

LOW TEMPERATURE SPALLING

Im Zuge des Forschungsprojekts LoTS (Abplatzpotential bei Betonbauteilen in Tunnelbauwerken im Niedertemperaturbereich) wurde das Verhalten vom herkömmlichen Innengewölbebeton bei Temperaturen bis 450 °C untersucht und mit dem Verhalten von Faserbeton der Klasse BBG verglichen.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden aufbauend auf bisherigen Erkenntnissen für Brandereignisse im Hochtemperaturbereich Betonzusammensetzungen untersucht, die eine ausreichende Brandbeständigkeit im Niedertemperaturbereich bis etwa 450 °C ohne die übliche Zugabe an Polypropylenfasern sicherstellen sollen. Die Fragestellung des Verhaltens von Betonrezepturen im Niedertemperaturbereich stellt dabei aufbauend auf dem Stand der Technik in Österreich einen neuen Forschungsbereich dar. Um das gemäß der Literatur stark rezepturabhängige Verhalten des Betons bei Temperatureinwirkungen von bis zu 450 °C zu untersuchen, wurden Brandversuche mit Probekörper unterschiedlicher Zusammensetzung durchgeführt. Die Betonrezeptur mit der Bezeichnung C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG wurde dabei innerhalb der Vorgaben der ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ mit Variation der Gesteinskörnungsart, des Luftgehaltes und der Wassersättigung des Probekörpers abgeändert und das Verhalten bei Temperaturbeanspruchung aufgezeichnet. Als Referenzbetonsorte wurde ein Faserbeton der Bezeichnung C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/I BBG herangezogen. Durch Prüfung aller relevanten Frisch- und Festbetoneigenschaften vor dem Brand-



versuch und dem Abplatzverhalten bzw. der Betoneigenschaften nach dem Brandversuch wurden neue Erkenntnisse gewonnen, inwieweit Betonsorten im Niedertemperaturbereich auch ohne Faserzugabe eingesetzt werden können bzw. welche Parameter und Rezepturvarianten dieses Verhalten positiv beeinflussen.

Facts:

- Initiative: VIF 2013
- Kurztitel: LoTS
- Laufzeit: 06/2014-12/2016
- Laufzeit in Monaten: 30
- Forschungskonsortium: Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie - Forschungsinstitut (VÖZfi)
TU Wien – Institut für Hochbau und Technologie – Forschungsbereich Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit (BWB)
- 8 Arbeitspakete
- 9 Meilensteine
- Gesamtkosten netto: € 149.953

ABB 1. Großprobekörper (Untersicht) nach dem Brandversuch

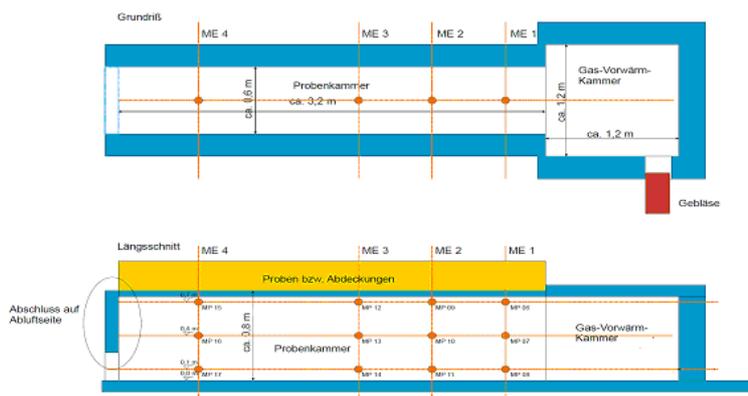


ABB 2. Grundriss und Seitenansicht des Ofenaufbaus

Kurzzusammenfassung

Problem

Klärung der Brandbeständigkeit von herkömmlichen Beton bei Temperaturen bis zu 450 °C und Beurteilung der Einflussfaktoren in Bezug auf die Wahl der Ausgangsstoffe.

Gewählte Methodik

Brandversuche mit Kleinkörper bei Variation der Rezeptur innerhalb der Vorgaben der entsprechenden Richtlinien und Beurteilung des Verhaltens über eingebaute Temperatursensoren sowie optische und mechanische Prüfung der Probekörper. Durchführung eines Großbrandversuches mit 3 Probekörpern. Die Brandversuche wurden dabei bei 450 °C und einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,4 m/s über eine Dauer von 90 Minuten durchgeführt.

Ergebnisse

Generell ist es bei keinem der Brandversuche unabhängig von der Zusammensetzung zu Betonabplatzungen und somit zu einer Schädigung der Betonstruktur bei Temperaturen bis 450 °C gekommen.

Schlussfolgerungen

Im Zuge der Brandversuche konnten keinerlei Abplatzungen an den Probekörpern festgestellt werden. Daher können keine Einschränkungen bei der Wahl der Ausgangsstoffe definiert werden. Für abgesicherte Erkenntnisse wären weitere Versuche mit erweiterter Variation in den Betonrezepturen (z.B. unterschiedliche Zementsorten) sinnvoll.

English Abstract

In the course of the research project LoTS, the behavior of conventional inner shell concrete was tested at temperatures up to 450 °C and compared with the behavior of fiber concrete of class BBG. The composition of the concrete and the specimen storage were varied as much as possible (air content, type of aggregate and saturation of the specimen). No spalling of concrete could be detected in any recipe variant.

Impressum:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

DI Dr. Johann Horvatits,
Abt. IV/ST 2 Technik und
Verkehrssicherheit
johann.horvatits@bmvit.gv.at,

DI (FH) Andreas Blust,
Abt. III/14 Mobilitäts- und
Verkehrstechnologien
andreas.blust@bmvit.gv.at,
www.bmvit.gv.at

ÖBB-Infrastruktur AG

DI Andreas Schön
Streckenmanagement und
Anlagenentwicklung
Stab LCM und Innovation
andreas.schoen2@oebb.at,
www.oebb.at

DI Roman Heissenberger
Streckenmanagement und
Anlagenentwicklung
Stab LCM und Innovation
Roman.heissenberger@oebb.at,
www.oebb.at

ASFINAG

DI Eva Hackl,
Manager International Relations
und Innovation
eva.hackl@asfinag.at,

DI (FH) René Moser, Leiter Strategie,
Internationales und Innovation
rene.moser@asfinag.at,
www.asfinag.at

**Österreichische Forschungs-
förderungsgesellschaft mbH**

DI Dr. Christian Pecharda,
Programmleitung Mobilität
Sensengasse 1, 1090 Wien
christian.pecharda@ffg.at,
www.ffg.at

Dezember, 2016

Abplatzpotential bei Betonbauteilen in Tunnelbauwerken im Niedertemperaturbereich (LowTemperatureSpalling)

LOTS

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2013
(VIF2013)

Dezember 2016

Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
A - 1030 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
A - 1020 Wien



Autobahnen-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A - 1010 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:

Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie
Forschungsinstitut (VÖZfi)
Reisnerstraße 53
A-1030 Wien



TU Wien – IHT
Forschungsbereich Baustofflehre,
Werkstofftechnologie und Brandsicherheit
Karlsplatz 13
1040 Wien



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Bereich Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien



Abplatzpotential bei Betonbauteilen in Tunnelbauwerken im Niedertemperaturbereich (LowTemperatureSpalling) LOTS

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2013)

Autoren:

DI Gerald Maier

DI Dr. Johannes Kirnbauer

DI Dr. Martin Peyerl

DI Dr. Heinrich Bruckner

Ing. Christian Lebeda

Ing. Hubert Mayerhofer

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie

Forschungsinstitut (VÖZfi)

Reisnerstraße 53

A-1030 Wien

TU Wien – IHT

Forschungsbereich Baustofflehre,

Werkstofftechnologie und Brandsicherheit

Karlsplatz 13

1040 Wien

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	8
2	LITERATURSTUDIE – AP1	9
2.1	Stand der Technik	9
2.2	Normative Grundlagen	15
2.3	Brandsicherheit im Niedertemperaturbereich	17
3	PROGRAMMIERSTELLUNG UND VERSUCHSBEAUFSICHTIGUNG – AP2	19
3.1	Motivation und Herangehensweise	19
3.2	Meilensteine und Projektziele	20
4	AUSWAHL UND CHARAKTERISIERUNG DER BETONAUSGANGSSTOFFE – AP3	23
4.1	Kornrohdichten	24
4.2	Sieblinien der Gesteinskörnungen	24
5	HERSTELLUNG DER (KLEIN-) PROBEKÖRPER UND BETONPRÜFUNG – AP4	26
5.1	Einleitung	26
5.2	Herstellung	27
5.3	Frischbeton und Festbetonkennwerte der Kleinkörper	31
6	BRANDVERSUCHE AN KLEINKÖRPERN – AP5	35

6.1	Probekörper und Vorspannung.....	35
6.2	Entwicklung der Versuchsanordnung (Brandraum) und Festlegung der Versuchsdurchführung	37
6.3	Versuchsdurchführung und Auswertung.....	40
6.3.1	Serie MV1	41
6.3.2	Serie MV2	43
6.3.3	Serie MV3	45
6.3.4	Serie MV4	47
6.3.5	Serie MV5	49
6.3.6	Serie MV6	51
6.3.7	Serie MV7	53
6.3.8	Serie MV8	55
6.3.9	Serie MV9	57
6.3.10	Serie MV10	59
6.3.11	Serie MV11	61
6.3.12	Serie MV12	63
6.3.13	Serie MV13	65
6.3.14	Serie MV14	67
6.3.15	Überblick und Interpretation der Ergebnisse	69
6.3.16	Messung der Luftpermeabilität im heißen Zustand an ausgewählten Mischungen.....	79
6.3.17	Vergleichende Brandversuche an Kleinprobekörpern mit der Einheitstemperaturkurve	81
6.3.18	Prüfung der Abreißfestigkeit vor und nach dem Brandversuch	84
6.3.19	Prüfung Druckfestigkeit von Bohrkernen.....	86
6.3.20	Prüfung der Porosität des Zementsteins vor und nach dem Brandversuch.....	88
7	BRANDVERSUCHE AN GROSSKÖRPERN – AP 6	91
7.1	Allgemeines.....	91

7.2	Herstellung der Großkörper	95
7.3	Ermittlung der Frisch- und Festbetonkennwerte	98
7.3.1	Frischbetonkennwerte	98
7.3.2	Festbetonkennwerte	99
7.4	Ergebnis und Beurteilung	109
7.4.1	Ergebnisse der Prüfung von Großkörpern bei einer Temperaturbelastung von 450°C	109
7.4.2	Optische Beurteilung	111
7.4.3	Prüfung der Abreißfestigkeiten vor und nach dem Brandversuch	117
7.4.4	Bestimmung der Porosität des Zementsteins vor und nach dem Brandversuch	120
8	GRUNDLAGEN DER MODELLRECHNUNGEN, SIMULATION – AP 7	121
8.1	Festlegung von Brandszenarien, Bemessungsbränden und Modellen zur Ermittlung der thermischen Belastungen, die zu LOTS führen können	121
8.1.1	Grundlagen	121
8.1.2	Bemessungsbrände auf Basis experimenteller Daten	125
8.2	Festlegung von Randbedingungen und Modellen zur Simulation des thermischen Materialverhaltens im Zusammenhang mit LOTS	131
8.2.1	Modelle	131
8.2.2	Modellannahmen	134
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	138
10	LITERATUR	141
10.1	Kapitel 1 - 7	141
10.2	Kapitel 8	143

1 EINLEITUNG

Die schweren Tunnelbrände der Vergangenheit haben gezeigt, welche verheerenden Auswirkungen ein Brand auf die Sicherheit und Tragstruktur von Tunnelbauwerken haben kann.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen aufbauend auf bisherigen Erkenntnissen für Brandereignisse im Hochtemperaturbereich Betonzusammensetzungen untersucht werden, die ohne die übliche Zugabe an Polypropylenfasern eine ausreichende Brandbeständigkeit im Niedertemperaturbereich bis etwa 450 °C sicherstellen sollen.

Versuchsreihen mit Klein- und Großbrandversuchen sollen die generellen Einflussfaktoren der Betonzusammensetzung auf das Abplatzverhalten unter Temperatureinwirkung darlegen.

Auf Basis von zusätzlichen begleitenden Untersuchungen der relevanten Betonkennwerte, wie Porosität oder Permeabilität sollen Schlüsse gezogen werden, welche Maßnahmen bzw. Betonzusammensetzungen für diesen Einsatzbereich am besten geeignet sind.

Die Arbeit ist folgendermaßen gegliedert:

- Literaturstudie: Sichtung und Zusammenstellung der relevanten Literatur
- Überblick über die geplanten Versuche
- Auswahl und Charakterisierung der Betonausgangsstoffe
- Probekörperherstellung mit der Ermittlung der relevanten Frisch- und Festbetonkennwerte
- Brandversuche an Kleinprobekörpern
- Brandversuche an Großprobekörpern
- Grundlagen der Modellrechnungen, Simulation Zusammenstellung relevanter Brandszenarien
- Versuchsauswertung und Interpretation

2 LITERATURSTUDIE – AP1

2.1 Stand der Technik

Aufgrund der Topographie gehört Österreich zu den Ländern mit den meisten Tunnelbauwerken. Die schweren Tunnelbrände (Euro-Tunnel 1996 und 2008, Mont-Blanc-Tunnel 1999, Tauern-Tunnel 1999, Gotthard-Tunnel 2001) haben auf dramatische Art und Weise gezeigt, welche verheerenden Auswirkungen ein Brand in Tunnelanlagen auf die Sicherheit von Personen aber auch auf die Tragstrukturen der Tunnel haben kann [1]. Ein rascher Temperaturanstieg innerhalb von Minuten und über Stunden andauernder hoher Temperatur führte zu starken Schäden an der Betonstruktur. Die im Anschluss an die Tunnelbrände abgewickelten Forschungsprojekte, zeigten, dass eine erhöhte Brandbeständigkeit von Tunnelinnenschalenbeton oder Spritzbeton generell durch Zugabe von Polypropylenfasern erreicht werden kann.

Abplatzverhalten und Betonzusammensetzung

Grundsätzlich dringen bei Bränden hohe Temperaturen in die Betonkonstruktion ein, erzeugen Temperaturspannungen und verändern die thermischen Kennwerte des Betons sowie das Verbundverhalten von Beton und dem eingebetteten Stahl. Bei Überschreiten eines gewissen Temperaturniveaus im Beton kann es zu einem explosionsartigen Abplatzen der obersten Schichten und somit zu einer sukzessiven Verringerung des Querschnittes kommen [2]. Grund für diese Abplatzungen ist das im Beton chemisch und physikalisch gebundene Wasser in Verbindung mit einem steilen Temperaturgradienten, der mit einem schnellen Anstieg des Dampfdruckes im Beton einhergeht. Kann der entstehende Wasserdampf nicht (schnell genug) entweichen, kommt es aufgrund der Volumenvergrößerung des Wasserdampfes (Faktor 1000 [19]) zu einem explosionsartigen Abplatzen der obersten Betonschichten [1].

Um die Phänomene des Abplatzverhaltens besser zu verstehen, zeigt Abbildung 1 den Dampfdruck von Wasserdampf bei verschiedenen Temperaturen.

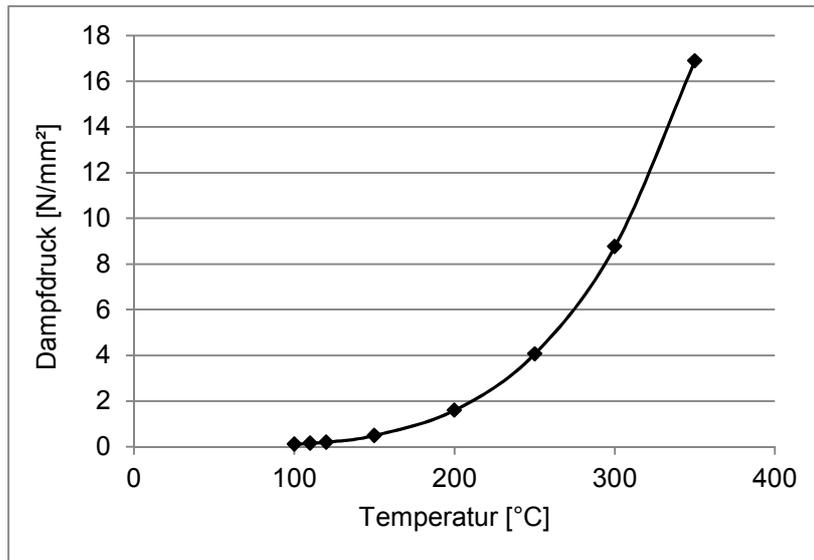


Abbildung 1: Dampfdruck des gesättigten Wasserdampfes in Abhängigkeit von der Temperatur [nach 1, 3]

Aus dem Zusammenhang Betonfeuchtigkeit und Abplatzverhalten lässt sich ableiten, dass Beton mit einem höheren Feuchtegehalt stärkere Abplatzungserscheinungen zeigen als weitgehend trockener Beton. Wird der Feuchtegehalt im Beton ausschließlich von der Luftfeuchtigkeit bestimmt, stellt sich je nach Umgebungsbedingungen (relative Luftfeuchtigkeit) und Zusammensetzung des Betons eine Ausgleichsfeuchte im Beton ein [3]. Die Korrelationen sind Abbildung 2 zu entnehmen. Die Lagerung sowie das Alter der Probekörper vor der Durchführung von Brandversuchen haben daher einen entscheidenden Einfluss auf die Versuchsergebnisse.

Theoretischer Zusammenhang zwischen Gleichgewichtswassergehalt und relativer Luftfeuchtigkeit

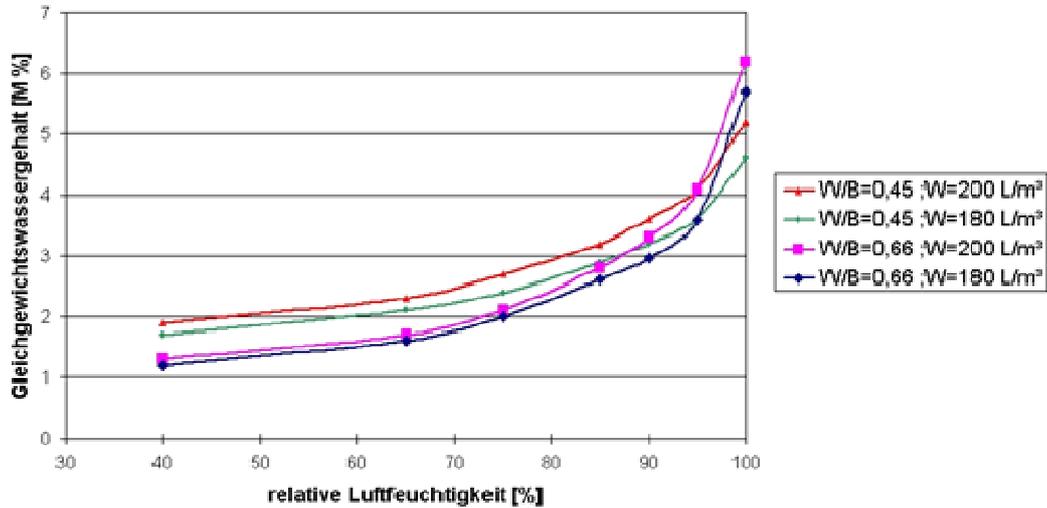


Abbildung 2: Theoretischer Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchtigkeit und Gleichgewichtswassergehalt von vollständig hydratisiertem Beton [3]

Weitere Abhängigkeiten zwischen Abplatzverhalten und der Porosität des Betons ergeben sich aus dem Zusammenhang zwischen W/B-Wert und Luftgehalt des Betons. *Korten und Wetzig* [19] untersuchten den Zusammenhang zwischen W/B-Wert, Porosität und Abplatzverhaltens des Betons an 350 mm großen Proben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt.

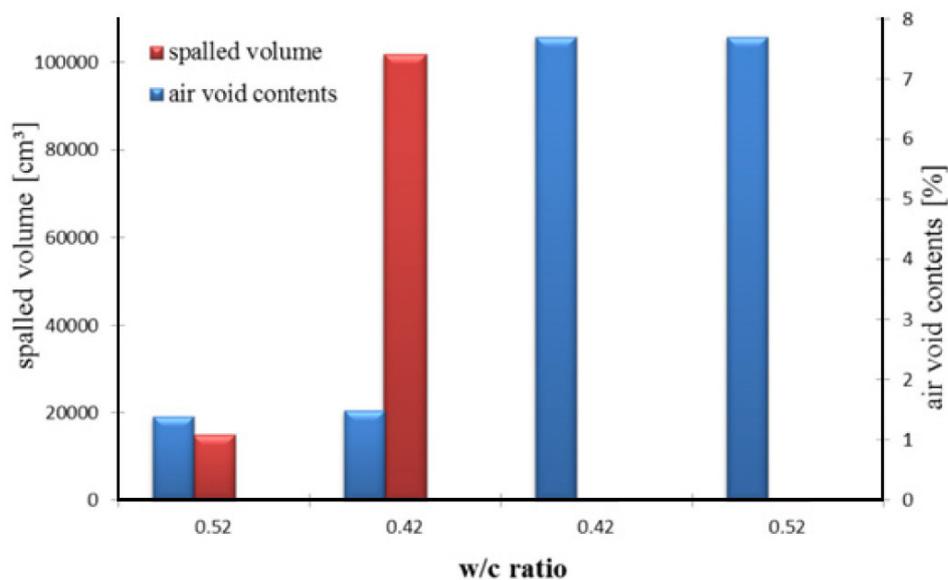


Abbildung 3: Abplatzverhalten und Porosität [19]

Bei den Untersuchungen wurden Betonproben mit 1 kg/m^3 PP-Fasern verwendet. Bei hohen Luftgehalten kam es praktisch zu keinen Abplatzungen, im Gegensatz zu Proben mit geringem Luftgehalt. Weiters zeigte sich, dass ein geringerer W/B-Wert und damit einhergehende geringere Porigkeit und Wasserdampfdurchlässigkeit des Zementsteins das Verhalten weiter verschlechtert [19].

Eine wirksame Reduzierung von explosionsartigen Abplatzungen bei Normalbeton kann durch ein entsprechendes Porensystem erreicht werden, das zu einem Abbau des Dampfdruckes führt. Wird dem Beton eine ausreichende Menge von PP-Fasern beigegeben, zersetzen sich diese ab einem gewissen Temperaturniveau (Schmelztemperatur ca. 170°C) thermisch und es bilden sich durchgängige Mikroporen aus, die eine Entspannung des Dampfdruckes begünstigen. Brandversuche haben gezeigt, dass entsprechend kurze, dünne PP-Fasern die besten Ergebnisse liefern. In [18] wurde im Zuge von Großkörperbrandversuchen ermittelt, dass durch die Zugabe von $1,5 \text{ kg/m}^3$ bzw. $3,0 \text{ kg/m}^3$ das Abplatzverhalten von Beton bei einer ursprünglichen Abplatztiefe der Probekörper von 360 mm (bei 300 mm/h) stark bzw. vollständig verhindert werden kann. In [3] wurden die optimalen Zugabemengen unter Berücksichtigung der Verarbeitbarkeit ermittelt. Es zeigte sich, dass ein Anteil der PP-Fasern von 2 kg/m^3 Beton die besten Ergebnisse zeigte. Abbildung 4 zeigt verwendete Fasern unter dem Auflichtmikroskop sowie in den Beton eingebettete PP-Fasern.



Abbildung 4: PP-Faser bei 50-facher Vergrößerung (links) sowie im Beton eingebetteten PP-Fasern (rechts) [3]

PP-Fasern können zwar das Abplatzen verhindern, hemmen jedoch nicht die Temperatureindringung oder verändern die thermischen Eigenschaften des Betons wesentlich. Die Temperatureindringung wird jedoch mit zunehmendem Faser- und Wassergehalt vermindert.

Untersuchung der Permeabilität und Porosität von Beton

Um die Zunahme der Durchlässigkeit des Betons durch das Aufschmelzen der Fasern beschreiben zu können, eignen sich Gasdurchlässigkeitsmessungen [1]. Abbildung 5 zeigt Versuchsergebnisse von Beton mit und ohne Faserzugabe.

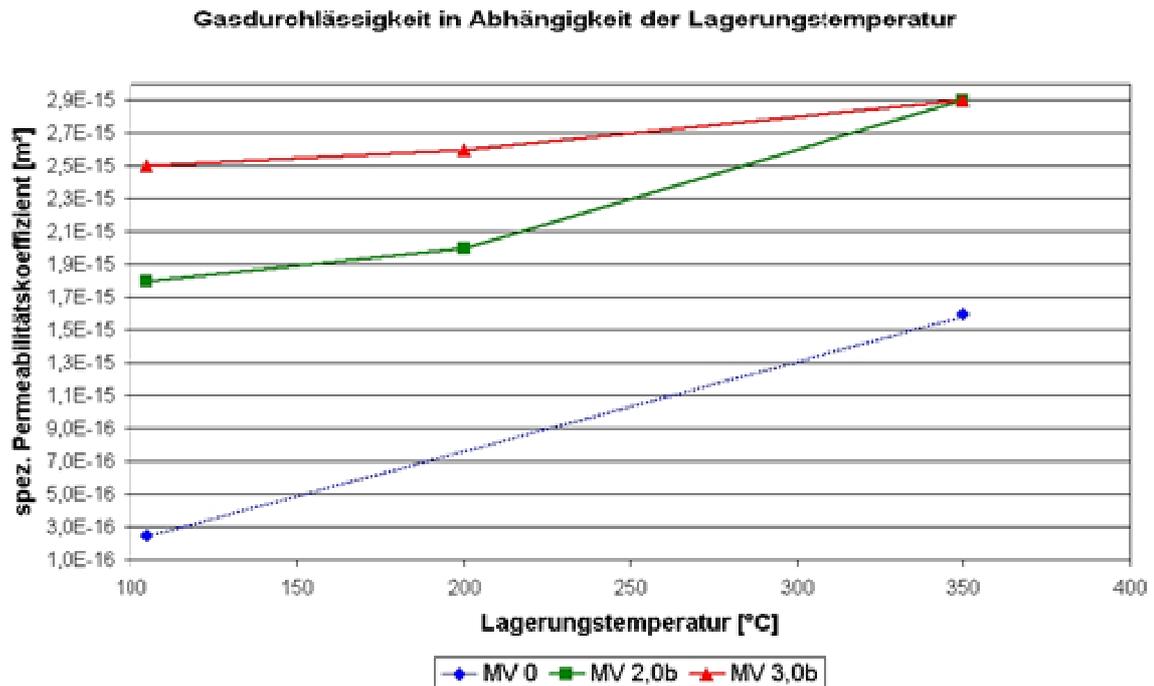


Abbildung 5: Gasdurchlässigkeit von Beton ohne (MV 0) und mit 2,0 kg/m³ (MV 2,0) und 3,0 kg/m³ (MV 3,0) PP-Faserzugabe in Abhängigkeit der Temperatur (gemessen an abgekühlten Proben) [1]

Aus Abbildung 5 wird deutlich, dass bereits bei einer Lagerungstemperatur von 105 °C die Gasdurchlässigkeit in Abhängigkeit der Mischungsverhältnisse um das 10-fache höher ist als bei einer ident zusammengesetzten Betonsorte ohne Zugabe von PP-Fasern. Die Gasdurchlässigkeit steigt bei anwachsender Temperatur noch weiter an. Bei höheren Temperaturen kommt es auch zum Verdampfen des chemisch gebundenen Wassers im Beton, weshalb die Durchlässigkeit des Betons auch ohne Faserzugabe deutlich zunimmt.

Neben der Messung der Gasdurchlässigkeit gibt auch die Ermittlung der Porenvolumenverteilung deutliche Aufschlüsse über das Abplatzverhalten des Betons. Im Rahmen des KIRAS Projekts „Sicherheit von Hohlraumbauten unter Feuerlast“ [4] wurden als Grundlage für die erfolgte Modellierung Porositätsuntersuchungen mit einem

Quecksilberdruckporosimeter an bei unterschiedlichen Temperaturen gelagerten Proben mit unterschiedlich dosierten PP-Fasern durchgeführt. Die Zusammenhänge zwischen PP-Fasergehalt und Porosität sind Abbildung 6 zu entnehmen.

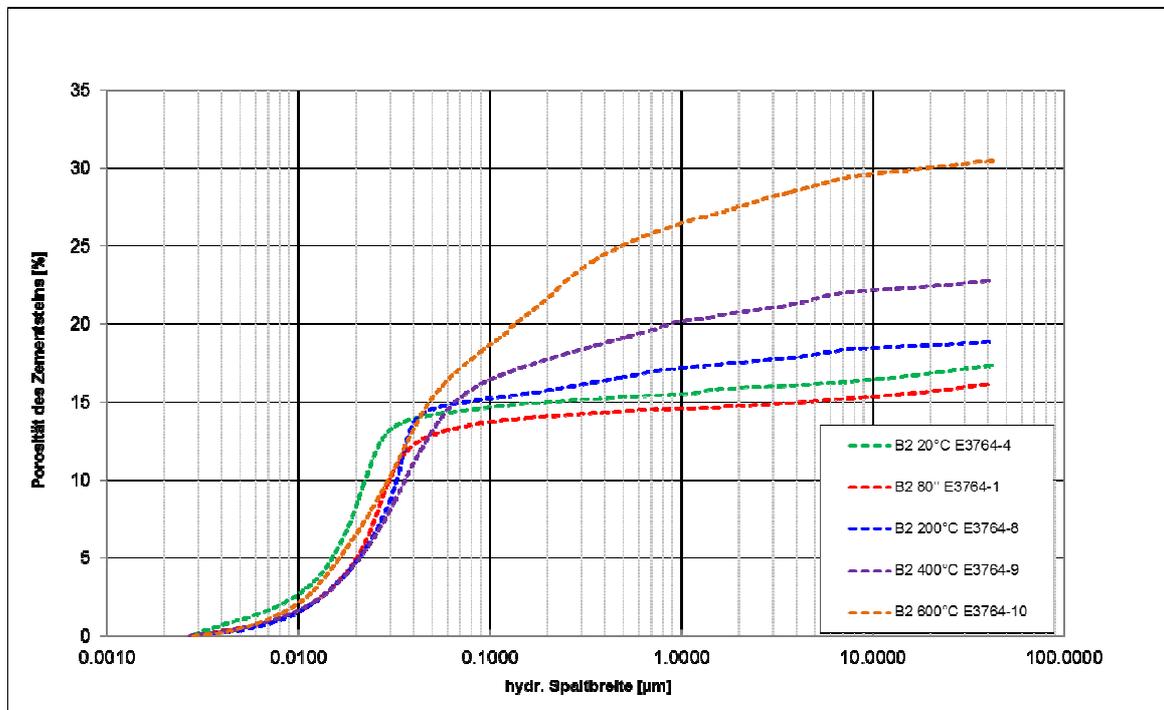


Abbildung 6: Porengrößenverteilung für von Mörtelproben für unterschiedliche Temperaturstufen [4]

Gemäß Abbildung 6 zeigt sich, dass bei anwachsender Temperatur (ab etwa 200 °C) auch eine Zunahme der Porosität zu beobachten ist. Dies passiert nicht schlagartig, sondern sukzessive mit steigender Temperatur. Diese Ergebnisse bestätigen, dass aufgrund der Faserzugabe eine poröse Übergangszone zwischen der Faser selbst und der Bindemittelmatrix vorliegt. Bei Erwärmung kann der Dampfdruck in dieser Zone schon vor dem Erreichen des Schmelzpunktes der Fasern von etwa 170° C entweichen. Steigen aufgrund eines Brandereignisses die Temperaturen noch weiter an, schmelzen die Fasern und es entsteht ein noch gasdurchlässigeres Porensystem [1].

Der positive Einfluss von Fasern auf die Durchlässigkeit bzw. Permeabilität von Beton wurde bereits eingehend untersucht. Zur Untersuchung dieser Problematik erfolgten zahlreiche Brandversuche im Labormaßstab als auch an Großkörpern. Beispielsweise wurden zur Simulation einer Tunnelkalotte Großkörper auf deren Brandbeständigkeit untersucht [3, 5]. Ziel der Versuchsreihen war, die Auswirkung von Betonzusammensetzung und Fasergehalt auf das Abplatzverhalten zu untersuchen. Es zeigte sich, dass eine gute Einmischung der Fasern im Beton zur Reduktion der

Abplatzungen essentiell ist. Nicht zufriedenstellende Versuchsergebnisse resultierten unter anderem daraus, dass im Großbrandkörper festgestellte Fasermengen örtlich teilweise stark von den Soll-Zugabemengen abwichen.

Aufgrund dieser Erkenntnisse war es erforderlich, ein entsprechend aussagekräftiges Prüfverfahren zur Kontrolle des erforderlichen Fasergehaltes im Frisch- und Festbeton zu entwickeln. Versuchsreihen zeigten, dass durch Zuhilfenahme eines Dispergierungsmittels die Fasern sehr gut von den restlichen Betonbestandteilen abgetrennt werden können und so eine Ermittlung des Fasergehalts am Frisch- und Festbeton möglich ist [6].

Einfluss der Kornform und des Bindemittels

Als generelle Einflussfaktoren auf das Abplatzverhalten können neben der Faserzugabe die Kornform der Gesteinskörnung (z.B. Rundkorn oder Kantkorn), die Bindemittelart, der Wasserbindemittelwert (W/B-Wert), der Luftgehalt im Beton sowie der Feuchtegehalt des Betons angegeben werden.

Über den Einfluss der Kornform wurden Untersuchungen mit Rund- bzw. Kantkorn durchgeführt. Es zeigte sich in Brandversuchen, dass durch die Verwendung von Rundkorn tendenziell geringere Abplatzungen hervorgerufen werden als durch die Verwendung von Kantkorn [7, 8].

Zur Untersuchung der Bindemittelart wurden Brandversuche mit unterschiedlichen Zementarten (CEM I, CEM II und einem Sulfathüttenzement) an Betonprobekörpern ohne Faserzugabe durchgeführt. Aufgrund der Abplatzungserscheinungen nach den Brandversuchen konnte festgestellt werden, dass die besten Ergebnisse mit CEM I Zementen gefolgt von CEM II und dem Sulfathüttenzement erreicht werden konnten. Beobachtungen im Rahmen dieser Versuche zeigten, dass die Abplatzungen der mit den CEM I Zementen hergestellten Probekörper punktuell zwar stärker aber in Summe am geringsten waren [9].

2.2 Normative Grundlagen

Vor den großen Brandereignissen war der Stand der Technik, dass auch bei hohen Brandlasten die Einhaltung einer entsprechenden Betondeckung zur Sicherstellung einer entsprechenden Brandbeständigkeit bzw. des Schutzes der Bewehrung ausreichend ist. Derzeit wird der Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke in der ÖBV-Richtlinie „Erhöhter Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton“ geregelt [11]. In diesem Regelwerk sind alle erforderlichen Grundlagen zur Tragwerksbemessung, zur

Betonherstellung sowie zum Betoneinbau zusammengefasst. Die Überarbeitung der alten Ausgabe wurde notwendig da für die Bemessung und die Einwirkung im Brandfall die ÖNORM B 1992-1-2 [14], die RVS 09.01.45 [15] sowie die RVE 08.00.01 [13] bzw. ÖBB-RW 10.03.01 [16] geschaffen wurden.

Für den Beton werden in dieser ÖBV-Richtlinie die Rahmenbedingungen für die Grundsatzprüfung bei einer Polypropylenfaserzugabe definiert. Darüber hinaus enthält die Richtlinie Vorgaben für die Prüfungen und die Prüfhäufigkeit sowie Angaben zum Einfluss der Faserzugabe auf die Betoneigenschaften (Verarbeitbarkeit, Wasseranspruch etc.). Informationen über erforderliche Maßnahmen für Bauteile im Niedertemperaturbereich bzw. alternative Brandlasten bzw. Brandkurven können diesem Regelwerk nicht entnommen werden.

In der RVE 08.00.01 „Baulicher Brandschutz in unterirdischen Verkehrsbauwerken“ [13] werden die aus den Schutzziele resultierenden Brandschutzanforderungen in der Tragwerksplanung berücksichtigt. Die RVE gliedert sich dabei in 2 Teile:

- Teil A: Baulicher Brandschutz – Objektschutz zum Personenschutz in unterirdischen Verkehrsbauwerken
- Teil B: Baulicher Brandschutz – Objektschutz der unterirdischen Verkehrsbauwerke und Objektschutz zum Schutz Dritter an der Oberfläche

Das Ziel des vorliegenden Forschungsprojekts basiert dabei auf Teil A. Der bauliche Brandschutz hat dabei das Ziel im Interesse des Personenschutzes in unterirdischen Verkehrsbauwerken während eines Brandes die Selbst- und Fremdrettung von Fahrgästen, Personal und Einsatzkräften zu ermöglichen.

Die für die Bemessung heranzuziehende Temperaturverteilung wird dabei gemäß TSI SRT (Technical specifications of interoperability on Safety in Railway Tunnels) [17] gewählt und ist in Abbildung 7 dargestellt.

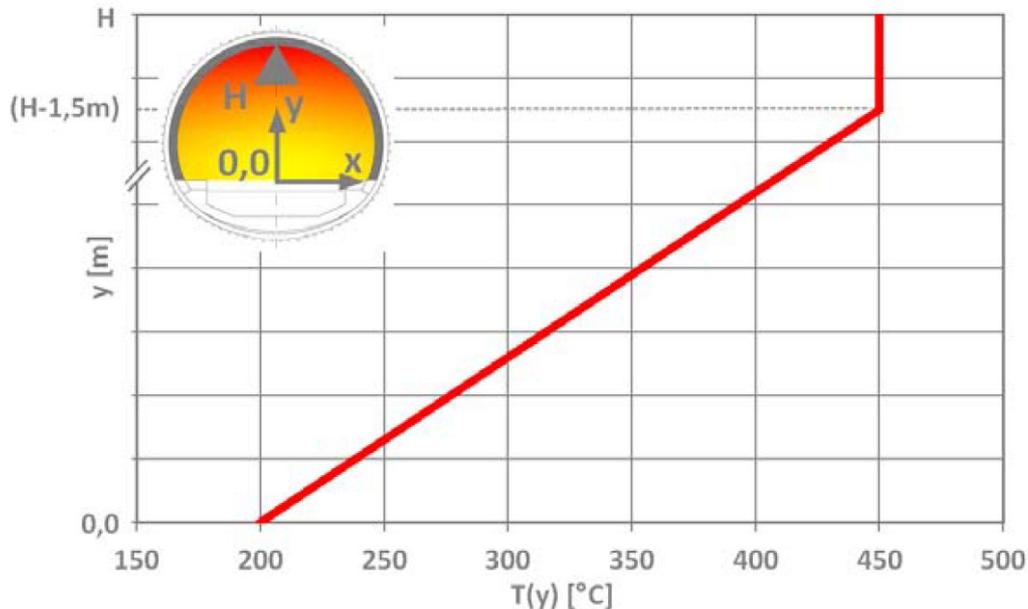


Abbildung 7: Temperaturverteilung $T(y)$ für Tunnelquerschnitte nach TSI SRT

Ausgehend von einer Temperatur von 450 °C auf Firstniveau $y = H$ ist an der vertikalen Achse des Querschnitts eine konstante Temperatur bis $y = H - 1,5\text{ m}$ anzusetzen. Bis zur Tunnelsohle nimmt die Temperatur dann linear auf 200 °C ab. Die Temperatur-Zeit-Kurve ist dabei über den Nachweiszeitraum als konstant anzunehmen. In der derzeit gültigen Fassung der betreffenden RVS 09.01.45 wird die Bemessung unabhängig vom Schutzziel mit höheren Temperaturen (z. B. HC_{inc}) durchgeführt. Ein Ziel des Projekts ist es, nach der positiven Absolvierung des Forschungsvorhabens, Ergänzungen in den entsprechenden Regelwerken vorzunehmen.

2.3 Brandsicherheit im Niedertemperaturbereich

Meist werden Betonkonstruktionen durch Brände nicht vollkommen zerstört. Brandschäden an Betonen nach einer hohen Brandlast wurden vielfach untersucht. Es wurden jedoch bisher kaum Publikationen über Schäden und daraus resultierende Maßnahmen für Brandtemperaturen bis 450 °C veröffentlicht. Um auch bei diesem Temperaturniveau eine Schadensminimierung zu erreichen, wurden rein betontechnologische Maßnahmen untersucht, um eine ausreichende Brandbeständigkeit im Niedertemperaturbereich auch ohne Zugabe von Fasern sicherzustellen.

Nach dem Brandereignis im Tauerntunnel wurden allgemein die Schäden im Rahmen von Bauwerksuntersuchungen an der Tunnelinnenschale sowie an der Zwischendecke beurteilt [12]. Direkt in der Nähe des Brandherdes waren die Schäden eindeutig. Es war die Zwischendecke von den ulmenseitigen Auflagern abgestürzt und es traten massive Betonabplatzungen in diesen Bereichen auf. Weitere Untersuchungen erfolgten auch in Abschnitten der Zwischendecke, die nicht direkt dem Brandherd ausgesetzt waren. Es konnten „stark geschädigte“ sowie „gering geschädigte“ Bereiche klassifiziert werden, die als Grundlage für die Sanierungsmaßnahmen herangezogen wurden. In Abbildung 8 sind typische Beispiele für „stark geschädigte“ sowie „gering geschädigte“ Tunnelbereiche dargestellt.

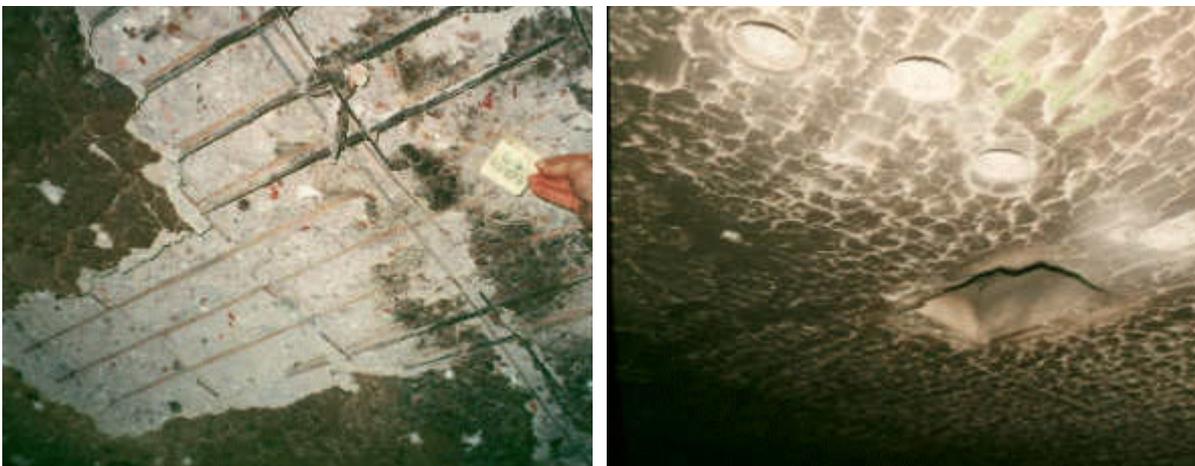


Abbildung 8: Zwischendecke „stark geschädigt“ (links) und „gering geschädigt“ (rechts) [12]

Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen sind, dass es in Abhängigkeit des zu erwartenden Temperaturniveaus eines Bauteils (Lüftungsschächte etc.) im Brandfall auch unterschiedliche Anforderungen in Bezug auf die Betontechnologie geben sollte.

