

# Emissionsarme, kreislaufgerechte Innenschalen – aktuelle Forschungen

<https://doi.org/10.14459/mbs28.12>

*Konrad Bergmeister*



**O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. MSc. Ph.D. Dr.phil.  
Dr.techn. Konrad Bergmeister**

1985 Promotion in Philosophie,  
Universität Innsbruck

1988 Promotion in Ingenieurwissenschaften,  
Universität Innsbruck

1992 M.Sc., Universität von Clarkson, New York  
seit 1993 ordentliche Professur für Konstruktiven  
Ingenieurbau, BOKU Wien

2012 PhD Economical Science, Paneuropean  
University Bratislava, Vienna

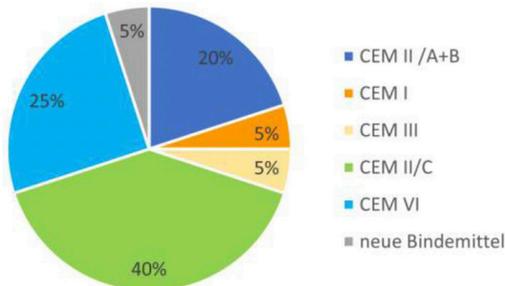
## Einführung

In den nachfolgenden Ausführungen werden teilweise bekannte Grundlagen über die Anforderungen an den Beton von Innenschalen dargestellt und neue aktuell laufende Forschungen beschrieben. Im Sinne der Klimaverträglichkeit gilt es heute und in Zukunft emissionsarme (primär betrifft dies den Zement) und kreislaufgerechte (primär betrifft das die Zuschläge) Betone zur Herstellung der Innenschalen für eine möglichst lange Nutzungsdauer zu verwenden [16].

Grundsätzlich werden sowohl unbewehrte und bewehrte Schalen in Ortbeton, Spritzbeton und Fertigteilbeton als Tübbinge verwendet. Nur in Sonderfällen werden Stahltübbinge eingesetzt. Zum Unterschied von temporären Spritzbetonaußenschalen, die für eine Nutzungsdauer von mindestens 10 Jahren für den Bauzustand ausgelegt werden, können auch permanente Spritzbetonschalen, dauerhaft für eine Nutzungsdauer von über 100 Jahren ausgeführt werden. Tunneln können einschalig mit Spritzbeton oder Tübbinge oder zweischalig mit einer Innenschale aus Ortbeton ausgeführt werden. Die Ziele der Nachhaltigkeit und die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit sowie den Brandwiderstand gelten für alle Innenschalenbetone.

Die Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial senkt bei einer Eigenversorgung die Kosten für Anschaffung, Transport und Lagerung und führt zu einer Verminderung der Umweltbelastungen (Verkehr, Lärm, Staub) sowie zur Schonung natürlicher Ressourcen [2]. Trotz umfassender Untersuchungen und vorliegender Praxiserfahrungen aus der Schweiz beim Lötschberg- und Gotthard-Basistunnel sowie aus Österreich vom Koralm- [3], Semmering- und Brenner Basistunnel mit bis zu 50 % Wiederverwendung des Tunnelausbruchmaterials, muss das Konzept der Materialbewirtschaftung für jedes Tunnelbauprojekt in Abhängigkeit der vorliegenden Lithologien gesondert bewertet werden [1].

Die neuen emissionsarmen, mittlerweile zertifizierten Zemente, wie der CEM II/C mit ca. 40 % reduzierten CO<sub>2,eq</sub>, können auch im Innenschalenbau eingesetzt werden. Für den CEM II/C gibt es erste Versuchsergebnisse über die langsamere Festigkeitsentwicklung (daher der Vorschlag die 56- oder 90-Tages-Festigkeit als Bemessungsgrundlage zu verwenden) und noch kaum Untersuchungen zur Porosität und Permeabilität.



