
BESTIMMUNG DER EXPERIMENTELLEN CALCIUM-AUSLAUGUNG AN SPRITZBETON-BOHRKERNEN: METHODENVERGLEICH UND UPDATE

DIFFERENT EXPERIMENTAL APPROACHES TO STUDY CA-LEACHING IN SPRAYED CONCRETE: COMPARISON OF METHODS AND UPDATE

Marlene **Sakoparnig**, Institut für Materialprüfung u. Baustofftechnologie, TU Graz, Österreich
Andre **Baldermann**, Institut für Angewandte Geowissenschaften, TU Graz, Österreich
Maria **Thumann**, Labor für Betontechnologie, OTH Regensburg, Deutschland
Florian **Mittermayr**, Institut für Materialprüfung u. Baustofftechnologie, TU Graz, Österreich
Wolfgang **Kusterle**, Labor für Betontechnologie, OTH Regensburg, Deutschland

Im Rahmen des FFG-Forschungsprojektes „Entwicklung neuer dauerhafter und nachhaltiger Spritzbetone (**A**dvanced and **s**ustainable **s**prayed concrete; ASSpC)“ werden Methoden zur Prüfung der Calcium-Auslaugung von Spritzbeton eingesetzt bzw. weiterentwickelt. Bestimmt wurde dafür das Reduzierte Versinterungspotential nach Regelwerken der Österreichischen Bautechnik Vereinigung und das Auslaugverhalten von Spritzbeton bei leichtem Säureangriff (Salpetersäure und Kohlensäure), um dauerhaftigkeitsrelevante Parameter im Bereich der Wechselwirkungen von Spritzbeton mit leicht sauren (Kohlensäure- und Nitrathaltigen) Oberflächen-, Grund- und Sickerwässern zu untersuchen und potentielle Schädigungsmechanismen zu identifizieren und zu quantifizieren. Die Vor- und Nachteile der verwendeten Prüfmethode zum lösenden Angriff werden in Bezug auf die Dauerhaftigkeit von Spritzbeton diskutiert.

In the course of the FFG-research project “Advanced and sustainable sprayed concrete (ASSpC)” different methods for testing the Ca-leaching behaviour are used and refined to investigate the extent of Ca-leaching from sprayed concrete. The test matrix includes the determination of the reduced sintering potential (so-called “Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials”) following the guidelines given by the Austrian Society for Construction Technology. The fate of aqueous Ca^{2+} ions is further evaluated based on leaching experiments performed under slightly acidic conditions (nitric acid, carbonic acid) in order to elucidate the physicochemical interaction mechanisms between sprayed concrete and carbonic acidic or nitrate bearing surface-, ground- and seepage waters. Advantages and disadvantages of the methods used for testing Ca-leachability in weak acidic media will be discussed with focus on the durability of (sprayed)-concrete.

1. Einleitung

Während seiner Lebenszeit kommt Spritzbeton (im Tunnelbau) in Kontakt mit Bergwasser, da er beim Vortrieb (vor allem beim zyklischen) eingesetzt wird, um das Gestein/Gebirge zu stützen, zu stabilisieren und den Hohlraum abzudichten. Wechselwirkungen von Spritzbeton mit Bergwässern haben daher einen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit von Tunnelsystemen und hängen stark von ortsabhängigen Variablen ab wie z.B. Wasserherkunft, Kontaktgestein, Bodenüberlagerung, die unter anderem pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur und CO_2 Partialdruck p_{CO_2} beeinflussen. Ein Prozess der durch die Interaktion mit dem Berg-

wasser auftritt, ist die Calcium-Auslaugung des Betons. Durch die Lösung von Komponenten des Zementsteins (Kalkhydrat $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Calcium-Silikat-Hydrat C-S-H) werden Ca^{2+} Ionen freigesetzt, die in das Bergwasser diffundieren. Das Ausmaß der Calcium-Auslaugung hängt einerseits von der Betonrezeptur und andererseits von den vorher erwähnten Wassercharakteristika wie pH-Wert, Temperatur, p_{CO_2} usw. ab. Diese können sich jedoch im Verlauf des Wasserflusses im Tunnelsystem – durch z.B. Entgasung, CO_2 -Aufnahme, Mischwasserbildung – ändern, was zu einer Übersättigung des Wassers bezüglich Karbonatmineralen führen kann. In Folge kommt es meist in den Tunnel drainagen zur Fällung von Karbonatmineralen (Versinterung), welche aufwendig gereinigt werden müssen. Daher ist es vor allem für den Tunnelbau von Vorteil, wenn neben konstruktiven Maßnahmen (z.B. Abschlauchung des Bergwassers in die Drainage, Installation von sekundären Entwässerungselementen [1]) der verwendete Spritzbeton ein geringes Calcium-Auslaugungsverhalten besitzt [2]. Während des Auslaugungsprozesses sind aufgrund ihrer hohen Löslichkeit und Reaktivität vor allem Portlandit [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] und Calcium-Silikat-Hydrate [C-S-H-Phasen] von entscheidender Bedeutung, da die Lösung dieser Komponenten im Extremfall zu einem Verlust der mechanischen Festigkeit des Zementsteins führen kann [3].

