
ASSpC- EIN FORSCHUNGSPROGRAMM FÜR DEN SPRITZBETON VON MORGEN

ASSpC – SHOTCRETE RESEARCH FOR THE NEEDS OF TOMORROW

Wolfgang **Kusterle**, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Deutschland
Maria **Thumann**, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Deutschland
Florian **Mittermayr**, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz, Österreich

Spritzbeton wird im Tunnelbau als temporäre und permanente Stütz- und Ausbaumaßnahme eingesetzt. Mit der Einführung der alkalifreien Spritzbeton-Technologie wurde um 2004 ein großer Qualitätssprung erzielt. Trotzdem besteht noch Optimierungsbedarf. Alle Bauwerke sollten heute nachhaltig und dauerhaft erstellt werden. Spritzbeton sollte daher aus möglichst umweltneutralen Stoffen hergestellt werden und auch in aggressiver Umgebung dauerhaft, ohne ungünstige Auswirkungen auf das Gesamtbauwerk, seine Aufgaben erfüllen. Das kann nur mit optimierten Rezepturen unter Einsatz ausgewählter Ausgangsstoffe realisiert werden. Das von der FFG in Österreich geförderte Forschungsprogramm „Entwicklung neuer dauerhafter und nachhaltiger Spritzbetone“ (**A**dvanced and **S**ustainable **S**prayed **C**oncrete) setzt genau hier an.

*Shotcrete (sprayed concrete) is used in tunnelling as initial and permanent lining. Due to the introduction of alkali free shotcrete technology around 2004 an improved quality could be realized. But there is still room for farther improvements. Nowadays, all constructions should be sustainable and durable. Using environmentally compatible constitutive materials, shotcrete should resist harsh environments without any unfavourable unknown impact on the construction. This target can only be reached by using sustainable constitutive materials and optimized mix design. The research project **Advanced and Sustainable Sprayed Concrete**, funded by the Austrian Research Promotion Agency FFG, aims at such advanced shotcrete technology.*

1. Einleitung [1]

Die Technologie des Spritzbetons im Tunnel- und Untertagebau hat in Österreich in Verbindung mit der „Neuen Österreichischen Tunnelbauweise“ NÖT [2] einen traditionell über die Jahre entwickelten hohen Qualitätsstandard. Österreichische Unternehmen sind führend in ihrer Anwendung und damit international erfolgreich tätig. Das österreichische Regelwerk für Spritzbeton ist vorbildhaft [3].

Heute rücken aber vermehrt Dauerhaftigkeitsaspekte in den Vordergrund. Vor wenigen Jahren wurden aggressive Umweltbedingungen teilweise unterschätzt. Schleichende Schäden können jedoch zu unerwünschten Einschränkungen führen.

Davon betroffen ist nicht nur der Spritzbeton, sondern das gesamte Bauwerk. Dies bedeutet für die Betreiber und Nutzer von unterirdischen Infrastrukturbauten (Tunnel, Stollen, Schächte, Rohrleitungen, etc.) ein zunehmend schwer kalkulierbares Risiko, Einschränkungen in der Verfügbarkeit und im Fall von Schäden in sehr kostenintensive Instandsetzungsmaßnahmen investieren zu müssen.

Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung und des Klimaschutzes sollen Ressourcen effizient und nachhaltig eingesetzt werden. Dies gelingt besonders effektiv, wenn die Lebensdauer der Tunnelbauwerke verlängert werden kann.

Es ist deshalb ein nächster Entwicklungsschritt in der Spritzbetontechnologie erforderlich (Bild 1), um den genannten Herausforderungen zu begegnen und durch entsprechende technologische Weiterentwicklungen auch umzusetzen.

Dieses Ziel wird unter dem Begriff „ASSpC - Advanced and Sustainable Sprayed Concrete“ vereint.



