

CO₂-reduzierter Faserspritzbeton für permanente Tunnelinnenschalen (Teil 1): Konzept und erste Testergebnisse

Einleitung

Im Tunnelbau kann die Reduktion des Treibhausgaspotenzials sowohl durch ressourcensparenden, effizienten Materialeinsatz als auch durch neue, emissionsarme Materialien gelingen. Demzufolge wurde es als ein Ziel des Forschungsprojekts „SpOC“ (Sprayed Optimized Concrete) definiert, CO₂-reduzierten Faserspritzbeton (FSpB) zu entwickeln, der zukünftig als materialsparende, dünne sowie permanente Tunnelinnenschale nach Konsolidierung des Gebirges auf die Spritzbetonaußenschale aufgebracht werden kann, siehe Abb. 1. Dieser FSpB kann übliche, dickwandige Ausbauten aus Beton in Tunnelabschnitten ersetzen und somit Ressourcen und CO₂eq einsparen. Im Beitrag wird gezeigt, wie den hohen Anforderungen an solchen FSpB, nämlich u.a. an Pumpbarkeit und Spritzbarkeit, geringes Schwinden und geringe Neigung zur Rissbildung sowie ausreichende Duktilität und Tragfähigkeit (bzw. Energieabsorptionsvermögen EA) durch innovative Fasermischungen begegnet werden kann.

Untersuchungen zur Verbesserung der Pumpbarkeit der Mischungen mit hohem Fasergehalt durch das Einführen von künstlichen Luftporen werden im Teil 2 des Beitrages präsentiert („CO₂-reduced fiber sprayed concrete for permanent tunnel linings (Part 2): a rheological investigation“).

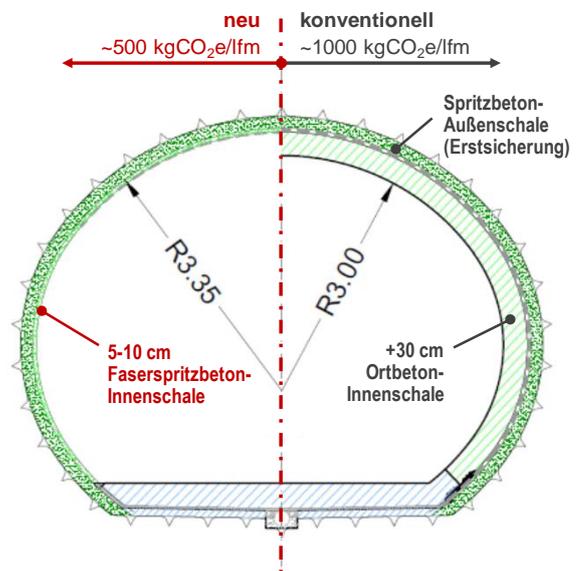


Abb. 1 Konzept der Anwendung von Faserspritzbeton für eine dünne permanente Tunnelinnenschale (links) versus konventionellem Tunnelausbau (rechts)

Materialien, Mischungen und Spritzvorgang

Im Rahmen eines großangelegten Spritzversuchs in den Laboren der Fa. MBS in Trostberg und nachfolgenden Untersuchungen an Proben im kleineren Maßstab an der TU Graz [1] wurden gespritzte und ungespritzte Betone mit systematisch variiertem Dosierung von Fasern sowie von Luftporenbildner hergestellt. Alle Mischungsvarianten wurden aus derselben Grundmischung ohne Fasern für sehr weiche Betone mit Größtkorn 8 mm und verlängerter Verarbeitungszeit gemäß Tab. 1 erzeugt. Mit der Grundmischung wurden Varianten mit unterschiedlichen Faserkombinationen aus Stahlfasern (S), Polymerfasern (P) und Naturfasern aus Hanf (N) sowie Varianten mit planmäßig unterschiedlichen

Luftgehalten erzeugt und zudem in unterschiedlicher Weise verarbeitet (Tab. 2). Einige Varianten wurden in Trostberg großmaßstäblich hergestellt, beschleunigt und gespritzt (T1 bis T15) bzw. unbeschleunigt gegossen (T16), andere wurden zum Teil mit und zum Teil ohne Beschleuniger im Kleinmischer hergestellt und gegossen (Varianten L0 bis L15).

