersichtlich. Die Kalorimetriedaten zeigen 2 bis 3 typische Hydratationsmaxima (Bild 2), welche gemäß Jansen [10] den folgenden, exothermen Reaktionen zugeordnet werden konnten: (i) Hydratation von Aluminat und Bildung von Ettringit (ii) Silikathydratation und (iii) Reaktion von Ettringit zu Monosulfat und weitere Hydratation der Aluminatphasen. Ersichtlich ist die Verfrühung und Beschleunigung des zweiten exothermen Maximums bzw. der Silikatreaktion durch die Zugabe von ultrafeinem Kalksteinmehl CALEGU. Je höher der Anteil an ultrafeinem Kalksteinmehl CALEGU, desto stärker ausgeprägt ist zudem das 2. exotherme Maximum.

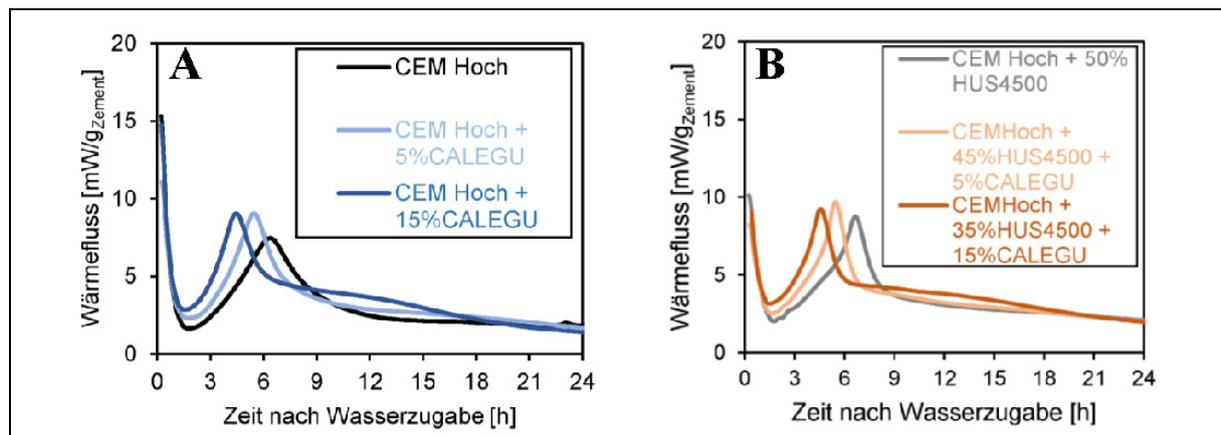


Bild 2: Gemessener exothermer Wärmefluss der Hydratation von ungespritzten Feinmörtelproben während den ersten 24 Stunden nach Wasserzugabe für A) Mischungen mit reinem CEM Hoch und variierendem CALEGU Gehalt (0%, 5%, 15%); B) Mischungen mit CEM Hoch und 50% Hüttensand HUS4500 und schrittweise substituiertem Hüttensand durch CALEGU (5%, 15%). Kleine Unregelmäßigkeiten der Wärmeflusskurven sind auf Messartefakte wie z.B. Öffnen und Schließen des Kalorimeters zurückzuführen.

3.2 Vergleich der Hydratationskinetik von gespritztem Feinmörtel mit der Schermodulentwicklung während der ersten 24 Stunden

Die Hydratationskinetik der gespritzten Minishot-Proben (Bild 3) unterscheidet sich von der Entwicklung der ungespritzten Proben ohne Fließmittel, Verzögerer und Beschleuniger (Bild 2). So zeigen alle gespritzten Proben einen verfrühenden Einfluss durch die Zugabe von CALEGU, das 3. exotherme Maximum ist generell stärker ausgeprägt. Die Rezepturen mit Hüttensand zeigen nach dem Spritzvorgang ein stark ausgeprägtes 1. exothermes Maximum

und eine verstärkte Abnahme der Intensität des 2. exothermen Maximums je höher der CALEGU Gehalt der Mischung. Die Silikatreaktionen findet vor allem bei den Mischungen mit Hüttensand bei den gespritzten Proben bis zu ca. 2 Stunden früher statt als ungespritzt und ohne Zugabe von Fließmittel, Verzögerer und Beschleuniger. Durch den Spritzvorgang und die Beschleunigung des Systems geht hier die verzögernde Wirkung von Fließmittel und/oder Verzögerer klar verloren (was leider nicht generell der Fall sein muss). Die Verfrühung der Silikatreaktion in Abhängigkeit der Rezepturzusammensetzung ist vor allem bei der Mischung CEM Hoch + 50% HUS4500 + 15% CALEGU stark ausgeprägt; die Ruhephase nach der Aluminatreaktion entfällt komplett und die Intensität des 2. exothermen Maximums ist sehr niedrig.