3 PROGRAMMERSTELLUNG UND VERSUCHSBEAUFSICHTIGUNG

– AP2

3.1 Motivation und Herangehensweise

Die Fragestellung des Verhaltens von Betonrezepturen im Niedertemperaturbereich begründet aufbauend auf dem Stand der Technik in Österreich einen neuen Forschungsbereich. Um das, gemäß der Literatur, stark rezepturabhängige Verhalten des Betons bei Temperatureinwirkungen von bis zu 450 °C zu untersuchen, werden Brandversuche mit Probekörper unterschiedlicher Zusammensetzung durchgeführt. Die Rezeptur wird dabei innerhalb der Vorgaben der ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ [10] mit Variation der Betonsorte, der Gesteinskörnungsart, des Zementes sowie des Luftgehaltes und der Wassersättigung des Probekörpers abgeändert und das Verhalten bei Temperatur-Beanspruchung aufgezeichnet. Durch Prüfung aller relevanten Frisch- und Festbetoneigenschaften vor dem Brandversuch und dem Abplatzverhalten bzw. der Betoneigenschaften (Wassergehalt, Porosität, Permeabilität) nach dem Brandversuch werden neue Erkenntnisse gewonnen, inwieweit Betonsorten im Niedertemperaturbereich auch ohne Faserzugabe eingesetzt werden können bzw. welche Parameter und Rezepturvarianten (z. B. quarzitisches Gesteinskörnungsart bei Luftgehalt X) dieses Verhalten positiv beeinflussen.

Um diese Versuche durchführen zu können, bedarf es aufgrund der geänderten Fragestellung zum Brandverhalten (keine Brandlast gemäß ETK) der Adaption des Brandraumes sowie der Anpassung der Brandkurven. Versuche dieser Art wurden bis dato noch nicht durchgeführt. Durch diese Untersuchungen und die darauf aufbauenden Erkenntnisse sollen Empfehlungen für einschlägige Regelwerke erarbeitet werden, um die Kosten bei der Errichtung von Tunnelbauwerken zu optimieren.

3.2 Meilensteine und Projektziele

Auf Basis der durchgeführten Arbeiten und der zusammengefassten Literatur sollen Zusammenhänge zwischen der Auswahl der Betonausgangsstoffe bzw. der Betonzusammensetzung und dem Brandverhalten (Abplatzverhalten, Veränderung der Porosität) gefunden werden. Zur Erreichung der Ziele bzw. zur Lösung der Problemstellung wurden folgende Arbeitsschritte (Meilensteine) positiv abgeschlossen:

- Detaillierte Literaturstudie und Versuchsplanung zur möglichst effizienten Projektabwicklung
- Auswahl von entsprechenden Randbedingungen (Aufheizkurve) zur Simulation des Brandverhaltens im Niedertemperaturbereich.
- Auswahl und Charakterisierung von Betonausgangsstoffen für die Herstellung der Probekörper zur möglichst breiten Abdeckung der angedachten Variationsparameter
- Herstellung von Probekörpern sowie Ermittlung der Frisch- und Festbetoneigenschaften zur exakten Dokumentation der Betoneigenschaften vor dem Brandversuch
- Adaption des Brandraumes für den Niedertemperaturbereich und Durchführung von Brandversuchen an Kleinkörpern zur Herstellung von Zusammenhängen zwischen Betonzusammensetzung bzw. Betoneigenschaften für Brandverhalten
- Durchführung von Brandversuchen an großen Probekörpern bestehend aus für geeignetbefundene Zusammensetzungen zur Verifikation der Ergebnisse aus den Kleinbrandversuchen
- Auswertung und Erstellung einer detaillierten Matrix über Zusammenhänge zwischen Betonzusammensetzung bzw. Betoneigenschaften und Brandverhalten zur Detektion von für die in der Ausschreibung definierten Einsatzgebiete geeigneten Betonsorten
- Erstellung einer Übersicht über erforderliche Szenarien zur Brandsimulation / Modellbildung

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 „Programmerstellung und Versuchsbeaufsichtigung“ wurde grundsätzlich das detaillierte Versuchsprogramm auf Basis der definierten technischen Ziele in Abstimmung mit den Ergebnissen aus AP1 erstellt. Aufgrund der Definition projektspezifischen Auflagen wurden Änderungen des ursprünglich geplanten Versuchsumfangs notwendig, die in mehreren Besprechungen unter den Projektpartnern und in Absprache mit der FFG in einem Sideletter zum Fördervertrag definiert wurden.

Es erfolgte die Auswahl einer entsprechend repräsentativen Rezeptur und einer entsprechenden Vergleichsrezeptur auf Basis der aktuellen Regelwerke. Als nächster Schritt erfolgte die Auswahl der geeigneten Betonausgangsstoffe sowie die Untersuchung der Betonausgangsstoffe, ob normativ geforderte Eigenschaften erfüllt werden.

Für die Herstellung wurden zwei unterschiedliche Zemente ausgewählt und als Basis zur Erstellung von Rezepturen analog der ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ herangezogen. In Tabelle 1 sind die in Anlehnung an reale und tatsächlich in Gebrauch befindliche Rezepturen verschiedenster Transportbetonwerke sowie Baustellen ausgearbeiteten Rezepturen zusammenfassend dargestellt:

Tabelle 1: Für die Versuche herangezogene Rezepturen

Bezeichnung	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG		C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/II/BBG	
	Wert/ Einwaage	Anmerkung / Ausgangsstoff	Wert/ Einwaage	Anmerkung / Ausgangsstoff
W/B-Wert	0,58		0,51	
Zement (kg/m ³)	270	CEM III/A-S 42,5R WT38 (Leube)	305	CEM III/A-S 42,5R WT27 C3A-frei (Leube)
Zusatzstoff (kg/m ³)	70	Fluasit (Rohrdorfer Hatschek)	70	Fluasit (Rohrdorfer Hatschek)
Wassergehalt (kg/m ³)	190		185	
Luft (%)	2,5 + 5,0		6,0	
GK (mm)	32	karbonatisch, quarzitisch, Tunnelausbruch Koralmtunnel	32	karbonatisch
Zusatzmittel		Mapeair LP100 Dynamon LZF		Mapeair LP100 Dynamon LZF
Fasern (kg/m ³)	-		1,2	Fibrin 315

Auf Basis der Rezepturen werden Kleinprobekörper bei Variation von Luftgehalt (hoch und niedrig), Gesteinskörnung (quarzitisch, karbonatisch, aufbereiteter Tunnelausbruch) und der Wassersättigung des Probekörpers (Ausgleichsfeucht bei Laborklima und wassergesättigt nach 3-tägiger Wasserlagerung vor dem Brandversuch) mit begleitender Prüfung der relevanten Frisch- und Festbetoneigenschaften hergestellt. Die Ergebnisse

der Frisch- und Festbetonprüfungen stellen die Datengrundlage für die spätere Beurteilung der Betonrezeptur im Zusammenhang mit den Brandversuchen dar.

Ein optimaler Ofenaufbau für den Niedertemperaturbereich wurde mit Hilfe zahlreicher Vorversuchen sowie durchgeführten Simulationen entsprechend Abbildung 9 entwickelt.



Abbildung 9: Grundriss und Seitenansicht des Ofenaufbaus

Die Beurteilung der Temperaturbeständigkeit der jeweiligen Mischung erfolgte einerseits mit Hilfe einer augenscheinlichen Beurteilung des Probekörpers (Beschädigungen, Abplatzungen) und andererseits über standardisierte Materialprüfverfahren (Abwiegen des Probekörpers, Abreißfestigkeiten, Druckfestigkeiten von Bohrkernen u. ä.) des Probekörpers nach dem Brandversuch. Begleitend zu den Versuchen wurde die Porosität des Zementsteins vor und nach der Temperaturbeaufschlagung an ausgewählten Probekörpern bestimmt.

Für ausgewählte Mischungen wurden Permeabilitätsuntersuchungen unter Temperaturbelastung durchgeführt, die Veränderungen im Kapillarporensystem während der Temperaturbelastung messbar machten. Untersuchungen der Permeabilität waren bisher nur bei Raumtemperatur möglich, wodurch nie eine exakte Messung der tatsächlich zur jeweiligen Temperaturstufe vorliegenden Permeabilität möglich war. Für eine spätere Modellrechnung werden auf der Basis der Materialkennwerte relevante Brandszenarien zusammengestellt. Tabelle 2 gibt eine Übersicht betreffend die durchzuführenden Versuche

Tabelle 2: Übersicht betreffend die durchzuführenden Versuche

Prüfung	Typ bzw. Mischungsverhältnis
Sieblinie, Kornrohddichte	Bad Fischau, Markgrafneusiedl, Koralmtunnel
Ausbreitmaß	MV1 bis MV 14
Luftporengehalt	MV1 bis MV 14
Betondruckfestigkeit	MV1 bis MV 14
Temperaturverteilung im Probekörper bei einer Temperaturbelastung von 450°C und einem Luftmassenstrom von 0,4 m/s	MV1 bis MV 14
Haftzugfestigkeit	MV5, MV7, MV11, MV12
Druckfestigkeit aus nach dem Brandversuch entnommenen Bohrkernproben	MV5, MV7, MV11, MV12
Porosität vor und nach der Temperaturbelastung	MV2, MV5, MV6
Permeabilität	MV1 und MV 13
Vergleichsprobekörper mit ETK	MV 2

4 AUSWAHL UND CHARAKTERISIERUNG DER BETONAUSGANGSSTOFFE – AP3

Auf Basis der ausgearbeiteten Rezepturen erfolgte die Auswahl von geeigneten Betonausgangsstoffe und deren Charakterisierung. Es wurden 3 verschiedene Gesteinskörnungsarten verwendet. Die Auswahl der Gesteinskörnungen für die Herstellung der Kleinkörper erfolgte auf Basis regionaler Verfügbarkeit (Bad Fischau, Markgrafneusiedl) sowie aus praxisbezogenen Gründen (aufbereitetes Tunnelausbruchsmaterial aus dem Koralmtunnel). Die ausgewählte karbonatische Gesteinskörnung (Rundkorn) stammt aus der Kiesgrube Bad Fischau, die quarzitisches Gesteinskörnung (Rundkorn) stammt aus der Kiesgrube Markgrafneusiedl. Das aufbereitete Tunnelausbruchsmaterial (ATA) stammt aus den Vortriebsarbeiten des Koralmtunnels.

4.1 Kornrohdichten

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Prüfung der Kornrohdichten der Gesteinskörnung sowie die, für die Gesamtsieblinie verwendeten Mengen in m% zusammenfassend dargestellt. Die Ermittlung der Kornrohddichte erfolgte gemäß ONR 23303 [25] bzw. ÖNORM EN 1097-6. Der Anteil an der Gesamteinwaage der Gesteinskörnungsfractionen ergibt sich aus der Erstellung der der Gesamtsieblinie in Kapitel 5.2.

Tabelle 3: Rohdichte und Anteil an der Gesamteinwaage der Gesteinskörnung

Bezeichnung der Gesteinskörnung	Rohdichte gemäß ONR 23303 [g/cm ³]	Anteil an der Gesamteinwaage der Gesteinskörnung in m.%
Bad Fischau 0/4	2,72	42
Bad Fischau 0/4	2,71	17
Bad Fischau 0/4	2,71	16
Bad Fischau 0/4	2,71	25
Markgrafneusiedl 0/4	2,64	40
Markgrafneusiedl 4/8	2,66	18
Markgrafneusiedl 8/11	2,66	27
Markgrafneusiedl 11/	2,66	15
Koralmb KAT 2 ATA 0/3	2,75	42
Koralmb KAT 2 ATA 3/8	2,77	17
Koralmb KAT 2 ATA 8/16	2,78	16
Koralmb KAT 2 ATA 16/32	2,78	25

4.2 Sieblinien der Gesteinskörnungen

Es wurden 3 verschiedene Gesteinskörnungssieblinien für die Herstellung der Probekörper gemäß ÖNORM B 4710-1 erarbeitet. Alle Sieblinien wurden im günstigen Bereich gemäß den normativen Vorgaben zusammengestellt. In **Abbildung 10** bis **Abbildung 12** sind die verwendeten Gesamtsieblinien für die Herstellung der Kleinprobekörper dargestellt.

Bad Fischau

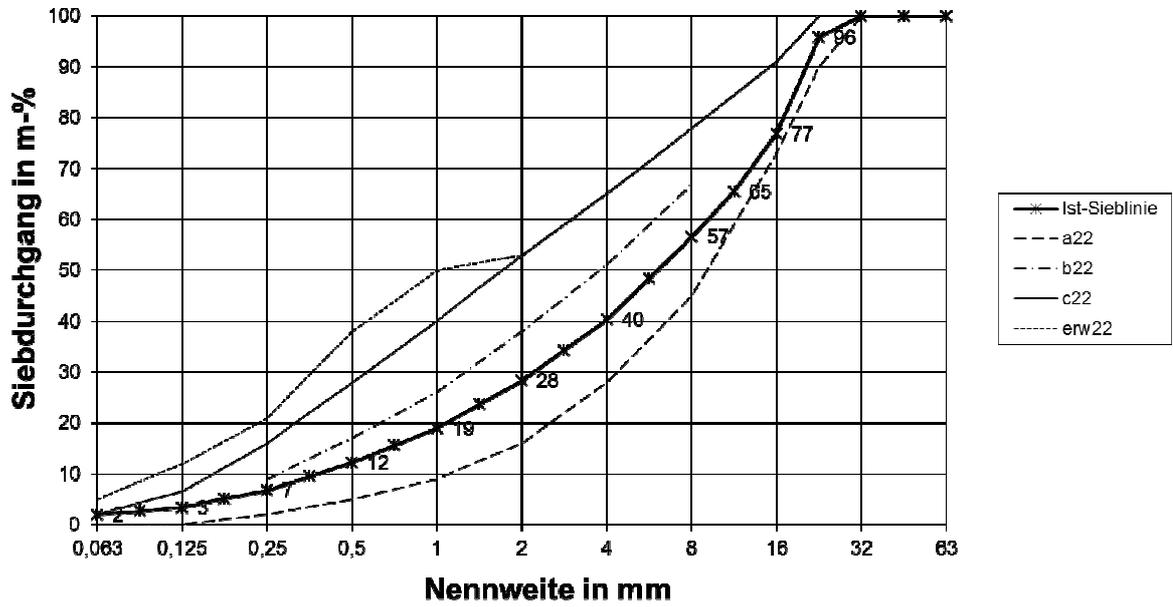


Abbildung 10: Sieblinie des karbonatischen Materials aus der Kiesgrube Bad Fischau

Markgrafneusiedl

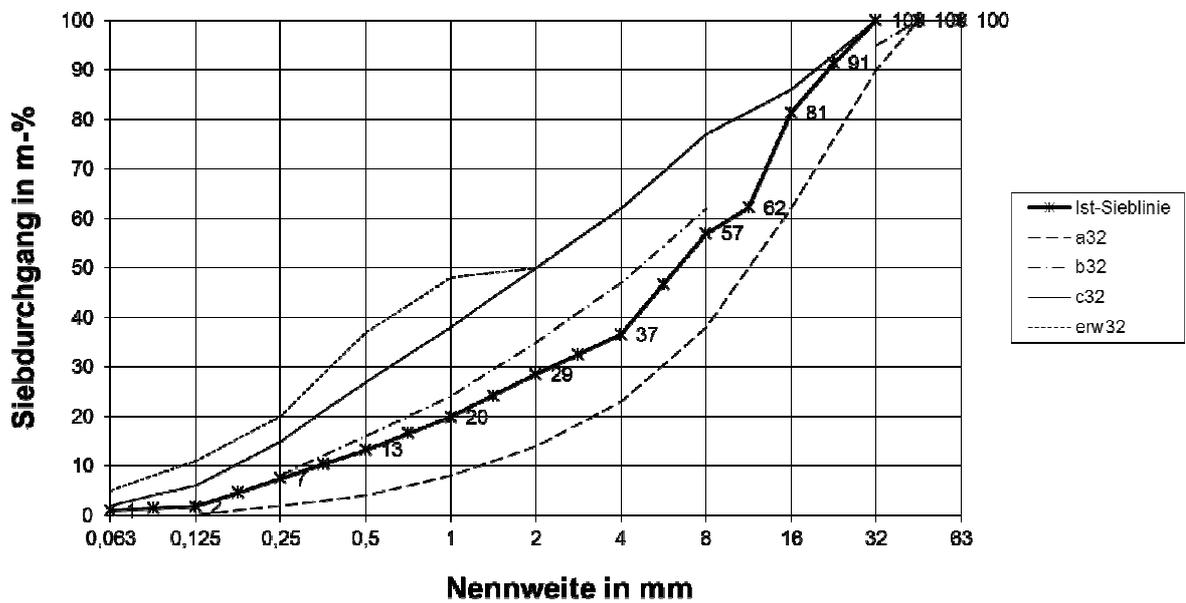


Abbildung 11: Sieblinie des quarzitäen Materials aus der Kiesgrube Markgrafneusiedl

Koralin KAT 2 ATA

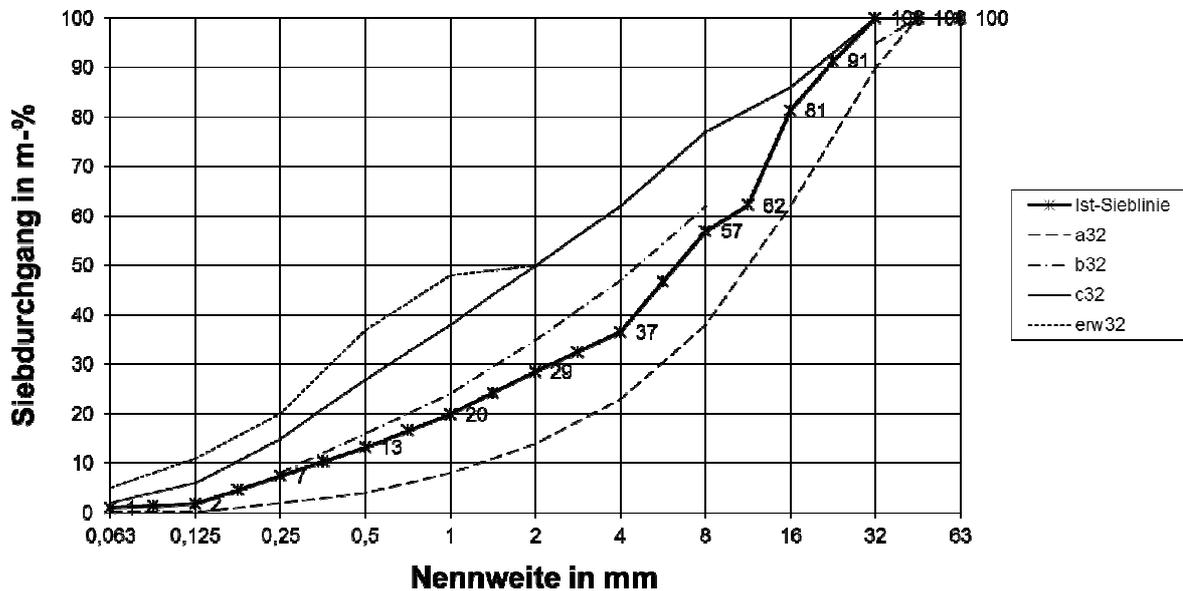


Abbildung 12: Sieblinie des aufbereiteten Tunnelausbruchmaterials (ATA) aus dem Koralmtunnel KAT 2

Alle hergestellten Sieblinien liegen im günstigen Bereich gemäß ÖNORM B 4710-1[].

5 HERSTELLUNG DER (KLEIN-) PROBEKÖRPER UND BETONPRÜFUNG – AP4

5.1 Einleitung

Im Zuge des Arbeitspakets 4 wurden die für die Brandprüfung notwendigen Probekörper mit den ausgewählten Betonsorten hergestellt. Gemäß den Änderungen zum Werkvertrag werden zur Überprüfung der Einflussparameter bei Variation des Gesteinskörnungstyps, Luftgehalts und der Wassersättigung der Probekörper im Rahmen der Kleinkörperversuche zwei unterschiedliche Basisrezepturen herangezogen. Die Basisbetonsorte, an der alle Variationen durchgeführt wurden ist ein herkömmlicher Innengewölbebeton mit der Betonsortenbezeichnungen C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG. Als Vergleichsrezeptur wird ein herkömmlicher brandbeständiger Innenschalenbeton mit der Betonsortenbezeichnung C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L//BBG herangezogen. Die zuletzt angeführte Rezeptur mit der Bezeichnung BBG beinhaltet PP-Fasern und dient als

Referenzzusammensetzung zur vergleichenden Beurteilung der brandtechnischen Eigenschaften (Abplatzverhalten und Porosität). Zur Herstellung der Rezepturen wurde ein Zement CEM II/A-S 42,5R WT38 für den Innengewölbebeton und ein Zement CEM II/A-S 42,5R WT27 C3A-frei für den brandbeständigen Faserbeton verwendet. Insgesamt wurden für die Kleinkörperversuche 14 praxisnahe Rezepturen entworfen, die jeweils mit 2 Probekörper mit den Abmessungen 50 x 60 x 30 cm getestet wurden (Doppelbestimmung). Dies ergibt eine Gesamtanzahl von 28 Versuchskörpern für die Kleinbrandversuche.

Bei der Herstellung der für die Brandversuche erforderlichen Probekörper wurden begleitende Frischbetonprüfungen (Ausbreitmaß, Luftgehalt, Frischbetonrohichte und -temperatur) durchgeführt, auf Basis deren Daten die Einflussfaktoren auf das brandtechnische Verhalten im Zuge der Versuchsauswertung bestimmt wurden. Am Festbeton wurden die Druckfestigkeit nach 28 bzw. 56 Tagen und die Luftporenkennwerte bestimmt. Die Ermittlung dieser Daten ist wesentlich, da in der Betonherstellung auftretende Schwankungen nur so erfasst und eventuelle Auswirkungen auf das Brandverhalten aufgezeigt werden können.

5.2 Herstellung

Mit den gewählten Ausgangsstoffen wurde ein Betonierprogramm zur Herstellung der Kleinkörper 60 x 50 x 30 cm erarbeitet und auf Basis der Grundrezepturen und den Untersuchungen zu den Betonausgangsstoffen (Sieblinien der einzelnen Kornfraktionen sowie Gesamtsieblinien und Kornrohichten) wurden die unterschiedlichen Varianten der Betonrezepturen bei Variation der Eingangsparameter erstellt.

In Tabelle 4 sind die unterschiedlichen Mischungsverhältnisse, die sich aus der Kombination von Variation der Gesteinskörnung, des Luftgehalts und des Wassergehalts ergeben, zusammenfassend dargestellt. MV 13 und MV 14 stellen den Vergleichsbeton der Klasse I/BBG gemäß Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton“ dar.

Tabelle 4: Betonierprogramm – Kleinkörper (Mischverhältnisse)

	Betonsorte	Gesteinskörnung ¹	Luftgehalt (Zielwert)	Wassergehalt ²
MV1	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG	BF	5,0 %	gesättigt
MV2	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG	BF	5,0 %	trocken
MV3	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG	BF	2,5 %	gesättigt
MV4	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG	BF	2,5 %	trocken
MV5	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG	MGN	5,0 %	gesättigt
MV6	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG	MGN	5,0 %	trocken
MV7	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG	MGN	2,5 %	gesättigt
MV8	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG	MGN	2,5 %	trocken
MV9	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG	ATA	5,0 %	gesättigt
MV10	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG	ATA	5,0 %	trocken
MV11	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG	ATA	2,5 %	gesättigt
MV12	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/IG	ATA	2,5 %	trocken
MV13	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/I BBG	BF	5,0 %	gesättigt
MV14	C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L/I BBG	BF	5,0 %	trocken

¹ BF: Bad Fischau – karbonatische Gesteinskörnung, Rundkorn
 MGN: Markgrafneusiedl, quarzitisches Gesteinskörnung, Rundkorn
 ATA: Aufbereiteter Tunnelausbruch Koralmtunnel, Kantkorn

² gesättigte Probe: Prüfung nach 3-tägiger Wasserlagerung (Tunneleinfahrt bei nassen Verhältnissen)

² trockene Proben: Ausgleichsfeuchte Probe bei Lagerung in trockener, nicht temperierter Raumluft

Die Grundrezeptur wurde im Vorfeld der Probekörperherstellung auf Basis von MV1 in 2 Vorversuchen getestet und die Frischbetonkennwerte sowie die für die gewünschte Konsistenz notwendige Fließmitteldosierung geprüft. Folgende Fühleranordnung wurden für die Versuchskörper gewählt:

- 3 Fühlerreihen über die Probekörperlänge (60 cm) bei 10, 30 und 50 cm
- Einbau von 8 Fühlern über die Probekörperhöhe (30 cm) in folgenden Abständen von der Unterkante des Probekörpers: 1, 3, 5, 7, 9, 15, 22,5, 30 cm ergibt insgesamt 24 Fühler pro Probekörper

Aufgrund der Größe der Probekörper mussten je Probekörper 2 x 45 L Beton angemischt und daher zweischichtig eingebaut werden. In Abbildung 13 bis Abbildung 18 ist die Schalungsvorbereitung und Herstellung der Probekörper dokumentiert:



Abbildung 13: Längsabmessung und Anordnung der Sensoren



Abbildung 14: Anordnung der Sensoren über die Probekörperhöhe



Abbildung 15: Einfüllen und Verdichten des Betons



Abbildung 16: Einfüllen des Betons 2. Lage



Abbildung 17: Fertiggestellter Vorversuchskörper



Abbildung 18: Überstehende Sensorkabel an Probekörperseite

Beide Vorversuchs-Probekörper des Mischungsverhältnisses MV1 waren gut verarbeitbar und somit konnte der Ablauf der Betonage geprobt werden. Durch die daraufhin erfolgten Brandversuche unter Verwendung des Spannrahmens konnte der Betrieb des Ofens und die Konstanz der Brandversuche (Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit) geprüft und Verbesserungen getroffen werden. Durch die Analyse der Temperaturdaten konnte die Funktion der Fühler und somit die gewählte Einbaumethode bestätigt werden. Durch den Vergleich der Daten aus der linken und rechten Fühlerreihe wurde offensichtlich, dass diese beiden Fühlerreihen aufgrund der sehr konstanten Temperaturverteilung über den gesamten Querschnitt des Ofens vergleichbare Ergebnisse lieferten. In Abbildung 19 die Daten der Temperaturfühler in Form einer Temperatureindringkurve für die rechte und linke Fühlerseite dargestellt.

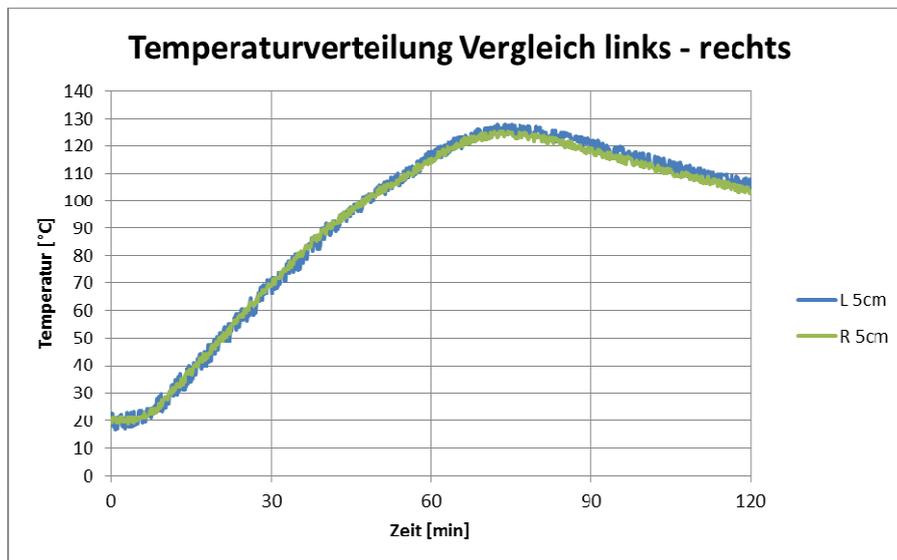


Abbildung 19: Vergleich der linken und rechten Fühlerreihe im Vorversuchskörper

Beide Fühlerreihen zeigten konstant die gleichen Temperaturen. Nach Absprache mit dem AG wurde daher bei der weiteren Herstellung der Probekörper auf eine der äußeren Fühlerreihen verzichtet und die endgültige Lage der Thermoelemente (Temperaturmessung im Probekörper) für die Versuche folgendermaßen gewählt (Abbildung 20):

- in Probekörpermitte in folgenden Höhenabstufungen von der temperaturbelasteten Seite aus gesehen: 0, 1, 3, 5, 7, 22 cm

im Abstand von 10 cm von der kurzen Probekörperseite in den Höhen - - 0, 1, 3, 5, 7, 22 cm von der Temperaturbelasteten Seite aus gesehen

In Abbildung 20 ist ein fertiger Kleileinkörper kurz vor dem Brandversuch abgebildet.



Abbildung 20: Lage der Thermoelemente im Probekörper)

5.3 Frischbeton und Festbetonkennwerte der Kleinkörper

Die Prüfung der relevanten Frisch- und Festbetonkennwerte erfolgte grundsätzlich gemäß ONR 23303 [25]. Die Beurteilung erfolgte anhand der Vorgaben der ÖNORM B 4710-1:2007, Anhang B [24] und ÖVBB-Richtlinie „Innenschalenbeton“ [10]. Der Beton wurde im Labor der Smart Minerals GmbH hergestellt und anschließend die Frischbetonprüfungen durchgeführt. Die Frischbetonprüfung erfolgte 10 Minuten nach Wasserzugabe. Die Einzelprobe wurde gemäß ONR 23303 [25] entnommen.

In Tabelle 5 sind die Frischbetonkennwerte zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 5: Frischbetonkennwerte der Kleinkörperherstellung

MV	Teil	Frischbeton-temperatur	Frischbeton-Rohdichte	Ausbreitmaß	Luftgehalt
----	------	------------------------	-----------------------	-------------	------------

		[°C]	[kg/m³]	[cm]	EW [%]	MW [%]
MV1	a	20,7	2283	54	5,0	4,9
	b	20,7	2290	54	4,9	
	c	20,9	2298	54	4,8	
	d	20,4	2299	54	4,8	
MV2	a	20,7	2267	54	5,4	4,9
	b	20,5	2339	54	4,8	
	c	20,5	2295	54	4,7	
	d	20,8	2295	54	4,7	
MV3	a	22,3	2347	52	3,1	2,7
	b	22,6	2354	54	2,9	
	c	22,7	2363	54	2,4	
	d	22,0	2368	54	2,3	
MV4	a	21,4	2354	55	2,9	2,8
	b	21,9	2359	53	2,8	
	c	22,2	2358	54	2,8	
	d	22,8	2359	52	2,8	
MV5	a	21,0	2286	48	6,4	6,3
	b	20,7	2286	55	6,4	
	c	24,4	2292	55	6,2	
	d	24,4	2292	55	6,2	
MV6	a	21,7	2311	51	5,4	5,5
	b	21,2	2318	53	5,5	
	c	21,0	2318	53	5,5	
	d	21,2	2314	55	5,7	
MV7	a	22,2	2429	54	2,6	2,6
	b	22,4	2410	55	2,7	
	c	23,1	2423	55	2,6	
	d	23,8	2418	55	2,6	
MV8	a	22,3	2343	53	3,1	3,0
	b	21,3	2397	54	3,0	
	c	20,7	2401	54	2,8	
	d	20,9	2396	55	2,9	
MV9	a	21,0	2305	52	4,9	4,9
	b	20,0	2304	53	4,9	
	c	20,6	2303	53	5,0	
	d	19,8	2429	53	4,9	
MV10	a	22,5	2278	53	4,9	4,9
	b	21,9	2272	54	5,0	
	c	21,5	2296	54	4,8	

	d	21,5	2293	54	4,8	
MV11	a	20,2	2333	53	2,4	2,4
	b	20,2	2341	53	2,2	
	c	20,0	2336	54	2,4	
	d	20,3	2335	54	2,4	
MV12	a	20,8	2334	54	2,4	2,4
	b	20,5	2336	55	2,3	
	c	20,5	2336	55	2,3	
	d	20,5	2342	54	2,4	
MV13	a	22,1	2270	55	5,6	6,3
	b	22,1	2273	55	5,5	
	c	22,1	2266	55	5,7	
	d	22,3	2249	55	7,0	
MV14	a	23,2	2284	54	6,1	6,1
	b	22,2	2297	54	5,7	
	c	21,9	2262	53	6,4	
	d	22,0	2266	54	6,2	

Die geprüften Frischbetonkennwerte entsprechen den Anforderungen gemäß ÖNORM B 4710-1 [24] und der ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ [10] und stimmen mit den in Tabelle 5 geplanten Rezepturen überein.

Die zum Nachweis der Festigkeitsklasse an 150 mm Würfeln nach Normlagerung (ONR 23303, Tab. 2 [25]) ermittelten Druckfestigkeiten (gemäß ONR 23303, Abschnitt 9.2 [25]) und Rohdichten sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Die Prüfung erfolgte bei lufttrockenem Oberflächenzustand des Probekörpers. Für die Prüfung der Luftporenkennwerte wurde aus je einem Prüfwürfel mit einer Steinsäge eine ca. 2 cm dicke Platte parallel zur Würfelachse geschnitten und die Schnittflächen mit einer Diamanttopfscheibe auf matten Glanz geschliffen. An der Platte wurden dann die Luftporenkennwerte gemäß ONR 23303, Abschnitt 9.6 [25] ermittelt. Die Ergebnisse der Prüfung der Luftporenkennwerte sind ebenfalls in Tabelle 6 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 6: Festbetonkennwerte

	Druckfestigkeit 28 d		Druckfestigkeit 56 d		LP-Kennwerte		
	[kg/m ³]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[N/mm ²]	Luft [Vol. %]	L300 [%]	AF [mm]
MV1	2282	37,9	2300	43,2	4,7	2,74	0,15
MV2	2294	41,9	2290	39,4	5,6	3,73	0,15
MV3	2350	47,8	2340	54,2	3,5	0,57	0,44
MV4	2341	45,3	2350	51,4	3,3	0,53	0,47
MV5	2300	30,2	2312	32,7	10,3	6,24	0,08
MV6	2333	33,4	2310	36,4	5,8	3,66	0,13
MV7	2394	45,8	2370	48,0	3,3	0,92	0,26
MV8	2367	39,7	2400	48,0	2,3	1,30	0,20
MV9	2285	39,9	2300	44,7	3,6	2,70	0,15
MV10	2240	37,4	2270	42,1	6,2	4,88	0,12
MV11	2330	44,7	2300	46,0	3,3	0,50	0,44
MV12	2330	44,1	2320	45,0	2,4	0,87	0,36
MV13	2270	43,7	2270	44,6	6,2	2,99	0,18
MV14	2260	45,4	2250	46,1	6,3	3,10	0,17

Gemäß ÖNORM B 4710-1 [24] erfüllen alle Mischungsverhältnisse die Anforderungen für die Identitätsprüfung an die Druckfestigkeit für die Festigkeitsklasse C25/30 sowohl nach 28, als auch nach 56 Tagen ($\geq 29 \text{ N/mm}^2$). Die Anforderungen an den Luftgehalt im Frischbeton gemäß ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ [10] wurden ebenfalls erfüllt.

6 BRANDVERSUCHE AN KLEINKÖRPERN – AP5

Das Arbeitspaket 5 beinhaltet die Durchführung von Brandversuchen mit Kleinkörpern, und Darstellung der Temperaturverteilung im Probekörper, der Beurteilung des Abplatzverhaltens und des Masseverlusts sowie der Änderung der Porosität nach den Brandversuchen.

6.1 Probekörper und Vorspannung

Die Kleinprobekörper wurden mit den Abmessungen von $l \times b \times h = 50 \times 60 \times 30$ von der Smart Minerals GmbH hergestellt und ins Labor der TU-Wien, IHT, Forschungsbereich Baustofflehre geliefert (siehe auch Kapitel 5: Herstellung der Klein- Probekörper und Betonprüfung).

Im Rahmen des Arbeitspaketes 5 „Brandversuche an Kleinkörper“ wurden seitens der TU-Wien Überlegungen zur Aufbringung einer Querspannung von 1,2 MPa am Probekörper ohne Beeinflussung des Temperaturverlaufs im Probekörper angestellt. Die Herausforderung war, einen Spannrahmen zu konstruieren, der durch eine Erwärmung der Zugglieder die Messergebnisse nicht beeinflusst. Für diese Fragestellung wurden Versuche zum Einfluss der Erwärmung der Spannglieder durchgeführt. Hierfür wurde ein spezielles Kühlsystem der Zugstangen, wie aus Abbildung 21 zu entnehmen, entwickelt. Die gemessenen Spannungen dienten im Weiteren zur Bemessung des Spannrahmens für die geplanten Versuche.

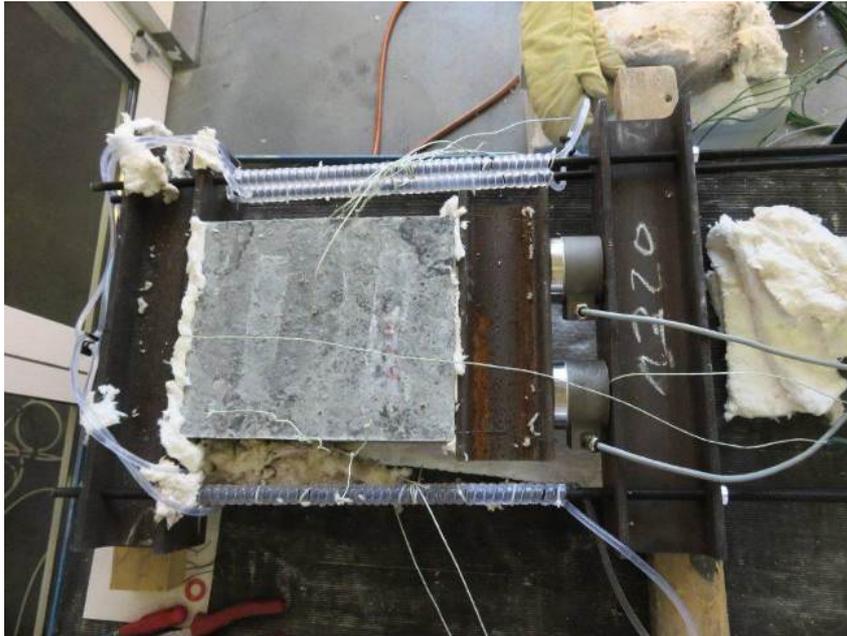


Abbildung 21: Spannrahmen zur Aufbringung einer Quervorspannung von 1,2 MPa mit Kühlung der Zugglieder

Hierbei zeigte sich jedoch dass es bei entsprechender Isolierung und Verhinderung abstrahlender Wärme zu keiner Verminderung des Spannungszustandes durch sich ausdehnende Spannglieder bei Temperaturen bis 450 °C kommt. Es wurde daher ein der Größe der Probekörper angepasster Spannrahmen auf Basis der gesammelten Daten konstruiert und durch eine Schlosserei hergestellt. In Abbildung 22 ist der fertige Spannrahmen für die Kleinkörperversuche abgebildet. Um die durch die Wärmedehnung der Probekörper tatsächlich auftretenden Spannungen während des Versuches zu ermitteln wurden Kraftmessdosen (C6A, 500kN) der Firma HBM eingebaut und die tatsächlich auftretenden Spannungen aufgezeichnet. Der Druck wurde über 2 Hydraulikzylinder und einer Druckplatte auf den Probekörper aufgebracht. Der Probekörper selbst wird dabei vor der Kraftaufbringung vom Rahmen selbst durch das Beilegen von Dämmmaterial isoliert. Somit wird auch die Wärmeübertragung vom Probekörper auf den Rahmen weitgehend unterbunden und die Spannungsverluste durch Ausdehnung des Rahmens bleiben äußerst gering.



Abbildung 22: Spannrahmen zur Aufbringung einer Quervorspannung von 1,2 MPa

6.2 Entwicklung der Versuchsanordnung (Brandraum) und Festlegung der Versuchsdurchführung

Für die Durchführung der Versuche wurde ein Ofen/Heißluftkanal im Labor des Institutes für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich Baustofflehre errichtet. Die Querschnittsabmessungen des Kanals wurden entsprechend der ÖBV-Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ [11] mit 80 x 57 cm gewählt. Für die Brandversuche an Kleinkörpern wurde als Breite 57cm gewählt (bei den Großkörpern 80 cm). Der Querschnitt des Heißluftkanals ist damit für die Kleinversuche als auch für die Großversuche gleich. Als einheitliche Versuchstemperatur wurden 450°C gewählt, wobei der steilste Temperatur-Gradient, der mit den Brennern erreicht werden kann, verwendet werden sollte.

Parallel zur praktischen Entwicklung des Heißluftkanals wurde eine Simulationsrechnung zur weiteren Optimierung des Versuchsaufbaus durchgeführt.

Die Simulationsergebnisse zur Entwicklung des Brandraums wurden dabei bereits als Vorbericht zusammengestellt und den Auftraggebern übergeben.

Die Versuchsbedingungen wurden in Absprache mit dem Auftraggeber folgendermaßen festgelegt:

- Mittlere Temperatur an der Probenoberfläche 450°C
- Konstante Strömungsgeschwindigkeit entlang der Probenkörperoberfläche mit ca. 0,4m/s Luftmassenstrom
- Vorspannung mit Hilfe eines Spannrahmens an der Längsseite der Probekörper mit 1,16 MPa gemäß ÖBV-Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ [11] aufgebracht.



Abbildung 23: Versuchsanordnung, links: Spannrahmen, rechts: Dehnungsmessung

Die Temperatur im Heißluftkanal wurde an 3 Stellen unter dem Probekörper gemessen. Der Luftmassenstrom wurde ebenfalls unterhalb des Probekörpers gemessen (Abbildung 24). Die Messergebnisse wurden kontinuierlich während des Versuches aufgezeichnet.



Abbildung 24: Darstellung des Brandraums, links: Brandkanal, rechts Anordnung der Temperaturfühler und des Massenströmsensors

Die Beheizung des Heißluftkanals erfolgte mit drei Propangasbrennern (jeweils max. 100 kW) die jeweils über ein Nadelventil geregelt wurden. Der Luftstrom wurde mit dem Gebläse einer Heizkanone erzeugt (Abbildung 25).