Das Ca-Auslaugverhalten von Betonen wird in Österreich nach dem ÖBV-Merkblatt „Festlegung des reduzierten Versinterungspotentials“ [4] getestet, welches als Erläuterung zur Festlegung eines Reduzierten Versinterungspotentials (RV) in den ÖBV-Richtlinien „Spritzbeton“ [5] und „Tunnelentwässerung“ [1] dient. Bei diesem Testverfahren wird die Auslaugung von Ca^{2+} Ionen aus dem Beton durch Reaktion mit entionisiertem Wasser über drei Zyklen betrachtet. Es ist anzumerken, dass der RV-Test eine vergleichsweise einfache und „baustellentaugliche“ Versuchsmethode darstellt, welche reproduzierbare und zuverlässige Vergleichswerte zwischen verschiedenen Betonmischungen ergibt, aber nur bedingt Aussagen zur tatsächlich auftretenden Versinterung in Drainageleitungen zulässt [6, 7]. Gründe hierfür umfassen u.a. unterschiedliche Fließverhalten in den Drainagen und die chemische Komplexität von natürlichen Bergwässern, deren Mineralisationsgrad, Ionenstärke und pH-Wert sowie externe Faktoren wie Temperatur und Partialdruck von CO_2 (p_{CO_2}). Änderungen der letztgenannten Parameter – beispielsweise durch Variationen in der Mächtigkeit der Bodenüberlagerung – können insbesondere zu einer erhöhten Calcium-Auslaugung im Beton durch die Bildung von korrosiven, kohlenstoffhaltigen Wässern führen. Im Einzugsbereich von stark landwirtschaftlich genutzten Gebieten und deren Sickerwässern kann die Bildung von Nitraten eine zusätzliche Calcium-Auslaugung von zementgebundenen Materialien bewirken. Daher wurden neben dem üblichen RV-Test auch Experimente mit Kohlensäure- und Salpetersäure-haltigen Lösungen durchgeführt, um den Einfluss solcher Wässer auf die Calcium-Auslaugung aus Spritzbeton zu untersuchen.

2. Methodik

2.1 Ausgangsmaterialien und Probekörpervorbereitung

Für die Versuche wurde ein Trockenspritzbeton untersucht (TBS 3), dessen Mischung nur aus einem Spritz-Bindemittel (SPBM 2, siehe Tab. 1) auf Basis Portlandzementklinker bestand. Als Gesteinskörnung wurde Dolomit (Größtkorn 7 mm) verwendet und der W/B Wert betrug 0,50. Gespritzt wurde der Trockenspritzbeton in Spritzkisten mit einer Aliva 246 Spritzmaschine, einer Schuller Typ S-2 Düse und einem 3,6 l Rotor bei einer Förderleistung von 2,5 m^3/h und einem Schlauchdurchmesser von 38 mm. Die Frühfestigkeitsentwicklung lag mit Ausnahme des 3 Stunden Wertes immer im J3 Bereich (3 Stunden oberer J2 Bereich). Nach 6 Stunden bzw. 28 Tagen betrug die Festigkeit 7 bzw. 52 N/mm^2 .

Bohrkerne mit einem Durchmesser von >100 mm wurden nach ca. 7 Tagen aus den Spritzkisten gebohrt und in der Wasserlagerung aufbewahrt. Bei Erreichen des erforderlichen Alters von 56 bzw. 115 Tagen wurden 50 mm Bohrkerne ausgebohrt und auf 100 mm

abgelängt. Es wurde darauf geachtet, dass die Oberfläche des hergestellten Probekörpers mindestens 20 mm von der Außenseite des ursprünglichen Bohrkerns entfernt war [4]. Die Versuche zur Calcium-Auslaugung wurden unmittelbar nach der Probengewinnung gestartet, um eine Alteration der Probekörper – durch Reaktion mit atmosphärischem CO₂ – auszuschließen.

Tab. 1: Kennwerte des verwendeten Spritz-Bindemittels SPBM 2.