Tab. 1 Grundmischung

	Wert	Einheit
Zement CEM II/A-LL 42,5 R	440	kg/m ³
Sand & Kies RK 0/8	1728	kg/m ³
W/Z	0,45	[-]
LP-Bildner (Tensid) ^{*)}	0/0,9/1,35	M.%/CEM
Fließmittel (PCE)	0,65%	M.%/CEM
Verzögerer (Phosphonat)	1,80%	M.%/CEM

^{*)} ein Luftgehalt von 1,5% wurde für die Mischungsberechnung der Grundmischung ohne LP-Bildner und Fasern angenommen.

In Trostberg wurden aus der per Fahrmischer angelieferten Grundmischung von 3 m³ Beton Kleinmengen von je 250 l entnommen und Einzelmischungen hergestellt, indem unterschiedliche Fasermengen und -kombinationen bzw. auch Dosierungen von Luftporenbildner (0/0,9/1,35%) langsam und schrittweise in einen Labormischer eingemischt wurden (Tab. 2). Mit jeweils 2 bis 3 solcher Mischungen wurde dann eine Meyco Suprema Spritzmaschine befüllt und Naßspritzbeton mit 5 M.% alkalifreiem Erstarungsbeschleuniger (EB) bezogen auf den

Zementgehalt in Probekörperformen gespritzt. Die Formen (Schwindrinnen, Spritzkisten und Rundplattenformen) wurden mit leichter Neigung von etwa 15° gegen die Vertikale positioniert. In sie wurde mit einem Düsenabstand von etwa 1,5 m von unten nach oben mit Hochdruck hineingespritzt. Zusätzlich wurden im Nachgang einige Mischungsvarianten kleinmaßstäblich im Labor der TU Graz angemischt und in Probekörperformen gegossen.

Betonprüfung

Frischbetonprüfung

Der frische Faserbeton wurde hinsichtlich Konsistenz (Ausbreitmaß gemäß ÖNORM EN 12350-5), Luftgehalt (ÖNORM B 4710-3) sowie Pumpbarkeit mittels V-Trichter und Gleitrohrrometer überprüft, auf letzteres wird im Detail hier nicht eingegangen. Der Luftgehalt wurde zunächst vor dem Spritzen mittels Prüfung im Luftporentopf ermittelt („Luftgehalt Nullbeton ungespritzt“). Zusätzlich wurde Spritzbeton direkt in einen Luftporentopf senkrecht von oben hineingespritzt, folglich kompaktiert und der Luftgehalt anschließend gemessen („Luftgehalt Nullbeton gespritzt“).

Die Frühfestigkeit wurde gemäß der ÖBV-Richtlinie Spritzbeton [2] überprüft und lag in der Regel im Bereich J1, worauf im Rahmen des Beitrags nicht weiter eingegangen wird.

Tab. 2 Misch- und Herstellungsvarianten sowie eingesetzte Faserkombinationen und gemessene Frischbeton-Luftgehalte

