
LAGENBILDUNG TEIL 2: VISUALISIERUNG UND UNTERSUCHUNG VON INHOMOGENITÄTEN IM SPRITZBETON

VISUALIZATION AND ANALYSIS OF INHOMOGENETIES IN SHOTCRETE

Marlene **Sakoparnig**, Institut für Materialprüfung u. Baustofftechnologie, TU Graz, Österreich
Günther **Koraimann**, Institut für Molekulare Biowissenschaften, Universität Graz, Österreich
Lukas **Briendl**, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz, Österreich
Florian **Steindl**, Institut für Angewandte Geowissenschaften, TU Graz, Österreich
Thomas **Angerer**, Institut für Mineralogie und Petrographie, Universität Innsbruck
Benedikt **Lindlar**, Sika Services AG, Zürich, Schweiz
Wolfgang **Kusterle**, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Deutschland
Florian **Mittermayr**, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz, Österreich

Aktuelle Bestrebungen, eine Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Spritzbetonen zu erreichen, erfolgen meist nur über die Anpassung der Bindemittelzusammensetzung. Im Rahmen des Projektes „**Advanced and Sustainable Sprayed Concrete**“ (ASSpC) konnte aber festgestellt werden, dass, durch den Spritzprozess verursachte, Inhomogenitäten die Dauerhaftigkeitseigenschaften lokal stark negativ beeinflussen. Bei Karbonatisierungsprüfungen wurden teilweise auch Inhomogenitäten oder Lagen sichtbar, die zuvor bei der Bohrkernbegutachtung optisch nicht erkennbar waren. Eine der Ursachen für diese Inhomogenitäten ist die unregelmäßige Verteilung des Erstarrungsbeschleunigers im Spritzbeton [1]. Visualisiert wurden diese Unregelmäßigkeiten mittels Zugabe eines fluoreszierenden Markierstoffes (Na-Fluorescein) zum Beschleuniger und der anschließenden Fluoreszenzanalyse von parallel zur Spritzrichtung entnommenen Bohrkernen. Zusätzlich konnte mittels Mikro-Röntgenfluoreszenz- und Röntgenbeugungsanalysen gezeigt werden, dass die lokal erhöhten Beschleunigerkonzentrationen chemische Änderungen im Zementstein hervorrufen.

*The durability of shotcrete mixtures is nowadays often optimized by adjusting the composition of the binder. However, in the frame of the project “**Advanced and Sustainable Sprayed Concrete**”, it was observed that inhomogeneities introduced in the spraying process could cause areas of reduced durability in shotcrete samples. During carbonation tests, inhomogeneities were detected which were not visible during visual inspection of the shotcrete cores. One cause for the inhomogeneities is the irregular distribution of accelerator in the shotcrete [1]. These differences in accelerator concentrations could be visualized by spraying shotcrete using a setting accelerator mixed with a fluorescent tracer (Na-fluorescein) and the subsequent fluorescence analyses of drill cores taken parallel to the spraying direction. Furthermore, changes on the chemistry of the cement matrix due to the locally higher accelerator concentrations were observed by X-ray fluorescence and diffraction methods.*

1. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten fanden viele Optimierungen von Spritzbeton hinsichtlich seiner Frisch- und Festbetoneigenschaften und des Auftrages statt [2]. Jedoch zeigen aktuelle Forschungsergebnisse, dass weitere Verbesserungen möglich und durch neue Anforderungen

an die Nachhaltigkeit auch notwendig sind [3,4]. Unter anderem demonstrieren Dauerhaftigkeitstests, dass lokale Inhomogenitäten, die oft in Form von Spritzlagen auftreten, die Dauerhaftigkeitsparameter stark negativ beeinflussen können [5].

Diese Schwachstellen zeichnen sich durch chemische oder physikalische Inhomogenitäten (Betonester, Lagen, Lunker) aus, die durch den Spritzprozess entstehen. Verursacht werden können sie durch das Einspritzen von Rückprall und Spritzstaub [6], Spritzschatten hinter Einbauten wie Bewehrung und Spritzfehler, die Inhomogenität im Spritzstrahl [7,8], aber auch durch asynchrone Beschleunigerzugabe zum zyklischen Betonförderstrom [1,9]. Vor allem der letzte Punkt tritt in der Praxis systematisch auf und ist durch den Düsenführer fast nicht zu beeinflussen. Hier wäre eine Verbesserung notwendig um den Anforderungen an einen homogenen und dichten Spritzbeton der öbv-Richtlinie Spritzbeton [10] zu entsprechen.

Um die Einflüsse der Lagenbildung besser zu untersuchen, ist es zuerst notwendig, diese auch verlässlich detektieren zu können. Bei einer Bohrkernbewertung [11] werden vor allem Spritzschatten, Spritzfehler und poröse Bereiche leicht erkannt. Beim Auftrocknen können durch unterschiedliche Feuchtigkeitszustände weitere Inhomogenitäten bzw. Lagen detektiert werden. Jedoch zeigen Dauerhaftigkeitstests oft weitere, von außen optisch nicht sichtbare, Schwachstellen in den Bohrkernproben auf. Daher wurden ihm Rahmen des Projektes ASSpC weitere Untersuchungen durchgeführt.

Über die beschleunigte Karbonatisierung wurde versucht, eine Methode für die Praxis zu finden, bei welcher das Vorhandensein von Inhomogenitäten und somit auch die Qualität des Spritzbetons mit geringem Aufwand getestet werden kann. Zusätzlich wurde bei zwei Großspritzversuchen eine Methode zur Detektion von Lagen mit unterschiedlichen Beschleunigergehalt entwickelt, bei der Erstarrungsbeschleuniger (EB) mit Na-Fluorescein, auch Uranin genannt, versetzt wird. Dieser Stoff kann mittels Fluoreszenz-Analyse großflächig mit hoher Auflösung detektiert werden und gibt so als Markierstoff Aufschluss über die räumliche Beschleunigerverteilung. Zusätzliche Analysen geben Auskunft über die chemischen Eigenschaften der Beschleunigerlagen.