Bild 1: Die Spritzbetonentwicklung der letzten 35 Jahre in Stichworten; EB Erstarrungsbeschleuniger; Hochleistungsverflüssiger vom Typ PCE, RV reduziertes Versinterungspotential, BBG Brandbeständigkeit im Großversuch

2. Das Forschungsprogramm

Das Forschungsprogramm ASSpC wurde von der Österreichischen Bautechnikveranstaltungs GmbH, einer Tochter der Österreichischen Bautechnikvereinigung (öbv) im Programm Collective Research beim FFG eingereicht. Es wird von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG 856080) und Beiträgen der industriellen Partner gefördert. Dafür möchten wir uns an dieser Stelle recht herzlich bedanken. Vier Forschungseinrichtungen und zahlreiche Mitglieder der öbv sind im Forschungskonsortium vertreten (Bild 2).

Das Forschungsprogramm begann im Juli 2016 und wird in 4 Jahren abgewickelt. Die Gesamtkosten von etwa 2 Mio € dienen zur Versuchsdurchführung und hauptsächlich zur Finanzierung von 4 Dissertanten und 6 Postdocs an den universitären Forschungseinrichtungen.

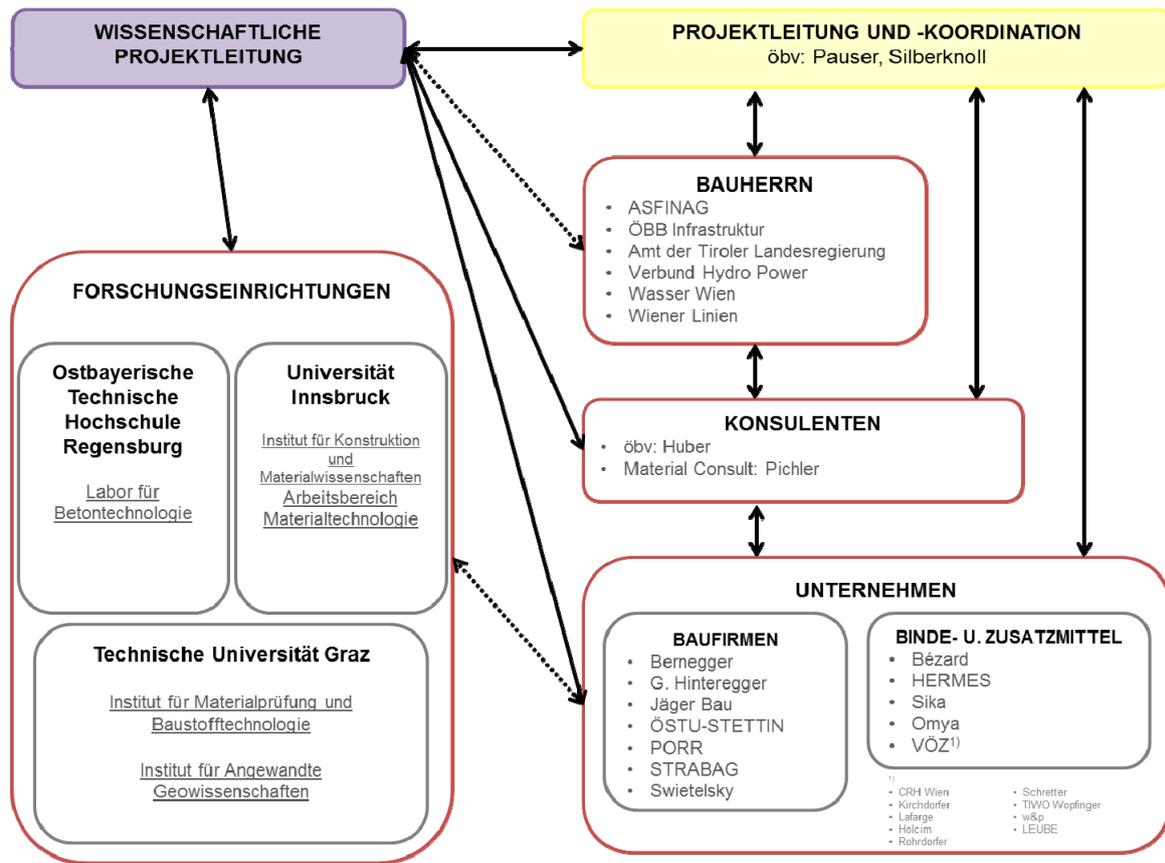


Bild 2: Organisationsschema ASSpC

3. Fragestellung und Forschungsziele

Die meisten Spritzbetone im österreichischen Tunnelbau haben temporäre Aufgaben zu erfüllen. Trotzdem sollen sie gewisse Dauerhaftigkeitsanforderungen erfüllen und ein geringes Versinterungspotential aufweisen sowie bei der Herstellung der Ausgangsstoffe den CO₂-Ausstoß geringhalten (Bild 3). Demgegenüber werden im Neubau und bei Instandsetzungen immer mehr Spritzbetone auch permanent eingesetzt. Diese Spritzbetone sollen zusätzlich chemischen Angriffen bis zu 200 Jahre widerstehen können.