	Mix-Variante	Herstellung	Makrofaser				Mikrofaser				Luftgehalt Nullbeton ungespritzt	Luftgehalt Nullbeton gespritzt			
			Typ	Länge	Ø (Breite)	Gehalt	Typ	Länge	Ø (Breite)	Gehalt					
				mm	µm	V. %	kg/m ³		mm	µm	V. %	kg/m ³	%	%	
groß	T1	beschleunigt gespritzt	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9%	3,4%	
	T2		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,0%	3,9%	
	T4		Stahl mit 2 Endhaken	35	550	0,34%	26,7	Hanf	10	20-250	0,10%	1,24	13,0%	6,0%	
	T5			35	550	0,34%	26,7	Hanf	10	20-250	0,10%	1,24	6,5%	4,0%	
	T6		Stahl Endhaken	35	550	0,34%	26,7	-	-	-	-	-	-	4,5%	n.g.
	T7			35	600	0,34%	26,7	-	-	-	-	-	-	2,0%	2,9%
	T8		Polymer geprägt "C"	50	500	0,55%	5	Hanf	10	20-250	0,02%	0,25	3,8%	3,2%	
	T9		Polymer geprägt "C"	50	500	0,55%	5	Hanf	10	20-250	0,10%	1,24	7,0%	3,8%	
	T11		Polymer geprägt "M"	55	(700)	0,55%	5	-	-	-	-	-	-	4,8%	3,6%
	T14		Polymer geprägt "A"	50	(800)	0,55%	5	-	-	-	-	-	-	9,5%	4,0%
	T15		Polymer geprägt "M"	55	(700)	0,55%	5	Polymer glatt	6	30	0,10%	0,9	7,2%	4,1%	
T16	unbeschleunigt gegossen	Stahl mit 2 Endhaken	35	550	0,55%	43,2	Hanf	10	20-250	0,10%	1,24	9,5%	n.g.		
klein	L0	beschleunigt gegossen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0%	2,0%	
	L1		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n.g.	n.g.	
	L4		Stahl mit 2 Endhaken	35	550	0,34%	26,7	Hanf	10	20-250	0,10%	1,24	n.g.	n.g.	
	L10			35	550	0,34%	26,7	Polymer glatt	6	30	0,10%	0,9	n.g.	n.g.	
	L9		Polymer geprägt "M"	55	(700)	0,55%	5	Hanf	10	20-250	0,10%	1,24	n.g.	n.g.	
	L15			55	(700)	0,55%	5	Polymer glatt	6	30	0,10%	0,9	n.g.	n.g.	

Freies und behindertes Schwinden

Das Schwindverhalten wurde vom frühestmöglichen Zeitpunkt an in Rinnen gemessen, um so die Effekte einer oberflächlich austrocknenden, dünnen Spritzbetonschicht als Tunnelauskleidung möglichst realitätsnah nachzubilden. Die Rinnen wurden unmittelbar nach ihrer Befüllung in eine Klimakammer gebracht und unter relativ trockenen Umgebungsbedingungen wie unten ausgeführt gelagert, wobei die Oberfläche frei austrocknen konnte.

Zur Messung des **freien Schwindens** wurde das Messsystem von Schwindrinnen der Fa. Schleibinger angewandt (Abb. 2a) [3]. Die Rinnen wurden mit einer 1-2 mm dicken Schicht aus Maschinenfett ausgekleidet, sodass sich der Spritzbeton darin weitgehend reibungsfrei und ungehindert verformen können sollte. Mithilfe der Rinnen wurde das „Gesamtschwinden“ als Summe von Frühschwinden, autogenem Schwinden und Trocknungsschwinden vom Zeitpunkt der Herstellung bis zu 30 Tagen erfasst. Die je eine Probe der Mischungsvarianten T1 bis T16 wurde bei $61\pm 5\%$ RH und $20.6\pm 1.2^\circ\text{C}$ gelagert (in Trostberg) und 30 Tage gemessen. Die jeweils 3 Proben der Mischungsvarianten L0, L1, L4, L9, L10 und L15 wurden bei $68\pm 3.0\%$ RH und $19.5\pm 0.4^\circ\text{C}$ im Labor an der TU Graz für rund 10 Tage gemessen.

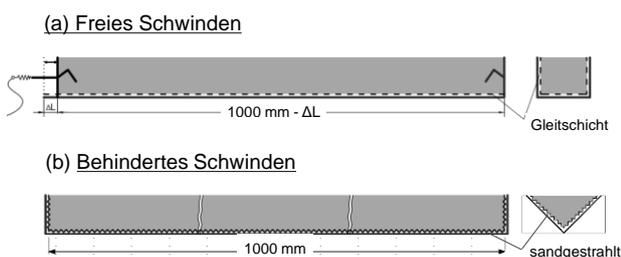


Abb. 2 schematische Darstellung der Messaufbauten für (a) freies Schwinden und (b) behindertes Schwinden

Zur Beurteilung der Rissbildung infolge von **behindertem Schwinden** wurde ein Versuchsaufbau nach BAW Merkblatt [4] gewählt. Es wurde Beton in V-förmige Stahlrinnen gemäß Abb. 2b mit einer innen rauen, sandgestrahlten Oberfläche gespritzt, sodass guter Verbund entstand und die Verformung des Betons voll behindert war. Zwei Proben der Mischungsvarianten T1 und je eine Probe der