2. Spritzversuche und optische Lagenbestimmung

Alle Spritzversuche wurden mit einem SIKA PM 500 Spritzmobil durchgeführt, welches mit einer Reihe von zusätzlichen Drucksensoren ausgestattet wurde [1]. Die Betonförderung erfolgte mittels einer Doppelkolbenpumpe und die Beschleunigerförderung zur Düse mithilfe einer Schlauchquetschpumpe. Das Spritzen der Mischungen erfolgte in laut Richtlinie gespritzte Probekisten welche eine Grundfläche von 45 x 45 cm (oben), abgeschrägte Seitenflächen und eine offene Seite (unten) aufweisen. Der Spritzvorgang wurde zusätzlich auch mit einer Hochgeschwindigkeitskamera dokumentiert. Die Bohrkern ($\varnothing=100\text{cm}/150\text{cm}$) wurden nach einem Tag aus den Kisten entnommen und auf Lagen hin optisch untersucht. Dafür wurden die Proben beim Auftrocknen beobachtet und fotografiert, um mögliche Lagen zu erkennen.

Bei der optischen Begutachtung konnten unter anderem bei den Bohrkernen, die am Rand der Kiste entnommen wurden, Betonester dokumentiert werden (Bild 1). Diese Nester entstanden vermutlich durch Rückprall, der an den Kistenseiten und Ecken mit eingespritzt wurde oder aufgrund zu geringen Abstands zwischen den aufgestellten Kisten, wobei hier die Kistenwand einen Spritzschatten bildet. Weitere optisch erkennbare Lagen wiesen meist eine erhöhte Anzahl an sichtbaren Poren, eine rauere Oberfläche und eine längere Auftrocknungszeit auf, wobei die Lagen nicht immer horizontal im Bohrkern vorlagen. Diese Inhomogenitäten werden möglicherweise durch die Inhomogenitäten der Beschleunigerverteilung verursacht (siehe Kapitel 4).

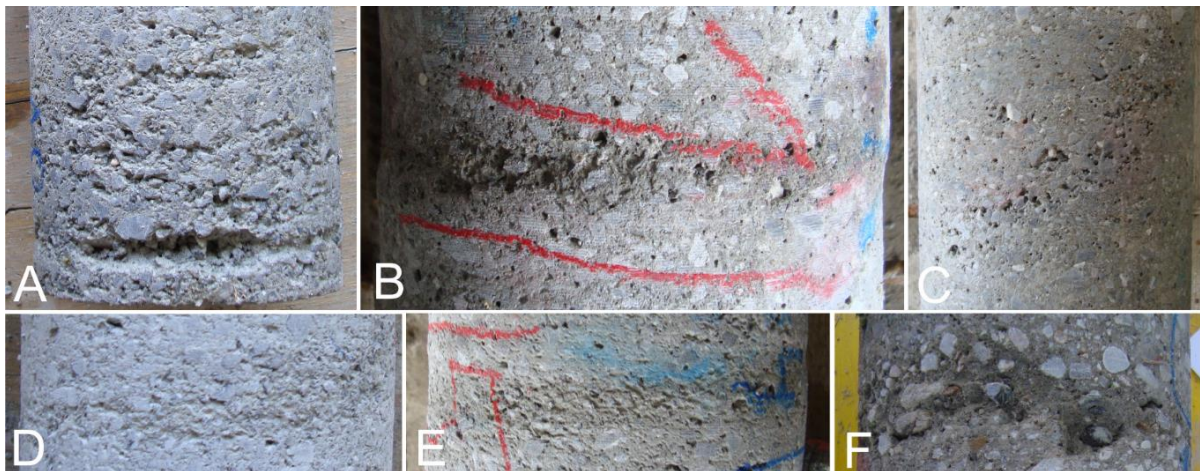


Bild 1: Beispielbilder für optisch dokumentierte Inhomogenitäten/Lagen. (A) Nest-Bildung am Rand der Spritzkiste. (B, F) Lagen fallen vor allem durch ihre langsamere Auftrocknungszeit auf. (D, E) Lagen sind vor allem durch ihre raue Oberfläche erkennbar. (C) schräge Lage mit erhöhter Anzahl an optisch sichtbaren Poren

3. Lagendetektion mittels Bestimmung der Karbonatisierungsfront

Um Inhomogenitäten besser optisch feststellen zu können, wurden bei der Bestimmung der beschleunigten Karbonatisierungsrate Unregelmäßigkeiten bei der Tiefe der Karbonatisierungsfront dokumentiert. Dafür wurden frisch gebohrte Bohrkern ($\varnothing=70$ mm), gewonnen aus unterwassergelagerten Bohrkernen ($\varnothing=100$ mm, mind. Betonalter =56d), zuerst für eine Woche in einer Klimakammer (20 °C und 65 % RH) gelagert. Danach kamen die Proben in einen CO₂ Schrank bei 2 Vol-% CO₂, 65 % RH und 20 °C. Zu jedem Prüfzeitpunkt (28 d, 70 d, 140 d) wurden die Bohrkern doppelt gespalten (Bild 2A). Das bedeutet, dass zuerst ein Stück normal zur Spritzrichtung abgebrochen und dieses nochmals parallel zur Spritzrichtung gespalten wurde (siehe Bild 2B). Mittels 1 %-iger Phenolphthaleinlösung konnten nicht karbonatisierte Bereiche (violett) von karbonatisierten Bereichen (farblos) unterschieden werden. Auffälligkeiten bei der Karbonatisierungstiefe über die Bohrkernlänge wurden dokumentiert.