Beide Anforderungen können mit recht ähnlichen Maßnahmen erfüllt werden. Die Rezepturen müssen chemisch beständige Bindemittel mit niedrigem Wasseranspruch enthalten. Die Kornabstufung der Bindemittel und Gesteinskörnungen ist für eine dichte Packung zu optimieren. Darüber hinaus müssen diese Grundmischungen 3 bis 6 Stunden verarbeitbar bleiben und die Frühfestigkeitsklasse J2 zielsicher erreichen. Der Einfluss von Zusatzmitteln ist bei den Nachhaltigkeitsbetrachtungen mit zu berücksichtigen.

Üblicherweise haben derzeitige Spritzbetone eine etwas gebremste Festigkeitsentwicklung zwischen 3 bis etwa 6 Stunden. Ob hier Abhilfe geschaffen werden kann, soll ebenso untersucht werden wie der bei manchen Angriffen angenommene ungünstige Einfluss von kalkhaltigen Sanden auf die Dauerhaftigkeit. Maschinenoptimierungen und der Einsatz von Fasern sind nicht Gegenstand dieses Forschungsprogramms.

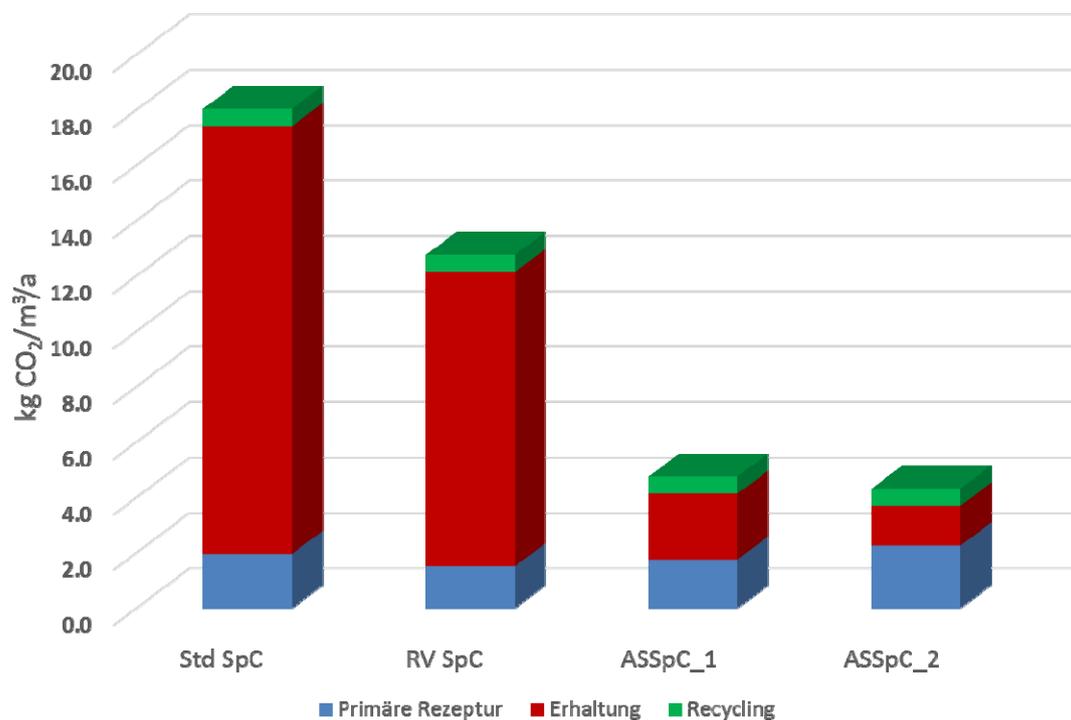


Bild 3: Life cycle performance von unterschiedlichen Spritzbetonrezepturen nach dem Ansatz in [4 bis 6] GWP für eine Standardrezeptur (Std SpC) mit 420 kg/m³ CEM II A-S 42,5R und 10% Zusatzmittel; (Herstellung: 376 kg/m³ CO₂), gerechnet auf eine Nutzungsdauer von 200 Jahren; gegenübergestellt einem Spritzbeton RV und zwei neu zu entwickelnden Spritzbetonen: ASSpC_1 optimiert auf den CO₂-Verbrauch für die Rezeptur bei der Herstellung, ASSpC_2 optimiert auf maximale Dauerhaftigkeit.

Ziel des Forschungsprogramms sind nicht neue Produkte, sondern Erkenntnisse zu Reaktionsabläufen mit verschiedenen Produktgruppen. Die daraus resultierenden grundlegenden Erkenntnisse werden später zu weitergehenden Entwicklungen führen.

4. Forschungsansätze

Die Forschungsaktivitäten beginnen mit Voruntersuchungen mit klassischen Labormethoden, Kleinspritzversuchen mit dem MiniShot System und enden dann bei Großspritzversuchen. Sie werden begleitet von Untersuchungen zu Reaktionsmechanismen, Rheologie, Frühfestigkeitsentwicklung und Auslagerungsversuchen unter gezielten Bedingungen (Bild 4).

Den bisher üblichen Bindemittelkombinationen aus CEM I + AHWZ-Kombi Typ aus Hütten-sand, Flugasche und Kalksteinmehl, werden Mischungen aus Klinker und mehreren gezielt abgestimmten Zusatzstoffen gegenübergestellt. Die erforderlichen Zusatzmittel werden auf diese Mischungen abgestimmt.