Spritz-Bindemittel Kennwerte			
Dichte [g/cm³]	3,14	Mineralgehalt	(wt.%)
BET [m²/g]	1,03	Calcit	0,5
BLAINE [cm²/g]	4002	Dolomit	0,8
Komponente	(wt.%)	Bassanit	1,2
LOI	1,8	Alit C ₃ S	56,1
Na ₂ O	0,7	Belit C ₂ S	13,9
MgO	2,0	Aluminat C ₃ Ac	3,4
Al ₂ O ₃	6,1	Aluminat C ₃ Ao	9,3
SiO ₂	20,6	Ferrit C ₄ AF	7,4
SO ₃	1,2	Aphitalit	0,7
K ₂ O	0,7	Arkanit	0,6
CaO	63,4	Portlandit	2,5
TiO ₂	0,2	Freikalk CaO	0,6
Fe ₂ O ₃	2,8	Periklas	1,0
Sr	0,17		

2.1 RV-Test (Probenalter 56 und 115 Tage)

An der Trockenspritzbetonprobe TBS 3 wurde das reduzierte Versinterungspotential (RV) nach dem ÖBV-Merkblatt „Festlegung des reduzierten Versinterungspotentials“ [4] im Alter von 56 und 115 Tagen bestimmt. Dazu wurde je 1 Bohrkern (Durchmesser 50 mm, Höhe 100 mm) in ein Reaktionsgefäß gegeben und im Masseverhältnis Auslaugmittel (entionisiertes Wasser) zu Feststoff von 4 ausgelaugt. Nach 1, 2 und 5 Tagen (3 Zyklen) wurde das Eluens gewechselt, entnommene Fluidproben (~50 ml) wurden abweichend zur Richtlinie mit 0,45 µm filtriert und auf die gelösten Haupt- und Nebenkomponenten mittels Ionenchromatographie (IC) und Optischer Emissionsspektroskopieanalyse (ICP-OES, mit HNO₃ angesäuert) analysiert. Zusätzlich wurde im Spritzbetonalter von 115 Tagen auch ein Vergleichstest durchgeführt, bei welchem das Eluens mit einem Magnetrührer (Cimarec, U = 150 1/min) langsam gerührt wurde, um eine Durchmischung des Eluens während des Versuchs zu erzielen. Die Rührgeschwindigkeit wurde bewusst langsam gewählt, um die Adsorption von atmosphärischen CO₂ in das Eluens zu minimieren.

2.2 Kohlensäureangriff (Probenalter 115 Tage)

Ein Plexiglasreaktor (Bild 1A) wurde mit 4700 ml entionisiertem Wasser gefüllt; anschließend wurde der Spritzbeton-Bohrkern mit einem Abstandhalter zum Boden (ca. 10 cm) eingelegt und gasförmiges CO₂ in das Eluens im Reaktor geführt (Bild 1B). Dieser Versuchsaufbau ermöglicht es, die zeitliche Änderung des Calcium-Auslaugungsverhaltens bei einem konstanten pH-Wert von 6,0 ± 0,2 und 25 ± 1°C zu untersuchen. Kenngrößen der wässrigen Lösungen wie pH-Wert (GHL pH-Elektrode), Temperatur und elektrische Leitfähigkeit (WTW TetraCon 325) wurden während des Versuches mit einem Aquariencomputer (Profilux Aquatic Bus der Firma GHL) online aufgezeichnet. Die Einstellung des pH-Wertes erfolgte automatisch über die Dosierung von gasförmigem CO₂ mittels Computer gesteuerter

Magnetventilöffnung. Über einen Zeitraum von 11 Tagen wurden Lösungsproben (jeweils 20 ml) entnommen, um die Entwicklung des Calcium-Auslaugungsverhaltens zu analysieren. Neben den gelösten Haupt- und NebenkompONENTEN wurde die Gesamtalkalinität per Titration (mittels 0,1 molarer HCl und Bromkresolgrün-Methylrot-Indikatorlösung) an 0,45 µm filtrierten Proben bestimmt. Das Eluens-Probekörper-Verhältnis betrug bei diesem Versuch 9:1.