**Abb. 1:** Mögliche Verwendung verschiedener Zemente im Tunnelbau (aus [4], bzw. aus: [5])

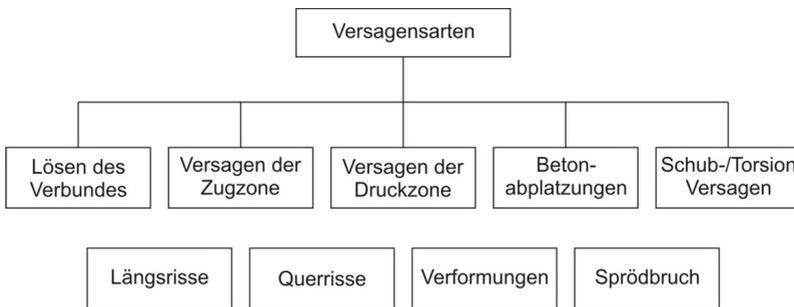
## **Spezifische Anforderungen und Maßnahmen bei Innenschalen**

In Tunnelkonstruktionen werden die Betonschalen vielfach durch eine Kombination von Druck und erhöhter Temperaturbelastung beansprucht. Prinzipiell müssen die Innenschalen den Grenzzustand der Tragsicherheit (Sicherung der Hohlraumlaibung, Wasserdruck, Fluten der Tunnelröhre, Explosion, Brandlasten, Druck- und Sogbelastung, je nach Bauart konzentrierte Lasteinleitungen durch Vortriebs- und Ausrüstungsgeräte sowie Ausrüstungsbauteile etc.), den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Dichtheit, Dauerhaftigkeit, etc.) und des Brandschutzes wahrnehmen [6]. Nachfolgend werden einige Punkte herausgegriffen.

### **Brandwiderstand – Wirkungen und Maßnahmen**

Im Brandfall ist bei (bewehrten) Innenschalen und Betonbauteilen die wesentliche Aufgabe des Betons ein Fortschreiten des kritischen Wärmeeintrags in den Beton gering zu halten. Damit kann ein Aufreißen und eine laufende Querschnittsschwächung als Folge von fortschreitenden Abplatzungen reduziert werden. Eine primäre Aufgabe der oberflächennahen Betonschicht der Innenschale bei erhöhter Temperatureinwirkung ist gegenüber dem klassischen Korrosionsschutz, dass sich möglichst keine und maximal geringe ( $< 1$  cm tiefe) Abplatzungen ausbilden. Die Temperatureindringkurven sind von vielen Faktoren abhängig, wie beispielsweise der Brandlast und der Temperaturverteilung im brandbeanspruchten Raum, dem Bauteilquerschnitt und der Geometrie, der Rohdichte des Betons, der Porengröße und -verteilung, der Festigkeit, etc.; all diese Einflüsse müssen für die Ermittlung der Temperatureindringkurven bei genauer Betrachtung empirisch oder numerisch berücksichtigt werden.

Allgemein betrachtet können durch eine erhöhte Temperaturbeanspruchung von Konstruktionsbeton in Tunnelinnenschalen folgende Versagensmechanismen auftreten (Abb. 2).



**Abb. 2:** Mögliche Versagensarten [6]

Bei den Versagensarten unter Brandeinwirkung kommt es häufig zu einem prozessartigen Versagen und damit zu mehreren teils interagierenden Bruchmechanismen. Die wichtigsten Mechanismen werden strukturiert kurz beschrieben (aus [6]).

**Rissbildung:** Entlang der Oberfläche, meist in Nähe von darunterliegenden Bewehrungsstäben bilden sich durch erhöhte Zugdehnungen in der oberflächennahen Betonschicht, Risse aus. Die Risse können als Längsrisse (entlang von Bewehrungsstäben) oder netzartig verteilt über die ganze Betonfläche, auftreten. Solche oberflächennahen Risse können durch eine Fasermischung (bspw. Fasercocktail aus Stahl- und Basaltfasern) reduziert werden.

**Lösen des Verbundes:** Im Verbundbereich zwischen Stahlbewehrung und dem Beton können durch die Wärmeeinwirkung lokale Risse und Ablösungen auftreten. Durch Verwendung eines dichten Betons, einer größeren Betondeckung sowie mit PP-Fasern kann dieser Bruchmechanismus teilweise verhindert werden.

**Versagen der Zugzone:** Durch die Erwärmung der Bewehrung, und damit der Stahlteile nimmt die Zugfestigkeit mit zunehmender Temperatur ab. Im Bereich der größten Stahlspannungen kann es in Folge zu Rissen und Verformungen sowie zu Betonabplatzungen kommen. Die Betondeckung bildet einen konstruktiven Schutz, welche durch ihre Stärke einen hohen Brandwiderstand darstellt. Bei Verwendung von Basaltstäben, ein hochtemperaturbeständiges und voll rezyklierbares Material, wird die Wärme auch kaum weitergeleitet (Wärmeleitfähigkeit von Stahl: 50 W/(mK); von Beton: 2,1 W/(mK) und von Basalt: 0,035 W/(mK)).