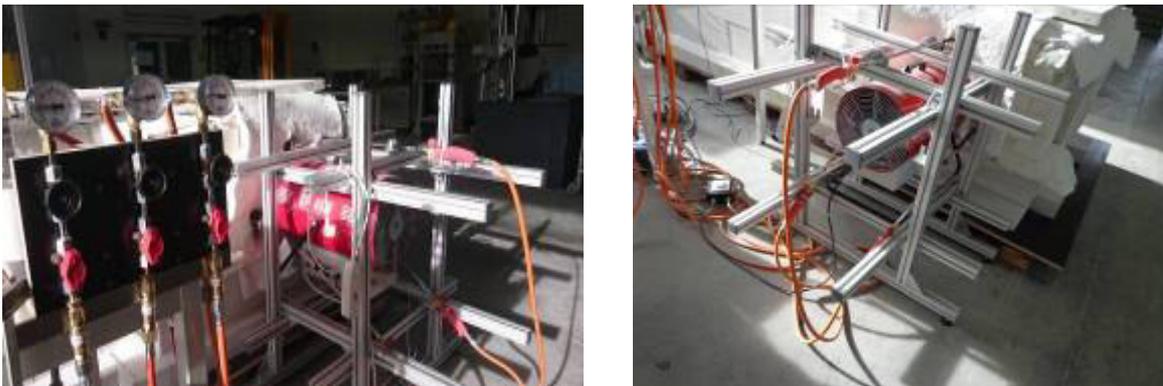


Abbildung 25: Brenner und Heizkanone zur Regelung des konvektiven Wärmestroms

Abbildung 26 zeigt die Temperaturverteilung und Strömungsgeschwindigkeit im Ofen für alle durchgeführten Versuche. Dargestellt werden der Mittel-, Minimal- und Maximalwert über alle Versuche.

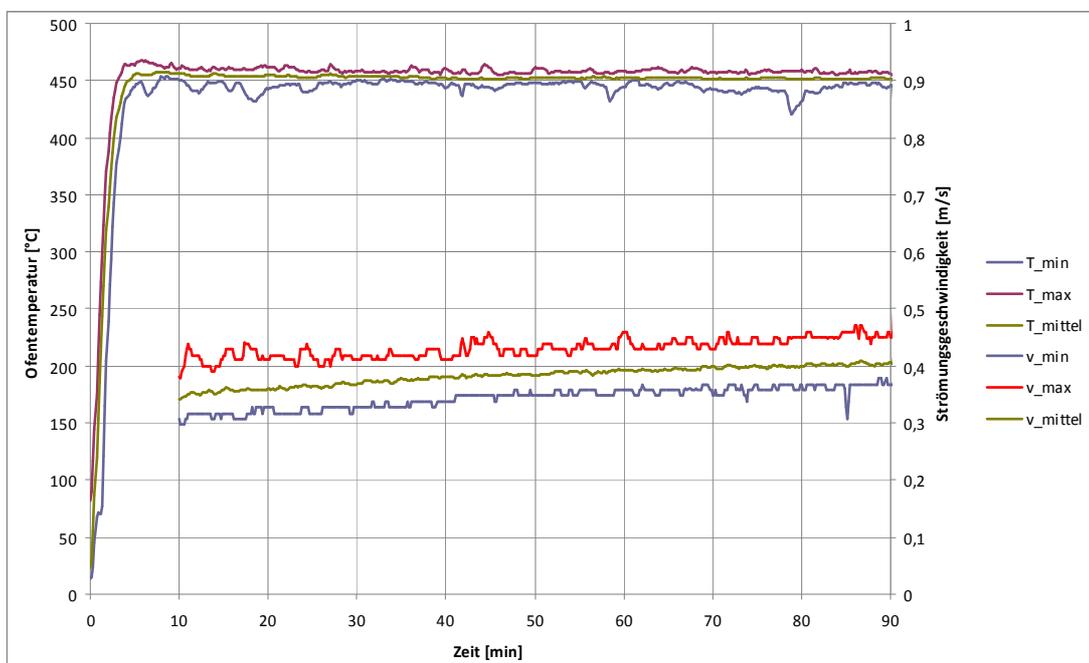


Abbildung 26: Temperaturverteilung bzw. Strömungsgeschwindigkeit im Ofen

6.3 Versuchsdurchführung und Auswertung

Vor dem Einbau der Probekörper wurde jeweils die Masse bestimmt. Beim Einbau der Probekörper wurden diese mit der entsprechenden Sensorik versehen (Thermokabel, Vorspannung, Dehnungsmessung) und anschließend mit Mineralfömmatten abgedeckt um die Wörmeverluste über die freie Oberfläche zu reduzieren.

Die Versuchsdauer wurde in Absprache mit dem Auftraggeber mit 90 Minuten festgelegt, wobei auch die Abkühlung (Zeit nach dem Abschalten der Brenner) mit aufgezeichnet wurde. Bei einigen Probekörpern wurde die Belastungsdauer (Branddauer) in Abstimmung mit dem Auftraggeber auf ca. 3 Stunden ausgedehnt. Nach dem Abkühlen der Probekörper erfolgte die Beurteilung des Oberflöchenerscheinungsbildes (Abplatzen) und wieder die Bestimmung der Masse (Massenverlust).

Ergänzend erfolgte die Beurteilung eines eventuell durch Dehydrierung auftretenden weiteren oberflöchlichen Schadens einige Tage nach den Brandversuchen.

Begleitend wurden Porositätsuntersuchungen an aus der Oberfläche entnommenen Proben durchgeführt und diese Ergebnisse mit den Ergebnissen vor den Brandversuchen verglichen.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Versuchsserien jeweils in folgender Reihenfolge zusammengestellt:

- Versuchsdauer
- Darstellung der Probekörper nach dem Versuch
- Masseverlust der Probekörper
- Temperaturverteilung im Probekörper
- Bei ausgewählten Serien: Temperaturdehnung, Änderung der Vorspannung infolge der Temperatur
- Ergebnisse der Porositätsmessungen
- Ergebnisse der Haftfestigkeitsprüfungen
- Interpretation der Messergebnisse

Anmerkung: Bei unvollständigen Diagrammen bzw. unterbrochenen Kurven sind Daten unvollständig (teilweiser Ausfall der Sensorik).

6.3.1 Serie MV1

6.3.1.1 Probekörper 1

Betonierdatum: 25.01.2016

Prüfdatum: 22.02.2016

Wasserlagerung ab 19.02.2016

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	212,25
	Masse nach dem Versuch [kg]	210,90
	Massendifferenz [kg]	1,35
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 27: MV1 Probekörper 1 nach dem Versuch

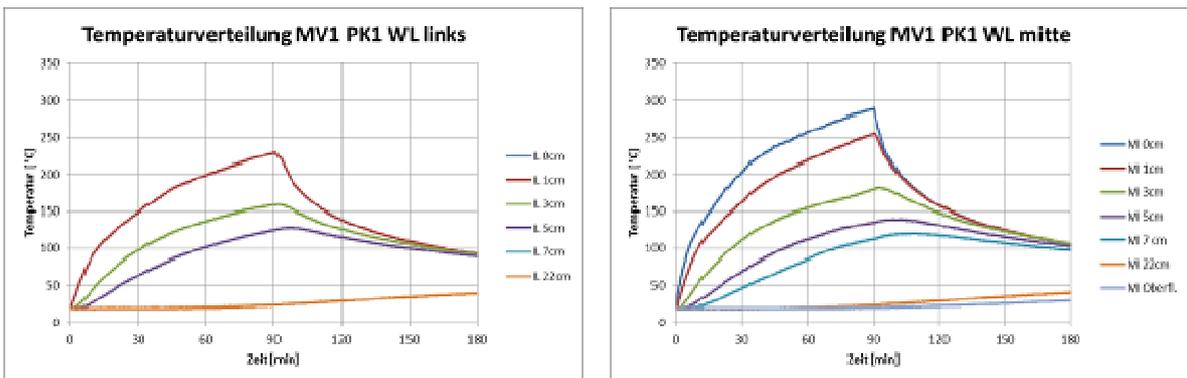


Abbildung 28: Temperaturverteilung im Probekörper

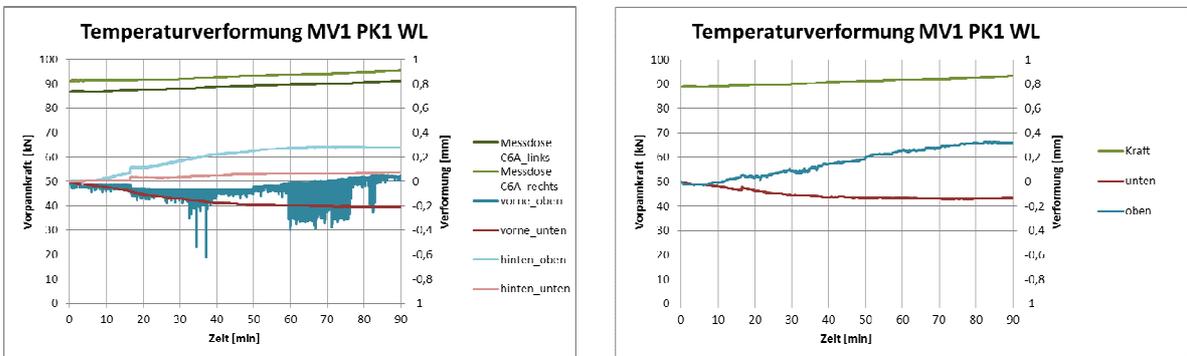


Abbildung 29: Temperaturdehnung und Vorspannung während des Brandversuches; links: Einzelmessungen; rechts: Kraft Mittelwert, Dehnung summiert

6.3.1.2 Probekörper 2

Betonierdatum: 25.01.2016

Prüfdatum: 23.02.2016

Wasserlagerung ab 19.02.2016

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	213,60
	Masse nach dem Versuch [kg]	212,00
	Massendifferenz [kg]	1,60
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 30: MV1 Probekörper 2 nach dem Versuch

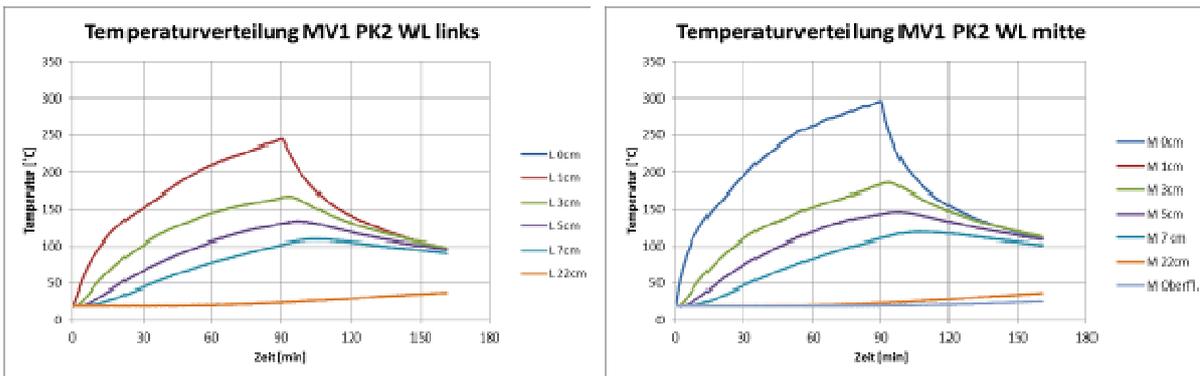


Abbildung 31: Temperaturverteilung im Probekörper

Interpretation:

Bei der Versuchsserie MV1 wurde festgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von 90 Minuten bei einem mittleren Masseverlust von 1,48 kg keine Abplatzungen an der dem Brandraum zugewendeten Oberfläche aufgetreten sind.

6.3.2 Serie MV2

6.3.2.1 Probekörper 1

Betonierdatum: 27.01.2016

Prüfdatum: 23.02.2016

Keine Wasserlagerung

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	210,65
	Masse nach dem Versuch [kg]	209,70
	Massendifferenz [kg]	0,95
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 32: MV2 Probekörper 1 nach dem Versuch

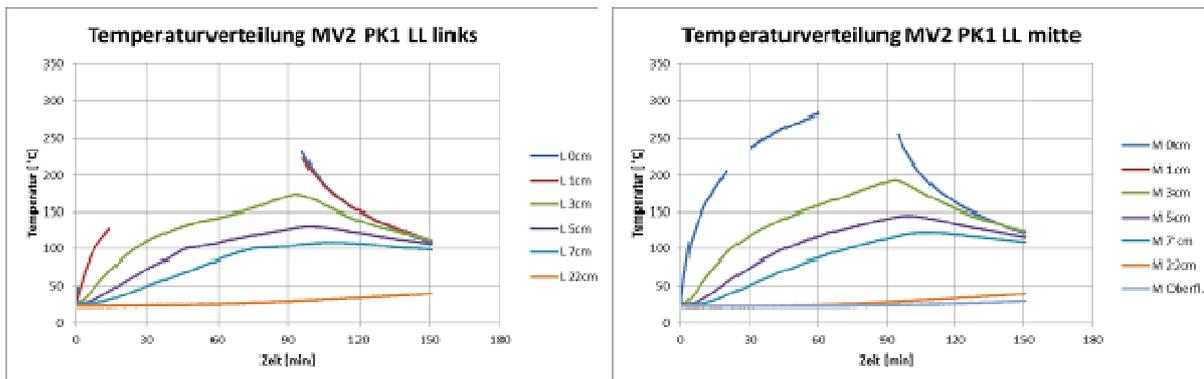


Abbildung 33: Temperaturverteilung im Probekörper

6.3.2.2 Probekörper 2

Betonierdatum: 27.01.2016

Prüfdatum: 24.02.2016

Keine Wasserlagerung

Versuchsdauer: 240 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	209,15
	Masse nach dem Versuch [kg]	206,75
	Massendifferenz [kg]	2,40
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 34: MV2 Probekörper 2 nach dem Versuch

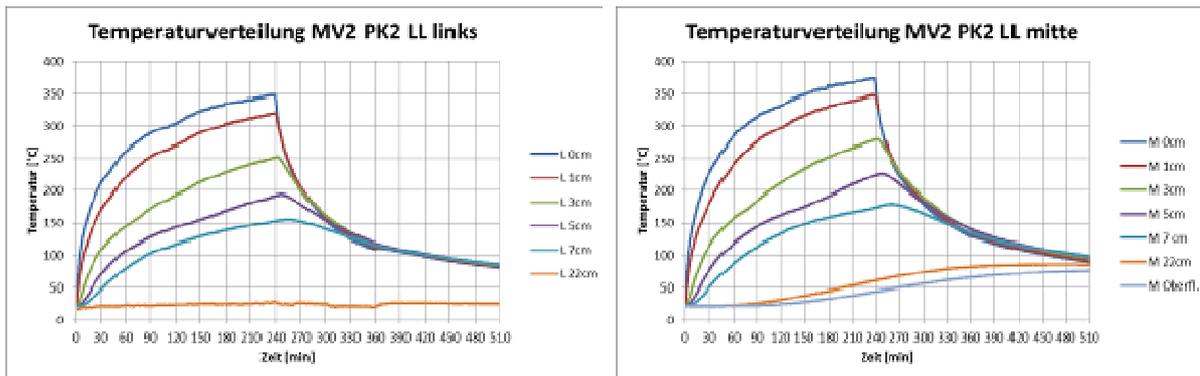


Abbildung 35: Temperaturverteilung im Probekörper

Interpretation:

Bei der Versuchsserie MV2 wurde festgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von 90 bzw. 240 Minuten bei einem Masseverlust von 0,95 kg bzw. 2,40 kg keine Abplatzungen an der dem Brandraum zugewendeten Oberfläche aufgetreten sind.

6.3.3 Serie MV3

6.3.3.1 Probekörper 1

Betonierdatum: 01.02.2016

Prüfdatum: 29.02.2016

Wasserlagerung ab 26.02.2016

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	220,10
	Masse nach dem Versuch [kg]	218,90
	Massendifferenz [kg]	1,20
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 36: MV3 Probekörper 1 nach dem Versuch

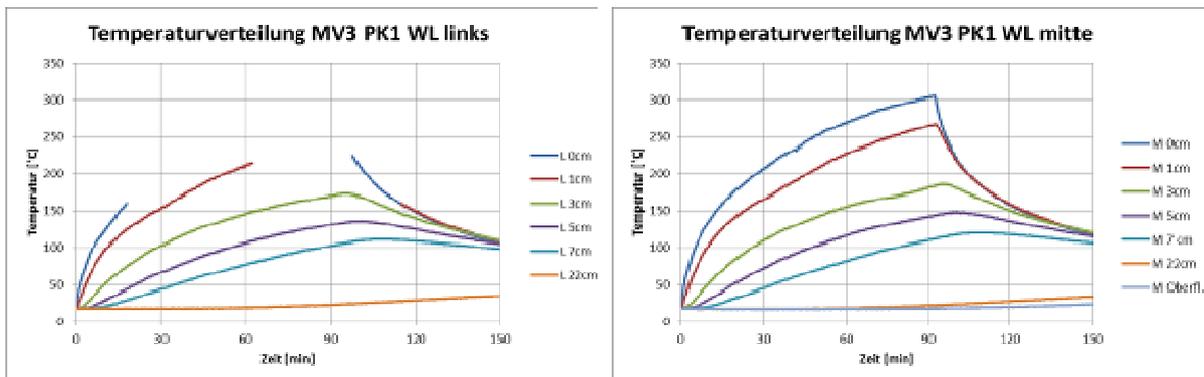


Abbildung 37: Temperaturverteilung im Probekörper

6.3.3.2 Probekörper 2

Betonierdatum: 01.02.2016
Wasserlagerung ab 26.02.2016

Prüfdatum: 01.03.2016
Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	209,15
	Masse nach dem Versuch [kg]	206,75
	Massendifferenz [kg]	2,40
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 38: MV3 Probekörper 2 nach dem Versuch

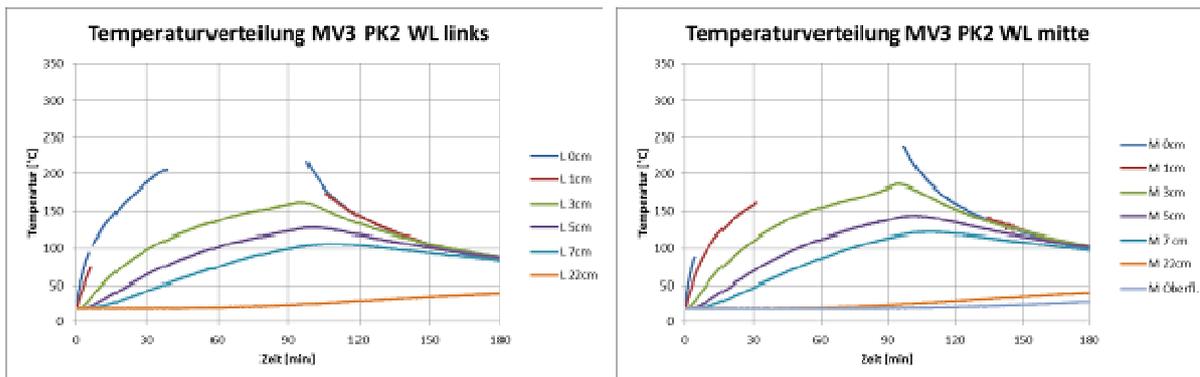


Abbildung 39: Temperaturverteilung im Probekörper

Interpretation:

Bei der Versuchsserie MV3 wurde festgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von 90 Minuten bei einem mittleren Masseverlust von 1,80 kg keine Abplatzungen an der dem Brandraum zugewendeten Oberfläche aufgetreten sind.

6.3.4 Serie MV4

6.3.4.1 Probekörper 1

Betonierdatum: 03.02.2016

Prüfdatum: 02.03.2016

Keine Wasserlagerung

Versuchsdauer: 180 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	218,15
	Masse nach dem Versuch [kg]	216,50
	Massendifferenz [kg]	1,65
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 40: MV4 Probekörper 1 nach dem Versuch

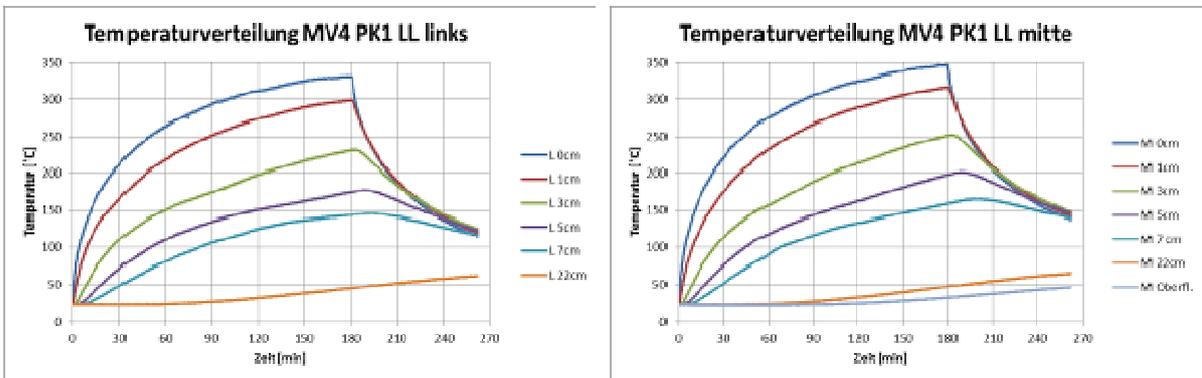


Abbildung 41: Temperaturverteilung im Probekörper

6.3.4.2 Probekörper 2

Betonierdatum: 03.02.2016

Prüfdatum: 03.03.2016

Keine Wasserlagerung

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	217,60
	Masse nach dem Versuch [kg]	216,60
	Massendifferenz [kg]	1,00
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 42: MV4 Probekörper 2 nach dem Versuch

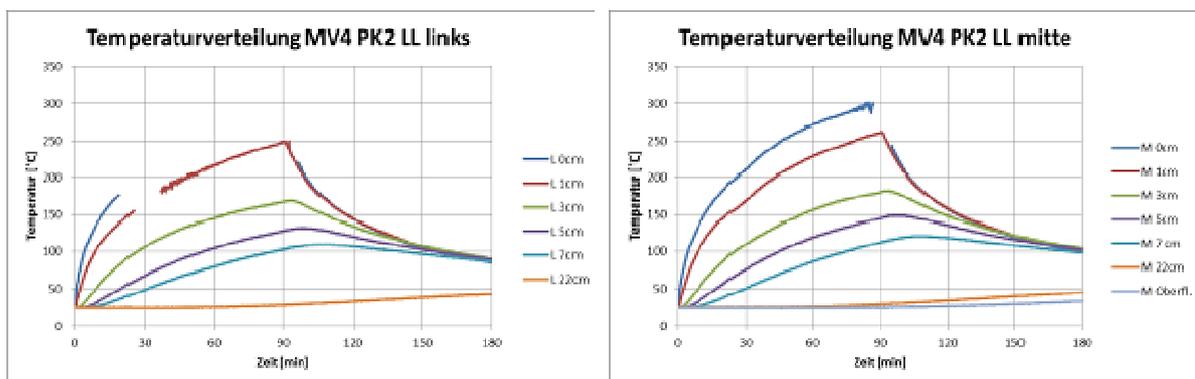


Abbildung 43: Temperaturverteilung im Probekörper

Interpretation:

Bei der Versuchsserie MV4 wurde festgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von 90 bzw. 180 Minuten bei einem mittleren Masseverlust von 1,00 kg bzw. 1,65 kg keine Abplatzungen an der dem Brandraum zugewendete Oberfläche aufgetreten sind.

6.3.5 Serie MV5

6.3.5.1 Probekörper 1

Betonierdatum: 11.01.2016

Wasserlagerung ab 05.02.2016

Prüfdatum: 08.02.2016

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	212,20
	Masse nach dem Versuch [kg]	210,55
	Massendifferenz [kg]	1,65
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 44: MV5 Probekörper 1 nach dem Versuch

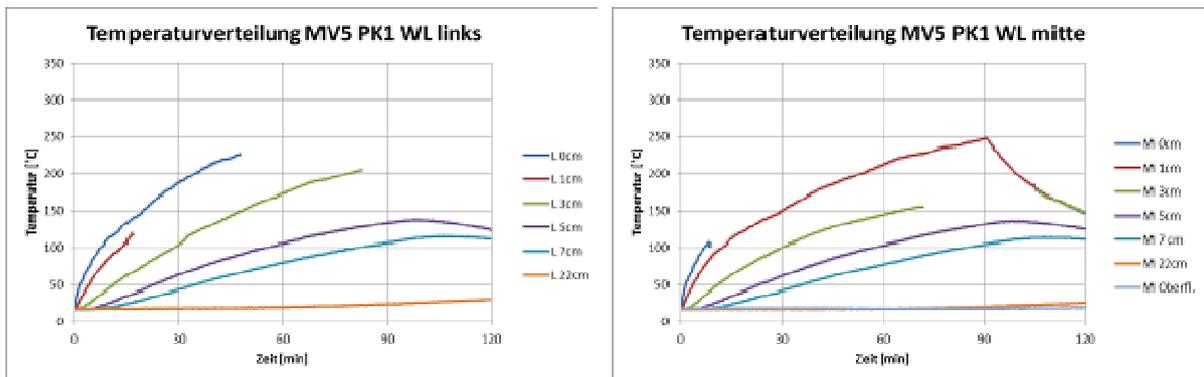


Abbildung 45: Temperaturverteilung im Probekörper

6.3.5.2 Probekörper 2

Betonierdatum: 11.01.2016
Wasserlagerung ab 05.02.2016

Prüfdatum: 09.02.2016
Versuchsdauer: 150 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	213,80
	Masse nach dem Versuch [kg]	211,35
	Massendifferenz [kg]	2,45
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 46: MV5 Probekörper 2 nach dem Versuch

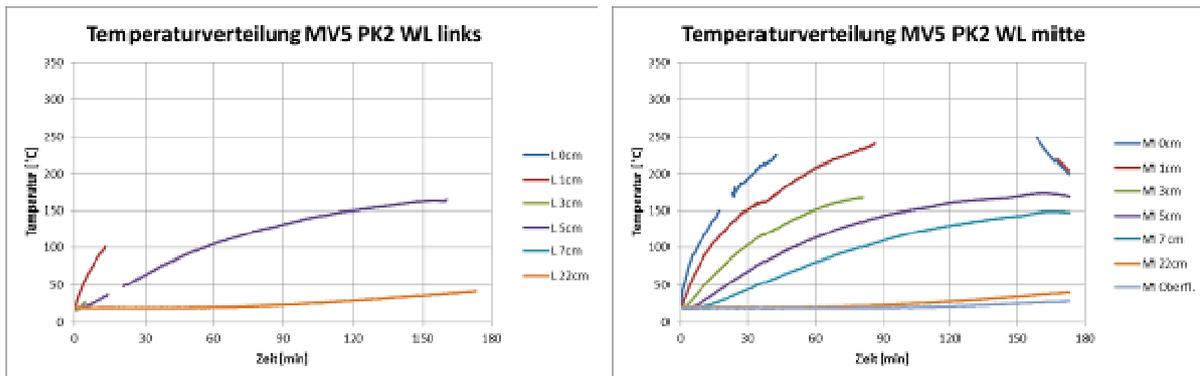


Abbildung 47: Temperaturverteilung im Probekörper

Interpretation:

Bei der Versuchsserie MV5 wurde festgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von 90 bzw. 150 Minuten bei einem mittleren Masseverlust von 1,65 kg bzw. 2,45 kg keine Abplatzungen an der dem Brandraum zugewendeten Oberfläche aufgetreten sind.

6.3.6 Serie MV6

6.3.6.1 Probekörper 1

Betonierdatum: 13.01.2016

Prüfdatum: 10.02.2016

Keine Wasserlagerung

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	213,90
	Masse nach dem Versuch [kg]	212,80
	Massendifferenz [kg]	1,10
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 48: MV6 Probekörper 1 nach dem Versuch

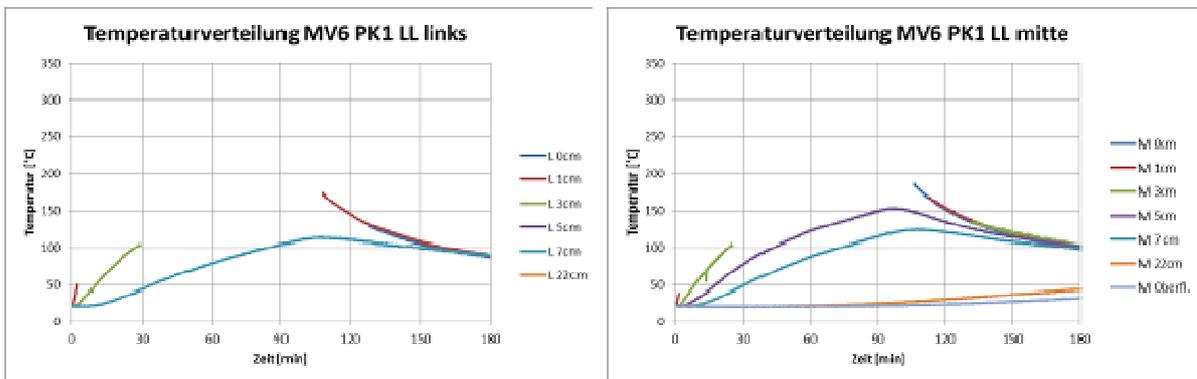


Abbildung 49: Temperaturverteilung im Probekörper

6.3.6.2 Probekörper 2

Betonierdatum: 13.01.2016

Prüfdatum: 11.02.2016

Keine Wasserlagerung

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	213,00
	Masse nach dem Versuch [kg]	212,00
	Massendifferenz [kg]	1,00
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 50: MV6 Probekörper 2 nach dem Versuch

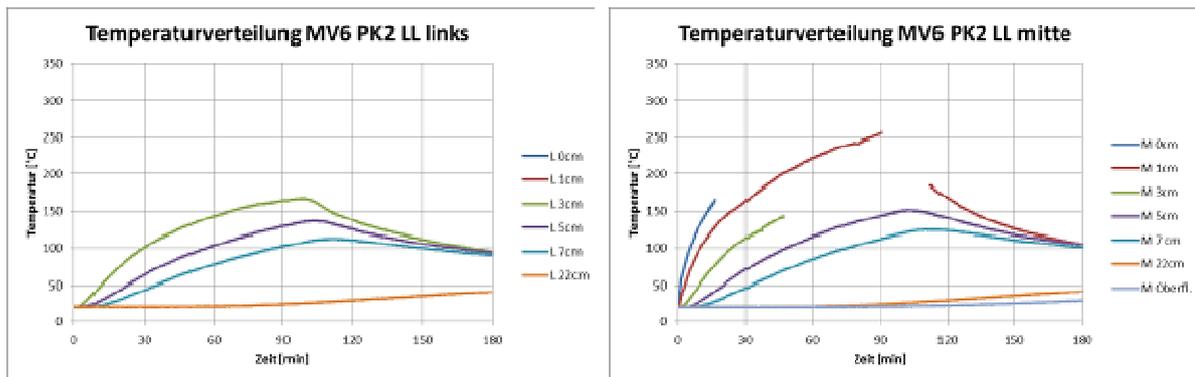


Abbildung 51: Temperaturverteilung im Probekörper

Interpretation:

Bei der Versuchsserie MV6 wurde festgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von 90 Minuten bei einem mittleren Masseverlust von 1,05 kg keine Abplatzungen an der dem Brandraum zugewendeten Oberfläche aufgetreten sind.

6.3.7 Serie MV7

6.3.7.1 Probekörper 1

Betonierdatum: 18.01.2016

Prüfdatum: 15.02.2016

Wasserlagerung ab 12.02.2016

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	228,25
	Masse nach dem Versuch [kg]	227,15
	Massendifferenz [kg]	1,10
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 52: MV7 Probekörper 1 nach dem Versuch

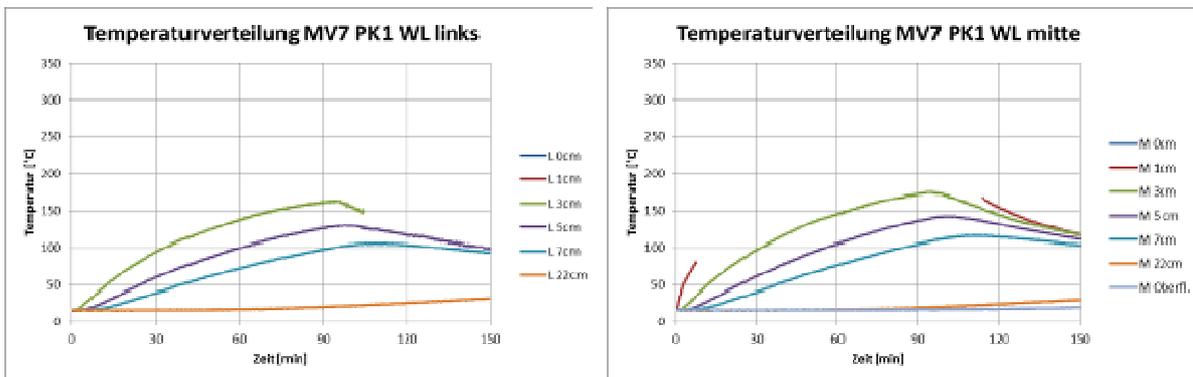


Abbildung 53: Temperaturverteilung im Probekörper

6.3.7.2 Probekörper 2

Betonierdatum: 18.01.2016
Wasserlagerung ab 12.02.2016

Prüfdatum: 16.02.2016
Versuchsdauer: 240 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	222,10
	Masse nach dem Versuch [kg]	219,05
	Massendifferenz [kg]	3,05
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 54: MV7 Probekörper 2 nach dem Versuch

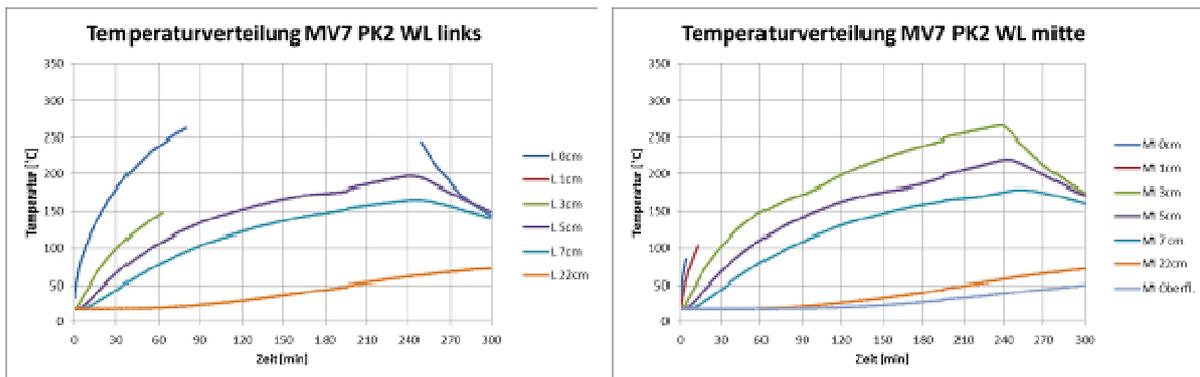


Abbildung 55: Temperaturverteilung im Probekörper

Interpretation:

Bei der Versuchsserie MV7 wurde festgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von 90 bzw. 240 Minuten bei einem mittleren Masseverlust von 1,10 kg bzw. 3,05 kg keine Abplatzungen an der dem Brandraum zugewendeten Oberfläche aufgetreten sind.

6.3.8 Serie MV8

6.3.8.1 Probekörper 1

Betonierdatum: 20.01.2016

Keine Wasserlagerung

Prüfdatum: 17.02.2016

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	221,65
	Masse nach dem Versuch [kg]	220,65
	Massendifferenz [kg]	1,00
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 56: MV8 Probekörper 1 nach dem Versuch

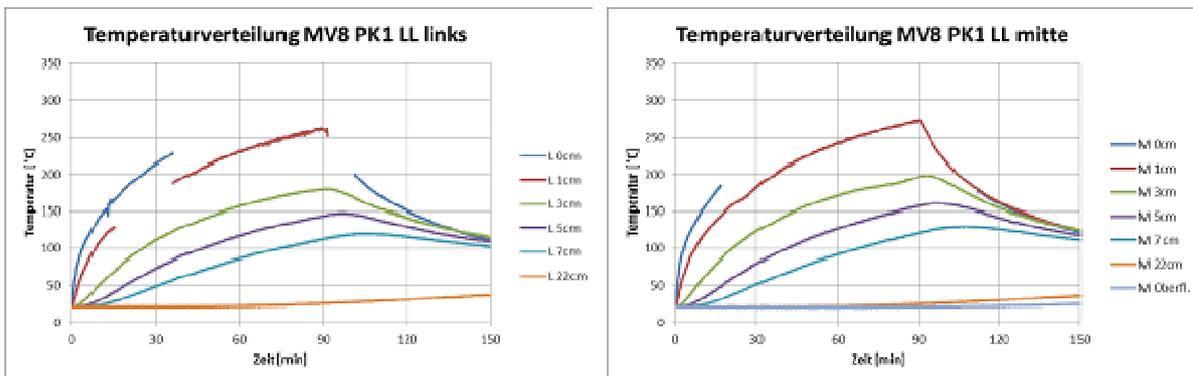


Abbildung 57: Temperaturverteilung im Probekörper

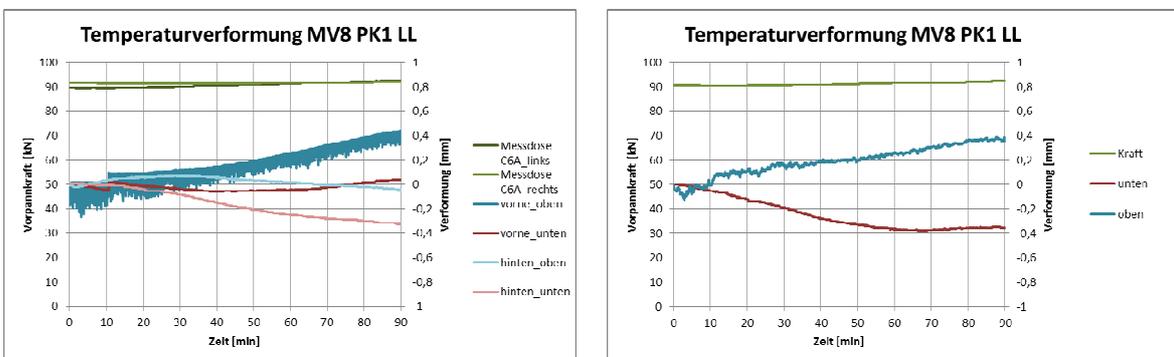


Abbildung 58: Temperaturdehnung und Vorspannung während des Brandversuches; links: Einzelmessungen; rechts: Kraft Mittelwert, Dehnung summiert

6.3.8.2 Probekörper 2

Betonierdatum: 20.01.2016

Prüfdatum: 18.02.2016

Keine Wasserlagerung

Versuchsdauer: 180 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	223,30
	Masse nach dem Versuch [kg]	221,65
	Massendifferenz [kg]	1,65
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 59: MV8 Probekörper 2 nach dem Versuch

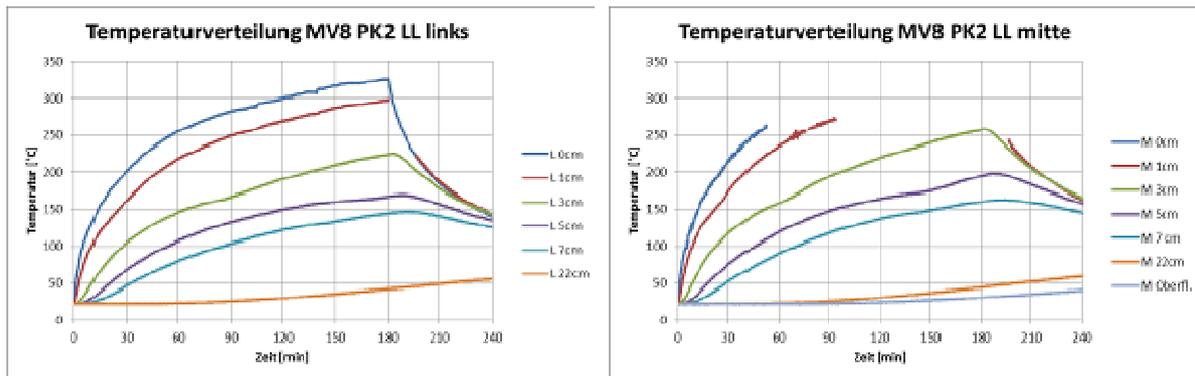


Abbildung 60: Temperaturverteilung im Probekörper

Interpretation:

Bei der Versuchsserie MV8 wurde festgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von 90 bzw. 180 Minuten bei einem mittleren Masseverlust von 1,00 kg bzw. 1,65 kg keine Abplatzungen an der dem Brandraum zugewendeten Oberfläche aufgetreten sind.

6.3.9 Serie MV9

6.3.9.1 Probekörper 1

Betonierdatum: 08.02.2016

Prüfdatum: 07.03.2016

Wasserlagerung ab 04.03.2016

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	212,45
	Masse nach dem Versuch [kg]	210,80
	Massendifferenz [kg]	1,65
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 61: MV9 Probekörper 1 nach dem Versuch

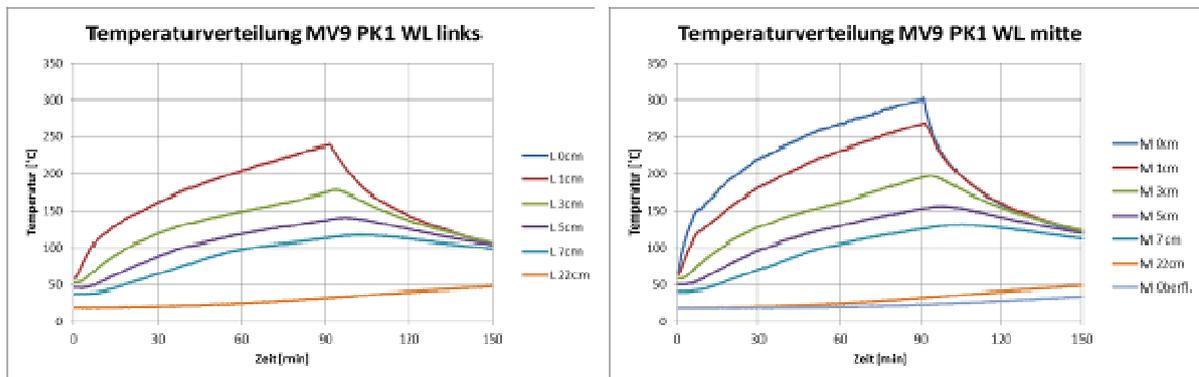


Abbildung 62: Temperaturverteilung im Probekörper

6.3.9.2 Probekörper 2

Betonierdatum: 08.02.2016

Prüfdatum: 08.03.2016

Wasserlagerung ab 04.03.2016

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	215,25
	Masse nach dem Versuch [kg]	213,60
	Massendifferenz [kg]	1,65
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 63: MV9 Probekörper 2 nach dem Versuch

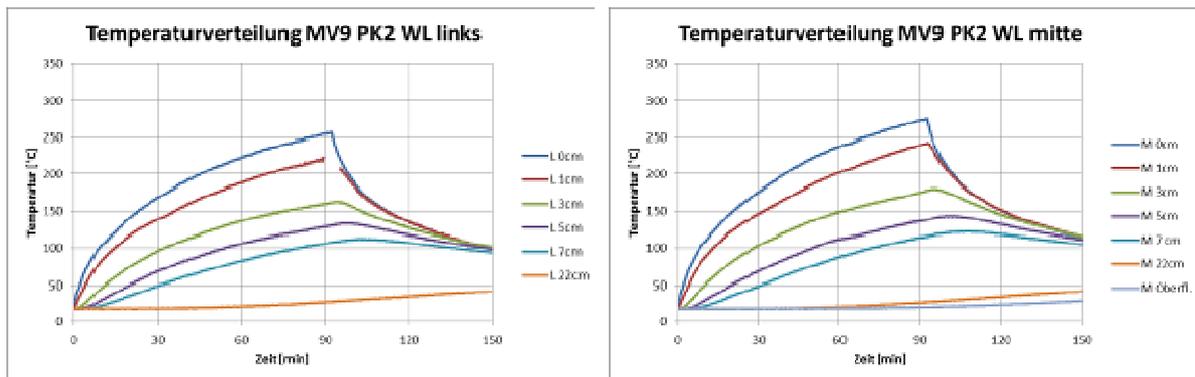


Abbildung 64: Temperaturverteilung im Probekörper

Interpretation:

Bei der Versuchsserie MV9 wurde festgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von 90 Minuten bei einem mittleren Masseverlust von 1,65 kg keine Abplatzungen an der dem Brandraum zugewendeten Oberfläche aufgetreten sind.