2.3 Salpetersäureangriff (Probenalter 115 Tage)

Die Versuchsanordnung (Bild 1C) und Analytik des Eluats entspricht wie in Kapitel 2.2 beschrieben. Die Einstellung eines statischen pH-Wertes (mit SI Analytics Blue Line 28 pH Elektrode) auf ~6,0 ($\text{pH}_{\text{stat}} = 6$) erfolgte durch die Titration einer 0,5-molaren Salpetersäure suprapur. Die Menge an zudosiertem Lösungsmittel entsprach der Menge an entnommenen Eluaten, um ein konstantes Eluens-Probekörper-Verhältnis über den Versuchszeitraum von 11 Tagen zu erhalten. Die chemische Zusammensetzung und die Gesamtalkalinität der Fluidproben (0,45 µm filtriert) wurden mittels IC, ICP-OES und per Titration bestimmt.

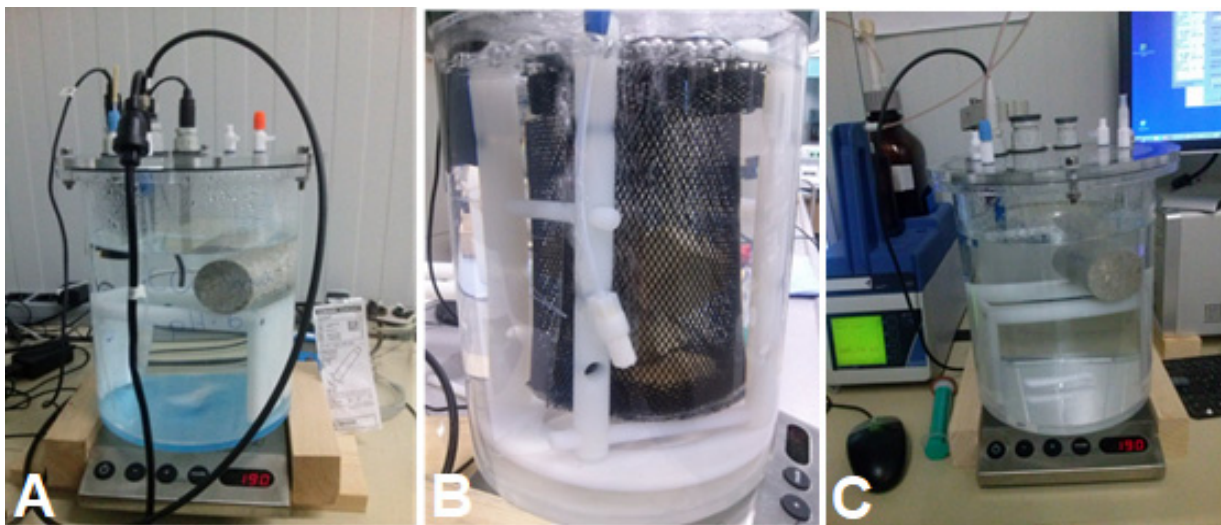


Bild 1: Versuchsaufbau zur experimentellen Bestimmung des Auslaugverhaltens von Calcium unter Verwendung von Kohlensäure (A und B) und Salpetersäure (C).

3. Ergebnisse

3.1 RV-Test:

Die RV Bestimmung im Alter von 56 Tagen ergab einen Wert von 0,68 kg/to ($n=2$) und im Alter von 115 Tagen einen Wert von 0,54 kg/t (Bild 2; Tab 2; meist wird für versinterungsarme Spritzbetone ein RV-Wert von $< 0,7$ gefordert). Wie ersichtlich, nimmt der RV-Wert mit höherem Probenalter im Vergleich zu 56 Tagen um rund 20 % ab. Beim RV-Test mit Magnetrührer hingegen ergibt sich bei gleichem Alter von 115 Tagen eine deutlich höhere Calcium-Auslaugung mit 0,84 kg/t. Es kann eine positive lineare Beziehung zwischen der gelösten Ca^{2+} -Konzentration und der Sr^{2+} -Konzentration (Steigung der Regressionsgerade = ~225; Bild 2B) festgestellt werden, was auf die Lösung von Ca^{2+} - und Sr^{2+} aus den Zementphasen zurückzuführen ist. Beim gerührten RV-Test ist die Steigung der Regressionsgerade höher (~280).