Im Zeitabschnitt des 2. exothermen Maximums gemäß Kalorimetriedaten lassen sich Unterschiede in der Entwicklung des Schermoduls der ungespritzten Proben beobachten. Die Mischungen CEM Hoch und CEM Hoch + 5%CALEGU zeigen einen stärkeren Anstieg in der Entwicklung des Schermoduls zwischen 4 und 8 Stunden; bei einem zunehmend höheren Gehalt an CALEGU setzt der Anstieg zeitlich früher ein. Dieser Befund korreliert mit dem zeitlich versetzt einsetzenden, aber immer deutlich ausgeprägten 2. exothermen Maximum der Kalorimetriedaten, welcher maßgeblich vom CALEGU-Gehalt kontrolliert wird. Die Mischungen mit hoher Zementsubstitution zeigen im Zeitfenster des 2. exothermen Maximums (Silikathydratation) einen langsameren Anstieg im aufgezeichneten Schermodul. In Bezug auf die Frühfestigkeitsentwicklung der gespritzten Feinmörtelproben (in den ersten 6 Stunden) scheinen eine früh einsetzende und generell starke Silikathydratation einen positiven Einfluss zu haben. Mischungen mit früh einsetzender Silikatreaktion und stark ansteigendem Schermodul in den ersten Stunden weisen jedoch eine schwächere weitere Festigkeits- bzw. Schermodulentwicklung bis 24 Stunden auf.

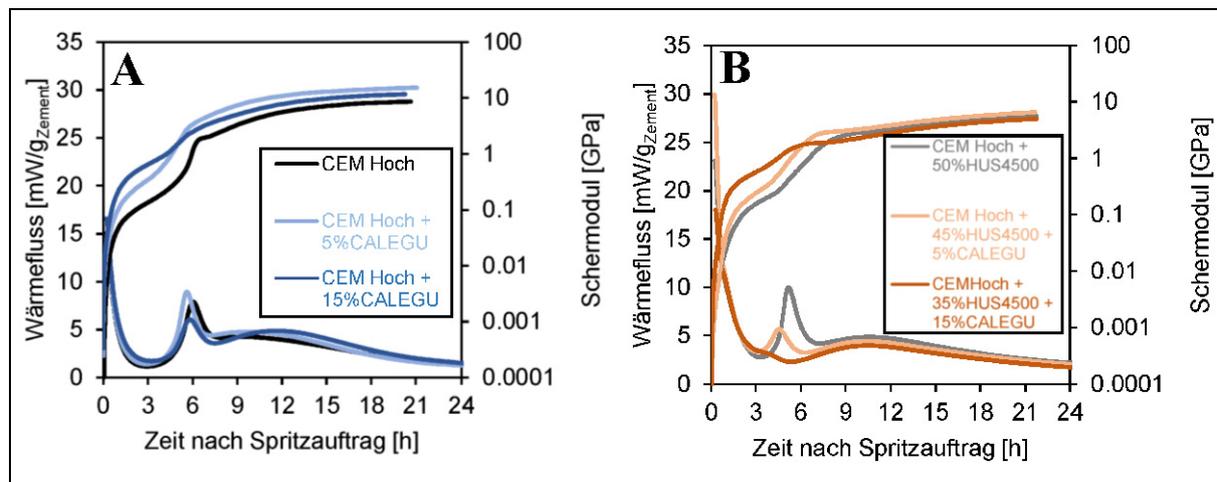


Bild 3: Gemessener exothermer Wärmefluss der Hydratation (untere Linien) und Schermodul (obere Linien) von gespritzten Leimmörtelproben während den ersten 24 Stunden nach dem Nassspritzvorgang für A) Mischungen mit reinem CEM Hoch und variierendem CALEGU Gehalt (0%, 5%, 15%); B) Mischungen mit CEM Hoch und 50% Hüttensand HUS4500 und schrittweise substituiertem Hüttensand durch CALEGU (5%, 15%).

