
VERSINTERUNGSPOTENTIAL VON SPRITZBETON - LABORUNTERSUCHUNGEN UND KLEINSPRITZVERSUCHE ZUR REDUZIERUNG DER CALCIUMFREISETZUNG

POTENTIAL FOR PRECIPITATIONS - LAB TESTS AND SPRAYED MORTAR TESTS FOR THE REDUCTION OF CALCIUM LEACHING

Maria **Thumann**, OTH Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Deutschland

Michael **Hartmaier**, Rohrdorfer Zement, Deutschland

Andreas **Saxer**, Universität Innsbruck, Österreich

Wolfgang **Kusterle**, OTH Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Deutschland

Die Calciumfreisetzung aus von Bergwasser umspülten Spritzbeton kann unter Umständen das Versintern des sekundären Tunnelentwässerungssystems verstärken. Versinterungen in den Drainagerohren führen aber zu aufwendigen Unterhaltsarbeiten. Die ÖBV-Richtlinie „Spritzbeton“ sieht bei Bedarf die Festlegung einer besonderen Eigenschaft RV (Reduziertes Versinterungspotential) vor. Im Forschungsprogramm REDUV, gefördert von der Bayerischen Forschungsförderung, werden Grundlagenuntersuchungen zur Calciumfreisetzung nach dem ÖBV-Merkblatt „Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials“ durchgeführt. Die Ergebnisse von Laboruntersuchungen und Kleinspritzversuchen werden vorgestellt. Daraus ergeben sich Hinweise zur Mischungsoptimierung und zielsicheren Versuchsdurchführung.

The contact of underground water with shotcrete leads to leaching of calcium hydroxide and can increase the precipitation of calcite in the secondary drainage system of tunnels under certain conditions. Indeed precipitations in the drainage pipes lead to high maintenance costs. The Austrian guideline “Shotcrete” provides a concrete specification called RV (= reduced potential for precipitations) where necessary. The leaching behavior of shotcrete according to the Austrian code of practice “Determination of the Reduced Potential for Precipitations” is studied in baseline investigations within the research project “REDUV”, which is funded by the Bavarian Research Foundation. The results of laboratory and sprayed mortar tests are presented in this paper. These results indicate how the concrete mix design can be improved and the test procedure can be optimized in a successful way.

1. Einleitung

Entwässerungssysteme in nicht druckwasserhaltenden Tunneln haben die Aufgabe anfallendes Bergwasser zu sammeln und abzuleiten. Versinterungen (Kalkablagerungen) in den Drainagen können zu Behinderungen, einem Teil- oder Vollverschluss der Leitungen führen und damit deren Funktion einschränken (Bild 1).

Die Folge ist ein Anstieg des Bergwasserdrucks hinter der Innenschale und/oder Wassereintritt in den Tunnel. Zur Vermeidung von Schäden am Bauwerk sind kostenintensive Reinigungsmaßnahmen notwendig, die meist mit Verkehrsbehinderungen einhergehen. Die Gründe für die Entstehung von Versinterungen sind vielfältig. Es spielen zum einen die Zusammensetzung des Bergwassers und die Geologie eine Rolle, zum anderen auch die Gestaltung und Ausführung des Entwässerungssystems und der Kontakt

des Wassers mit zementgebundenen Materialien (z.B. Spritzbeton) aus denen versinterungsrelevante Stoffe ausgelaugt werden können.



Bild 1: Versinterungen in Drainageleitungen [Bild: Testor, BEG]

Bei der Hydratation von Portlandzement entstehen neben den CSH-Phasen auch Calciumhydroxid, das für den Korrosionsschutz der Bewehrung erforderlich ist, aber bei Kontakt mit Bergwasser herausgelöst werden kann und die Versinterungsneigung erhöht. In der ÖBV-Richtlinie „Spritzbeton“ [1] ist die Einhaltung einer besondere Eigenschaft RV (Reduziertes Versinterungspotential) bei Bedarf vorgesehen. Die ÖBV-Richtlinie „Tunnelentwässerung“ [2] weist ebenfalls auf diese Problematik im Zusammenhang mit Versinterungen hin. In der ZTV ING, Teil 5 Tunnelbau [3], wird gefordert auf eine geringe Auslaugbarkeit des Spritzbetons zu achten, jedoch ohne konkrete Festlegungen und Vorgaben eines Prüfverfahrens.

Zu optimistische Beispiele in den ÖBV-Richtlinien „Spritzbeton“ und „Tunnelentwässerung“ führten 2012 zur Herausgabe eines ÖBV Merkblatts „Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials“, in dem nochmals die Anforderungen und Zusammenhänge klar dargestellt wurden. Spritzbeton mit der besonderen Eigenschaft RV wurde bereits in mehreren österreichischen Verkehrstunnels ausgeschrieben, erfolgreich eingesetzt und nachgewiesen. Die Grundlagen für diese Versuche beruhen auf Untersuchungen von Saxer und Pichler [4; 5].

Bereits seit Anfang der 90er Jahre beschäftigen sich Breitenbücher, Springenschmid und Maidl [6–12] mit dem Phänomen der Kalkausfällungen in Tunnel drainagen. Anlass waren vermehrt auftretende Versinterungen in deutschen Tunnels aufgrund erhöhter Dosierungen veralteter Erstarrungsbeschleuniger. Es wurden umfangreiche Untersuchungen mit gegenüber dem hier beschriebenen Verfahren realitätsnäherer Darstellung, aber deshalb auch deutlich aufwendigerer Versuchsdurchführung, gemacht. Es gab zu diesem Zeitpunkt kein genormtes Prüfverfahren, dennoch waren qualitative Vergleiche zwischen den verschiedenen Prüfverfahren möglich. Diese Untersuchungen zeigten, dass sich das Versinterungspotential von Spritzbeton durch Reduzierung des Klinkeranteils im Bindemittel unter Verwendung von puzzolanischen oder latent-hydraulischen Zusatzstoffen, einer möglichst dichten Zementsteinmatrix und Verwendung von alkalifreien Beschleunigern reduzieren lässt.

Die Reduzierung des Versinterungspotentials von Spritzbeton durch innovative Baustoffe unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Anforderungen an den Spritzbeton bezüglich Frühfestigkeit, Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit ist das Ziel eines bayerischen Forschungsprojekts. Nachfolgend werden die grundlegenden Einflüsse auf das Versinterungspotential dargestellt und über Hintergründe zum angewendeten Prüfverfahren sowie erste Ergebnisse aus Labor- und Mörtelspritzversuchen berichtet.

2. Entstehung von Versinterungen

Im Allgemeinen wird die Entstehung von Versinterungen durch die chemisch-physikalische Zusammensetzung des Bergwassers im Bereich des Tunnels und durch den Kontakt des Bergwassers mit zementgebundenen Baustoffen beeinflusst.

In nicht druckwasserhaltenden Tunneln gelangt das Bergwasser über Abschlauchungen, Entwässerungsbohrungen etc. und/oder Risse und Fehlstellen im Spritzbeton zu einer Abdichtungsbahn und wird schließlich in Drainageleitungen abgeführt (Bild 2). Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht des Wassers kann dabei durch den Kontakt mit zementgebundenen Baustoffen und/oder Änderungen der Umgebungsbedingungen (Druck- und Temperaturverhältnisse, Luftzutritt) gestört werden.