Mischungsvarianten T2 bis T15 wurden zunächst für 30 Tage bei $61\pm 5\%$ RH und $20.6\pm 1.2^\circ\text{C}$ gelagert (in Trostberg) und nach einem Transport nach Graz für bis zu 220 Tage bei 50% RH und 23°C . Im Abstand einiger Tage wurden mehrmals Risse mithilfe des Aufsprayens von Wasser bzw. Ethanol und mittels Risslupe gesucht und kartiert.

Energieadsorptionsvermögen

Um das Energieabsorptionsvermögen (EA) der diversen Faserkombinationen vergleichen und einordnen zu können, wurden Prüfungen an je 3 Rundplatten je Spritzbetonvariante (RDP - round determinate panels) gemäß ASTM C 1550 [5] bzw. [6] durchgeführt, welche 24h nach der Herstellung entformt und anschließend bis zur Prüfung im Alter von 28d unter Wasser gelagert wurden. Eine zentrale Punktlast wurde auf eine runde Platte mit den Maßen $80 \times \text{Ø}800$ mm aufgebracht, die auf drei radial angeordneten Auflagerpunkten auf einem Durchmesser von 750 mm auflag (Abb. 3). Die Berechnung des EA erfolgte nach ASTM C1550 [5] durch Integration der Fläche unter der Last-Durchbiegungs-Kurve bis 40 mm Durchbiegung. Um die Werte an RDPs nach ASTM mit Prüfergebnissen an quadratischen Platten nach EFNARC/EN 14488-05 zu korrelieren, wurden die Ergebnisse des EA mit einem Faktor $f=2.5$ multipliziert, der mithilfe der Daten einer umfangreichen Vergleichsstudie [6] nach Elimination eines Ausreißers ermittelt wurde.



Abb. 3 Test des Energieabsorptionsvermögens an RDP Platten

Ergebnisse & Diskussion

Frischbeton

Alle Mischungen wiesen eine weiche oder sehr weiche Konsistenz auf (zwischen 46,5 cm und 62,5 cm Ausbreitmaß), waren stabil, zeigten

also weder Bluten noch Sedimentation und waren gut spritzbar. Interessant ist der Vergleich des Frischbetonluftgehaltes vor dem Spritzen („Luftgehalt ungespritzt“) und nach dem Spritzen - also kompaktiert („Luftgehalt gespritzt“) - welcher Tab. 2 zu entnehmen ist. Es ist zu erkennen, dass der Luftgehalt der ungespritzten Mischungen T1-T15, die mit unterschiedlicher Dosierung von Luftporenbildner und Fasern hergestellt worden waren, entsprechend stark von 0,9% bis 13% variiert, während der Luftgehalt des gespritzten Nullbetons weniger stark von 2,9% bis 6,0% variiert. Das zeigt, dass der Luftgehalt des Frischbetons durch den Spritzvorgang und die damit verbundene Kompaktierung stark vergleichmäßigt wurde und in unserem Fall von im Mittel 6% (ungespritzt) auf 3,9% (gespritzt) reduziert wurde. Interessant zu beobachten war, dass sich der Luftgehalt von Mischungen, die vor dem Spritzvorgang unterdurchschnittlichen Gehalt aufwiesen, erhöhte, während er sich von Mischungen, die überdurchschnittlichen Gehalt aufwiesen, nach dem Spritzvorgang senkte (Tab. 2). Der Luftgehalt der gespritzten Betone entspricht somit i.M. in etwa dem Luftgehalt von 3%, der gemäß ÖBV -Richtlinie für Spritzbeton [2] in der Stoffraumrechnung anzunehmen ist, wodurch diese Annahme bestätigt wird.