3.3 Hydratationsreaktionen des gespritzten Feinmörtels während der ersten 24 Stunden

Die RDA-Untersuchung der „abgestopften“ Proben ermöglicht eine Korrelation des 1. Hydratationsmaximums der gespritzten Proben (Bild 3) mit der Bildung von 5-10 Massenprozent Ettringit, welche durch die Zugabe des Beschleunigers begünstigt ist, der Hydratation von Anhydrit und der progressiven Hydratation von Aluminatphasen (Bild 4). Das 2. exotherme Maximum der Mischungen mit HUS4500 verläuft langsamer und später als mit

reinem CEM Hoch. Durch die Substitution von CEM Hoch und/oder HUS4500 mit CALEGU setzt das 2. Maximum verfrüht ein. Das 2. Hydratationsmaximum ist hauptsächlich auf die Hydratation von Silikatmineralphasen, wie Alit und Belit, zurückzuführen, wodurch sich (im weiteren Verlauf der Hydratationsreaktion) Portlandit und AFm Phasen bilden (Bild 4). Das 3. Hydratationsmaximum entspricht der voranschreitenden Bildung von Portlandit und AFm Phasen, der Reaktion von Ettringit zu AFm Phasen und der weiteren Hydratation der Aluminatphasen (Bild 4). Nach 24 Stunden sind die Aluminatphasen bei allen untersuchten Rezepturen vollständig hydratisiert, Portlanditgehalte variieren gemäss Thermogravimetriedaten zwischen 1-2 Massenprozent. Auffällig ist, dass sich nach 24 Stunden Monokarbonat und/oder Hydrotalkit gebildet hat. Nach 6 Stunden Hydratationszeit sind diese Phasen noch nicht vorhanden. Dies spricht für eine progressive Umwandlung von Ettringit nicht nur zu AFm, sondern auch zu Hydrotalkit und/oder Monokarbonat. Die Umwandlung von Ettringit zu AFm und verwandten karbonathaltigen Phasen zwischen 6 – 24 Stunden wird von der Karbonatverfügbarkeit gesteuert und nicht nur durch die Verfügbarkeit von Aluminat- bzw. Sulfatphasen. Dies wird von den kalorimetrischen Daten der geprüften Proben unterstützt, da diese v.a. bei den Mischungen ohne Hüttensand ein 3. exothermes Maximum zeigen, welches mit zunehmendem CALEGU-Gehalt ausgeprägter ist. Die Bildung von Hydrotalkit / Monokarbonat belegt somit die Reaktivität des Kalksteinmehls, d.h. von CALEGU und/oder Nekafill.