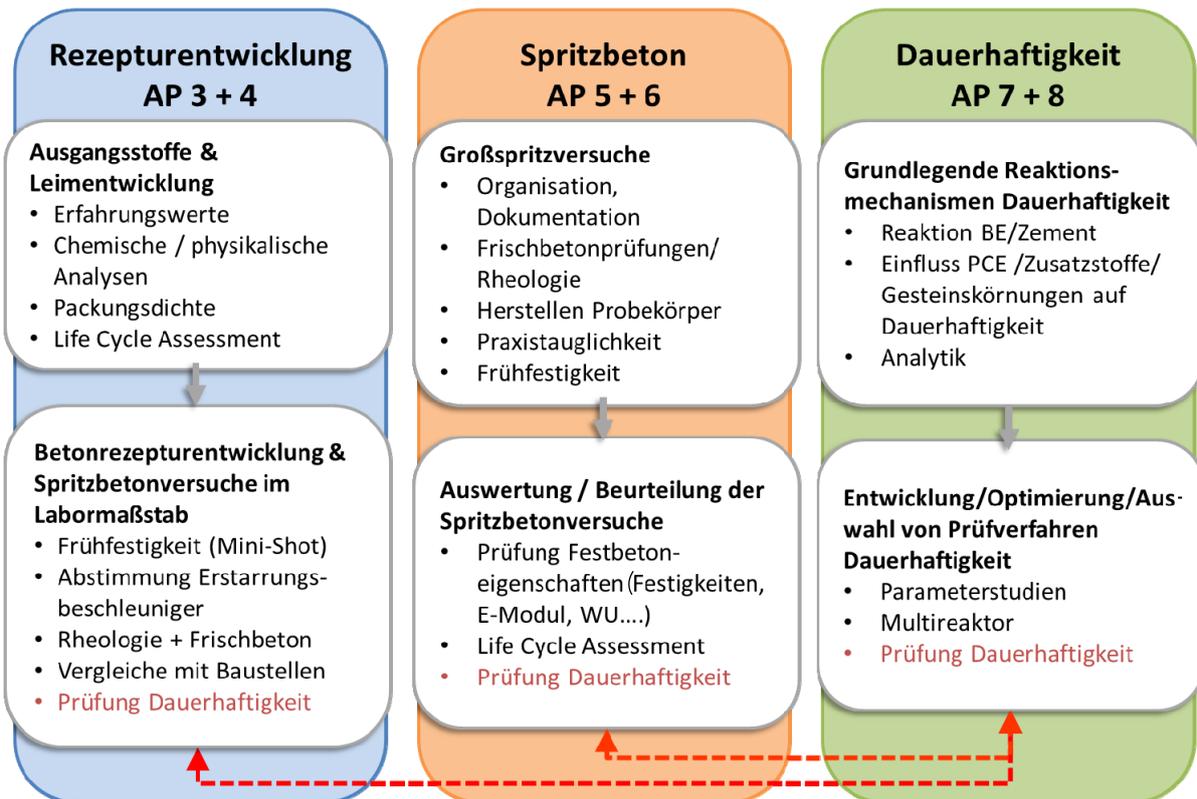


Bild 4: Übersicht Arbeitspakete ASSpC

5. Chemische Angriffe

Folgende Angriffsmechanismen werden untersucht:

5.1 Lösender Angriff

Bei lösendem Angriff können chemische Reaktionen die Auflösung von Zementstein an der Oberfläche bewirken. Es handelt sich um die oberflächennahe Umwandlung und den Abtrag von schwerlöslichen in leicht lösliche Verbindungen. Gesteinskörnungen an der Oberfläche eines Betons können herausbrechen und der Beton wird abgetragen [7].

Im Tunnelbau wird ein lösender Angriff im Beton durch kalklösende Kohlensäure oder weiches Wasser hervorgerufen.

5.2 Versinterungen

Bei Versinterungen handelt es sich in erster Linie um Kalkablagerungen, die im sekundären Entwässerungssystem nicht druckwasserhaltender Tunnelbauwerke auftreten können. Versinterungen können durch die zementösen Bindemittel begünstigt werden und führen immer zu hohen Instandhaltungskosten [8]. Der eventuelle Beitrag von zementösen Baustoffen wird nach öbv-Merkblatt Festlegung des Reduzierten Versinterungspotential [9] beurteilt.

5.3 Sulfatangriff und Thaumasil-Sulfatangriff (TSA)

In unterirdischen Bauten stellt der Sulfatangriff, vor allem der Thaumasil-Sulfatangriff (TSA), ein schwerwiegendes Problem dar. Derzeit kann laut Richtlinie Spritzbeton [3] bei einer Sulfatkonzentration >1500 mg/l im Bergwasser Spritzbeton nicht mehr als dauerhafte