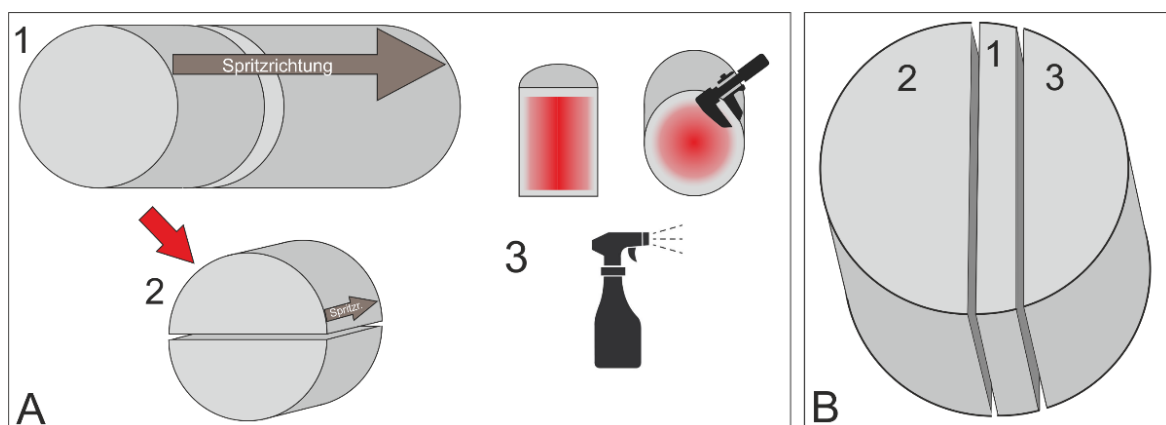


Bild 2: (A) schematische Darstellung des doppelten Brechens für die Überprüfung der Karbonatisierungstiefe und der Lagenbildung. Es wurden sowohl die Bruchflächen normal (1) wie auch die Flächen parallel (2) zur Spritzrichtung auf ihre Karbonatisierungstiefe untersucht (3) (B) Position im Bohrkern der Probenstabe (1) für die Fluoreszenzanalyse. Die Gegenstücke (2, 3) wurden für weitere Untersuchungen verwendet

Bei der Überprüfung der Karbonatisierung zeigte sich, dass die Bruchflächen normal zur Spritzrichtung eine bis zu 4-fach erhöhte Tiefe der Karbonatisierungsfrent im Vergleich zu ungestörten Bereichen auf der parallelen Bruchfläche aufwiesen (Bild 3). Das bedeutet, dass die Bohrkernbeim Spalten bevorzugt bei den Inhomogenitäten – vermutlich bedingt durch eine geringere Festigkeit in diesen Bereichen – brechen. Auch entlang der parallelen Bruchflächen lassen sich Lagen mit erhöhter Karbonatisierungstiefe detektieren. Bereits nach einer Auslagerung von 28 Tagen, sind Unterschiede in der Karbonatisierungstiefe zwischen Inhomogenitäten/Lagen und intakten Bereichen gut erkennbar.

Durch die Feststellung dieser Unterschiede in der Karbonatisierung konnten auch Lagen detektiert werden, die bei der optischen Begutachtung der Bohrkernoberfläche nicht eindeutig erkannt worden waren. Das bedeutet, dass mittels Karbonatisierungsprüfung Inhomogenitäten in Spritzbetonproben zuverlässiger festgestellt werden können als durch die optische Begutachtung. Für eine reine Detektion der Lagen könnte der Test modifiziert werden. Die Proben könnten einen geringeren Hydratationsgrad aufweisen und der CO_2 Gehalt könnte höher gewählt werden.

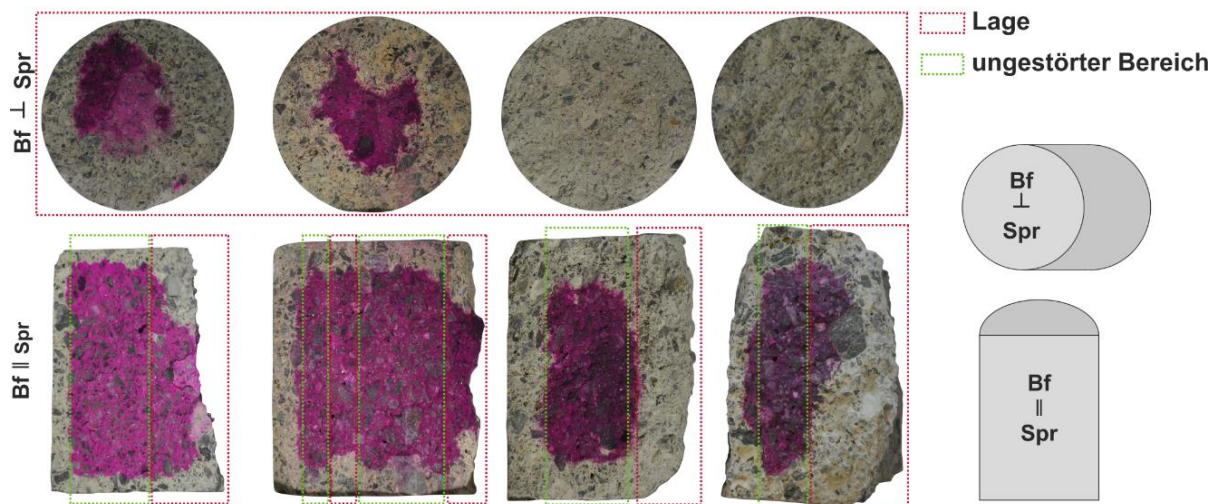


Bild 3: Optische Lagendetektion mittels beschleunigter Karbonatisierung und Phenolphthalein-pH Indikator. Die Bruchflächen parallel zur Spritzrichtung ($Bf \parallel Spr$) zeigen die Abfolge von Bereichen ohne Lage mit geringeren Karbonatisierungstiefen im Vergleich zu den Lagen. Die BF normal zur Spr ($Bf \perp Spr$) sind häufig mit Lagen verbunden und weisen eine größere Karbonatisierungstiefe auf als die ungestörten Bereiche.