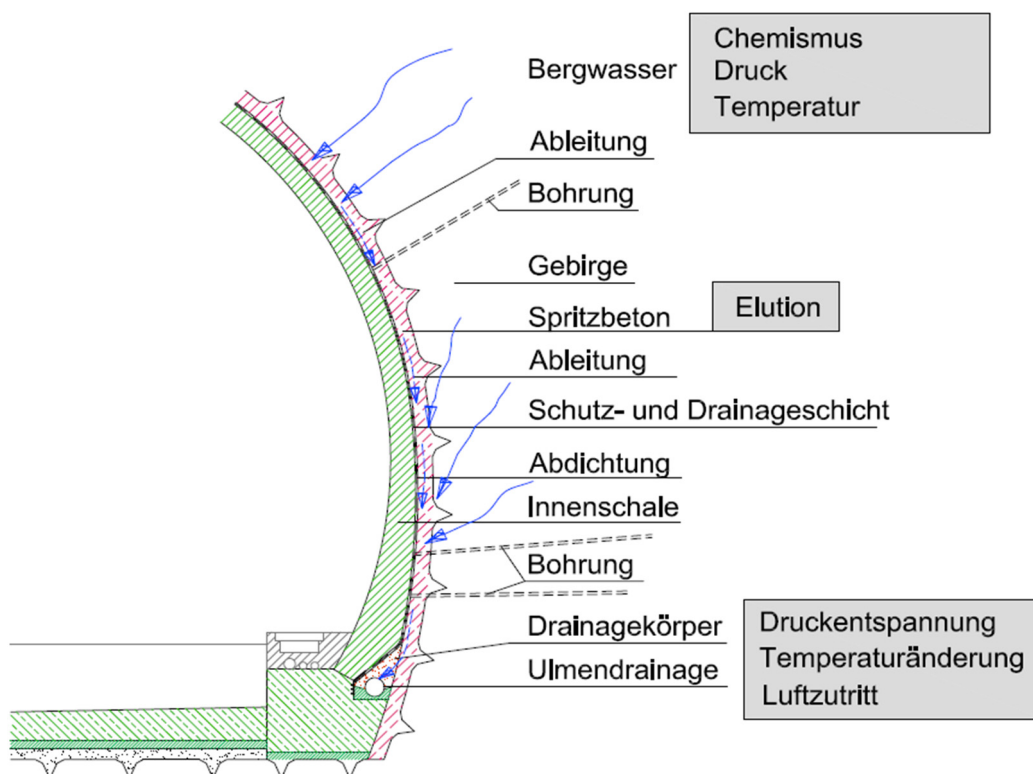
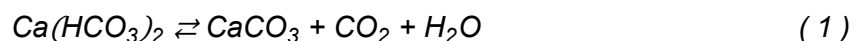
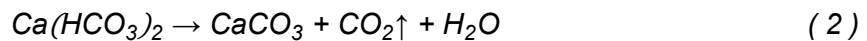


Bild 2: Weg des Bergwassers in die Ulmendrainage [2]

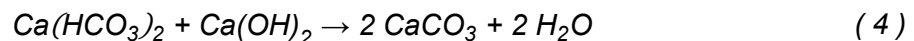
Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht beschreibt vereinfacht den Anteil an gelöstem Calciumhydrogencarbonat unter den gegebenen Umgebungsbedingungen (Formel (1)).



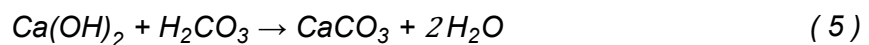
Beim Eintritt von Bergwasser mit entsprechender Carbonathärte in das Entwässerungssystem steht das Wasser im Austausch mit der korrespondierenden Atmosphäre. Die Menge an gelöstem Calciumcarbonat ist eng mit der Menge an gelöstem Kohlendioxid verbunden. Entweicht Kohlendioxid durch den Kontakt mit Luft bzw. ändern sich die Druck- und Temperaturverhältnisse wird auch das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht des Wassers gestört. Das Bergwasser ist dann kalkübersättigt und scheidet folglich Kalk aus (Formel (2)).



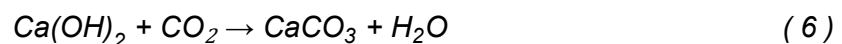
Der Kontakt von Bergwasser mit entsprechender Carbonathärte mit Natriumhydroxid (Formel (3)) oder Calciumhydroxid (Formel (4)) führt zu einem Anstieg des pH-Werts. Durch den hohen pH-Wert kann nur wenig Calciumhydroxid in Lösung gehalten werden. Die Hydroxide werden dann durch Kalkausfällung neutralisiert. Dieser Versinterungsmechanismus tritt zum Beispiel beim Kontakt von Wasser mit zementgebundenen Baustoffen auf, aus denen das leicht lösliche Calciumhydroxid oder auch Alkalien bei Verwendung von alkalihaltigen Beschleunigern herausgelöst werden [12].



Kohlensaures Wasser ist in der Lage aus zementgebundenen Stoffen vermehrt Kalkhydrat auszulösen. Das Wasser wird dadurch kalkübersättigt und kann erst durch die Ausscheidung von Kalk wieder neutralisiert werden. Dieses Wasser kann auch Kalk aus carbonatischem Zuschlag des Betons herauslösen und somit zu Kalkausfällungen führen (Formel (5)).



Gelöstes Kalkhydrat kann durch den Kontakt mit Luft ebenfalls zur Ausfällung von Kalk führen. Verstärkt wird dieser Versinterungsmechanismus durch niedrige Fließgeschwindigkeiten und/oder Wasserverdunstung (Formel (6)).



Die Mischung von unterschiedlichen Wässern kann unter bestimmten Umständen ebenfalls zu Versinterungen führen.

Diese Beispiele für Störungen des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts von Wasser zeigen wie unterschiedlich die Einflussfaktoren sind. Generell kann man festhalten, dass es hinsichtlich der Entstehung von Versinterungen nicht beeinflussbare Faktoren (wie zum Beispiel die Zusammensetzung des Bergwassers, Austausch mit der Atmosphäre) und beeinflussbare Faktoren (wie zum Beispiel den Kontakt des Wassers mit zementgebundenen Baustoffen) gibt. [2]

3. Versuche

3.1 Versuchsziele

Das erste Ziel des Forschungsprojektes ist die Entwicklung von Spritzbetonrezepturen mit reduziertem Versinterungspotential ohne Einschränkungen in der Frühfestigkeitsentwicklung. Es wird in drei Stufen umgesetzt. Zunächst werden Mischungen mit unterschiedlichen Bindemitteln und Zusätzen, W/B-Werten, Gesteinskörnungen etc. in Laborversuchen auf ihr Auslaugverhalten hin untersucht. In Mörtelspritzversuchen werden zusätzlich der Einfluss

des Erstarrungsbeschleunigers und des Spritzverfahrens berücksichtigt. Im letzten Schritt sollen dann erfolgsversprechende Rezepturen in Baustellenspritzversuchen umgesetzt werden.

Ein weiteres Ziel ist es die Ursachen von großen Schwankungen/Streuungen von Baustellenergebnissen zu klären und Vorschläge für eine reproduzierbare Gestaltung des Prüfverfahrens zu unterbreiten. Dazu wurden Baustellenergebnisse analysiert und Parameterstudien bei der Prüfung durchgeführt.

3.2 Mischung

Die Labor- und Mörtelspritzversuche wurden an einer Grundmischung (nachfolgend als Referenzmischung bzw. als „Standard“ bezeichnet) durchgeführt. Vorgabe für die Mischung war im Besonderen, dass sie durch die zur Verfügung stehende Mörtelpumpe gut gefördert werden kann. Die Referenzmischung hat einen Zementgehalt von 450 kg/m^3 , einen Quarzmehlanteil von 150 kg/m^3 , einen W/B-Wert von 0,52 und Quarzsand mit einem Größtkorn von 5 mm. Die Auslaugergebnisse mit solch einer Mischung liefern gute Vergleichswerte und Trends, die aber nicht mit den Zahlenwerten von Untersuchungen an Spritzbetonen übereinstimmen müssen.

3.3 Versuchsdurchführung

Das Auslaugverhalten der Mörtel-/Betonmischungen wird mit dem Verfahren nach dem ÖBV-Merkblatt „Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials von Spritzbeton“ [13] beurteilt.

Der Versuch wird an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Länge von 100 mm durchgeführt. Bei den Laborversuchen werden die Bohrkern aus Würfeln ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$) gezogen, die in Plastiksäcken Vakuum verpackt bis zur Prüfung im Alter von 56 d gelagert werden. Bei den Mörtelspritzversuchen werden nach 21 d zunächst Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Mindestlänge von 140 mm aus Spritzkisten gebohrt, aus denen dann im Alter von 56 d die Bohrkern mit 50 mm Durchmesser gezogen werden. Die Bohrkern sind innerhalb einer Stunde nach dem Bohren nass auf eine Länge von 100 mm zu schneiden und anschließend mit einer weichen Bürste unter fließendem Wasser innerhalb von 30 s von Bohrmehl zu befreien. Das Oberflächenwasser ist mit einem weichen, saugfähigen Tuch abzuwischen und die Abmessungen der Probekörper und das Gewicht sind festzuhalten. Direkt im Anschluss an die Probengewinnung muss der Versuch zur Bestimmung des Reduzierten Versinterungspotentials begonnen werden (max. drei Stunden nach dem Bohren).

