

J. Glatzl, P. Nischer, J. Steigenberger, O. Wagner

PP-Faserbeton für erhöhte Brandbeständigkeit

Untersuchungen zu dessen Wirksamkeit und Ermittlung des Polypropylen-Fasergehalts am Festbeton

Univ.Doz. DI Dr. Johann Glatzl

Eisenbahn-Hochleistungsstrecken AG, Wien

Univ.Doz. DI Dr. Peter Nischer

Forschungsinstitut der VÖZ, Wien

DI Dr. Johannes Steigenberger

Forschungsinstitut der VÖZ, Wien

DI Oliver Wagner

Eisenbahn-Hochleistungsstrecken AG, Wien



Bild 1: Beton MV 2,0 mit 2,0 kg/m³ PP-Fasern nach 20° C Lagerung
alle Fotos und Grafiken: VÖZFI

Für Beton mit erhöhter Brandbeständigkeit haben sich im Rahmen von Forschungsprojekten [z.B. 1] Betone mit etwa 2,0 kg/m³ Polypropylen-Fasern mit kleinem Durchmesser (< 20 µm) und geringer Länge (etwa 6 mm) bewährt. Durch diese Fasern werden die bei schneller Aufheizung des Betons möglichen Abplatzungen verhindert, weil die Gasdurchlässigkeit verglichen mit gleich zusammengesetztem Beton ohne Fasern bereits bei 105° C um eine 10er Potenz vergrößert wird. Für die Wirkung ist entscheidend, dass die Fasern gleichmäßig eingemischt sind. Zur Beurteilung der gleichmäßigen Einmischung und um überprüfen zu können, ob durch die Fasern genügend Kanäle im Beton entstanden sind, ist eine Bestimmung des Fasergehaltes am erhärteten Beton zweckmäßig und möglich.

1. Problemstellung

Große Brandereignisse in Tunneln hatten bisher deutliche Schädigungen des Bauwerkes durch Abplatzungen zur Folge. Diese sind auf den schnellen Temperaturanstieg zurückzuführen, der eine rapide Zunahme des Dampfdruckes im Beton verursacht. Bei entsprechend schneller Aufheizung ist daher auch im Hochbau (z.B. bei Pfeilern usw.) mit Abplatzungen zu rechnen. Durch ein rasches Fortschreiten derselben kann es zu Querschnittverringerung, Freilegen der Bewehrung und in weiterer Folge zu einem Bauteilversagen kommen. Zur systematischen Klärung der Frage, wie sich Abplat-

zungen verhindern lassen, wurden folgende Untersuchungen [1] durchgeführt:

An Kleinbrandkörpern wurden bei einer extremen Aufheizgeschwindigkeit der Luft (0–1.000° C in vier Minuten, 1.200° C ab 20 Minuten bis zum Brandende) jene Betonzusammensetzungen mit PP-Fasern ausgewählt, welche Abplatzungen des Betons im Brandfall verhindern. Weiters wurden in Abhängigkeit von der Branddauer die für die Dimensionierung von Bauwerken relevanten Betontemperaturverteilungen festgelegt und die Betonkennwerte (Festigkeit, E-Modul) vor und nach dem Brand ermittelt. Zum halbquantitativen Nachweis der Wirksamkeit von PP-Fasern wurde die Gasdurchlässigkeit des Betons für verschiedene Temperaturen und Fasergehalte eruiert. Anschließend wurden in Anlehnung an den realen Tunnelbau Großbrandversuche an Teilen von Tunnelinnenschalen (Kalotten) im Maßstab 1:1 durchgeführt. Hierzu wurden zur Simulation von realen Spannungsverteilungen und Verformungen ein Kalottenmodell entwickelt und die Folgen der Brandeinwirkung (Temperaturverteilung ähnlich Kleinbrandkörper) bei einer realen Belastungs- bzw. Spannungsverteilung untersucht.

Erst das Zusammenspiel von Bauherren, Planern, Ausführenden und Brandexperten ermöglichte die Entwicklung und Finalisierung eines Projektes [1] zur Abklärung der Einflussfaktoren. Dank gebührt daher allen, die dafür ihr Wissen zur Verfügung gestellt haben.

2. Ursachen für Betonabplatzungen beim Brand

1 Mol Wasserdampf (18 g) hat bei 100° C ein Volumen von etwa 30 Litern. Dies bedeutet, dass bei üblichen Zementsteingehalten etwa 200 g verdampfbares Wasser (0,01 M-%) in einem Kubikmeter Beton ausreichen, damit bei 250° C ein Dampfdruck (4,1 N/mm²) entsteht, der die Zugfestigkeit des Betons überschreitet. Wird der Dampfdruck nicht durch entsprechend porösen Beton abgebaut, kommt es bei Temperaturen ab etwa 200° C aufgrund der überschrittenen Zugfestigkeit zu Abplatzungen.

3. Brandversuche

3.1. Untersuchte Betonzusammensetzungen sowie Wirkung der Fasern

Untersucht wurden die in Tabelle 1 wiedergegebenen Betonzusammensetzungen.

Verwendet wurden monofilamentale Polypropylenfasern mit Spin-finish mit einem Durchmesser von etwa 20 µm und einer Länge von 6 mm. Ihr Schmelzpunkt beträgt etwa 150° C, ihr Brennpunkt ca. 360° C, ihre Dichte 0,91 kg/dm³, die Anzahl der Fasern etwa 900 Millionen Stück/kg. Zwischen Betonmatrix und Fasern bildet sich eine poröse Übergangszone. Die Fasern erzeugen durchgängige Mikroporen, wodurch sich der bei der Erwärmung entstehende Dampfdruck entspannen kann. Im Brandfall schmelzen die Fasern, folglich entsteht ein noch gasdurchlässigeres Porensystem.

