

# **Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 73**

The logo for the Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) is displayed in a stylized, lowercase, green font with a white outline. The letters are bold and modern.



# **Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln**

von

Frank Dehn  
Peter Nause  
Michael Juknat  
Marko Orgass  
Andreas König

Gesellschaft für Materialforschung  
und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig GmbH

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 73**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

## **Impressum**

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.448/2007/ERB**  
Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln

**Projektbetreuung**  
Ingo Kaundinya

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

**Druck und Verlag**  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

ISSN 0943-9293  
ISBN 978-3-86918-063-2

Bergisch Gladbach, September 2010

## Kurzfassung

Das Gesamtziel des Forschungsprojektes zum „Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln“ war die Verifizierung und Validierung des Einflusses von Kunststofffasern auf das Brand- und Abplatzverhalten von Tunnelbetonen unter der besonderen Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen in Straßentunneln. Dabei sollte im Rahmen der Forschungsarbeit eruiert werden, inwieweit sich mit Kunststofffasern modifizierte Tunnelbetone, die entsprechend ihrer Betonzusammensetzung den gültigen Vorgaben der ZTV-ING zusammengesetzt werden sollten, für den Straßentunnelbau als bauliche Brandschutzmaßnahme eignen.

Es wurde untersucht, welche Fasergehalte und Fasergeometrien in den Tunnelbetonen einzusetzen sind, damit ein explosionsartiges Abplatzen des Betons infolge der Brandbeanspruchungen mit dem schnellen Temperaturanstieg und den hohen Maximaltemperaturen verhindert werden kann. Des Weiteren wurden experimentell verifiziert, ob bei den festgelegten Betonen ohne Faserzugabe und fasermodifizierten Tunnelbetonen, die zulässige Maximaltemperatur von 300°C in Höhe der tragenden Bewehrung (vgl. ZTV-ING, Teil 5 (Tunnelbau), Abschnitt 1, 10.3.2) nicht überschritten wird.

Ein weiteres Ziel der Arbeit war es, herauszufinden, ob die in der ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 2, 10.3.2 (2), geforderte verzinkte Mattenbewehrung (N94) für die offene Bauweise als wirksamer Schutz gegen auftretende Abplatzungen infolge einer einseitigen Temperaturbeanspruchung durch die ZTV-ING-Kurve angesetzt werden kann.

Diese zuvor beschriebenen grundlegenden Zielstellungen wurden vor allem an großmaßstäblichen Bauteilversuchen experimentell untersucht. Dabei wurden entsprechend der Trennung in ZTV-ING für Tunnelbauwerke in die geschlossene Bauweise (ZTV-ING, Teil 5, Tunnelbau, Abschnitt 1 und in die offene Bauweise (ZTV-ING, Teil 5, Tunnelbau, Abschnitt 2) angepasste Tunnelbetonrezepturen und verschiedene Probekörpergeometrien untersucht. Mit der Durchführung des Forschungsprojektes sollte insgesamt der Nachweis des positiv wirksamen Einflusses von PP-Fasern auf das Brand- und Abplatzverhalten von ZTV-ING-konformen Tunnelbetonen für die Anwendung in Straßentunneln erbracht und zudem im Großversuch gezeigt werden, dass es möglich ist, fasermodifizierte Tunnelbetone mit Praxis üblichen Einbaukonsistenzen zielsicher herzustellen.

## Abstract

The overall aim of the research project on the “Fire and spalling behaviour of fibre reinforced concrete in road tunnels” was the verification and validation of the effect of synthetic fibres on the fire and spalling behaviour of tunnel concretes, in particular taking into account the specific conditions in road tunnels. The task of this research work was to determine to what extent tunnel concretes modified by adding synthetic fibres whose concrete composition should comply with the valid regulations of the ZTV-ING (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten) are suitable as a means of structural fire protection in road tunnel construction.

Tests were made to determine which synthetic fibre content and fibre geometry should be used in concretes for tunnels to prevent the explosive spalling of the concrete as a result of exposure to fire with a rapid rise in temperatures and the high maximum temperatures reached. In addition, experiments were carried out to verify if the admissible maximum temperature of 300°C at the height of the load-bearing reinforcement (see ZTV-ING, part 5, section 1, 10.3.2) is not exceeded by the defined concrete materials without synthetic fibres and tunnel concretes modified by the addition of fibres.

Another aim of the study was to establish if the zinc-coated wire mesh reinforcement (N94), required by ZTV-ING, part 5, section 2, 10.3.2 (2) for open-cut tunnelling can be used as an effective protection against spalling occurring as a result of one-sided exposure to high temperatures as per the ZTV-ING fire curve.

These basic targets as previously described were mostly studied in experiments using large-scale construction elements. In accordance with the distinction drawn in ZTV-ING for tunnel constructions, experiments were performed with tunnel concrete mixtures adapted for closed tunnel construction (ZTV-ING, part 5, section 1) as well as open-cut tunnelling (ZTV-ING, part 5, section 2) and with different test specimen geometries. The overall aim of the research project was to provide evidence for the positive effect of PP fibres on the fire and spalling behaviour of tunnel concrete materials for use in road tunnels compliant with ZTV-ING, and to show in large-scale trials that it is possible to produce tunnel concretes modified with fibres with construction consistencies common in practice and in a targeted manner.



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>BEMESSUNG UND HERSTELLUNG DER GROßMAßTÄBLICHEN PROBEKÖRPER .....</b>	<b>28</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>3</b>	5.1	Allgemeines.....	28
<b>1 ALLGEMEINES .....</b>	<b>7</b>	5.2	Probekörper für die geschlossene Bauweise .....	28
1.1	Stand der Technik .....	5.2.1	Probekörpergeometrie .....	28
1.2	Ziel der Forschungsarbeit.....	5.2.2	Statische Bemessung .....	29
1.3	Aufbau der Forschungsarbeit.....	5.2.3	Herstellung der Probekörper.....	30
<b>2 BETONREZEPTUREN .....</b>	<b>9</b>	5.3	Probekörper für die offene Bauweise.....	33
2.1	Allgemeines.....	5.3.1	Probekörpergeometrie .....	33
2.2	Betonausgangsstoffe.....	5.3.2	Statische Bemessung .....	33
2.2.1	Allgemeines.....	5.3.3	Herstellung der Probekörper.....	34
2.2.2	Zement .....	<b>6 DURCHFÜHRUNG DER GROßBRANDVERSUCHE.....</b>	<b>37</b>	
2.2.3	Betonzusatzstoffe.....	6.1	Allgemeines.....	37
2.2.4	Zugabewasser.....	6.2	Durchführung der Großbrandversuche an den Probekörpern für die geschlossene Bauweise.....	37
2.2.5	Betonzusatzmittel.....	6.2.1	Allgemeines .....	37
2.2.6	Gesteinskörnungen .....	6.2.2	Prüfaufbau .....	37
2.3	Rezepturentwicklung für die Kleinbrandversuche.....	6.2.3	Thermische Beanspruchung.....	38
2.3.1	Allgemeines.....	6.2.4	Messtechnik in den Probekörpern .....	40
2.3.2	Betonrezepturen.....	6.2.5	Durchführung und Prüfbeobachtungen	40
<b>3 KLEINBRANDVERSUCHE.....</b>	<b>15</b>	6.2.6	Bestimmung der Masseverluste .....	45
3.1	Herstellung Frischbeton .....	6.2.7	Bestimmung der Abplatztiefen.....	45
3.2	Herstellung Prüfkörper .....	6.2.8	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	49
3.3	Konditionierung der Prüfkörper .....	6.3	Durchführung der Großbrandversuche an den Probekörpern für die offene Bauweise .....	50
3.4	Bestimmung der Material-kennwerte .....	6.3.1	Allgemeines .....	50
3.5	Prüfaufbau - Kleinbrandversuche.....	6.3.2	Prüfaufbau .....	50
3.6	Durchführung der Prüfungen.....	6.3.3	Thermische Beanspruchung.....	51
3.7	Prüfbeobachtungen / Ergebnisse .....	6.3.4	Messtechnik .....	51
3.7.1	Ergebnisse der Prüfung 1 .....	6.3.5	Durchführung und Prüfbeobachtungen	52
3.7.2	Ergebnisse der Prüfung 2 .....	6.3.6	Bestimmung der Masseverluste .....	55
3.7.3	Ergebnisse der Prüfung 3 .....	6.3.7	Bestimmung der Abplatztiefen.....	55
3.7.4	Ergebnisse der Prüfung 4 .....	6.3.8	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	57
3.7.5	Zusammenfassung der Prüfergebnisse	<b>7 BETONTECHNOLOGISCHE MACHBARKEITSSTUDIE.....</b>	<b>58</b>	
3.8	Bewertung der Prüfergebnisse.....	7.1	Allgemeines.....	58
3.8.1	Allgemeines.....	7.2	Arbeitspaket 1 - Laborversuche .....	58
3.8.2	Rezeptur für geschlossene Bauweise...	7.2.1	Wasseranspruch des Bindemittels .....	59
3.8.3	Rezeptur für offene Bauweise.....	7.2.2	Wechselwirkung zwischen PCE- Fließmittel und Bindemittelsystem .....	59
3.8.4	Zusammenfassung.....	7.2.3	Einfluss von weiteren Zusatzmitteln .....	59
<b>4 OPTIMIERUNG DER BETONREZEPTUREN .....</b>	<b>25</b>	7.2.4	Beton.....	59
4.1	Allgemeines.....	7.2.5	Sieblinie .....	60
4.2	Durchführung von großvolumigen Eignungsmischungen .....	7.2.6	Bindemittelzusammensetzung.....	60
4.3	Festlegung der Rezepturen.....	7.2.7	Kunststofffaserart.....	61

7.2.8	Zeitpunkt der Faserzugabe .....	61
7.2.9	w/z- bzw. $(w/z)_{eq}$ -Wert .....	61
7.2.10	Festigkeitsentwicklung .....	61
7.3	Arbeitspaket 2: Großmisch- und Pumpversuche.....	61
7.3.1	Geschlossene Bauweise .....	62
7.3.2	Offene Bauweise .....	62
7.4	Zusammenfassung.....	63
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>64</b>
<b>9</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>65</b>
<b>10</b>	<b>ANLAGENVERZEICHNIS .....</b>	<b>66</b>

# 1 Allgemeines

## 1.1 Stand der Technik

In den vergangenen zehn Jahren hat das Brand- und Abplatzverhalten von Betonen für Tunnelbauwerke und damit auch der vorbeugende bauliche Brandschutz für diese unterirdischen Bauwerke extrem an Bedeutung gewonnen. Infolge der schlimmen Brandkatastrophen im Montblanc- und Tauerntunneln sowie auch im Euro-Tunnel wurden neue Konzepte erdacht, die insbesondere unter Beachtung der spezifischen Randbedingungen des Tunnelbaus, eine alleinige Schutzwirkung dem Tunnelbeton zuweisen. Dabei werden den Mischungskonzeptionen kurze Kunststofffasern aus Polypropylen zugegeben, die nachweislich einen positiven Einfluss auf die Reduzierung des Brand- und Abplatzverhaltens der Betone für den Tunnelbau haben.

Aktuelle Literaturrecherchen zur Thematik des Einflusses der Polypropylenfasern (PP-Fasern) auf das Brand- und Abplatzverhalten und auch eigene, an der MFPA Leipzig GmbH durchgeführte Untersuchungen an Tunnelbetonen haben gezeigt, dass die Konzeption, Überprüfung und Anwendung von kunststofffasermodifizierten, brandbeständigen Betonen für Tunnelbauwerke für die Gewährleistung eines ausreichenden vorbeugenden baulichen Brandschutzes möglich scheinen.

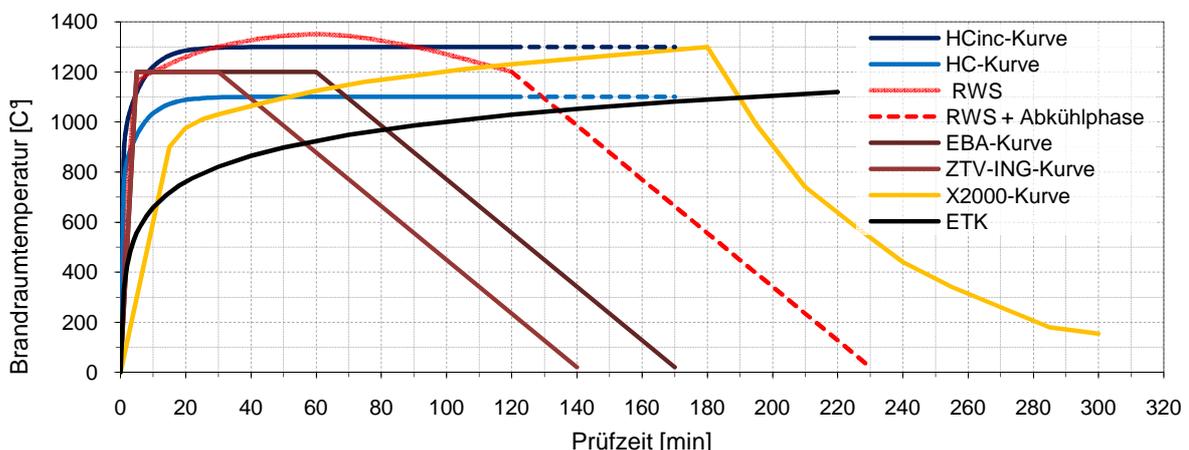
An der MFPA Leipzig GmbH wurden in den letzten Jahren umfangreiche Erfahrungen bei der Prüfung von kleinmaßstäblichen und großmaßstäblichen Probekörpern mit Betonen ohne Fasern und fasermodifizierten Tunnelbetonen gesammelt. Dazu wurden im Rahmen der verschiedenen Projekte spezielle Tunnelbrandöfen und Versuchsaufbauten konzipiert, in denen sehr unterschiedliche Temperatur-Zeit-Modelle zur Beanspruchung der Probe-

körper zur Anwendung kamen. Dazu gehören unter anderem:

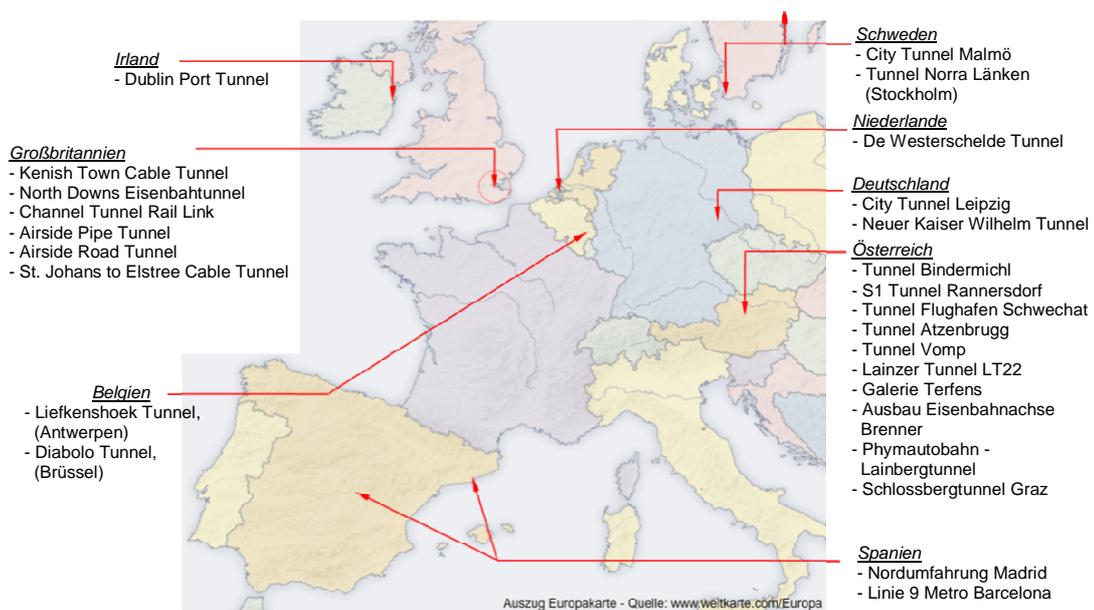
- ZTV-ING Kurve,
- Rijkswaterstaat-Kurve (RWS-Kurve),
- EBA- bzw. RABT-Kurve,
- Hydrocarbon-Kurven (HC- und HC<sub>inc</sub>-Kurven),
- und spezielle Tunnelbrandszenarien, wie z. B. X2000-Kurve für den City Tunnel Malmö.