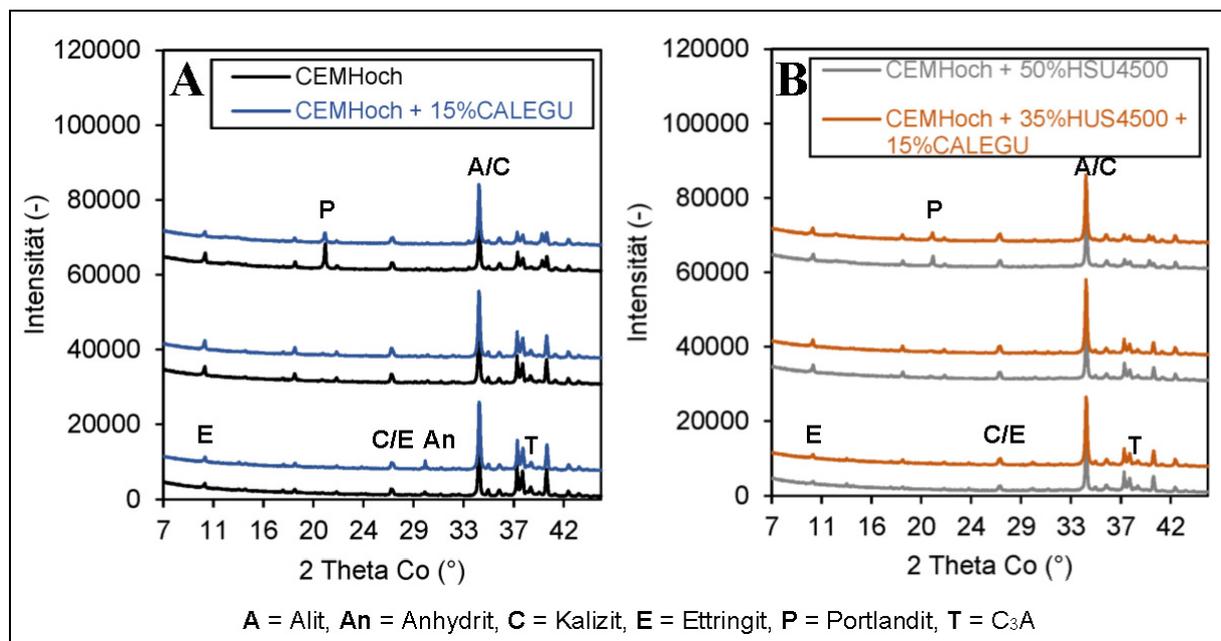


Bild 4: RDA Spektrogramme von 7° – 45° 2Theta Co gemessen an abgestoppten Proben jeweils (von unten nach oben) 0h, 6h und 24h nach dem Spritzvorgang für A) Mischungen mit reinem CEM Hoch und variierendem CALEGU Gehalt (0%, 15%); B) Mischungen mit CEM Hoch und 50% Hüttensand HUS4500 und schrittweise substituiertem Hüttensand durch CALEGU (15%).

4. Zusammenfassung

In vorliegender Studie wurde der Einfluss von Hüttensand und ultrafeinem Kalksteinmehl auf die Hydratationskinetik untersucht. Durch die Kombination von kontinuierlicher exothermer Wärmeflussmessung und RDA Spektrogrammen zu ausgewählten Zeitpunkten konnten Aussagen zu den Hydratationsreaktionen getroffen und mit der Schermodulentwicklung korreliert werden. Hervorzuheben ist die verfrühende Wirkung des ultrafeinen Kalksteinmehls auf die Silikathydratation. Die Reaktivität des Kalksteinmehls ist v.a. im Zeitraum zwischen

6 – 24 Stunden nach dem Spritzvorgang durch die Bildung von Hydrotalkit und/oder Monokarbonat ersichtlich. Es konnte gezeigt werden, dass die Kombination von Daten zur Wärmefluss- und Festigkeitsentwicklung vielversprechende Möglichkeiten bieten, um die komplexen Hydratationsreaktionen und -prozesse qualitativ und quantitativ zu beschreiben.

Für die Baupraxis wäre eine höhere Reaktivität des Spritzbetons nach 3 bis 9 Stunden wünschenswert, ist es in dem Zeitbereich doch oft eine Herausforderung die Frühfestigkeitsanforderung J2 einzuhalten. Die hier vorgestellten Untersuchungen beziehen sie derzeit noch auf ausgewählte Produkte. Darüber hinaus muss die Auswirkung von erhöhten Kalksteingehalten unter chemisch angriffigen Umweltbedingungen auf die Dauerhaftigkeit abgeklärt werden.

5. Danksagung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des öbv-Forschungsprojektes ASSpC (Entwicklung neuer dauerhafter und nachhaltiger Spritzbetone) von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG 856080) und industriellen Partnern gefördert. Wir möchten uns dafür und für die Unterstützung bei speziellen Untersuchungen bei SIKA Technology AG bedanken.