4. Detektion der EB- Verteilung im Festbeton mittels Fluoreszenz -Tracer

Bei zwei Großspritzversuchen wurde zur Untersuchung der Lagen aufgrund erhöhter EB-Konzentration der Erstarrungsbeschleuniger mit dem Markierstoff Na-Fluorescein versetzt. Diese Spritzversuche fanden bei der TBA Zams und im Versuchstollen Hagerbach (VSH) statt. In Zams wurde für eine der Spritzbetonmischungen in einem 25 l Kanister zuerst 20 g Uranin in 45 g Wasser gelöst, bevor 28 kg Aluminiumsulfat-Beschleuniger hinzugegeben wurden. Durch Schütteln wurde das gelöste Uranin im Beschleuniger homogen verteilt (Bild 2 A). Die Spritzbetonmischung wurde mit dem Uranin versetzten Beschleuniger in Spritzkisten gespritzt und nach 24 h wurde für die Beschleuniger-Lagenbestimmung ein Bohrkern ($\varnothing = 150 \text{ mm}$) entnommen. Aus dem Bohrkern wurden bei einem Betonalter von 14 Tagen drei Bohrkern ($\varnothing = 50 \text{ mm}$) entnommen, die in der Mitte durchgeschnitten wurden (Kühlung mit Ethanol) und auch die oberen und unteren Enden wurden abgeschnitten. Die Proben wurden lichtgeschützt gelagert, um ein Ausbleichen des fluoreszierenden Uranins zu verhindern.

Bei den Versuchen im Versuchsstollen Hagerbach wurden alle Mischungen mit einem mit Uranin versetzten Beschleuniger gespritzt. Dafür wurde in einem leeren IBC-Behälter in 7 kg Wasser 1,08 kg Uranin gelöst und mit 1200 kg Beschleuniger vermischt (Bild 4 A). Mittels einer Luftlanze wurde der Markierstoff homogen verteilt. Die Bohrkern ($\varnothing=100$) wurden jeweils am nächsten Tag aus den Spritzkisten entnommen. In einem Alter von 7-9 Tagen wurde aus 21 ausgewählten Bohrkernen je eine Scheibe entnommen (Bild 4B), mit Ethanol gekühlt angeschliffen und lichtgeschützt gelagert.

Die Uraninkonzentration wurde mit einem Epifluoreszenz-Abbildungssystem gemessen (ChemiDoc MP). Eine Blaulicht-Lichtquelle und ein 530/28 Emissionsfilter wurden dabei verwendet. Die Belichtungszeit wurde an das Messsignal angepasst und betrug für die Proben von ZAMS III 0,1 sek und für die Proben von Hagerbach- 0.002 sek. Die Daten wurden des Weiteren im Programm ImageLab (V5.2) ausgewertet. Für die Proben von Zams wurde zudem die Messungen zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt, um zu beobachten, wie stark das Messsignal mit zunehmendem Alter abnimmt.

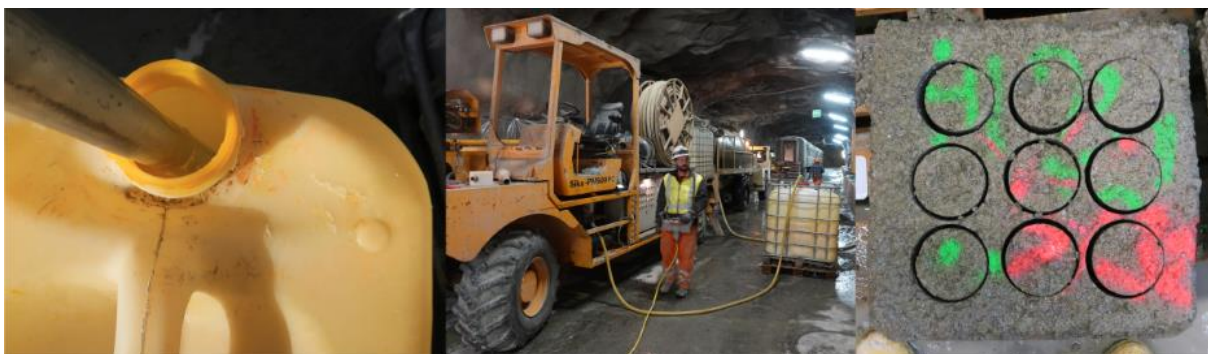


Bild 4: Uranin-Beschleuniger-Gemisch im Kanister (A) und im IBC Behälter (B). Beispielbild für die Bohrkernentnahme (C)

Die Bohrkern von Zams zeigten bei der Messung (Probenalter = 15 d) eindeutig drei Bereiche mit höherer Fluoreszenz und damit mit höherer Uranin- bzw. Beschleunigerkonzentration (Bild 5). Betrachtet man im Vergleich zur Messung die Fotos der Bohrkern (Bild 5 unten), können optisch keine Unregelmäßigkeiten in der Betonstruktur erkannt werden. Nach 57 Tagen hatte die Fluoreszenz des Uranins in den Proben stark abgenommen, jedoch waren die Lagen bei der gleichen Belichtungszeit von 0,1 sek. noch gut sichtbar. Das Uranin ist laut Produktdatenblatt in einer verdünnten Ammoniaklösung ($\text{pH} = 13$) mindestens 1 Monat stabil.

Von den Proben aus Hagerbach wurden 21 Bohrkern mittels Fluoreszenzanalyse untersucht. 9 davon kamen aus einer Spritzkiste. Diese werden in diesem Beitrag als Beispiel gezeigt und sind repräsentativ für alle 21 Messungen (Bild 6). Anhand dieser 9 Bohrkern ist erkennbar, dass sich die einzelnen Beschleunigerlagen nicht über die gesamte Spritzkiste erstrecken. Insgesamt können 3 voneinander abgegrenzte Lagen in der Spritzkiste beobachtet werden.

Vergleicht man die Position der Lagen mit den Bildausschnitten der Videoaufnahme (Bild 7) stimmen diese mit den Änderungen im Spritzstrahl überein: zum Zeitpunkt der ersten Umschaltphase, in der hauptsächlich Beschleuniger aus der Düse kommt (Strahl wird heller), befindet sich der Spritzstrahl vor allem rechts unten bei der Kiste (Lage 1); beim zweiten Hub links unten (Lage 2) und der dritte Hub tritt ein als die Düse kurz vorm Ende von links unten nach oben geführt wurde (Lage 3). Die optischen Beobachtungen der Beschleunigerzugabe während des Spritzvorgangs konnten damit durch die Zugabe und spätere Messung des Tracers bestätigt werden.