Die grafische Übersicht zum Vergleich der oben, genannten Temperatur-Zeit-Modelle kann dem Bild 1 entnommen werden.

Aus mehreren Forschungsvorhaben und Praxisanwendungen, die vor allem im europäischen Ausland realisiert wurden, ist mittlerweile bekannt, dass die zusätzliche Applikation von Kunststofffasern einen positiven Einfluss auf das Brand- und Abplatzverhalten haben kann. Es wurde nachgewiesen, dass die Faserzugabe außerdem zu einer deutlichen oder gar vollständigen Reduzierung der explosionsartigen Abplatzungen führen kann. Im bisher einzigen deutschen Bauprojekt werden derzeit am Leipziger City Tunnel Stahlbeton-Tübbings verbaut, die unter Verwendung von PP-Fasern als brandbeständig eingestuft werden können. In der grafischen Übersicht in Bild 2 werden aktuelle europäische Tunnelbauprojekte aufgeführt, bei denen Betone mit einer gezielten Applikation von kurzen Kunststofffasern für die Verbesserung der Brandbeständigkeit verwendet wurden und werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass vor allem in Österreich die eine Vielzahl von Projekten mit fasermodifizierten Tunnelbetonen in der jüngsten Vergangenheit realisiert wurden. Die Anwendung von PP-Faserbewehrungen ist in Österreich in den Richtlinien „Faserbeton“ und „Brandwirkungen (Straße, Eisenbahn, U-Bahn)“ der österreichischen Vereinigung für Beton- und Bauteiltechnik (ÖVBB) geregelt. In Deutschland existieren zu diesem Thema bisher noch keine normativen Richtlinien und Regelungen.



**Bild 1** Verschiedene Temperatur-Zeit-Modelle für Brandbeanspruchungen Tunnelbau [1]



**Bild 2** Aktuelle europäische Tunnelbauprojekte unter Verwendung von fasermodifizierten Betonen

## 1.2 Ziel der Forschungsarbeit

Das Gesamtziel des Forschungsprojektes zum „Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln“ war die Verifizierung und Validierung des Einflusses von Kunststofffasern auf das Brand- und Abplatzverhalten von Tunnelbetonen unter der besonderen Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen in Straßentunneln. Dabei sollte im Rahmen der Forschungsarbeit eruiert werden, inwieweit sich mit Kunststofffasern modifizierte Tunnelbetone, die entsprechend ihrer Betonzusammensetzung den gültigen Vorgaben der ZTV-ING zusammengesetzt werden sollten, für den Straßentunnelbau als bauliche Brandschutzmaßnahme eignen.

Es war zu untersuchen, welche Fasergehalte und Fasergeometrien in den Tunnelbetonen einzusetzen sind, damit ein explosionsartiges Abplatzen des Betons infolge der Brandbeanspruchungen mit dem schnellen Temperaturanstieg und den hohen Maximaltemperaturen verhindert werden kann. Des Weiteren war im Rahmen der Forschungsarbeit zu untersuchen, ob bei den festgelegten Betonen ohne Faserzugabe und fasermodifizierten Tunnelbetonen die zulässige Maximaltemperatur von max. 300°C in Höhe der tragenden Bewehrung (vgl. ZTV-ING, Teil 5 (Tunnelbau), Abschnitt 1, 10.3.2 [2]) nicht überschritten wird.

Ein weiteres Ziel der Arbeit war es, herauszufinden, ob die in der ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 2, 10.3.2 (2) [3], geforderte verzinkte Mattenbewehrung (N94) für die offene Bauweise

als wirksamer Schutz gegen auftretende Abplatzungen infolge einer einseitigen Temperaturbeanspruchung durch die ZTV-ING-Kurve angesetzt werden kann.

Diese grundlegenden, zuvor beschriebenen Zielstellungen wurden vor allem an den großmaßstäblichen Bauteilversuchen experimentell untersucht. Dabei wurden entsprechend der Trennung in ZTV-ING für Tunnelbauwerke in die geschlossene Bauweise (ZTV-ING, Teil 5, Tunnelbau, Abschnitt 1 [2]) und in die offene Bauweise (ZTV-ING, Teil 5, Tunnelbau, Abschnitt 2 [3]) angepasste Tunnelbetonrezepturen und verschiedene Probekörpergeometrien untersucht. Mit der Durchführung des Forschungsprojektes sollte insgesamt der Nachweis des positiv wirksamen Einflusses von PP-Fasern auf das Brand- und Abplatzverhalten von ZTV-ING konformen Tunnelbetonen für die Anwendung in Straßentunneln erbracht werden.

### 1.3 Aufbau der Forschungsarbeit

Die Forschungsarbeit der MFPA Leipzig GmbH wurde modular aufgebaut und bearbeitet. Basierend auf dem aktuellen Kenntnisstand zum Brand- und Abplatzverhalten von fasermodifiziertem Beton für Tunnelbauwerke wurden in gemeinsamer Abstimmung mit dem Forschungsgeber ZTV-ING-konforme Tunnelbetonrezepturen für die Anwendung der experimentellen Untersuchungen festgelegt, wobei die jeweils besonderen Randbedingungen der geschlossenen und der offenen Bauweise von Tunnelbauwerken Berücksichtigung fanden.

An den festgelegten Betonrezepturen wurden im nächsten Bearbeitungsschritt verifizierende Kleinbrandversuche an unbelasteten Kleinprobekörpern durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse stellten die Grundlage für die Festlegung der Betonrezepturen dar, mit denen die Probekörper für die großmaßstäblichen Brandversuche hergestellt wurden.

Die abschließenden Brandversuche an großmaßstäblichen Tunnelbauteilen stellten den Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen des Forschungsvorhabens dar. Dabei wurden in Abhängigkeit von den vorhandenen Belastungseinrichtungen und Prüfaufbauten, getrennt nach der geschlossenen und nach der offenen Bauweise, verschiedene Bauteilgeometrien auf deren Brand- und Abplatzverhalten bei einseitiger Brandbeanspruchung durch die ZTV-ING-Kurve geprüft.

Die Konzipierung der Großbrandversuche hinsichtlich der Geometrie und der Belastung der Probekörper stützte sich vor allem auf die einschlägigen Erfahrungen der MFPA Leipzig GmbH mit vergleichbaren Prüfaufbauten.

Wichtige Aspekte bei der Entwicklung des Versuchsprogramms für die großmaßstäblichen Probekörper stellten dabei die Verwendung von original- bzw. großmaßstäblichen Probekörpergeometrien und die Wahl und Abstimmung von realistischen Einwirkungen zur Simulation von nahezu realen Schnittgrößen bzw. Spannungszuständen in den Querschnitten der belasteten Probekörpergeometrien dar.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Bearbeitungsschritte der Forschungsarbeit näher erläutert. Die aus den experimentellen Untersuchungen resultierenden Ergebnisse werden dargestellt und bewertet.

Ergänzend zu den beschriebenen Arbeitspaketen wurde die MFPA Leipzig GmbH mit einer Machbarkeitsstudie zur Optimierung der untersuchten Betonrezepturen beauftragt. In dieser war der

endgültige Nachweis zu erbringen, dass die gewählten Betonrezepturen für die geschlossene und die offene Bauweise so optimiert werden können, dass sie baupraktisch nutzbar sind. Dazu gehörte unter anderem die Sicherstellung der Frischbetoneigenschaften sowie der Nachweis der Pumpfähigkeit.

## 2 Betonrezepturen

### 2.1 Allgemeines

Bauteile von Straßentunnelbauwerken werden getrennt nach offener und geschlossener Bauweise in Abhängigkeit der geometrischen Lage im Gesamtbauwerk und den Bauteilabmessungen durch unterschiedliche Umwelteinwirkungen beansprucht.

Vor allem in den Portalbereichen von Straßentunneln müssen die Betone zusätzlich zu dem ggf. durch die Tunnelatmosphäre verstärkten Effekt der Karbonatisierung (XC) auch einen hohen Widerstand gegenüber den Einwirkungen einer Frost-Tauwechsel-Beanspruchungen bzw. einer Frost-Taumittel-Wechselbeanspruchungen (XF) sowie einen hohen Eindringwiderstand gegen angreifende Chloride (XD) besitzen. Durch die vorhandenen Beanspruchungen werden die Betone für die Tunnelinnenschalen und die Tunnelwände im Einfahrtsbereich in die maßgebenden Expositionsklassen XD2 und XF2 eingeordnet.

Entsprechend der derzeit gültigen Fassung der ZTV-ING, Teil 3, Abschnitt 1, Absatz 4 mit dem Stand vom Juli 2006 können die Betone für diese Bauteile, abweichend vom gültigen DIN-Fachbericht 100, auch ohne die zusätzliche Applikation von luftporenbildenden Betonzusatzmitteln so zusammengesetzt sein, dass die Betone zum Bemessungszeitalter die Mindestdruckfestigkeitsklasse C30/37 besitzen.

Die zugehörigen Anforderungen an die Grenzwerte der Betonzusammensetzung und die dabei verwendeten Ausgangsstoffe werden für die zuvor beschriebenen Expositionsklassen bei der Konzeption der fasermodifizierten, brandbeständigen Betone für das BAST-Forschungsprojekt „Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln“ berücksichtigt. Diese können entsprechend der nachfolgend aufgeführten Tabelle 1 zusammengefasst werden.

**Tabelle 1** Grenzwerte der Betonzusammensetzung für die hier maßgebende Expositionsklasse XF2 nach ZTV-ING

	geschlossene Bauweise	offene Bauweise
max. w/z-Wert	0,50	0,50
Mindestdruckfestigkeitsklasse	C30/37	C30/37
Mindestzementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	320	320
Mindestzementgehalt bei der Anrechnung von Betonzusatzstoffen [kg/m <sup>3</sup> ]	270 <sup>1)</sup>	keine Anrechnung zulässig
Mindestluftgehalt [%]	--	--
andere Anforderungen	Gesteinskörnungen mit Regelanforderungen und zusätzlichem Widerstand gegen Frost bzw. Frost- und Taumittel	

<sup>1)</sup> Anrechnung von Betonzusatzstoffen nur nach spezieller Eignungsprüfung gemäß ZTV-ING Teil 3, Abschnitt 1, Abs. 3.2 (7) zulässig (Stand:07/2006) [4]

## 2.2 Betonausgangsstoffe

### 2.2.1 Allgemeines

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde die Auswahl der einzelnen Betonausgangsstoffe für die herzustellenden ZTV-ING-konformen Tunnelbetone der geschlossenen und der offenen Bauweise in Abhängigkeit der in Tabelle 1 beschriebenen Grenzwerte getroffen. Hinsichtlich der Auswahl von geeigneten Betonzusatzstoffen sowie Betonzusatzmitteln wurde ebenfalls die Anforderung berücksichtigt, dass bei der Herstellung der Tunnelbetone nur bauaufsichtlich zugelassene oder genormte Bauprodukte bzw. Baustoffe eingesetzt werden dürfen, die einen entsprechenden Verwendbarkeitsnachweis haben. In gemeinsamer Abstimmung mit dem Forschungsgeber wurden für die Herstellung der Tunnelbetone für die Probekörper der verifizierenden Kleinbrandversuche folgende Ausgangsstoffe verwendet.

### 2.2.2 Zement

Die Recherchen zum Forschungsprojekt haben ergeben, dass in Zukunft die Verwendung von Portlandzementen (CEM I) rückläufig sein wird. Dies kann in den hohen Kosten für den Herstellungsprozess begründet werden. In Zukunft werden für die Anwendung von Betonen für den Tunnelbau reine Portlandzemente verstärkt durch Portlandkompositzemente (CEM II) oder durch Hochofenzemente (CEM III) ersetzt werden.

Um den Einfluss auf das Brand- und Abplatzverhalten der gemäß DIN EN 197-1:2004 [5] zulässigen Hauptbestandteilen in den Portlandkomposit- und Hochofenzementen zu vermeiden, wurden bei der Herstellung der Betone für die verifizierenden Kleinprüfkörper zunächst auf „bewährte Systeme“ zurückgegriffen. Dem entsprechend wurden nach Abstimmung mit dem Forschungsgeber alle Mischungskonzeptionen mit einem CEM I 32,5 R hergestellt.

In einer ergänzenden Untersuchungsreihe wurden im Rahmen der Vorversuche zusätzlich für die Mischungsrezeptur der geschlossenen Bauweise ein Portlandkompositzement CEM II/A-S 42,5 R sowie für den Betonentwurf der offenen Bauweise ein Hochofenzement CEM III/A 42,5 N bei der Herstellung der Kleinprüfkörper verwendet.

### 2.2.3 Betonzusatzstoffe

#### Steinkohleflugasche

Bei der Konzeption von Betonen mit speziellen Eigenschaften werden sehr häufig gezielt verschiedene Betonzusatzstoffe eingesetzt. Die zur Bearbeitung des Forschungsvorhabens durchgeführte Literatur- und Rezepturrecherche hat ergeben, dass bei einer Vielzahl von aktuellen Tunnelbauprojekten Flugasche als Betonzusatzstoff verwendet wurde. Diese Tendenz kann einerseits damit begründet werden, dass durch die Anwendung dieses Zusatzstoffes, auf Grund der rheologisch günstig wirkenden, kugeligen Kornform und Korngrößenverteilung, die Verarbeitbarkeit verbessert wird. Andererseits werden zusätzlich durch die puzzolanische Wirkung der Flugasche in der Regel verbesserte mechanische Kennwerte, höhere Packungsdichten in der Betonmatrix und somit auch bessere Dauerhaftigkeitseigenschaften erreicht [6]. Im Tunnelbau wird Steinkohleflugasche außerdem zugegeben, da diese zusätzlich zu einer Reduzierung der Hydratationswärme führt und somit eine Reduzierung von Eigen- bzw. Zwangsspannungen bewirkt.

Damit die oben genannten günstigen Auswirkungen des Einsatzes von Flugasche auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften auch im Forschungsprojekt „Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln“ Anwendung fand, wurde bei der Entwicklung der kunststoffasermodifizierten Betone die Zugabe von Steinkohleflugasche als Betonzusatzstoff vorgesehen. Es konnte anhand der bisherigen Erfahrungen des Forschungsnehmers mit polypropylenfasermodifizierten Betonen und durch die durchgeführte aktuelle Literatur- so-

wie Rezepturrecherche davon ausgegangen werden, dass zur Herstellung eines Tunnelbetons mit der zusätzlichen, planmäßigen Anwendung von Polypropylenfasern zur Sicherstellung der Brand- und Abplatzbeständigkeit des Betons ein Betonzusatzstoff (Flugasche) zur Gewährleistung von baupraktisch relevanten Frischbetoneigenschaften zweckmäßig ist.