Im Vergleich zur Grundmischung mit geringem angenommenen Luftgehalt (Tab. 1) haben die ausgeführten Mischungsvarianten einen höheren Luftgehalt, was dazu führt, dass sie bezogen auf das Einheitsvolumen (im Stoffraum) einen geringeren Zement- und Gesteinskörnungsanteil haben als die ursprüngliche Grundmischung. Zudem wurden hier die von 0 -0,65 V.% variierten Faservolumina in den Mischungen in der Stoffraumrechnung vernachlässigt. Der Zementgehalt der ausgeführten Mischungsvarianten sinkt folglich mit dem steigenden Anteil an Luft und Fasern im Einheitsvolumen um bis zu 5% gegenüber der Grundmischung (420 kg/m³ in Mischungsvariante T4 statt 440 kg/m³).

Freies Schwinden

Die Ergebnisse der Messung des freien Schwindens sind in Abb. 4 und Abb. 5 dargestellt.

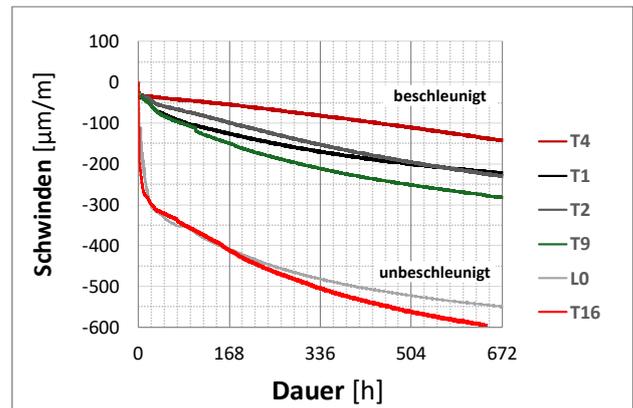


Abb. 4 Freies Schwinden von unbeschleunigtem, gegossenem Beton (L0, T16) versus beschleunigten gespritzten Beton (T1, T2, T4, T9)

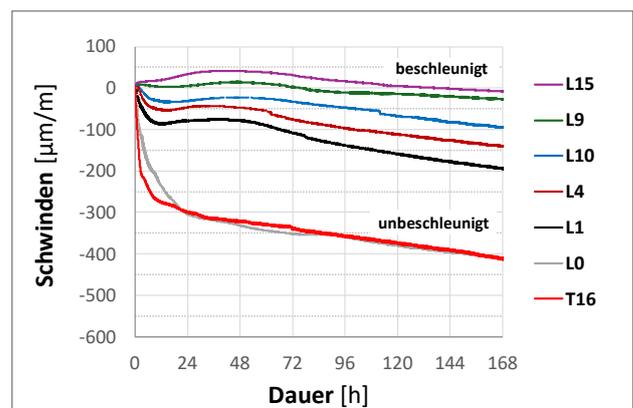


Abb. 5 Freies Schwinden von unbeschleunigtem, gegossenem Beton (L0, T16) versus beschleunigten gegossenem Beton ohne Fasern (L1) und mit verschiedenen Faserkombinationen (L4, L9, L10, L15)

Im Falle der großmaßstäblichen Spritzversuche (T1 bis T16) werden die Ergebnisse von jeweils einem Probekörper gezeigt, während im Falle der kleinmaßstäblichen Labormischungen (L0 bis L15) der Median von 3 Versuchen dargestellt wird. Die Längenänderungen (=Schwinden) des Betonkörpers in der Rinne werden von einem Punkt Null an aufgetragen, welcher nach Fontana [7] als Zeitpunkt „t₀“ durch das Maximum der ermittelten Schwindrate (=Schwindgeschwindigkeit) definiert ist. Ab t₀ geht im Zuge der Erstarrung die plastische Verformbarkeit weitgehend verloren, sodass der Betonkörper in einen festen Zustand übergeht und spannungsinduzierende Verformungen auftreten. Der Zeitpunkt t₀ der Erstarrung tritt im Fall der beschleunigten Mischungen wenige Minuten nach der Herstellung ein und ist markant ausgeprägt, während er bei den unbeschleunigten Mischungen wesentlich später nach Wasserzugabe eintritt und ein schwach ausgeprägtes Maximum der