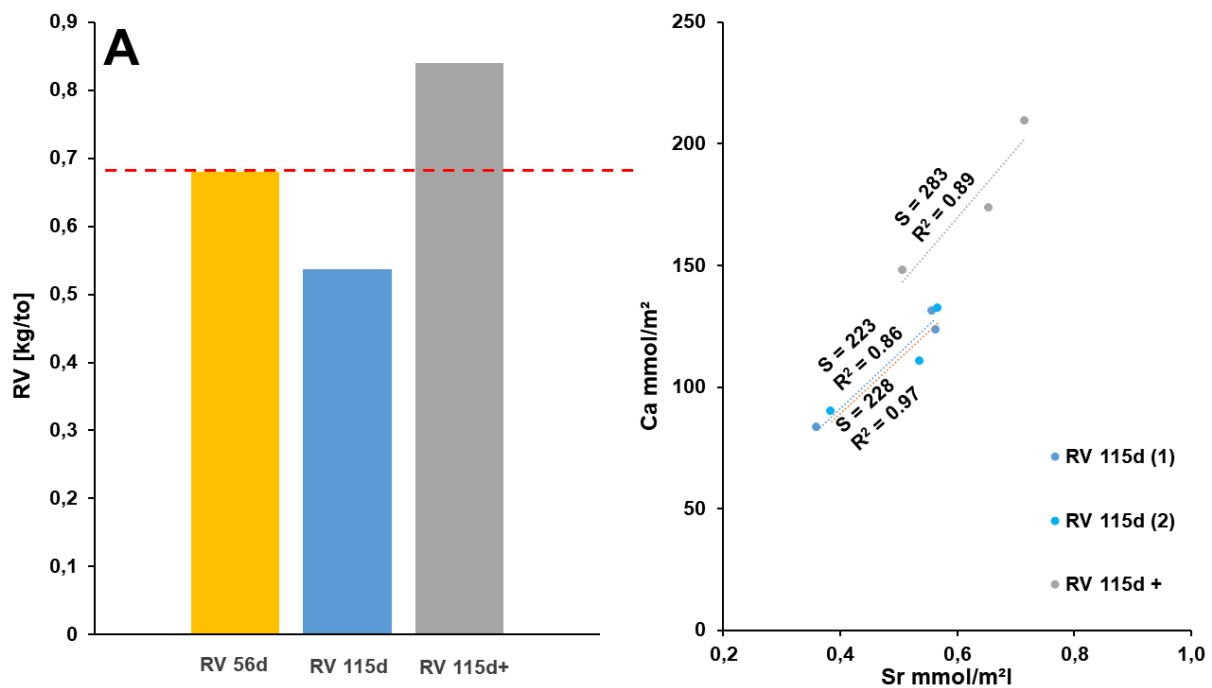


Bild 2: (A) Ergebnisse des RV-Tests im Alter von 56 Tagen (RV 56d) und 115 Tagen ohne (RV 115d) und mit Magnetrührer (RV 115d +), (B) Gegenüberstellung der Konzentrationen an gelöstem Ca^{2+} und Sr^{2+} über den Versuchszeitraum (3 Zyklen).

3.2 Kohlensäure- und Salpetersäureangriff

Die Ergebnisse der Tests zum schwach lösenden Angriff mit konstantem pH-Wert von 6 sind in Tabelle 2 zusammengefasst. In Bild 3A ist der Verlauf der oberflächenbezogenen Calcium-Freisetzung (in $\text{mmol Ca}^{2+}/\text{m}^2$) über die gesamte Versuchsdauer dargestellt. Mit zunehmender Reaktionszeit (ab ca. 70 h) weicht die Kurve sowohl bei Kohlensäure als auch bei Salpetersäure vom linearen Verlauf ab, was auf einen Einfluss der Konzentration in der Lösung auf die weitere Löslichkeit von Calcium hindeutet. Bei längerem Versuchszeitraum würde sich die gelöste Menge an Calcium einem Gleichgewichtszustand, welcher der Sättigungskonzentration entspricht, annähern. Die Konzentration an gelösten Ca^{2+} Ionen ist in Anwesenheit von HNO_3 gegenüber H_2CO_3 erhöht (Bild 3A; Tab. 2).

Tab.2: Ergebnisse der Auslaugmethoden: gesamte massebezogene [mg/kg] und oberflächenbezogene [mg/m^2] Freisetzung von Calcium (Ca^{2+}) und Strontium (Sr^{2+})

Probenbezeichnung	W:F	Probenalter [d]	Versuchsdauer	pH-Wert	Ca^{2+} Gesamt [mg/kg]	Sr^{2+} Gesamt [mg/kg]	Ca^{2+} Gesamt [mg/m^2]	Sr^{2+} Gesamt [mg/m^2]
RV 56d	12:1	56	8 Tage	>11	691	-	16190	-
RV 115d	12:1	115	8 Tage	>11	534	5,2	13448	130,1
RV 115d +	12:1	115	8 Tage	>11	840	6,5	21269	164,5
HNO_3	9:1	115	11 Tage	6	1571	10,7	40330	275,1
H_2CO_3	9:1	115	11 Tage	6	1051	6,4	25305	154,8