6.3.10 Serie MV10

6.3.10.1 Probekörper 1

Betonierdatum: 10.02.2016

Prüfdatum: 09.03.2016

Keine Wasserlagerung

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	209,45
	Masse nach dem Versuch [kg]	208,40
	Massendifferenz [kg]	1,05
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 65: MV10 Probekörper 1 nach dem Versuch

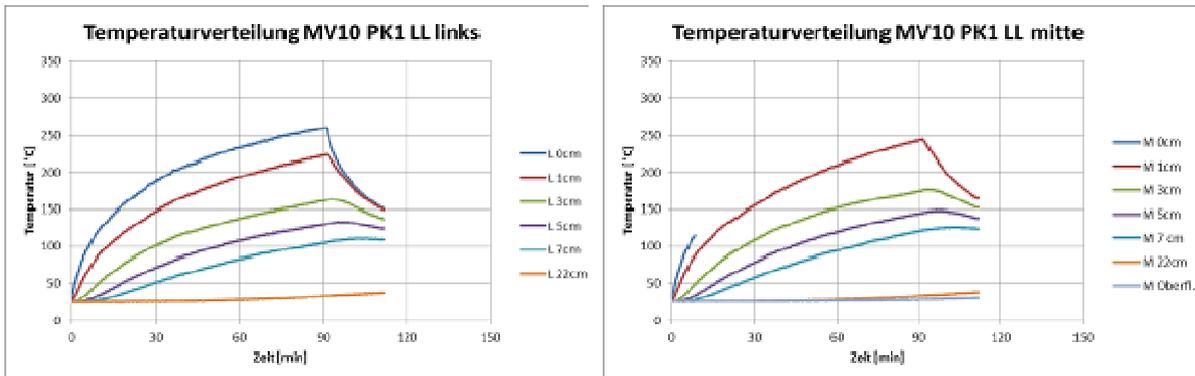


Abbildung 66: Temperaturverteilung im Probekörper

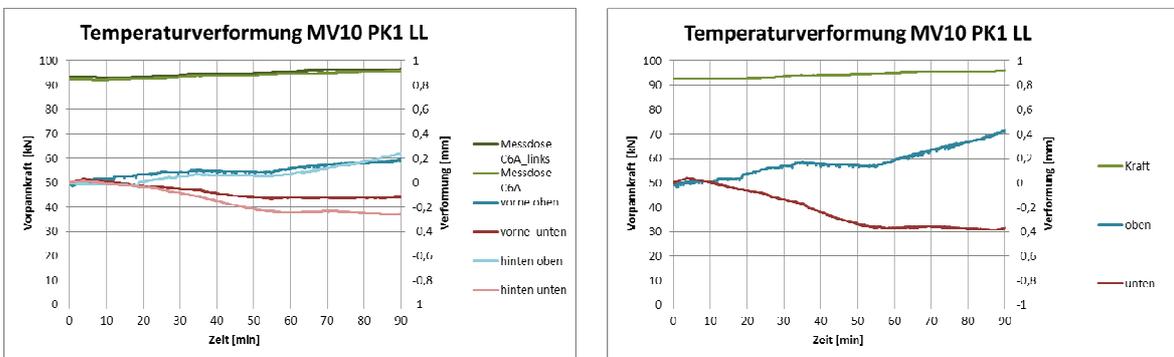


Abbildung 67: Temperaturdehnung und Vorspannung während des Brandversuches; links: Einzelmessungen; rechts: Kraft Mittelwert, Dehnung summiert

6.3.10.2 Probekörper 2

Betonierdatum: 10.02.2016

Prüfdatum: 10.03.2016

Keine Wasserlagerung

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	208,10
	Masse nach dem Versuch [kg]	206,60
	Massendifferenz [kg]	1,50
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 68: MV8 Probekörper 2 nach dem Versuch

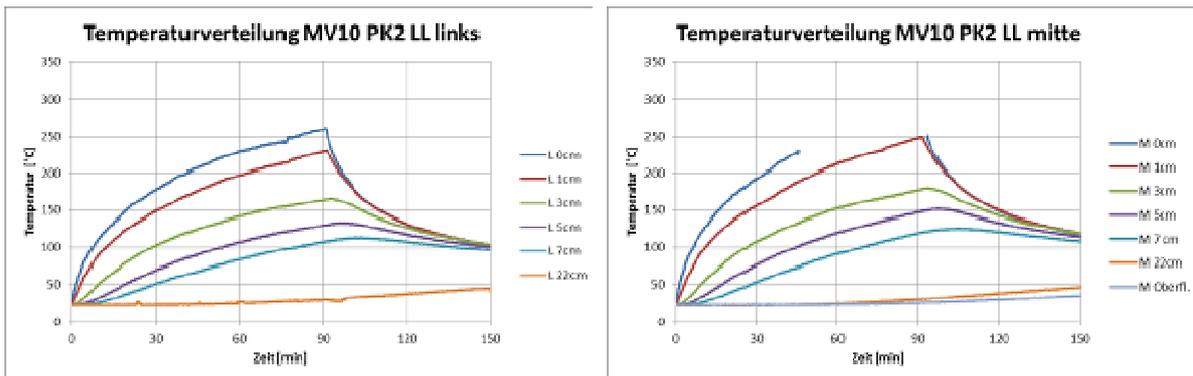


Abbildung 69: Temperaturverteilung im Probekörper

Interpretation:

Bei der Versuchsserie MV10 wurde festgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von 90 Minuten bei einem mittleren Masseverlust von 1,28 kg keine Abplatzungen an der dem Brandraum zugewendeten Oberfläche aufgetreten sind.

6.3.11 Serie MV11

6.3.11.1 Probekörper 1

Betonierdatum: 15.02.2016

Prüfdatum: 14.03.2016

Wasserlagerung ab 11.03.2016

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	216,15
	Masse nach dem Versuch [kg]	214,55
	Massendifferenz [kg]	1,60
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 70: MV11 Probekörper 1 nach dem Versuch

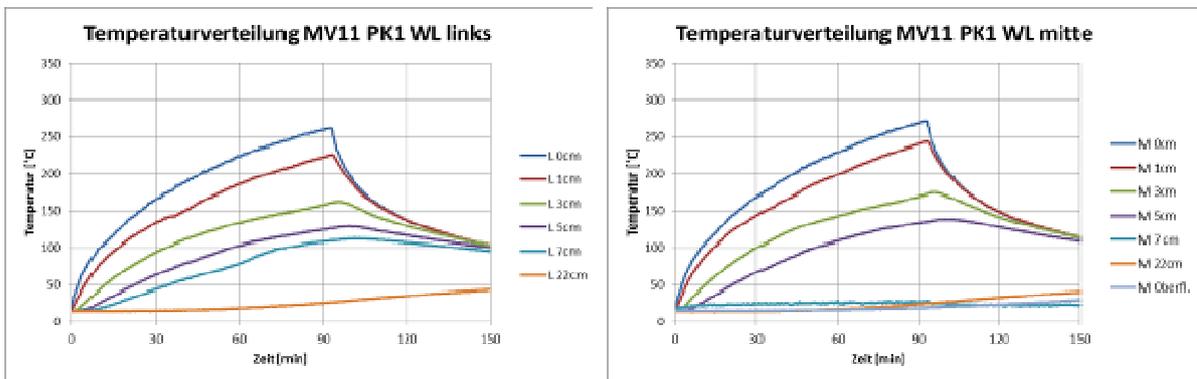


Abbildung 71: Temperaturverteilung Serie MV12

6.3.11.2 Probekörper 2

Betonierdatum: 15.02.2016
Wasserlagerung ab 11.03.2016

Prüfdatum: 15.03.2016
Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	217,40
	Masse nach dem Versuch [kg]	215,85
	Massendifferenz [kg]	1,55
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 72: MV11 Probekörper 2 nach dem Versuch

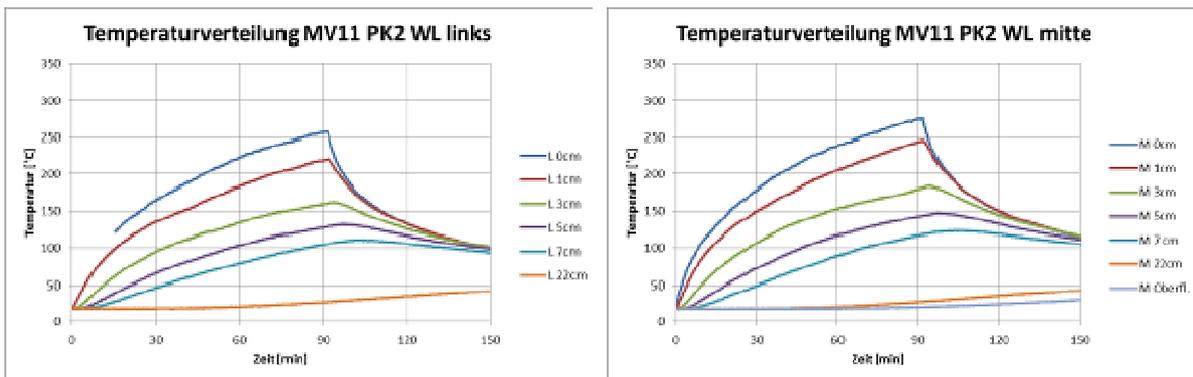


Abbildung 73: Temperaturverteilung im Probekörper

Interpretation:

Bei der Versuchsserie MV11 wurde festgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von 90 Minuten bei einem mittleren Masseverlust von 1,58 kg keine Abplatzungen an der dem Brandraum zugewendeten Oberfläche aufgetreten sind.

6.3.12 Serie MV12

6.3.12.1 Probekörper 1

Betonierdatum: 17.02.2016

Prüfdatum: 16.03.2016

Keine Wasserlagerung

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	214,20
	Masse nach dem Versuch [kg]	212,80
	Massendifferenz [kg]	1,40
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 74: MV12 Probekörper 1 nach dem Versuch

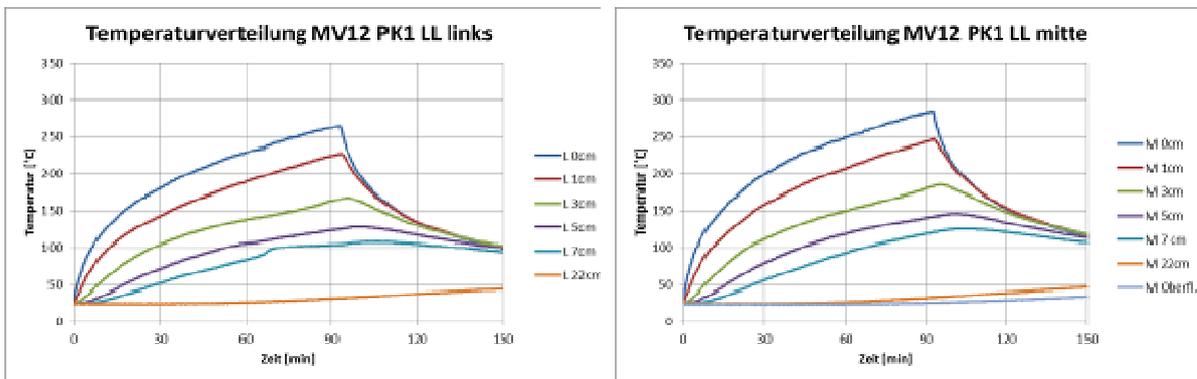


Abbildung 75 Temperaturverteilung im Probekörper

6.3.12.2 Probekörper 2

Betonierdatum: 17.02.2016

Prüfdatum: 17.03.2016

Keine Wasserlagerung

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	216,40
	Masse nach dem Versuch [kg]	214,85
	Massendifferenz [kg]	1,55
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 76: MV12 Probekörper 2 nach dem Versuch

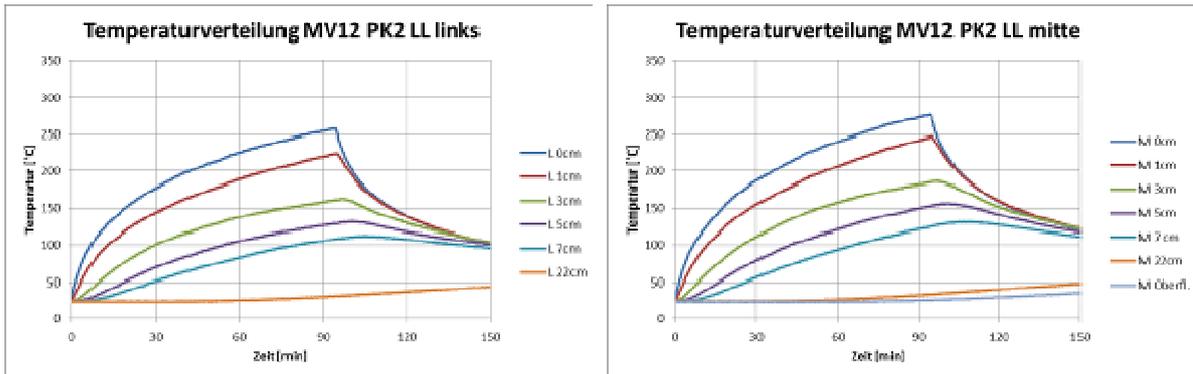


Abbildung 77: Temperaturverteilung im Probekörper

Interpretation:

Bei der Versuchsserie MV12 wurde festgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von 90 Minuten bei einem mittleren Masseverlust von 1,48 kg keine Abplatzungen an der dem Brandraum zugewendeten Oberfläche aufgetreten sind.

6.3.13 Serie MV13

6.3.13.1 Probekörper 1

Betonierdatum: 29.02.2016

Prüfdatum: 30.03.2016

Wasserlagerung ab 25.03.2016

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	211,65
	Masse nach dem Versuch [kg]	210,15
	Massendifferenz [kg]	1,50
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 78: MV13 Probekörper 1 nach dem Versuch

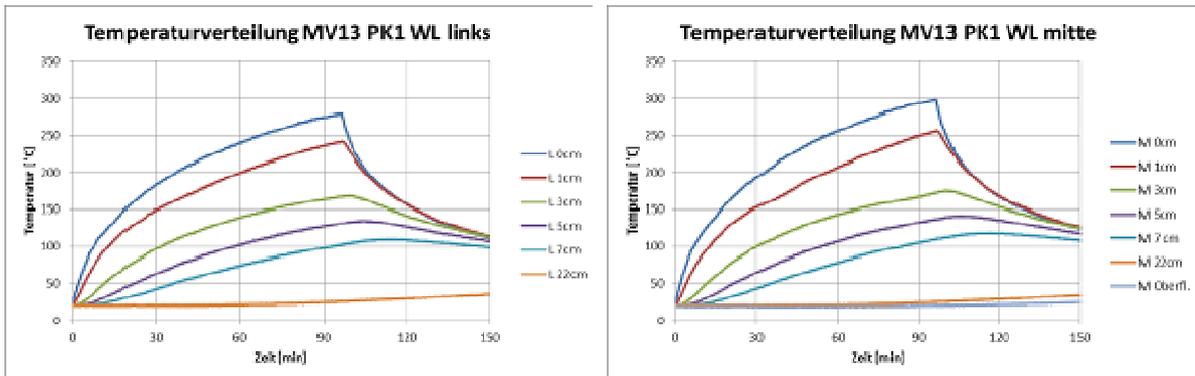


Abbildung 79: Temperaturverteilung im Probekörper

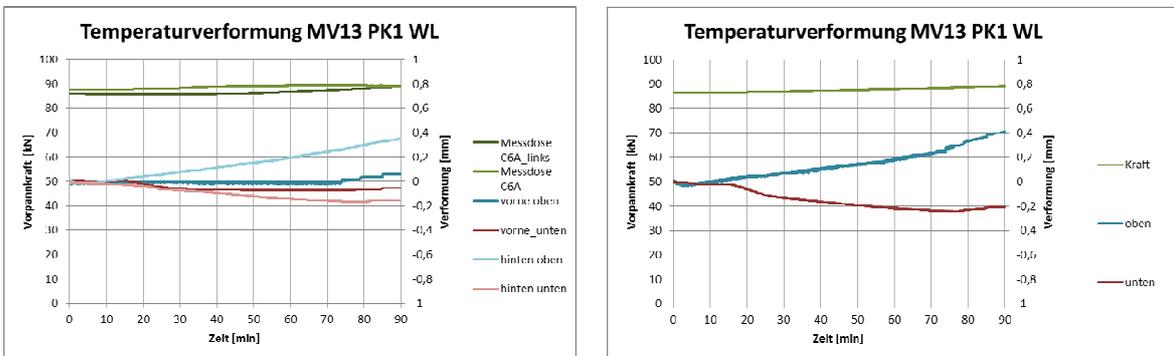


Abbildung 80: Temperaturdehnung und Vorspannung während des Brandversuches; links: Einzelmessungen; rechts: Kraft Mittelwert, Dehnung summiert

6.3.13.2 Probekörper 2

Betonierdatum: 29.02.2016

Prüfdatum: 30.03.2016

Wasserlagerung ab 25.03.2016

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	210,05
	Masse nach dem Versuch [kg]	208,05
	Massendifferenz [kg]	2,00
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 81: MV13 Probekörper 2 nach dem Versuch

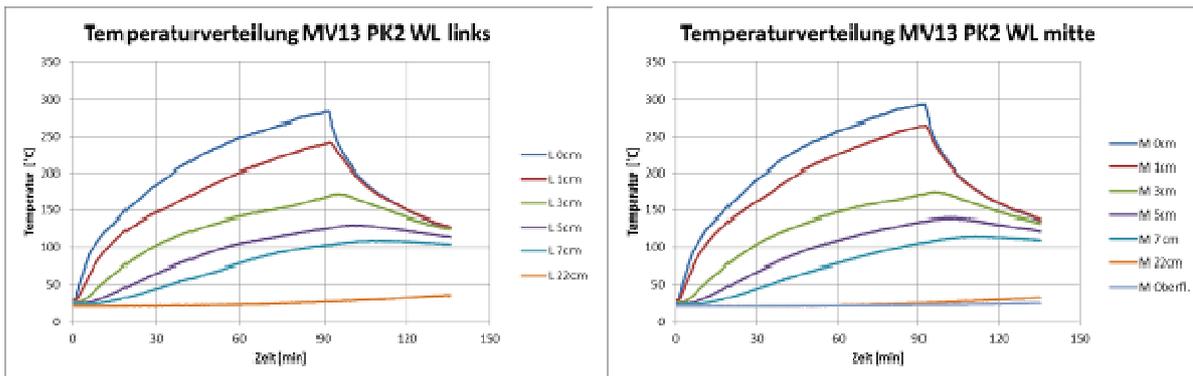


Abbildung 82: Temperaturverteilung im Probekörper

Interpretation:

Bei der Versuchsserie MV13 wurde festgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von 90 Minuten bei einem mittleren Masseverlust von 1,75 kg keine Abplatzungen an der dem Brandraum zugewendeten Oberfläche aufgetreten sind.

6.3.14 Serie MV14

6.3.14.1 Probekörper 1

Betonierdatum: 24.02.2016

Prüfdatum: 29.03.2016

Keine Wasserlagerung

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	208,75
	Masse nach dem Versuch [kg]	207,80
	Massendifferenz [kg]	0,95
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 83: MV14 Probekörper 1 nach dem Versuch

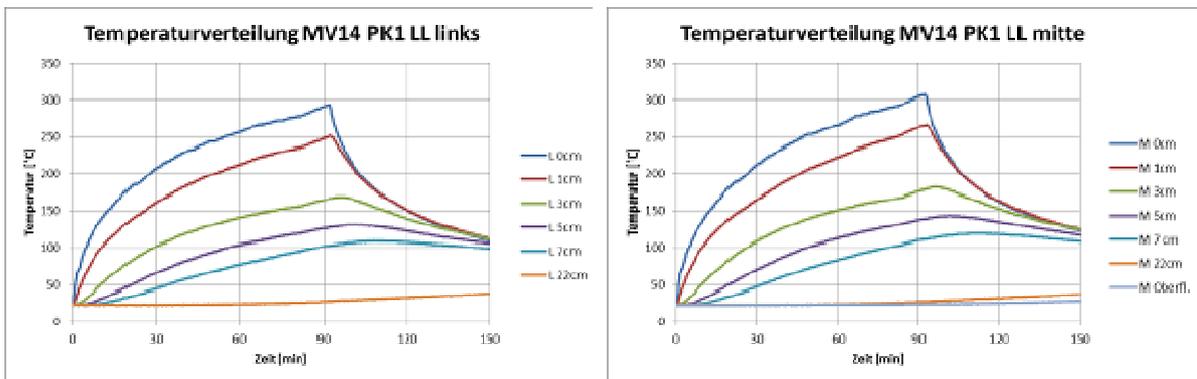


Abbildung 84: Temperaturverteilung im Probekörper

6.3.14.2 Probekörper 2

Betonierdatum: 24.02.2016

Prüfdatum: 29.03.2016

Keine Wasserlagerung

Versuchsdauer: 90 Minuten

	Masse vor dem Versuch [kg]	208,80
	Masse nach dem Versuch [kg]	208,00
	Massendifferenz [kg]	0,80
	Abplatzverhalten:	Keine Abplatzungen
	Dehydrierungserscheinungen	Kein Absanden nach 7 Tagen

Abbildung 85: MV14 Probekörper 2 nach dem Versuch

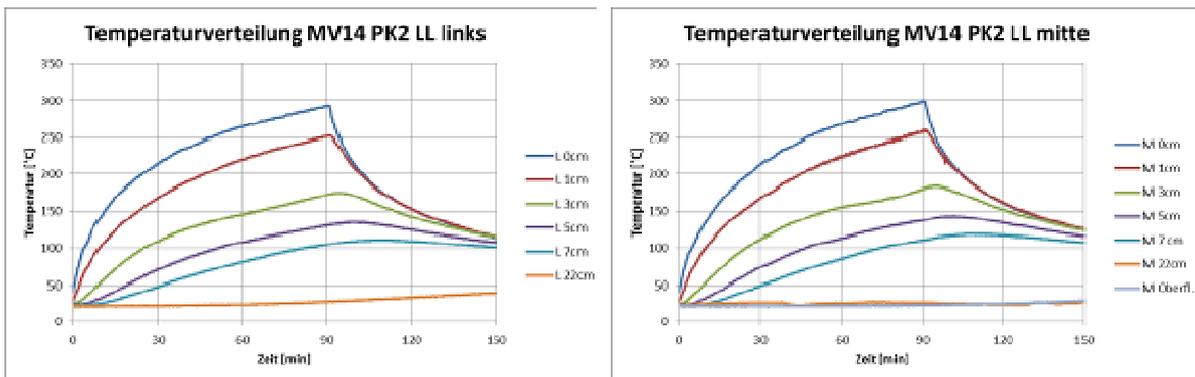


Abbildung 86: Temperaturverteilung im Probekörper

Interpretation:

Bei der Versuchsserie MV14 wurde festgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von 90 Minuten bei einem mittleren Masseverlust von 0,88 kg keine Abplatzungen an der dem Brandraum zugewendeten Oberfläche aufgetreten sind.

6.3.15 Überblick und Interpretation der Ergebnisse

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, Betonzusammensetzungen zu untersuchen, die evtl. ohne die übliche Zugabe von Polypropylenfasern eine ausreichende Brandbeständigkeit im Niedertemperaturbereich bis etwa 450 °C besitzen.

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurde festgestellt, dass bei keinem Probekörper Abplatzungen aufgetreten sind. Die Auswertung (Rezepturen vgl. Tabelle 4) der vorhandenen Daten führte zu den nachfolgenden Ergebnissen in Bezug auf:

- Wärmedehnung der Probekörper in Abhängigkeit der/des
 - Gesteinskörnung
 - Probekörperlagerung
 - Luftporengehalts
 - Betonsorte
 - Zementsorte
- Änderung der Vorspannkraft infolge der Temperaturbelastung
 - Gesteinskörnung
 - Probekörperlagerung
 - Luftporengehalts
 - Betonsorte
 - Zementsorte
- Massenänderung: lufttrockene Probekörper, wassergelagerte Probekörper in Abhängigkeit der Versuchsdauer
- Temperaturunterschied im Probekörper: seitliche Sensoranordnung, mittige Sensoranordnung
- Temperaturverteilung im Probekörper (mittige Sensoranordnung) in Abhängigkeit
 - Gesteinskörnung
 - Probekörperlagerung
 - Luftporengehalts
 - Betonsorte
 - Zementsorte
- Abkühlphase
 - in Abhängigkeit der verwendeten Gesteinskörnung
 - in Abhängigkeit der Versuchsdauer

6.3.15.1 Wärmedehnung der Probekörper

Im folgenden Balkendiagramm Abbildung 87 ist die Dehnung normal zur Vorspannrichtung in Abhängigkeit der

- Gesteinskörnung
- Probekörperlagerung
- Luftporengehalts
- Betonsorte
- Zementsorte

dargestellt. Es handelt sich dabei um den Mittelwert der jeweiligen Serie. Der Wert setzt sich zusammen aus dem Betrag der Dehnungen an der Oberseite des Probekörpers und dem Betrag der Dehnungen an der Unterseite des Probekörpers.

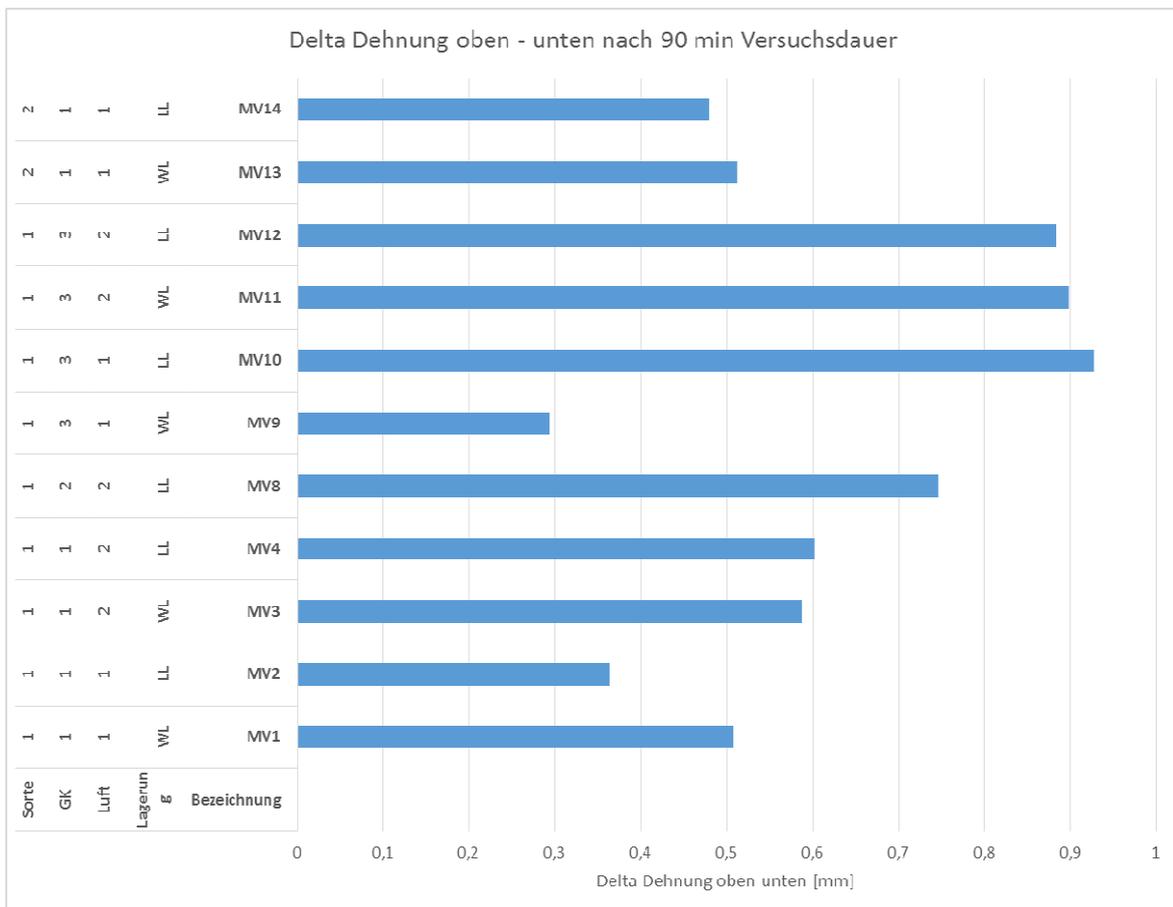


Abbildung 87: Dehnung in Abhängigkeit der Gesteinskörnung, der Probekörperlagerung, des Luftporengehalts, der Betonsorte und der Zementsorte. GK: 1 - karbonatisch, 2 – Tunnelausbruch ATA, 3 – quarzitisch; Luft: 1 – hoch, 2 – niedrig. Bei MV 5 – MV7 konnten keine Daten gesammelt werden.

Interpretation:

Es zeigt sich, dass im oberen Bereich des Probekörpers – der, der Temperaturbelastung abgewendeten Seite - Dehnungen auftreten. Im unteren Bereich – der dem Brandraum zugewendete Oberfläche - ist wahrscheinlich aufgrund des Trocknungsschwindens, der Querdehnung durch die Vorspannung und des durch die Temperatur veränderten E-Moduls eine Stauchung erfolgt.

In Bezug auf den Einfluss der Rezepturen auf die Wärmedehnung ist folgendes Festzustellen:

- **Betonsorte:** nicht signifikant
- **Luftporengehalt:** nicht signifikant
- **Lagerungsart:** nicht signifikant
- **mit/ohne Fasern:** Wasserlagerung (WL) Dehnung gleich, Luftlagerung (LL) Dehnung mit Fasern mehr als ohne
- **Gesteinskörnung:**
 - Gesteinsart 1 (Institutsmaterial, karbonatisch): Dehnungsbereich 0,4 bis 0,5
 - Gesteinsart 2 (Tunnelausbruch Koralm, Kantkorn): Dehnungsbereich 0,7 bis 0,8
 - Gesteinsart 3 (Markgrafneusiedl, quarzitisches): Dehnung ca. 0,9mm.
d.h. die Dehnung ist vor allem von der Gesteinsart abhängig, wobei quarzitisches Material höhere Dehnungen aufweist als karbonatisches.

6.3.15.2 Änderung der Vorspannkraft infolge der Temperaturbelastung

Abbildung 88 zeigt die Änderung der Vorspannkraft infolge der Temperaturbelastung in Abhängigkeit folgender Parameter:

- Gesteinskörnung
- Probekörperlagerung
- Luftporengehalts
- Betonsorte
- Zementsorte.

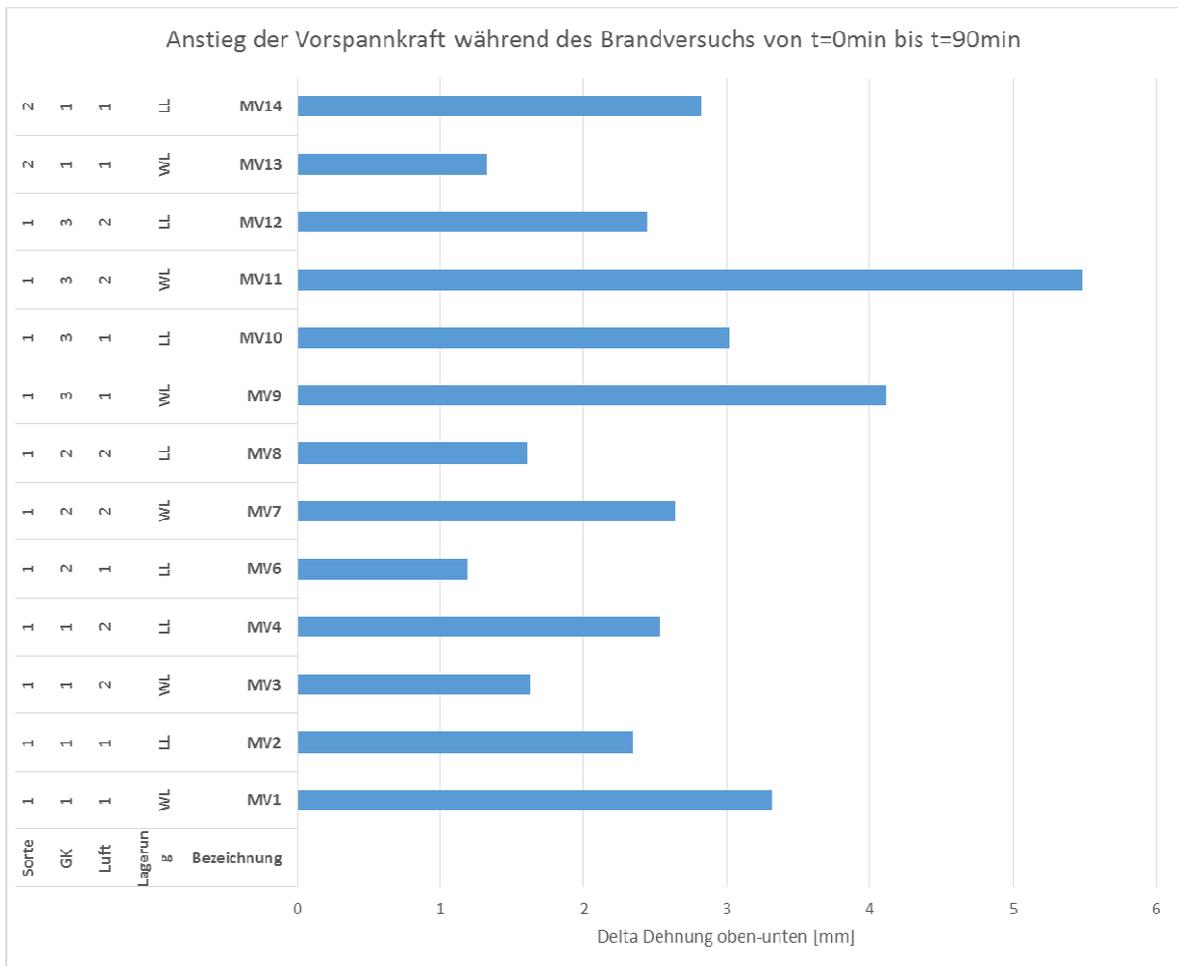


Abbildung 88: Anstieg der Vorspannkraft während einer Versuchsdauer von 90 Minuten

Interpretation:

Die Veränderung der Vorspannkraft während der Versuche zeigt keine eindeutige Tendenz in Bezug auf die variierten Parameter. Man kann zum Einfluss der Rezepturen auf die Vorspannkraft daher folgende Aussagen treffen:

- **Betonsorte:** nicht signifikant
- **Luftporengehalt:** nicht signifikant
- **Lagerungsart:** nicht signifikant
- **mit/ohne Fasern:** nicht signifikant
- **Gesteinskörnung:** nicht signifikant.

6.3.15.3 Massenänderung: lufttrockene Probekörper, wassergelagerte Probekörper

Die folgende Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Masseverluste der einzelnen Probekörper in Folge der Temperaturbelastung. Zu beachten ist, dass die Versuchsdauer der Versuche unterschiedlich ist.

Tabelle 7: Masseverluste in Folge der Temperaturbelastungen an Probekörpern mit den Abmessungen 60 x 50 x 30 cm

Mischung	Bezeichnung-Lagerung	Masse vor Versuch kg	Masse nach Versuch kg	Masseverlust kg	Prüfdauer min.
MV 1	WL1	212,25	210,90	1,35	90
	WL2	213,60	212,00	1,60	90
MV 2	LL1	210,65	209,70	0,95	90
	LL2	209,15	206,75	2,40	240
MV 3	WL1	220,10	218,90	1,20	90
	WL2	220,00	218,60	1,40	90
MV 4	LL1	218,15	216,50	1,65	180
	LL2	217,60	216,60	1,00	90
MV 5	WL1	212,20	210,55	1,65	90
	WL2	213,80	211,35	2,45	150
MV 6	LL1	213,90	212,80	1,10	90
	LL2	213,00	212,00	1,00	90
MV 7	WL1	228,25	227,15	1,10	90
	WL2	222,10	219,05	3,05	240
MV 8	LL1	221,65	220,65	1,00	90
	LL2	223,30	221,65	1,65	180
MV 9	WL1	212,45	210,80	1,65	90
	WL2	215,25	213,60	1,65	90
MV 10	LL1	209,45	208,40	1,05	90
	LL2	208,10	206,60	1,50	90
MV 11	WL1	216,15	214,55	1,60	90
	WL2	217,40	215,85	1,55	90
MV 12	LL1	214,20	212,80	1,40	90
	LL2	216,40	214,85	1,55	90
MV 13	WL1	211,65	210,15	1,50	90
	WL2	210,05	208,05	2,00	90
MV 14	LL1	208,75	207,80	0,95	90
	LL2	208,80	208,00	0,80	90

Die nachfolgende Abbildung 89 zeigt deutlich die zu erwartenden höheren Masseverluste der wassergelagerten Probe. Bezüglich der Betonsorte, des Luftporengehalts, des Fasergehaltes und der – Gesteinskörnung kann keine Abhängigkeit abgeleitet werden.

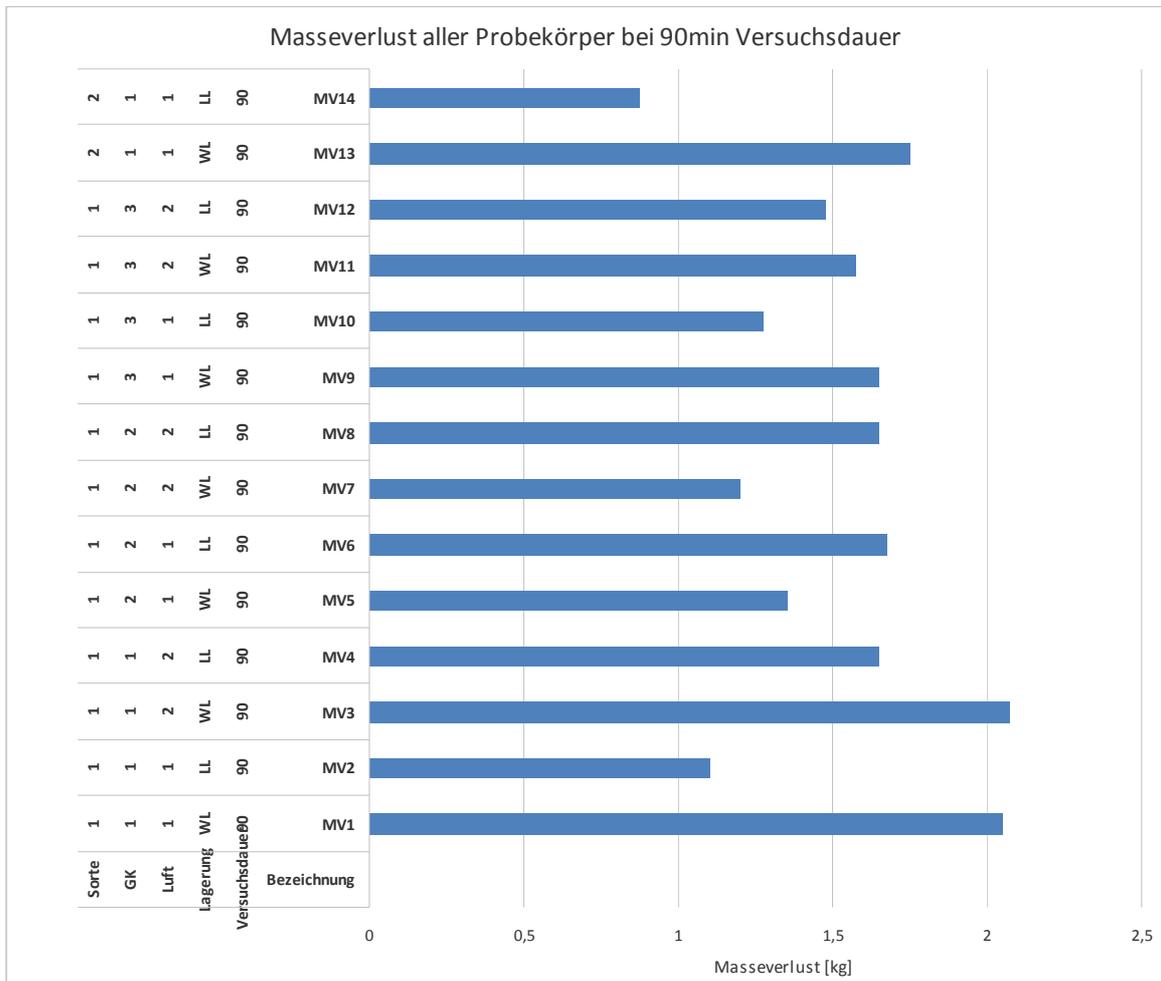


Abbildung 89: Masseverlust der Probekörper (Mittelwerte) nach 90Minuten

6.3.15.4 Temperaturunterschied: seitliche Sensoranordnung, mittige Sensoranordnung

In den Vorversuchen wurden 3 Temperatursensoranordnungen für die Probekörper gewählt (mittig, links, rechts im Probekörper) und festgestellt, dass die seitlichen Anordnungen jeweils nahezu identische Temperaturen liefern. Bei den Hauptversuchen wurden daher zwei Sensorreihen mit jeweils sieben Thermoelementen eingebaut. Ein Vergleich der gemessenen Temperaturen ist in Abbildung 90 dargestellt.