**Versagen der Druckzone:** Ein Versagen der Druckzone unter Brandeinwirkung führt zu einem spontanen Ausbrechen von Betonteilen. Dadurch vermindert sich der innere Hebelarm und die Kräfte in der Zugzone nehmen schlagartig zu. Durch die Verwendung eines faserbewehrten Betons in der Druckzone kann dieses Versagen verzögert werden.

**Versagen durch Betonabplatzungen:** Prinzipiell unterscheidet man bei dieser Versagensart zwischen einem

- lokalem Abplatzen von einzelnen Zuschlagskörnern,
- langsames Abplatzen (Soft-Spalling tritt primär bei Spritzbeton auf)
- explosionsartigen Abplatzungen.

Die lokalen Abplatzungen entstehen auf Grund lokaler physikalischer und chemischer Veränderungen in der Gefügematrix Zement und Zuschläge.

Das Soft-Spalling ist auf markante Permeabilitäts- und Feuchteänderungen zurückzuführen. Der Wasserdampf strömt bzw. diffundiert durch die Zone mit geringerer Permeabilität hindurch und staut (kondensiert) sich an der Grenzfläche zur dichteren Zone auf. Da dieser Grenzflächenbereich in der Regel auch eine geringere Zugfestigkeit aufweist, kommt es hier bevorzugt zum Abfallen der thermisch beanspruchten Betonschichten. Beim Einsatz von Fasern kann dieser Versagensmechanismus nahezu verhindert werden.

Explosionsartige Abplatzungen von kleineren bis größeren Betonschichten entstehen bei lang andauernden Brandeinwirkungen. Diese Form ist die gefährlichste Art der Abplatzungen. Durch Brandeinwirkung werden in Betonbauteilen thermische, thermomechanische sowie thermohydraulische Prozesse ausgelöst, die bei feuchter (Wassergehalt  $w > 2\%$ ) und homogener sowie dichter Betonmatrix zu Gefügeschädigungen an der beflamnten Betonoberfläche bis hin zu explosionsartigen Abplatzungen führen können [7].

Ziel einer vorrangigen Erhöhung des Brandwiderstandes durch die Anpassung von Betonrezepturen und die Verwendung von verschiedenen Fasern ist, ein ausreichend permeables System zur Druckentlastung zu schaffen, um bei Temperaturerhöhung den entstehenden Dampfdruck des Wassers bereits im frühen Temperaturstadium sehr schnell abbauen zu können. Durch das Verhindern von erhöhten Dehnungen und späteren Abplatzungen soll primär das Fortschreiten der Temperaturfront in den Betonquerschnitt verhindert werden. Der Druckausgleich im Beton und ein mögliches Abplatzen werden hauptsächlich durch die Permeabilität (Porengröße,

-verteilung, Durchgängigkeit, etc.) beeinflusst. Daher gilt es diese auch bei Verwendung von Tunnelausbruch- oder Recyclingzuschlägen sowie emissionsarmen Bindemitteln zu erforschen.

### **Permeabilität und Dauerhaftigkeit**

Die Permeabilität hat sowohl auf die Dauerhaftigkeit als auch auf den Brandwiderstand eine große Auswirkung. Entscheidend ist das Vermögen des Betons, von Fluiden durchströmt zu werden (lat. „permeare“, dt. „durchströmen“). Beispielsweise seien die experimentellen Untersuchungen an Spritzbetonmörtel angeführt (aus: [8]). Die Permeabilität der Spritzbetonproben wurde an ofengetrockneten Bohrkernscheiben ermittelt. Die Prüfungen wiesen Werte von  $6 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  bis  $6,5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  auf. Gemäß *Baroghel-Bouny* [9] können aus den Permeabilitätswerten folgende Zuordnungen hinsichtlich eines Dauerhaftigkeits-Potentials für den Spritzbeton gemacht werden:

**Tab. 1:** Dauerhaftigkeits-Potential für den Spritzbeton

Dauerhaftigkeit	Permeabilität
Hoch	3 bis $10 \times 10^{-17} \text{ m}^2$
mittel	1 bis $3 \times 10^{-16} \text{ m}^2$
gering – mittel	3 bis $10 \times 10^{-16} \text{ m}^2$
sehr gering – gering	$> 1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$