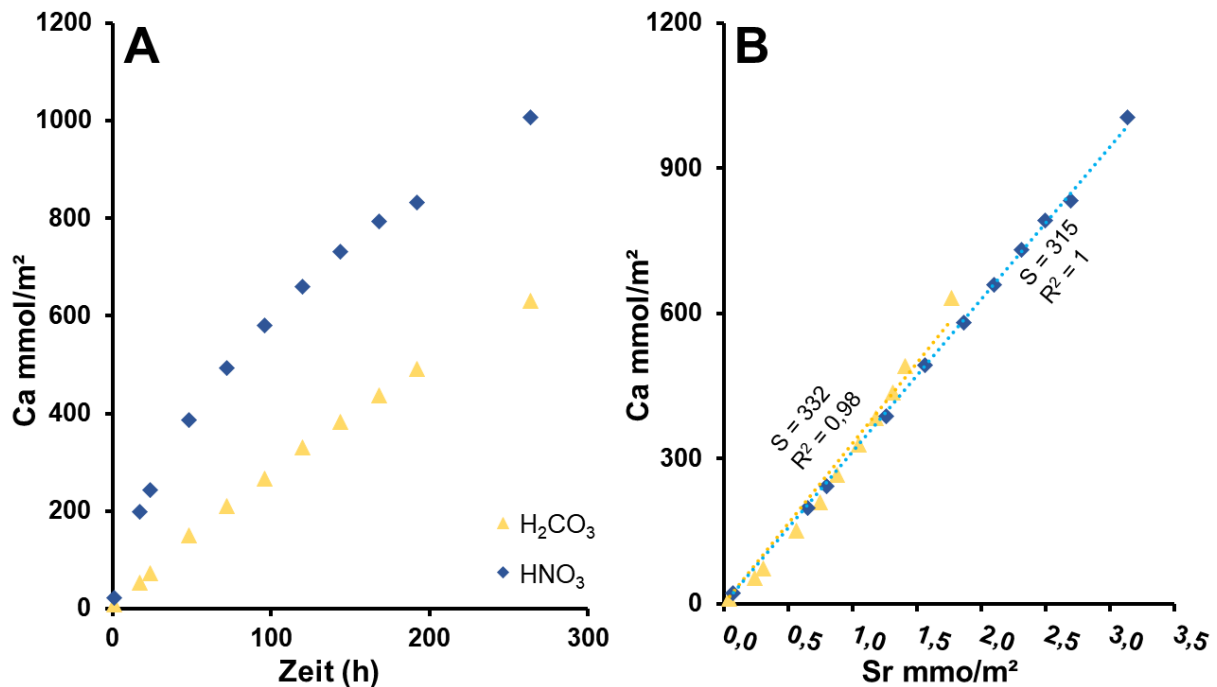


Bild 3: (A) Zeitliche Änderung der Gesamt-Ca-Konzentration bei pH 6 in Anwesenheit von H₂CO₃ und HNO₃. (B) Korrelation der Ca²⁺ und Sr²⁺ Konzentration im untersuchten Zeitraum

4. Diskussion

Der RV-Test ermöglicht eine rasche Einschätzung des Calcium-Auslaugungsverhaltens von unterschiedlichen Rezepturen. Hier bestimmt vor allem die Löslichkeit von Portlandit den pH-Wert, der im stark alkalischen Bereich liegt. Inwieweit auch die Löslichkeit von CSH-Phasen in diesem pH-Bereich eine Rolle spielt, kann mit den durchgeführten Untersuchungen nicht beantwortet werden. Wichtig ist allerdings, dass beim RV-Test entsprechende Vorkehrungen getroffen werden, um eine Ausfällung von gelöstem Portlandit zu verhindern. Zudem wird nach jedem Zyklus das Eluat abgossen und auf pH-Wert von 3 angesäuert, um etwaig ausgefallenes Calciumcarbonat wieder in Lösung zu bringen. Jedoch werden dabei Ausfällungen am Probekörper, im Bodensatz und an der Reaktorwand vernachlässigt.

Der Vergleich der Werte nach 56 und 115 Tagen zeigt, dass mit zunehmendem Alter des Spritzbetons, bei entsprechender Lagerung, eine Reduktion des RV-Wertes um rund 20 % zu beobachten ist. Obwohl die genauen Gründe für diese Reduktion der Ca-Auslaugbarkeit mit zunehmenden Betonalter noch nicht vollständig geklärt sind, wird vermutet, dass unter anderem die fortschreitende Hydratation während der Probenlagerung die Gesamtporosität und Porenradien ändern, was wiederum in reduzierten RV-Werten resultiert.