Entsprechend der derzeit gültigen Fassung der ZTV-ING, Teil 3, Abschnitt 1, Abs. 3.2 (7-9) [4], wurde dabei die Möglichkeit berücksichtigt, dass abweichend vom DIN-Fachbericht 100 [7] für die Expositionsklasse XF2, der Flugascheanteil auf den Mindestzementgehalt und auf den Wasserzement angerechnet werden darf. Damit konnte zumindest bei den Tunnelbetonrezepturen für die geschlossene Bauweise ein höherer Wasseranteil zugegeben werden, was sich theoretisch günstig auf PP-Faseranwendung auswirken sollte. Entsprechend der vorliegenden Erfahrungen der MFPA Leipzig GmbH werden im europäischen Ausland fasermodifizierte Tunnelbetonrezepturen in der Regel mit höheren Wasserzementwerten als mit den gemäß ZTV-ING maximal zulässigen Grenzwerten für Tunnelbetone mit den erforderlichen Expositionsklassen hergestellt. Die Wasserzementwerte liegen bei diesen Betonen in der Regel oberhalb des Wertes von  $w/z = 0,55$ .

Für den Betonentwurf der offenen Bauweise galt wie bisher die Annahme, dass Flugasche dem Beton bis zu einem maximalen Anteil von 60 M-% vom Zement zugegeben werden darf, aber diese keine rechnerische Berücksichtigung bei der Berechnung des Wasserzementwertes und beim Mindestzementgehalt findet.

Bei der Herstellung der kleinmaßstäblichen Prüfkörper wurde seitens des Forschungsnehmers eine Steinkohleflugasche verwendet, deren Anwendung nach DIN EN 450 [8] bzw. in einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung für die Anwendung in einem Beton für die maßgebenden Expositionsklassen XF2, XD2 geregelt ist.

Für die Erstellung der Tunnelbetonrezepturen des Forschungsprojektes wurde die Flugasche vom Typ SAFAMENT® HKV (allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung: Z-3.31-1917) gewählt und bei den experimentellen Untersuchungen angewandt.

### **Polypropylenfasern**

Wie bereits im Abschnitt 1.1 beschrieben wurde, kann entsprechend verschiedener Forschungsvorhaben und Praxisberichte durch die Zugabe von Kunststofffasern eine deutliche oder gar eine voll-

ständige Reduzierung der explosionsartigen Abplatzungen bei einer schnellen, hohen Temperaturbeanspruchung erreicht werden. Diese wirksame Reduzierung von möglichen Abplatzungen wird durch die Ausbildung eines Porensystems erreicht, da die Fasern einerseits bei einem Brandangriff schmelzen und durchgängige Mikroporen öffnen. Des Weiteren eine poröse Übergangszone zwischen der Matrix und den Fasern ausgebildet, wodurch es zu einem frühzeitigen und ausreichenden Abbaus des bei der Aufheizung entstehenden hohen Dampfdruckes kommen kann.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten ZTV-ING-konforme Tunnelbetone hergestellt werden. Dem entsprechend ergab sich die Forderung, dass nur normativ geregelte oder bauaufsichtlich zugelassene Ausgangsstoffe verwendet werden können. Die Recherchen der MFPA Leipzig GmbH haben ergeben, dass für die Anwendung als Betonzusatzstoff in Deutschland nur drei verschiedene Arten von Polypropylenfasern mit einer gültigen bauaufsichtlichen Zulassung existieren. Dazu gehören:

- PB-Eurofiber-Fasern zur Verwendung in Beton (Zulassungsnummer: Z-3.73.1878; Zulassung gültig bis 30.06.2011),
- Polypropylenfaser KampeFibrin PM (Zulassungsnummer: Z-3.73.1901 Zulassung gültig bis 31.07.2011) und
- PPE-Faser STRUX® 90/40 zur Verwendung in Beton (Zulassungsnummer: Z-3.73.1937; Zulassung gültig bis 31.03.2012).

Durch den Forschungsnehmer wurde auf Grund der bereits bestehenden positiven Erfahrungen an vorab bearbeiteten Projekten PP-Fasern der Firma ift-Fasertechnik gewählt. Die Fasern der o.g. Firma werden unter dem Handelsnamen Polyloc® geführt und entsprechen den bauaufsichtlich zugelassenen Fasern vom Typ PB-Eurofiber-Fasern. Dem entsprechend gilt ebenfalls die oben aufgeführte bauaufsichtliche Zulassung mit der, DIBt-Zulassungsnummer Z-3.73.1878.

Die Recherchen sowie eigene Erfahrungen der MFPA Leipzig GmbH bezüglich der Faserzugabe haben ergeben, dass vorzugsweise die Möglichkeit besteht, die PP-Fasern dem Trockengemisch der Betonausgangsstoffe zuzugeben. Andererseits wurde in Gesprächen mit Herstellern von Kunststofffaserbetonen die auch die Variante erläutert, dass die Fasern erst nach der Zugabe der flüssigen Bestandteile dem Feuchtgemisch zugegeben werden können. Diese unterschiedlichen Zugabeoptionen liegen vor allem in den Dosieranlagen der Mischwerke begründet. Wäh-

rend in einigen Mischwerken und vor allem auch im Labor, die Möglichkeit besteht die Fasern gemeinsam mit den trockenen, festen Betonausgangsstoffen zuzugeben, ist dies bei anderen Mischwerken technisch nicht möglich. Bei der Herstellung der Tunnelbetone für die verifizierenden Kleinbrandversuche wurde an der MFPA Leipzig GmbH unter labortechnischen Bedingungen gearbeitet. Daher wurde entschieden, für die kleinmaßstäblichen Probekörper die Fasern dem Trockengemisch zuzugeben.

#### 2.2.4 Zugabewasser

Für die Herstellung der Betone wurde Leitungswasser aus dem regionalen Wassernetz verwendet. Auf die gemäß ZTV-ING vorgesehene Eignungsuntersuchung konnte somit auf Grund der vorausgesetzten Trinkwasserqualität verzichtet werden.

#### 2.2.5 Betonzusatzmittel

Im Rahmen der Herstellung der Kleinprüfkörper wurden durch den Forschungsnehmer nur bauaufsichtlich zugelassene Betonzusatzmittel eingesetzt. Als Fließmittel kam ein Betonzusatzmittel auf Polycarboxylatetherbasis mit der Bezeichnung Glenium Sky<sup>®</sup> 501 zur Anwendung, welches entsprechend der Herstellerangabe im Tunnelbau eingesetzt werden kann.

Durch die Zugabe der Fasern konnte eine deutliche Reduzierung der guten Ausgangskennwerte der Frischbetonkonsistenz der Referenzbetone beobachtet werden. Den Konsistenzverlusten wurde dabei zum Teil mit der Erhöhung des Fließmittelgehaltes entgegengewirkt. Dabei wurde teilweise eine Neigung zum Bluten des Frischbetons beobachtet. Für eine Tunnelbetonrezeptur wurde daher zusätzlich auch ein bauaufsichtlich zugelassener Stabilisierer mit der Bezeichnung RheoMatrix<sup>®</sup> 100 eingesetzt.

#### 2.2.6 Gesteinskörnungen

Entsprechend dem Forschungsantrag wurden für die groben Gesteinskörnungen  $d > 2 \text{ mm}$  sowohl quarzitisches als auch kalzitische Gesteinskörnungen eingesetzt. Damit sollten im aktuellen Forschungsprojekt die Auswirkungen der chemisch-mineralogischen sowie der petrographischen Zusammensetzungen der verschiedenen Gesteinskörnungen untersucht werden. Somit konnten auch

die regionalen Unterschiede in den Gesteinskörnungsvorkommen der regionalen Lagerstätten in Deutschland berücksichtigt werden.

Da in der Praxis in der Regel keine gebrochenen Gesteine als feine Gesteinskörnung eingesetzt werden, wurde für alle Tunnelbetone im Bereich der feinen Gesteinskörnungen mit den Korndurchmessern von 0-2 mm ein quarzitischer Sand verwendet. Das maximale Größtkorn wurde abstimmungsgemäß bei den hergestellten Betonkonzeptionen auf den Durchmesser  $\leq \varnothing 16 \text{ mm}$  begrenzt und es wurden jeweils drei verschiedene Kornfraktionen verwendet.

Die quarzitischen Gesteinskörnungen wurden von der Sehring Sand und Kies GmbH aus Langen bezogen und die gebrochenen kalzitischen Gesteinskörnungen wurden aus dem Kalksteinwerk Medenbach GmbH angeliefert.

### 2.3 Rezepturentwicklung für die Kleinbrandversuche

#### 2.3.1 Allgemeines

Die Grundlage für die im Mittelpunkt dieses Forschungsvorhabens stehenden Großbrandversuche bildeten die verifizierenden Brandversuche an kleinmaßstäblichen Probekörpern (Würfel mit 150 mm Kantenlänge). Diese wurden mit ihren unterschiedlichen Zusammensetzungen unter Ansatz der Temperatur-Zeit-Kurve nach ZTV-ING, Teil 5, Tunnelbau, Bild 5.1.3, unter fünfseitiger Brandbeanspruchung geprüft.

Die Rezepturentwicklung für die Betone der verifizierenden Kleinbrandversuche erfolgte unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.1 dieses Berichtes aufgeführten Anforderungen an Tunnelinnenschalenbetone der ZTV-ING, Teil 3, Massivbau und Teil 5, Tunnelbau.

Für eine möglichst breite Anwendung im Tunnelbau wurden die Betone so konzipiert, dass sie den Beanspruchungen im Einfahrtsbereich von Tunneln in geschlossener und offener Bauweise entsprechen. Deshalb wurden die maximal zulässigen Zugabemengen der Betonausgangsstoffe entsprechend den Anforderungen der ZTV-ING gewählt (Einfahrtsbereiche von Tunnelbauwerken: Expositionsklassen XF2 und XD2).

### 2.3.2 Betonrezepturen

Zur Eingrenzung von umfangreichen, möglichen Mischungsvariationen, hinsichtlich der Menge und der Art der verschiedenen Betonausgangsstoffe, wurden in gemeinsamer Abstimmung dem Forschungsgeber vier verschiedene Referenzbetone zur Herstellung der kleinmaßstäblichen Probekörper festgelegt.

Die Tunnelbetonrezepturen wurden dabei jeweils nach der Art der Anwendung im Tunnelbau gemäß der Unterteilung nach der ZTV-ING (geschlossene oder offene Bauweise) und entsprechend der verwendeten Art der groben Gesteinskörnungen (Kornfraktionen 2/8 mm und 8/16 mm) untergliedert. Die nachfolgend verwendeten Bezeichnungen für die einzelnen, untersuchten Betone können wie folgt abgeleitet werden:

- B01 geschlossene Bauweise,  
quarzitische Gesteinskörnung
- B02 geschlossene Bauweise,  
kalzitische Gesteinskörnung
- B03 offene Bauweise,  
quarzitische Gesteinskörnung
- B04 offene Bauweise,  
kalzitische Gesteinskörnungen

Entsprechend der in Abschnitt 2.2.2 dieses Berichtes beschriebenen Abstimmungen mit dem Forschungsgeber wurden im Rahmen der Herstellung der Tunnelbetone für die verifizierenden Kleinbrandversuche zunächst alle vier Grundmischungen mit einem Portlandzement CEM I 32,5 R hergestellt. Die jeweils verwendeten Mengen der einzelnen Ausgangsstoffe können getrennt nach den verschiedenen Bauweisen von Straßentunneln den Übersichten in Tabelle 2 sowie in Tabelle 3 entnommen werden.

In weiteren Arbeitsschritten wurden die beschriebenen Referenzbetonmischungen durch die Zugabe von verschiedenen Fasergehalten der bauaufsichtlich zugelassenen PP-Fasern vom Typ Polyloc<sup>®</sup> mit den geometrischen Abmessungen 2,8 dtex ( $\varnothing = 18 \mu\text{m}$ ) und einer Länge von 6 mm modifiziert. Es wurden die drei Faserhalte von  $1,0 \text{ kg/m}^3$ ,  $2,0 \text{ kg/m}^3$  und  $3,0 \text{ kg/m}^3$  zugegeben.

Ergänzend wurden die an einzelnen Faserbetonmischungen mit dem PP-Fasergehalt von  $2,0 \text{ kg/m}^3$  der verwendete Portlandzement ausgetauscht. Für die geschlossene Bauweise wurde der CEM I 32,5 R durch einen hüttensandhaltigen Portlandkompositzement der Festigkeitsklasse CEM II / A-S 42,5 R ersetzt. In den Tunnelbetonen der offenen Bauweise wurde der Portlandzement

CEM I 32,5 R durch einen Hochofenzement CEM III / A 42,5 N ausgetauscht.

In Tabelle 4 können ergänzend alle erstellten und in den nachfolgend beschriebenen Abschnitten experimentell auf deren Durchwärmungsverhalten untersuchten Tunnelbetone entnommen werden.

**Tabelle 2** Ausgangswerte der Referenzmischungen für die geschlossene Bauweise

Bezeichnung der Referenzmischung	B01	B02
Gesteinskörnungen	quarzitische GK	kalzitische GK
w/z-Wert	0,53	0,53
(w/z) <sub>eq.</sub> -Wert	0,49	0,49
Mindestdruckfestigkeitsklasse	C30/37	C30/37
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	300	300
Flugasche [kg/m <sup>3</sup> ]	60	60
Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]	160	160
Betonzusatzmittel BV / FM Glenium Sky 501 [M.-%]	1,1	1,1
Gesteinskörnung [kg/m <sup>3</sup> ]	1826	1826
0/2 mm	40,0 %	40,0 %
2/8 mm	30,4 %	28,2 %
8/16 mm	29,6 %	31,8 %

**Tabelle 3** Ausgangswerte der Referenzmischungen für die offene Bauweise

Bezeichnung der Referenzmischung	B03	B04
Gesteinskörnungen	quarzitische GK	kalzitische GK
w/z-Wert	0,49	0,49
(w/z) <sub>eq.</sub> -Wert	-- <sup>1)</sup>	--
Mindestdruckfestigkeitsklasse	C30/37	C30/37
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	320	320
Flugasche [kg/m <sup>3</sup> ]	40	40
Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]	157	157
Betonzusatzmittel BV / FM Glenium Sky 501	1,4	1,4
Gesteinskörnung [kg/m <sup>3</sup> ]	1837	1837
0/2 mm	40,0 %	40,0 %
2/8 mm	30,4 %	28,2 %
8/16 mm	29,6 %	31,8 %

<sup>1)</sup> Anrechnung von Betonzusatzstoffen auf den äquivalenten Wasserzementwert gemäß ZTV-ING nicht zulässig.

**Tabelle 4** Überblick über die Bezeichnung und die Betonbestandteile für die verifizierenden Kleinbrandversuche

Bezeichnung	Fasern in [kg/m <sup>3</sup> ]	Bauweise	Gesteinskörnung	Zementart
B01 – 0	--	geschlossene	quarzitisch	CEM I 32,5 R
B01 – 1	1			
B01 – 2	2			
B01 – 3	3			
B02 – 0	--	geschlossene	kalzitisch	CEM I 32,5 R
B02 – 1	1			
B02 – 2	2			
B02 – 3	3			
B03 – 0	--	offene	quarzitisch	CEM I 32,5 R
B03 – 1	1			
B03 – 2	2			
B03 – 3	3			
B04 – 0	--	offene	kalzitisch	CEM I 32,5 R
B04 – 1	1			
B04 – 2	2			
B04 – 3	3			
B01 – 2 <sup>1</sup>	2	geschlossene	quarzitisch	CEM I 32,5 R
B01 – 2a	2	geschlossene	quarzitisch	CEM II / A-S 42,5R
B02 – 2a	2	geschlossene	kalzitisch	CEM II / A-S 42,5R
B03 – 2a	2	offene	quarzitisch	CEM III / 42,5N
B04 – 2a	2	offene	kalzitisch	CEM III / 42,5N

Hinweis: Der Tunnelbeton B01 – 2 wurde mit einer modifizierten Sieblinie in der Rezeptur B01 – 2<sup>1</sup> noch einmal wiederholt.