Gemäß [10] kann auch ein Zusammenhang zwischen der Karbonatisierungstiefe und der Permeabilität hergestellt werden. Aus gemessenen Permeabilitäten und Karbonatisierungstiefen kann über eine logarithmische Regressionsgerade folgender Zusammenhang hergestellt werden (Korrelationsfaktor = 0,979):

$$\log(y) = k_1 \cdot x \cdot \log(x) + c \quad (1)$$

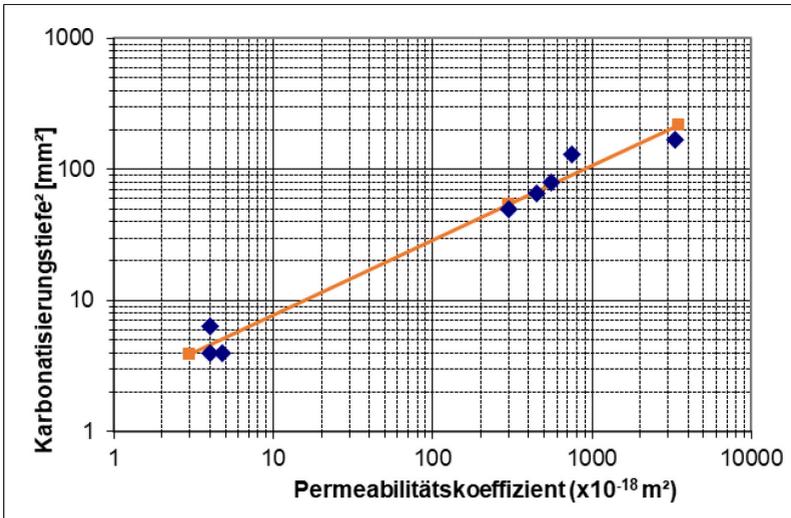
mit:

y ... Karbonatisierungstiefe in mm

x ... Permeabilität in  $\text{m}^2$

$k_1$  ... Steigung = 0,57041

c ... Konstante = 0,31971



**Abb. 3:** Zusammenhang Karbonatisierungstiefe und Permeabilitätskoeffizient (aus [8])

Mit den im ofentrockenen Zustand gemessenen Permeabilitäten kann nach Gleichung (1) eine Karbonatisierungstiefe nach einjähriger Lagerung berechnet werden. Daraus kann der Koeffizient  $k_2$  (Gleichung 2) entsprechend der einjährigen Lagerung bestimmt werden. Mit dem rechnerisch ermittelten Koeffizienten  $k$  kann über die Gleichung (2) der zeitabhängige Karbonatisierungsfortschritt  $y$  zu beliebigen Zeitpunkt prognostiziert werden.

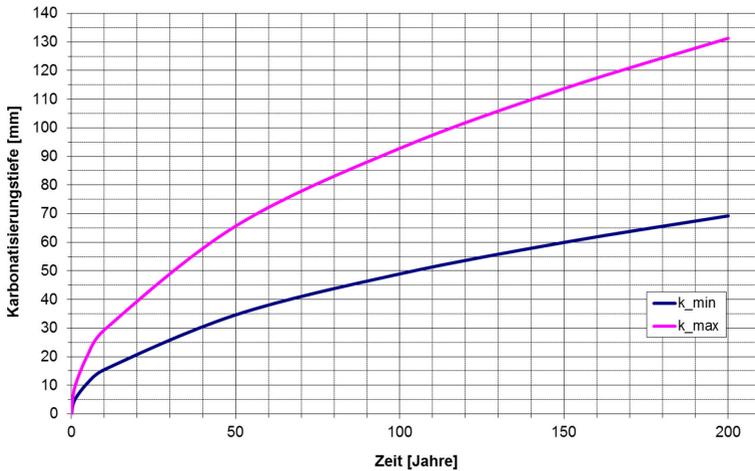
$$y = k_2 \cdot t^{0,5} \quad (2)$$

mit:

$y$  ... Karbonatisierungstiefe in mm

$k_2$  ... Faktor in  $\text{mm}/t^{0,5}$

$t$  ... Zeitdauer in Jahren



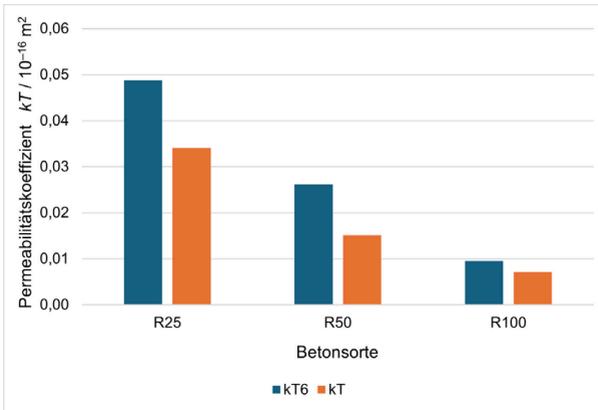
**Abb. 4:** Entwicklung der Karbonatisierungstiefe bis 200 Jahre (aus [8])

In Abb. 4 ist das Fortschreiten der Karbonatisierungsfront über die Nutzungsdauer mit dem errechneten minimalen und maximalen  $k$ -Faktor der äußeren Bohrkernscheibe für den Spritzbeton als untere und obere Schranke extrapoliert.

Bei der Verwendung von Tunnelausbruchmaterial oder rezyklierten Zuschlägen bis zu 100% haben aktuelle Untersuchungen ergeben (siehe [11]), dass die Permeabilität mit zunehmendem Anteil von Recyclingzuschlägen abnimmt (Abb. 5). Das kann mit noch anhaftenden nicht vollständig aushydratisierten Zementpartikeln an den Recyclingzuschlägen in Zusammenhang stehen.

## Bindemittel und deren Auswirkungen

Für Tunnelinnenschalen kommen derzeit noch vorwiegend Portlandkompositzemente CEM II und eher im Rückgang begriffen Portlandzemente CEM I zum Einsatz. Vergleichende Untersuchungen von *Schneider und Horvath* [12] zwischen CEM II/A und CEM III/A Zementen haben gezeigt, dass für den CEM III Zement eine höhere Porosität und eine höhere Permeabilität bei hohen Temperaturen vorliegt.



**Abb. 5:** Permeabilitätskoeffizienten von Beton mit rezyklierten Zuschlägen bis 100 % (Torrent-Messgerät bezogen auf 5 % Betonfeuchte).  $k_{t6}$  = Messwert nach 6 Minuten,  $k_t$  = Messung nach 12 Minuten.

Gleichzeitig wurde beim Einsatz des CEM II/A Zementes bei langsamer und gemäßiger Temperaturerhöhungsrate ein höherer Porendruck und bei schneller Temperaturerhöhungsrate eine vermehrte Rissbildung festgestellt. Die Rissbildung ermöglichte jedoch wiederum einen schnelleren Druckabbau.

Für den zukünftigen Einsatz von emissionsarmen Zementen, wie dem CEM II/C in Tunnelinnenschalen sollten daher noch konkrete Untersuchungen zur Permeabilität bzw. zum Verhalten bei hohen Temperaturen durchgeführt werden.

## Ressourceneffizienz bei Gesteinskörnungen

Bei der Herstellung von Untertagebauwerken fallen große Mengen an Ausbruchmaterial an (siehe [13]). Dabei handelt es sich in Abhängigkeit der vorliegenden geologischen Gegebenheiten um Locker- oder Festgestein unterschiedlicher Ausprägung bzw. Qualität. Die Gesteinsqualität ist in technischer und chemischer Sicht von der Art des Vortriebes abhängig. Während ein maschineller Vortrieb mittels Tunnelbohrmaschine im Festgestein zu kleineren Korngrößen (geringeres Größtkorn, tendenziell mehr

Feinanteil) führt und eine Verunreinigung durch Mineralöle und Bohrhilfsmittel bedingen kann, so erzielt der zyklische Vortrieb gröbere Kornfraktionen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass karbonatische und magmatische Gesteinskörnungen aus dem Tunnelvortrieb einem Steinbruchmaterial sehr ähneln (in Abhängigkeit der Löseart). Metamorphe Gesteinskörnungen zeigen aufgrund der teilweise vorhandenen Schieferung bzw. des unter Umständen hohen Schichtsilikatanteils stark anisotrope Eigenschaften. Ein erhöhter Schichtsilikatanteil hat oftmals eine verminderte Gesteinsfestigkeit zur Folge. Beides muss bei der Konzeption bedacht werden, um die Eigenschaften der Gesteinskörnung und folglich die betontechnologischen Eigenschaften nicht negativ zu beeinflussen [13].