Auf Bild 1 sind die PP-Fasern in der Pore eines Betonbruchstückes zu sehen.

Zur Beurteilung des Einflusses der Fasern auf die Gasdurchlässigkeit wurden je drei etwa zwei Monate alte und 5 cm dicke Scheiben aus Betonen mit MV 0, MV 2,0 und MV 3,0 bis zur Massekonstanz bei 105° C gelagert. Weiters wurden von jedem MV zwei Proben weitere 24 Stunden bei 200° C und anschließend eine Probe nochmals 24 Stunden bei 350° C gelagert.

Geprüft wurde die Gasdurchlässigkeit gegenüber Sauerstoff als Maß für die offene Porigkeit. Die Ermittlung der Gasdurchlässigkeit erfolgte durch einseitigen Überdruck an Probekörpern im einachsigen Durchströmungsversuch. Den Prüfwert bezeichnet man als spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K [m²]. Die Ergebnisse sind in Bild 2 dargestellt.

Den Einfluss der Betonzusammensetzung wie auch der Nachbehandlung auf die Gasdurchlässigkeit behandelt [2]. Mit zunehmendem W/B-Wert, bei schlechter Nachbehandlung und abnehmender Betonfeuchtigkeit nimmt die Gasdurchlässigkeit zu. Unter normalen Umweltbedingungen (Temperatur, Betonfeuchtigkeit) hat ein gut nachbehandelter, bei durchschnittlicher Temperatur und Luftfeuchte gelagerter Beton entsprechend MV 0 einen Permeabilitätskoeffizienten von etwa 10^{-17} [m²].

Da bei der Herstellung der Spritzbetonprobekörper beim Spritzen des Trocken-Spritzbetons ein großer Faserrückprall feststellbar war, wurde der Fasergehalt am Festbeton mit einer in Anlehnung an das Verfahren zur Ermittlung der Luftporenkennwerte im Forschungsinstitut der Österreichischen Zementindustrie (VÖZFI) entwickelten und in Abschnitt 4 beschriebenen Methode ermittelt. Die Resultate sind in Tabelle 2 dargestellt.

Die beim Brandversuch am Trocken-Spritzbeton ermittelten Ergebnisse sind somit für einen Fasergehalt von etwa 1 kg/m³ repräsentativ.

3.2. Kleinbrandversuche

Bei den Kleinbrandkörpern der Größe 60 x 50 x 30 cm aus Normalbeton wurde die Bodenfläche dem Brand ausgesetzt. Auf der

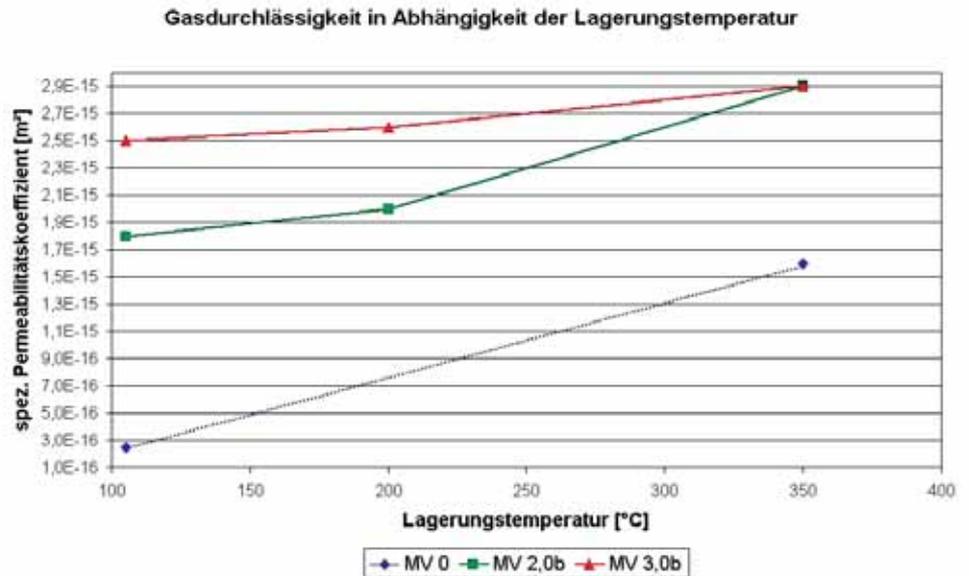


Bild 2: Gasdurchlässigkeit von Beton ohne (MV 0) und mit 2,0 kg/m³ (MV 2,0) und 3,0 kg/m³ (MV 3,0) PP-Fasern in Abhängigkeit von der Temperatur

Tabelle 1: Untersuchte Betonzusammensetzungen (MV) mit ermitteltem Luftgehalt (Kapitel 3)

MV	0	1,5	2,0	2,5	3,0	SPN ¹⁾ 2,0a	SPN ¹⁾ 2,0b	SPT ²⁾ 3,0
CEM I [kg/m³]	260	260	260	260	260	420	490	350
HOS [kg/m³]	70	70	70	70	70	0	0	0
Wasser [kg/m³]	180	180	180	180	180	190	225	165
PP-Fasern [kg/m³]	0	1,5	2,0	2,5	3,0	2,0 ³⁾	2,0 ³⁾	3,0 ³⁾
L [%]	6,5	5,0	6,2	3,1	4,4	14	3,0	3,9