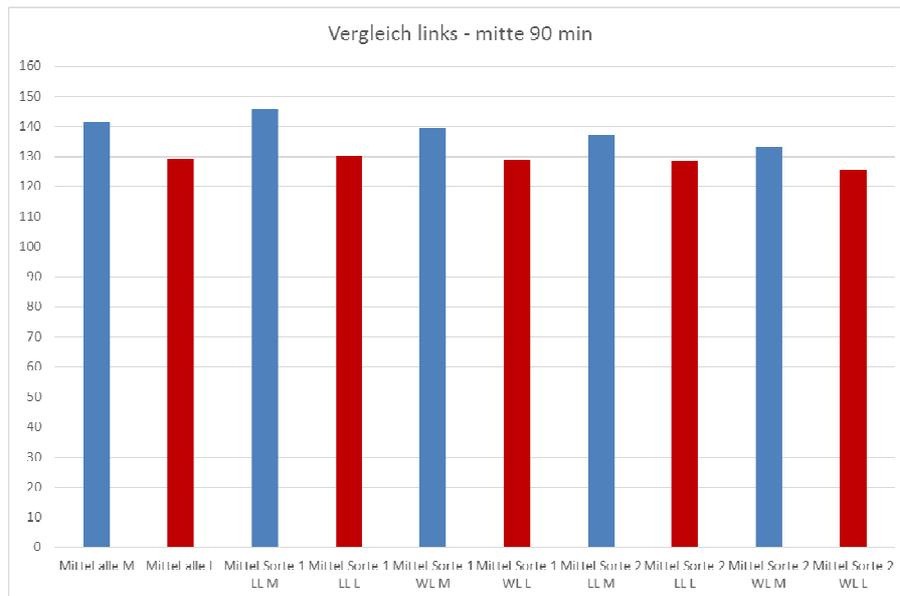


Abbildung 90: Vergleich der Temperaturen im Probekörper in Abhängigkeit der Sensorlage (mittig, seitlich)

Interpretation:

Die Analyse der Messdaten zeigt, dass die Temperatursensoren am Rand des Probekörpers (Links, rot), trotz der verwendeten Wärmedämmung um den Probekörper, immer geringere Messwerte anzeigen als in der Mitte (blau) der Probekörper. Eine Abhängigkeit der Werte von den Parametern Betonsorte, Luftporengehalt, Lagerungsart, Fasergehalt, Gesteinskörnung lässt sich nicht ableiten.

6.3.15.5 Temperaturverteilung im Probekörper (mittige Sensoranordnung)

Für die Untersuchung des Temperaturverhaltens im Probekörper wurden die Daten der Sensoren in 5 cm tiefe (Abstand zur Brandoberfläche) in der Mitte der Probekörper gewählt. Es soll wieder der Einfluss der Gesteinskörnung, Probekörperlagerung, Luftporengehalts, Betonsorte und Zementsorte und der Lagerung auf die Temperaturverteilung zu ermittelt werden.

Abbildung 91 zeigt den Einfluss der Lagerungsart. Die Mittelwerte der Temperaturen liegen bei alle luftgelagerten Proben über denen der Wasserlagerung, d.h. eine Wasserlagerung bewirkt eine geringere Erwärmung der Probekörper im Gegensatz zu einer Luftlagerung.

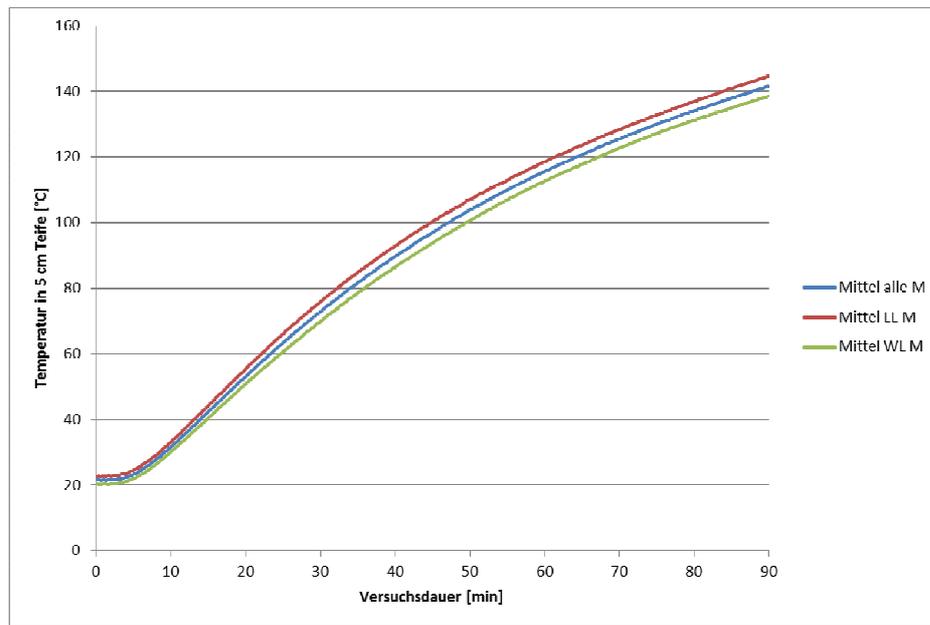


Abbildung 91: Temperaturunterschiede in 5cm Tiefe (mittlere Sensoren) bei Wasserlagerung bzw. Luftlagerung der Probekörper

Stellt man die Betonsorten in Abbildung 92 gegenüber, so zeigt sich, dass Beton der Sorte 1 (IG) unabhängig von der Lagerung immer höhere Temperaturen im Vergleich zu Proben der Sorte 2 (BBG) aufweisen.

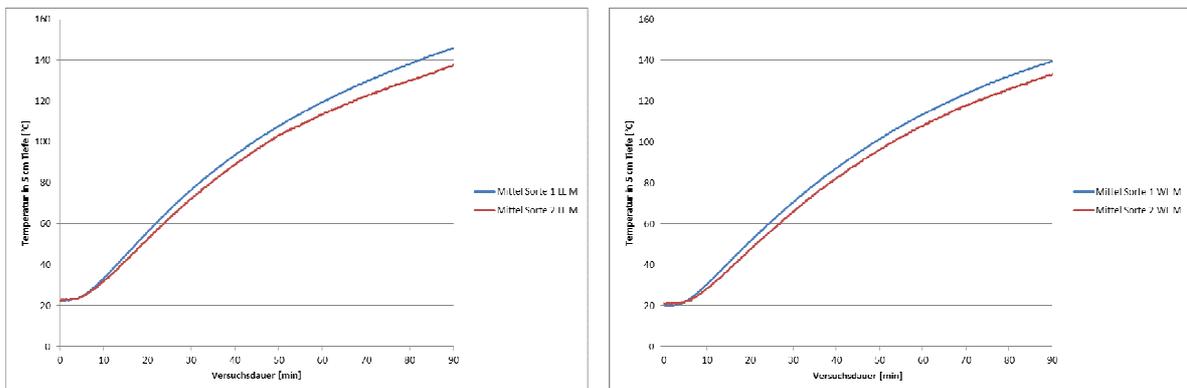


Abbildung 92: Mittelwerte der Temperaturen in 5cm tiefe bei Luft- bzw. Wasserlagerung der Betonsorten 1 und 2 (Standardrezeptur)

Abbildung 93 gibt eine Gesamtübersicht der Mittelwerte der Temperaturen in 5 cm Tiefe.

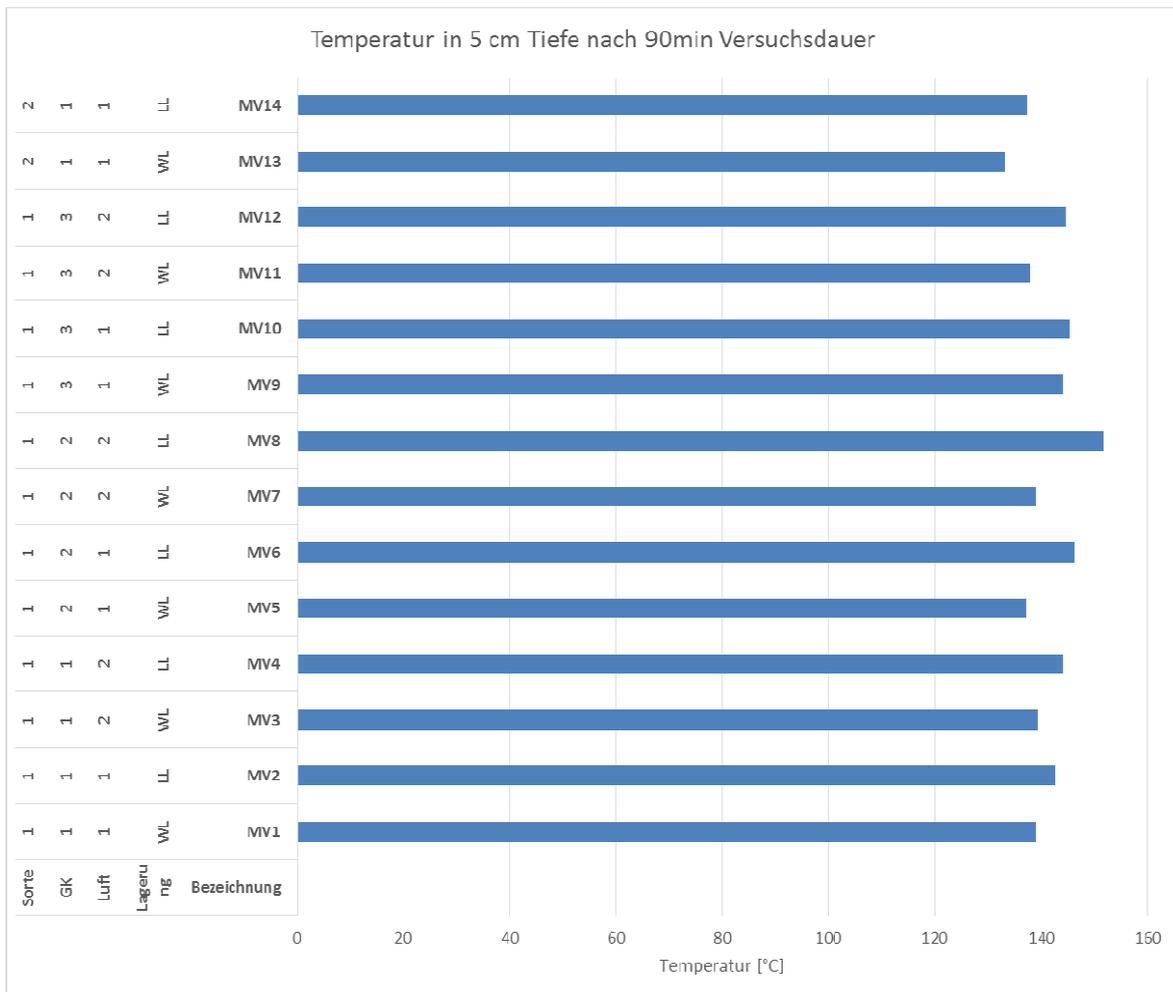


Abbildung 93: Gesamtübersicht der Temperaturen in 5 cm tiefe

Interpretation:

Die Interpretation der Daten zeigt, dass die Temperaturverteilung im Probekörper signifikant von der Lagerungsart (Luftlagerung, Wasserlagerung) und der Betonsorte abhängig ist.

6.3.15.6 Abkühlphase

Im Rahmen der fachlichen Diskussionen mit den Auftraggebern wurde festgelegt, dass die Temperaturen nach den Brandversuchen während der Abkühlphase der Probekörper ebenfalls aufgezeichnet werden. Abbildung 94 zeigt diese in Abhängigkeit der Versuchsdauer.

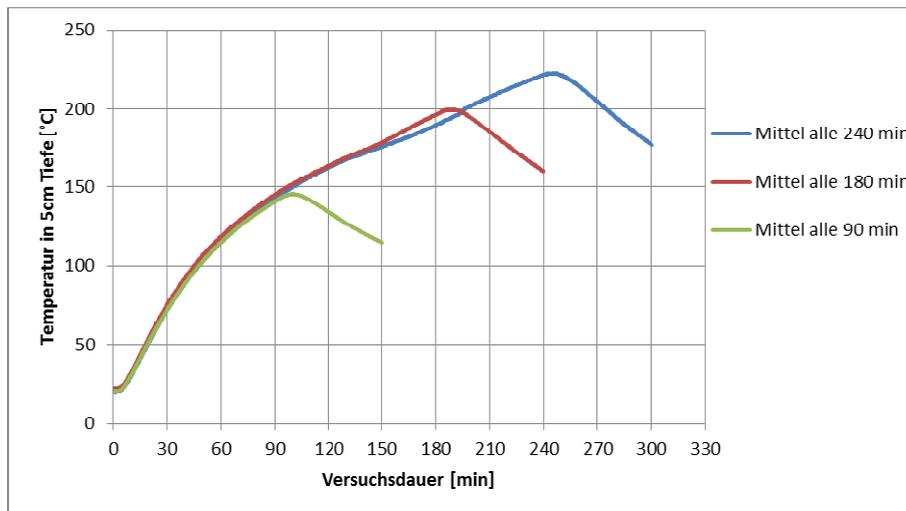


Abbildung 94: Abkühlphase in Abhängigkeit der Versuchsdauer (Mittelwerte)

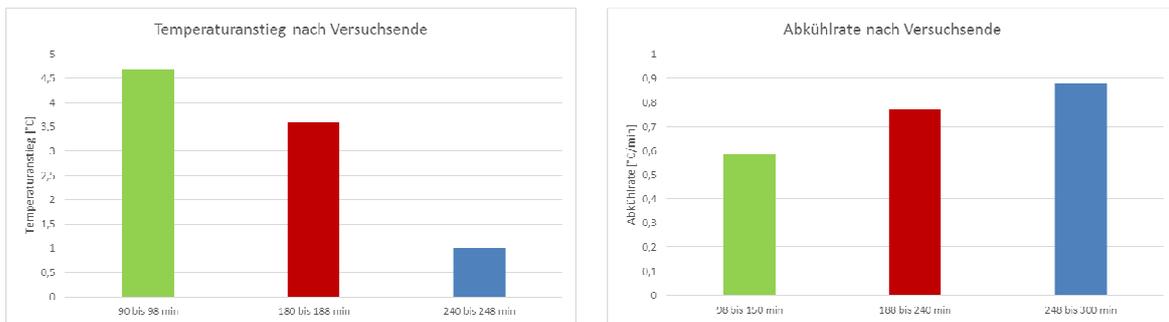


Abbildung 95: links: Temperaturanstieg nach Versuchsende, rechts: Abkühlrate

Interpretation:

Abbildung 95 zeigt die unterschiedliche Versuchsdauer von 90, 180 und 240 Minuten und die darauffolgende Abkühlung anhand des Temperatursensors in 5 cm Tiefe. Die Analyse der Kurve ergibt in den ersten acht Minuten nach Versuchsende einen Temperaturanstieg bei allen Versuchen, unabhängig von der Versuchsdauer.

Die ermittelten Abkühlraten für die erste Stunde der Abkühlphase zeigen, dass die Probekörper nach einer Versuchsdauer von 90 Minuten wesentlich langsamer abkühlen als jene mit längerer Prüfungsdauer. Grund dafür dürfte der höherer Temperaturunterschied zwischen Probekörper und Umgebung sein.

6.3.16 Messung der Luftpermeabilität im heißen Zustand an ausgewählten Mischungen

Eine bedeutende physikalische Eigenschaft von Beton ist, dass durch die poröse Struktur Transportphänomene stattfinden, wobei die festen Phasen des Betons als Trägermedium dienen. Als Transportweg steht die poröse Struktur, aufgebaut aus Hohlräumen, Kanälen oder Poren, zur Verfügung. Mit Transportphänomenen ist stets ein Stofftransport verbunden, dessen quantitative Transportleistung durch den porösen Aufbau des Betons, bedingt ist. Außerdem spielen noch die rheologischen Eigenschaften der Flüssigkeit und der physikalische Charakter des den Transport treibenden Potentials eine Rolle. Zur Beschreibung des Transportvermögens poröser Materialien im Bauwesen wird die Luftpermeabilität verwendet.

Um die ermittelten Werte der Permeabilität von verschiedenen Messverfahren und unter unterschiedlichen Druckverhältnissen vergleichbar zu machen, wurden die Messergebnisse normiert. Zwei nennenswerte Normierungsansätze lauten Ansatz nach *Klinkenberg* und *Ansatz nach Carman und Kozeny*. Grundlage für diese Ansätze ist die Bestimmung der intrinsischen Permeabilität (siehe Abbildung 96).

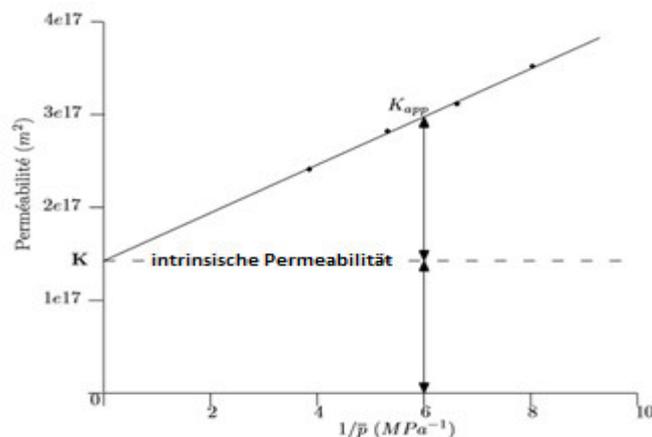


Abbildung 96: Darstellung der intrinsischen Permeabilität

Entsprechend der Vereinbarungen mit dem Auftraggeber wurde an zwei Mischungen (MV1 und MV 13, d.h. Mischungen mit unterschiedlichen Zementsorten) die Luftpermeabilität im heißen Zustand (450 °C) gemessen.

Dazu wurden jeweils von jeder Mischung 2 Probekörper hergestellt und in die dazu vorgesehenen Probehälter gegossen.

Nach einer Erhärtungsdauer von 28 Tagen im Klimaraum bei Normklima wurden die Probekörper in die institutseigene Prüfanlage eingebaut (Abbildung 97).

Es wurden folgende Randbedingungen für die Versuche gewählt:

- Temperaturstufen: Raumtemperatur, 105, 150, 300, 450 °C
- Druckstufen: 1,0; 2,0; 3,0 bar (2,0, 3,0, 4,0 bara)

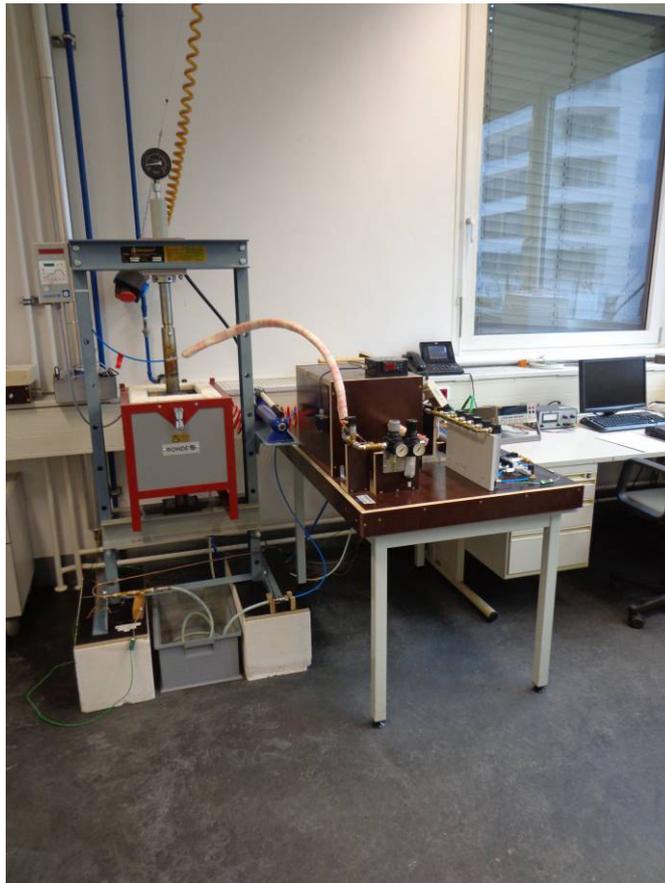


Abbildung 97: Prüfanlage zur Messung der Luftpermeabilität unter Temperaturbelastung

Wie aus der Literatur bekannt, zeigte sich auch hier eine deutliche Erhöhung der Permeabilität mit der Temperatur. Liegt die Luftpermeabilität bei Raumtemperatur im Bereich zwischen 10^{-15} bis 10^{-16} m² steigt die Permeabilität über 100 °C stark an. Die gemessenen Werte für die Permeabilität liegen bei 450 °C im Bereich 1×10^{-11} bis 7×10^{-13} m² für die intrinsische (druckunabhängige) Permeabilität. Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß eine höhere Permeabilität bei der Mischung mit integrierten PP-Fasern.

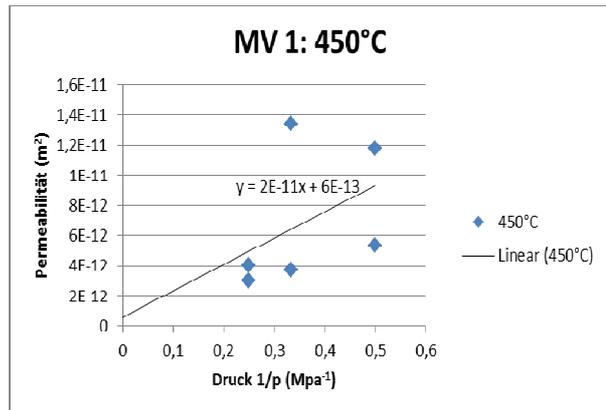


Abbildung 98: Links: Probe MV1 PK1; rechts: Bestimmung der intrinsischen Permeabilität

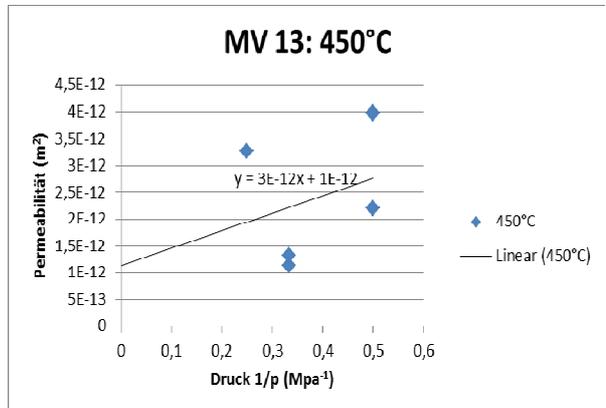


Abbildung 99: Links: Probe MV13 PK2; rechts: Bestimmung der intrinsischen Permeabilität

6.3.17 Vergleichende Brandversuche an Kleinprobekörpern mit der Einheitstemperaturkurve

Es wurden in Absprache mit den Auftraggebern 4 Probekörper mit den Abmessungen 30 x 25 x 10 cm und der Mischung MV2 (karbonatische Gesteinskörnung, 5,0 % Zielluftgehalt) von der Smart Minerals GmbH hergestellt. Die Prüfung erfolgte nach 28 Tagen am Prüfofen des Instituts für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit der TU-Wien. Als Brandbelastungskurve wurde die ETK gewählt (Abbildung 100). Die Prüfdauer wurde mit 90 Minuten festgelegt. Analog zu den anderen Versuchen wurde auch hier die Temperatur im Probekörper in verschiedenen Tiefen gemessen.

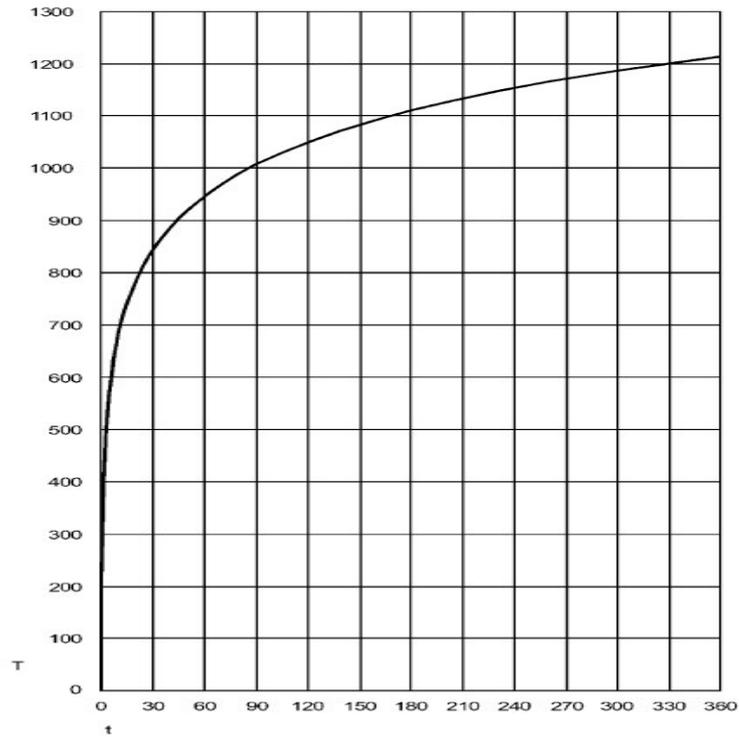


Abbildung 100: Einheitstemperaturkurve (t = Zeit [min]; T = Temperatur [°C]) nach EN 1363-1

Abbildung 101 zeigt die Probekörper vor und nach dem Brandversuch

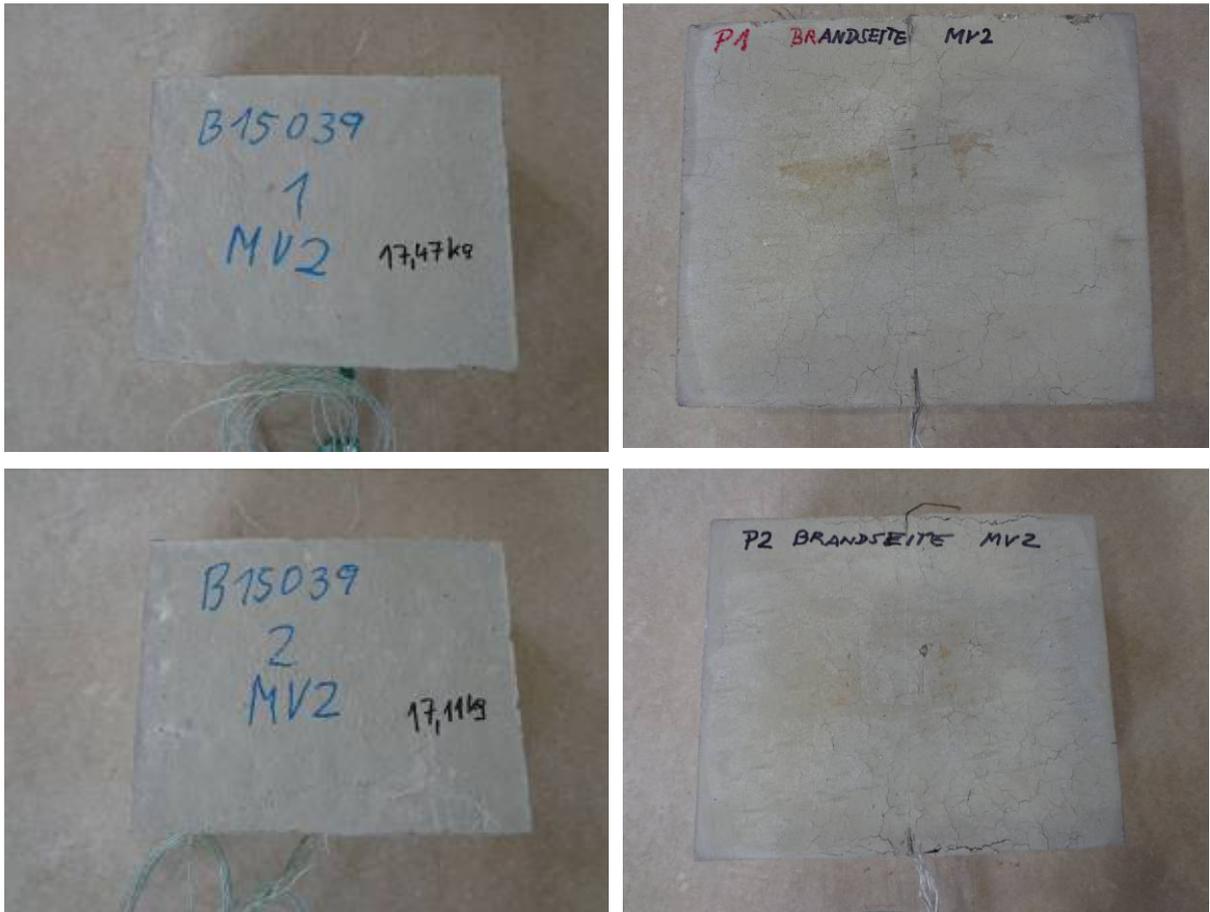


Abbildung 101: Probekörper eins und zwei vor und nach dem Brandversuch

Während der Prüfdauer wurden keine Abplatzungen festgestellt. Aufgrund der Dehydrierung des Betons beim Brandversuch zeigte sich in den Folgetagen ein Absanden der im Versuch beflamten Oberflächen (Abbildung 102).



Abbildung 102: Dehydrierte und absandende Oberflächen der Probekörper

6.3.18 Prüfung der Abreißfestigkeit vor und nach dem Brandversuch

Um eine nicht augenscheinliche oberflächennahe Schädigung des Betons durch Temperatureintrag zu überprüfen wurde vor und nach dem Brandversuch die Abreißfestigkeit der Betonoberfläche geprüft. Die Prüfung der Abreißfestigkeit erfolgte gemäß ÖNORM EN 1542 [20]. Dafür wurde mit einem Kernbohrgerät (Innendurchmesser 50 mm, Trockenbohrung) bis in eine Tiefe von 15 mm in den Betonuntergrund gebohrt. Nach Reinigung der Prüfflächen mit einer Bürste wurden Stahlstempel (Durchmesser 50 mm) mit einem Zweikomponentenkleber auf den Beton geklebt. Nach der Aushärtezeit erfolgte die Bestimmung der Abreißfestigkeit durch zentrisches Abziehen des Stahlstempels unter konstanter Belastungsgeschwindigkeit ($0,05 \pm 0,01$) MPa/s. Die Ergebnisse der Prüfung der Abreißfestigkeit sind in Tabelle 8 dargestellt.

Folgende Rezepturkennwerte wurden bei den geprüften Mischungsverhältnissen verwendet:

- MV 5: MGN (quarzitisch), 5 % Zielwert Luftgehalt, gesättigt
- MV 7: MGN (quarzitisch), 2,5 % Zielwert Luftgehalt, gesättigt
- MV 11: ATA, 2,5 % Zielwert Luftgehalt, gesättigt
- MV 12: ATA, 2,5 % Zielwert Luftgehalt, trocken

Tabelle 8: Ermittelte Abreißfestigkeiten des Betonuntergrundes vor und nach dem Brandversuch (BS)

Bereich	Prüf- stelle	Bruchlast EW [kN]	Durchmesser MW [mm]	Abreißfestigkeit [N/mm ²]		Versagens- art ¹
				EW	MW	
MV 5/2 vor BS	1	3,45	50,0	1,76	1,7	A/Y
	2	3,10	50,0	1,58		A/Y
	3	3,39	50,0	1,73		A/Y
MV 5/2 nach BS	1	1,83	50,0	0,93	1,2	A/Y
	2	2,73	50,0	1,40		A
	3	2,22	50,0	1,13		A/Y
MV 7/1 vor BS	1	4,10	50,0	2,09	1,8	A
	2	3,26	50,0	1,66		A
	3	2,98	50,0	1,52		A
MV 7/1 nach BS	1	1,48	50,0	0,76	0,9	A/Y

	2	2,39	50,0	1,23		A/Y
	3	1,66	50,0	0,86		A/Y
MV 11/2 vor BS	1	3,23	50,0	1,65	1,6	A
	2	4,32	50,0	2,20		A
	3	2,16	50,0	1,10		A
MV 11/2 nach BS	1	2,55	50,0	1,32	1,6	A/Y
	2	2,80	50,0	1,43		A/Y
	3	4,00	50,0	2,05		A
MV 12/2 vor BS	1	3,74	50,0	1,94	1,4	A
	2	1,30	50,0	0,66		A/Y
	3	2,91	50,0	1,50		A
MV 12/2 nach BS	1	2,61	50,0	1,33	1,4	A
	2	3,80	50,0	1,95		A
	3	2,00	50,0	1,03		A

¹Anmerkung zu Tabelle 9:

Die Versagensart des Prüfkörpers ist durch visuellen Nachweis zu bestimmen. Es gibt folgende Versagensarten:

A: Kohäsionsversagen

A/Y: Kohäsionsversagen des Betons und in der Klebeschicht

Beurteilung

Gemäß ÖBV Merkblatt „Tunnelbeschichtung“ [21] besteht eine Mindestanforderung von 1,5 MPa an den Mittelwert (bei EW \geq 1,0 MPa) der Abreißfestigkeit des Untergrundes bei der Applikation von Tunnelbeschichtungen. Weiter Anforderung existieren nicht. Die ermittelten Abreißfestigkeiten des Betonuntergrundes entsprechen nur teilweise den Mindestanforderungen gemäß [21] (\geq 1,5 MPa). Bei MV 5/2 verringert sich der Mittelwert der Abreißfestigkeiten vor und nach dem Brandversuch von 1,7 N/mm² auf 1,2 N/mm² bzw. bei MV 7//1 halbiert sich der Wert von 1,8 N/mm² auf 0,9 N/mm². Ein EW bei MV 5/2 nach dem Brandversuch erfüllt dabei nicht das Einzelwertkriterium. Bei MV 11/1 und MV 12/2 bleiben die Abreißfestigkeiten konstant wobei der Probekörper MV 12/2 weder vor noch nach dem Brandversuch die Anforderung an den Mittelwert (\geq 1,5 N/mm²) erfüllt.

Aufgrund der teils stark schwankenden Einzelwerte wurden aus den geprüften Probekörper zusätzliche Bohrkernproben entnommen und geprüft.

6.3.19 Prüfung Druckfestigkeit von Bohrkernen

Zur Bestimmung der Druckfestigkeit wurden aus den vier Probekörpern, an denen die Abreißfestigkeit geprüft wurde, je zwei Bohrkern $d_N=50$ mm entnommen (ENr. 5609/1 – 5609/8). Bei der Prüfung betrug das Alter der Bohrkern ca. 15 - 20 Wochen. Nach Eintreffen der Bohrkern im Labor der Smart Minerals GmbH wurden sie bis zur weiteren Verwendung unter Laborbedingungen gelagert. Aus den Bohrkernen wurden Probekörper ($d=h$) gesägt und diese nach dreitägiger Lagerung in einem be- und entlüftetem Trockenschrank (50 ± 5) °C für die Bestimmung der Druckfestigkeiten gemäß ONR 23303 [25] herangezogen.

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung zusammengefasst. Die Probekörper sind mit steigender Entfernung zur brandbelasteten Oberfläche aufsteigend nummeriert (z. B. Probekörper 6/1 = erster Probekörper, direkt an der brandbelasteten Seite, 6/6 = letzter Probekörper aus dem Kern, größte Entfernung zur brandbelasteten Seite).

Folgende Rezepturkennwerte wurden bei den geprüften Mischungsverhältnissen verwendet:

- MV 5: MGN (quarzitisch), 5 % Zielwert Luftgehalt, gesättigt
- MV 7: MGN (quarzitisch), 2,5 % Zielwert Luftgehalt, gesättigt
- MV 11: ATA , 2,5 % Zielwert Luftgehalt, gesättigt
- MV 12: ATA, 2,5 % Zielwert Luftgehalt, trocken

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Prüfung der Druckfestigkeit zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 9: Einzelwerte Abmessung, Rohdichte, Höchstlast und Druckfestigkeit der entnommenen Bohrkern

Bezeichnung Mische/ Probekörper/ Alter [d]	Pr.- Bez.	Abmessungen		Rohdichte [kg/m³]E W	Aufgebrachte Höchstlast F [KN]EW	Druckfestig- keit [MPa] EW	Druckfestig- keit [MPa] MW
		Durch- messer [mm]	Höhe [mm]				
MV 5/2/ 148	6/1	49,0	50,7	2393	58,5	31,0	34,2
	6/2	49,0	50,9	2343	72,1	38,2	
	6/3	49,0	49,7	2283	64,5	34,2	

	6/4	49,0	50,0	2296	60,8	32,2	
	6/5	49,0	50,1	2275	65,1	34,5	
	6/6	49,0	50,3	2268	65,4	34,7	
MV 7/1/ 141	8/1	49,0	50,7	2488	79,3	41,1	45,8
	8/2	49,0	50,7	2428	80,6	42,7	
	8/3	49,0	50,2	2431	90,7	48,1	
	8/4	49,0	50,1	2400	89,5	47,5	
	8/5	49,0	50,2	2373	90,2	47,8	
	8/6	49,0	50,3	2331	88,3	46,8	
MV 11/2/ 113	2/1	49,0	49,7	2324	69,7	37,0	40,5
	2/2	49,0	45,5	2332	85,4	45,3	
	2/3	49,0	50,4	2357	93,1	49,4	
	2/4	49,0	50,6	2344	69,7	37,0 ¹	
	2/5	49,0	50,3	2326	71,5	37,9 ¹	
	2/6	49,0	50,9	2310	68,8	36,5 ¹	
MV 12/1/ 111	4/1	49,0	50,5	2355	59,8	31,7	37,9
	4/2	49,0	51,0	2310	65,6	34,8	
	4/3	49,0	51,0	2319	75,1	39,8	
	4/4	49,0	50,8	2367	78,3	41,5	
	4/5	49,0	50,8	2355	77,3	41,0	
	4/6	49,0	50,8	2362	72,5	38,4	

Probekörper 6/1 zeigt als erster, direkt belasteter Probekörper eine mit 31 N/mm² herabgesetzte Druckfestigkeit im Vergleich zu den darauffolgenden Probekörpern 6/2, 6/3, 6/5, 6/6 mit einem Mittelwert von 35 N/mm². Bei Probekörper 6/4 wurden mit 32 N/mm² ebenfalls erniedrigte Druckfestigkeiten festgestellt. (mögliche Ursache: Ausreißer, Unzulänglichkeiten bei der Verdichtung, Beschädigung des PK während der Probekörpervorbereitung).

Die Probekörper aus MV 7/1 zeigen ein ähnliches Bild. Hier weisen die ersten beiden Probekörper 7/1 und 7/2 mit 42 N/mm² gegenüber den anderen Probekörpern merkbar herabgesetzte Druckfestigkeiten. In größerer Entfernung zur brandbelasteten Fläche steigen die Druckfestigkeiten bei sehr konstanten Einzelwerten auf einen Mittelwert von 48 N/mm².

Weniger eindeutig ist die Schädigung des Probekörpers MV 11/2. Hier zeigen Probekörper 2/2 und 2/3 mit durchschnittlich 47 N/mm² um fast 30 % höhere Druckfestigkeiten als die Probekörper 2/1, 2/4, 2/5, 2/6 (MW = 37 N/mm²). Dieser Unterschied wird auf die Tatsache dass es sich bei der oberen Probekörperhälfte um eine eigene Mische handelt zurückgeführt

¹ Die Probekörper wurden mit 2 Einzelmischen hergestellt. Ein Unterschied zwischen erster und zweiter Mische ist daher nicht ausgeschlossen.

Der Probekörper MV12/2 zeigt in der Analyse der Druckfestigkeiten von Bohrkernen ein ähnliches Bild wie Probekörper MV 7/1. Die ersten beiden Probekörper 4/1 und 4/2 zeigen mit einer mittleren Druckfestigkeit von 33 N/mm² eine gegenüber den Probekörpern mit größerem Abstand zur Brandoberfläche um 18 % herabgesetzte Druckfestigkeit (Mittelwert Probekörper).

Die Erkenntnisse können folgenderweise zusammengefasst werden: Die Temperaturen von 450 °C führen zu einer geringfügigen Herabsetzung der Betondruckfestigkeiten. Die maximale Eindringtiefe der Schädigung bei einer Branddauer von 90 Minuten ist ca. 10 cm (= 2 Probekörper).

- **Luftporengehalt:** Einfluss auf die Schädigungstiefe: Geringere Luftgehalte führen zu tiefergreifender Schädigung
- **Lagerungsart:** Einfluss auf die Schädigungstiefe: Bei gesättigten Probekörper ist die Eindringtiefe geringer als bei nicht gesättigten.
- **Gesteinskörnung:** nicht signifikant.

6.3.20 Prüfung der Porosität des Zementsteins vor und nach dem Brandversuch

Die Bestimmung der Porenvolumenverteilung durch Quecksilberintrusion erfolgte in Anlehnung an DIN 66133 [24] an 3 ausgewählten Rezepturen (MV2, MV5 und MV6). Quecksilber ist eine nicht benetzende Flüssigkeit, d.h. der Benetzungswinkel liegt über 90°. Das Quecksilber dringt daher nur unter Aufbringen von Druck in die Poren des untersuchten Materials ein. Ein Quecksilberdruckporosimeter misst den Zusammenhang zwischen aufgebrachtem Druck und dem Volumen an eingepresstem Quecksilber. Mit Hilfe der erweiterten Washburn-Gleichung (1) wird daraus die Porengrößenverteilung bestimmt.

$$d = \frac{-f\sigma}{p} \cos \vartheta \quad (1)$$

In Gleichung (1) bezeichnet d den Porendurchmesser, p den auf das Quecksilber aufgetragenen Druck, σ die Oberflächenspannung des Quecksilbers und ϑ den Kontakt-/ Benetzungswinkel des Quecksilbers auf der Probe sowie f den so genannten Formfaktor.

Wie aus Gleichung (1) ersichtlich, ist die errechnete Porengröße indirekt proportional dem aufgetragenen Druck, d.h. je größer der bei der Messung aufgezeichnete Druck ist, umso kleiner die zugeordnete Porengröße. Das bei den Untersuchungen verwendete Porosimeter kann einen Druck im Bereich von 0,136 bar bis 2000 bar aufbringen. Über die Materialparameter des Quecksilbers gibt es zahlreiche Untersuchungen. In der vorliegenden Arbeit wurde für σ ein Wert von 0,48 N/m sowie für θ ein Wert von 117° verwendet. Für den Formfaktor f scheint ein Wert von 2,5 die Form der Poren am besten zu charakterisieren, wie sich durch elektronenmikroskopische Aufnahmen herausgestellt hat. Wichtig bei der Wahl der Parameter der Gleichung (1) ist, dass bei vergleichenden Studien für alle Auswertungen die gleichen Parameter verwendet werden.

Durch die Untersuchungen zur Porenstruktur können Aussagen über die Veränderung der Porenfeinstruktur im Zuge des Brandversuches getroffen werden. Dazu wurden Zementsteinproben vor und nach dem Brandversuch entnommen. Die ermittelte Porosität des Zementsteins der Kleinprobekörper ist in Abbildung 103 dargestellt.