Für den Auslaugversuch werden die Probekörper in getrennte Behälter mit entionisiertem Wasser gelegt. Das Massenverhältnis beträgt dabei: $E/F = 4$

- E: Auslaugmittelmenge in g – Eluens (entionisiertes Wasser)
- F: Feststoffmasse des Probekörpers (Spritzbeton) in g

Die Probekörper müssen allseitig mit Eluens bedeckt sein und der verbleibende Luftraum in den geschlossenen Behältern darf nicht größer als 1000 ml sein.

Der Auslaugversuch wird in 3 Zyklen durchgeführt:

1. Zyklus: $24 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ eingelagert
2. Zyklus: $48 \text{ h} \pm 2 \text{ h}$ eingelagert
3. Zyklus: $120 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$ eingelagert

Nach jedem Zyklus sind die Probekörper zu entnehmen und das Eluens abzugießen. Dabei darf ein etwaiger Bodensatz nicht aufgewirbelt werden und die Restwassermenge von 100 ml am Boden des Behälters ist zu entsorgen. Der Behälter ist zu spülen und mit einem Tuch auszuwischen. Direkt im Anschluss ist der Probekörper in frisches entionisiertes Wasser für den nächsten Zyklus einzulagern. Am abgegossenen Eluens sind die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert zu messen. Für die Bestimmung des Calciumgehalts ist die Probe auf einen pH-Wert von 3 – 4 anzusäuern um Karbonatisierungseffekte zu vermeiden. Das Beurteilungskriterium ist der Mittelwert der Summe der Calciumfreisetzung aus den drei Zyklen von zwei Probekörpern und wird als RV bezeichnet und in kg/to angegeben.

Ein weiterer Aspekt, der im Zusammenhang mit der Versinterung von Spritzbeton berücksichtigt werden muss, ist die Porosität. Sie beeinflusst die Auslaugung versinterungsrelevanter Stoffe aus dem Beton. Zur Bestimmung der offenen Porosität wird ein Prüfverfahren in Anlehnung an [14] verwendet. Die bereits für die Auslaugversuche verwendeten Probekörper werden bis zur Massenkonstanz bei 105 °C getrocknet und die Trockenmasse (m_d) bestimmt. Anschließend werden sie in eine Vakuumkammer gestellt deren Druck auf $2,0 \pm 0,7$ kPa gesenkt und für 4 h gehalten wird. Danach wird - unter Beibehaltung des Drucks - entionisiertes Wasser langsam in den Behälter gefüllt bis alle Probekörper vollständig mit Wasser bedeckt sind. Nach 24 h werden die Probekörper unter Wasser (m_h) gewogen und die Masse des gesättigten Probekörpers (m_s) wird bestimmt. Die offene Porosität (ρ_o) errechnet sich nach:

$$\rho_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad [\text{Vol.-%}] \quad (7)$$

Bei den Laborversuchen werden noch die Konsistenz des Frischmörtels mit dem Hägermann-Ausbreittisch und der LP-Gehalt am 1 l LP-Topf bestimmt. Außerdem wird die Druckfestigkeit an Prismen (40 x 40 x 160 mm) nach 1 d bzw. nach 28 d geprüft.

Bei den Mörtelspritzversuchen werden neben dem Auslaugversuch und dem Versuch zur Bestimmung der offenen Porosität die Frühfestigkeitsentwicklung und die Wasserundurchlässigkeit bestimmt. Für die Mörtelspritzversuche wird eine Schneckenpumpe mit einer Förderleistung von 45 l/min, wie sie im Bereich der Betoninstandsetzung üblicherweise eingesetzt wird, verwendet. Die Förderung des Mörtels erfolgt über einen 10 m langen Schlauch mit einer Nennweite von 35 mm bis zur Düse (15 mm) im Dichtstrom, über welcher der Spritzbetonbeschleuniger zusammen mit Druckluft zugegeben wird. Der Luftdruck beträgt etwa 5 bar. Die Dosierung des Beschleunigers erfolgt ebenfalls über eine Schneckenpumpe.

3.4 Hintergrund zu den Auslaugversuchen

Zur Festlegung einer besonderen Eigenschaft RV war es notwendig ein relativ einfaches, aber gut reproduzierbares Prüfverfahren festzulegen. Das Prüfverfahren kann daher nur Vergleichswerte zwischen verschiedenen Mischungen, jedoch keine absoluten Aussagen zur Versinterung in der Drainage liefern. Das Prüfverfahren wurde durch Saxer [15] in Anlehnung an ÖNORM S 2116-4 [16] für Spritzbetonauslaugungen adaptiert. Der Auslaugprozess wird dort einem Wurzel t Gesetz folgend in immer längeren Intervallen geprüft. Der letzte Zyklus beim ÖBV Merkblatt ist etwas länger gewählt, um aussagekräftige Werte zu bestimmen. Der Auslaugprozess von Calcium aus der Zementsteinmatrix ist in der Regel diffusionsgesteuert. Diffusionsgesteuert heißt vereinfacht ausgedrückt, dass durch Unterschiede in der Teilchenkonzentration ein Mischungs- und Ausgleichsprozess angestrebt wird. Die Diffusion kann abhängig von der Konzentration des Porenwassers bzw. der Kontaktlösung aus dem Feststoff heraus in das Eluens oder vom Eluens in den Feststoff hinein stattfinden und läuft beim Beton vorwiegend über die Kapillarporen der Zementsteinmatrix ab. Dabei wird eine

freie Diffusion durch chemische und physikalische Faktoren behindert, wie zum Beispiel die Porenstruktur der Zementsteinmatrix (Tortuosität). Man spricht in diesem Fall vom effektiven Diffusionskoeffizienten, der in Auslaugtests ermittelt werden kann [17]. Dazu trägt man die freigesetzte Stoffmenge bezogen auf die Oberfläche (in diesem Fall den Calciumgehalt in mg/m^2) in einem doppeltlogarithmischen Diagramm über die Zeit auf (Bild 3). Ist die Steigung 0,5 handelt es sich beim maßgebenden Freisetzungsmechanismus um „Diffusion“ [16].

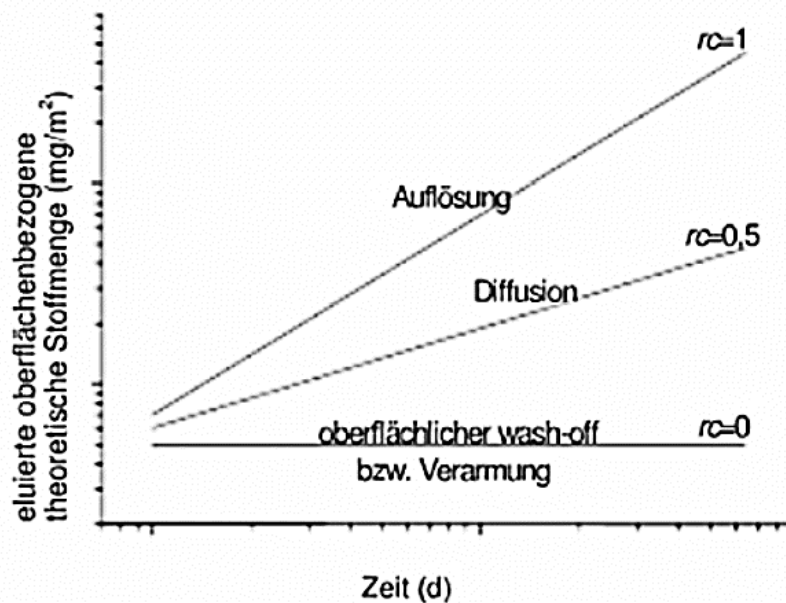


Bild 3: Ermittlung der Freisetzungsmechanismen (schematisch) nach ÖNORM S 2116-4 [16]

Weitere mögliche Freisetzungsmechanismen sind Auflösung, zum Beispiel bei lösendem Angriff des Betons, oder der sogenannte wash-off Effekt, bei dem leicht lösliche Salze an der Oberfläche des Betons beim ersten Kontakt mit dem Eluens abgelöst werden.