**Tabelle 5** Kennwerte der Frischbetoneigenschaften der hergestellten Tunnelbetone für die Kleinbrandversuche

Bezeichnung	Fasern [kg/m <sup>3</sup> ]	Menge BV/FM [M.-% vom Zement]	Ausbreitmaß [cm x cm]	Luftgehalt [Vol.-%]	F1 [kg/m <sup>3</sup> ]	F2 [kg/m <sup>3</sup> ]	F3 [kg/m <sup>3</sup> ]	Fasergehalt <sup>1)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]
B01 – 0	--	1,1	46 x 46	3,4	--	--	--	--
B01 – 1	1	2,0	47 x 49	2,0	0,90	0,91	0,85	0,89
B01 – 2	2	2,2	29 x 30	2,5	1,64	1,75	1,81	1,73
B01 – 3	3	2,6	28 x 29	3,0	2,87	2,97	2,94	2,93
B02 – 0	--	1,1	45 x 45	1,8	--	--	--	--
B02 – 1	1	1,8	37 x 37	1,8	0,83	0,85	0,86	0,85
B02 – 2	2	2,3	31 x 32	2,2	2,02	1,98	19,6	1,99
B02 – 3	3	2,8	36 x 36	3,2	2,75	2,69	2,89	2,78
B03 – 0	--	1,4	42 x 43	2,7	--	--	--	--
B03 – 1	1	2,0	32 x 34	2,5	0,94	0,88	0,97	0,93
B03 – 2	2	2,4	31 x 32	2,8	1,74	1,85	1,96	1,85
B03 – 3	3	3,0	35 x 36	2,3	2,64	2,81	2,77	2,74
B04 – 0	--	1,4	43 x 42	1,6	--	--	--	--
B04 – 1	1	2,0	36 x 36	1,8	0,93	0,97	0,95	0,95
B04 – 2	2	2,6	34 x 34	1,8	1,97	1,96	2,03	1,99
B04 – 3	3	3,0	36 x 38	2,3	2,95	2,77	3,01	2,91
B01 – 2 <sup>1</sup>	2	2,4	41 x 42	1,7	1,90	2,02	1,91	1,94
B01 – 2a	2	3,1	40 x 41	1,8	1,85	1,86	1,89	1,86
B02 – 2a	2	3,2	41 x 41	1,8	1,72	1,85	1,69	1,75
B03 – 2a	2	2,8	41 x 42	1,6	1,97	2,04	1,99	2,00
B04 – 2a	2	3,2	41 x 42 <sup>2)</sup>	1,4	1,81	1,86	1,94	1,87

<sup>1)</sup> Angabe zum ermittelten Fasergehalt im Frischbeton: Mittelwert aus drei Einzelproben F1, F2, F3.

<sup>2)</sup> Bei der Mischungskonzeption B02 – 2a wurde zusätzlich zur Verhinderung des auftretenden Blutens des Zementleimes ein stabilisierendes Betonzusatzmittel vom Typ RheoMatrix® 101 (0,31 M.-% vom Zement) zugegeben.

### 3 Kleinbrandversuche

#### 3.1 Herstellung Frischbeton

Die Herstellung der Tunnelbetone für die kleinmaßstäblichen Brandversuche erfolgte an einem 75-Liter Mischer der Firma Eirich.

Im Rahmen der Herstellung der kleinmaßstäblichen Probekörper wurde angestrebt, dass jeweils mehrere Tunnelbetone an einem Tag erstellt wurden. Zur besseren Vergleichbarkeit der experimentellen Ergebnisse sollte somit sicher gestellt werden, dass der Zeitraum zwischen Herstellung und Prüfung der Probekörper bei allen Tunnelbetonen ungefähr 28 Tage betrug.

Direkt im Anschluss an die Herstellung wurden das Ausbreitmaß und der Luftgehalt experimentell unter labortechnischen Bedingungen ermittelt. Zusätzlich wurde bei den faserverstärkten Tunnelbetonen die Faserverteilung und der daraus resultierend Fasergehalt im Frischbeton gemäß der österreichischen ÖVBB-Richtlinie „Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ [9] bestimmt. Dabei wurden je Tunnelbeton drei Einzelproben zu je genau 5000 g des Frischbetons entnommen und die Fasern entsprechend der Vorschrift aus dem Frischbeton unter Zugabe von speziellen chemischen Zusätzen ausgewaschen. Im Anschluss wurde anhand der ermittelten Fasermenge in mehreren Arbeitsschritten die jeweilige Fasermenge der Einzelproben ermittelt. Eine Zusammenfassung der ermittelten Frischbetonkennwerte kann Tabelle 5 entnommen werden.

Anhand der Ergebnisse ist zu erkennen, dass bereits durch die Zugabe von nur  $1,0 \text{ kg/m}^3$  PP-Fasern die Frischbetonkonsistenz und somit auch die Verarbeitbarkeit gegenüber der Referenzbetone deutlich herabgesetzt wurden. Des Weiteren wurde festgestellt, dass bei einer Erhöhung der Zugabemenge an Fließmittel die Frischbetone sehr schnell zum Bluten neigen. Eine ausreichend gute Frischbetonkonsistenz ohne direkte Anzeichen einer Wasserabgabe konnte nur bei dem Tunnelbeton B04-2a beobachtet werden. Bei diesem Betonentwurf wurde zusätzlich ein bauaufsichtlich zugelassener Stabilisierer zugegeben.

#### 3.2 Herstellung Prüfkörper

Zur Durchführung der verifizierenden Kleinbrandversuche sowie für die Bestimmung der mechanischen Parameter der einzelnen ZTV-ING-

konformen Tunnelbetone wurden jeweils folgende Prüfkörper hergestellt:

- 4 Würfel  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$  zur Bestimmung des Brand- und Abplatzverhaltens,
- 6 Würfel  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$  zur Bestimmung der Druckfestigkeit am Prüftag und
- 6 Prismen  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  zur Bestimmung des Feuchtegehaltes am Prüftag.

#### 3.3 Konditionierung der Prüfkörper

Bauteile von Tunnelbauwerken können in Abhängigkeit ihrer geometrischen Lage im Tunnel und der daraus resultierenden äußeren Umwelteinflüsse sehr unterschiedliche Feuchtegehalte aufweisen. Daher wurden im Rahmen der experimentellen Untersuchungen zwei verschiedene Konditionierungsarten für die hergestellten Probekörper festgelegt. Bis zum Zeitpunkt der Brandprüfung wurden jeweils 5 Würfel und 3 Prismen sowohl bei  $20^\circ\text{C}$  unter Wasser und vergleichend bei normklimatischen Verhältnissen bei  $20^\circ\text{C}$  und 65% relativer Luftfeuchte gelagert. Durch die voneinander abweichenden Lagerungsbedingungen sollten im Rahmen der verifizierenden Brandversuche Rückschlüsse auf den Einfluss des Feuchtegehaltes der kleinmaßstäblichen Prüfkörper auf das Brand- und Abplatzverhalten gezogen werden.

#### 3.4 Bestimmung der Materialkennwerte

Am Tag der Brandprüfung wurden zu jedem Tunnelbeton an den hergestellten Begleitprobekörpern die Werte der Druckfestigkeit an den 150er Würfeln und der Feuchtegehalt der Probekörper durch Darrtrocknung bei  $105^\circ\text{C}$  ermittelt.

Es kann festgehalten werden, dass alle untersuchten Betone mindestens der Festigkeitsklasse C30/37 zugeordnet werden können. Für die mit dem Portlandzement CEM I 32,5 R hergestellten Betone wurden im Alter von 28 bis 35 Tagen Mittelwerte der Druckfestigkeit von  $43 \text{ N/mm}^2$  bis  $55 \text{ N/mm}^2$  bestimmt. Bei den Betonen mit CEM II/A-S 42,5 R und CEM III/A 42,5 N lagen die Werte der Druckfestigkeiten am Tag der Brandbeanspruchung auf Grund der höheren Zementfestigkeitsklasse zwischen 48 bis  $65 \text{ N/mm}^2$ .

**Tabelle 6** Ermittelte Werte der Druckfestigkeit und des Feuchtegehaltes der Betone am Prüftag, getrennt nach Art der jeweiligen Konditionierung (20°C + Wasserlagerung oder 20°C + 65% relative Luftfeuchtigkeit)

Bezeichnung	Zementart	Alter <sup>1)</sup> [d]	Wasserlagerung		Trockenlagerung	
			Feuchtegehalt [M.-%]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Feuchtegehalt [M.-%]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
B01 – 0	CEM I 32,5 R	29	5,42	46,0	2,39	45,8
B01 – 1	CEM I 32,5 R	28	5,37	43,4	2,46	43,7
B01 – 2	CEM I 32,5 R	30	5,49	53,7	2,61	52,5
B01 – 3	CEM I 32,5 R	30	5,45	48,6	2,54	45,7
B02 – 0	CEM I 32,5 R	29	5,53	52,6	2,64	48,8
B02 – 1	CEM I 32,5 R	30	5,37	47,4	2,40	43,5
B02 – 2	CEM I 32,5 R	35	5,10	49,1	2,43	45,7
B02 – 3	CEM I 32,5 R	35	4,82	42,9	2,55	40,81
B03 – 0	CEM I 32,5 R	29	4,95	51,9	2,59	49,0
B03 – 1	CEM I 32,5 R	29	4,91	55,6	2,52	55,8
B03 – 2	CEM I 32,5 R	35	5,31	54,1	2,61	49,4
B03 – 3	CEM I 32,5 R	28	4,81	43,4	2,54	45,3
B04 – 0	CEM I 32,5 R	29	5,22	55,3	2,71	50,4
B04 – 1	CEM I 32,5 R	29	4,90	52,2	2,58	49,0
B04 – 2	CEM I 32,5 R	29	4,66	45,0	2,23	45,7
B04 – 3	CEM I 32,5 R	29	4,50	42,7	2,4	46,3
B01 – 2'	CEM I 32,5 R	27	4,99	49,2	2,57	52,1
B01 – 2a	CEM II / A-S 42,5 R	28	5,60	64,2	2,91	61,5
B02 – 2a	CEM II / A-S 42,5 R	28	4,78	68,4	2,41	57,5
B03 – 2a	CEM III / A 42,5 N	26	4,65	48,4	2,95	52,4
B04 – 2a	CEM III / A 42,5 N	26	4,82	65,54	2,95	64,9

<sup>1)</sup> Alter der Probekörper zum Prüftermin.

Eine Übersicht über alle ermittelten Werte der Druckfestigkeiten sowie die zugehörigen Feuchtigkeitsgehalte, die an den kleinen Begleitprobekörpern mit den geometrischen Abmessungen von 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup> durch Darrtrocknung bestimmt wurden, können Tabelle 6 entnommen werden. Die ausgewiesenen Werte für die Feuchtegehalte beziehen sich auf die Trockenmasse der Probekörper nach dem Trocknungsvorgang. Anhand dieser Werte kann festgestellt werden, dass die Unterschiede zwischen der Lagerung unter Wasser und der Lagerung bei normklimatischen Verhältnissen etwa 2,5 M.-% betragen. Die wassergelagerten Proben besaßen einen Feuchtigkeitsgehalt von 4,5 bis 5,5 M.-% (Durchschnittswert: 5,1 M.-%). Die im Klimaraum, unter normklimatischen Verhältnissen bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte gelagerten Proben besaßen einen Feuchtegehalt von 2,2 bis 2,7 M.-% (Durchschnittswert: 2,5 M.-%).

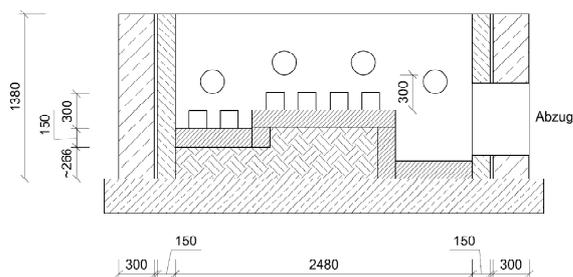
### 3.5 Prüfaufbau - Kleinbrandversuche

Die verifizierenden Brandversuche an den Würfeln mit der Kantenlänge von 150 mm wurden im Tun-

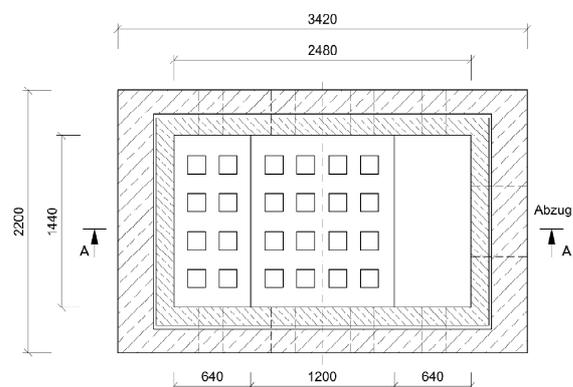
nelofen der MFPA Leipzig GmbH durchgeführt. Dabei wurden die Probekörper einer fünfseitigen Beanspruchung durch die ZTV-ING-Kurve ausgesetzt.

Die Probekörper wurden nach den unterschiedlichen Arten der Konditionierung (Wasserlagerung / Lagerung unter normklimatischen Verhältnissen bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte) am Tag der Brandprüfung in den Tunnelofen eingebaut. Je hergestellter Tunnelbetonrezeptur wurden vier Probekörper (jeweils 2 x Wasserlagerung und 2 x Trockenlagerung) geprüft. Somit wurden während der vier Prüfdurchläufe jeweils 20 bis maximal 24 Probekörper mit den geometrischen Abmessungen von 150 x 150 x 150 mm<sup>3</sup> auf deren Brand- und Abplatzverhalten untersucht.

Die Probekörper wurden so in den Ofen eingebaut, dass sie alle ca. 300 mm unterhalb der Brenner platziert waren, so dass eine direkte Beflammung der Probekörper ausgeschlossen werden konnte. Desweiteren wurden die Würfel untereinander sowie zur Wand des Tunnelofens so ausgerichtet, dass gleiche Zwischenabstände vorlagen (siehe Bilder 3, 4, 5 und 6)



**Bild 3** Querschnitt Tunnelofen mit Anordnung der 150er Probekörper



**Bild 4** Grundriss – Anordnung der 150er Probekörper im Tunnelofen

Die Steuerung der Temperaturen im Brandraum erfolgte bei den Prüfungen durch jeweils sechs Mantelthermoelemente vom Typ NiCr-Ni, die Abstand von ca. 10 cm über den Probekörpern angeordnet waren. Die Temperaturen im Brandraum wurden alle zehn Sekunden gemessen und mittels einer geeigneter EDV aufgezeichnet.

Eine Übersichtsskizze des beschriebenen Prüfaufbaus kann den grafischen Darstellungen in Bild 3 und Bild 4 entnommen werden. Zur weiteren Veranschaulichung sind die fotografischen Aufnahmen Bild 5 und Bild 6 mit aufgeführt.

### 3.6 Durchführung der Prüfungen

Nach dem Einbau der Probekörper in den Tunnelofen wurden diese fünfseitig über die Brandbeanspruchungsdauer von insgesamt 140 Minuten gemäß der Temperatur-Zeit-Kurve der ZTV-ING, Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 1 geschlossene Bauweise, Abs. 10.2 [2], beansprucht.