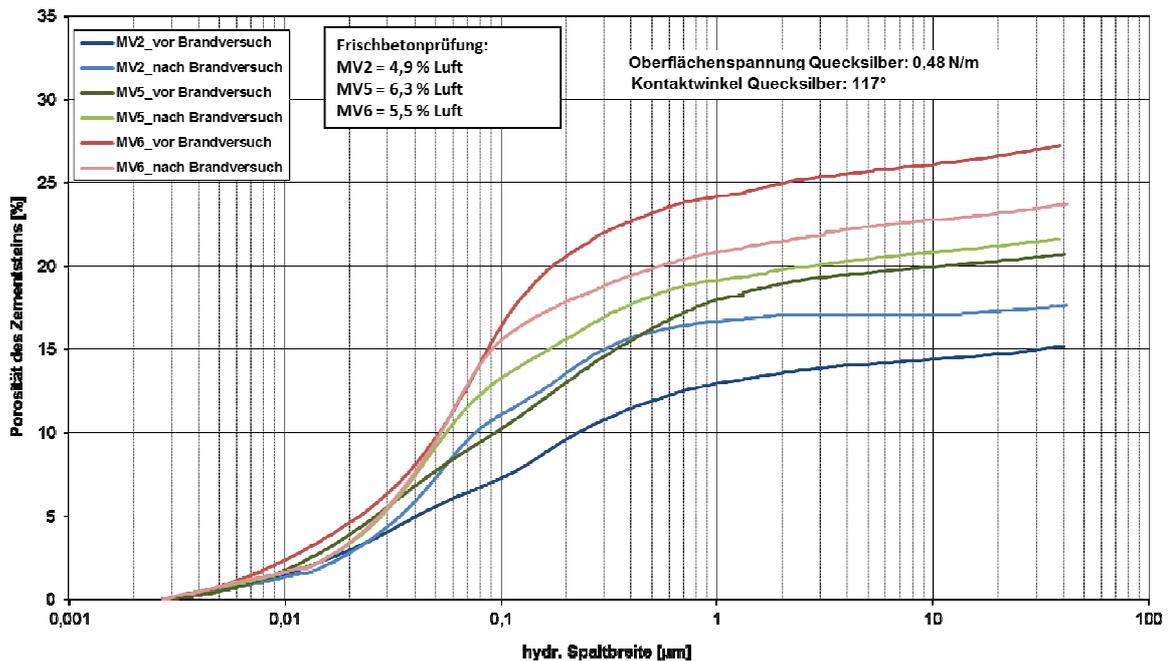


Abbildung 103: Porosität des Zementsteins bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen vor und nach dem Brandversuch

Die Auswertung der Zementsteinporigkeit über die Quecksilberdruckporosimetrie brachte keine eindeutigen Ergebnisse. Während bei MV 2 und MV 5 die Porosität des Zementsteins nach dem Brandversuch geringfügig höher ist, ist sie bei MV 6 nach dem

Brandversuch niedriger. Der Grund für die nicht eindeutigen Ergebnisse kann die in Relation zum Probekörper sehr kleinen Probegrößen für die Analyse. Ob die entnommene probe eine repräsentative, für den gesamten Probekörper darstellendes Porengefüge aufweist ist rein optisch nicht möglich zu beurteilen. Hinzu kommt eine gewisse Prüfstreuung die in diesem Fall eine eindeutige Interpretation verhindert.

7 BRANDVERSUCHE AN GROSSKÖRPERN – AP 6

7.1 Allgemeines

Für die Durchführung des Arbeitspaketes 6 „Brandversuche am Großkörper“ erfolgte die grundsätzliche Konzeption zur Konstruktion der Vorspannung der Probekörper gemäß ÖBV-Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ [11].

Dazu gehören die Herstellung eines entsprechenden Brandraumes zur Durchführung von Großbrandversuchen, die Herstellung der Probekörper zur Durchführung von Großbrandversuchen sowie die Bestimmung der Porosität nach den Brandversuchen.



Abbildung 104: Adaptierter Brandraum für die Versuche mit den Großkörpern

Gemäß den Änderungen zum Werkvertrag wurden auf Basis der Ergebnisse der Kleinkörperversuche 3 Großkörper mit den Abmessungen 180 x 140 x 50 cm hergestellt.

Im Zuge der Projektbesprechung am 9. März 2016 wurde seitens der AG die Herstellung der Großkörper mit Tunnelausbruchmaterial aus dem Koralmtunnel KAT 2 (ATA – Aufbereiteter Tunnelausbruch) angeregt. Die Herstellung der Probekörper konnte dabei direkt auf der Baustelle des KAT 2 unter Verwendung einer tatsächlich im Tübbingwerk in Verwendung stehenden Rezeptur erfolgen. Die Herstellung der Probekörper erfolgte gemäß den Vorgaben der ÖBV-Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz von unterirdischen Verkehrsbauwerken aus Beton“ [11] mit folgenden Abänderungen:

- Die Probekörper wurden ohne Bewehrung hergestellt: Bei Tunnelinnenschalen handelt es sich vorwiegend um bewehrungsfrei hergestellte Bauteile.
- Die Probekörper wurden nur mit Querspannung (1,2 MPa) belastet: Aufgrund von in Tunnelbauwerken vorhandenen Blockfugen sind aus konstruktiver Sicht die Querspannungen als vordergründig zu betrachten.
- Es erfolgt die Prüfung zweier unterschiedlicher Luftgehalte. Dabei wurden die ersten beiden Probekörper mit konformen Luftgehalten hergestellt. Vor der Betonage des dritten Probekörpers wurde der Luftgehalt des Betons mit Hilfe eines Entschäumers möglichst weit verringert.

Für die Herstellung der Probekörper wurden 3 Stahlschalungen durch eine Fachfirma hergestellt und auf die Baustelle des Koralmtunnels KAT 2 geliefert.

Die Temperaturfühler wurden entsprechend der ÖBV-Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ [11] Pkt. A.3.2.3. folgendermaßen eingebaut:

„An den Bewehrungsstäben der ersten 2 Lagen sind seitlich am Durchmesser, jeweils in der Mitte der Platte und an einem Eck an jeweils 5. Stab von außen Thermolement-Temperaturfühler vor dem Betonieren zu befestigen. Ein weiterer Fühler ist etwa 25 cm vom Brandraum entfernt, möglichst in Versuchskörpermitte zu positionieren. Soll eine Temperatureindringkurve aufgenommen werden, sind zusätzliche Fühler mittig in 2,5 cm, 10 cm und 15 cm Tiefe und je ein weiterer Fühler im Abstand von 10 cm bei Fühler 1 und 2 anzuordnen“. Zusätzliche Fühler (S7-S11, siehe Tabelle 10) wurden nach eigenem Ermessen ebenfalls eingebaut. Die Temperaturfühler dienen der Bestimmung der Temperatureindringung in den Probekörper. In Tabelle 10 sind die Lage und Position der Fühler zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 10: Lage und Anzahl der Temperaturfühler, gereiht nach Fühlertiefe

Fühlerbezeichnung	Lage	Körper 1	Körper 2	Körper 3
		[cm] v. Boden		
S7	mittig/mittig	2,5	3,0	2,5
S1*	mittig/mittig	5,5	5,0	5,5
S2*	mittig/mittig	7,5	7,0	8,0
S8	mittig/mittig	16,0	16,0	16,0
S5*	Mittig/50 cm links	25,0	25,0	25,0
S6*	Mittig/ 50 cm rechts	25,0	25,0	25,0
S9	mittig/mittig	25,0	25,0	25,0
S10	mittig/mittig	36,0	35,5	36,0
S3*	Ecke	3,0	4,0	3,5
S11	Stutzen	26,5	27,0	27,5

*Fühler gemäß Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbaugeräte aus Beton“ [11]

Zur Stabilisierung der Schalung wurden Hüllrohre mit Schraubanker eingebaut. Die Hüllrohre dienen später gleichzeitig dem Vorspannen des Probekörpers. Die Vorspannung der Probekörper entsprechend o.g. Richtlinie wurde innerhalb von 4 Tage vor der Versuchsdurchführung durch eine einschlägige Fachfirma (KB-Vorspanntechnik) aufgebracht. In Abbildung 105 ist eine der verwendeten Stahlschalungen abgebildet.


Abbildung 105: Verwendete Stahlschalungen

Um einen möglichst praxisnahen Versuch durchzuführen, wurden die Großprobekörper in Abstimmung mit den AG mit zusätzlichen Einbauteilen versehen. Werden Innenschalen aus Fertigteilen gefertigt so wird der verbleibende Ringspalt zwischen Fertigteilaußenhaut und anstehendem Gebirge in der Regel mit sogenanntem Ringraumverfüllmaterial ausgefüllt. Dabei kommt unter anderem Perlkies zum Einsatz der über sogenannten Einblasstutzen in den verbleibenden Ringraum eingeblasen wird. Hierzu werden in die Fertigteile sogenannte Verblasstutzen aus Kunststoff eingebaut und nach der Verfüllung mit einem wasserdicht ausgeführten Schraubdeckel verschlossen. Um die Auswirkungen im Brandfall auf eine Innenschale zu testen wurden diese Bauteile in die Großkörper verbaut – ohne die regulär ablaufenden Messungen zu beeinflussen – und die Temperatur in 1,0 cm Abstand vom Einblasstutzen auf einer Höhe von 25 cm aufgezeichnet. Die Schalungen wurden noch mit jeweils 4 angeschweißten Ösen als Hebevorrichtung seitens der ARGE KAT 2 ergänzt.

Das vom Auftraggeber geforderte Belastungsszenario betrug wie bei den Kleinversuchen:

- 450°C
- ca. 0,4 m/s Luftmassenstrom.

Diese Anforderungen wurden mit Hilfe von drei Propangasbrennern und einem entsprechenden Gebläse erreicht. Die Überprüfung von Temperatur und Luftmassenstrom erfolgt mit Hilfe entsprechender Sensoren.

Folgender Versuchsablauf wurde durchgeführt:

- Einbau des Probekörpers
- Anschluss und Funktionstest aller Sensoren an das Messsystem
- Gleichzeitiger Start der Brenner (Zünden) und des Gebläses (Luftmassenstrom)
- Die geforderten Bedingungen wurden innerhalb von ca. 3 Minuten erreicht. Die Versuchsdauer betrug vereinbarungsgemäß 90 Minuten.

Die Messwerterfassung erfolgte mit einem Multimeter vom System Keithley. Die Temperaturdaten im Probekörper und Brandkanal wurden direkt in eine entsprechende Excel-Tabelle übertragen und gespeichert.

Nach den Brandversuchen erfolgt die Feststellung der Abplatztiefe sowie der Porosität. Eine weitere Beurteilung des durch Dehydrierung auftretenden weiteren Masseverlustes erfolgt 56 Tage nach dem Brandversuch. Zusätzlich wurde auf Wunsch des Auftraggebers die Haftzugfestigkeit an der Betonoberfläche der Brandseite nach dem Versuch gemessen.

7.2 Herstellung der Großkörper

Die Schalungen für die Probekörper wurden nach der Herstellung direkt in das Fertigteilwerk des KAT 2 geliefert. Die Vorbereitung der Schalungen vor Ort (Verankerung der Schalungen am Boden, Einbau des Einblasstutzens) erfolgte durch die ARGE KAT2. Die Herstellung der Großkörper erfolgt am 21.06.2016. Dazu wurden die Stahlschalungen auf Plastikfolien gelagert und mit Hilfe von einfachen Winkelprofilen auf den Boden gespannt, um ein „Aufschwimmen“ der Stahlschalung durch mittig austretenden Beton zu verhindern. In **Abbildung 106** ist eine für die Betonage fertig vorbereitete Schalung zu sehen.



Abbildung 106: Vorbereitungen der Schalung für die Betonage

Bei den Temperaturfühlern handelt es sich um umflochtene Thermodrähte, die mittels Bindedraht in der Schalung fixiert wurden (siehe **Abbildung 107**).

Die Fühler wurden mit Hilfe von Bindedraht im Probekörper fixiert und beschriftet, zu einem Strang vereint und mittig aus dem Probekörper geführt. Der Einblasstutzen wurde am Boden verankert und dessen Position eingemessen. Die Seiten der Schalung wurden mit Anker verbunden und ein Ausbauchen der Schalung zu verhindern. Die im Beton verbleibenden Hüllrohre dienen später dem Einbau der Vorspannungslitzen.



Abbildung 107: Fühler in der Höhe von 2,5, 5,5, 7,0, 25 und 35 cm mittig im Großprobekörper

Der Einbau erfolgte nach durchgeführter Frischbetonprüfung mit Beton der Bezeichnung C25/30/IG/IS/GK22/F52 aus einem Fahrmischer. Um die Fühler bzw. deren Position nicht zu beeinträchtigen wurde der Probekörper seitlich der Fühler gleichmäßig befüllt und die Fühler mit einer Schaufel händisch gestützt. Die Probekörper wurden nach dem Befüllen mit einem Innenrüttler (Flaschenrüttler) verdichtet und mittels anliegender Platte 14 Tage nachbehandelt. Nach der Herstellung der ersten 2 Probekörper MV101 erfolgte die

Zugabe eines Entschäumers in den Fahrmischer und erneutes Aufmischen. Danach wurde der Dritte Probekörper betoniert. Der Transport von Deutschlandsberg nach Wien erfolgte 14 Tage nach Herstellung. Die Prüfung der Brandbeständigkeit wurde im Probekörperalter von 6 Wochen in Anwesenheit der AG durchgeführt.

MV101: Rezeptur gemäß EP mit 4,8 % Luft (Bezeichnung Probekörper 2 und 3)

MV102: Zugabe eines Entschäumers 1,0 % Luft (Bezeichnung Probekörper 1)



Abbildung 108: Lagerung der Probekörper für die ersten 14 Tage

7.3 Ermittlung der Frisch- und Festbetonkennwerte

7.3.1 Frischbetonkennwerte

Die Bestimmung der Frischbetonkennwerte und die Probekörperherstellung erfolgt am Einbauort. In

Tabelle 11 sind die ermittelten Kennwerte sowie die Angaben gemäß Formblatt 1-1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 11: Angaben gemäß Formblatt 1-1 und ermittelte Frischbetonkennwerte

Betonsorte: C25/30/(90)IG/IS/GK22/F52 Größtkorn: 32 mm	Angaben lt. Formblatt 1- 1	Ergebnis der Frischbetonprüfung MV 101	Ergebnis der Frischbetonprüfung g MV 102
Mikroprozessorsteuerung	Ja	-	
Sieblinie bis 4 mm i. W. obere Hälfte AB	Ja	-	
Zement CEM II/A-M(S-L) 42,5N Retznei	230 kg/m ³		
Fluamix C Lafarge Retznei	110		
Anrechenbarer Bindemittelgehalt	276 kg/m ³		
Gesteinskörnung KK 0/3 Arge KAT 2	813 kg/m ³		
Gesteinskörnung KK 3/8 Arge KAT 2	284 kg/m ³		
Gesteinskörnung KK 8/16 Arge KAT 2	473 kg/m ³		
Gesteinskörnung KK 16/32 Arge KAT 2	321 kg/m ³		
Gesamtwasser	174 kg/m³	177 kg/m³	-
Fließmittel: Durment LZ SP11	1,19 kg/m ³		
LP-Mittel LP100	0,71 kg/m ³		
Frischbetonrohddichte lt. Formblatt 1-1	2410 kg/m³	2437 kg/m³	2546 kg/m³
W/B-Wert	0,63	0,64	
Luftgehalt (bei LP-Betonn Mindestwert für L300 bzw. Abstandsfaktor AF)	5,4 %	4,8 %	1,0 %
Konsistenz , Ausbreitmaß bei Erstprüfung	a ₁₀ = 59 cm	55 cm	-
Frischbetontemperatur	26,0 °C	23,9 °C	-
Druckfestigkeit bei Erstprüfung	44 N/mm²	-	-

Die Betonzusammensetzung erfüllt die Anforderungen für die Betonsorte C25/30/(90)IG/IS/GK22/F52 gemäß ÖNORM B 4710-1 [24] und ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ [10] sowie die Angaben gemäß Formblatt 1-1.

7.3.2 Festbetonkennwerte

7.3.2.1 Druckfestigkeit und E-Modul

Die zum Nachweis der Festigkeitsklasse an 150 mm Würfeln nach Normlagerung (ONR 23303 Tab. 2 [25]) ermittelten Druckfestigkeiten (gemäß ONR 23303, Abschnitt 9.2 [25]) und Rohdichten sind in Tabelle 12 zusammengestellt. Die Prüfung erfolgte bei lufttrockenem Oberflächenzustand des Probekörpers.

Tabelle 12: Druckfestigkeiten des Luftporenbetons MV 101

		7		28		56		90	
		Dichte	N/mm ²						
MV101	1	2437	22,6	24858	39,1	2360	40,7	2467	46,2
	2	2442	23,1	2386	36,6	2456	43,6	2373	44,7
	3	2440	22,7	2373	35,5	2378	41,6	2477	45,9
	MW	2440	22,8	2410	37,1	2400	42,0	2440	45,6
MV 102	MW	k. B.	k. B.	k. B.	k. B.	k. B.	k. B.	k. B.	47,9

k. B.: keine Beurteilung

Die ermittelte Druckfestigkeit entspricht der Anforderung (37 N/mm²) gemäß ÖNORM B 4710-1 [24] für die angegebene Druckfestigkeitsklasse bereits nach 56 Tagen (Betonsorte mit Anforderung an die Druckfestigkeit nach 90 Tagen).

Zur Beurteilung der Relevanz des Prüfergebnisses gemäß ONR 23303, Abschn. 9.2.4.4 [25] für die zu prüfende Betonsorte wurde an den Probekörpern vor der Druckfestigkeitsprüfung die Rohdichte gemäß ONR 23303, Abschn. 9.1 [25] ermittelt und mit der Frischbetonrohddichte verglichen (Tabelle 13).

Ist die Rohdichte des Probekörpers nach Luftlagerung um mehr als 70 kg/m³ leichter oder mehr als 10 kg/m³ schwerer als die Frischbeton-Rohddichte ist die Relevanz des Prüfergebnisses für den zu prüfenden Beton nicht gegeben.

Tabelle 13: Beurteilung der Relevanz der Druckfestigkeit (gemäß ONR 23303, Abschnitt 9.2.4.4 [25])

Werte lt. Frischbetonprüfung		Festbetonwerte
ρ_{FB} [kg/m ³]	A_C ¹⁾ [%]	D [kg/m ³]
2437	4,8	2400

1) Luftgehalt des Frischbetons

Die Relevanz des Prüfergebnisses ist gegeben.

In Tabelle 14 sind die ermittelten E-Module nach 7, 28, 56 und 90 Tagen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 14: E-Modul der Großkörper

	7	28	56	90
MV 101	19600	24100	26100	28800
MV 102	-	-	-	28600

7.3.2.2 Luftporenkennwerte

Aus einem Prüfwürfel wurde mit einer Steinsäge eine ca. 2 cm dicke Platte parallel zur Würfelachse geschnitten und die Schnittflächen mit einer Diamanttopfscheibe auf matten Glanz geschliffen. An der Platte wurden die Luftporenkennwerte gemäß ONR 23303, Abschnitt 9.6 [25] ermittelt (siehe Tabelle 15 und Tabelle 16).

Tabelle 15: Messergebnisse MV 101

Luftporenkennwerte		Messwerte	
Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1223	Vergrößerung:
Anzahl der Poren	[-]	312	50-fach
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	39,8	
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,19	
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	337	
Wassergehalt	[kg/m ³]	177	
Leimgehalt P	[Vol-%]	29	
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	31	
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	8,9	
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	3,25	
L300	[%]	1,66	
Abstandsfaktor	[mm]	0,19	
Rohdichte UW	[kg/m ³]	2539	
Sollwerte für Identitätsprüfung		Expositionsklasse:	XF3
Ges. Luftgehalt [Vol.-%]:	2,5 bis 5,0	Vergrößerung:	50-fach
L300 [Vol.-%] ³	0,9	Messlänge:	1
Abstandsfaktor [mm] £	--	Größtkorn:	GK 22

Porenverteilung

Durchmesser	[μm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt	[%]	0,00	0,00	0,06	0,48	0,85	1,66	2,25	2,45	2,75	3,15
Verteilung < 1mm	[%]	0	0	3	20	35	68	92	100		

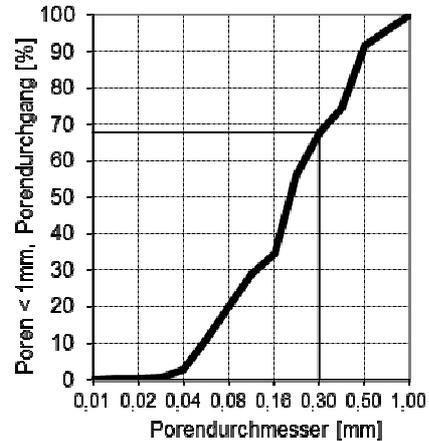
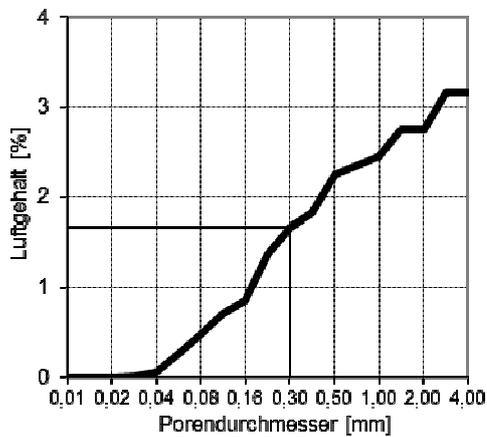


Abbildung 109 zeigt die mikroskopische Aufnahme einer repräsentativen Stelle des gemäß ONR 23303, Abschnitt 9.6.3 [25] vorbereiteten Probekörpers.

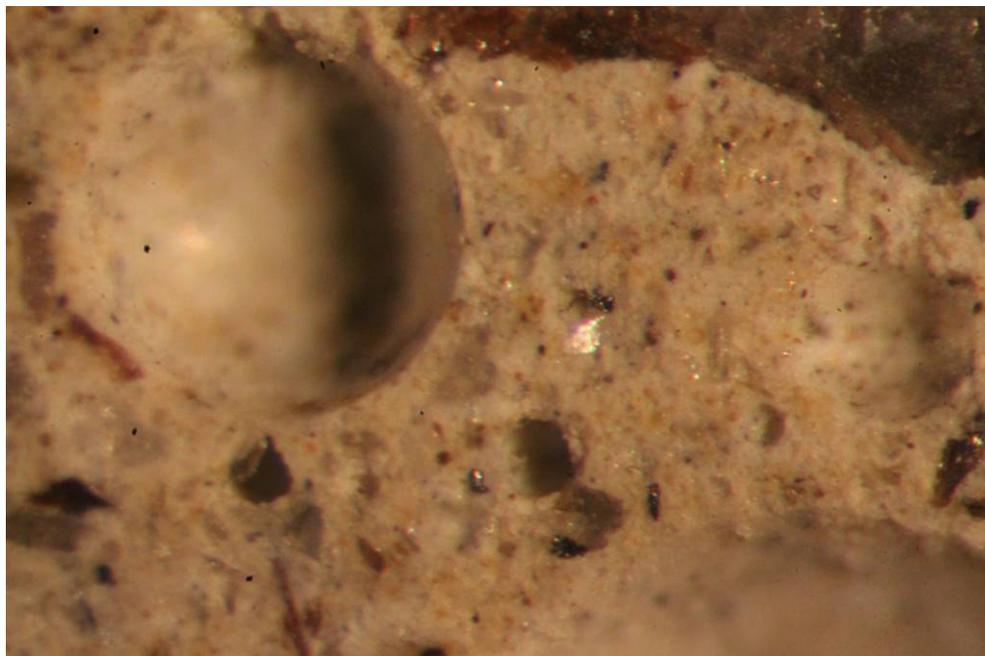


Abbildung 109: Mikroskopische Aufnahme (Vergrößerung 100-fach; Durchmesser Gesichtsfeld \approx 1,3 mm)

Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 den Anforderungen der ÖNORM B 4710-1 [24] bzw. der ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ [10] bei Identitätsprüfung gegenübergestellt.

Tabelle 16: Luftporenkennwerte bestimmt nach ONR 23303:2010, Abschnitt 9.6

Prüfdatum	Ergebnis gemessen			Anforderung ^{1), 2)}	
	L [%]	AF [mm]	L300 [%]	AF [mm]	L300 [%]
03.11.2016	3,3	-	1,7	-	≥ 1,0

1) Die für die Beständigkeit erforderlichen Werte gemäß ÖNORM B 4710-1:2007, Tabelle NAD 10 (Identitätskriterien) betragen für die Erstprüfung bei XF2: L300 = 1,0 %, XF3: L300 = 1,0 % und für XF4: L300 = 1,8 % und AF 0,18 mm. Gemäß ÖNORM B 4710-1: 2007, Anhang B und Tab. 17 ergeben sich die für die Identitätsprüfungen gültigen Anforderungen.

Die Anforderungen für die Identitätsprüfung der ÖBV Richtlinie „Innenschalenbeton“ für die Betonsorte IG sind L300 ≥ 1,0 %.

2) Werte für die halbe Messlänge (1200 mm)

Der ermittelte Luftporenkennwert L300 entspricht nicht der Anforderung an die Betonsorte C25/30/(90)/IG/IS/GK22/F52 gemäß ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ [10] und ÖNORM B 4710-1 [24]. In Tabelle 17 und Tabelle 18 sind die relevanten Prüfergebnisse der Luftporen von MV 102 dargestellt.

Tabelle 17: Messergebnisse MV 102

Luftporenkennwerte

		Messwerte	
Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1325	Vergrößerung: 50-fach
Anzahl der Poren	[-]	61	
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	19,9	
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,49	
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	337	
Wassergehalt	[kg/m ³]	177	
Leimgehalt P	[Vol.-%]	29	
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	12	
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	19,2	
Gesamtluftgehalt	[Vol.-%]	1,50	
L300	[%]	0,24	
Abstandsfaktor	[mm]	0,69	

Rohdichte UW [kg/m³] 2513

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol.-%]:	2,5 bis 5,0
L300 [Vol.-%] ≥	0,9
Abstandsfaktor [mm] ≤	--

Expositionsklasse: XF3

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1
Größtkorn: GK 22

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,01	0,08	0,13	0,24	0,32	0,51	1,31	1,52
Verteilung < 1mm [%]	0	0	2	15	27	47	62	100		

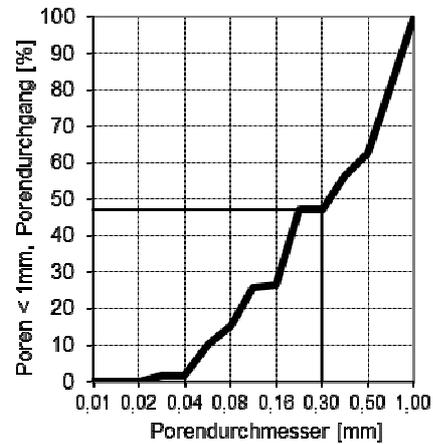
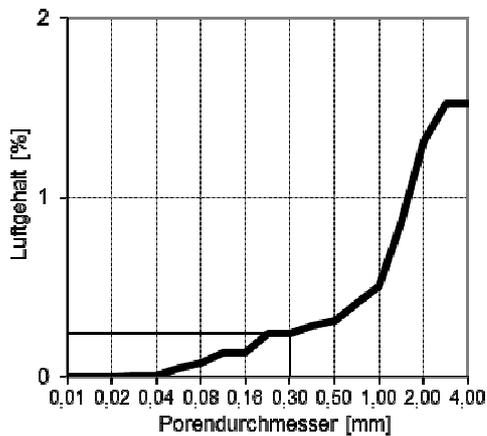


Abbildung 110 zeigt die mikroskopische Aufnahme einer repräsentativen Stelle des gemäß ONR 23303, Abschnitt 9.6.3 [25] vorbereiteten Probekörpers.

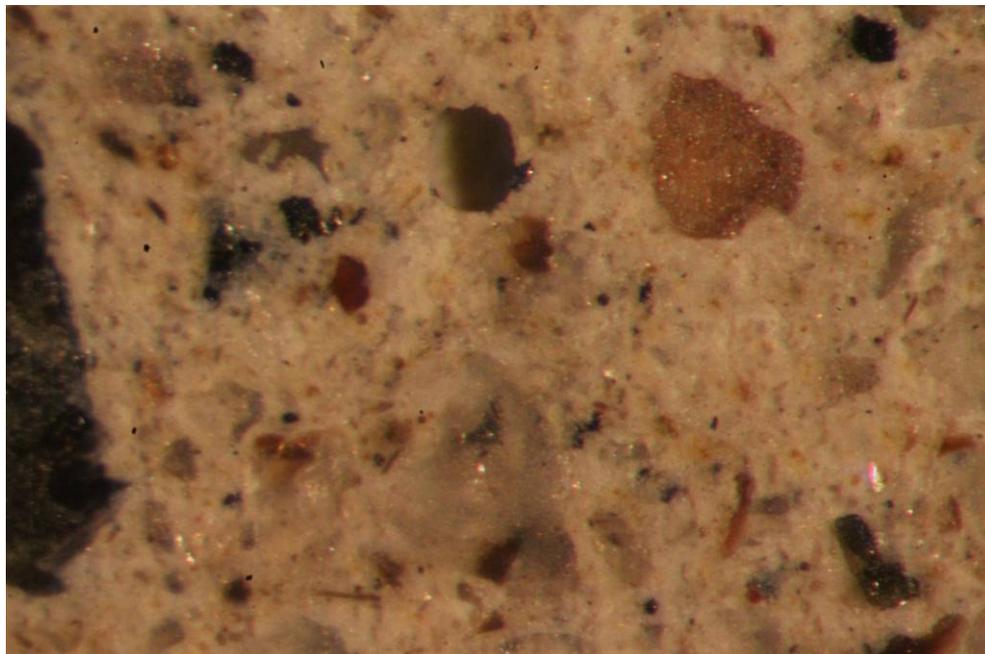


Abbildung 110: Mikroskopische Aufnahme (Vergrößerung 100-fach; Durchmesser Gesichtsfeld \approx 1,3 mm)

Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 den Anforderungen der ÖNORM B 4710-1 [24] bzw. der ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ [10] bei Identitätsprüfung gegenübergestellt.

Tabelle 18: Luftporenkennwerte bestimmt nach ONR 23303:2010, Abschnitt 9.6

Prüfdatum	Ergebnis gemessen			Anforderung ^{1), 2)}	
	L [%]	AF [mm]	L300 [%]	AF [mm]	L300 [%]
03.11.2016	1,5	-	0,2	-	≥ 1,0

3) Die für die Beständigkeit erforderlichen Werte gemäß ÖNORM B 4710-1:2007, Tabelle NAD 10 (Identitätskriterien) betragen für die Erstprüfung bei XF2: L300 = 1,0 %, XF3: L300 = 1,0 % und für XF4: L300 = 1,8 % und AF 0,18 mm. Gemäß ÖNORM B 4710-1: 2007, Anhang B und Tab. 17 ergeben sich die für die Identitätsprüfungen gültigen Anforderungen.

Die Anforderungen für die Identitätsprüfung der ÖBV Richtlinie „Innenschalenbeton“ für die Betonsorte IG sind L300 ≥ 1,0 %.

4) Werte für die halbe Messlänge (1200 mm)

Der ermittelte Luftporenkennwert L300 unterschreitet die Anforderung an die Betonsorte C25/30/(90)/IG/IS/GK22/F52 gemäß ÖNORM B 4710-1 [24] (L300 ≥ 1,0 %) und ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ [10] (L300 ≥ 1,0 %), erfüllt jedoch gemäß ÖNORM B 23301 [26] die anzuwendenden Identitätskriterien (L300 ≥ 0,7 %).

7.3.2.3 Wassereindringtiefe

Die Prüfung der Wassereindringtiefe wurde gemäß ONR 23303, Abschnitt 9.8 [25] an Platten 200/200/120 mm nach Normlagerung (ONR 23303, Tab. 2 [25]) durchgeführt. Das Probealter am Prüfbeginn betrug 90 Tage. Der Wasserdruck wurde von unten auf die Oberfläche des Probekörpers aufgebracht (entgegen der Betonierichtung). Die Wassereindringtiefe ist in Tabelle 19 und Tabelle 20 zusammengestellt.

Tabelle 19: Wassereindringtiefe MV101

Wassereindringtiefe [mm]		Anforderung gemäß ÖNORM B 4710-1 [mm]
EW	MW	
11,3; 9,2; 4,5	8,3	≤ 50

Tabelle 20: Wassereindringtiefe MV102

Wassereindringtiefe [mm]		Anforderung gemäß ÖNORM B 4710-1 [mm]
EW	MW	
10,0; 11,7; 5,5	9,1	≤ 50

Die ermittelte Wassereindringtiefe entspricht der Anforderung an die Betonsorte C25/30/IG/IS/GK22/F52 und entspricht dem Nachweis am erhärteten Beton gemäß ÖNORM B 4710-1 [24].

7.3.2.4 Prüfung der Beständigkeit gegenüber Frost-Tau-Wechsel XF3

Die gleichwertige Beständigkeit für die Frostklasse XF3 wurde gemäß ONR 23303, Abschnitt 9.10 [25] an Prismen 100/100/400 mm nach Normlagerung (ONR 23303, Tab. 2 [25]) sowie gemäß ÖBV-Richtlinie Innenschalenbeton nach ONR 23303 Abschnitt 9.7 [25] (Abfall des statischen E-Moduls) ermittelt.

7.3.2.4.1 Prüfung der Schalllaufzeit (ONR 23303 Abschn. 9.10)

Die Zusammensetzung des Vergleichsbetons erfolgte unter Berücksichtigung der Vorgaben der ONR 23303 [25].

Das Prüfverfahren basiert auf dem Vergleich des Verhaltens (Masseänderung und Schalllaufzeit) unter Frost-Tau-Beanspruchung des zu untersuchenden Betons mit einem definierten Nullbeton.

Die Zusammensetzung des Nullbetons (ohne Zusatzmittel außer Luftporenmittel) gemäß ONR 23303 ist in Tabelle 21 angegeben.

Tabelle 21: Zusammensetzung des Nullbetons (Vergleichsbeton) XF3

Nullbeton XF3 (Vergleichsbeton)	Anforderung ONR 23303	Einwaagen und Messwerte (Ist-Werte)
Zement:	CEM II/A	330 kg/m ³
Gesteinskörnung:	GK 22; F1 oder F2	1842 kg/m ³
W/B-Wert:	0,55	0,55
Ausbreitmaß:	(38 ± 2) cm	40 cm
Luftgehalt (Frischbeton):	2,5 % - 5,0 %	3,3 %
L300:	≥ 1,0 %	1,0 %
Frischbetonrohddichte:	-	2376 kg/m ³

Die Zusammensetzung des Prüfbetons ist in

Tabelle 11 angegeben.

In Tabelle 22 ist die Wasserabgabe (Massenänderung) der Betonprismen zwischen dem 1. und dem 7. Tag der Lagerung (in Plastikfolie verpackt) dargestellt.

Tabelle 22: Wasserabgabe zwischen 1. und 7. Tag der Lagerung in % der Masse

Nullbeton				Prüfbeton			
EW	EW	EW	MW	EW	EW	EW	MW
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

In Tabelle 23 ist die Wasseraufnahme (Massenänderung) der Betonprismen zwischen dem 7. und dem 28. Tag der Lagerung (Unterwasserlagerung) dargestellt.

Tabelle 23: Wasseraufnahme zwischen 7. und 28. Tag der Lagerung in % der Masse

Nullbeton				Prüfbeton			
EW	EW	EW	MW	EW	EW	EW	MW
0,9	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0

Die Änderung von Masse und Schalllaufzeit des Nullbetons nach 14, 28, 42 und 56 Frost-Tau-Wechseln ist in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Änderung von Masse und Schalllaufzeit des Nullbetons durch Frost-Tau-Wechsel

Anzahl FT- Wechsel	Masse			Schalllaufzeit		
	[g] EW	MW	[%] Änderung	[μs] EW	MW	[%] Änderung
0	8593, 8608, 8624	8608	0,0	75,4; 73,8; 72,5	73,9	0,0
14	8592, 8602, 8621	8605	0,0	75,2; 73,8; 72,7	73,9	0,0
28	8587, 8599, 8616	8600	- 0,1	75,4; 74,0; 73,0	74,1	0,3
42	8575, 8596, 8615	8595	- 0,2	75,3; 74,1; 73,0	74,1	0,3
56	8571, 8594,	8593	- 0,2	75,5; 74,0; 72,8	74,1	0,3

	8614					
--	------	--	--	--	--	--

Die Änderung von Masse und Schalllaufzeit des Prüfbetons MV101 und MV 102 nach 14, 28, 42 und 56 Frost-Tau-Wechseln ist in Tabelle 25 bzw. Tabelle 26 dargestellt. Der zu untersuchende Beton hat mit dem Nullbeton eine gleichwertige Beständigkeit für die Frostklasse XF3, wenn dessen Änderung der Schalllaufzeit nach 56 Frost-Tau-Wechseln um maximal 5 Prozentpunkte größer als jene des Nullbetons ist bzw. wenn die Abnahme der Resonanzfrequenz in Prozent um maximal 5 Prozentpunkte größer als jene des Nullbetons ist.

Tabelle 25: Änderung von Masse und Schalllaufzeit des Prüfbetons MV 101 durch Frost-Tau-Wechsel

Anzahl FT-Wechsel	Masse			Schalllaufzeit			
	[g]		[%]	[μs]		[%]	
	EW	MW	Änd.	EW	MW	Änd.	Abw. vom Nullbeton
0	8800; 8944; 8934	8893	0	73,7; 73,5; 72,8	73,3	0	/
28	8785; 8932; 8916	8878	-0,2	78,0; 76,8; 77,3	77,4	5,6	
56	8783; 8929; 8912	8875	-0,2	78,8; 77,7; 77,8	78,1	6,5	

Der Prüfbeton MV 101 erfüllt nicht die Anforderungen für eine gleichwertige Beständigkeit mit dem Nullbeton für die Frostklasse XF3.

Tabelle 26: Änderung von Masse und Schalllaufzeit des Prüfbetons MV 102 durch Frost-Tau-Wechsel

Anzahl FT-Wechsel	Masse			Schalllaufzeit			
	[g]		[%]	[μs]		[%]	
	EW	MW	Änd.	EW	MW	Änd.	Abw. vom Nullbeton
0	9114; 9110; 9095	9106	0,0	74,5; 73,9; 74,1	74,2	0,0	/
28	9112; 9109; 9092	9104	0,0	79,3; 78,2; 79,0	78,8	6,2	
56	9113; 9109; 9093	9105	0,0	79,8; 78,6; 79,3	79,2	6,7	

Der Prüfbeton MV 102 erfüllt nicht die Anforderungen für eine gleichwertige Beständigkeit mit dem Nullbeton für die Frostklasse XF3.

7.3.2.4.2 Prüfung des Abfalls des E-Moduls (ONR 23303 Abschn. 9.7 [25])

Gemäß ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ [10] erfolgt der Nachweis der Expositionsklasse XF3 mittels statischen E-Moduls. Der E-Modul wird vor der Frostlagerung, nach 28 und 56 Frost-Tau-Wechsel gemäß ONR 23303 Pkt. 9.7 [25] ermittelt. Der Abfall des E-Moduls ist in ganzen Prozentpunkten anzugeben und darf nach 28 Frost-Tauwechsel $\leq 5\%$ und nach 56 Frost-Tauwechsel $\leq 25\%$ betragen. Die Ergebnisse der Prüfung von MV 101 und MV 102 sind in Tabelle 27 und Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 27: Änderung des E-Modul des Prüfbetons MV 101 durch Frost-Tau-Wechsel

Anzahl FT-Wechsel	E-Modul		
	[N/mm ²]		[%]
	EW	MW	Änd.
0	25600; 27200; 27500	27000	0,0
28	23800; 24400; 24700	24500	-9,3
56	24400; 24900; 25500	25000	-7,4

MV101 erfüllt die Anforderung gemäß ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ [10] für den Abfall des E-Moduls nach 56 Frost-Tauwechsel (Abfall des statischen E-Moduls $\leq 25\%$).

Tabelle 28: Änderung des E-Modul des Prüfbetons MV 102 durch Frost-Tau-Wechsel

Anzahl FT-Wechsel	E-Modul		
	[N/mm ²]		[%]
	EW	MW	Änd.
0	27700; 27700; 28700;	27700	0,0
28	24200; 23800; 24600;	24000	-13,4
56	24100; 22800; 24800	24000	-13,4

MV102 erfüllt die Anforderung gemäß ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ [10] für den Abfall des E-Moduls nach 56 Frost-Tauwechsel (Abfall des statischen E-Moduls $\leq 25\%$).

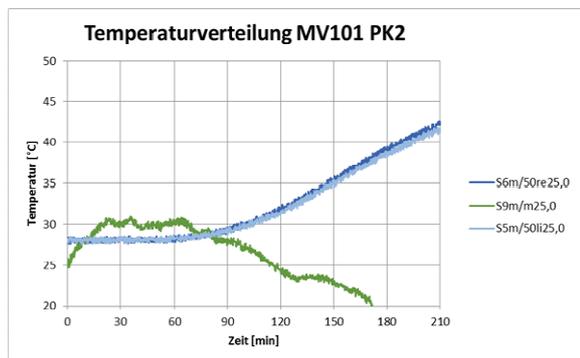
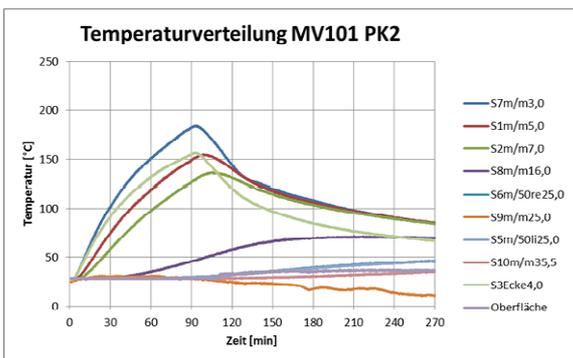
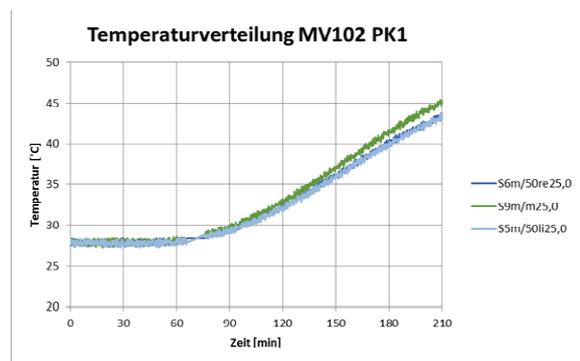
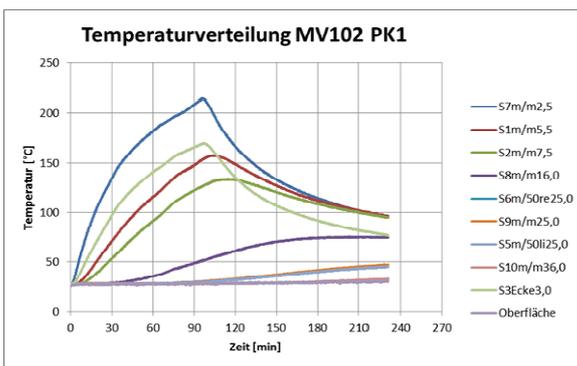
7.4 Ergebnis und Beurteilung

7.4.1 Ergebnisse der Prüfung von Großkörpern bei einer Temperaturbelastung von 450°C

Die Ergebnisse der Brandversuche sind in folgender Reihung in Diagrammen zusammengefasst:

- Temperaturverteilung im Probekörper
- Visuelle Beurteilung des Abplatzverhaltens an der Brandoberfläche
- Porosität nach den Brandversuchen.