Stützmaßnahme eingesetzt werden. Vor allem TSA wird durch lokal auftretende geologische und hydro-chemische Faktoren stark beeinflusst, grundsätzlich muss aber festgehalten werden, dass es trotz intensiver Forschungsaktivitäten noch immer keine eindeutige Klarheit bezüglich der Vermeidung von Schäden durch TSA gibt. Dies zeigt sich durch die Vielzahl an wissenschaftlichen Publikationen und die darin enthaltenen Diskussionen, Unklarheiten und Limitationen (z.B. [10-12]).

5.4 Weitere chemische Wechselwirkungen

Weiter Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit umfassen die Themenkreise Karbonatisierung, Chlorid und Porosität. Für manche Einsätze im Portalbereich oder bei Hangsicherungen ist auch Frostbeständigkeit XF3 gefordert, die als Vergleichsuntersuchung mitgenommen wird.

6. Nachhaltigkeit

Gemäß EU-Bauproduktenrichtlinie [13] müssen Bauwerke als Ganzes und in ihren Teilen für deren Verwendungszweck tauglich sein, wobei insbesondere der Gesundheit und der Sicherheit der während des gesamten Lebenszyklus der Bauwerke involvierten Personen Rechnung zu tragen ist. Bauwerke müssen diese Grundanforderungen bei normaler Instandhaltung über einen wirtschaftlich angemessenen Zeitraum erfüllen. Diese Grundanforderungen beinhalten explizit die Nachhaltigkeit, wobei gemäß der nachhaltigen Nutzung der natürlichen Ressourcen ein Bauwerk derart entworfen, errichtet und abgerissen werden muss, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden.

Sowohl bezüglich der Umweltwirkungen (CO₂ Emission und Primärenergiebedarf) als auch in Bezug auf die Dauerhaftigkeit ist es vorteilhaft das Bindemittel zu optimieren. Im Forschungsprojekt wird angestrebt durch eine erhöhte Dauerhaftigkeit die Umweltbilanz der Spritzbeton-Rezepturen noch weiter zu verbessern.