¹⁾ Nass-Spritzbeton
²⁾ Trocken-Spritzbeton
³⁾ Fasergehalt in Ausgangsmische

Tabelle 2: Bei Fasergehaltbestimmung am Festbeton ermittelte Daten (Kapitel 3.1)

	SPN 2,0a; 2,0 kg/m³ Nass-Spritzbeton	SPN 2,0b; 2,0 kg/m³ Nass-Spritzbeton	SPT 3,0; 3,0 kg/m³ Trocken-Spritzbeton
Faseranzahl je Meter Messlänge	320 ¹⁾	280 ¹⁾	170
durchschnittlicher Faserdurchmesser in Schnittfläche [µm] ²⁾	63	73	83

¹⁾ Bei der untersuchten Faser waren je Meter Messlänge im Durchschnitt 150 Fasern je kg/m³ zugegebener Fasern auffindbar.

²⁾ Der gegenüber den Fasern von etwa 20 µm bedeutend größere Durchmesser in der Schnittfläche ist durch den i.a. nicht senkrechten Schnitt durch die Fasern, eine nicht vollständige Vereinzelnung der Fasern beim Mischen und die durch den Grobschliff ausgefranste Faseroberfläche bedingt.

Tabelle 3: Wassergehalt (bis zu etwa 2 cm Tiefe) der Brandprobekörper vor Brand (Kapitel 3.2)

Lagerung	Wassergehalt der Brandprobekörper mit MV							
	0	1,5	2,0	2,5	3,0	SPN ¹⁾ 2,0a	SPN ¹⁾ 2,0b	SPT ²⁾ 3,0
Wasser 56 Tage	5,4 %		5,1 %		5,3 %			
Luft 56 Tage		2,8 %	3,1 %	2,8 %		2,6 %	4,9 %	4,4 %

¹⁾ Nass-Spritzbeton
²⁾ Trocken-Spritzbeton

Tabelle 4: Probekörpermassen vor und nach dem Brand; Abplatzmengen, Abplatztiefen und Tiefe des vollkommen zerstörten Betons (Kapitel 3.2)

MV Lagerung	Abplatzmenge warm kg	Abplatztiefe warm		Zerstörungstiefe kalt	
		max. cm	Mittel cm	max. cm	Mittel ¹⁾ cm
0 56Tg WL ²⁾	2,5	2,5	0,4	4,8	4,2
2,0 56Tg WL	0,8	1,2	0,1	2,2	1,4
3,0 56Tg WL	0,0	0,0	0,0	1,8	1,3
1,5 56Tg LL ³⁾	0,0	0,0	0,0	2,0	1,6
2,0 56Tg LL	0,0	0,0	0,0	1,9	1,7
2,5 56Tg LL	0,0	0,0	0,0	2,1	1,8
SPN 2,0a 56Tg LL	0,0	0,0	0,0	1,9	1,5
SPN 2,0b 56Tg LL	0,0	0,0	0,0	2,1	1,6
SPT 3,0 56Tg LL	0,0	0,0	0,0	1,8	1,5

¹⁾ nach Abschlagen der Betonschicht mit sehr geringer Festigkeit
²⁾ Wasserlagerung bis Brandprüfung
³⁾ Luftlagerung bis Brandprüfung

Brandseite wurde mit 4 cm Überdeckung ein Baustahlgitter (8 mm Stabdurchmesser, 100 mm Maschenweite) eingebaut. Der Spritzbeton wurde in einer Schichtdicke von etwa 5 cm auf eine ca. 25 cm dicke, sandgestrahlte Normalbetonplatte aufgebracht. Unmittelbar vor dem Brandversuch wurde der Wassergehalt des Betons in der für das Abplatzen relevanten Tiefe von 0 bis etwa 2 cm ermittelt. Entsprechende Werte finden sich in Tabelle 3.

Der Wassergehalt der luftgelagerten Körper entsprach dem bestehender Tunnel, jener der wassergelagerten Körper war um etwa zwei Prozent höher. (Anmerkung: Untersuchungen an bestehenden Tunnelbauwerken zeigten, dass unabhängig von den untersuchten Bauweisen [NÖT mit Folienabdichtung bzw. WDI, dichte Schlitzwände mit Weißer Wanne] sowohl bei Bauwerken im Grundwasser als auch bei solchen mit Bergfeuchte im Beton in 2,5 cm Tiefe mit

Wassergehalten von 1,5 bis 3,5 Prozent und in 7 cm Tiefe mit 2,5 bis 4,5 Prozent zu rechnen ist. Nur in Bereichen mit örtlichen Fehlstellen ist durch die Durchnässung von bis zu etwa drei Prozent höheren Werten auszugehen.