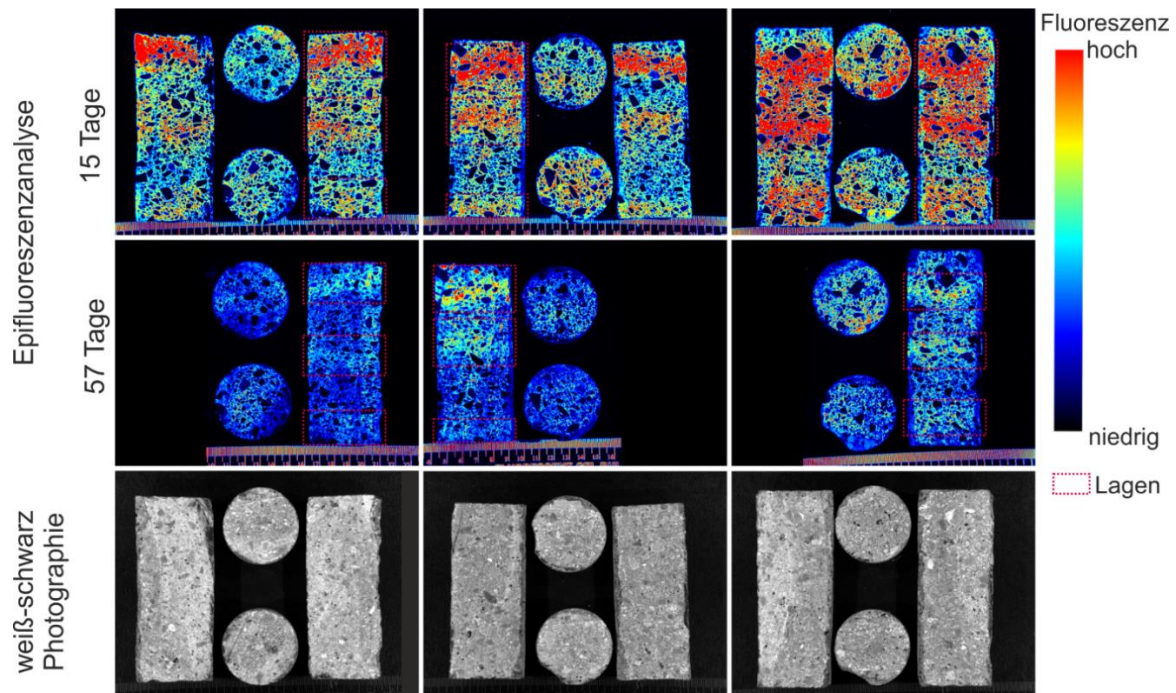


Bild 5: Falschfarbenbilder der Fluoreszenz- Messung der drei Bohrkerne von Zams zu zwei Zeitpunkten.

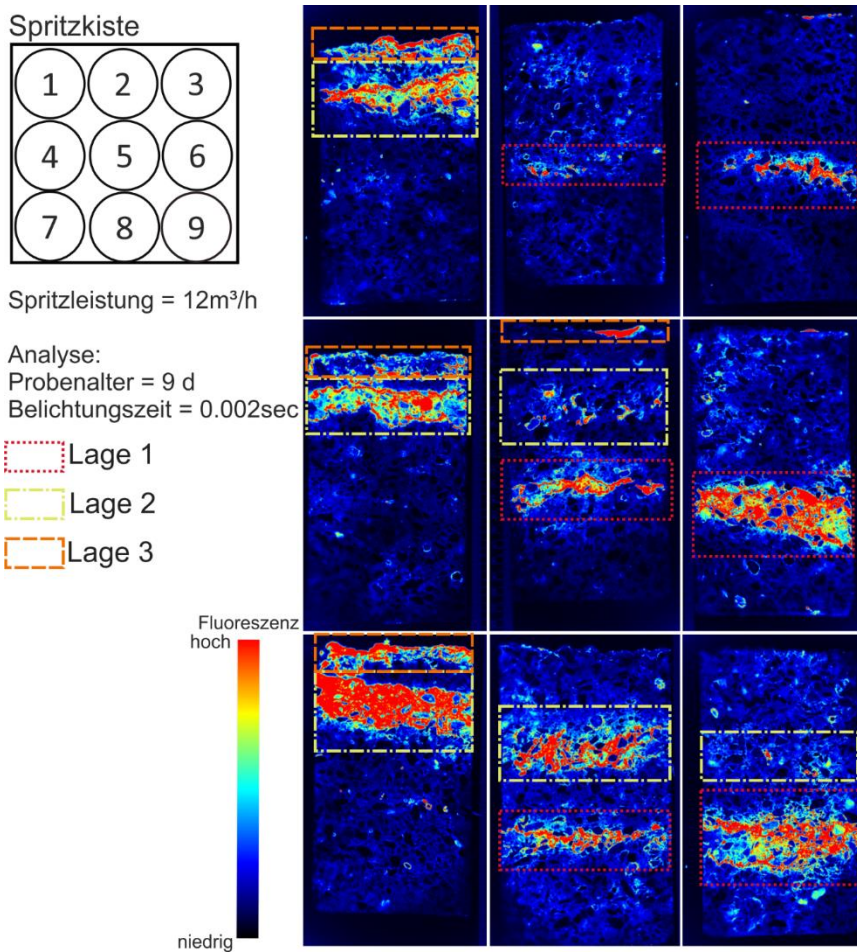


Bild 6: Falschfarbenbild der Fluoreszenzanalysen von 9 Bohrkernen aus den Versuchen Hagerbach, entnommen aus einer Spritzkiste. 3 Lagen können unterschieden werden.