7. Verarbeitbarkeit und Frühfestigkeit

Dauerhaftere und nachhaltigere Mischgüter dürfen nicht schlechter verarbeitbar sein oder gespritzt geringere Frühfestigkeiten erzielen, wie übliche Mischungen.

Durch das MiniShot-Verfahren steht ein Laborspritzverfahren zur raschen kontinuierlichen Frühfestigkeitsmessung und Herstellung von Proben für Dauerhaftigkeitsuntersuchungen zur Verfügung [14].

Die Prüfung der Verarbeitungseigenschaften wird durch ein Gleitrohr Rheometer (Sliper) zur Abschätzung des jeweiligen Pumpendruckes ergänzt.

8. Forschungsstand

Im ersten Forschungsjahr wurden bereits einige interessante Ergebnisse erzielt. Dies sind aber Puzzle-Steine eines großen Mosaiks, das sich erst nach 4 Jahren gänzlich zusammenfügen sollte. Nach dem ersten Versuchsjahr können folgende, vorerst noch unverbindliche, Ergebnisse festgehalten werden

- Trockenspritzbeton: Spritz-Bindemittel kann ohne Beeinflussung der Frühfestigkeitsentwicklung und Verarbeitbarkeit teilweise mit Zusatzstoffen ersetzt werden. Auswirkungen auf Dauerhaftigkeit sind in Prüfung.
- Versuche an Prismen zeigen, dass nicht alle Verflüssiger ganz von der Wirkung des EB übersteuert werden. In Großspritzversuchen noch zu verifizieren.
- Nachhaltigkeitsbetrachtungen sind stark vom gewählten Ansatz abhängig.

- Das Konzept der „Dichten Packung“ ist effektiv bei Spritzbeton-Leimen und Mörtelversuchen. Im Spritzversuch noch zu verifizieren.
- Feinstkalzit könnte helfen die Frühfestigkeiten anzuheben. Auswirkung auf die Dauerhaftigkeit noch in Untersuchung.
- Reduktionen im Klinkergehalt und damit verbundene höhere Beschleunigerdosierungen können zu Festigkeitsabfällen gegenüber dem Nullbeton führen.
- Das MiniShot Spritzsystem samt dem Pulsment Auswertesystem sind ein effektives Hilfsmittel fürs Labor.
- Der Sliper ist ein nützliches Gleitrohr Rheometer zur Abschätzung der Verarbeitung
- Dauerhaftigkeitszwischenergebnisse neuer Mischungen sind durchaus positiv.

In diesem Tagungsband erscheinen drei Beiträge mit ersten Forschungsergebnissen [15-17].

9. Zusammenfassung

Zukünftig müssen die Rezepturen für Spritzbeton besser an heutige Herausforderungen angepasst werden. Es zeigen sich zunehmend Schäden an bestehenden Betonbauwerken auf Grund von Sulfatangriff und/oder Sulfat/Thaumasit-Angriff. Problematisch ist auch der hohe Erhaltungsaufwand durch Versinterungen in den Drainageleitungen von Tunnelbauwerken. Die Ursache liegt in der eingeschränkten Beständigkeit des Spritzbetons durch chemischen Angriff unterschiedlicher Wässer. Es gilt neue Spritzbetonrezepturen mit erhöhter Dauerhaftigkeit zu entwickeln und dabei auch den Aspekt der Life Cycle Performance zu berücksichtigen. Das FFG Forschungsprogramm ASSpC sucht in systematischen Untersuchungen Lösungen für einen dauerhaften und nachhaltigen Spritzbeton zu finden. Mit dem vorgeschlagenen Forschungsprojekt kann somit ein entscheidender Entwicklungsschritt in der Spritzbetontechnologie getan werden, um sie den Herausforderungen unserer Zeit anzupassen. Eine Anzahl junger Forscher wird auch vertiefte Kompetenzen für zukünftige Verbesserungen an Spritzbeton und Beton aufbauen.