Die Abplatzungen nach Wasserlagerung von MV 0 und MV 2,0 traten drei bis vier Minuten nach Brandbeginn auf und erfolgten in Plättchen mit einer Dicke von unter 1 cm. Zu diesem Zeitpunkt hatte der Beton in 1 cm Tiefe eine Temperatur unter 200° C. Die Masse des unmittelbar nach dem Brandversuch abgeplatzen, auf dem Boden des Ofens liegenden Materials wurde untersucht. Nach Abkühlen der Proben auf Raumtemperatur wurde von der dem Brand ausgesetzten Oberfläche die noch dort haftende, durch die Hitze zerstörte Betonschicht abgeschlagen und deren Dicke ermittelt. Entsprechende Ergebnisse sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Erwartungsgemäß war der Beton im Gefüge, der beim Brand Temperaturen von über 800° C ausgesetzt war, vollkommen gestört. Bei Verwendung der Polypropylen-Fasern traten beim Normalbeton mit künstlichen Luftporen (Durchmesser etwa 20 µm, Länge 6 mm) bei einer Betonfeuchtigkeit, wie sie auch in der Praxis zu erwarten ist, bereits bei einem Fasergehalt von 1,5 kg/m³ keine Abplatzungen auf. Aufgrund der am Trocken-Spritzbeton ermittelten Ergebnisse ist davon auszugehen, dass für Beton mit mindestens drei Prozent Luftporen bei einer gleichmäßigen Verteilung der Fasern ein Fasergehalt von 1,0 kg/m³ ausreichend ist. Die im Beton gemessenen Temperaturen sind auf Bild 3 dargestellt.

3.3. Großbrandversuche

3.3.1. Dimensionierung

Im Großbrandversuch wurden die Betone MV 1,5 mit 1,5 kg/m³ Fasern, MV 2,0 mit 2,0 kg/m³ Fasern, MV 2,5 mit 2,5 kg/m³ Fasern und Nass-Spritzbeton SPN 2,0a im Alter von etwa zwei Monaten untersucht. Dazu wurde aus jedem Beton ein eigenes Kalottenelement mit 50 cm Querschnittsdicke (Bild 4), 2 m Breite und einer zweilagigen Bewehrung hergestellt. Die Berechnung des statischen Systems erfolgte als

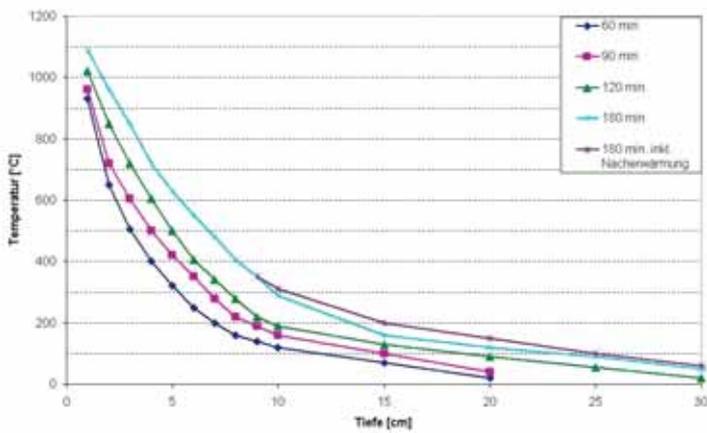


Bild 3: Temperaturverlauf über die Tiefe bei unterschiedlicher Branddauer und Lufttemperaturen im Brandraum von etwa 1.100° C bis 1.350° C

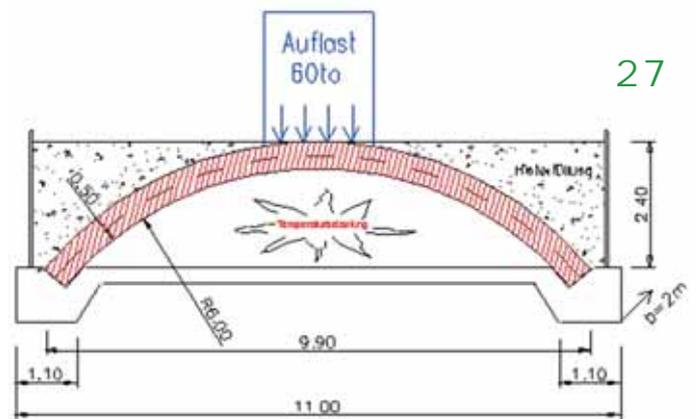


Bild 4: Kalottenmodell

gebetteter Stabzug. Berechnet wurde die statisch erforderliche Bewehrung, der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit wurde über einen Rissnachweis (Rissweite 0,2 mm) geführt. Als Lasten wurden das Eigengewicht von 25 kN/m³, eine Hinterfüllung mit einer Dichte von 20 kN/m³, einem Reibungswinkel von 30° und einem Bettungsmodul von 3000 kN/m³ sowie eine Auflast von 30 t/lfm Firstbereich (entspricht einer Einzellast von 60 t) in Rechnung gestellt.

3.3.2. Vorbereitung und Durchführung der Brandversuche

Um Aussagen über die tatsächliche Faser-Verteilung in den Kalotten zu ermöglichen, wurde der Fasergehalt am erhärteten Beton abgeschätzt. Dafür wurde von den Kalotten-

rändern von der Kalottenunterseite etwa aus den Viertelpunkten und der Kalottenmitte eine Betonprobe mit dem Meißel abgeschlagen. Ebenfalls ein Stück abgeschlagen wurde von einer im Labor hergestellten Betonprobe mit 2,0 kg/m³ PP-Fasern.