4. Versuchsergebnisse

Bei der Versuchsdurchführung mit verschiedenen Mischungen muss immer bewusst sein, dass das Ergebnis vom Portlandzementanteil, einer Zudosierung oder Ersatz durch Zusätze und der Porigkeit in Folge eines unterschiedlichen Wassergehalts abhängig ist. Außerdem muss beachtet werden, dass die Versuche zur Bestimmung des Reduzierten Versinterungspotentials 56 d nach Herstellung durchgeführt werden und somit nur eine Aussage über diesen Prüfzeitpunkt möglich ist.

4.1 Laborversuche zu Verdünnungseffekten und W/B-Wert Variationen

Bei den Versuchsserien Verdünnungseffekte wurde ein Teil des Zements, ausgehend von der Referenzmischung, schrittweise durch ein inertes Material (Quarzmehl) ersetzt.

Der Wassergehalt wurde bei der Versuchsserie „Verdünnungseffekt 1“ unabhängig von den geringeren Zementmengen nicht angepasst (vgl. Bild 4).

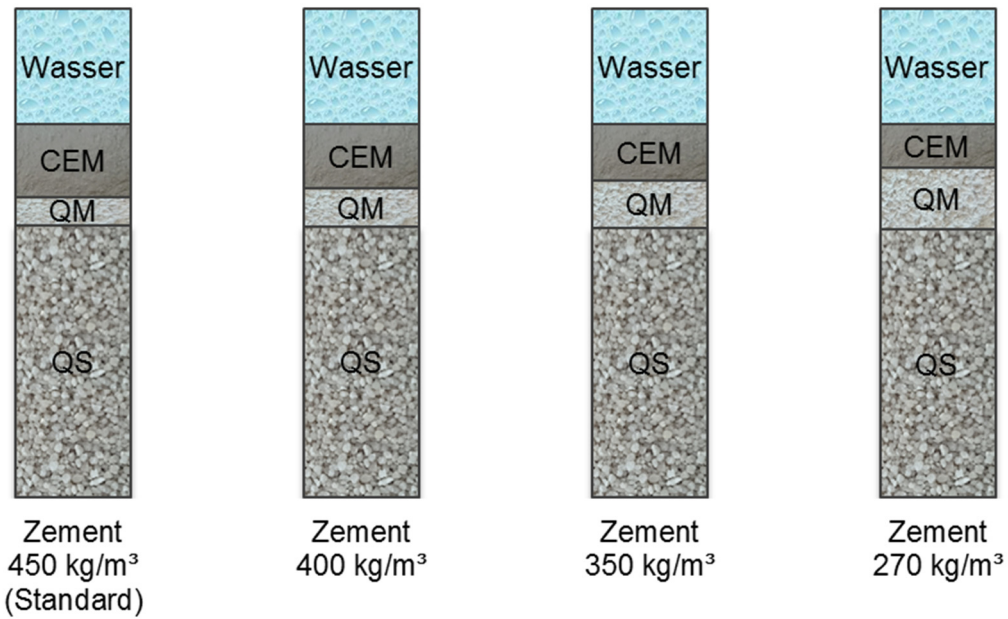


Bild 4 : Schematische Darstellung der Mischungsverhältnisse bei der Versuchsserie „Verdünnungseffekt 1“ im Vergleich zur „Standard“ Mischung

Die Ergebnisse in Bild 5 zeigen, dass die RV-Werte mit einem geringeren Zementgehalt von 400 kg/m³ im Vergleich zur Standardmischung mit 450 kg/m³ niedriger sind. Bei einer weiteren Reduzierung des Zementgehalts steigen die RV-Werte jedoch wieder an.

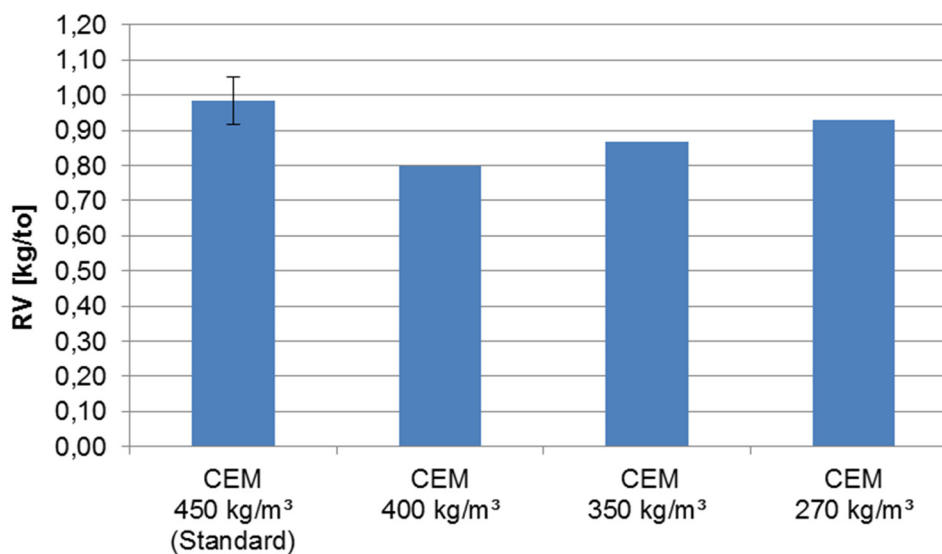


Bild 5: RV-Werte der Versuchsserie „Verdünnungseffekt 1“

Das zeigt zum einen, dass der Anteil an Klinker, und damit der Anteil an leicht löslichem Calciumhydroxid (Ca(OH)₂), direkten Einfluss auf die Calciumfreisetzung hat. Zum anderen kann dieser Effekt durch den Einfluss der Porigkeit überlagert werden. Bei den Mischungen mit geringeren Zementgehalten wurde der Wassergehalt im Vergleich zur Standardmischung nicht reduziert, weshalb das Verhältnis Wasser zu Zement höher ist. Eine erhöhte Porosität konnte anhand der Ergebnisse zur Bestimmung der offenen Porosität bestätigt werden

(Bild 6). Die Auslaugung des leicht löslichen Calciumhydroxids wird durch die erhöhte Porosität aufgrund des größeren W/B-Werts begünstigt.

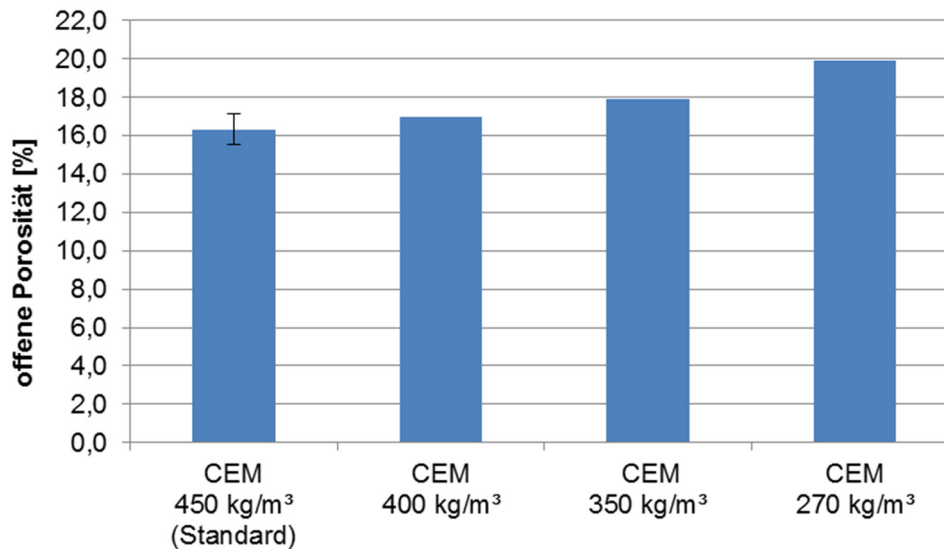


Bild 6: Werte der offenen Porosität bei der Versuchsserie „Verdünnungseffekt 1“

Im Gegensatz dazu wurde bei der Versuchsserie „Verdünnungseffekt 2“ der Wassergehalt entsprechend der geringeren Zementmenge so angepasst, dass das Verhältnis Wasser zu Zement weiterhin 0,52 wie bei der Referenzmischung betrug (Bild 7).