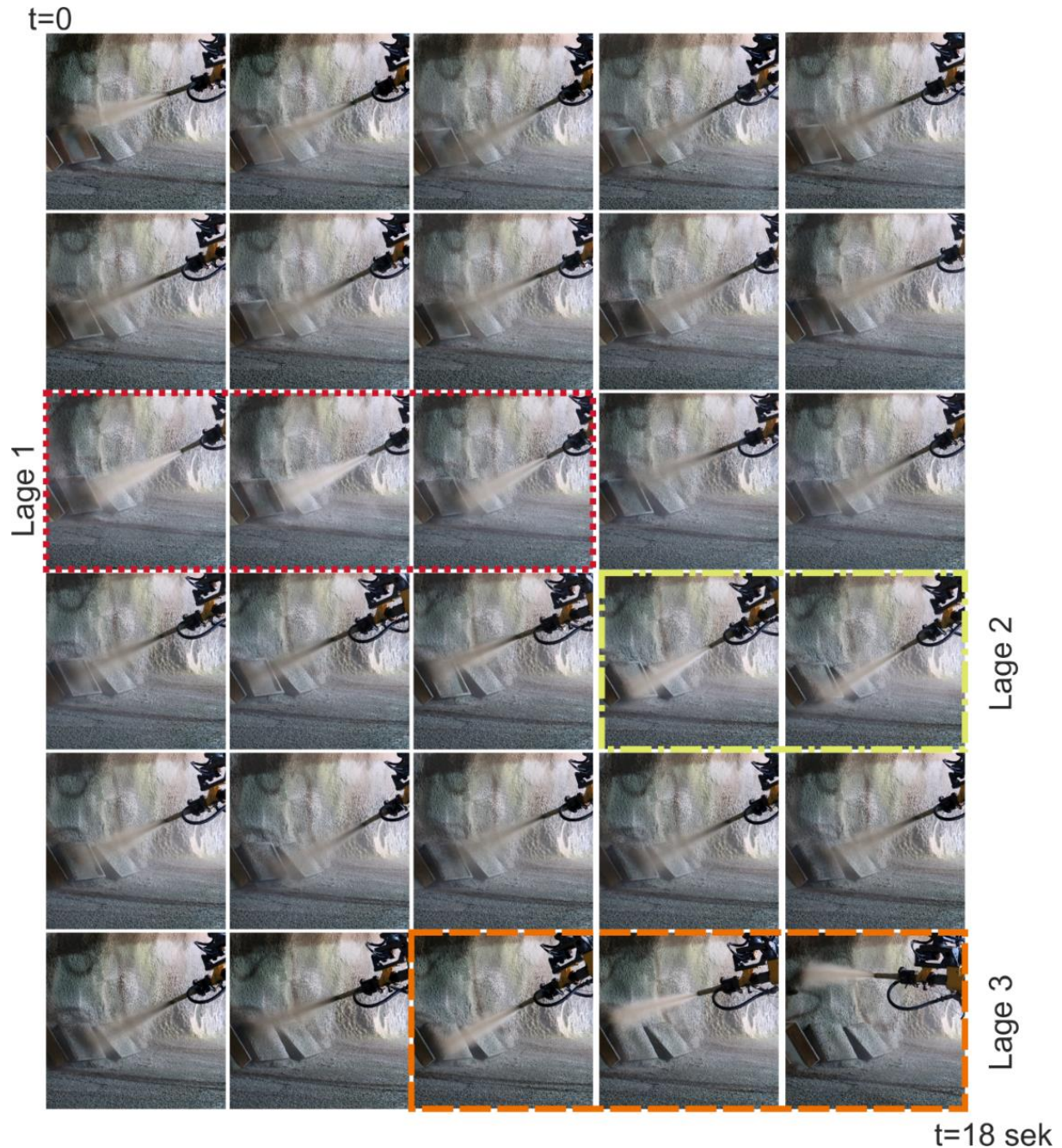


Bild 7: Bildausschnitte aus der Videoaufnahme vom Spritzen der untersuchten Spritzkiste können mit den Lagen in Bild 6 korreliert werden.

5. Chemisch mineralogische Analysen der Beschleunigerlagen

Die Auswirkungen der lokal erhöhten Beschleunigerkonzentrationen auf die chemisch-mineralogischen Eigenschaften wurden mittels Röntgendiffraktometrieanalyse (RDA; PANalytical X'Pert PRO, Co-K α -Strahlung, Universität Graz) und Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse (μ RFA, Bruker M4 Tornado, Universität Innsbruck) untersucht.

Für die RDA wurde mit einem elektrischen Handbohrer (Dremel R3000) aus einem Bohrkern der Versuchsserie Hagerbach jeweils eine Probe aus einem Lagenbereich sowie einem

ungestörten Bereich entnommen. Die Ergebnisse zeigen, dass in den Bereichen der Lagen deutlich mehr Ettringit vorliegt als im ungestörten Bereich (Bild 8). Hingegen konnte im Bereich mit Lage kein Portlandit gemessen werden. Diese Beobachtung ist auch ein Grund für das rasche Fortschreiten der Karbonatisierungsfront in den Bereichen von Lagen.