In Bezug auf den Brandwiderstand bei Tunnelinnenschalen hat die Wahl der Gesteinskörnung auf das Festigkeitsverhalten des Betons bei hohen Temperaturen einen entscheidenden Einfluss [12]. Bei silikatischen Gesteinen können bei einem raschen Temperaturanstieg bis 600 °C durch das Freiwerden von gebundenem Wasser (ca. 20 %) Risse indiziert werden. Zusätzlich werden durch reversible kristallstrukturelle Umwandlungsprozesse bei 573 °C – Umwandlung von  $\alpha$ -Quarz in  $\beta$ -Quarz – Zugspannungen in die Betonmatrix eingebracht, die zu Zerstörungen der Betonmatrix führen können. Bei karbonatischen Gesteinen kann man bis ca. 650 °C ein stabiles Temperaturverhalten feststellen.

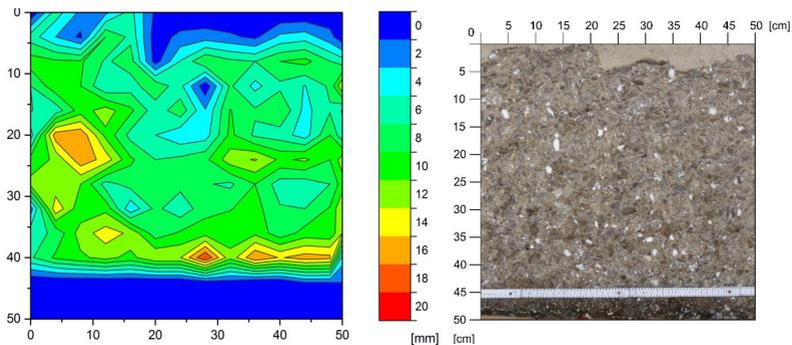
Bei Basalten zeigten sich auf Grund des sehr dichten Gefüges erst Umwandlungsprozesse bei Temperaturen über 1000 °C, wodurch ein sehr günstiges Verhalten hinsichtlich Abplatzungsvermeidung festgestellt wurde. Daher sollte für Innenschalen bei Verwendung von Tunnelausbruchmaterial oder von rezyklierten Zuschlägen auch die mineralogische Zusammensetzung untersucht werden.

### **Wirkung und Verteilung der Polypropylenfasern**

Durch die Zugabe von Kunststofffasern wird das Ziel verfolgt, nur im Brandfall ein kommunizierendes Kapillarporensystem auszubilden und dadurch die Permeabilität des Betons zu erhöhen. Als Brandschutzfasern kommen kurze, sehr dünne Polypropylenfasern zum Einsatz, deren Zugabe jedoch keine erhöhte Zugfestigkeit des Faserbetons induziert.

Für die Auswahl des Fasermaterials ist wesentlich, dass das Verdampfen der Faser bei Temperaturen möglichst nahe dem Siedepunkt des Wassers beginnt. Bei Polypropylen, dem üblicherweise eingesetzten Brandschutzfasermaterial, ist der Schmelzpunkt von der Taktizität des Polypropylens, d.h. von der Ausrichtung der Methylgruppe in der Polymerkette abhängig. Der Schmelzpunkt liegt im Bereich von ca. 150 °C bis 180 °C. Ab ca. 200 °C beginnend bis ca. 380 °C zersetzen sich die Fasern (siehe [12]).

Die Wichtigkeit einer gleichmäßigen Verteilung der PP-Fasern wurde von *Maier* [14] beim experimentellen Vergleich zwischen Großbrandversuchen und Großplattenversuchen aufgezeigt. Die Verteilung bei größeren Bauteilgeometrien wie zum Beispiel Tunnelinnenschalen ist durch den Herstellungsprozess vielfach ungleichmäßig. Hieraus folgt der Vorschlag mindestens 2 kg/m<sup>3</sup> an PP-Fasern für Tunnelnischen zu verwenden.