Unter dem Mikroskop kam es an der Bruchfläche sämtlicher Proben zur Beurteilung der Fasermenge nach Augenschein. Die im Labor hergestellte Probe mit 2,0 kg/m³ PP-Fasern zeigte viele gleichmäßig verteilte Fasern. Sie wurde als augenscheinliche Referenzprobe verwendet. Dadurch konnte abgeschätzt werden, wie viele Fasern im Vergleich zur Sollmenge jedes Betons in den einzelnen Proben vorhanden waren. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Für den Brandversuch wurde als Auflager und unteres Zugband für die Kalotte eine Bodenplatte angefertigt, auf die die Kalotte mit Neoprene Auflagern gestellt wurde. Die für die Zwischenlagerung und den Transport erforderlichen seitlichen Längsspannglieder wurden entfernt. Der seitliche Abschluss erfolgte mit einem 25 cm dicken YTONG-Mauerwerk. Zur Aufbringung der verdichteten Sandbeschüttung wurde außerhalb des YTONG-Mauerwerkes eine Bohlenwand errichtet. Die auf der Innenseite des YTONG-Mauerwerkes angebrachte Steinwollisolierung wurde mit 3 cm dicken Wärmeschutzplatten verkleidet. Um ein Durchschlagen der Hitze weitgehend zu verhindern, wurden die Hohlräume zwischen der Kalotte und der seitlichen Begrenzung des Brandraumes mit Steinwolle und Keramikwolle fest ausgestopft. Im First der Kalotten wurde eine Auflast von 60 Tonnen aufgebracht (Bild 5) und anschließend die dadurch entstandenen Zustand II-Risse ermittelt. Der Brandraum

wurde an der Stirnseite mit zwei modulierten Hochleistungs-Industriebrennern (Heizöl extra leicht) der Type Olymp HL3 befeuert (Bild 5). Die Gesamtleistung der Brenner betrug 4,3 MW (5850 PS). Pro Stunde kam es zu einem Verbrauch von etwa 400 Litern Heizöl extra leicht.

Vor dem Brand, vor und nach dem Aufbringen der Einzellast von 60 Tonnen und während des Brandversuches wurden die Verformungen der Kalotten 1 bis 4 mit elf in der Mittellinie der Kalottenseitenwand angebrachten Messbolzen gemessen. Diese wurden zwangungsfrei durch die seitliche Abmauerung geführt. Bei der „Spritzbetonkalotte“ 0 erfolgte die Messung der Verformungen am Rand und in der Mitte der Oberseite (dadurch war eine räumliche Nachrechnung der Verformungen möglich).

3.3.3. Abplatzungen beim Brandversuch

(1) Kalotte 1 aus Beton MV 1,5 mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern

Die Abplatzungen während des Brandversuches und der nach dem Abkühlen abgefallene, durch die Hitze in seinem Gefüge geschädigte Beton sind beispielhaft für Kalotte 1 auf Bild 6 dargestellt.

Erste massive Abplatzungen waren akustisch und augenscheinlich nach 13 Minuten Branddauer zu bemerken. Nach der 26. Minute konnten keine weiteren Abplatzungen mehr festgestellt werden. Bild 7 zeigt die bis zu 7 cm tiefen Abplatzungen (Braun verfärbte Bereiche: Hier hat sich die Oberfläche aufgrund der hohen Temperaturen während des Brandes verfärbt.) sowie die nach der Abkühlung abgefallenen Bereiche (helle Oberfläche).

Bild 5: Brandversuch, Kalotte mit 60 Tonnen Auflast in Kalottenmitte



Abplatzungen bei Brand Abwicklung der Unterseite Kalotte 1,5 kg/m³ PP-Fasern / 10cm Überdeckung

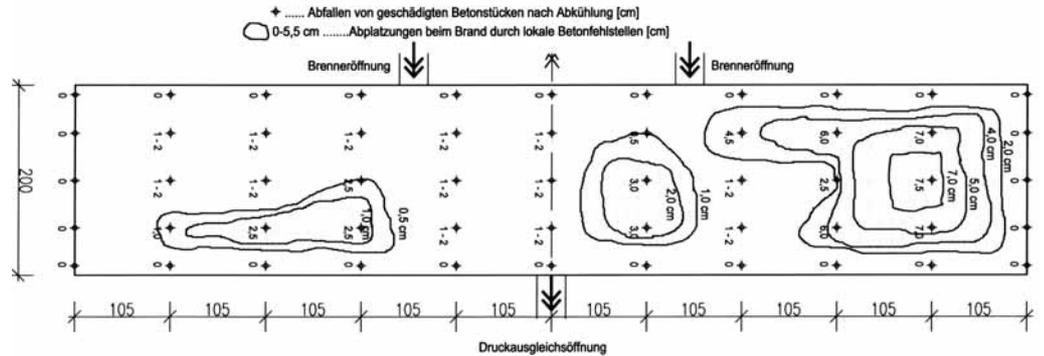


Bild 6: Kalotte aus Beton MV 1,5; Abplatzungen während des Brandversuches und nach dem Abkühlen abgefallener Beton

Aufgrund der in Tabelle 5 dargestellten Ergebnisse betreffend die Faserverteilung und den erforderlichen Fasergehalt gemäß 3,2 ist anzunehmen, dass die Fasergehalte in den abgeplatzten Bereichen teilweise unter 1 kg/m³ betragen.

(2) Kalotte 2 mit 6 cm Betonüberdeckung aus Beton MV 2 mit 2,0 kg/m³ PP-Fasern

Nach 9,5 Minuten Branddauer konnten lokal akustisch und augenscheinlich erste Abplatzungen festgestellt werden. Weitere lokale Abplatzungen waren 13 bis 15 Minuten nach Brandbeginn hörbar. Die Abplatzungen waren jeweils etwa 0,3 m² groß und maximal 1,5 cm tief.