10. Literatur

- [1] Pauser, M., Mittermayr, F.; Kusterle, W.: Entwicklung neuer dauerhafter und nachhaltiger Spritzbetone. Forschungsantrag FFG Collective Research, unveröffentlicht, 74 S., 213 Zitate, 2016.
- [2] Stipek, W., Galler, R. und Bauer, M.: 50 Jahre NATM - Erfahrungsberichte. 2012, Wien: ITA - Austria. 236.
- [3] ÖVBB: Richtlinie Spritzbeton. Österreichische Vereinigung für Bautechnik, Wien, 2009.
- [4] Passer, A., Klammer, G., Fischer, G. und Juhart, J.: Review of LCA for concrete and its applicability to Austria Short Summary. In: Passer, A., Höfler, K., und Maydl, P. (Hrsg.): Sustainable Buildings, Construction Products & Technologies. 2013. p. 1557-1562.
- [5] ÖNORM EN ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. 2006.
- [6] ÖNORM EN ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. 2006.
- [7] Rosenqvist, M., Bertron, A., Fridh, K., und Hassanzadeh, M.: Concrete alteration due to 55years of exposure to river water: Chemical and mineralogical characterisation. Cement and Concrete Research, 2017. 92: p. 110-120.
- [8] Pichler, W., Wagner, H. und Insam, R.: Spritzbeton mit reduziertem Versinterungspotential- Praktische Anwendung auf österreichischen Großbaustellen. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Tagung 2015. Tagungs-CD der 11. Fachtagung in Alpbach, 29.+30. 1. 2015, Eigenverlag, p. 11, 2015.

- [9] ÖBV:
Merkblatt Festlegung des Reduzierten Versinterungspotential. Österreichische Vereinigung für Bautechnik, Wien, 2012.
- [10] Bellmann, F.:
On the formation of thaumasite $\text{CaSiO}_3\text{-CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-15H}_2\text{O}$: part III. *Advances in Cement Research*, 2007. 19(4): p. 139-146.
- [11] Crammond, N.:
The occurrence of thaumasite in modern construction - a review. *Cement and Concrete Composites*, 2002. 24(3-4): p. 393-402.
- [12] Neville, A.:
The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*, 2004. 34(8): p. 1275-1296.
- [13] Rat, E.P.u.:
Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten. 2011.
- [14] Lindlar, B., Stenger, C., und Lootens, D.:
Miniaturisiertes Laborspritzverfahren für Spritzbeton – neue Möglichkeiten der Produktentwicklung, Rezepturoptimierung und Qualitätskontrolle. In: Kusterle, W. (Hrsg.): *Spritzbeton-Tagung 2015, Tagungs-CD der 11. Fachtagung in Alpbach, 29.+30. 1. 2015*, Eigenverlag 2015.
- [15] Stauffacher, A., Galan, I., Juilland, P., Thumann, M., Stenger, Ch., Baldermann, A., Mittermayer, F., Lindlar, B., Kusterle, W.:
Einfluss von Hüttensand und ultrafeinem Kalksteinmehl auf die Hydratation von Jungem Spritzbeton. In: Kusterle, W. (Hrsg.): *Spritzbeton-Tagung 2018, Tagungs-CD der 12. Fachtagung in Alpbach, 11.+12.1.2018*, Eigenverlag, 2018.
- [16] Juhart, J., Briendl, L., Mittermayr, F., Thumann, M., Röck, R., Kusterle, W.:
Optimierte Eigenschaften von Spritzbeton durch kombinierte Zusatzstoffe. In: Kusterle, W. (Hrsg.): *Spritzbeton-Tagung 2018, Tagungs-CD der 12. Fachtagung in Alpbach, 11.+12.1.2018*, Eigenverlag, 2018.
- [17] Sakoparnig, M., Baldermann, A., Thumann, M., Mittermayer, F., Kusterle, W.:
Bestimmung der experimentellen Calcium-Auslaugung an Spritzbetonbohrkernen: Methodenvergleich und Update. In: Kusterle, W. (Hrsg.): *Spritzbeton-Tagung 2018, Tagungs-CD der 12. Fachtagung in Alpbach, 11.+12.1.2018*, Eigenverlag, 2018.

Zu den Autoren

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 Professor für Baustoffkunde an der Ostbayerischen Technischen Hochschule in Regensburg
wolfgang.kusterle@oth-regensburg.de

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. 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