Der RV-Wert im Spritzbetonalter von 115 Tagen bei gerührtem Eluens liegt rund 55 % höher als der im selben Alter ermittelte RV-Wert ohne Rühren. Die Freisetzung von Calcium aus dem Beton bzw. Zementstein ist ein diffusionsgetriebener Prozess, wodurch auch die Porosität des Zementsteins erhöht wird, was zur Reduktion der Festigkeit führen kann [8]. Deshalb kann vermutet werden, dass eine kontinuierliche Homogenisierung des Eluens einer Behinderung der diffusionsgetriebenen Calcium-Freisetzung entgegenwirkt und somit zu höheren RV-Werten führt. Da es sich hier um eine erste Untersuchung handelt, sind für eine gezielte Aussage zu diesen Einflüssen noch weitere Untersuchungen erforderlich.

Die Auslaugung bei konstantem pH-Wert von 6, was gemäß ÖNORM B 4710-1 der Expositionsklasse XA1, also einem leichten lösenden Angriff zuzuordnen ist, führt einmal zu deutlich höheren Calcium-Freisetzen im Vergleich zum RV-Test. Die Unterschiede für das Spritzbetonalter von 115 Tagen betragen einen Faktor von ca. 2 bei Kohlensäure und einen Faktor von ca. 3 bei Salpetersäure. Nicht berücksichtigt dabei sind die unterschiedlichen Eluens-Feststoff-Verhältnisse, die beim RV-Test insgesamt 12 und bei den Auslaugtests mit konstantem pH-Wert 9 betragen. Es ist davon auszugehen, dass bei dem pH-Wert von 6 mehr CSH-Phasen gelöst werden als im alkalischen Milieu des RV-Tests.

Der Verlauf der Calcium-Konzentration im Eluat der Auslaugmethoden mit konstantem pH-Wert zeigt bereits nach ca. 70 h eine Abflachung, die sich weiter fortsetzt. Es scheint also bereits nach relativ kurzer Versuchsdauer eine geringer werdende Freisetzung stattzufinden, was auf einen Einfluss der im Eluat vorhandenen Konzentrationen an gelösten Stoffen auf die Calcium-Auslaugung hindeuten könnte.

Einen interessanten Aspekt liefert die Bestimmung des gelösten Strontiums (Sr)-Gehalts im Eluat. Strontium ist in Karbonaten als Nebenkomponente eingebaut und gelangt während des Brennvorgangs in den Zementklinker und schließlich in die Hydratphasen. In Bild 3B ist die Korrelation von gelöstem Calcium zu gelöstem Strontium für die Auslaugversuche mit konstantem pH-Wert dargestellt. Es liegt eine ausgezeichnete Korrelation vor mit Steigungen von 332 für Kohlensäure und von 315 für Salpetersäure. Das Verhältnis Calcium zu Strontium beträgt im verwendeten Spritz-Bindemittel 265 ± 30 (siehe Tabelle 2). Bei der Auslaugung mit Kohlensäure und Salpetersäure liegt eine etwas höhere Korrelation zwischen gelöstem Calcium und Strontium vor. Das kann einerseits durch zusätzliche Lösung von Calcium-Verbindungen ohne Strontium bedingt sein oder andererseits durch eine Fraktionierung von Sr^{2+} in den Hydratphasen.

Auch beim RV-Test im Alter von 115 Tagen wurden die Strontium-Konzentrationen im Eluat gemessen. Die Korrelation von gelöstem Calcium und Strontium ergibt für den Test ohne Rühren eine Steigung von 225 und mit Rühren eine Steigung von 280 (siehe Bild 2B). Das bedeutet, dass das $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$ Verhältnis beim RV-Test ohne Rühren leicht unter dem Wert des Spritz-Bindemittels liegt. Ursache dafür könnte eine Ca-Senke sein aber auch eine Fraktionierung des Sr^{2+} in den Hydratphasen. Bei der gerührten Probe liegt eine Steigung vor, die dem $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$ Verhältnis des Spritz-Bindemittels entspricht.

5. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Versuchsserie war es, drei unterschiedliche Auslaugmethoden zum Auslaugungsverhalten von Calcium an einer Betonrezeptur zu testen. Wesentlicher Unterschied ist einmal der pH-Wert, bei dem die Auslaugung stattfindet. Beim RV-Test nach ÖBV-Merkblatt zur Bestimmung des reduzierten Versinterungspotentials liegt ein stark alkalischer pH-Wert um 11,5 vor. Bei den Auslaugmethoden unter Einblasung von CO_2 und Zugabe von Salpetersäure wurde ein pH-Wert von 6 über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten. Dieser pH-Wert ist der Expositionsklasse XA1L (leicht lösender Angriff) zuzuordnen. Der Vorteil der Auslaugmethoden bei konstant gehaltenem leicht saurem pH-Wert liegt in der Untersättigung des Eluats in Bezug auf die Lösungszusammensetzung bzw. Ausfällung von Calcium-Verbindungen (speziell Calciumcarbonat). Beim RV-Test sind dagegen besondere Vorkehrungen zu treffen, um eine Fällung von Calcium-Verbindungen möglichst zu vermeiden.

Eine interessante Erweiterung hinsichtlich Interpretationen der Vorgänge bei Auslauguntersuchungen stellt die Bestimmung von nicht bis wenig reaktiven („konservativen“) Elementen wie Strontium dar (oder auch Barium und Lithium). Mit Hilfe dieser Elementkonzentrationen

können Massenbilanzbetrachtungen an gelöstem Portlandit und CSH-Phasen durchgeführt werden [10]. Es bedarf sicherlich noch weiterer Untersuchungen, um mehr Informationen sowohl zum Einbau von Strontium in die Zement- bzw. Hydratphasen als auch deren Lösungsverhalten zu erhalten.

Ziel der Untersuchungen wird es sein, Aussagen über das tatsächliche Ausmaß an Calcium-Freisetzung bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und deren Beitrag zu Versinterungen treffen zu können.

6. Danksagung

Die Autoren danken der Österreichischen Bautechnik Vereinigung (ÖBV), allen Wirtschaftspartnern und der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG, 856080), Isabel Galan für die chemisch-mineralogische Untersuchung des Spritz-Bindemittels und Andreas Saxer für die kritischen aber sehr hilfreichen Kommentare.

7. Literatur

- [1] Österreichische Bautechnik Vereinigung:
Richtlinie Tunnelentwässerung. Wien, 04.2010.
- [2] Breitenbücher, R.:
Verringerung der Auslaugbarkeit von Spritzbeton im Tunnelbau durch Betonzusätze. In: Techn. Akademie Konstanz und Elkem: Microsilica in der modernen Betontechnologie. Konstanz, 1991.
- [3] Stark, J. und Wicht, B.:
Dauerhaftigkeit von Beton. 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [4] Österreichische Bautechnik Vereinigung:
Merkblatt Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials. Wien, 07.2012.
- [5] Österreichische Bautechnik Vereinigung:
Richtlinie Spritzbeton. Wien, 12.2009.
- [6] Thumann, M.; Hartmaier, M.; Saxer, A.; Kusterle, W.:
Versinterungspotential von Spritzbeton-Laboruntersuchungen und Kleinspritzversuche zur Reduzierung der Calciumfreisetzung. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Tagung 2015, Alpbach 29.+30.1. 2015.
- [7] Kusterle, W., Pichler, W., Saxer, A.:
Prüfverfahren zur Bestimmung des Versinterungspotentials von Spritzbeton – Einflussfaktoren. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), Heft 12, pp. 847.
- [8] Pichler, Ch., Saxer, A., Lackner, R.:
Differential-scheme based dissolution/diffusion model for calcium leaching in cement-based materials accounting for mix design and binder composition. Cement and Concrete Research 42 (2012), pp. 689-699.
- [9] Franke, L., Schmidt, H., Schmidt-Döhl, F.:
Prüfung der Beständigkeit von Mörtelprodukten gegenüber saurem Angriff bis pH 3 und Einstufung in Expositionsclassen. Beton, Heft 1+2, Bd. 60, 2010, pp. 20-31.
- [10] Baldermann, A.; Rezvani, M.; Proske, T.; Grengg, C.; Emmerich, F.; Stauffacher, A.K.; Sakoparnig, M.; Steindl, F.; Baldermann, C.; Galan, I.; Graubner, C.A.; Mittermayr, F.:
The effect of limestone content and type on the sulfate resistance of cement-reduced eco-concretes with high limestone powder contents. Im Review mit „Cement and Concrete Research“.

Zu den Autoren

Marlene Sakoparnig, MSc.

Studium der Erdwissenschaften an der Karl-Franzens-Universität Graz, seit 2017 Projektassistentin am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz
m.sakoparnig@tugraz.at

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

Dr. rer. nat. Andre Baldermann

Studium der Geowissenschaften an der Universität Greifswald, 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, Doktorat an der TU Graz am Institut für Angewandte Geowissenschaften, seit 2013 am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz

f.mittermayr@tugraz.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