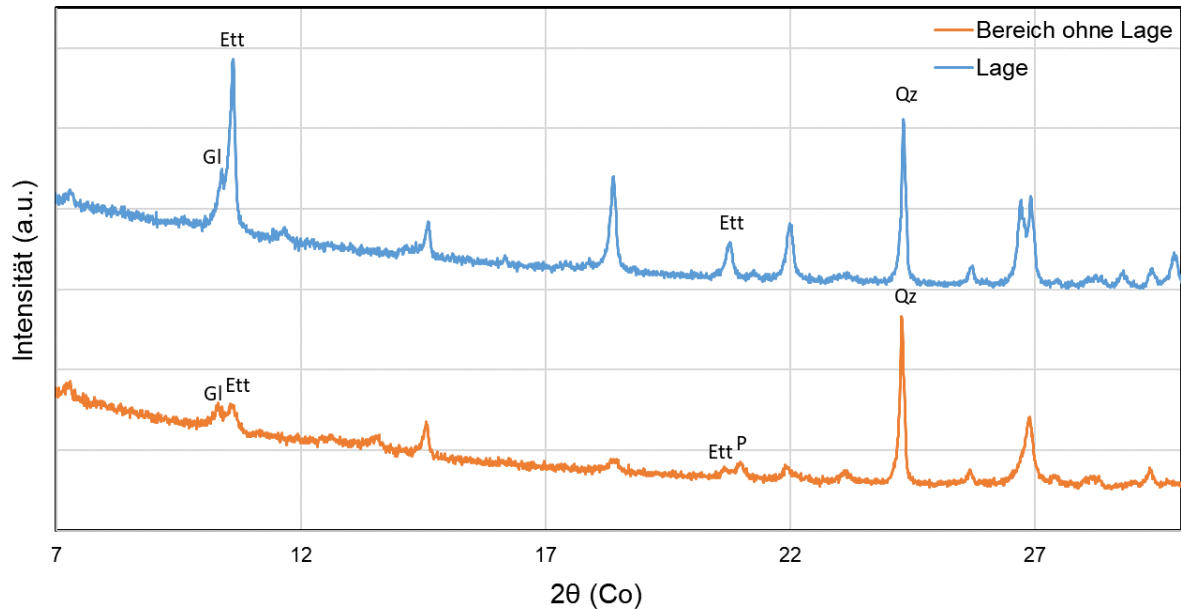


Bild 8: XRD Analyse von Proben aus einem Bereich der Lage und einem Bereich ohne Lage; Gl... Hell- und Dunkelglimmer, Ett... Ettringit, P... Portlandit, Qz... Quarz

Mittels μ RFA wurden bei einer ausgewählten Probe aus der Serie Zams die Elementverteilungen über eine Fläche von 39,5 x 109,2 mm gemessen. Die Probenoberfläche wurde mit einem auf 25 μ m Durchmesser fokussierten polychromatischen Röntgenstrahl aus einer mit 50 kV und 600 μ A betriebenen Rh-Röhre angeregt. Die Analyse der elementcharakteristischen Röntgen-Intensitäten erfolgte energiedispersiv mittels Siliziumdriftdetektor. Die Elementverteilungen zeigen um bis zu 20 % höhere Aluminium- und bis zu 50 Masse-% höhere Schwefelkonzentrationen im Bereich der Lagen (Bild 9). Die gemessene durchschnittliche chemische Zusammensetzung des Spritzbetons ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des Spritzbetons. Die Quantifizierung basiert auf unkalibrierte Fundamentalparameter mit einer relativen Ungenauigkeit von 5 bis 10%.

Oxide	Spritzbeton [M.%]
MgO	23,2
Al ₂ O ₃	2,2
SiO ₂	7,4
SO ₃	0,4
K ₂ O	1,0
CaO	63,2
Fe ₂ O ₃	2,1

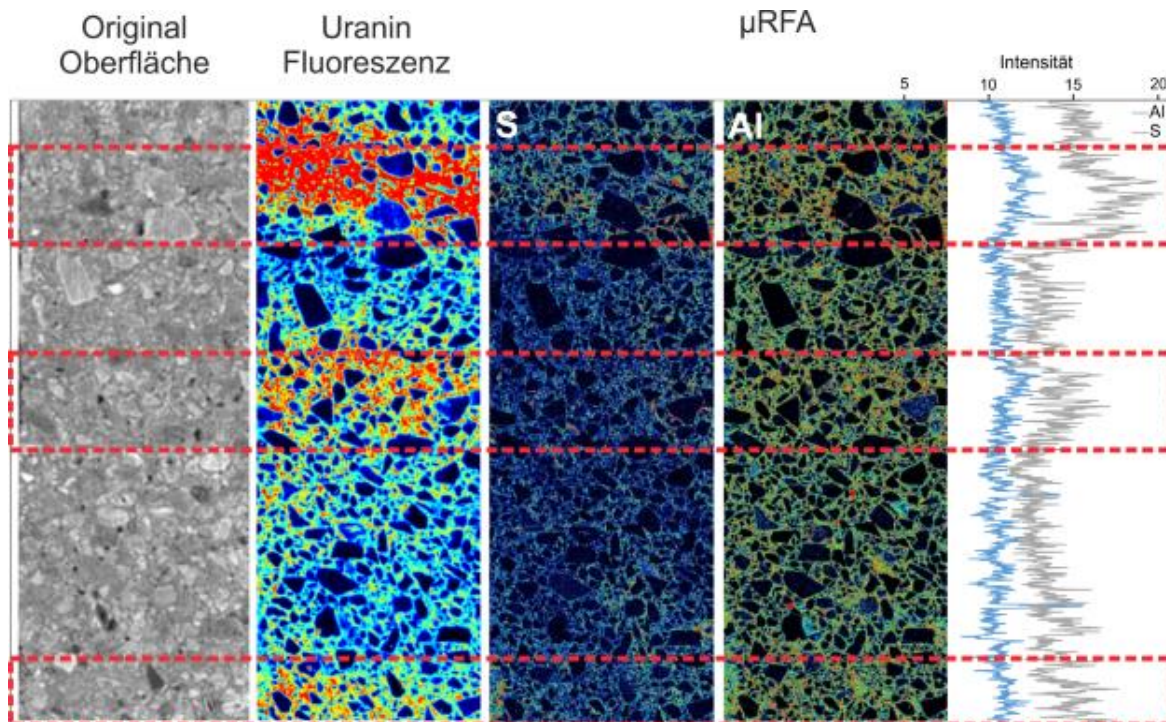


Bild 9: Vergleich des visuellen Ergebnisses aus der Epifluoreszenz Analyse mit den charakteristischen Röntgenstrahlungs-Intensitäten für S und Al aus der μ RFA-Analyse