6. Literatur

- [1] Fennis-Huijben, S.: Design of ecological concrete by particle packing optimization, Dissertation, TU Delft, 2010.
- [2] Lothenbach B, Scrivener K, Hooton RD.: Supplementary cementitious materials. *Cement Concrete Research*, 41 (2011), 12, 1244-1256.
- [3] Lindlar, B., Oblak, L., Lootens, D., Stenger, C.: From Tunnel to Laboratory: Scaling of Shotcrete Testing, 7th International Symposium on Sprayed Concrete, pp. 282-286. Sandefjord, Norway, 2014.
- [4] De Schutter, G., Taerwe, L.: General hydration model for Portland cement and blast furnace slag cement. *Cement and Concrete Research*, 25 (1995), 3, 593-604.
- [5] Gruyaert, E., Robeyst, N., De Belle, N.: Study of the hydration of Portland cement blended with blast-furnace slag by calorimetry and thermogravimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 102 (2010), 3, 941-951.
- [6] Kumar, A., Oey, T., Falzone, G., Huang, J., Bauchy, M., Balonis, M., Neithalath, N., Bullard, J., Sant, G.: The filler effect: The influence of filler content and type on the hydration rate of tricalcium silicate. *Journal of the American Ceramic Society*, 2017, 1-13.
- [7] Berodier, S., Scrivener, K.: Understanding the Filler Effect on the Nucleation and Growth of C-S-H. *Journal of the American Ceramic Society*, 2014, 12-97.
- [8] Matschei, T., Lothenbach, B., Glasser, F.P.: The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 37 (2007), 551-558.
- [9] Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E., Scrivener, K.: Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 38 (2008), 848-860.
- [10] Jansen, D., Goetz-Neunhoeffler, F., Lothenbach, B., Neubauer, J.: The early hydration of Ordinary Portland Cement (OPC): An approach comparing measured heat flow with calculated heat flow from QXRD. *Cement and Concrete Research*, 42 (2012), 134-138.
- [11] Salvador, R.P., Cavaclaro, S.H.P., Cano, M., Figueiredo, A.D.: Influence of spraying on the early hydration of accelerated cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 88 (2016), 7-19.
- [12] Maltese, C., Pistolesi, C., Bravo, A., Cella, F., Cerulli, T., Salvioni, D.: A case history: effect of moisture on the setting behaviour of a Portland cement reacting with an alkali-free accelerator. *Cement Concrete Research*, 37 (2007), 856–865.

- [13] Xu, Q., Stark, J.:
Quantification of cement hydration when using an alkali-free setting accelerator. *Zement-Kalk-Gips*, 58 (2005), 68-79.
- [14] Paglia, C., Wombacher, F., Böhni, H.K.:
The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems. I. Characterization of setting behaviour. *Cement Concrete Research*, 31 (2001), 913-918.

Zu den Autoren

Anina Stauffacher MSc

Studium der Erdwissenschaften an der ETH Zürich, 2012 – 2013 Explorationsgeologin in Mali, 2013 - 2016 Projektleiterin Bauschadstoffe bei CSD Ingenieure AG, Februar – August 2017 Universitätsassistentin an der TU Graz
sanina@alumni.ethz.ch

Dr. Isabel Galan*

Studium der Physik und Materialwissenschaften an der Universität Autonoma Madrid, Doktorat im Bereich Beton Dauerhaftigkeit an der Universität Complutense Madrid/CSIC. PostDoc an der Universität Aberdeen 2012-2016, seit Januar 2017 als PostDoc am Institut für Angewandte Geowissenschaften an der TU Graz
igalangarcia@tugraz.at

Dr. sc. nat. Patrick Juillard

Studium der Materialwissenschaften an der ETH Lausanne, Doktorat im Bereich der Zementhydratation an der ETH Lausanne, seit 2010 Sika Technology AG, Research Scientist.
juillard.patrick@ch.sika.com

M. Eng. Maria Thumann

Studium des Bauingenieurwesens an der OTH Regensburg, seit 2013 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Ostbayerischen Technischen Hochschule in Regensburg
maria1.thumann@oth-regensburg.de

Dipl. phil. nat. Christian Stenger

Studium der Chemie an der Universität Bern, Forschung am Department für Radio- und Umweltchemie der Universität Bern und am PSI Villigen, seit 2005 Sika Technology AG
stenger.christian@ch.sika.com

Dr. rer. nat. Andre Baldermann

Studium der Geowissenschaften in Deutschland, 2012- 2015 Doktorat und anschließend Post-Doktorat am Institut für Angewandte Geowissenschaften an der TU Graz
baldermann@tugraz.at

Dr. rer. nat. Florian Mittermayr

Studium der Geowissenschaften an der Universität Innsbruck und TU Graz, Doktorat an der TU Graz, aktuell als PostDoc am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz
f.mittermayr@tugraz.at

Dr. sc. nat. Benedikt Lindlar

Studium der Chemie und der Germanistik an der Universität Konstanz, Dissertation an der ETH Zürich, Forschung am Lehrstuhl der Universität Konstanz, seit 2002 Sika Technology AG
lindlar.benedikt@ch.sika.com

Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Kusterle

Studium an der Universität Innsbruck, Mitarbeit im Ingenieurbüro, Dozent an der Universität Innsbruck. Beratungstätigkeit für Spritzbeton, Baustoffe im Tunnelbau, Betoninstandsetzung, Faserbetone, Brandschutz im Tunnelbau und Betontechnologie, seit 2001 Prof. an der OTH- Regensburg
wolfgang.kusterle@oth-regensburg.de

* Ansprechperson