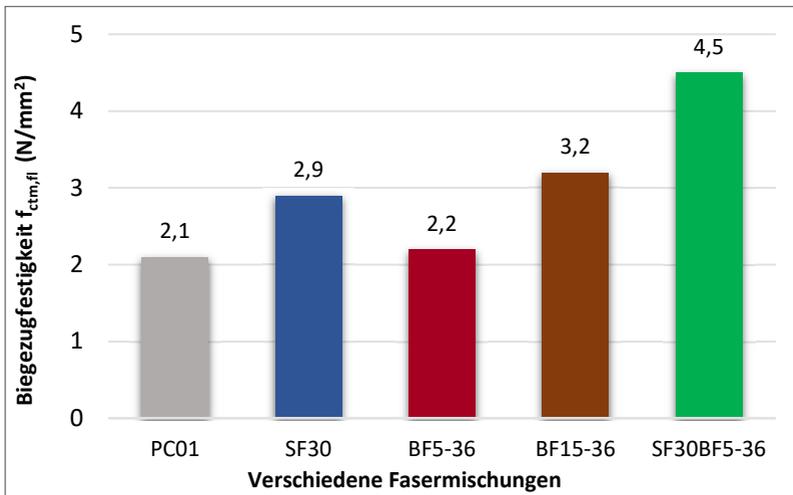
**Abb. 6:** Großplatten Brandversuche des Brenner Basis Tunnels für Beton mit aufbereitetem Zuschlag ohne Polypropylenfasern [14], links Abplatztiefe der Oberfläche und rechts Ansicht nach Brandbeanspruchung (Wassersättigungsgrad 41 % bei 2,5 cm und 65 % bei 5 cm, Intr. Permeabilität 19,9 nm<sup>2</sup>, Abplatzmenge 5,1 kg, Abplatzfläche 79 %)

### Innovativer Fasercocktail für Tunnelnischen

Durch eine gezielte Kombination von Stahl- und Basaltfasern kann die Rissüberbrückung und die Tragfähigkeit wesentlich verbessert werden. Im Rahmen von aktuellen Forschungen [15] eines Fasercocktails aus Stahl- und Basaltfasern (auch unter Zumischen von PP-Fasern) wurden die Bie-

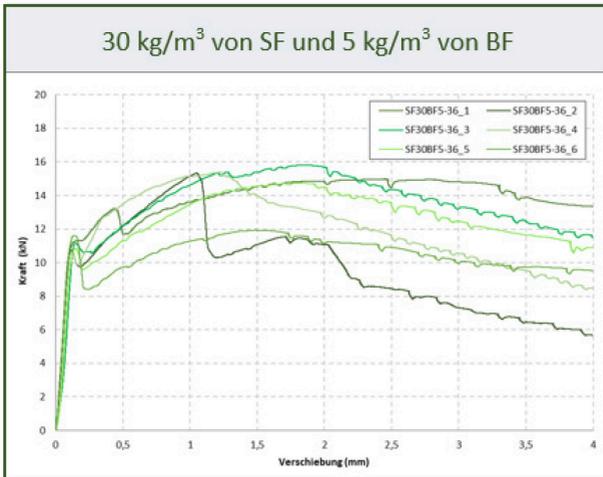
gezugsfestigkeiten ermittelt. Bei Zumischung von 30 kg/m<sup>3</sup> ca. 60 mm langen Stahlfasern und von 5 kg/m<sup>3</sup> ca. 36 mm langen Basaltfasern konnte die Biegetragfähigkeit um über 100 % gesteigert werden. In Abb. 7 werden neben dem unbewehrten Referenzbalken (PC01) vergleichend 30 kg/m<sup>3</sup> ca. 60 mm lange Stahlfasern (SF 30), 5 kg/m<sup>3</sup> ca. 36 mm lange Basaltfasern (BF5-36) sowie 15 kg/m<sup>3</sup> ca. 36 mm lange Basaltfasern (BF15-36) und ein Fasercocktail mit beiden Fasern (SF30BF5-36) untersucht.

Sehr vorteilhaft sieht auch das Kraft-Verformungs-Verhalten aus, wo beim Fasercocktail ein stark ausgeprägtes plastisches Verhalten auftritt (Abb. 8).



**Abb. 7:** Abgleich der Biegezugfestigkeiten

Neben der Verwendung von Basalt als Fasern können auch Basaltstäbe oder Basaltgelege und -gewebe in Tunnelschalen oder Tübbinge verwendet werden. Dazu werden aktuell Forschungen an der Boku-Universität – Wien und an der Montanuniversität – Leoben durchgeführt.