In den nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 111) ist die Temperaturverteilung in den einzelnen Probekörpern dargestellt



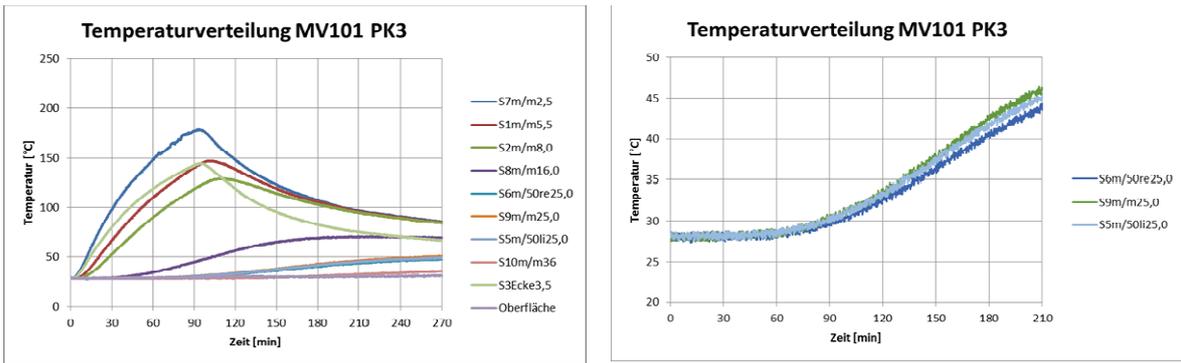


Abbildung 111: Temperaturverteilung im Probekörper

Die Temperaturverteilung im Probekörper erscheint gemäß der Lage der Fühler plausibel. Dabei werden Temperaturen > 100 °C bis in eine Tiefe von 8 cm erreicht. Bei Probekörper PK1 (1,5 Vol.-% Luftgehalt) steigt dabei die Temperatur oberflächennah (Tiefe 2,5 cm) über 200 °C, bei den anderen Probekörpern (3,3 Vol.-% Luftgehalt) steigt die Temperatur in dieser Tiefenstufe nur bis 180 bzw. 190 °C. Die stärkste Erhitzung zeigen die Probekörper in der Körpermitte (vgl. Fühler S3 und S7), zum Rand hin fallen die Temperaturen.

Es konnten nach den Versuchen an keinem Probekörper Abplatzungen festgestellt werden (Abbildung 112).

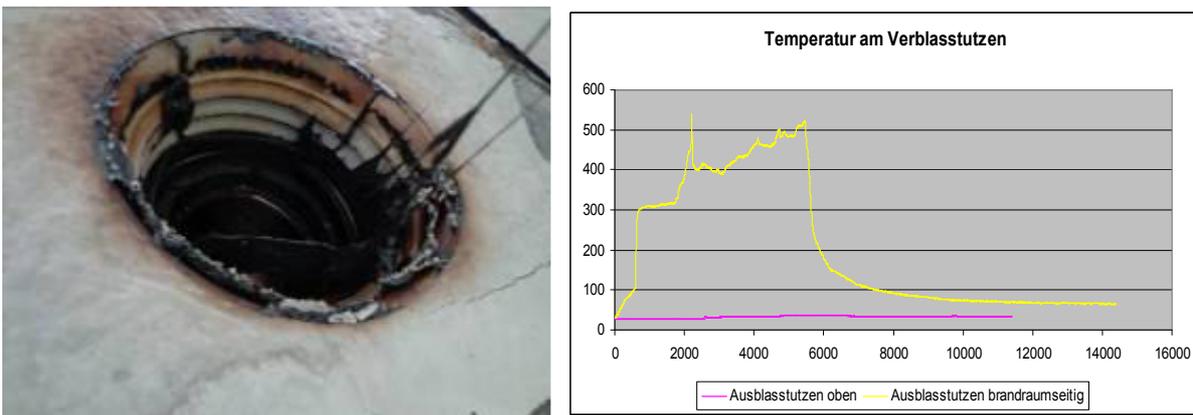


Abbildung 112: links: Probekörperunterseite mit Verblasstutzen nach dem Brandversuch; rechts Temperaturverteilung am Verblasstutzen

Die Deckel der Verblasstutzen halten in etwa 10 Minuten, danach steigt die Temperatur im Verblasstutzen stark an. Der Fühler im unteren Bereich des Stutzens zeigt hier einen steilen Temperaturstieg.

7.4.2 Optische Beurteilung

Um eventuelle Schäden an der Probekörperunterseite zu beurteilen, wurden die Großkörper nach dem Brandversuch und einer Abkühlphase von mehreren Tagen aufgestellt. Die Beurteilung erfolgte durch augenscheinliche Begutachtung der Probekörperunterseite und Prüfung der Probekörper durch Hammerschlag. Aufgrund des Tons des Hammerschlags konnten Hohlstellen bzw. beginnende Ablöseerscheinungen erkannt und lokalisiert werden. Wenn ein selbstständiges Abfallen des Betons von der Decke nicht möglich erschien, wurde der Beton belassen und als schadensfrei beurteilt. Der Zustand des Probekörpers PK2 M V101 ist in Abbildung 113 dargestellt und beschrieben. Generell konnten keine Fehlstellen bzw. Risse bei PK2 MV 101 festgestellt werden.



Abbildung 113: PK2 MV 101, Probekörper nach dem Brandversuch.

Probekörper 2 MV 101 zeigt keine offensichtlichen Fehlstellen oder Risse. Bei den scheinbaren Rissen im unteren Drittel des Probekörpers handelt es sich um geschmolzene Kunststoffäden vom Einblasstutzen. Durch Prüfung mit Hammerschlag konnten ebenfalls keine Fehlstellen gefunden werden. Prüfung der Abreißfestigkeit im

Bereich des Einblasstutzens sowie zentral, die Entnahme der Proben für die Prüfung der Zementsteinporosimetrie im Bereich rechts davon. Ablösen (umlaufender Riss im Bereich des Übergangs von der Schalung zum Beton) des Zementleims, der bei der Herstellung die Schalung unterlaufen hat.

Der Zustand des PK3 MV101 Probekörpers ist in dargestellt und beschrieben. Generell konnten keine Fehlstellen bzw. Risse festgestellt werden.



Abbildung 114: PK3 MV 101, Probekörper nach dem Brandversuch.

Probekörper PK 3 MV 101 zeigt keine offensichtlichen Fehlstellen oder größere Risse. Bei den scheinbaren Rissen im oberen Drittel des Probekörpers handelt es sich um Abdrücke von Falten der Plane, die bei der Herstellung unter den Probekörpern gelegen ist. Durch Prüfung mit Hammerschlag konnten ebenfalls keine Fehlstellen gefunden werden. Die Prüfung der Abreißfestigkeit erfolgte im Bereich des Einblasstutzens sowie zentral, die Entnahme der Proben für die Prüfung der Zementsteinporosimetrie im linken unteren Bereich. Im oberen Bereich löste sich der Beton durch das Ablösen des Zementleims von der Schalung, der bei der Herstellung die Schalung unterlaufen hat (umlaufender Riss im Bereich des Übergangs von der Schalung zum Beton).

Feine Risse sowie die Ablösung im oberen Bereich des Zementsteins sind in Abbildung 115 abgebildet.



Abbildung 115: links: feine Risse an der Oberfläche des Beton. Rechts: Ablösungen des randlich unterlaufenen Zementsteins bis etwa 1 cm Tiefe.

PK1 MV102 ist in Abbildung 116 abgebildet. Auch hier konnte trotz geringeren Luftgehalts kein Schaden durch den Brandversuch festgestellt werden.



Abbildung 116: PK1 MV 102, Probekörper nach dem Brandversuch.

Probekörper PK 1 MV 102 zeigt keine offensichtlichen Fehlstellen oder größere Risse. Die scheinbaren Risse auf halber Höhe des Probekörpers sind erneut Abdrücke von Falten der Plane, die bei der Herstellung unter den Probekörpern gelegen ist. Durch Prüfung mit

Hammerschlag konnten ebenfalls keine Fehlstellen gefunden werden. Die Prüfung der Abreißfestigkeit erfolgte im Bereich des Einblasstutzens sowie zentral, die stark verrußten Flächen wurden zu diesem Zweck gereinigt. Die Entnahme der Proben für die Prüfung der Zementsteinporosimetrie erfolgte in der unteren Probekörperhälfte. Im unteren Bereich löste sich erneut Beton durch das Ablösen des Zementleims, der bei der Herstellung die Schalung unterlaufen hat (umlaufender Riss im Bereich des Übergangs von der Schalung zum Beton).

Beim Brandversuch von PK1 MV102 kam es offensichtlich zu stärkerer Rußentwicklung durch abbrennen des Einblasstutzens als bei den beiden anderen Probekörpern. Die ungesäuberte Oberfläche ist in Abbildung 117 abgebildet

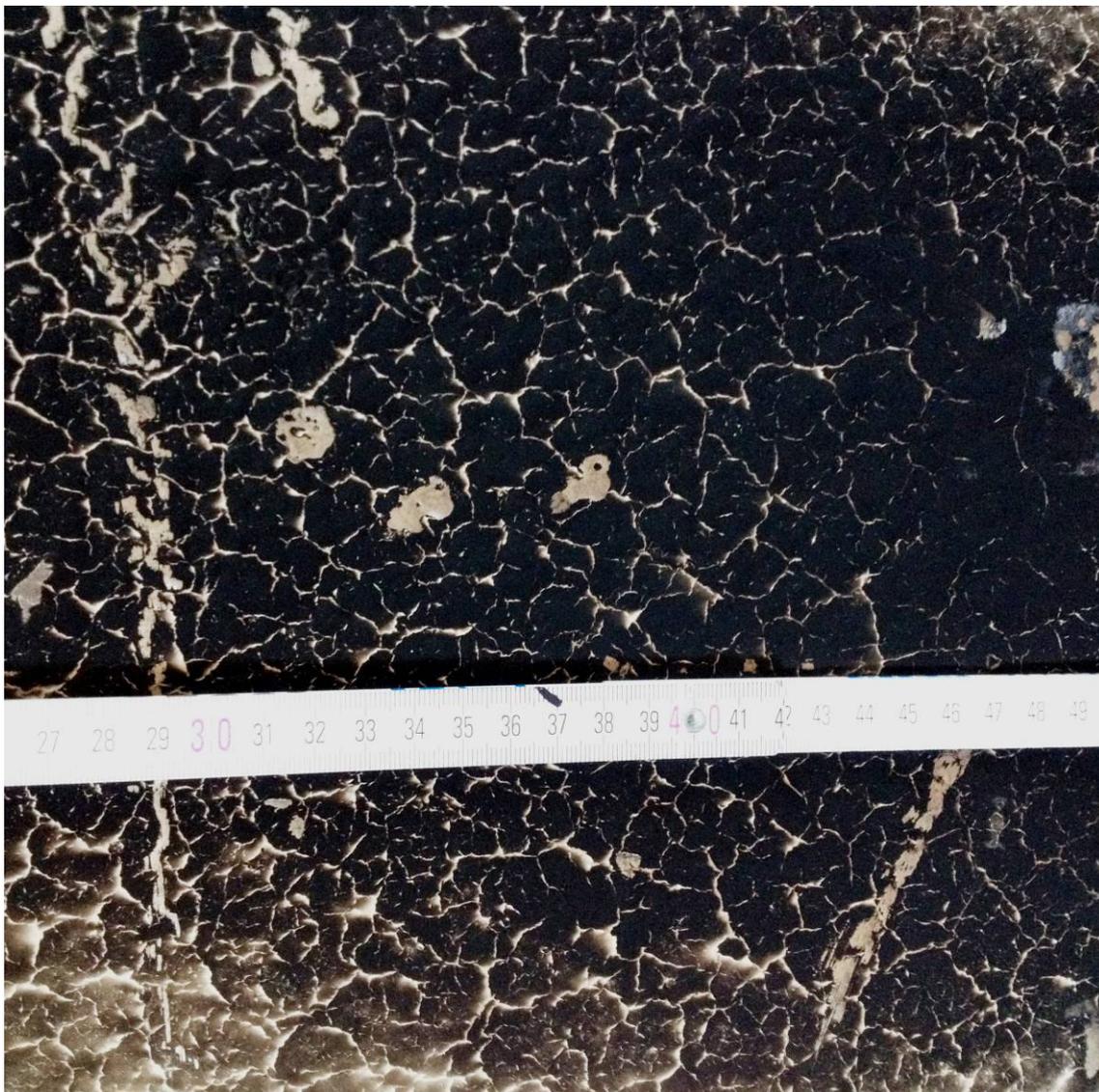


Abbildung 117: Rissbild an der verrußten Oberfläche bei PK1 MV 102.

Das Rissbild des Probekörpers lässt aufgrund der unverrußten, hellen Rissflanken vermuten, dass die Rissbildung erst nach dem Brandversuch im Zuge der Probekörperabkühlung erfolgte.

7.4.3 Prüfung der Abreißfestigkeiten vor und nach dem Brandversuch

Um eine nicht augenscheinliche Schädigung des Betons an der Oberfläche zu überprüfen, wurde vor und nach dem Brandversuch die Abreißfestigkeit der Betonoberfläche geprüft. Die Prüfung der Abreißfestigkeit erfolgte gemäß ÖNORM EN 1542 [20]. Dafür wurde mit einem Kernbohrgerät (Innendurchmesser 50 mm, Trockenbohrung) bis in eine Tiefe von 15 mm in den Betonuntergrund gebohrt. Nach Reinigung der Prüfflächen mit einer Bürste wurden Stahlstempel (Durchmesser 50 mm) mit einem Zweikomponentenkleber auf den Beton geklebt. Nach der Aushärtezeit erfolgte die Bestimmung der Abreißfestigkeit durch zentrisches Abziehen des Stahlstempels unter konstanter Belastungsgeschwindigkeit ($0,05 \pm 0,01$) MPa/s, siehe Abbildung 118).



Abbildung 118: Prüfung der Abreißfestigkeit durch zentrisches Abziehen eines geklebten Stahlstempels von einer durch eine ringförmige Bohrung begrenzten Betonoberfläche.

Die Ergebnisse der Prüfung der Abreißfestigkeit sind in Tabelle 29 dargestellt.

Tabelle 29: Ermittelte Abreißfestigkeiten des Betons

Bereich	Prüf- stell e	Bruchlast EW [kN]	Durchmesser MW [mm]	Abreißfestigkeit [N/mm ²]		Versagens- art ¹
				EW	MW	
PK 2 MV101 vor Brandversuch	1	3,20	50,0	1,63	1,4	A/Y
	2	1,63	50,0	0,83		A/Y
	3	3,34	50,0	1,70		A/Y
PK 2 MV101 nach Brandversuch	1	5,01	50,0	2,55	2,0	Y
	2	3,32	50,0	1,69		A/Y
	3	3,50	50,0	1,78		A/Y
PK 3 MV101 vor Brandversuch	1	3,17	50,0	1,61	2,1	A/Y
	2	5,59	50,0	2,85		A/Y
	3	3,43	50,0	1,75		Y
PK 3 MV101 nach Brandversuch	1	3,69	50,0	1,88	1,6	A/Y
	2	2,54	50,0	1,29		A/Y
	3	2,05	50,0	1,55		A/Y
PK 1 MV102 vor Brandversuch	1	3,15	50,0	1,60	1,5	A/Y
	2	3,91	50,0	1,99		A/Y
	3	1,70	50,0	0,87		A/Y
PK 1 MV102 nach Brandversuch	1	3,22	50,0	1,64	1,6	A/Y
	2	3,56	50,0	1,81		A/Y
	3	2,70	50,0	1,38		A/Y

¹Anmerkung zu Tabelle 29:

Die Versagensart des Prüfkörpers ist durch visuellen Nachweis zu bestimmen. Es gibt folgende Versagensarten:

A: Kohäsionsversagen des Betons

Y: Kohäsionsversagen in der Klebeschicht

Beurteilung

Gemäß ÖBV Merkblatt „Tunnelbeschichtung“ [21] besteht eine Mindestanforderung von 1,5 MPa an den Mittelwert (bei EW \geq 1,0 MPa) der Abreißfestigkeit des Untergrundes bei der Applikation von Tunnelbeschichtungen. Weiter Anforderung existieren nicht. Die ermittelten Abreißfestigkeiten des Betonuntergrundes entsprechen größtenteils den Mindestanforderungen gemäß [21] (\geq 1,5 MPa). Der Prüfwert 2 von PK 2 und 3 von PK 1 wird dabei als Ausreißer betrachtet. In

Abbildung 119 sind die geprüften Abreißfestigkeiten vor und nach dem Brandversuch dargestellt.

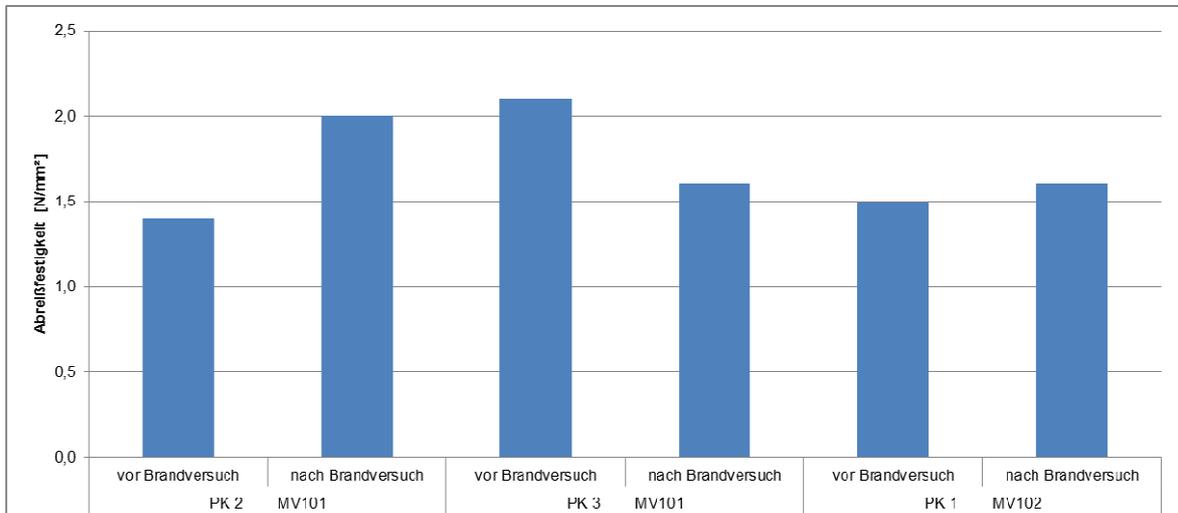


Abbildung 119: Abreißfestigkeiten vor und nach dem Brandversuch an Großkörper

Generell schwanken die Abreißfestigkeiten aufgrund vieler unterschiedlicher Einflüsse auf die Oberfläche des Betons stark. Auch in diesem Fall treten Unterschiede von 0,5 N/mm² auf. Es lässt sich jedoch kein Trend in der Verteilung der Abreißfestigkeiten ablesen. Bei Probekörper 2 MV 101 sind nach dem Brandversuch die Abreißfestigkeiten sogar höher als vor dem Brandversuch (2,0 gegenüber 1,5 N/mm²). Bei Probekörper 3 MV 101 verhält es sich genau gegenteilig (2,1 gegenüber 1,6 N/mm²). Bei Probekörper 1 MV 101 sind die geprüften Abreißfestigkeiten gleichwertig.

7.4.4 Bestimmung der Porosität des Zementsteins vor und nach dem Brandversuch

Die Bestimmung der Porenvolumenverteilung durch Quecksilberintrusion erfolgte in Anlehnung an DIN 66133 [28]. Eine genaue Verfahrensbeschreibung ist in Kapitel 6.18 angeführt. Die ermittelten Porositäten des Zementsteins der Großprobekörper ist in Abbildung 120 dargestellt.

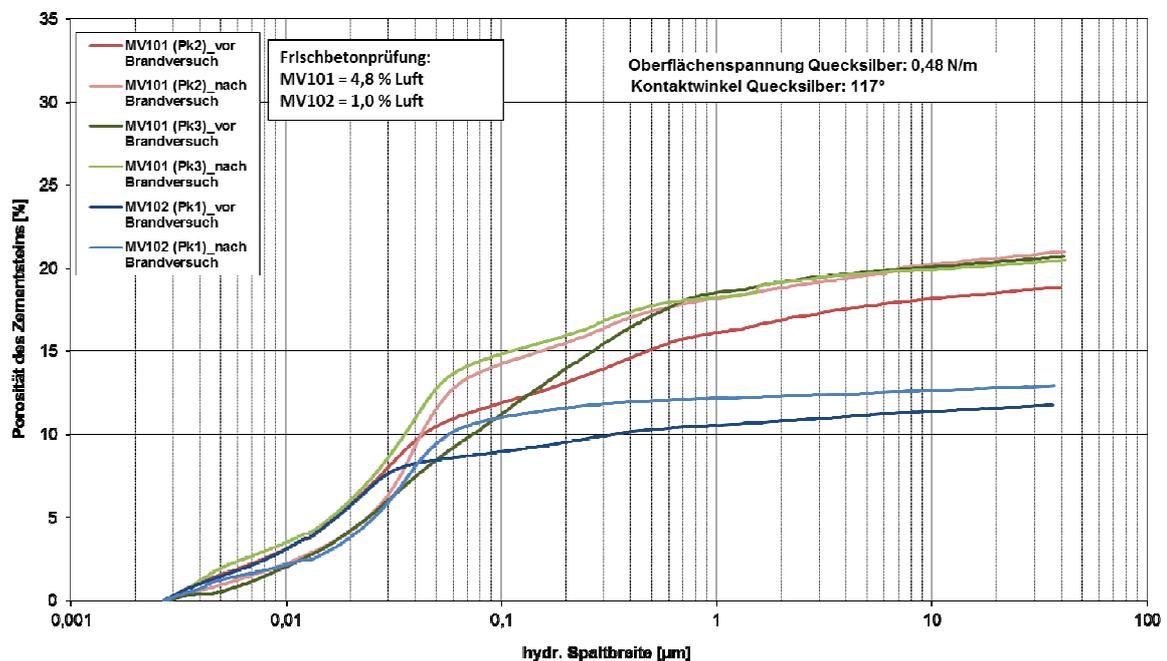


Abbildung 120: Hydraulische Spaltbreitenverteilung [µm] vor und nach dem Brandversuch

In Abbildung 120 können 2 Probekörperarten unterschieden werden. MV 101 wurde mit einem Luftgehalt gemäß Frischbetonprüfung von 4,8 % hergestellt. MV 102 wurde durch Zugabe eines Entschäumers mit 1,0 % Luft gemäß Frischbetonprüfung hergestellt. Bei PK2 MV 101 und PK1 MV 102 tritt eine Erhöhung der Gesamt-Porosität nach dem Brandversuch von 2,2 bzw. 1,2 % auf. Bei PK3 MV 101 bleibt die Gesamt-Porosität vor und nach dem Brandversuch in etwa vergleichbar. Unterhalb von 1 µm Porendurchmesser ist jedoch eine Steigerung der Porosität zu erkennen.

8 GRUNDLAGEN DER MODELLRECHNUNGEN, SIMULATION – AP 7

In diesem AP werden zwei Schwerpunkte bearbeitet. Ein Schwerpunkt setzt sich in der Erarbeitung von Grundlagen und Festlegungen für Simulationen zur Ermittlung von erwarteter thermischer Belastung von Bauteilen bei Brandfällen in Tunneln auseinander. Ein zweiter Schwerpunkt wird in Bezug auf die Simulation der thermischen Eigenschaften der Baustoffe im Zusammenhang mit LOTS gelegt. Zusammengestellt werden Brandszenarien und Bemessungsbrände im Zusammenhang mit Tunnelbränden (Schwerpunkt 1) und Materialkennwerte aus den untersuchten Materialien (Schwerpunkt 2).

8.1 Festlegung von Brandszenarien, Bemessungsbränden und Modellen zur Ermittlung der thermischen Belastungen, die zu LOTS führen können

8.1.1 Grundlagen

Zur Festlegung der für die thermische Belastung in Tunnelbauwerken ist es wesentlich, dass verwendeten Terminologien definiert sind. In den nationalen und internationalen Normen und Literaturstellen werden grundsätzlich ähnliche Begriffe in Bezug auf solche brandschutztechnischen Fragen verwendet. Die Grundlagen dieser Begriffe bilden meist die englische Literatur. Durch Übersetzung sind jedoch in den deutschsprachigen Unterlagen manchmal leicht divergierenden Terminologien zu finden. Ausgehend von international angewandten englischen Bezeichnungen fasst die Tabelle 30 einige Begriffe zusammen, wie sie in der ÖNORM EN 1991-1-2 (2003) und der DIN EN ISO 13943 (2011) verwendet werden.

Tabelle 30: Terminologie und Beschreibung wichtiger Begriffe des Brandschutzes [sim0003]

Begriffe/ Terminologie			Beschreibung
Internationale Bezeichnungen	ÖNORM EN 1991-1-2 (2003)	DIN EN ISO 13943 (2011)	
Fire scenario	Brandfall (Brandszenario)	Brandszenario	qualitative Beschreibung des Brandverlaufs mit Zeitangaben für Schlüsselereignisse, die den untersuchten Brand charakterisieren und von anderen möglichen Bränden unterscheidet
Design fire scenario	Bemessungsbrandfall	Bemessungsbrandszenario	Bestimmter/s Brandfall/Brandszenario, für das eine deterministische brandschutztechnische Untersuchung/die Berechnung durchgeführt wird.
Design Fire	Bemessungsbrand	Bemessungsbrand	Quantitative Beschreibung der angenommenen Eigenschaften eines Brands innerhalb des Bemessungsbrandszenarios/ Bemessungsbrandfalles. Definierter Brandverlauf, der bei der Brandschutzbemessung zu Grunde gelegt wird.

Es ist zu erkennen, dass bereits bei diesen beiden Normen keine durchgehende und einheitliche Terminologie zur Anwendung kommt. Im vorliegenden Forschungsbericht werden in weitere Folge die Begriffe aus der DIN EN ISO 13943 (2011) verwendet.

Für die gegenständliche Betrachtung ist vor allem eine genaue Definition des Brandszenariums erforderlich. Im Kontext mit der gegenständlichen Darstellung wird das Brandszenarium als eine Beschreibung eines brandschutztechnischen Sachverhalts in qualitativer Art und Weise unter spezieller Berücksichtigung der in diesem Sachverhalt möglicherweise auftretenden Brände verstanden. D.h. bei der Festlegung eines Brandszenariums sind beispielsweise die Konstruktion des Tunnels, die Ventilation (im speziellen Maßnahmen zur Entrauchung, vorgesehenen Maßnahmen zur Brandunterdrückung (Sprinkler, Löschanlagen etc.) und mögliche „Brandquellen“ (bspw. PKW, LKW, Reisezugwagons, Güterzug, ...) zu berücksichtigen.

Die **Abbildung 121** zeigt einen Überblick der Zusammenhänge zwischen einem Brandszenario, einem Bemessungsbrandszenario und Bemessungsbrand (vgl. auch Beschreibungen Tabelle 30). In der Realität können grundsätzlich die verschiedensten Brände vorkommen, d.h. n Brandszenarien. Diese Brände bzw. Brandszenarien sind abhängig von den vorhandenen Zündquellen und Brandlasten. Je nach Betrachtungsobjekt (Straßentunnel, Eisenbahntunnel) können unterschiedliche Brandquellen (besser Objekte) vorhanden sein, welche im Brandszenario definiert werden müssen. Aus diesen n-Brandszenarien ist dann jenes Brandszenario zu ermitteln welches einer brandschutztechnischen Betrachtung, Bemessung zugrunde zu legen ist. Dieses bemessungsrelevante Brandszenario (Bemessungsbrandszenario) wird in der Regel über eine Brandrisikobeurteilung festgelegt. [sim0003]

Brandszenarien und das Bemessungsbrandszenarium weisen in der Regel noch einen hohen Abstraktionsgrad auf. Durch eine Quantifizierung des Bemessungsbrandszenariums kann dann ein Bemessungsbrand genau definiert werden. Diesbezüglich stellen normative Bemessungsbrände einem Sonderfall dar. Sie ergeben sich aus Brandszenarien für die bereits die Risikobetrachtung und eine Quantifizierung vorgenommen wurden.

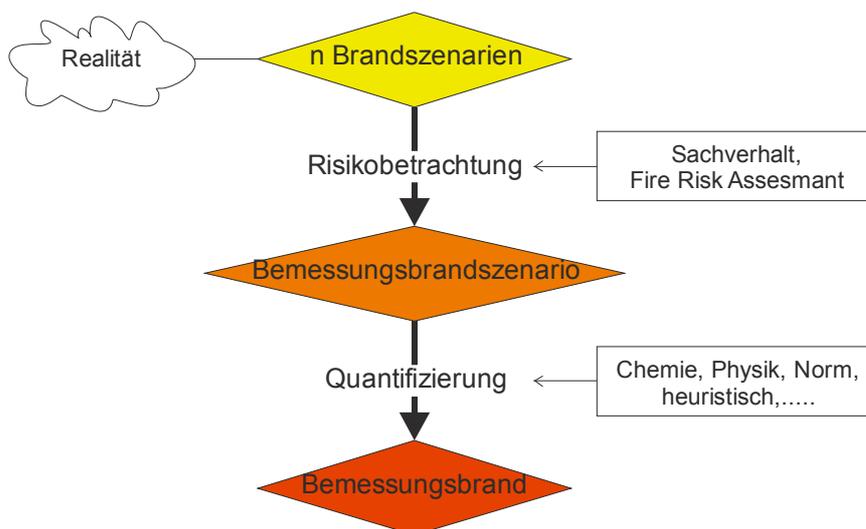


Abbildung 121: Überblick über die Zusammenhänge von Brandszenarien, Bemessungsbrandszenarien und Bemessungsbränden [sim0003]

Bemessungsbrände können durch eine Reihe von Parametern beschrieben werden. Die wichtigsten Parameter sind:

- die zeitliche und örtliche Entwicklung des Brandes (Brandverlauf),
- die maximale Leistung des Brandes und
- die am Brand beteiligten Stoffe (Art und Menge; Brandlast).

Diese drei Parameter dürfen nicht singular betrachtet werden, da zwischen Ihnen Abhängigkeiten bestehen. Je nach geometrischer Situation in der ein Brand abläuft kommt ein weiterer Parameter hinzu, nämlich die Ventilationsverhältnisse während des Brandes. Diese haben bspw. einen wesentlichen Einfluss auf die Brandleistungen.

Je nach Fragestellung/Nachweisverfahren können Bemessungsbrände unter Berücksichtigung aller vorgenannten Parameter festgelegt/ermittelt werden, oder es werden nur ausgewählte Parameter berücksichtigt. Wesentliche Elemente welche die Parameter näher charakterisieren sind in der **Tabelle 31** dargestellt.

Tabelle 31: Wichtige Eingabeparameter für Bemessungsbrände und deren Bestandteile [sim0003]

Brandverlauf	Brandleistung(sbeschreibungen)	Stoffe
Brandausbreitung (geometrisch)	Leistung im physikalischen Sinn (Energie/Zeiteinheit)	Heizwert
Brandfläche, -volumen	Temperatur ²⁾	spez. Abbrand/Pyrolyseraten
parametrische Entwicklung ¹⁾		Menge
		thermodynamische Stoffdaten
		Brennstoffchemie
¹⁾ In der Regel frei von geometrischen Daten		
²⁾ Bsp.: Bauteilprüfungen nach der EN 13501-2		

8.1.2 Bemessungsbrände auf Basis experimenteller Daten

Nachfolgend werden beispielhaft ausgewählte Experimente dargestellt, auf dessen Ergebnissen Bemessungsbrände in Tunnel abgeleitet werden können. Diese Versuche wurden im Rahmen eines Eureka Projektes durchgeführt [sim0002]

Versuch „Public Bus“ Nr: 02.03.0001

Der Brandversuch „Public Bus“ fand am 23. August 1992 in einem ehemaligen Transporttunnel, einer stillgelegten Kupfermine, in Repparfjord, im Norden Norwegens statt. Für den Brandversuch wurde ein Bus aus den 60er Jahren der Marke VOLVO verwendet. Dieser hatte eine Länge von 12 m und eine Kapazität von etwa 40 Sitzen. An Stelle der Gepäckstücke der Passagiere wurden ca. 310 Kanthölzer zugeladen.

Als Zündquelle wurden ca. 1,5 kg Isopropanol in einer Blechwanne verwendet. Die Wanne wurde auf der ersten Sitzreihe hinter dem Fahrer platziert.



Start



Höhepunkt



Ende

Abbildung 122: Brandentwicklung zu Brandszenarium „Public Bus“ Nr. 02.03.0001

Die **Abbildung 123** zeigt die resultierende Brandleistungskurve für den „Public Bus“.

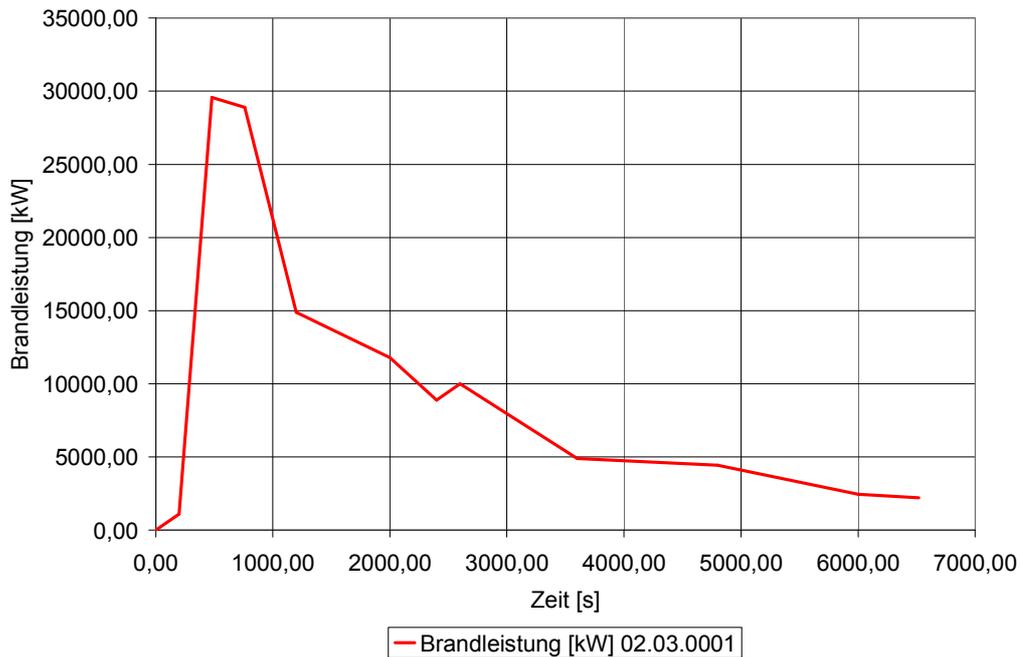


Abbildung 123: Brandleistungskurve zu Brandszenarium „Public Bus“ Nr. 02.03.0001

Versuch „Mixed Fire Load“ Nr: 02.03.0002

Der Brandversuch „Mixed Fire Load“ fand am 23. Oktober 1992 in einem ehemaligen Transporttunnel, einer stillgelegten Kupfermine, in Repparfjord, im Norden Norwegens statt.

Um das Brandverhalten der Ladung eines LKWs zu untersuchen wurden 2.850 kg brennbares Material mittels Isopropanol zur Entzündung gebracht.



Start

Höhepunkt

Ende

Abbildung 124: Brandentwicklung zu Brandszenarium „Mixed Fire Load“ Nr: 02.03.0002

Abbildung 125 zeigt die resultierende Brandleistungskurve für eine „Mixed Fire Load“.

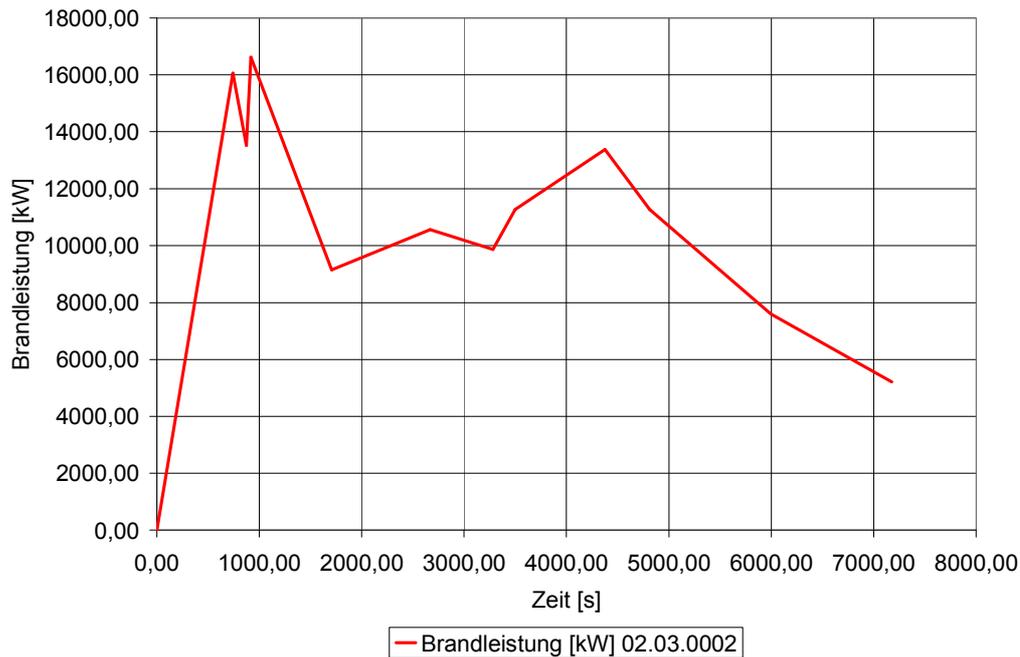


Abbildung 125: Brandleistungskurve zu Brandszenarium „Mixed Fire Load“Nr: 02.03.0002

Versuch „Heavy Goods Vehicle“ Nr: 02.03.0003

Der Brandversuch „Heavy Goods Vehicle“ fand am 12. November 1992 in einem ehemaligen Transporttunnel, im Norden Norwegens statt. Für den Brandversuch wurde ein LKW mit zwei-achsiger Zugmaschine mit einem zwei-achsigen Auflieger verwendet.

Zusätzlich zur normalen Ausstattung eines LKWs mit Fahrerkabine und Notliege wurden beinahe 2 Tonnen an Möbeln auf den Auflieger geladen.

Die Entzündung fand mittels Holzkrippenbrand statt. Zusätzlich wurde in die Polsterung des Fahrersitzes, auf dem diese platziert war, geringe Mengen an Polypropamol eingebracht.

Die Abbildung 126 zeigt die Entwicklung des Brandes und die Abbildung 127 die korrespondierende Brandleistungskurve.



LKW und Ladung

Höhepunkt

Ende

Abbildung 126: Brandentwicklung zu Brandszenarium „Heavy Goods Vehicle“Nr: 02.03.0003

Brandleistungskurve

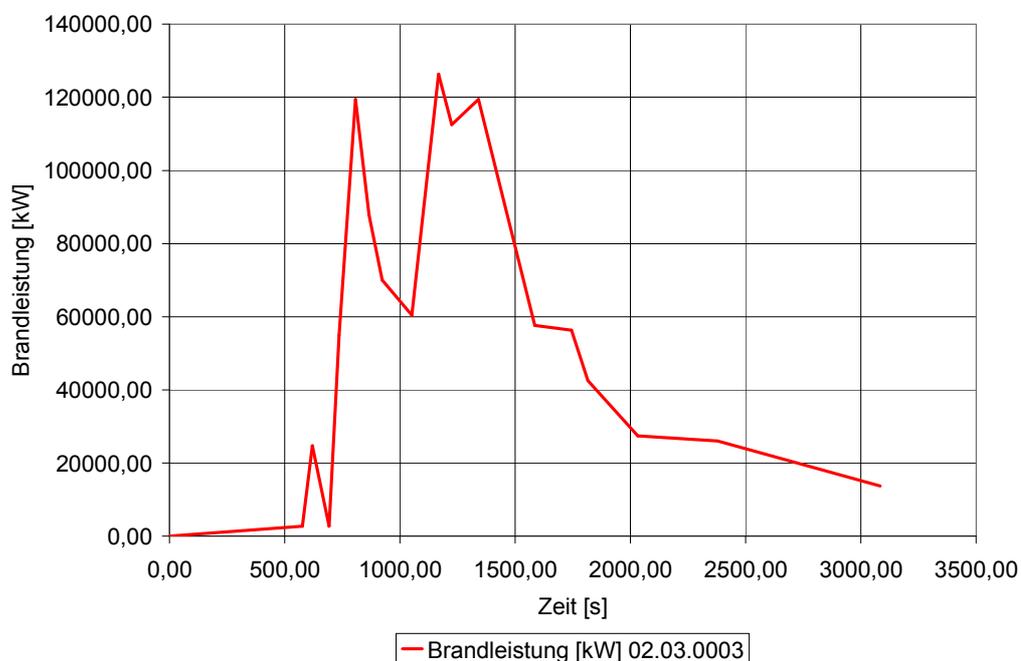


Abbildung 127: Brandleistungskurve zu Brandszenarium „Heavy Goods Vehicle“Nr: 02.03.0003

Versuch „Railway Car“ Nr: 02.03.0004

Der Brandversuch „Railway Car“ fand am 7. Oktober 1992 in einem ehemaligen Transporttunnel, im Norden Norwegens statt. Die Abbildung 128 zeigt den beim Brandversuch verwendeten Zugswagon mit Stahlkarosserie.

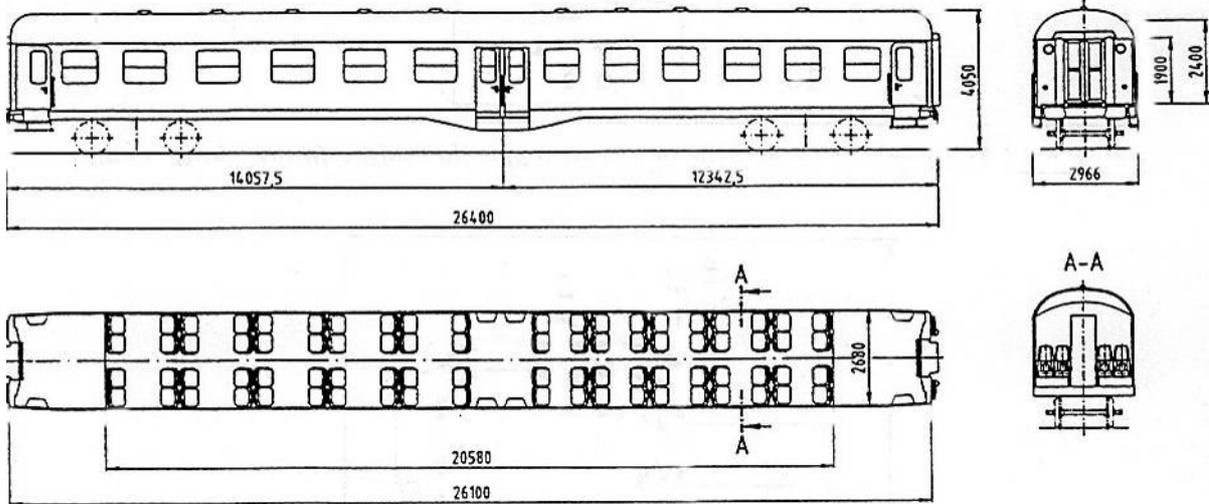


Abbildung 128: Beim Brandversuch verwendeten Zugwagen mit Stahlkarosserie

Die Zündung erfolgte mittels vier Stahlwannen die mit 6,2 kg Isopropanol gefüllt waren. Die Wannen wurden auf Sitzniveau im hinteren Bereich des Wagens aufgestellt. Die Abbildung 129 zeigt die resultierende Brandleistungskurve.