(3) Kalotte 3 mit 10 cm Betonüberdeckung aus Beton MV 2 mit 2,0 kg/m³ PP-Fasern

Die Kalotte wurde in zwei Teilen mit Längspressfuge betoniert, Teil a (siehe Tabelle 5) mit teilweise zu wenig Fasern, Teil b mit gleichmäßig verteilten Fasern in ausreichender Menge.

Nach 13 Minuten Branddauer waren in Teil a die ersten Abplatzungen akustisch und augenscheinlich zu bemerken, wobei ein etwa 1 cm dickes Handteller großes Stück durch die Druckausgleichsöffnung ins Freie geschleudert wurde. Eine mikroskopische Beurteilung dieses Stückes an frisch hergestellten Bruchflächen zeigte, dass zumindest in diesem Bereich fast keine Fasern sichtbar waren. Nach der 23. Minute waren keine weiteren Abplatzungen mehr feststellbar. Teil b wies keine Abplatzungen auf. Es dürfte daher ein zu geringer Fasergehalt für die Abplatzungen verantwortlich gewesen sein.

Tabelle 5: Menge und Gleichmäßigkeit des Fasergehaltes im Kalottenbeton (Kapitel 3.3.2)

Kalotte	Fasergehalt in % vom Sollwert		
	1/4 Punkt	Mitte	3/4 Punkt
0; 2,0 kg/m ³ , 8 cm Überdeckung ¹⁾	40	50	30
1; 1,5 kg/m ³ , 10 cm Überdeckung	130	50	70
2; 2,0 kg/m ³ , 6 cm Überdeckung	40	60	100
3a, 2,0 kg/m ³ , 10 cm Überdeckung	100	50	80
3b; 2,0 kg/m ³ , 10 cm Überdeckung	100	90	100
4; 2,5 kg/m ³ , 10 cm Überdeckung	120	40	80

¹⁾ Auf diese Kalotte wurde der Spritzbeton aufgebracht.

Tabelle 6: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Kapitel 4.2 bis 4.4)

	MV 1	MV 2	MV 3	MV 4	MV 5	MV 6	MV 7	MV 8
Fasern [kg/m ³]	2,0	1,5	2,0	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0
Bindemittel [kg/m ³]	330	320	320	320	380	330	360	370
Wasser [kg/m ³]	170	164	164	164	185	165	190	190
Gesteinskörnung [kg/m ³]	1930 GK16	1950 GK 22	1950 GK 22	1950 GK 22	1790 GK 22	1950 GK 22	1720 GK 22	1680 GK 22
Ausbreitmaß [cm]	36	40	38	36	50	45	59	55
Luftgehalt [%]	1,5	1,5	1,6	1,4	5	6,5	5,5	6

Tabelle 7: Fasergehalt im Festbeton, ermittelt an Labormische in Probekörpergröße (Kapitel 4.2.1)

MV	Fasern (Stück je Meter Messlänge)		durchschnittlicher Faserdurchmesser (µm)		Fasern je Kilogramm zugegebener Fasern (Stück je Meter Messlänge)	
	EW	MW	EW	MW	EW	MW
1a	238, 237	238	77, 70	74	119, 119	119
1b	309, 307	308	77, 71	74	155, 154	155
1c	254, 229	242	76, 91	84	127, 115	121

Tabelle 8: Fasergehalt Festbeton, ermittelt an mehreren Probekörpern, die aus einer Labormische hergestellt wurden. (Kapitel 4.2.2)

MV	Fasern (Stück je Meter Messlänge)		durchschnittlicher Faserdurchmesser (µm)		Fasern je Kilogramm zugegebener Fasern (Stück je Meter Messlänge)	
	EW	MW	EW	MW	EW	MW
2	188, 217, 125	177	44, 59, 52	52	125, 145, 84	118
3	267, 319, 368	318	53, 56, 60	56	133, 160, 184	159
4	338, 293	316	46, 58	52	135, 117	126
6	267, 319, 368, 470	356	53, 56, 60, 56	56	134, 160, 184, 235	178

(4) Kalotte 4 aus Beton MV 2,5 mit 2,5 kg/m³ PP-Fasern

Während des Brandversuches konnten weder akustisch noch optisch Abplatzungen festgestellt werden.

(5) Kalotte 0 mit aufgebrachtem Spritzbeton SPN 2,0

Auf Kalotte 0 mit zahlreichen Zustand II-Rissen wurde nach Hochdruckreinigung mit etwa 1.700 bar (Korn bis etwa 8 mm freigelegt) Spritzbeton SPN 2,0a in einer Dicke von mindestens 5 cm aufgebracht. Nach einer Erhärtung von zwei Monaten

traten Zustand II-Risse ohne seitlichen Versatz auch im Spritzbeton auf. Während des Brandes fiel ein etwa 0,75 m² großes Stück vom Spritzbeton ab. Es handelte sich dabei um jenen Bereich, der extrem geringe Zugfestigkeiten (etwa 0,2 N/mm²) aufwies, was auf unübliche Probleme bei der Herstellung zurückzuführen war. Bild 8 zeigt den am Boden liegenden Teil nach dem Brand. Es ist deutlich erkennbar, dass es sich hierbei um keine Abplatzungen, sondern um den Absturz eines ganzen Stückes handelt. Ablösungen des Spritzbetons vom Untergrund traten nicht auf.