**Abb. 8:** Biegezugversuch eines mit einem Fasercocktail bestehend aus 5 kg/m<sup>3</sup> ca. 36 mm langen Basaltfasern und 30 kg/m<sup>3</sup> ca. 60 mm langen Stahlfasern bewehrten Betonbalkens

## Zusammenfassung

Tunnelinnenschalen sind neben dem Gebirgs- und Wasserdruck auch anderen Extremereignissen ausgesetzt. Dazu müssen sie auch den Anforderungen der Dauerhaftigkeit für eine lange Nutzungsdauer (gerade bei Straßentunnels spielt die Chloridpenetration und damit die mögliche einhergehende Korrosion der Stahlbewehrung eine große Rolle) und des Brandwiderstandes genügen. Der Einsatz von emissionsarmen Zementen und die Vorortverwendung von Tunnelausbruchmaterial führen zu einer verbesserten Kreislaufwirtschaft und einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Zusätzlich erzielen die Innenschalen durch die Verwendung von Basalt (chemikalienbeständig, funktionsfähig bis 700°C und kann bei einem Abbruch im Betonzuschlag bleiben) in Form von Fasern oder speziell gefertigten (mittels Spinnrobotern gefertigt) Gelegen oder Stäben eine verbesserte Leistungsfähigkeit.

## Literatur

- [1] Bergmeister, K. (2019): The Brenner Base Tunnel – geological, construction and logistical challenges and innovations at half time. *Geotechnics and Tunneling* 12(5), Ernst & Sohn, Berlin, 2019, S. 555-563, <https://doi.org/10.1002/geot.201900038>
- [2] Voit K.: Einsatz und Optimierung von Tunnelausbruchmaterial des Brenner Basistunnels. Dissertation am Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur Wien, 2013
- [3] Stelzer, R.; Egger-Cresnik, G.; Wagner, H. (2018): Spritzbeton aus aufbereitetem Tunnelausbruchmaterial mit reduziertem Versintierungspotential am Beispiel des Bauloses KAT 2. ÖBV-Spritzbetontagung 2018, Alpbach, 2018
- [4] Waldl, G.; Papsch, W. (2022): Roadmap zur CO<sub>2</sub>-Neutralität der österreichischen Zementindustrie. In: *BH-Monatshefte*. August 2022. DOI: 10.1007/s-501-022-01253
- [5] Bischofberger, A.D. (2024): Nachhaltigkeit im Tunnelbau – Einsatzpotenzial des ressourceneffizienten Tübbings im maschinellen Tunnelbau. Masterarbeit TU Wien
- [6] Bergmeister, K.; Cordes, T.; Lun, H.; Murr, R. (2018): Beton unter hoher Temperaturbeanspruchung – Brandschutz und Rettungssysteme in Tunnels. In: *Betonkalender 2018*. Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [7] Lun H. (2015): Permeabilität von Beton unter kombinierter thermischer und mechanischer Belastung. Doktorarbeit, Universität Innsbruck, 2015
- [8] Cordes, T.; Hofmann, M.; Murr, R.; Bergmeister, K.: Aktuelle Entwicklungen der Spritzbetontechnologie und Spritzbetonbauweise am Brenner Basistunnel. ÖBV-Spritzbetontagung 2018, Alpbach, 2018
- [9] Baroghel-Bouny V. (2007): Durability Indicators: relevant tools for an improved assessment for RC durability. *Toutlemonde, F. (Ed.), Proc. the 5th International Conference on Concrete under Severe Conditions, Environment and Loading. (2007), Paris, (LCPC), pp. 67-84.*
- [10] RILEM TC 116-PCD (1999): Concrete durability - An approach towards performance testing. *Materials and Structures, Vol. 32, April 1999, pp 163-173.*
- [11] Pichler, Th. (2024): Betonrecycling – mit Urban Mining zu einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft – Dauerhaftigkeit und Nutzungskriterien. Arbeitstitel der Dissertation. Boku-University, 2024

- [12] Schneider U. und Horvath J. (2006): Brandschutz-Praxis in Tunnelbauten, Bauwerk-Verlag
- [13] Voit, K.; Hron, J.; Bergmeister, K. (2022): Das Potential rezyklierter Gesteinskörnung für einen nachhaltigen Betonbau. In: Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift 167. Wien
- [14] Maier, M.: Safety assessment of underground structures subjected to fire loading : from a fire spalling test recommendation towards a concrete spalling assessment procedure. Dissertation, Universität Innsbruck, 2018
- [15] Macha, M-P. (2024): Recycled Aggregate Concrete reinforced with a Novel Fiber Cocktail. PhD-Symposium Budapest, Boku-University, 08/2024
- [16] Bergmeister (2024): Klimaverträglichkeit und Kreislaufwirtschaft im Tunnelbau. Münchner Tunnelbausymposium 2024. Universität der Bundeswehr, München