Die Beflammung erfolgte durch acht Dieselbrenner, die an den beiden Längswänden des Tunnelofens angeordnet sind. Die Steuerung der Brandraumtemperatur erfolgte manuell an den Brenner

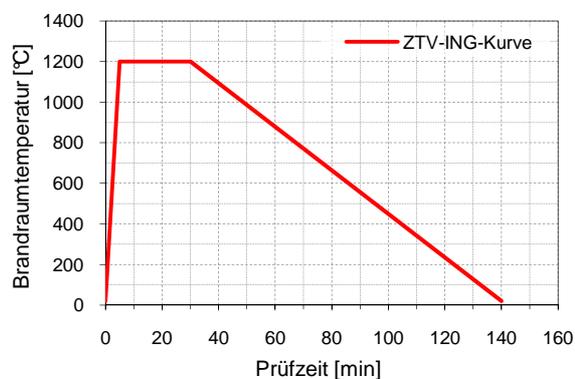


**Bild 5** Anordnung der Probekörper zur Prüfung



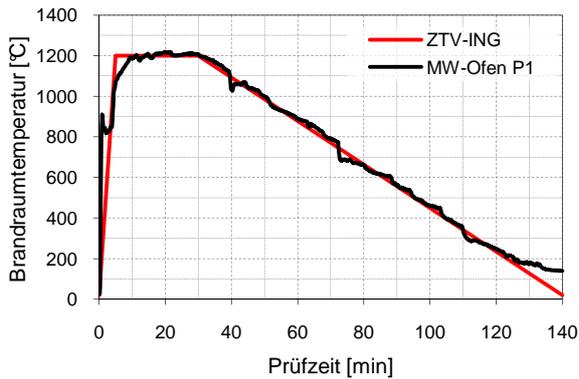
**Bild 6** Anordnung der kleinmaßstäblichen Probekörper im Tunnelofen

gemäß dem vorgegebenen Temperatur-Zeit-Verlaufes durch Fachpersonal der MFPA Leipzig GmbH. Der zeitliche Verlauf der Temperatur-Zeit-Kurve kann der nachfolgenden grafischen Darstellung in Bild 7 entnommen werden. Der direkte Vergleich mit anderen üblichen Beanspruchungskurven für Tunnelbauwerke ist im Bild 1 zusammengestellt.

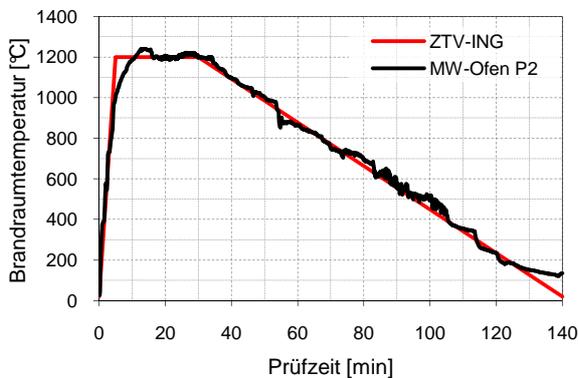


**Bild 7** Temperatur-Zeit-Verlauf nach ZTV-ING, Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 1, Abs. 10.2 [2]

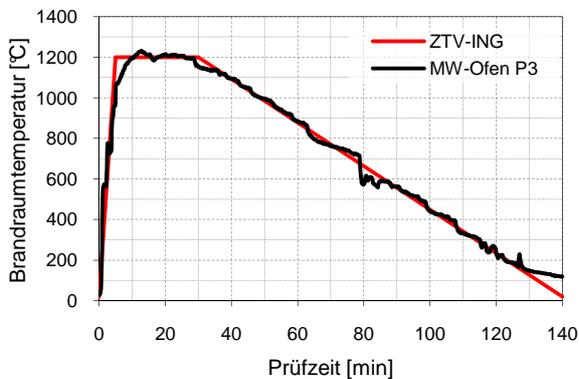
Die während der Prüfung gespeicherten Temperatur-Zeit-Verläufe können den nachfolgenden Grafiken Bild 8 bis Bild 11 entnommen werden:



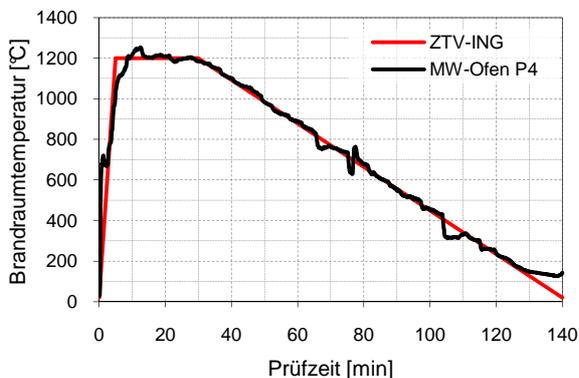
**Bild 8** Braundraumtemperatur während Prüfung 1



**Bild 9** Braundraumtemperatur während Prüfung 2



**Bild 10** Braundraumtemperatur während Prüfung 3



**Bild 11** Braundraumtemperatur während Prüfung 4

An den grafischen Auswertungen der Temperatur-Zeit-Beanspruchungen (siehe Bild 8 bis Bild 11) ist zu sehen, dass im Wesentlichen der steile Anstieg der Temperaturen in den ersten fünf Minuten der Brandbeanspruchung erfüllt worden ist. Des Weiteren ist zu erkennen, dass es in den letzten 15 bis 20 Minuten der Prüfzeit nicht mehr möglich war, den verhältnismäßig kleinen Brandraum mit einer Grundfläche von ca. 2500 x 1440 mm<sup>2</sup> und einer Höhe von ca. 1300 mm weiter abzukühlen. Diese Tatsache kann damit begründet werden, dass die Wände des Ofens durch die hohen Temperaturbeanspruchungen eine sehr große Menge an Wärmeenergie gespeichert haben, so dass eine weitere, schnelle Abkühlung durch die aktive Belüftung des Brandraumes durch die Brenner nicht möglich war.

Direkt nach den einzelnen Brandprüfungen wurde der Deckel des Brandraumes jeweils einen Spalt geöffnet, so dass sich der Brandraum langsam abkühlen konnte. Die aufgenommenen Prüfbeobachtungen sowie die zugehörigen Ergebnisse der anschließenden Bestimmung des Masseverlustes werden im folgenden Abschnitt aufgeführt.

### 3.7 Prüfbeobachtungen / Ergebnisse

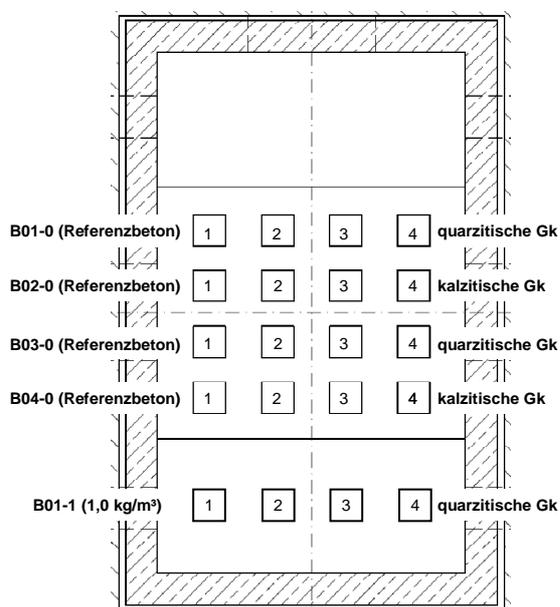
Nach der Durchführung der einzelnen Brandprüfungen wurden die Auswirkungen der hohen Temperaturbeanspruchungen auf die kleinen Probekörper visuell aufgenommen. Dabei wurden verschiedene Ergebnisse festgestellt. Diese werden in den nachfolgenden Abschnitten kurz beschrieben und zusammengefasst.

Des Weiteren wurden die Massen der Probekörper sowohl vor als auch nach den Brandversuchen bestimmt, wobei im ausgekühlten Zustand alle lose anhaftenden Bestandteile der geschädigten Probekörper entfernt wurden. Anhand der Restquerschnitte der Würfel konnten so die absoluten Masseverluste der Probekörper infolge der fünfseitigen Brandbeanspruchung ermittelt werden. Eine Übersicht über die bestimmten Masseverluste der Probekörper ist in Tabelle 7 aufgeführt.

Es wurden wie bereits beschrieben vier verifizierende Brandprüfungen an den Kleinprobekörpern durchgeführt. Diese fanden an den folgenden Tagen statt:

- Prüfung 1 am 25.06.2008,
- Prüfung 2 am 27.06.2008,
- Prüfung 3 am 09.07.2008 sowie
- Prüfung 4 am 16.07.2008.

### 3.7.1 Ergebnisse der Prüfung 1



**Bild 12** Schematische Übersicht - Anordnung der Probekörper im Ofen bei der Prüfung 1 am 25.06.2008

Während der ersten Prüfung am 25.06.2008 wurden die im Bild 12 dargestellten Probekörper 1 bis 4 der einzelnen Mischungskonzeptionen geprüft. Die Probekörper 1 und 2 wurden dabei bis zum Prüftag unter Wasser und die Probekörper 3 und 4 unter normklimatischen Bedingungen bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit im Klimaraum gelagert.

Die Auswirkungen der fünfseitigen Brandbeanspruchung durch die ZTV-ING-Kurve auf die kleinmaßstäblichen Probekörper wurden einen Tag nach der Brandbeanspruchung aufgenommen. Bild 13 kann ein Überblick über den Zustand der Probekörper nach der Brandbeanspruchung entnommen werden.



**Bild 13** Blick auf die Prüfkörper nach der ersten Prüfung (einen Tag nach dem Brandversuch)

Es konnte festgestellt werden, dass an den Probekörpern, die vor der Brandbeanspruchung unter normklimatischen Bedingungen trocken im Klima-

raum gelagert wurden keine, explosionsartigen Abplatzungen an der Oberfläche zu erkennen waren. Dies kann auf den ermittelten geringen Feuchtegehalt von ca. 2,5 M.-% zurückgeführt werden. An den wassergelagerten, Probekörpern ohne Fasern waren dagegen sichtbare Spuren von partiellen Abplatzungen an der Oberfläche der Probekörper sichtbar.

An den beiden Tunnelbetonen mit kalzitischen Gesteinskörnungen konnten bereits einen Tag nach der Brandprüfung deutliche Volumenzunahmen festgestellt werden. Die kann durch die Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft an den gebrannten Kalkphasen und der damit verbundenen Bildung von Portlandit (Calciumhydroxid) erklärt werden. Das dadurch gelockerte Material an der brandbeanspruchten Oberfläche der Probekörper war so lose, dass es teilweise bereits beim Berühren der Probekörper abfiel.

Im Gegensatz dazu konnten die Probekörper, die unter Verwendung von quarzitischen Gesteinskörnungen hergestellt wurden, in einem Stück dem Ofen entnommen werden. Auch bei diesen Probekörpern waren die Oberflächen ebenfalls sehr stark beansprucht worden, so dass sich auch bei diesen Würfeln die äußere Schicht ohne großen Kraftaufwand händisch von verbleibenden festen Kerns des brandbeanspruchten Würfels entfernt ließ.

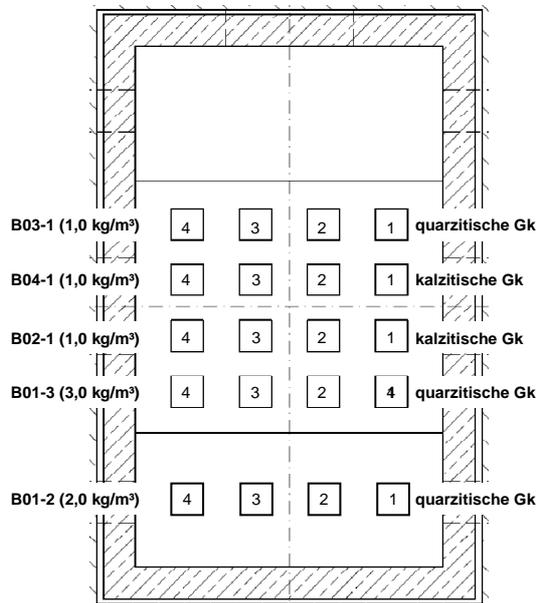
Ein Überblick über die Größenverhältnisse des verbleibenden Kerns in Bezug auf die ursprüngliche Größe des Probekörpers kann dem folgenden Bild 14 entnommen werden.



**Bild 14** „Rest“-Prüfkörper B01-1 (1) nach dem Entfernen der losen Bestandteile

An allen Probekörper wurden die losen Bestandteile entfernt und die Masse des jeweils verbleibenden Restquerschnitts bestimmt.

### 3.7.2 Ergebnisse der Prüfung 2



**Bild 15** Schematische Übersicht - Anordnung der Probekörper im Ofen bei der Prüfung 2 am 27.06.2008

Während der zweiten Prüfung am 27.06.2008 wurden die im Bild 16 dargestellten Probekörper untersucht. Die Probekörper 1 und 2 wurden bis zum Prüftag unter Wasser und die Probekörper 3 und 4 wurden unter normklimatischen Bedingungen bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit im Klimaraum gelagert.

Im Gegensatz zur ersten Prüfung wurden die Ergebnisse der Brandbeanspruchung erst drei Tage nach der Prüfung aufgenommen. Dem entsprechend konnte festgestellt werden, dass an den Probekörpern mit kalzitischen Gesteinskörnungen die Volumenzunahme durch Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft an die gebrannten Kalkphasen und der daraus resultierenden Bildung von Portlandit sehr weit fortgeschritten war. Die beschriebene Beobachtung kann dem folgenden Bild 16 entnommen werden.



**Bild 16** Blick auf die Probekörper nach der zweiten Prüfung (drei Tage nach dem Brandversuch) - Probekörper mit den kalzitischen Gesteinskörnungen in den beiden mittleren Reihen zu sehen

In den folgenden Bildern 17 und 18 werden ergänzend noch einmal die Unterschiede zwischen den aufgenommenen Beobachtungen an den Prüfkörpern mit quarzitischen und den mit kalzitischen Gesteinskörnungen dargestellt.



**Bild 17** Prüfkörper B03-1 (2) mit quarzitischen Gesteinskörnungen im ausgekühlten Zustand, drei Tage nach dem Brandversuch



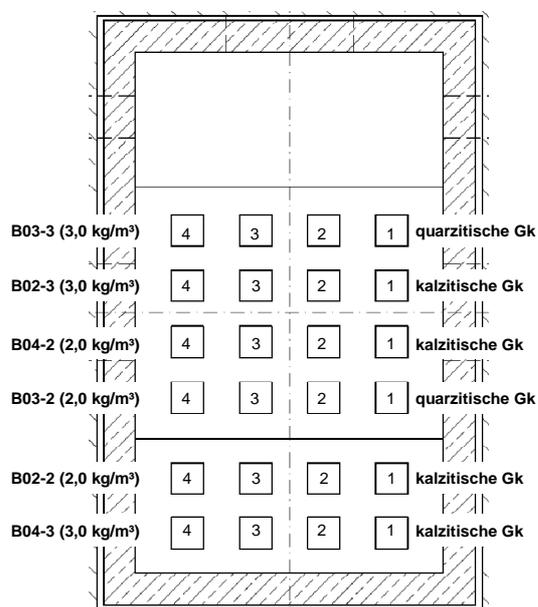
**Bild 18** Prüfkörper B04-1 (2) mit kalzitischen Gesteinskörnungen im ausgekühlten Zustand, drei Tage nach dem Brandversuch

Es muss jedoch festgehalten werden, dass sowohl bei den Probekörpern mit kalzitischen Gesteinskörnungen als auch bei den Probekörpern mit quarzitischen Gesteinskörnungen der verbleibende feste Restquerschnitt der Würfel nach dem Entfernen der losen Bestandteile in etwa gleich groß war.

Des Weiteren wurden an den Probekörpern der fünf ausschließlich faserbewehrten Betonkonzeptionen festgestellt, dass es keine signifikanten visuellen Unterschiede zwischen den wassergelagerten Prüfkörpern und den normklimatisch gelagerten Prüfkörpern gab.

Wie auch bei der ersten Prüfung wurden die einzelnen Probekörper nach dem entfernen der brandgeschädigten, lockeren Oberflächenschichten gewogen und die Massen zur Bestimmung der absoluten Masseverluste aufgezeichnet.