Schwindrate darstellt, das in unserem Fall von stark verzögerten Mischungen erst 4 bis 6 h nach dem Erstarrungsbeginn auftritt (siehe [1]). Abb. 4 und Abb. 5 zeigen den zeitlichen Verlauf der gesamten Schwinddehnungen von bis zu 4 Wochen (672h) unter den austrocknenden Bedingungen. In beiden Abbildungen fällt zunächst das starke Frühschwinden von unbeschleunigtem, gegossenem Beton (L0 und T16) in den ersten 24 Stunden auf. Der weitere Schwindverlauf bis 168h (7 Tage) bzw. 672h (28 Tage) ist vor allem auf langsames Austrocknen zurückzuführen. Die beiden Mischungen L0 ohne Fasern und T16 mit Fasern (Kombination S+N) unterscheiden sich dabei kaum. Die Schwindrate nimmt zwar langsam ab, das Trocknungsschwinden erreicht aber auch nach mehr als 4 Wochen (672h) noch kein Ende.

Abb. 4 zeigt darüber hinaus das im Vergleich zu den unbeschleunigten Proben wesentlich geringere Gesamtschwinden von vier Spritzbetonen (T1, T2, T4 und T9) ohne und mit Fasern. Auffällig ist, dass diese Spritzbetone alle so gut wie kein kapillares Frühschwinden in den ersten Stunden aufweisen. Ihr weiterer Schwindverlauf (i.e. ihre Schwindrate) ist dem der unbeschleunigten Betone ähnlich und wie bei diesen auf langsames Austrocknen zurückzuführen. Die einzelnen Spritzbetonvarianten (T1, T2, T4 und T9) unterscheiden sich nicht signifikant, weil kein völlig reibungsfreies und unbehindertetes Schwinden gewährleistet werden konnte. Es wurde nämlich beim Ausschalen der gespritzten Mischungsvarianten festgestellt, dass die Gleitschicht aus Fett in den Rinnen vom Aufprall des Spritzbetons verformt worden war und zudem an den Rinnenrändern Spritzbeton anhaftete. Somit konnte nicht ausgeschlossen werden, dass es durch Reibung bzw. Störeffekte zur Behinderung der freien Verformung der Proben gekommen war im Unterschied zu Proben, die in die Formen gegossen wurden.

Abb. 5 zeigt den Vergleich von unbeschleunigtem, gegossenem Beton (L0, T16), mit beschleunigtem, gegossenem Beton ohne Fasern (L1) und mit verschiedenen beschleunigten Faserkombinationen, die in

kleinmaßstäblichen Mischungen hergestellt wurden (L4, L9, L10, L15). Es wird sichtbar, dass Mischungen mit Fasern ein deutlich geringeres Anfangsschwinden in den ersten 96h (4 Tagen) als die Mischung ohne Fasern (L1) aufweisen. Faserkombinationen, die Polymerfasern (Makro- und Mikrofasern) sowie natürliche Mikrofasern (Hanf) enthalten, reduzieren das Anfangsschwinden stark bzw. verursachen sogar Quelleffekte (= positive Dehnungen). Stahlfasern scheinen hingegen keinen Einfluss auf das Schwinden in den ersten Tagen auszuüben. Diese Beobachtungen wurden durch systematische Untersuchungen in [1] an Mischungen bestätigt, die jeweils nur einen Fasertyp enthielten, welche allerdings hier nicht näher ausgeführt werden. Die Fasermischungen zeigen zudem positive Dehnungen, immer gekoppelt mit einer Temperaturzunahme innerhalb der ersten 96h, die auf das Zusammenwirken von EB und Verzögerer während der Hydratationsreaktion und Temperatureffekte zurückzuführen sind.