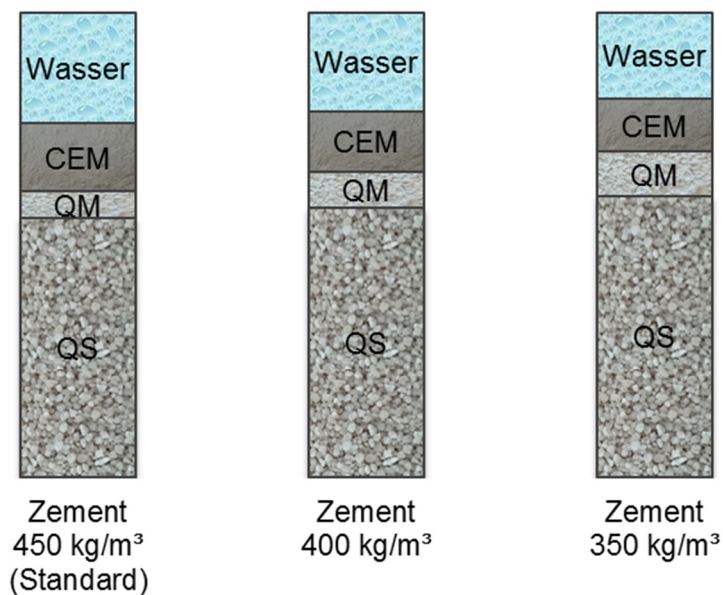


Bild 7: Schematische Darstellung der Mischungsverhältnisse bei der Versuchsserie „Verdünnungseffekt 2“ im Vergleich zur „Standard“ Mischung

Die Ergebnisse bestätigen oben genannte Effekte. Die RV-Werte sind umso geringer je niedriger der Klinkeranteil ist (Bild 8). Hier hat der W/B-Wert keinen Einfluss auf die Auslaugrate, da er nicht verändert wurde – der Wassergehalt wurde entsprechend dem Zementgehalt verringert.

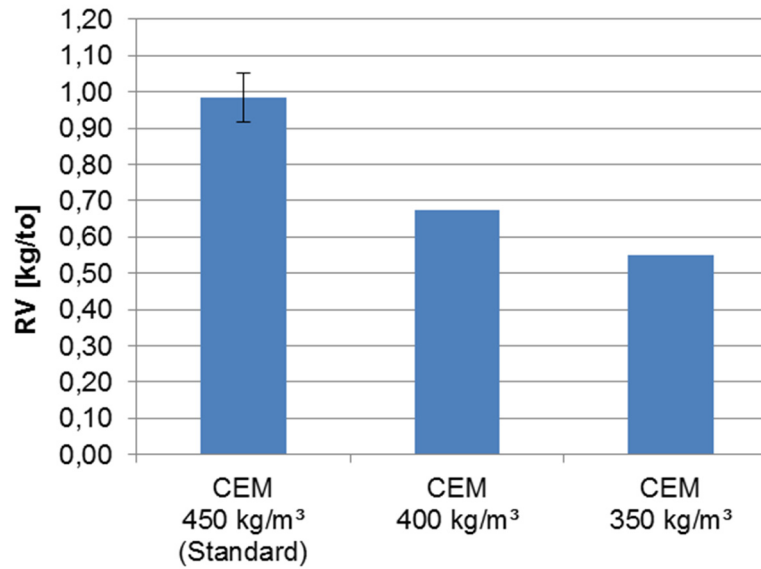


Bild 8: RV-Werte der Versuchsserie „Verdünnungseffekt 2“

Der Einfluss des W/B-Wertes wurde in einer weiteren Versuchsserie im Einzelnen nochmals untersucht. In Bild 9 sind die RV-Werte von Mischungen mit W/B-Werten im Bereich von 0,40 bis 0,55 dargestellt.

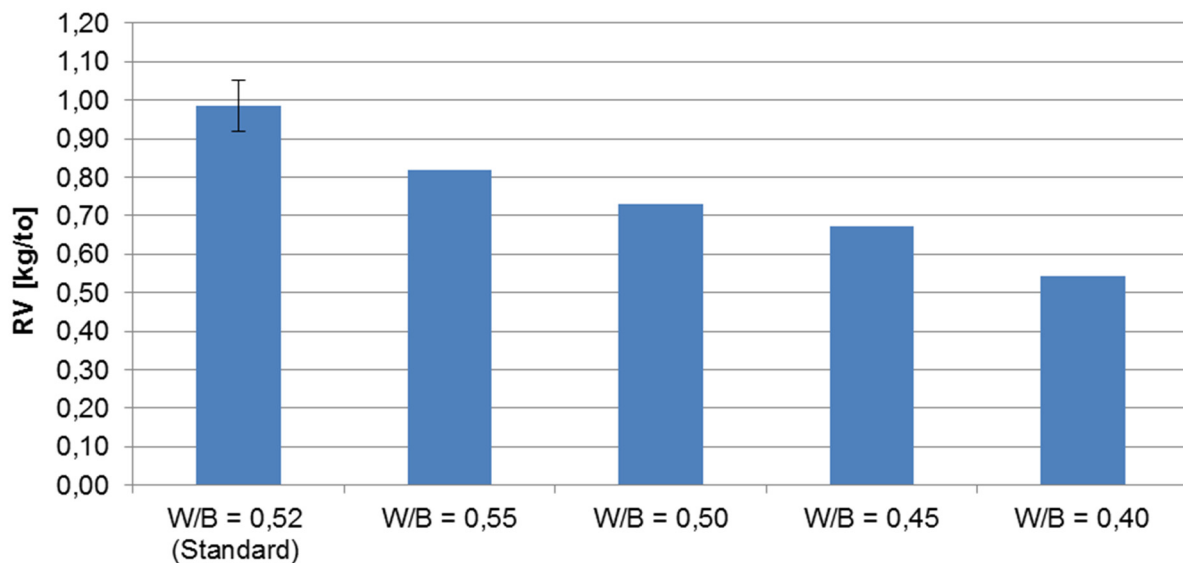


Bild 9: RV-Werte der Versuchsserie „W/B-Variation“

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit geringerem W/B-Wert die Calciumfreisetzung abnimmt, bis auf die Ausnahme bei einem W/B-Wert von 0,55. Je niedriger der W/B-Wert einer Mischung ist, umso weniger Kapillarporen sind in der Zementsteinmatrix vorhanden. Da die Auslaugung vorwiegend über die Kapillarporen stattfindet, wird sie dadurch direkt beeinflusst.

4.2 Laborversuche zum Einsatz von Zusatzstoffen

Die Versuchsserie „Substitution Zement“ umfasst einen Großteil der Laborversuche. Ein Teil des Zements wird durch Zusatzstoffe ersetzt (mittlerer Balken Bild 10). Neben den in den Richtlinien [1; 2] empfohlenen puzzolanischen oder latent-hydraulischen Stoffen wurden auch nicht genormte Produkte untersucht.

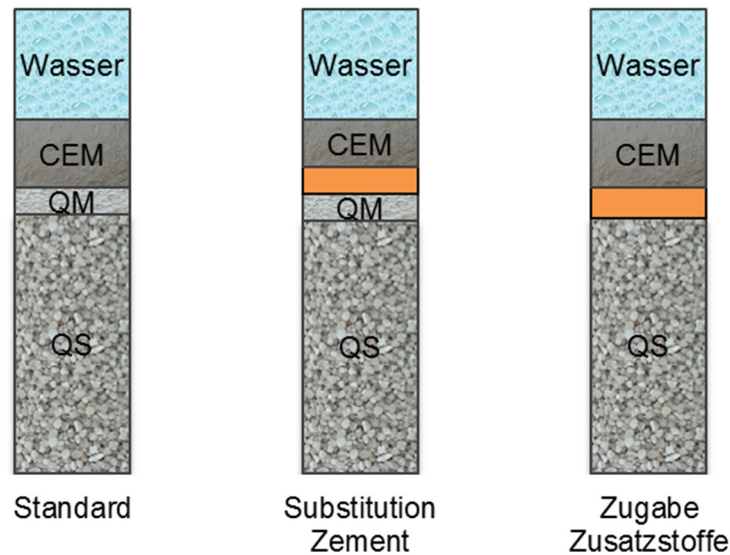


Bild 10: Schematische Darstellung der Mischungsverhältnisse bei den Versuchsserien „Substitution Zement“ und „Zugabe Zusatzstoffe“ im Vergleich zur „Standard“ Mischung

In Bild 11 sind die Ergebnisse mit einer Substitution von 30 % Flugasche, 30 % Hüttensand, 30 % AHWZ und 15 % des Produkts „XY“ dargestellt. Die RV-Werte mit Hüttensand, Flugasche und AHWZ liegen im Bereich von 0,62 – 0,65 kg/to und sind damit deutlich geringer als der Mittelwert der Standardmischung mit 0,99. Mit einem der besten Produkte konnte bei einer Zugabe von nur 15 % eine Reduzierung der Calciumfreisetzung um ca. 55 % zum Mittelwert der Standardmischung erzielt werden.