### 3.7.3 Ergebnisse der Prüfung 3



**Bild 19** Schematische Übersicht - Anordnung der Probekörper im Ofen bei der Prüfung 3 am 09.07.2009

Während des dritten Prüfdurchlaufes an den kleinmaßstäblichen Prüfkörpern wurden die folgenden sechs Tunnelbetonrezepturen untersucht: B04-3, B02-2, B03-2, B04-2, B02-3 sowie B03-3. Die Anordnung der Probekörper im Tunnelofen kann dem Bild 19 entnommen werden. Die Probekörper 1 und 2 wurden bis zum Prüftag unter Wasser und die Probekörper 3 und 4 wurden unter normklimatischen Bedingungen bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit im Klimaraum gelagert.

Da die Aufnahme der Ergebnisse einen Tag nach der Prüfung erfolgte, war bei den Prüfkörpern mit den kalzitischen Gesteinskörnungen die Wasseraufnahme und damit die Volumenvergrößerung noch nicht so weit fortgeschritten, wie im vorherigen Abschnitt 3.7.2 beschrieben. Im Wesentlichen kann festgehalten werden, dass auch bei diesem Versuch ähnliche Beobachtungen wie zuvor aufgenommen wurden. Es wurden an den fasermodifizierten Kleinprüfkörpern keine großflächigen Oberflächenschäden infolge explosionsartiger Abplatzungen festgestellt. Partiiell wiesen auch diese Prüfkörper lokale Fehlstellen in den Eck- und Kantenbereichen auf. Dieses Schadensbild wird aber auf die andauernde hohe und vor allem fünfseitige Temperaturbeanspruchung zurückgeführt.

In den nachfolgenden Bildern 20 bis 22 wird die Oberflächenbeschaffenheit eines Kleinprobekörpers mit quarzitischer Gesteinskörnung nach dem Herausheben aus dem Tunnelofen dargestellt. Auch hier konnte der Probekörper zunächst in ei-

nem Stück herausgehoben werden. Die geschädigte Oberflächenstruktur des Probekörpers war jedoch so lose, dass auch hier diese Bereiche händisch vom Probekörper entfernt werden konnten.



**Bild 20** Prüfkörper B03-2 (1) – Oberfläche des brandbeanspruchten Kleinprüfkörpers



**Bild 21** Prüfkörper B03-2 (1) – Seitenfläche 1 des brandbeanspruchten Kleinprüfkörpers

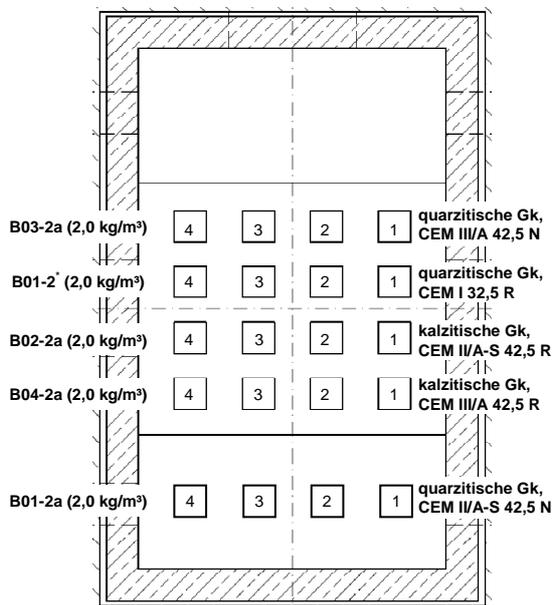
Nach der Entfernung des losen Materials blieb folgender Restquerschnitt übrig (siehe Bild 22):



**Bild 22** Prüfkörper B03-2 (1) – „Restquerschnitt“ nach dem händischen Entfernen des losen Materials

Im Rahmen der Beobachtungsaufnahme wurden auch nach diesem Prüfdurchgang nach dem Entfernen der lockeren, geschädigten Oberflächenbereiche die verbleibenden Restquerschnitte der einzelnen Probekörper gewogen und es wurden die Massen zur Bestimmung des absoluten Masseverlustes aufgezeichnet.

### 3.7.4 Ergebnisse der Prüfung 4



**Bild 23** Schematische Übersicht - Anordnung der Probekörper im Ofen bei der Prüfung 4 am 16.07.2009

Während der letzten Prüfung am 16.07.2008 wurden die fasermodifizierten Tunnelbetone, die unter der Verwendung des Portlandkompositzementes CEM II/A-S 42,5 R sowie des Hochofenzementes CEM III/A 42,5 N hergestellt wurden, geprüft. Die Übersicht über die Anordnung der einzelnen Probekörper kann Bild 23 entnommen werden. Die Probekörper 1 und 2 wurden bis zum Prüftag unter Wasser und die Probekörper 3 und 4 wurden unter normklimatischen Bedingungen bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit im Klimaraum gelagert.

Die Aufnahme der Prüfergebnisse erfolgte einen Tag später am 17.07.2008. Es kann festgehalten werden, dass im Vergleich zu den bereits durchgeführten drei Versuchen keine abweichenden Prüfbeobachtungen aufgenommen wurden.



**Bild 24** Probekörper B04-2a (3) - Schadensaufnahme nach der Brandbeanspruchung



**Bild 25** Probekörper B04-2a (3) – „Restquerschnitt“ nach dem händischen Entfernen des losen Materials

### 3.7.5 Zusammenfassung der Prüfergebnisse

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass an allen brandbeanspruchten Probekörpern durch die fünfseitige Brandbeanspruchung über 140 Minuten große Bereiche der kleinmaßstäblichen Probekörper geschädigt, und dass große Masseverluste aufgenommen wurden. Die aus den Massen der Restquerschnitte der Probekörper ermittelten Masseverluste sind in der folgenden Tabelle 7 zusammengefasst.

Eine zusammenfassende Bewertung der erhaltenen Prüfergebnisse wird im nachfolgenden Abschnitt 3.8 aufgeführt.

**Tabelle 7** Ermittelte Werte des Masseverlustes an den kleinmaßstäblichen Prüfkörpern nach der Brandbeanspruchung von 140 Minuten nach der Temperatur-Zeit-Kurve gemäß ZTV-ING Teil 5, Tunnelbau, Abschnitt 1, Abs. 10.2

Bauweise	Zement	Gesteinskörnungen	Bezeichnung + Fasergehalt	Wasserlagerung Masseverlust in [M.-%]			Trockenlagerung Masseverlust in [M.-%]		
				Pk 1	Pk2	Ø	Pk3	Pk4	Ø
GB	CEM I 32,5 R	quarzitisch	B01 – 0	67,8	67,5	<b>67,7</b>	74,8	68,0	<b>71,4</b>
			B01 – 1	63,2	61,7	<b>62,4</b>	59,2	61,1	<b>60,4</b>
			B01 – 2	69,4	64,5	<b>66,9</b>	71,3	68,0	<b>69,7</b>
			B01 – 3	65,8	66,0	<b>65,9</b>	68,6	70,4	<b>69,5</b>
GB	CEM I 32,5 R	kalzitisch	B02 – 0	70,9	60,5	<b>65,7</b>	67,1	74,4	<b>70,8</b>
			B02 – 1	62,8	57,5	<b>60,2</b>	57,7	64,5	<b>61,1</b>
			B02 – 2	58,9	57,6	<b>58,8</b>	51,0	61,7	<b>56,4</b>
			B02 – 3	58,5	58,9	<b>58,7</b>	53,4	53,2	<b>53,3</b>
OB	CEM I 32,5 R	quarzitisch	B03 – 0	70,2	67,3	<b>68,7</b>	64,0	67,2	<b>65,6</b>
			B03 – 1	68,0	61,6	<b>64,8</b>	64,6	59,8	<b>62,2</b>
			B03 – 2	69,7	75,1	<b>72,4</b>	65,9	75,9	<b>70,9</b>
			B03 – 3	76,2	67,9	<b>72,1</b>	60,4	71,8	<b>66,1</b>
OB	CEM I 32,5 R	kalzitisch	B04 – 0	65,0	54,4	<b>59,7</b>	60,2	71,2	<b>65,7</b>
			B04 – 1	66,0	70,8	<b>68,4</b>	65,9	70,0	<b>68,0</b>
			B04 – 2	61,2	63,6	<b>62,4</b>	59,2	57,4	<b>58,3</b>
			B04 – 3	64,1	62,6	<b>63,3</b>	62,1	62,9	<b>62,5</b>
GB	CEM I 32,5 R	quarzitisch	B01 – 2*	66,9	77,6	<b>72,3</b>	64,2	60,9	<b>62,5</b>
GB	CEM II/A-S 42,5 R	quarzitisch	B01 – 2a	66,7	64,5	<b>66,6</b>	65,4	75,4	<b>70,4</b>
GB	CEM II/A-S 42,5 R	kalzitisch	B02 – 2a	72,0	61,6	<b>66,8</b>	63,6	65,3	<b>64,5</b>
OB	CEM III/A 42,5 N	quarzitisch	B03 – 2a	67,0	75,9	<b>71,5</b>	66,4	61,1	<b>65,3</b>
OB	CEM III/A 42,5 N	kalzitisch	B04 – 2a	62,4	61,0	<b>61,7</b>	56,5	62,4	<b>59,4</b>

GB ... Geschlossene Bauweise

OB ... Offene Bauweise

### 3.8 Bewertung der Prüfergebnisse

#### 3.8.1 Allgemeines

Die experimentell ermittelten und in Tabelle 7 zusammengefassten Werte für die absoluten Masseverluste der einzelnen, untersuchten Tunnelbetone zeigen, dass die Probekörper infolge der hohen Brandbeanspruchung effektiv ca. 53,3 M.-% bis zu 72,3 M.-% der Ausgangsmasse vor dem Brandversuch verlieren.

Der Masseverlust der kleinmaßstäblichen Probekörper wurde dabei aus der Differenz zwischen der Masse des verbleibenden Restquerschnitts und der vor den Brandversuchen bestimmten Ausgangsmasse der Würfel ermittelt. Die prozentuale Angabe des Masseverlustes in Tabelle 7 bezieht sich dabei auf die Ausgangsmasse vor dem Brandversuch.

Die hohen Masseverluste können durch die andauernde, fünfseitige Brandbeanspruchung in Kombination mit der für die verifizierenden Kleinbrandversuche gewählten Probekörpergeometrie

begründet werden. Nachfolgend werden die Ergebnisse, getrennt für die offene und geschlossene Bauweise betrachtet.

#### 3.8.2 Rezeptur für geschlossene Bauweise

Im Rahmen der Untersuchungen wurden für die geschlossene Bauweise die Betone B01 mit quarzitästischen Gesteinskörnungen und B02 mit kalzitischen Gesteinskörnungen untersucht. Beide Prüfserien wurden als Referenzbeton ohne Faserzugabe und als Faserbeton mit den drei Zugabemengen 1,0 kg/m<sup>3</sup>, 2,0 kg/m<sup>3</sup> und 3,0 kg/m<sup>3</sup> untersucht.

Aus den ermittelten Ergebnissen der Masseverluste nach den Brandversuchen der Betone B01 konnten zwischen dem ansteigenden Fasergehalt und den ermittelten Werten der zugehörigen Masseverluste keine direkte Korrelation festgestellt werden. Die minimalen Werte des Masseverlustes wurden bei dieser Prüfserie mit 62,4 M.-% (Wasserlagerung) und 60,4 M.-% (Lagerung bei Norm-

klima) bei einem Fasergehalt von  $1,0 \text{ kg/m}^3$  festgestellt.

Bei der Prüferserie B02 mit den kalzitischen Gesteinskörnungen ist eine direkte Korrelation zwischen den ansteigenden Fasergehalten und den abnehmenden Masseverlusten erkennbar. Die Minimalwerte konnten mit 58,7 M.-% (Wasserlagerung) und 53,3 M.-% (Lagerung bei Normklima) bei einem Fasergehalt von  $3,0 \text{ kg/m}^3$  bestimmt werden. Bei dem Fasergehalt von  $2,0 \text{ kg/m}^3$  wurden mit 58,8 M.-% (Wasserlagerung) und 56,4 M.-% (Lagerung bei Normklima) nur geringfügig schlechtere Ergebnisse bestimmt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Probekörper der Betone B01 mit den quarzitäen Gesteinskörnungen zunächst augenscheinlich weniger geschädigt waren und sich im Allgemeinen in einem Stück aus nach der Brandbeanspruchung aus dem Tunnelofen entnommen werden konnten. Nach der Entfernung der geschädigten Bestandteile mit der Hand wurde qualitativ bei dieser Mischungskonzeption (B01) ein höherer Masseverlust bestimmt.

Bei den zusätzlich untersuchten Betonen der geschlossenen Bauweise, die mit einem Portlandkompositzementes CEM II / A-S 42,5 R und mit einem Fasergehalt von  $2,0 \text{ kg/m}^3$  hergestellt wurden mit 66,6 M.-% und 70,4 M.-% tendenziell ähnliche Masseverluste wie bei der gleichen Mischungskonzeption unter Verwendung des Portlandzementes CEM I 32,5 R festgestellt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass anhand der bestimmten Ergebnisse des Masseverlustes kein eindeutiger Einfluss der verschiedenen Fasergehalte auf die Betonkonzeptionen erkannt werden kann.

### 3.8.3 Rezeptur für offene Bauweise

Für die offene Bauweise wurden die Betone B03 mit quarzitäen Gesteinskörnungen und B04 mit kalzitischen Gesteinskörnungen untersucht. Beide Prüferserien wurden als Referenzbeton ohne Faserzugabe und als Faserbeton mit den drei Zugabemengen  $1,0 \text{ kg/m}^3$ ,  $2,0 \text{ kg/m}^3$  und  $3,0 \text{ kg/m}^3$  untersucht.

Anhand der ermittelten Ergebnisse konnte sowohl für die Betone B03 als auch für B04 mit den differierenden Fasergehalten keine direkte Korrelation keine direkte Korrelation zwischen dem zugegebenen Fasergehalt und dem bestimmten Masseverlust festgestellt werden.

Bei der Betonen B03 wurden die besten Ergebnisse mit 64,8 M.-% (Wasserlagerung) und 62,2 M.-% (Lagerung bei Normklima) bei einem Fasergehalt von  $1,0 \text{ kg/m}^3$  ermittelt. Bei der Faserbetonserie B04 wurden insgesamt die geringsten Masseverluste bei einem Fasergehalt von  $2,0 \text{ kg/m}^3$  mit 62,4 M.-% (Wasserlagerung) und 58,3 M.-% (Lagerung bei Normklima) bestimmt.

Bei dieser Konzeption wurden wie bereits beschrieben ähnliche Werte unter Verwendung eines Hochofenzementes CEM III/A 42,5N sowie eines stabilisierenden Betonzusatzes (bei deutlich besseren Frischbetoneigenschaften) erreicht.

### 3.8.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend wurde anhand der ermittelten Ergebnisse festgestellt, dass bei den durchgeführten Brandbeanspruchungen an den kleinmaßstäblichen Probekörpern an den Betonen unter Verwendung von kalzitischen Gesteinskörnungen etwas geringere Masseverluste bestimmt wurden als an den Probekörpern, die unter Verwendung der quarzitäen Gesteinskörnungen hergestellt worden sind.

Die geringsten Masseverluste der Probekörpern die unter Verwendung von quarzitäen Gesteinskörnungen hergestellt wurden, weichen jedoch jeweils nur zwei bis vier M.-% von den Ergebnissen der Betone mit den kalzitischen Gesteinskörnungen ab. Daher kann anhand dieser Ergebnisse keine direkte Empfehlung für die Festlegung einer Gesteinskörnung abgeleitet werden.

Bezüglich des einzusetzenden Fasergehaltes kann entsprechend der Erfahrungen der MFPA Leipzig GmbH in Verbindung mit den im Rahmen der aktuellen Forschungsarbeit durchgeführten Recherche und von den hier erzielten Ergebnissen festgehalten werden, dass ein Fasergehalt von  $2,0 \text{ kg/m}^3$  zweckdienlich erscheint, um bei großmaßstäblichen Probekörpern das Brand- und Abplatzverhalten bei hohen Temperaturbeanspruchungen zu verbessern.