Abbildung 129: Brandleistungskurve zu Brandszenarium „Railway Car“ Nr: 02.03.0004

Versuch „Subway Car, Alu“ Nr: 02.03.0005

Der Brandversuch „Subway Car, Alu“ fand am 14. Oktober 1992 in einem ehemaligen Transporttunnel, im Norden Norwegens statt. Die Abbildung 130 zeigt den beim Brandversuch verwendeten U-Bahnwagen mit Aluminiumkarosserie.

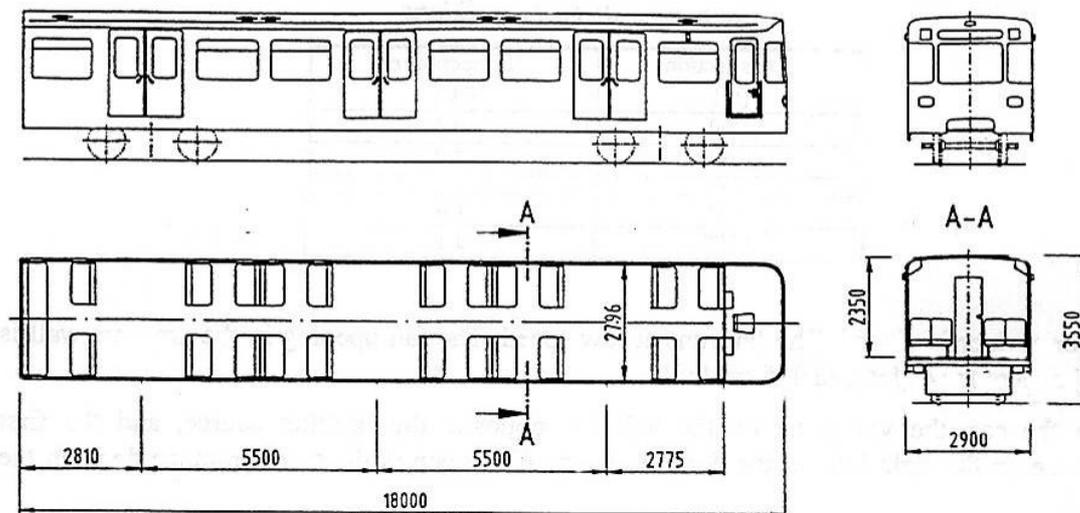


Abbildung 130: Schematische Darstellung „Subway Car, Alu“

Zur Brandinitiierung wurden 0,7 kg Isopropanol in zwei Stahlwannen verwendet. Diese Stahlwannen wurden auf Sitzniveau im hinteren Bereich des Wagens platziert. Zusätzlich wurden die Sitzbänke mit Isopropanol beträufelt.

Die Abbildung 131 zeigt die Brandentwicklung und die Abbildung 132 die resultierende Brandleistungskurve.



Start

Höhepunkt

Ende

Abbildung 131: Brandentwicklung zu Brandszenarium „Subway Car, Alu“ Nr: 02.03.0005

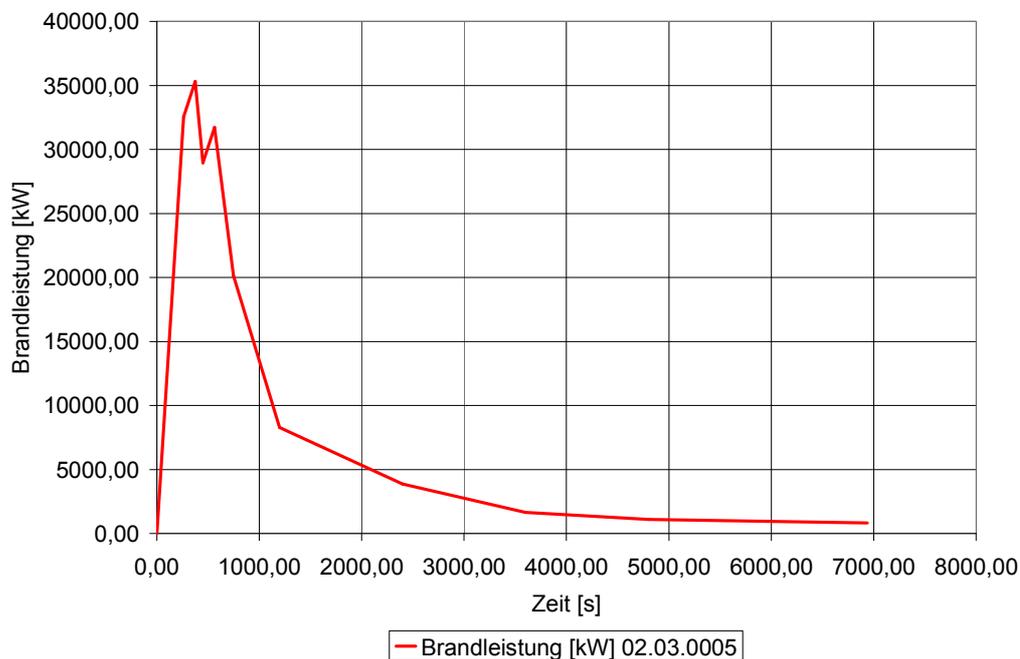


Abbildung 132: Brandleistungskurve zu Brandszenarium „Subway Car, Alu“ Nr: 02.03.0005

Die Experimente zeigen auf, dass die Brandleistungen und Brandverläufe sich sehr stark unterscheiden können wenn unterschiedliche Brandobjekte betrachtet werden. Dies ist von Bedeutung wenn Brandszenarien und Bemessungsbrände als Eingangsdaten für Simulationen entwickelt werden.

8.2 Festlegung von Randbedingungen und Modellen zur Simulation des thermischen Materialverhaltens im Zusammenhang mit LOTS

8.2.1 Modelle

Die Ermittlung der Temperaturen welche bei einem Brand in einem Tunnel auftreten können, erfolgt durch Simulationen. Grundsätzlich lassen sich zwei Arten von Simulationen unterscheiden; solche die mittels Experimenten durchgeführt werden (auch dabei handelt es sich um die Simulation eines realen Sachverhaltes) und numerischen Simulationen mittels entsprechenden Simulationsprogrammen. Hauptsächlich kommen numerische Simulationen zum Einsatz, da in diesen die Randbedingungen (wie bspw. die Geometrie oder das Brandszenarium) innerhalb der Gültigkeitsgrenzen des

Rechenmodells frei definiert werden können. Solche numerische Verfahren werden im Allgemeinen auch als Ingenieurmethoden für den Brandschutz bezeichnet.

Die Nachweis- bzw. Bemessungsverfahren mit Ingenieurmethoden basieren in der Regel auf vereinfachten thermodynamischen Modellen, welche die Realität angenähert wiedergeben. Zu den ingenieurmäßigen Berechnungsmethoden zur Ermittlung von Temperaturen zählen:

- explizite bzw. analytische Methoden und
- Brandsimulationsmodelle

Die expliziten bzw. analytischen Methoden basieren zumeist auf der Anwendung experimenteller Daten (z. B. Plumemodelle). Sie sind jedoch nicht beliebig skalierbar, d. h. die richtige Anwendung der angegebenen Berechnungsgleichungen ist nur in dem durch Experimente abgedeckten Bereich möglich. Ein wesentlicher Nachteil ist, dass die meisten expliziten bzw. analytischen Methoden den sogenannten „steady state“ Fall voraussetzen, d. h. es finden keine zeitlichen Änderungen der Einflussgrößen und Randbedingungen statt (siehe auch Tabelle 32). Im Zusammenhang mit Bränden in Tunnel können solche Modelle zwar zur Anwendung gelangen, liefern in der Regel jedoch nur sehr eingeschränkt verwendbare Ergebnisse (geringer Informationsgehalt).

Bei den Brandsimulationsmodellen lassen sich drei Gruppen von Modelltypen unterscheiden:

- Zonenmodelle,
- CFD-Modelle,
- Systemcodes.

Die derzeit am häufigsten praktisch eingesetzten Modelle sind Zonenmodelle. Systemcodes sind spezielle Codes für kerntechnische Fragestellungen (Energiefreisetzung in geschlossenen Systemen). In Tabelle 33 werden einige prinzipielle Eigenschaften von Zonen- und CFD-Modellen unter dem Gesichtspunkt des Brandschutzingenieurwesens untereinander verglichen. Den Brandsimulationsmodellen liegen grundsätzlich die technischen und wissenschaftlichen Erkenntnisse über Strömungsmechanik und Thermodynamik zugrunde. Diese sind somit, unter der Annahme der allgemeinen

Gültigkeit der Theorien, in weiten Bereichen frei skalierbar und anwendbar. Die Grenzen der heute angewendeten Modelle liegen im Wesentlichen bei den auf analytischen Lösungen basierenden Modellansätzen für die Flammenberechnung, Turbulenzbetrachtung und Verbrennungsansätze. Die jeweils mögliche Aussagefähigkeit bei Brandsimulationen ist in Tabelle 34 angegeben.

Tabelle 32: Eigenschaften von analytischen Methoden und komplexen Brandsimulationsmodellen nach [sim0001]

Eigenschaft	analytische Methoden	Simulationsmodelle
zeitliche Abläufe	nein	ja
Skalierung	nur im Gültigkeitsbereich	ja
Plausibilitätskontrolle	einfach	einfach
Fehlerabschätzung	einfach	schwierig
Aufwand des Einsatzes	gering	mittel bis aufwendig
Aussagen	Einzelaussagen	Systemaussagen

Tabelle 33: Grundsätzliche Eigenschaften von CFD- und Zonenmodellen nach [sim0004]

Eigenschaft	Zonenmodell¹⁾	CFD-Modelle
Geometrieerfassung	angenähert	exakt
Lüftungserfassung	exakt	exakt
Heat source	angenähert	angenähert
Modellaufwand	gering	sehr hoch
Aussagen	global ²⁾	lokal
Verifizierung	aufwendig	sehr aufwendig
Plausibilitätskontrolle	einfach	aufwendig
Dimensionsabhängigkeit	nicht gegeben ³⁾	sehr hoch ⁴⁾
Genauigkeit der lokalen Aussagen	exakt (für analytische ²⁾ Formel)	abhängig von Zellgröße
Kosten des Einsatzes	gering	sehr hoch ⁴⁾

¹⁾ am Beispiel MRFC (Multi Room Fire Code, AGB)

²⁾ für gewisse Bereiche (z. B. Plumbereich, Öffnungen) auch lokal möglich

³⁾ innerhalb der definierten Modellgrenzen

⁴⁾ Rechenaufwand steigt exponentiell zu der Zellenanzahl

Tabelle 34: Aussagefähigkeit bzw. Berechnungsgrößen von Zonen- und CFD-Modellen nach [sim0004]

Fragestellungen	Zonenmodell ^{*)}	CFD-Modelle
lokale Temperaturen im Plumbereich	ja	ja, generell
lokale Temperaturen in brandfernen Bereichen	bedingt (nur im Plume bzw. ceiling jet und in Bauteilen)	ja, generell
Schichttemperaturen	ja	ja, aufwendig
Verrauchung	ja	ja, aufwendig
lokale Strömungsfelder	im Plumbereich, an Öffnungen	ja, generell
komplexe Geometrien (Mehrraummodelle)	ja	bedingt, aufwendig
Bauteiltemperaturen	ja	ja (teilw. angenähert)
Parameterstudien	leicht durchführbar	sehr aufwendig

^{*)} am Beispiel MRFC - gilt nicht für einfache Zonenmodelle

8.2.2 Modellannahmen

Bei jeder Brandschutzberechnung oder -simulation müssen zur Berechnung des Brandablaufes und der Brandwirkungen vorab bestimmte Modellannahmen getroffen werden. Diese sind insbesondere Annahmen über:

- die Geometrie,
- die Ventilations- und Lüftungsbedingungen,
- thermodynamische Randbedingungen,
- modellspezifische Randbedingungen .

8.2.2.1 Geometrie

Die geometrischen Randbedingungen sind in der Regel aus der Planung bekannt. Die Modelle müssen die realen geometrischen Verhältnisse widerspiegeln. Es müssen alle auf das Ergebnis einwirkenden geometrischen Größen entsprechend den tatsächlichen Gegebenheiten bekannt sein und berücksichtigt werden. Die Modellerfordernisse können je nach verwendetem Brandsimulationsmodell stark unterschiedlich sein. Bei Zonenmodellen gehen die Raumvolumina und -höhen sowie die Decken-, Boden- und Wandflächen unmittelbar in das Ergebnis ein, weil die Umfassungsbauteile Wärme absorbieren. Eine pauschale Berücksichtigung der Wärmeabsorption in der Energiebilanz ist

nicht richtig und führt nach längeren Branddauern zu Fehlern bei den Brandraumtemperaturen.

Bei CFD-Modellen ist die Geometrie möglichst genau einzugeben, da hier durch die lokalen Strömungsbetrachtungen ein unmittelbarer Einfluss auf das Ergebnis eintritt. Die Wärmeabsorption der Bauteile ist bei längeren Betrachtungen wichtig, da in der Regel lange Simulationsdauern bei hohen Brandleistungen vorliegen.

Im Zusammenhang mit der Geometrie von Tunnelanlagen sind die drei Querschnittsgrundformen (Kreis-, Rechteck- und Gewölbequerschnitt) besonders zu beachten, da hier unterschiedliche Temperaturverteilungen an den Umfassungsbauteilen auftreten können. Bei der Modellierung der Geometrie sind die baulichen Strukturen für die Tunnellüftung ebenfalls zu beachten (Kanäle). Ebenso ist die geodätische Lage des Tunnels zu beachten. Tunnelneigungen sind zu berücksichtigen.

8.2.2.2 Ventilations- und Lüftungsbedingungen

Die Lüftungsbedingungen haben in der Regel einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der Brandsimulation. Sie sind unmittelbar mit den Brandszenarien gekoppelt, z.B. über den Sauerstoffbedarf der Verbrennung selbst und somit der resultierenden Brandleistung.

Die Festlegung der Lüftungsbedingungen für die Simulation erfolgt auf Basis des jeweiligen Tunnellüftungskonzeptes. Je nach Fragestellung kann es auch erforderlich sein einen Fall zu berücksichtigen bei der eine ausgefallene Tunnellüftung anzusetzen ist.

Die Festlegung der Lüftungsrandbedingungen in der Simulation muss in Abhängigkeit der topographischen Lage des Tunnelbauwerkes gegebenenfalls auch meteorologische Effekte berücksichtigen.

8.2.2.3 Thermodynamische Randbedingungen

Bei den thermodynamischen Randbedingungen sind zwei wesentliche Gruppen zu beachten. Diese sind:

- Materialkennwerte für die „geometrischen Randbedingungen“,
- Wärmeübergänge und
- der Bemessungsbrand.

8.2.2.3.1 Materialkennwerte für die „geometrischen Randbedingungen“

Zur korrekten Bestimmung der Temperaturen in den begrenzenden Bauteilen ist die thermische Leitfähigkeit, die spezifische Wärme, die Dichte und gegebenenfalls die Feuchte des verwendeten Materials in Abhängigkeit der Temperatur festzulegen.

Sofern keine detaillierten, sachverhaltsbezogene Stoffwerte vorliegen können normativ festgelegte Materialkennwerte verwendet werden. Für Beton können beispielsweise die Materialkennwerte nach dem Eurocode 2 (ÖNORM EN 1992-1-2: 2010 09 01) unter Berücksichtigung der der nationalen Anwendungsdokumente (ÖNORM B 1992-1-2: 2011 11 15) herangezogen werden.

8.2.2.3.2 Wärmeübergänge

Eine Festlegung der Kennwerte für die Wärmeübergänge zwischen fluiden Medien (Gase) und den Oberflächen bzw. zwischen Strahlungsquellen und -Empfänger ist nur insoweit erforderlich, als dass diese nicht in den verwendeten Simulationsmodellen unmittelbar bestimmt werden.

8.2.2.3.3 Bemessungsbrand

Die Modellierung der „Heat Source“, d. h. des Feuers selbst, stellt in der Regel die größte Hürde beim Einsatz von Simulationsverfahren dar. Das Brandszenarium hat naturgemäß einen wesentlichen Einfluss auf alle Ergebnisse der Brandsimulation. Das Brandszenarium und der daraus abgeleitete Bemessungsbrand sind für den Einzelfall anhand der vorliegenden Gegebenheiten festzulegen. Ansätze für eine solche Festlegung finden sich im Abschnitt 8.1

8.2.2.4 Modellspezifische Randbedingungen

Je nach verwendetem Simulationsmodell sind ggf. weitere modellspezifische Randbedingungen festzulegen. Dies betrifft im Wesentlichen Eingabedaten für vorhandene Submodelle oder die Festlegung welche Submodelle (bzw. theoretische Ansätze) zur Anwendung gelangen. Am Beispiel von CFD Modelle können dies beispielsweise sein:

- Diskretisierungsdaten (Größe, Art und Anzahl der Rechenzellen),
- Festlegung der Turbulenzmodelle, Verbrennungsmodelle,
- Numerische Lösungsschemen usw..

9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Verhalten von Beton im Niedertemperaturbereich stellte in Österreich einen neuen Forschungsbereich dar.

Um das von der Betonzusammensetzung abhängige Verhalten bei Temperatureinwirkungen von bis zu 450 °C zu untersuchen, wurden Brandversuche mit Betonprobekörpern unterschiedlicher Zusammensetzung durchgeführt. Die verwendeten Rezepturen entsprachen dabei den Vorgaben der ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ (herkömmlicher Innenschalenbeton der Bezeichnung IG, Referenz-Faserbeton der Bezeichnung I/BBG). Variiert wurden jeweils die Gesteinskörnungsart (karbonatisch, quarzitisch und Tunnelausbruch) sowie der Luftgehalt und die Lagerungsbedingungen nach dem Erstarren (Wassersättigung bzw. Luftlagerung).

Generell ist es bei keinem der Brandversuche unabhängig von der Zusammensetzung zu Betonabplatzungen und somit zu einer Schädigung der Betonstruktur bei Temperaturen bis 450 °C gekommen.

Die vorliegenden Daten wurden nach folgenden Gesichtspunkten ausgewertet:

Dehnverhalten der Kleinprobekörper:

Wassergesättigte Probekörper zeigen nach einer Temperatureinwirkung von 450 °C über 90 Minuten unabhängig von der Betonsorte geringere absolute Dehnungen aufgrund der geringeren Erwärmung (Info JK!) der wassergelagerten Probekörper. Bei den luftgelagerten Probekörpern zeigen die Proben aus Faserbeton eine höhere Dehnung als die Proben aus herkömmlichem IG-Beton. Die Dehnung in Bezug auf die Gesteinskörnung lässt folgende Schlüsse zu:

Die Dehnung ist vor allem von der Gesteinsart abhängig, wobei quarzitisches Material mit 0,9 mm höhere Dehnungen aufweist als karbonatisches mit 0,4 – 0,5 mm. Der Tunnelausbruch ist dabei mit 0,7 – 0,8 mm erwartungsgemäß eher mit einer quarzitischen Gesteinskörnung zu vergleichen.

Masseverluste der Kleinkörper im Zuge der Brandversuche:

Wassergelagerte Betonproben haben erwartungsgemäß deutlich höhere Masseverluste als luftgelagerte Proben bei Temperaturbelastungen bis 450°C. Bezüglich der Betonsorte, des Luftporengehalts, des Fasergehaltes und der Gesteinskörnung konnte bei diesen Versuchen kein Zusammenhang mit dem Masseverlust hergestellt werden.

Temperaturverteilung bei Kleinprobekörper:

Die Analyse der Messdaten zeigt, dass die Temperatursensoren am Rand des Probekörpers trotz der verwendeten Wärmedämmung um den Probekörper, immer geringere Messwerte anzeigen als in der Mitte der Probekörper. Eine Abhängigkeit der Temperaturverteilung von den Parametern Betonsorte, Luftporengehalt, Lagerungsart, Fasergehalt, Gesteinskörnung lässt sich jedoch nicht ableiten.

Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Lagerung:

Die Mittelwerte der Temperaturen im Probekörper liegen bei allen luftgelagerten Proben über denen der wassergelagerten Probekörper. Das heißt dass wassergesättigter Beton eine geringere Erwärmung bei Temperaturbelastung zeigt als ausgleichsfeuchter (=hier trockener) Beton.

Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Betonsorte:

Stellt man die Temperaturverteilung in den Probekörpern in 5 cm Tiefe (Abstand zur Brandraumseite) in Abhängigkeit der Betonsorten gegenüber, so zeigt sich, dass Beton der Sorte 1 (IG) unabhängig von der Lagerung immer höhere Temperaturen und somit eine stärkere Erwärmung im Vergleich zu Proben der Sorte 2 (BBG) aufweist.

Die Interpretation der Daten ergibt, dass die Temperaturverteilung im Probekörper signifikant von der Lagerungsart (Luftlagerung, Wasserlagerung) und der Betonsorte abhängig ist.

Einfluss auf die Druckfestigkeit der Kleinprobekörper:

Die Temperaturen von 450 °C führen zu einer geringfügigen Herabsetzung der Betondruckfestigkeiten. Die maximale Eindringtiefe der Schädigung bei einer Branddauer von 90 Minuten ist ca. 10 cm. Geringere Luftgehalte im Beton führen dabei zu tiefergreifenderen Schädigungen der Betonstruktur. Bei wassergelagerten Probekörpern ist die Eindringtiefe geringer als bei nicht gesättigten Proben. Ein Einfluss der Gesteinskörnung auf die Druckfestigkeit im Falle einer Temperaturbelastung bis 450°C konnte nicht abgeleitet werden.

Ergebnisse der Brandversuche an Großkörpern:

Aus der Prüfung der Abreißfestigkeit sowie der Porosität des Zementsteins vor und nach dem Brandversuch lassen sich keine Zusammenhänge mit der Betonrezeptur oder den

Lagerungsbedingungen ableiten. Bei der optischen Beurteilung der Oberflächen waren keine Abplatzungen an der Betonstruktur festzustellen.

Um das Verhalten von Beton im Niedertemperaturbereich weiter abzusichern wären zur Ergänzung weitere Versuche mit unterschiedlichen Betonrezepturen (z.B. unterschiedliche Zementsorten) sinnvoll.

10 LITERATUR

10.1 Kapitel 1 - 7

- [1] Nischer, P.; Steigenberger J.: Beton höchster Brandbeständigkeit mit Polypropylenfasern, Beton und Fertigteiltechnik 2004
- [2] Kusterle, W. et. al: Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton, BMVIT Straßenforschung und Eisenbahn-Hochleistungsstrecken AG, Heft 544, 2004
- [3] Nischer, P.; Wiklicky, H.; Steigenberger, J.: Praxisverhalten von erhöht brandbeständigem (Innenschalen-)Beton (EBB), Forschungsbericht VÖZFI 2003
- [4] Zeiml, M. et. al.: Wissenschaftlicher Endbericht Forschungsprojekt Sicherheit von Hohlraumbauten unter Feuerlast (SHF1), IMWS 2010
- [5] Glatzl, J.; Nischer, P.; Steigenberger, J.; Wagner, O.: PP-Faserbeton für erhöhte Brandbeständigkeit, Zement und Beton 2004
- [6] Nischer, P.; Wagner, O.: Beton erhöhter Brandbeständigkeit mit Polypropylenfasern – Nachweis im Frisch- und Festbeton, Beton und Stahlbetonbau 2005
- [7] Becic, A.: Der Einfluss der Kornform des Zuschlages auf das Abplatzverhalten von Betons unter Brandbeanspruchung, Diplomarbeit an der TU Wien, 2010
- [8] Schneider, U.; Kirnbauer, J.: Fire Tests – Brandversuch, Abschlussbericht Corptus
- [9] Teggan, M.: Einfluss des Bindemittels auf die Brandbeständigkeit des Betons, Diplomarbeit an der TU Wien, 2007
- [10] ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“, Dezember 2012
- [11] ÖBV-Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton“, April 2015
- [12] Glantschnigg, N.: Untersuchungen zur Brandfeststellung im Tauerntunnel, Bericht BVFS 2002

- [13] RVE 08.00.01 „ Baulicher Brandschutz in unterirdischen Verkehrsbauwerken“. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene Verkehr, Stand 11.0 vom 01.08.2014

- [14] ÖNORM EN 1992-1-2 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Ausgabe 2010.09.01, Austrian Standards Institute Wien

- [15] RVS 09.01.45 Baulicher Brandschutz in Straßentunnel – Ausgabe 2015.10.01, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr - Wien

- [16] ÖBB-RW-10.03.01 Baulicher Brandschutz in unterirdischen Verkehrsbauwerken, Ausgabe 09-2013

- [17] TSI SRT - Technical specifications of interoperability on Safety in Railway Tunnels Ausgabe 2015 als Nachfolgedokument zur TSI SRT (2008/163/EG)

- [18] Lemmerer J., Kusterle W. Lindlbauer W., Zeiml M., Hörhan R., Steigenberger J.: Fire Loading of Highly Fire-Resistant Concrete Tunnel Linings. IABSE Symposium “ Structures and Extreme Events”, Lisbon 2005

- [19] Korten A., Wetzig V.: Spalling of Concrete – influence of porosity and specimen size and its critical factors regarding safety

- [20] ÖNORM EN 1542 „Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch“, Ausgabe 1999-09-01, Austrian Standards Institute, Wien

- [21] ÖBV Merkblatt „Tunnelbeschichtung“, Österreichische Bautechnikvereinigung Ausgabe August 2014

- [22] ÖNORM EN 1363-1 Feuerwiderstandsprüfung Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Ausgabe 2012.09.01, Austrian Standards Institute Wien

- [23] ÖNORM EN 1991-1-2 Eurocode 1 – Einwirkung auf Tragwerke Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkung auf Tragwerke, Ausgabe 2013.01.15, Austrian Standards Institute Wien

- [24] ÖNORM B 4710-1 Beton Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis, Ausgabe 2007.10.01, Austrian Standards Institute Wien

- [25] ONR 23303 Prüfverfahren Beton (PVB) – Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe, Ausgabe 2009.09.01, Austrian Standards Institute Wien

- [26] ÖNORM EN 1097-6

- [27] ÖNORM B 23301

- [28] DIN 66133

10.2 Kapitel 8

- [sim0001] Schneider, U.: Ingenieurmethoden im Brandschutz, 2. Auflage, Werner Verlag, Köln, 2009

- [sim0002] EUREKA-Projekt EU 499: Fires in Transport Tunnels, Report on Full-Scale Tests. Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, Nov. 1995.

- [sim0003] N. Schjerve, C. Lebeda, U. Schneider: "Ingenieurmethoden im Brandschutz"; in: "Bauphysik Kalender 2016 - Brandschutz", Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2016, ISBN: 978-3-433-03128-5, S. 157 - 222.

- [sim0004] Schneider, U.: Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz, 5. Auflage, expert Verlag, Remmingen, 2008; 6. Auflage 2010/2011

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Für die Versuche herangezogene Rezepturen	21
Tabelle 2: Übersicht betreffend die durchzuführenden Versuche	23
Tabelle 3: Rohdichte und Anteil an der Gesamteinwaage der Gesteinskörnung	24
Tabelle 4: Betonierprogramm – Kleinkörper (Mischverhältnisse)	28
Tabelle 5: Frischbetonkennwerte der Kleinkörperherstellung	31
Tabelle 6: Festbetonkennwerte	34
Tabelle 7: Masseverluste in Folge der Temperaturbelastungen an Probekörpern mit den Abmessungen 60x50x30cm.....	73
Tabelle 8: Ermittelte Abreißfestigkeiten des Betonuntergrundes vor und nach dem Brandversuch (BS)	84
Tabelle 9: Einzelwerte Abmessung, Rohdichte, Höchstlast und Druckfestigkeit der entnommenen Bohrkerne	86
Tabelle 10: Lage und Anzahl der Temperaturfühler, gereiht nach Fühlertiefe	93
Tabelle 11: Angaben gemäß Formblatt 1-1 und ermittelte Frischbetonkennwerte.....	98
Tabelle 12: Druckfestigkeiten des Luftporenbetons MV 101.....	99
Tabelle 13: Beurteilung der Relevanz der Druckfestigkeit (gemäß ONR 23303:2010, Abschnitt 9.2.4.4).....	99
Tabelle 14: E-Modul der Großkörper.....	100
Tabelle 15: Messergebnisse MV 101	100
Tabelle 16: Luftporenkennwerte bestimmt nach ONR 23303:2010, Abschnitt 9.6	102
Tabelle 17: Messergebnisse MV 102	102
Tabelle 18: Luftporenkennwerte bestimmt nach ONR 23303:2010, Abschnitt 9.6	104
Tabelle 19: Wassereindringtiefe MV101.....	104
Tabelle 20: Wassereindringtiefe MV102.....	104
Tabelle 21: Zusammensetzung des Nullbetons (Vergleichsbeton) XF3.....	105
Tabelle 22: Wasserabgabe zwischen 1. und 7. Tag der Lagerung in % der Masse.....	106
Tabelle 23: Wasseraufnahme zwischen 7. und 28. Tag der Lagerung in % der Masse	106
Tabelle 24: Änderung von Masse und Schalllaufzeit des Nullbetons durch Frost-Tau-Wechsel	106
Tabelle 25: Änderung von Masse und Schalllaufzeit des Prüfbetons MV101 durch Frost-Tau-Wechsel	107

Tabelle 26: Änderung von Masse und Schalllaufzeit des Prüfbetons MV102 durch Frost-Tau-Wechsel	107
Tabelle 27: Änderung des E-Modul des Prüfbetons MV101 durch Frost-Tau-Wechsel ..	108
Tabelle 28: Änderung des E-Modul des Prüfbetons MV102 durch Frost-Tau-Wechsel ..	108
Tabelle 29: Ermittelte Abreißfestigkeiten des Betons	118
Tabelle 30: Terminologie und Beschreibung wichtiger Begriffe des Brandschutzes [sim0003]	122
Tabelle 31: Wichtige Eingabeparameter für Bemessungsbrände und deren Bestandteile [sim0003].....	124
Tabelle 32: Eigenschaften von analytischen Methoden und komplexen Brandsimulationsmodellen nach [sim0001]	133
Tabelle 33: Grundsätzliche Eigenschaften von CFD- und Zonenmodellen nach [sim0004]	133
Tabelle 34: Aussagefähigkeit bzw. Berechnungsgrößen von Zonen- und CFDModellen nach [sim0004].....	134

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Dampfdruck des gesättigten Wasserdampfes in Abhängigkeit von der Temperatur [nach 1, 3].....	10
Abbildung 2: Theoretischer Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchtigkeit und Gleichgewichtswassergehalt von vollständig hydratisiertem Beton [3]	11
Abbildung 3: Abplatzverhalten und Porosität [19].....	11
Abbildung 4: PP-Faser bei 50-facher Vergrößerung (links) sowie im Beton eingebetteten PP-Fasern (rechts) [3].....	12
Abbildung 5: Gasdurchlässigkeit von Beton ohne (MV 0) und mit 2,0 kg/m ³ (MV 2,0) und 3,0 kg/m ³ (MV 3,0) PP-Faserzugabe in Abhängigkeit der Temperatur (gemessen an abgekühlten Proben) [1].....	13
Abbildung 6: Porengrößenverteilung für von Mörtelproben für unterschiedliche Temperaturstufen [4].....	14
Abbildung 7: Temperaturverteilung T(y) für Tunnelquerschnitte nach TSI SRT.....	17
Abbildung 8: Zwischendecke „stark geschädigt“ (links) und „gering geschädigt“ (rechts) [12]	18
Abbildung 10: Grundriss und Seitenansicht des Ofenaufbaus.....	22
Abbildung 11: Sieblinie des karbonatischen Materials aus der Kiesgrube Bad Fischau ...	25

Abbildung 12: Sieblinie des quarzitäen Materials aus der Kiesgrube Markgrafneusiedl	25
Abbildung 13: Sieblinie des aufbereiteten Tunnelausbruchmaterials (ATA) aus dem Koralmtunnel KAT 2.....	26
Abbildung 14: Längsabmessung und Sensorlage	29
Abbildung 15: Verteilung der Sensoren über die Probekörperhöhe.....	29
Abbildung 16: Verdichten des Betons	29
Abbildung 17: Einfüllen des Betons 2. Lage.....	29
Abbildung 18: Fertiggestellter Vorversuchskörper.....	29
Abbildung 19: Sensorkabel an Probekörperseite	29
Abbildung 20: Vergleich der linken und rechten Fühlerreihe im Vorversuchskörper	30
Abbildung 21: Lage der Thermoelemente im Probekörper).....	31
Abbildung 22: Spannrahmen zur Aufbringung einer Quervorspannung von 1,2 MPa mit Kühlung der Zugglieder.....	36
Abbildung 23: Spannrahmen zur Aufbringung einer Quervorspannung von 1,2 MPa.....	37
Abbildung 24: Versuchsanordnung, links: Spannrahmen, rechts: Dehnungsmessung	38
Abbildung 25: Darstellung des Brandraums, links: Brandkanal, rechts Anordnung der Temperaturfühler und des Massenstromsensors	38
Abbildung 26: Brenner und Heizkanone zur Regelung des konvektiven Wärmestroms....	39
Abbildung 27: Temperaturverteilung bzw. Strömungsgeschwindigkeit im Ofen.....	39
Abbildung 28: MV1 Probekörper 1 nach dem Versuch.....	41
Abbildung 29: Temperaturverteilung im Probekörper	41
Abbildung 30: Temperaturdehnung und Vorspannung während des Brandversuches; links: Einzelmessungen; rechts: Kraft Mittelwert, Dehnung summiert.....	41
Abbildung 31: MV1 Probekörper 2 nach dem Versuch.....	42
Abbildung 32: Temperaturverteilung im Probekörper	42
Abbildung 33: MV2 Probekörper 1 nach dem Versuch.....	43
Abbildung 34: Temperaturverteilung im Probekörper	43
Abbildung 35: MV2 Probekörper 2 nach dem Versuch.....	44
Abbildung 36: Temperaturverteilung im Probekörper	44
Abbildung 37: MV3 Probekörper 1 nach dem Versuch.....	45
Abbildung 38: Temperaturverteilung im Probekörper	45
Abbildung 39: MV3 Probekörper 2 nach dem Versuch.....	46
Abbildung 40: Temperaturverteilung im Probekörper	46

Abbildung 41: MV4 Probekörper 1 nach dem Versuch.....	47
Abbildung 42: Temperaturverteilung im Probekörper	47
Abbildung 43: MV4 Probekörper 2 nach dem Versuch.....	48
Abbildung 44: Temperaturverteilung im Probekörper	48
Abbildung 45: MV5 Probekörper 1 nach dem Versuch.....	49
Abbildung 46: Temperaturverteilung im Probekörper	49
Abbildung 47: MV5 Probekörper 2 nach dem Versuch.....	50
Abbildung 48: Temperaturverteilung im Probekörper	50
Abbildung 49: MV6 Probekörper 1 nach dem Versuch.....	51
Abbildung 50: Temperaturverteilung im Probekörper	51
Abbildung 51: MV6 Probekörper 2 nach dem Versuch.....	52
Abbildung 52: Temperaturverteilung im Probekörper	52
Abbildung 53: MV7 Probekörper 1 nach dem Versuch.....	53
Abbildung 54: Temperaturverteilung im Probekörper	53
Abbildung 55: MV7 Probekörper 2 nach dem Versuch.....	54
Abbildung 56: Temperaturverteilung im Probekörper	54
Abbildung 57: MV8 Probekörper 1 nach dem Versuch.....	55
Abbildung 58: Temperaturverteilung im Probekörper	55
Abbildung 59: Temperaturdehnung und Vorspannung während des Brandversuches; links: Einzelmessungen; rechts: Kraft Mittelwert, Dehnung summiert.....	55
Abbildung 60: MV8 Probekörper 2 nach dem Versuch.....	56
Abbildung 61: Temperaturverteilung im Probekörper	56
Abbildung 62: MV9 Probekörper 1 nach dem Versuch.....	57
Abbildung 63: Temperaturverteilung im Probekörper	57
Abbildung 64: MV9 Probekörper 2 nach dem Versuch.....	58
Abbildung 65: Temperaturverteilung im Probekörper	58
Abbildung 66: MV10 Probekörper 1 nach dem Versuch.....	59
Abbildung 67: Temperaturverteilung im Probekörper	59
Abbildung 68: Temperaturdehnung und Vorspannung während des Brandversuches; links: Einzelmessungen; rechts: Kraft Mittelwert, Dehnung summiert.....	59
Abbildung 69: MV8 Probekörper 2 nach dem Versuch.....	60
Abbildung 70: Temperaturverteilung im Probekörper	60
Abbildung 71: MV11 Probekörper 1 nach dem Versuch.....	61
Abbildung 72: Temperaturverteilung Serie MV12.....	61

Abbildung 73: MV11 Probekörper 2 nach dem Versuch.....	62
Abbildung 74: Temperaturverteilung im Probekörper	62
Abbildung 75: MV12 Probekörper 1 nach dem Versuch.....	63
Abbildung 76 Temperaturverteilung im Probekörper	63
Abbildung 77: MV12 Probekörper 2 nach dem Versuch.....	64
Abbildung 78: Temperaturverteilung im Probekörper	64
Abbildung 79: MV13 Probekörper 1 nach dem Versuch.....	65
Abbildung 80: Temperaturverteilung im Probekörper	65
Abbildung 81: Temperaturdehnung und Vorspannung während des Brandversuches; links: Einzelmessungen; rechts: Kraft Mittelwert, Dehnung summiert.....	65
Abbildung 82: MV13 Probekörper 2 nach dem Versuch.....	66
Abbildung 83: Temperaturverteilung im Probekörper	66
Abbildung 84: MV14 Probekörper 1 nach dem Versuch.....	67
Abbildung 85: Temperaturverteilung im Probekörper	67
Abbildung 86: MV14 Probekörper 2 nach dem Versuch.....	68
Abbildung 87: Temperaturverteilung im Probekörper	68
Abbildung 88: Dehnung in Abhängigkeit der Gesteinskörnung, der Probekörperlagerung, des Luftporengehalts, der Betonsorte und der Zementsorte. GK: 1 - karbonatisch, 2 – Tunnelausbruch ATA, 3 – quarzitisch; Luft: 1 – hoch, 2 – niedrig. Bei MV 5 – MV7 konnten keine Daten gesammelt werden.	70
Abbildung 89: Anstieg der Vorspannkraft während einer Versuchsdauer von 90 Minuten	72
Abbildung 90: Masseverlust der Probekörper (Mittelwerte) nach 90Minuten	74
Abbildung 91: Vergleich der Temperaturen im Probekörper in Abhängigkeit der Sensorlage (mittig, seitlich).....	75
Abbildung 92: Temperaturunterschiede in 5cm Tiefe (mittlere Sensoren) bei Wasserlagerung bzw. Luftlagerung der Probekörper	76
Abbildung 93: Mittelwerte der Temperaturen in 5cm tiefe bei Luft- bzw. Wasserlagerung der Betonsorten 1 und 2 (Standardrezeptur).....	76
Abbildung 94: Gesamtübersicht der Temperaturen in 5 cm tiefe.....	77
Abbildung 95: Abkühlphase in Abhängigkeit der Versuchsdauer (Mittelwerte).....	78
Abbildung 96: links: Temperaturanstieg nach Versuchsende, rechts: Abkühlrate.....	78
Abbildung 96: Darstellung der intrinsischen Permeabilität.....	79
Abbildung 97: Prüfanlage zur Messung der Luftpermeabilität unter Temperaturbelastung	80

Abbildung 98: Links: Probe MV1 PK1; rechts: Bestimmung der intrinsischen Permeabilität	81
Abbildung 99: Links: Probe MV13 PK2; rechts: Bestimmung der intrinsischen Permeabilität.....	81
Abbildung 101: Einheitstemperaturkurve (t = Zeit [min]; T = Temperatur [°C]) nach EN 1363-1	82
Abbildung 102: Probekörper eins und zwei vor und nach dem Brandversuch	83
Abbildung 103: Dehydrierte und absandende Oberflächen der Probekörper.....	83
Abbildung 104: Porosität des Zementsteins bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen vor und nach dem Brandversuch	89
Abbildung 105: Adaptierter Brandraum für die Versuche mit den Großkörpern	91
Abbildung 106: verwendete Stahlschalungen	93
Abbildung 107: Vorbereitungen der Schalung für die Betonage	95
Abbildung 108: Fühler in der Höhe von 2,5, 5,5, 7,0, 25 und 35 cm mittig im Großprobekörper	96
Abbildung 109: Lagerung der Probekörper für die ersten 14 Tage.....	97
Abbildung 110: Mikroskopische Aufnahme (Vergrößerung 100-fach; Durchmesser Ge-101	
Abbildung 111: Mikroskopische Aufnahme (Vergrößerung 100-fach; Durchmesser Ge-103	
Abbildung 112: Temperaturverteilung im Probekörper	110
Abbildung 113: links: Probekörperunterseite mit Verblasstutzen nach dem Brandversuch; rechts Temperaturverteilung am Verblasstutzen	110
Abbildung 114: PK2 MV 101, Probekörper nach dem Brandversuch.	112
Abbildung 115: PK3 MV 101, Probekörper nach dem Brandversuch.	113
Abbildung 116: links: feine Risse an der Oberfläche des Beton. Rechts: Ablösungen des randlich unterlaufenen Zementsteins bis etwa 1 cm Tiefe.....	114
Abbildung 117: PK1 MV 102, Probekörper nach dem Brandversuch.	115
Abbildung 118: Rissbild an der verrußten Oberfläche bei PK1 MV 102.....	116
Abbildung 119: Prüfung der Abreißfestigkeit durch zentrisches Abziehen eines geklebten Stahlstempels von einer durch eine ringförmige Bohrung begrenzten Betonoberfläche.	117
Abbildung 120: Abreißfestigkeiten vor und nach dem Brandversuch an Großkörper.....	119
Abbildung 121: Hydraulische Spaltbreitenverteilung [μm] vor und nach dem Brandversuch	120

Abbildung 122: Überblick über die Zusammenhänge von Brandszenarien, Bemessungsbrandszenarien und Bemessungsbränden [sim0003]	123
Abbildung 123: Brandentwicklung zu Brandszenarium „Public Bus“ Nr. 02.03.0001	125
Abbildung 124: Brandleistungskurve zu Brandszenarium „Public Bus“ Nr. 02.03.0001 ..	126
Abbildung 125: Brandentwicklung zu Brandszenarium „Mixed Fire Load“Nr: 02.03.0002	126
Abbildung 126: Brandleistungskurve zu Brandszenarium „Mixed Fire Load“Nr: 02.03.0002	127
Abbildung 127: Brandentwicklung zu Brandszenarium „Heavy Goods Vehicle“Nr: 02.03.0003.....	128
Abbildung 128: Brandleistungskurve zu Brandszenarium „Heavy Goods Vehicle“Nr: 02.03.0003.....	128
Abbildung 129: Beim Brandversuch verwendeten Zugswagon mit Stahlkarosserie.....	129
Abbildung 130: Brandleistungskurve zu Brandszenarium „Railway Car“ Nr: 02.03.0004.	129
Abbildung 131: Schematische Darstellung „Subway Car, Alu“	130
Abbildung 132: Brandentwicklung zu Brandszenarium „Subway Car, Alu“Nr: 02.03.0005	130
Abbildung 133: Brandleistungskurve zu Brandszenarium „Subway Car, Alu“ Nr: 02.03.0005.....	131