Behindertes Schwinden

Die Beobachtungen der Rissbildung zufolge behinderten Schwindens sind in Abb. 6 dargestellt. An Proben ohne Fasern (T1, T2) treten nach einer Auslagerungszeit von ≥ 28 d unter austrocknenden Bedingungen Trennrisse über die ganze Breite auf, deren Anzahl im Zeitraum bis 220 d zunimmt. Der mittlere Rissabstand beträgt rund 250 mm bei einer Rissöffnung von 0,1 bis 0,2 mm. An allen Proben mit Faserkombinationen (T4, T5, T6, T8, T9, T15) hingegen sind keine Risse zu sehen, mit Ausnahme von T11, einer Probe mit einem einzelnen Trennriss in der Mitte, die wie unten beschrieben auch das geringste Energieabsorptionsvermögen (EA) zeigt. Unterschiedliche Wirkungen der verschiedenen Faserkombinationen auf die Rissbildung wurden bisher kaum bzw. nicht sichtbar. Es kann aber mit Berücksichtigung der Ergebnisse der Prüfungen des EA davon ausgegangen werden, dass Mikrofasern, besonders im späteren Alter (> 4 d), keinen nennenswerten Beitrag zur Risservermeidung bzw. -verteilung bringen, da sie keine Nachrisstragfähigkeit bzw. keinen nennenswerten Beitrag zum EA aufweisen, Makrofasern hingegen die

Risse kontrollieren und somit mit ihnen Trennrisse vermieden werden können.

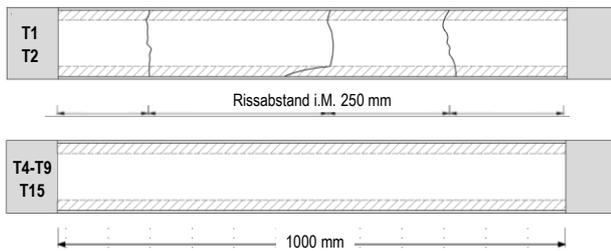


Abb. 6 Rissbild aufgrund von behindertem Schwinden in Versuchsrinnen ohne Fasern (oben) und mit Fasern (unten)

Energieadsorptionsvermögen

Die Ergebnisse der Prüfung und Berechnung des EA sind als Mittelwerte und Standardabweichungen in Abb. 7 dargestellt. Der Mindestwert von 700J für das EA gemäß österreichischer Richtlinie für Spritzbeton [2] wird von allen Faserkombinationen mit Ausnahme der Varianten T11 und T15 erfüllt. Letztere zeigen aufgrund einer schwach ausgeprägten Prägung der Faseroberfläche dieser Polypropylen-Makrofasern, die sich noch in der Entwicklungsphase befinden, ein schlechtes Verbundverhalten. Hingewiesen sei darauf, dass das EA-Niveau mit je nach Fasertyp unterschiedlichen Dosierungen gemäß Tab. 2 erreicht wurde. Proben mit Stahl-Makrofasern zeigen bei der gewählten Dosierung ein etwas höheres EA-Vermögen als Polymerfasern. Mikrofasern tragen kaum (Hanf) bzw. nicht (Polymer) zum Tragvermögen nach der Rissöffnung bei, wie aus dem Vergleich der jeweiligen Mischungen mit und ohne Mikrofasern hervorgeht (T5 versus T6 und T11 versus T15).

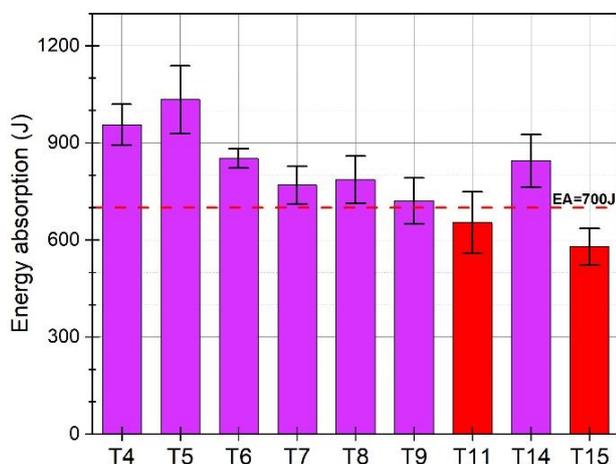


Abb. 7 Energieabsorption der verschiedenen Faserkombinationen (Mindestanforderung EA 700 J)

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die beschriebenen Untersuchungen wurden mit Ziel durchgeführt, Faserbetone für dünnwandige permanente Spritzbeton-innenschalen zu entwickeln, die zur Massen- und CO₂-eq-Reduktion im Tunnelbau beitragen. Spritzbetonmischungen mit unterschiedlichen Faserkombinationen wurden dafür hinsichtlich ihrer Frischbetoneigenschaften, des Schwindverhaltens und des Energieabsorptionsvermögens verglichen, sodass folgende Schlüsse daraus gezogen werden können.