Im Allgemeinen muss anhand der Ergebnisse aus den verifizierenden Kleinbrandversuchen jedoch festgehalten werden, dass auf Grund der experimentell bestimmten Frischbetoneigenschaften und auf Grund der zuvor beschriebenen Ergebnisse der verifizierenden Kleinbrandversuche keine der verwendeten ZTV-ING-konformen Tunnelbetonrezepturen endgültig für die Anwendung an den großmaßstäblichen Probekörpern selektiert werden konnte.

In Verbindung mit den im nachfolgenden Abschnitt aufgeführten Rahmenbedingungen, die gemeinsam mit dem Forschungsgeber diskutiert und festgelegt worden sind, wurden durch den Forschungsnehmer weiterführende Untersuchungen zur Verbesserung der Frischbetoneigenschaften anhand von großvolumigen Eignungsmischungen durchgeführt.

Die iterativ durchgeführte Anpassung der zuvor verwendeten Labormischungen an großvolumige, in einem Transportbetonwerk herzustellende Tunnelbetone für die Anwendung in den großmaßstäblichen Probekörpern, werden im nachfolgenden Abschnitt 4 näher erläutert.

## 4 Optimierung der Betonrezepturen

### 4.1 Allgemeines

Im Rahmen der Vorversuche an den Kleinprobekörpern wurde festgestellt, dass die Zugabe der PP-Fasern zu den ZTV-ING-konformen Tunnelbetonrezepturen einen erheblichen Einfluss auf die Frischbetonkonsistenz und somit auch auf die Verarbeitbarkeit der fasermodifizierten Betone besitzt. Mit der Zugabe steigender Fasergehalte musste so im Vergleich zur jeweiligen Referenzbetonmischung eine deutliche Reduzierung des Ausbreitmaßes beobachtet werden (vgl. auch Tabelle 5).

Auf Grund der zu erwartenden, relativ großen Volumina sollte die Herstellung der Referenz- und der fasermodifizierten Betone für die großmaßstäblichen Probekörper planmäßig in einem Transportbetonwerk erfolgen. In diesem Zusammenhang wurden die ZTV-ING-konformen Betonrezepturen überarbeitet und es wurden weitere ergänzende Eignungsmischungen in dem Ortbetonwerk durchgeführt, in dem im Anschluss auch die Betone für die großmaßstäblichen Probekörper hergestellt wurden.

Dabei galten, wie auch bei den Vorversuchen die folgenden Festlegungen:

- nur bauaufsichtlich zugelassene und genormte Ausgangsstoffe dürfen verwendet werden,
- abweichend von den Vorversuchen dürfen auch andere Betonzusatzstoffe und Betonzusatzmittel verwendet werden,
- die Verwendung von stabilisierenden Betonzusätzen ist möglichst zu vermeiden,
- die Frischbetonkonsistenz der Betone für die geschlossene und die offene Bauweise sollte

so eingestellt sein, dass das Ausbreitmaß zwischen 50 cm und 55 cm liegt,

- es werden für die groben Kornfraktionen kalzitische Gesteinskörnungen in den Kornfraktionen von 2/8 und 8/16 verwendet und
- die Tunnelbetone müssen den Anforderungen nach ZTV-ING entsprechen.

Für die Herstellung der großmaßstäblichen Probekörper der geschlossenen Bauweise wurde speziell für dieses Projekt eine offene Schalung hergestellt (vgl. dazu Abschnitt 5.2). Durch die zu realisierende Krümmung des Probekörpers der ein Tunnelinnenschalensegment des Regelquerschnitts RQ 10,5 T darstellt, war es einbautechnisch nicht möglich einen Beton mit der geforderten sehr weichen Konsistenz herzustellen. Als Zielkonsistenz wurde daher für die Tunnelbetonrezepturen der geschlossenen Bauweise ein Ausbreitmaß von  $\geq 45$  cm und für die Betone der offenen Bauweise ein Ausbreitmaß von ca. 50 cm anvisiert.

### 4.2 Durchführung von großvolumigen Eignungsmischungen

Zur Verbesserung der Frischbetonkonsistenz der Betonkonzeptionen der geschlossene und der offenen Bauweise wurden in einem ersten Schritt der Optimierung der Betonrezepturen der Bindemittelgehalt erhöht, was ebenfalls zur Folge hat, dass auch der zulässige Wasseranteil erhöht werden konnte.

Die Ausgangswerte der Rezepturen für die großvolumigen Eignungsmischungen können der Tabelle 8 entnommen werden.

**Tabelle 8** Ausgangswerte der großvolumigen Eignungsmischungen für die geschlossene und die offene Bauweise

		geschlossene Bauweise	offene Bauweise
Zementgehalt CEM I 32,5 R	[kg/m <sup>3</sup> ]	310	340
Flugasche	[kg/m <sup>3</sup> ]	80	50
Wasser	[kg/m <sup>3</sup> ]	170	170
w/z -Wert		0,55	0,50
(w/z) <sub>eq</sub> -Wert		0,50	.. <sup>1)</sup>
Betonzusatzmittel Glenium C 323 Mix	[M.-%] vom Zement	0,5..1,8 ggf. Nachdosierung	1,0..1,8 ggf. Nachdosierung
Gesteinskörnungen		(1806 kg/m <sup>3</sup> )	(1782 kg/m <sup>3</sup> )
0/2 mm	[%]	35	40
2/16 mm		65	60

<sup>1)</sup> Anrechnung der sfa gemäß ZTV-ING Teil 3 [4] nicht zulässig

Hauptziel der Durchführung der großvolumigen Eignungsmischungen war es, die Frischbetoneigenschaften der fasermodifizierten ZTV-ING-konformen Tunnelbetonrezepturen - sowohl für die geschlossene als auch für die offene Bauweise - so zu verbessern, dass die angestrebten Ausbreitmaße trotz der Zugabe der PP-Fasern erreicht werden können.

In einem ersten Bearbeitungsschritt wurden acht Eignungsmischungen zu je  $0,5 \text{ m}^3$  an der modifizierten Rezeptur für die geschlossene Bauweise durchgeführt um den erforderlichen Fließmittelgehalt für die geforderte Frischbetonkonsistenz einzustellen. Für die fasermodifizierten Betonkonzeptionen wurden zum einen die festgelegten PP-Fasern mit der bauaufsichtlichen Zulassung mit der Nr. Z-3.73.1878 und den geometrischen Abmessungen von 2,8 dtex ( $\varnothing = 18 \mu\text{m}$ ) und 6 mm Länge verwendet. Zusätzlich wurden im Rahmen der Untersuchungen ebenfalls Fasern mit den geometrischen Abmessungen von 2,2 dtex ( $\varnothing = 15 \mu\text{m}$ ) und einer Länge von 2 mm dem Betonentwurf zugegeben.

Abweichend von den Laborversuchen wurden die Fasern nicht dem Trockengemisch sondern erst dem fertigen Frischbeton zugegeben. Somit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes auch die zweite Möglichkeit der Faserzugabe mit untersucht. Die Auswirkungen dieser Variante der Faserzugabe auf die Faserverteilung und auf die tatsächliche Menge im Frischbeton wurde bei der Herstellung der großmaßstäblichen Probekörper mit untersucht.

Die Ergebnisse der ersten Serie haben ergeben, dass im Vergleich zur Referenzbetonmischung ohne Fasern, bei der ein Ausbreitmaß von ca. 43 cm erhalten wurde, die angepasste Faserbetonmischung mit den längeren PP-Fasern (2,8 dtex / 6 mm) bei einem grenzwertigen Zusammenhalt des Frischbetons lediglich ein Ausbreitmaß von 40 cm erreicht werden konnte. An der fasermodifizierten Rezeptur mit den kürzeren Fasern (2,2 dtex / 2 mm) wurde im bei der ersten Serie der Eignungsmischungen ein Frischbeton mit einem sehr guten Zusammenhalt und einem Ausbreitmaß von 41 cm erhalten.

In zwei weiteren Eignungsmischungen zur geschlossenen Bauweise wurde anschließend noch einmal der Feinkornanteil der Gesteinskörnungen um 5 % erhöht. Mit den gleichen Rezeptur wurden an dem Tunnelbeton mit den längeren PP-Fasern (2,8 dtex / 6 mm) ein Ausbreitmaß von 44 cm nach 10 Minuten und von 43 cm nach 45 Minuten erzielt. An der Tunnelbetonrezeptur mit den kürzeren PP-Fasern wurde sowohl nach 10 Minuten als

auch nach 45 Minuten ein Ausbreitmaß von 45 cm bestimmt.

Für die Betonrezepturen der offenen Bauweise wurde im ersten Schritt der Eignungsmischungen für den Referenzbeton ein Ausbreitmaß von 51 cm bestimmt. Am PP-fasermodifizierten Beton konnte nach der Erhöhung des Fließmittelgehaltes ein Frischbeton mit einem akzeptablen Zusammenhalt der Matrix und einem Ausbreitmaß des Frischbetons von 49 cm erhalten werden.

Auf Grund des lediglich akzeptablen Zusammenhalts der Frischbetonmatrix wurden auch hier noch weitere fünf Eignungsmischungen zu je  $0,5 \text{ m}^3$  durchgeführt. Dabei wurden zum Vergleich der Mischungskonzeptionen sowohl die längeren (2,8 dtex / 6 mm) als auch die kürzeren (2,2 dtex / 2 mm) PP-Fasern eingesetzt. Als Ergebnis dieser Mischserie konnte festgestellt werden, dass auch hier die Faserbetonkonzeptionen mit den längeren Fasern nur einen grenzwertig akzeptablen bis guten Zusammenhalt der Frischbetonkonzeption aufwiesen.

Bei den Betonkonzeptionen mit den kürzeren Fasern konnte augenscheinlich ein deutlich besserer Zusammenhalt der Frischbetonmatrix beobachtet werden. Dabei muss aber angemerkt werden, dass zusätzlich auch noch einmal der Flugascheanteil von  $50 \text{ kg/m}^3$  auf  $80 \text{ kg/m}^3$  erhöht wurde. Bei beiden Faserbetonkonzeptionen wurden Ausbreitmaße nach 10 Minuten von bis zu 48 cm bestimmt.

In der Nachbereitung der ersten beiden Serien der Eignungsmischungen wurde festgestellt, dass die Tunnelbetonrezepturen mit dem vorgeschlagene Betonzusatzmittel nach 20 Stunden noch nicht erhärtet waren. Für die Herstellung der Probekörper und auch für die avisierte Praxisanwendung der Tunnelbetonkonzeptionen war es aber von Bedeutung, dass der Beton möglichst für erstarrt und anschließend auch ausgeschalt werden kann. dem entsprechend wurde das verwendete Fließmittel als ungeeignet empfunden und gegen das Fließmittel mit der Bezeichnung FM Glenium Sky 503 (Fa. BASF) ausgetauscht.

Entsprechend dem Ziel, die die Frischbetoneigenschaften der ZTV-ING konformen Tunnelbetone so zu verbessern, dass die angestrebten Frischbetonkonsistenzen erreicht werden können, wurden auf Grund der oben beschriebenen, augenscheinlich besseren Verarbeitbarkeit die kürzeren Fasern mit den geometrischen Abmessungen 2,2 dtex ( $\varnothing = 15 \mu\text{m}$ ) und einer Länge von 2 mm für weitere Eignungsmischungen verwendet. Entsprechend der Recherchen der MFPA Leipzig GmbH wurden auch diese Fasern,

die in der bauaufsichtlichen Zulassung mit der Nr. Z-3.73.1878 aufgeführt sind, bereits als Faserzusatz in aktuellen Tunnelbauprojekten zur Verbesserung des Brand- und Abplatzverhaltens eingesetzt. Diese Fasergeometrie wurde aber nicht in der vorangegangenen Entwicklung der Faserbetonrezepturen berücksichtigt.

Bei den Tunnelbetonrezepturen für die geschlossene Bauweise wurde unter der Verwendung der Rezeptur entsprechend Tabelle 8 und dem erwähnten Austausch des Betonzusatzmittels eine Frischbetonkonsistenz von 48 cm nach 10 Minuten erhalten. Dabei wurde unter der Anwendung der Mindestdosierung des Betonzusatzmittels von 0,2 M.-% vom Zement ein augenscheinlich guter Zusammenhalt der Frischbetonmatrix erzielt.

An der fasermodifizierten Tunnelbetonrezeptur für die geschlossene Bauweise (unter Zugabe der PP-Fasern mit der Geometrie von 2,8 dtex / 2 mm) konnte mit 42 cm nach 10 Minuten und mit 46 cm nach 45 Minuten ebenfalls eine hinsichtlich anvisierten Zielstellung eine annähernd akzeptable Frischbetonkonsistenz sowie eine augenscheinlich guter Zusammenhalt der Frischbetonmatrix aufgenommen werden. Bei den Mischungsentwürfen für die offene Bauweise wurden bei dieser Untersuchungsserie ein Ausbreitmaß von ca. 58 cm an dem Beton ohne Faserzugabe und Ausbreitmaße von 51 cm nach 10 Minuten sowie von 56 cm nach 45 Minuten an dem fasermodifizierten Beton (mit den kurzen Fasern, 2,8 dtex / 2 mm) bestimmt.

Insgesamt konnte anhand der durchgeführten Eignungsmischungen nachgewiesen werden, dass es prinzipiell möglich ist ZTV-ING-konforme Betone mit der zusätzlichen Anwendung von PP-Faserzusätzen herzustellen.

Es wurde aber durch die Ergebnisse der Eignungsmischungen außerdem festgestellt, dass die im Forschungsprojekt favorisierten Fasern mit den geometrischen Abmessungen von 2,8 dtex ( $\varnothing = 18 \mu\text{m}$ ) und 6 mm Länge einen größeren Einfluss auf die Frischbetonkonsistenz besitzen, als die kürzeren Fasern mit den geometrischen Abmessungen von 2,2 dtex ( $\varnothing = 15 \mu\text{m}$ ) und 2 mm Länge.

### 4.3 Festlegung der Rezepturen

Wie bereits zuvor beschrieben wurde, konnten im Rahmen der durchgeführten experimentellen Untersuchungen gute Ergebnisse hinsichtlich der anvisierten Frischbetoneigenschaften erreicht werden. Nach den insgesamt 24 Eignungsmischungen zu je  $0,5 \text{ m}^3$  wurden sowohl für die geschlossene

als auch für die offene Bauweise jeweils Referenz- sowie Faserbetone mit einer augenscheinlich guten Frischbetonkonsistenz und Ausbreitmaßen in den angestrebten Konsistenzbereichen hergestellt. Jedoch konnte diese Optimierung bis zum augenscheinlich guten Zusammenhalt der Frischbetonmatrix lediglich mit den bauaufsichtlich zugelassenen kürzeren Fasern mit den geometrischen Abmessungen von 2,2 dtex ( $\varnothing = 15 \mu\text{m}$ ) und 2 mm Länge erreicht werden.

Dennoch wurden diese PP-Fasern im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht weiter berücksichtigt, da es zu diesen zwar rheologisch günstigen wirkenden PP-Fasern zum Zeitpunkt der Rezepturfestlegung noch keine Untersuchungen und Veröffentlichungen zur Wirksamkeit der PP-Faser in Brandschutzbetonen vorlagen.

Im Gegensatz dazu, wurden mit den längeren PP-Fasern bereits umfangreiche Untersuchungen zum Brand- und Abplatzverhalten von Betonen mit positiven Ergebnissen durchgeführt.

Hinsichtlich der im Forschungsprojekt gestellten Zielstellung, den Nachweis für eine positive Wirkung von PP-Faserbewehrungen auf ZTV-ING-konforme Tunnelbetonrezepturen zu erbringen, wurde mit dem Wissen der günstigen Wirkungsweise der bereits in den Vorversuchen verwendeten Faserbewehrung gemeinsam mit dem Forschungsgeber eine Entscheidung für die Faser mit den geometrischen Abmessungen von 2,8 dtex ( $\varnothing = 18 \mu\text{m}$ ) und 6 mm Länge getroffen.