3.3.4. Nachrechnung der gemessenen Verformungen

Die zweidimensionalen Nachrechnungen wurden gemäß den tatsächlichen Temperaturverläufen vorgenommen. Aufgrund deutlicher Risse im Firstbereich von drei Kalotten wurde für die Berechnung die Biegesteifigkeit II im gerissenen Bereich des Querschnittes berücksichtigt. Die Berechnung erfolgte mit dem Programm FLAMDOCS entsprechend den tatsächlichen Temperaturverläufen der Versuche. Infolge der durch den Randeinfluss bedingten Querdehnung stimmen die bei der Nachrech-

Bild 7: Kalotte mit Beton MV 1,5; Abplatzungen während des Brandversuches (braun verfärbte Oberfläche) und nach dem Abkühlen abgefallener Beton (helle Oberfläche)



Bild 8: Im Bildvordergrund am Boden liegender, abgefallener Spritzbeton, 20 Minuten nach Brandende



nung ermittelten Verformungen mit jenen der Dimensionierung nur tendenziell überein. Bei der Berechnung als Flächentragwerk mit erweiterter Formulierung (unter Berücksichtigung der Querbiegung) konnten die gemessenen Deformationen auch numerisch sehr genau eruiert werden. Wegen der unterschiedlichen geometrischen Abmessungen zwischen Versuchskörper und realem Tunnelbauwerk ist eine 3D-Modellierung vermutlich nicht immer erforderlich, da sich der Einfluss der „Randstörung“ (Querverformung) auf die Randbereiche beschränkt.

4. Prüfverfahren zur Ermittlung des Fasergehaltes im erhärteten Beton

Nachfolgend sollen das analog zur Ermittlung von künstlichen Luftporen funktionierende Verfahren und die damit erzielbare Reproduzierbarkeit beschrieben werden. Die bei einer bestimmten Faserzugabe entstehende Anzahl von Kanälen im Beton ist u.a. von der Wirkung des Betonmischers abhängig. Angaben über die in der Praxis erforderliche Mindestanzahl der Kanäle können daher nur auf der Grundlage der durchgeführten Brandversuche gemacht werden. Die Ermittlung erfolgt nach Ö-NORM B 3303-2002, Abschnitt 7.6, bei 50-facher Vergrößerung und mit nachstehenden Änderungen:

(1) Vorbereiten der Prüffläche

Die Prüffläche ist planparallel, aber nur grob und nicht auf matten Glanz zu schleifen. Die geschliffene Fläche ist mit einer geeigneten Farbe, die den Beton dunkel färbt, aber nicht auf den PP-Fasern haftet, einzufärben, damit die Fasern bei der mikroskopischen Ermittlung sichtbar sind (Bild 9).

(2) Berechnungen

Ermittelt werden

- die Faseranzahl je Meter Messlänge und
- der mittlere Faserdurchmesser (Der gegenüber dem Durchmesser der Fasern bedeutend größere gemessene Wert in der Schnittfläche ist durch den i.a. nicht senkrechten Schnitt und die mittels Grobschliff ausgefranzte Faseroberfläche bedingt. Anmerkung: Der ermittelte Wert ist vom Faserdurchmesser und der Wirkung des Mischers [Vereinzeln der Fasern beim Mischen] abhängig. Veränderungen gegenüber der Erstprüfung weisen auf eine unterschiedliche Mischwirkung und/oder andere Fasern hin.)

4.1. Untersuchte Betonzusammensetzungen

Der Fasergehalt wurde an für unterirdische Verkehrsbauwerke typischen Betonzusammensetzungen (Tabelle 6) untersucht.

4.2. Fasergehaltbestimmung an Beton aus Labormischen

4.2.1. Mischengröße = Probekörpervolumen

Im Labor wurde mit drei verschiedenen Fasern (Durchmesser ≤ 20 µm, Länge 6 mm) je eine Mische mit 3,5 Liter hergestellt und daraus jeweils ein 15 cm Würfel geformt. Durch die Verwendung der gesamten Probenmenge sollte sichergestellt werden, dass im Würfel auch tatsächlich die gewünschte Fasermenge enthalten ist. Die ermittelten Fasergehalte sind in Tabelle 7 aufgelistet. Die Messflächen befanden sich senkrecht zur abgezogenen Würfeloberfläche in einem Abstand von 3 cm. Der Unterschied der Faseranzahl in den beiden Messflächen betrug null bis maximal zehn Prozent des ermittelten Wertes.

4.2.2. Mehrere Probekörper aus einer Mische

Zur Überprüfung der Gleichmäßigkeit der Einmischung der Fasern im Labor wurde eine Mische mit 12 Litern hergestellt und daraus Würfel von 15 cm geformt. Die ermittelten Fasergehalte sind in Tabelle 8 wiedergegeben. Die Messflächen befanden sich senkrecht zur abgezogenen Würfeloberfläche. An jedem Würfel wurde eine Bestimmung durchgeführt. Der Unterschied

Tabelle 9: Fasergehalt Festbeton, ermittelt an mehreren Probekörpern, die während einer Betonierung hergestellt wurden. (Kapitel 4.3)