- Die Pumpbarkeit und damit Spritzbarkeit von Faserbeton kann durch einen erhöhten Luftgehalt des Frischbetons verbessert werden, der durch erhöhten Lufteintrag bei Einmischung von Fasern bzw. künstlichem Luftporenbildner entsteht (siehe auch Teil 2 des Beitrags)
- Freies Schwinden von Spritzbeton unterscheidet sich von freiem Schwinden von Normalbeton hauptsächlich in der Anfangsphase. Die Phase des Frühschwindens bzw. Kapillarschwindens im noch plastischen Zustand fällt bei beschleunigtem Spritzbeton praktisch weg, der wenige Minuten nach dem Auftrag innerhalb kurzer Zeit erstarrt, früh Festigkeit entwickelt und ein geschlossenes, steifes Gefüge ausbildet. Im Gegensatz zu Normalbeton bewirkt die oberflächliche Austrocknung (Verdunstung) nur eine geringe Gefahr von Frühschwindrissen zufolge von Kapillarkräften in den Poren.
- Kleinmaßstäbliche Laborversuche an beschleunigten, ungespritzten Proben zeigen, dass das frühe Schwinden innerhalb der ersten Tage (hier bis 4d an dem stark verzögerten Beton) durch Polymermakro- und -mikrofasern sowie Naturfasern (Hanf) deutlich reduziert werden kann, während Stahlfasern keine Auswirkungen auf das Frühschwinden zeigen.
- Auf den Verlauf des (unbehinderten) Trocknungsschwindens haben Fasern einen sehr geringen Einfluss.
- Im Fall von behindertem Schwinden zeigt Spritzbeton ohne Fasern im Gegensatz zu Faserspritzbeton ein hohes Risiko der

Ausbildung von Trennrissen $>0,1$ mm im Alter ≥ 28 d. Die Mischungen mit Stahlfasern und Makropolymerfasern mit gutem Verbund und ausreichendem Fasergehalt verringern das Risiko von Trennrissen.

- Ein Energieabsorptionsvermögen >700 J kann mit diversen Fasermischungen erzielt werden, wobei Mikrofasern keinen großen Beitrag zum EA liefern.

Danksagung

Die Autoren danken allen Unterstützern und beteiligten Firmen im Forschungsprojekt „SpOC“ – Sprayed optimized concrete, das von der FFG als Branchenprojekt der ÖBV gefördert wurde. Insbesondere danken wir der Fa. MBS (master builder solutions) für die Möglichkeit zur Durchführung und tatkräftige Unterstützung der Versuche am Standort Trostberg.

1 Literatur

- [1] *Maximilian Eckart*: Schwinden von Faserspritzbeton für permanente Tunnelinnenschalen. Masterarbeit. Graz 03 / 2024.
- [2] ÖBV: Richtlinie Spritzbeton. Wien: ÖBV (12/2009).
- [3] *Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH*: Schwindrinne. <https://www.schleibinger.com/cmsimple/?Schwinden:Schwindrinne>, 18.10.2024.
- [4] *Bundesanstalt für Wasserbau*: BAWEmpfehlung Instandsetzungsprodukte – Hinweise für den Sachkundigen Planer zu bauwerksbezogenen Produktmerkmalen und Prüfverfahren. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106477> (06/2019).
- [5] *ASTM C09.42 Committee*: Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel). West Conshohocken, PA: ASTM International (02.11.2020).
- [6] *Bernard, E. S.*: Correlations in the behaviour of fibre reinforced shotcrete beam and panel specimens. *Materials and Structures* 35 (2002), S. 156–164.
- [7] *Fontana, P., Pirskawetz, S., Weise, F., Meng, B.*: Detection of early-age cracking due to restrained autogenous shrinkage. In: Grosse, C. U. (Hg.): *Advances in Construction Materials 2007*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 489–496.