6. Zusammenfassung

Verschiedene Laboruntersuchungen an Bohrkernen zeigen

- Eine optische Begutachtung von Spritzbetonbohrkernen zeigt Inhomogenitäten wie z.B. Spritzlagen oft nicht zuverlässig an. Hingegen können mittels beschleunigter Karbonatisierung Lagen bzw. Inhomogenitäten zuverlässig detektiert werden.
- Die Verteilung des Beschleunigers im Spritzbeton kann durch die Zugabe von Uranin zum Beschleuniger und anschließender Epifluoreszenzanalyse visualisiert werden. Die Belichtungszeit muss auf die Signalstärke abgestimmt werden, welche vom Alter der Probe und der verwendeten Uraninkonzentration abhängt. Die Ergebnisse der Fluoreszenzanalysen bestätigen die optischen Beobachtungen des Spritzvorgangs (Video): durch die Hubwechsel-Phasen kommt es beim Umschalten der Betonpumpe in kurzen Zeitabschnitten zum Spritzen von Beschleuniger ohne Beton, was Lagigkeit im Spritzbeton verursacht.
- XRD und μ RFA Untersuchungen dieser Inhomogenitäten zeigen eine erhöhte Schwefel- und Aluminiumkonzentration, sowie einen erhöhten Gehalt an Ettringit.
- Eine praxisgerechte Prüfung wäre über einen Schnelltest zur Karbonatisierung möglich.

Derzeit ist noch nicht klar, ab welchen Konzentrationsunterschieden diese Inhomogenitäten kritisch werden. Zahlreiche Laboruntersuchungen zur Dauerhaftigkeit geben aber einen Hinweis, dass Inhomogenitäten durchaus schlagend für das Ergebnis werden können. In Zukunft sollte dieser Problematik mehr Augenmerk gewidmet werden. Die Qualität von Spritzbeton wird durch die maschinenseitig steuerbare Gleichmäßigkeit der Förderströme, die handwerklich richtige Düsenführung und das optimal zusammengesetzte Mischgut beeinflusst [2].

7. Danksagung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des FFG-ÖBV-Forschungsprojekts ASSpC (Entwicklung neuer dauerhafter und nachhaltiger Spritzbetone) von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG 856080) und industriellen Partnern gefördert. Die Autoren danken für diese Unterstützung. Wir danken auch Sebastian Jehle (Sika) für die großartige Unterstützung bei den Großspritzversuchen.

8. Literatur

- [1] Juhart, J., Briendl, L., Sakoparnig, M., Lindlar, B., Röck, R., Johannes, F., Florian, M., Kusterle, W.: Lagenbildung - Teil 1: Untersuchung zur Förderung von Nass-Mischgut und zur Lagenbildung im aufgetragenen Spritzbeton. In: Galler, R., Goger, G., Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton Tagung 2020, Alpbach, Österreichische Bautechnikvereinigung, Wien (2020).
- [2] Kusterle, W., Jäger, J., John, M., Neumann, C., Röck, R.: Spritzbeton im Tunnelbau. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Betonkalender 2014, Unterirdisches Bauen - Grundbau, Ernst & Sohn, 2014.
- [3] Briendl, L.G., Mittermayr, F., Baldermann, A., Steindl, F.R., Sakoparnig, M., Letofsky-papst, I., Galan, I.: Early hydration of cementitious systems accelerated by aluminium sulphate: Effect of fine limestone. *Cement and Concrete Research*, 134 (2020), 106069.
- [4] Saade, M.R.M., Passer, A., Mittermayr, F.: (Sprayed) concrete production in life cycle assessments: a systematic literature review. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 25 (2020), 188–207.
- [5] Niu, D.T., Wang, Y. De, Ma, R., Wang, J. Bin, Xu, S.H.: Experiment study on the failure mechanism of dry-mix shotcrete under the combined actions of sulfate attack and drying-wetting cycles. *Constr. Build. Mater.*, 81 (2015), 74–80.
- [6] Thomas, A.: *Sprayed concrete lined tunnels: an introduction*. T & F Books UK, 1. edition. ISBN 97804153686432009.
- [7] Ginouse, N., Jolin, M.: Investigation of spray pattern in shotcrete applications. *Constr. Build. Mater.*, 93 (2015), 966–972.
- [8] Ginouse, N., Jolin, M.: Mechanisms of placement in sprayed concrete. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 58 (2016), 177–185.
- [9] Jolin Beupré, M.: Understanding wet-mix shotcrete; mix design, specifications and placement. *Surf. Support Min.*, (2004), 263–267.
- [10] ÖVBB: Richtlinie Spritzbeton. Österreichische Bautechnik Vereinigung, Wien (2009), 105.
- [11] ACI 506.2-95: Specification for Shotcrete (1995), 1–8.

Zu den Autoren

Marlene Sakoparnig, M.Sc.

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

Ao. Univ.-Prof. Dr. Günther Koraimann

Studium der Biologie an der Universität Graz, Doktorat an der Med Uni Graz, ab 1986 am Institut für Mikrobiologie der Universität Graz, seit 1999 Dozent für Mikrobiologie, seit 2003 am Institut für Molekulare Biowissenschaften der Universität Graz.
guenther.koraimann@uni-graz.at

Dipl.-Ing. Lukas Briendl

Studium der Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz, seit 2018 Universitätsassistent am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit TVFA der TU Graz.

lukas.briendl@tugraz.at

Florian Roman Steindl, MSc

Studium der Erdwissenschaften (Mineralogie und Kristallographie) an der Universität Wien, seit 2017 Doktoratsstudent und Universitätsprojektassistent an der TU Graz

florian.steindl@tugraz.at

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 bei Sika AG.

lindlar.benedikt@ch.sika.com

Dr. rer. nat. Thomas Angerer

Studium der Geologie-Paläontologie in Frankfurt am Main, Dissertation in Heideberg, zw. 2008 und 2014 Post-doc an der UWA Perth, seit 2015 am Institut f. Mineralogie der Universität Innsbruck.

Thomas.Angerer@uibk.ac.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 des Bauingenieurwesens 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. 2001 bis 2020 Prof. für Baustoffkunde an der OTH Regensburg

wolfgang@kusterle.net