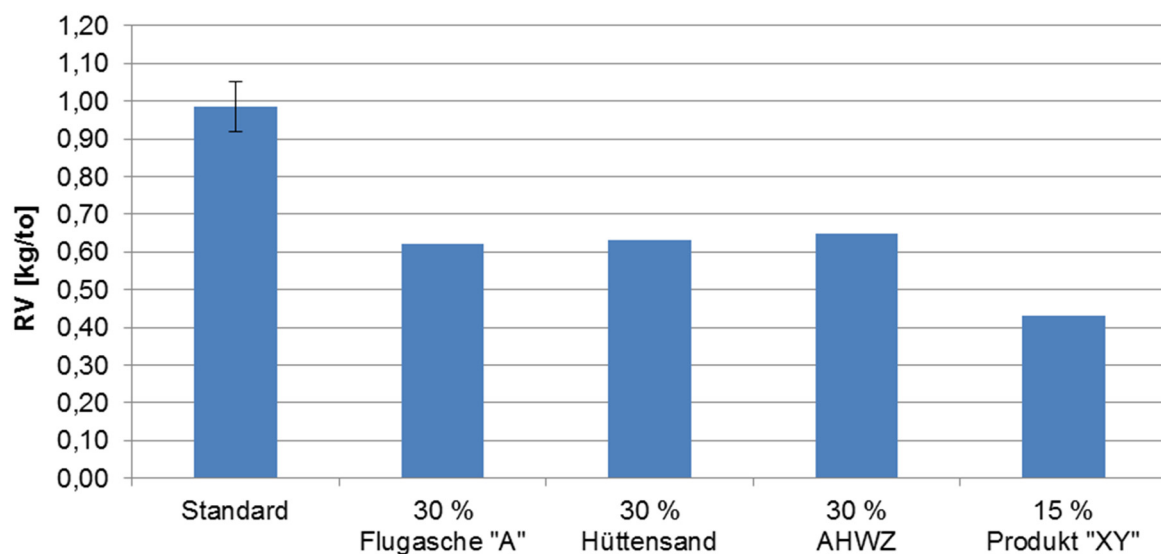


Bild 11: RV-Werte der Versuchsserie „Substitution Zement“ (30 % Flugasche „A“, 30 % Hüttensand, 30 % AHWZ, 15 % Produkt „XY“)

Bei den Ergebnissen dieser Serie ist zu beachten, dass eine geringere Calciumfreisetzung immer auch auf den reduzierten Klinkeranteil zurück zu führen ist, wodurch der Anteil an leicht löslichem Calciumhydroxid reduziert wird. Es können aber auch chemische Effekte einen Einfluss haben.

Puzzolanische Stoffe reagieren mit dem Calciumhydroxid, das während der Hydratation gebildet wird, zu festigkeitsbildenden Bestandteilen. Der Anteil an leicht löslichem Calciumhydroxid wird also sowohl durch den Verdünnungseffekt als auch durch chemische Effekte verringert. Je nach Aktivität des Puzzolans können diese Effekte mehr oder weniger intensiv ausfallen.

Die Frage ob die Reduzierung der Calciumauslaugung bei Flugasche, Hüttensand und AHWZ nicht nur auf Verdünnungseffekte zurückzuführen ist, wurde mit einer weiteren Versuchsserie untersucht. Dazu wurde der Zement nicht durch den Anteil an Zusatzstoffen substituiert, sondern anstelle von Quarzmehl der Mischung hinzugegeben (rechtes Bild „Zugabe Zusatzstoffe“ Bild 10). Das heißt der Anteil an Zement blieb unverändert im Vergleich zur Standardmischung.

Die RV-Werte sind bei der Zugabe von Flugasche, Hüttensand und AHWZ geringer als bei der Standardmischung, jedoch etwas höher als bei der Serie „Substitution Zement“ (Bild 12). Hier scheint die Reduzierung der Calciumauslaugung zum einen auf chemische Effekte zurückzuführen zu sein. Zum anderen muss man in die Betrachtung mit einbeziehen, dass der Wassergehalt nicht verändert wurde und ein inertes Material (Quarzmehl) durch puzzolanische oder latent-hydraulische Stoffe ersetzt wurde.

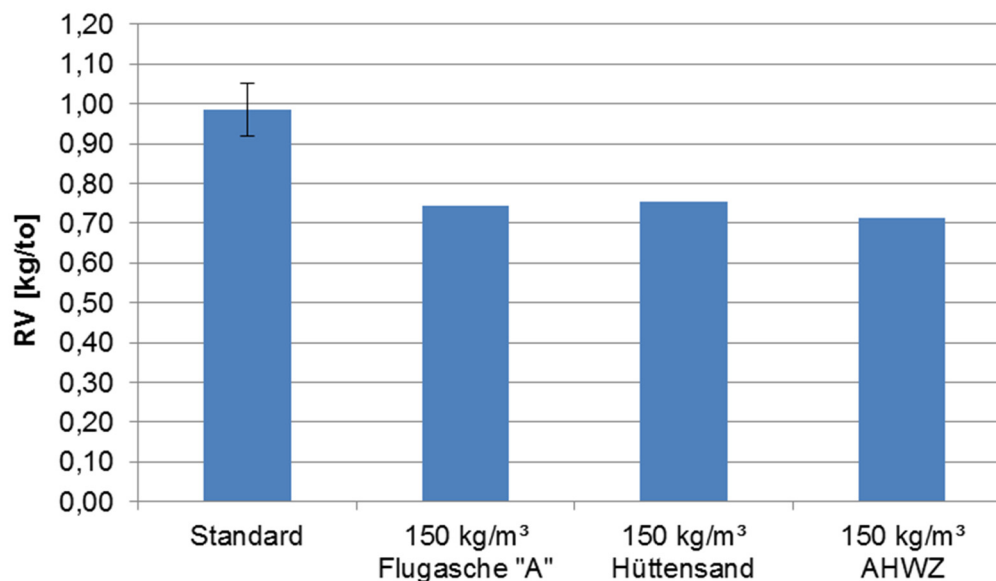


Bild 12: RV-Werte der Versuchsserie „Zugabe von Zusatzstoffen“ (150 kg/m³ Flugasche „A“, 150 kg/m³ Hüttensand, 150 kg/m³ AHWZ)

4.3 Laborversuche zur Versuchsdurchführung

Ein weiteres Ziel des Forschungsprojekts ist es, wie oben bereits erwähnt, genauere Informationen über die Einflüsse auf das Prüfverfahren zu erkennen. Dazu wurden Parameterstudien durchgeführt, die die Ergebnisse der Laborversuche beeinflussen können,

wie zum Beispiel Temperatur, Bewegung des Eluens, die Leitfähigkeit des Eluens und die Art der Behälter.

Für die Untersuchungen wurden labortypische Schwankungsbreiten gewählt. Die meisten dieser Parameter erwiesen sich als unkritisch, dennoch scheint es sinnvoll, im Merkblatt genauere Angaben zu machen. Es werden derzeit noch weitere Untersuchungen zu den Einflussfaktoren bei der Versuchsdurchführung durchgeführt. Dazu zählen der Einfluss des Luftraums im Behälter und zusätzliche Auslaugzyklen, die dem Wurzel t Gesetz entsprechen.

4.4 Mörtelspritzversuche

Parallel zu den Laborversuchen wurden ausgewählte Mischungen in Mörtelspritzversuchen untersucht um in ersten Ansätzen die Einflüsse des Spritzverfahrens und des Beschleunigers auf die Calciumauslaugung berücksichtigen zu können. Die ersten Versuche wurden mit unterschiedlichen Spritzeinstellungen, Beschleunigerdosierungen sowie mit Beschleunigern verschiedener Hersteller mit der Standardrezeptur durchgeführt.

Im Vergleich zu den Labormischungen sind die Abweichungen der RV-Werte bei den Mörtelspritzversuchen gering, als Beispiel sind in Bild 13 die Ergebnisse mit unterschiedlichen Beschleunigergehalten dargestellt.