MV	Fasern (Stück je Meter Messlänge)		durchschnittlicher Faserdurchmesser (µm)		Fasern je Kilogramm zugegebener Fasern (Stück je Meter Messlänge)	
	EW	MW	EW	MW	EW	MW
5	276, 252, 274, 246, 226, 257, 225, 331, 257, 259	265	98, 80, 102, 97, 98, 92, 98, 82, 78, 92	91	138, 126, 137, 123, 113, 124, 113, 166, 128, 129	133
6	467, 419, 317, 392, 347	388	55, 68, 61, 86, 64	67	233, 210, 159, 196, 174	195
7	230, 250, 243	241	72, 68, 69	70	115, 125, 122	121
8a	455, 381 ¹⁾ , 447 ²⁾	428	90, 86, 96	90	223, 228, 191	214
8b	329, 328 ¹⁾ , 343 ²⁾	333	121, 94, 138	118	164, 164, 172	167

¹⁾ Messfläche in 3 cm Abstand von erstem Wert
²⁾ Messfläche parallel abgezogener Oberfläche

Tabelle 10: Fasergehalt Festbeton, ermittelt an mehreren aus dem Bauteil entnommenen Bohrkernen (Kapitel 4.4)

MV	Fasern (Stück je Meter Messlänge)		durchschnittlicher Faserdurchmesser (µm)		Fasern je Kilogramm zugegebener Fasern (Stück je Meter Messlänge)	
	EW	MW	EW	MW	EW	MW
6	222, 151, 224, 197, 228	204	52, 50, 59, 39, 55	51	111, 76, 112, 99, 114	102
7	134, 130, 138, 112, 150, 115, 138, 151	134	79, 77, 79, 77, 87, 85, 86, 86	83	67, 65, 69, 56, 75, 58, 69, 76	67

der Faseranzahl in den einzelnen Würfeln betrug sieben bis maximal 32 Prozent, im Mittel 21 Prozent des aus den Einzelwerten ermittelten durchschnittlichen Fasergehaltes. Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit den in Kapitel 4.1 dargelegten Resultaten zeigt bei Labormischen mit dem verwendeten Planetenmischer eine relativ große Ungleichmäßigkeit der Einmischbarkeit der PP-Fasern.

4.3. Fasergehalt – an bei Betonierung hergestellten Probekörpern ermittelt

Während der Entleerung des Transportbetonfahrzeuges wurden etwa gleichmäßig verteilt 15 cm große Würfel hergestellt. Die hier ermittelten Fasergehalte finden sich in Tabelle 9. Die Messflächen befanden sich, wenn nicht anders angegeben, senkrecht zur abgezogenen Würfeloberfläche. An jedem Würfel wurde eine Bestimmung durchgeführt. Der Unterschied der Faseranzahl in den einzelnen Würfeln aus einer Mische betrug zehn bis maximal 25 Prozent, im Mittel 18 Prozent des aus den Einzelwerten ermittelten durchschnittlichen Fasergehaltes. Ein Vergleich dieser Resultate mit den in Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 erörterten Ergebnissen zeigt bei Labormischen und Baustellenmischen eine etwa gleich große Ungleichmäßigkeit der Einmischbarkeit von PP-Fasern. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse von MV 8a und 8b (Fasern derselben Charge verwendet, bei Prüfung am Frischbeton in beiden Fällen 2,0 kg/m³ Fasern nachgewiesen) ergibt für MV 8b weniger Fasern, wobei diese jedoch einen größeren mittleren Durchmesser als MV 8a aufweisen. Dies dürfte auf die unterschiedliche Mischwirkung (Vereinzelung der Fasern) zurückzuführen sein.

4.4. Fasergehalt – ermittelt an Proben aus Bauteil

Aus mit MV 6 und MV 7 hergestellten Bauteilen wurden zur Ermittlung des Fasergehaltes Bohrkern entnommen. Insbesondere beim Bauteil aus MV 7 war aufgrund der Beobachtungen bei der Betonherstellung ein zu geringer Fasergehalt zu erwarten.

4.5. Schlussfolgerungen

Mittels des vorgeschlagenen Prüfverfahrens lässt sich der Fasergehalt im Festbeton ermitteln.

Bei Verwendung identischer Fasern ist eine geringere Faseranzahl in Kombination mit einem größeren Faserdurchmesser ein Hinweis auf eine schlechtere Mischwirkung (Vereinzelung der Fasern). Baustellenmischer mit Wirbler haben i.a. eine bessere Mischwirkung als konventionelle Gegenstrom-

zwangsmischer im Labor. Wegen der unvermeidlichen Streuung der Einmischung sind zur Beurteilung mindestens drei Probekörper aus verschiedenen Stellen des zu untersuchenden Prüflöses zu verwenden. Diese müssen im Mittel je Kilogramm zugegebener Fasern (Durchmesser < 20 µm, Länge 6 mm) mindestens 120 Fasern je Meter Messlänge aufweisen. Wird in Ausnahmefällen nur ein Probekörper zur Beurteilung herangezogen, muss dieser mindestens 150 Fasern je Meter Messlänge aufweisen.

Literaturverzeichnis

- [1] Praxisverhalten von erhöht brandbeständigem (Innenschalen-)Beton (EBB). Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie. FFF-Projekt Nr.: 806201, gefördert von BEG, HL-AG, ÖBB, ÖVBB, VÖZ, Wien 2003.
- [2] Gräf, H., Bonzel, J.: Über den Einfluß der Porosität des erhärteten Betons auf seine Gebrauchseigenschaften, Beton 40 (1990) Nr. 7, Betonverlag Düsseldorf.

Bild 9: Grob geschliffene Betonoberfläche mit PP-Fasern