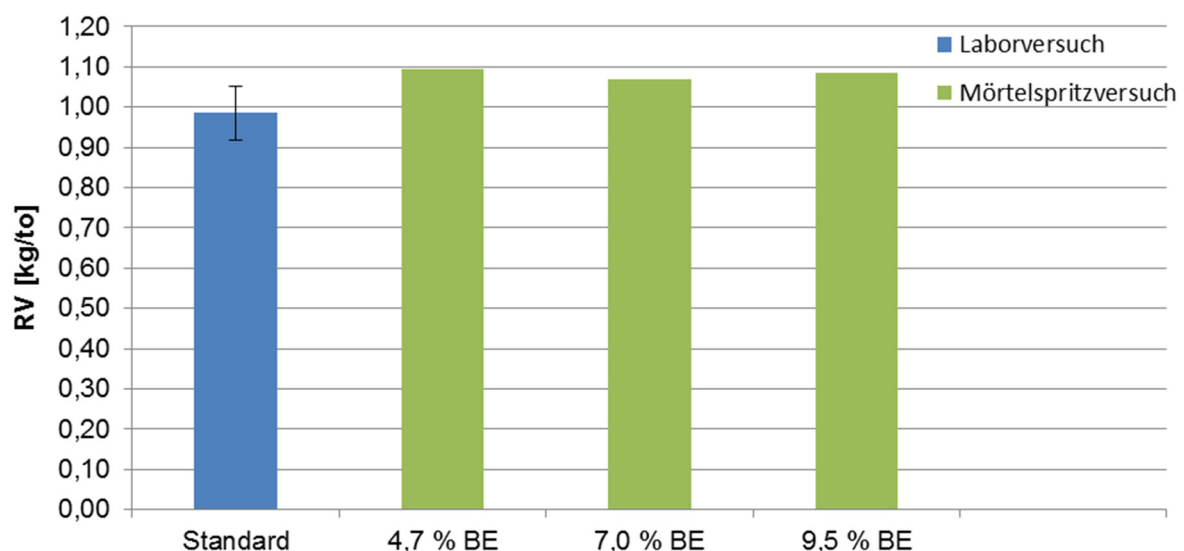


Bild 13: Vergleich der Labormischung mit Mörtelspritzversuchen mit unterschiedlichen Beschleuniger-Gehalten

Mit Mörtelspritzversuchen konnten auch bereits erste Bindemittelkombinationen untersucht werden (Mischungsverhältnisse vgl. mittlerer Balken Bild 10). Auch hier ist eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus den Laborversuchen festzustellen (Bild 14).

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die Ergebnisse aus den Laborversuchen mit den Ergebnissen der Mörtelspritzversuche korrelieren. Den Ergebnissen nach zu urteilen hat der untersuchte Beschleuniger keinen wesentlichen Einfluss auf die RV-Werte. Ob sich die Ergebnisse auf Baustellenbedingungen übertragen lassen, muss noch geklärt werden. Auf den Baustellen kommen noch weitere Einflussfaktoren hinzu wie die Schwankungen in der Bindemittelzusammensetzung, die Lagerung der Spritzkisten etc. [5].

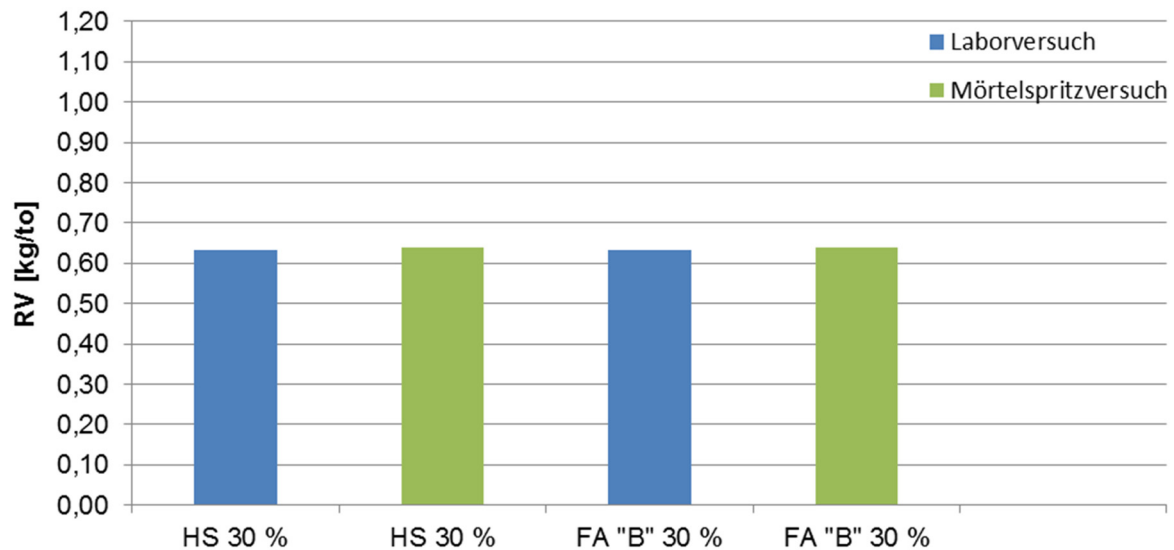


Bild 14: Vergleich der Laborversuche mit Mörtelspritzversuchen mit Substitution des Zements mit Hüttensand und Flugasche

4.5 Auswertung von Baustellenergebnissen und Ringversuchen

Im Zuge der Fragestellung inwiefern die Baustellenbedingungen oder auch laborübergreifende Schwankungsbreiten die Ergebnisse der RV-Werte beeinflussen, wurden bereits vorhandene Datenmengen ausgewertet.

Zur Verfügung standen neben Baustellenergebnissen unter anderem Ergebnisse aus einem Ringversuch, der durch die Material Consult Dr. Pichler ZT GmbH organisiert worden war [4]. Es wurden zeitgleich hergestellte Spritzbeton-Probekisten an 14 verschiedene Labore verteilt. Mit Ausnahme eines Ausreißers lag der Variationskoeffizient bei nur 8,5 % [4].

Bei genauerer Betrachtung der Einzelwerte fällt jedoch auf, dass zwar die Abweichung des Gesamtergebnisses sehr gering ist, jedoch die Verläufe der Calciumfreisetzung über die drei Zyklen sich relativ stark unterscheiden (Bild 15). Das ist der Tatsache geschuldet, dass als Ergebnis die Summe der Calciumfreisetzung der drei Zyklen verwendet wird und dadurch keine Aussage über die Verläufe der Einzelwerte gegeben werden kann. Ein Großteil der Ergebnisse folgte dem Verlauf B mit 38,5 % oder C mit 30,8 %. Der Verlauf A bzw. D war das Ergebnis von jeweils nur 2 der 13 Labore, die in die Auswertung mit einbezogenen wurden.

Ähnliche Ergebnisse wurden bei der Auswertung von „Baustellenproben“ festgestellt. In weiteren Untersuchungen sollen deshalb genauere Erkenntnisse gewonnen werden, wie diese Verläufe zu beurteilen sind. Diese Untersuchungen werden die unter Pkt. 4.3 angesprochenen Optimierungen des Prüfverfahrens mit Untersuchungen aus Spritzversuchen unter Baustellenbedingungen kombinieren.

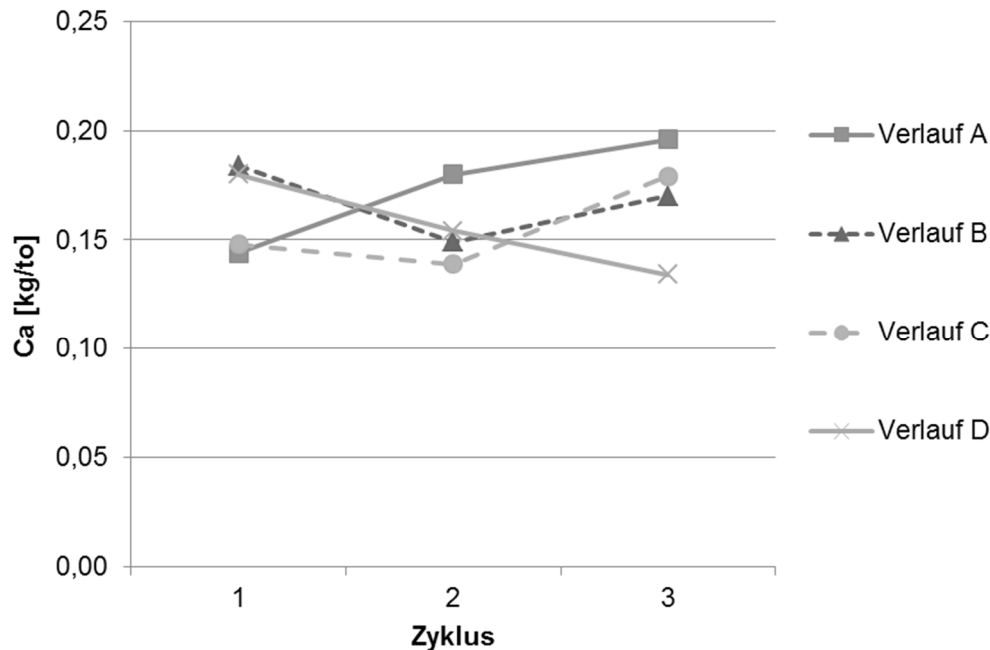


Bild 15: Verläufe der Calciumfreisetzung über drei Zyklen

5. Praxisergebnisse

In Österreich wurden bereits mehrere Baustellen mit der besonderen Anforderung RV an den Spritzbeton erstellt [4; 5]. Mit einer Mischung aus hochwertigem 280 kg/m³ CEM I 52,5 R und 140 kg/m³ AHWZ konnten die geforderten Werte von RV 0,7 eingehalten werden. Die Frühfestigkeitsklasse J2 kann damit noch zielsicher erreicht werden. Bei Spritzbetonen mit der Frühfestigkeitsklasse J3 wurden die Anforderung RV nicht gestellt. Unbefriedigend sind derzeit noch relativ große Schwankungen in den Einzelergebnissen. Diese Schwankungen können verschiedene Ursachen haben

- Ungenaue Definitionen beim Prüfverfahren
- Schwankungen in den Ausgangsstoffen
- Schwankungen in der Mischung und EB Dosierung (ev. verursacht durch Leistungsreduzierung beim Kistenspritzen)
- Unterschiedliche Verdichtung beim Spritzvorgang und nicht erkannte Spritzfehler

6. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Auslaugversuche nach dem ÖBV Merkblatt „Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials“ im Rahmen des Forschungsprojektes zeigen, dass eine Reduzierung der Calciumauslaugung durch eine Optimierung der Mischungen möglich ist. In Laborversuchen wurde unter anderem der Klinkergehalt durch verschiedene Zusatzstoffe substituiert. Die Reduzierung der Calciumfreisetzung lässt sich zum einen auf Verdünnungseffekte zurückführen. Zum anderen spielen auch chemische Effekte, zum Beispiel bei puzzolanischen Stoffen durch die Einbindung von Calciumhydroxid in festigkeitsbildende Reaktionsprodukte, als auch Füllereffekte eine Rolle. Das zeigen Versuchsergebnisse, bei denen ein Teil des Klinkers nicht durch Zusatzstoffe ersetzt wurde, sondern der Mischung bei gleichem Klinkergehalt wie der Referenzmischung anstelle von Quarzmehl hinzugegeben wurde.

Eine gute Übertragbarkeit zwischen ausgewählten Laborversuchen auf die Ergebnisse von Mörtelspritzversuchen ist gegeben. Bei den Mörtelspritzversuchen wurden zusätzlich der Einfluss des Beschleunigers und die Auswirkung der neuen Zusatzstoffe auf die Frühfestigkeitsentwicklung berücksichtigt. Derzeit ist noch zu überprüfen, inwiefern diese Ergebnisse bei Großspritzversuchen reproduzierbar sind.

Bei Versuchsergebnissen von Baustellen werden teilweise relativ große Schwankungen festgestellt, die bis dato noch nicht geklärt werden konnten. Deshalb werden im Moment noch verstärkt Versuche zur Fragestellung durchgeführt wie das Prüfverfahren optimiert werden kann und welche Einflüsse noch zusätzlich zu berücksichtigen sind.

7. Danksagung

Das Forschungsprojekt "REDUV – Reduzierung des Versinterungspotentials von Spritzbeton durch innovative Bindemittel und Zusatzstoffe" wird von der Bayerischen Forschungstiftung gefördert, der unser Dank gilt.

8. Literatur

- [1] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: Richtlinie Spritzbeton. Wien, 12.2009.
- [2] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: Richtlinie Tunnelentwässerung. Wien, 04.2010.
- [3] Bundesanstalt für Straßenwesen: ZTV-ING Teil 5 Tunnelbau. 12.2012.
- [4] Kusterle, W.; Pichler, W.; Saxer, A.: Prüfverfahren zur Bestimmung des Versinterungspotentials von Spritzbeton - Einflussfaktoren. Beton- und Stahlbetonbau, 106 (2011), S. 847–852.
- [5] Pichler, W.; Saxer, A.; Kusterle, W.: Kann die Spritzbetonzusammensetzung die Versinterungsneigung in der sekundären Tunnel-drainage beeinflussen? In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Tagung, Eigenverlag, Alpbach, 2012.
- [6] Maidl, B.; Berger, T.: Empfehlungen für den Spritzbetoneinsatz im Tunnelbau. Bauingenieur, 70 (1995), S. 11–19.
- [7] Maidl, B.; Kirschke, D.: Abdichtungs- und Entwässerungssysteme bei Verkehrstunnelbauwerken. Forschungsbericht FE-Nr. 15.273/1996/ER, 08.1998.
- [8] Maidl, B.; Maier, G.; Abel, F.: Untersuchungen und Maßnahmen zur Reduzierung des versinterungsbedingten Wartungsaufwandes am Saukopftunnel. Bauingenieur, 76 (2001), S. 392–403.
- [9] Maidl, B.; Tallarek, F.; Rohrbeck, M.: Prüfverfahren zum Nachweis der Umweltverträglichkeit von Spritzbeton. Bauingenieur, 71 (1996), S. 497–503.
- [10] Naumann, J.; Maidl, B.; Heimbecher, F.; Abel, F.: Verbesserung von Tunneldränagen unter Berücksichtigung des versinterungsbedingten Wartungsaufwands. In: Taschenbuch für den Tunnelbau, Glückauf, 2002, S. 353–407.
- [11] Breitenbücher, R.: Verringerung der Auslaugbarkeit von Spritzbeton im Tunnelbau durch Betonzusätze. In: Elkem GmbH (Hrsg.): Microsilica in der Modernen Betontechnologie. Allensbach, 1991, S. 36–51.
- [12] Breitenbücher, R.; Springenschmid, R.; Dorner, H. W.: Verringerung der Auslaugbarkeit von Spritzbeton im Tunnelbau durch besondere Auswahl von Zementen und Betonzusätzen. Beton-Information, 1992, S. 10–15.
- [13] Österreichische Bautechnik Vereinigung: Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials. Merkblatt. Wien, 07.2012.
- [14] DIN EN 1936: Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität. Berlin, 02.2007.

- [15] Saxer, A.:
Elution Tunnelbaustoffe. Forschungsprojekt. Innsbruck 2004-2005.
- [16] Österreichisches Normungsinstitut:
ÖNORM S 2116-4: Untersuchung verfestigter Abfälle Elutionstests über 24 Stunden, 64 Tage, 2 Tage. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 01.2001.
- [17] Hohberg, I.:
Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe. Sachstandsbericht. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1996.

Zu den Autoren

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.-Ing. (TU) Michael Hartmaier

Studium des Baustoffingenieurwesens an der TU München, seit 2008 technische Beratung bei der Firma Rohrdorfer Zement, u.a. Produktentwicklung Spritzbetonzement und Betreuung von Tunnelbauprojekten

michael.hartmaier@rohrdorfer.eu

Ass.-Prof. Dr. Andreas Saxer

Gelernter Physiker mit Nebenfach physikalische Chemie, seit 1990 an der Bau fakultät der Universität Innsbruck mit Tätigkeit in den Bereichen Baustoffe und Bauchemie, Ass.-Prof. am Arbeitsbereich Materialtechnologie

andreas.saxer@uibk.ac.at

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

Studium an der Universität Innsbruck, Mitarbeit im Ingenieurbüro (Brückenbau), 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