Die endgültigen Tunnelbetonrezepturen zur Herstellung der Betone für die geschlossene und die offene Bauweise wurden anhand der zuvor durchgeführten Eignungsmischungen festgelegt. Gemäß der durchgeführten Abstimmungen wurde für die Herstellung der großmaßstäblichen Probekörper jeweils ein Referenzbeton und eine fasermodifizierte Tunnelbetonrezeptur unter Zugabe von  $2,0 \text{ kg/m}^3$  der bauaufsichtlich zugelassenen PP-Fasern (Zulassungs-Nr.: Z-3.73.1878) verwendet. Die Übersicht über die Mengen der verwendeten Betonausgangsstoffe kann der Tabelle 9 entnommen werden. Die Protokolle der Mischungsentwürfe aus dem Transportbetonwerk sind in Anlage 1 aufgeführt.

Gemäß der Abstimmung mit dem Forschungsgeber wurden in den groben Kornfraktionen 2/8 mm und 8/16 mm bei der Herstellung der Tunnelbetonrezepturen gebrochene, kalzitische Gesteinskörnungen verwendet. Analog zu den Vorversuchen wurde für die Sandfraktion (0/2 mm) eine quarzische Gesteinskörnung (im speziellen ein Mainsand) verwendet.

**Tabelle 9** Ausgangswerte für die Rezepturen der geschlossene und offene Bauweise zur Herstellung der großmaßstäblichen Probekörper

		geschlossene Bauweise	offene Bauweise
Zementgehalt CEM I 32,5 R	[kg/m <sup>3</sup> ]	310	340
Flugasche	[kg/m <sup>3</sup> ]	80	80
Wasser	[kg/m <sup>3</sup> ]	170	170
w/z -Wert		0,55	0,50
(w/z) <sub>eq</sub> -Wert		0,50	-- <sup>1)</sup>
Betonzusatzmittel Glenium Sky 501	[M.-%] vom Zement	0,2 bzw. 0,4	0,4 bzw. 0,8
Fasern 2,8 dtex / 6 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	0 bzw. 2,0	0 bzw. 2,0
Gesteinskörnung		(1806 bzw. 1803 kg/m <sup>3</sup> )	(1803 bzw. 1777 kg/m <sup>3</sup> )
0/2 mm	[%]	40	40
2/8 mm		20	20
8/16 mm		40	40

<sup>1)</sup> Anrechnung der sfa gemäß ZTV-ING Teil 3 [4] nicht zulässig

Entsprechende der Kenntnisse aus den durchgeführten Eignungsmischungen an den ZTV-ING-konformen Tunnelbetonrezepturen, in Verbindung mit der Zugabe der PP-Fasern mit den geometrischen Abmessungen von 2,8 dtex ( $\varnothing = 18 \mu\text{m}$ ) und 6 mm, Länge war bereits im Vorfeld der Herstellung der Probekörper eine Beeinträchtigung des angestrebten Ausbreitmaßes zu erwarten.

Anhand von der MFPA Leipzig GmbH durchgeführten Recherchen kann jedoch die Aussage getroffen werden, dass PP-fasermodifizierte Betone auch mit der Anwendung dieser Fasern in Konsistenzbereichen von  $a > 50 \text{ cm}$  mit sehr guten Zusammenhalt der Frischbetonmatrix hergestellt werden können. Jedoch ist anzumerken, dass diese Betone im Allgemeinen mit Wasserzementwerten von mind.  $w/z = 0,55$  hergestellt werden. Der erhöhte Wasseranteil ist entsprechend der erhaltenen Informationen zwingend auf Grund des Wasseranspruches der PP-Fasern erforderlich. In diesem FE-Projekt war auf Grund der festgelegten Anforderungen an die ZTV-ING-konformen Tunnelbetonrezepturen eine zusätzliche Erhöhung des Wassergehaltes nicht vorgesehen.

Der Nachweis der zielsicheren Herstellung von Betonen mit den baupraktischen Zielkonsistenzen wurde durch die MFPA Leipzig GmbH im Rahmen einer betontechnologischen Machbarkeitsstudie erbracht. Es konnte im Rahmen der ergänzenden Laboruntersuchungen nachgewiesen werden, dass die Herstellung von Betonen mit Frischbetonkonsistenzen zwischen 500 und 550 [mm] Ausbreitmaß, bei Druckfestigkeiten von ca.  $3,0 \text{ N/mm}^2$  nach 12 Stunden möglich ist. Hierfür

bedarf es jedoch speziell abgestimmter und optimierter Tunnelbetonrezepturen.

Die Untersuchungen haben im Rahmen der beton-technologischen Machbarkeitsstudie aber auch gezeigt, dass solche optimierten Betone mit den hohen Zielkonsistenzen zum Beispiel sehr sensibel gegenüber Variationen der einzelnen Betonausgangsstoffe reagieren.

## 5 Bemessung und Herstellung der großmaßstäblichen Probekörper

### 5.1 Allgemeines

Nachfolgend wird die Herstellung der Probekörper, beginnend von der statischen Bemessung der geometrisch auf die vorhandenen Belastungseinrichtungen der MFPA Leipzig GmbH angepassten Probekörper bis zur Herstellung und dem Einbau der im vorherigen Abschnitt 4.3 beschriebenen Tunnelbetone in die Schalungen der großmaßstäblichen Probekörper näher erläutert.

Zur realen Bewertung und Einschätzung des Brand- und Abplatzverhaltens von ZTV-ING konformen Betonen ohne Faserzugabe und fasermodifizierten Tunnelbetonen wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens insgesamt sechs Tunnelbrandversuche an großmaßstäblichen Probekörpern durchgeführt. Getrennt nach geschlossener und nach offener Bauweise wurden in Abhängigkeit der an der MFPA Leipzig GmbH vorhandenen Belastungseinrichtungen für den Tunnelofen und in gemeinsamer Abstimmung mit dem Forschungsgeber zwei verschiedene geometrische Formen für die Probekörper gewählt.

### 5.2 Probekörper für die geschlossene Bauweise

#### 5.2.1 Probekörpergeometrie

An der MFPA Leipzig GmbH existiert für den großen Tunnelofen eine Belastungseinrichtung mit der es möglich ist, in großmaßstäbliche Probekörper sowohl vertikale als auch horizontale Belastungen einzutragen und somit auch reale Schnittgrößen in einem Tunnelbauwerk zu simulieren.

Die Belastungseinheit wurde bisher sowohl an nationalen (z. B. Brandversuche zum City Tunnel Leipzig) als auch internationalen Großprojekten (z. B. Brandversuche zum Liefkenshoek Tunnel in

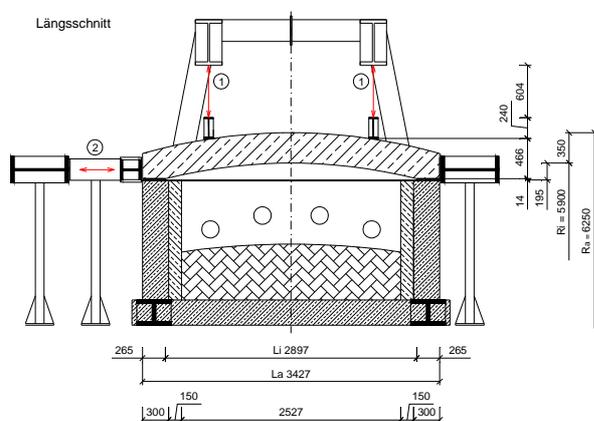
Antwerpen) erfolgreich eingesetzt. Im folgenden Bild 26 ist der Tunnelofen mit den zuvor beschriebenen Belastungseinrichtungen abgebildet.



**Bild 26** Vorhandene Belastungseinrichtung für die Durchführung von Großbrandversuchen an Tunnelinnenschalensegmenten

Mit der Durchführung der experimentellen Untersuchungen an dem festgelegten Referenzbeton und an der PP-fasermodifizierten Tunnelbetonrezeptur sollten die Auswirkungen der Zugabe der PP-Faserbewehrung auf das Brand- und Abplatzverhalten der ZTV-ING-konformen Tunnelbetone infolge der einseitigen Beanspruchung durch die ZTV-ING-Kurve dargestellt werden.

Bei drainierten Tunnelbauwerken stellt der Lastfall Eigengewicht häufig für eine lange Zeit die einzige und somit maßgebende Beanspruchung für die Tunnelinnenschale dar. Daher sollte des Weiteren ebenfalls der Unterschied zwischen unbelasteten Probekörpern (bzw. Belastung lediglich durch dessen Eigengewicht) sowie der Auswirkungen von zusätzlich eingetragenen vertikalen und horizontalen Lasten auf die einseitig brandbeanspruchten Probekörper untersucht werden.



**Bild 27** Schematischer Versuchsaufbau und Abmessungen des festgelegten Prüfkörpers

Zur Bestimmung der genannten Einflusskriterien wurden daher vier Tunnelbrandversuche an großmaßstäblichen Tunnelinnenschalensegmenten durchgeführt. Gemeinsam mit dem Forschungsgeber wurde die Auswahl getroffen, dass:

- jeweils ein Referenzbetonprobekörper und ein fasermodifizierter Probekörper unbelastet und
- jeweils ein Referenzbetonprobekörper und ein fasermodifizierter Probekörper unter zusätzlicher vertikaler und horizontaler Belastung

unter einer einseitigen Brandbeanspruchung durch die ZTV-ING-Brandkurve geprüft wird.

Als geeignete Probekörpergeometrie der zu prüfenden großmaßstäblichen Probekörper wurde in Anlehnung an den Regelquerschnitt RQ 10,5 T der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ein Tunnelinnenschalensegment mit einem Innenradius von  $r_i = 5,9$  m und einer Mindestquerschnittsdicke von  $d = 35$  cm gewählt.

Die Anpassung der festgelegten Probekörpergeometrie erfolgte, wie bereits beschrieben, auf die geometrischen Abmessungen des Tunnelofens und der vorhandenen Zwangspunkte der Belastungseinrichtungen. Eine Übersichtsskizze des gewählten Versuchsaufbaus mit den geometrischen Abmessungen des Probekörpers und den Lasteinleitungspunkten kann der Grafik im Bild 27 entnommen werden.

## 5.2.2 Statische Bemessung

In Abstimmung mit dem Forschungsgeber wurden die großmaßstäblichen Probekörper für die geschlossene Bauweise statisch so bemessen, dass unter der Einwirkung von:

- einer, über vier hydraulische Druckzylinder eingetragenen, vertikalen Gesamtlast von  $V = 1900$  kN und
- der horizontalen Gesamtbelastung (ebenfalls durch vier hydraulische Zylinder eingetragenen) von  $H = 3600$  kN.

reale Schnittgrößen, wie sie auch in einem Straßentunnelbauwerk auftreten können, eingetragenen werden.

Die statische Bemessung der Probekörper für die geschlossene Bauweise kann Anlage 2 entnommen werden. Die Bemessung der Probekörper erfolgte dabei unter Ansatz eines Teilsicherheitsbeiwertes von 1,35 nach DIN 1054 (GZ1b, LF1, Ständige Einwirkungen) für das Eigengewicht des Probekörpers. Für die, durch die Belastungseinrichtungen eingetragenen Einwirkungen (Lastfall 2)

wurde der Teilsicherheitsbeiwert mit 1,0 angenommen. Die aus der statischen Bemessung und aus der Wahl der Probekörpergeometrie resultierenden Schal- und Bewehrungspläne können Anlage 3 entnommen werden.

### 5.2.3 Herstellung der Probekörper

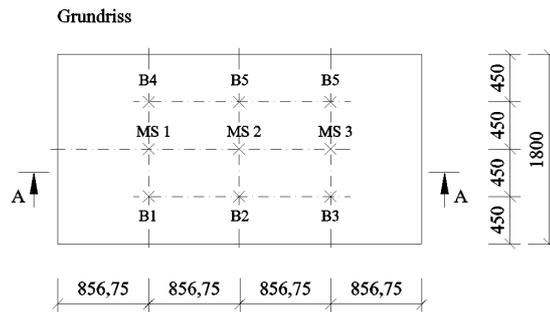
Zur Herstellung der vier großmaßstäblichen Probekörper zur Simulation eines Tunnelinnenschalensegmentes mit den geometrischen Abmessungen des Regelquerschnitts RQ 10,5 T musste zunächst eine geeignete Schalung erstellt werden. Die Herstellung dieser Schalung sowie auch die Produktion der Probekörper gemäß der Vorgaben der erstellten Schal- und Bewehrungsplanung erfolgte mit Unterstützung der HOCHTIEF Construction AG.

In die speziell errichtete offene Schalungen wurden bei der Herstellung der einzelnen großmaßstäblichen Probekörper jeweils die statisch erforderlichen Bewehrung und spezielle Thermoleitungen eingebaut, die während der Brandversuche zur Aufzeichnung der Temperaturerhöhung in verschiedenen Messtiefen erforderlich waren.

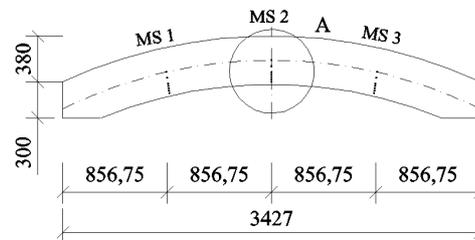
Dabei wurden in der Längsachse der Probekörper jeweils drei Messstellen MS1 bis MS3 festgelegt, an denen die Thermoleitern mit den Messfühlern in den acht Messebenen angeordnet waren. Zur Überwachung des Temperaturanstieges an der tragenden Längsbewehrung wurden ergänzend an den Messpunkten B1 bis B6 einzelne Thermoelemente an der Längsbewehrung vorgesehen. Eine Übersicht über die Anordnung der Messstellen in den Probekörpern kann den nachfolgenden grafischen Darstellungen (Bild 28 bis Bild 30) entnommen werden.

Ergänzend kann Bild 31 die vorbereitete Schalung für die Betonage eines Probekörpers der Tunnelinnenschalensegmente entsprechend dem Regelquerschnitt der BAST RQ 10,5 T, inklusive der bereits installierten Thermoelemente, entnommen werden.

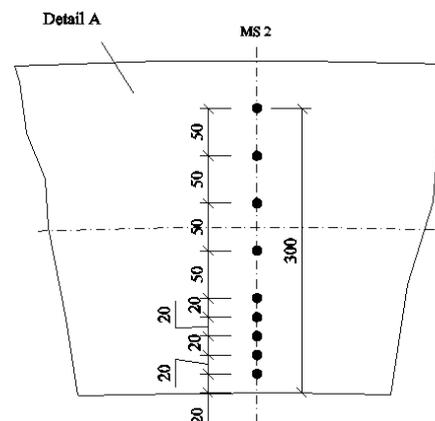
Die Herstellung der einzelnen Tunnelbetone für den Einbau erfolgte im Transportbetonwerk der in Frankfurt a. M. ansässigen Firma Waibel unter der Leitung von Betontechnologen der HOCHTIEF Construction AG, mit den in Abschnitt 4.3 festgelegten und in der Anlage 1 aufgeführten Mischungsberechnungen (Nr. 224 für die Referenzbetone und Nr. 222 für die fasermodifizierten Mischungskonzeptionen).



**Bild 28** Anordnung der Messstellen im Probekörper  
 - an den drei Messpunkten wurden spezielle Messleitern mit jeweils acht Messpunkten MS 1 bis MS 3 angeordnet  
 - die sechs zusätzlichen einzelnen Thermoelemente wurden jeweils an der tragenden Bewehrung in einer Messtiefe von 6 cm installiert



**Bild 29** Übersicht über die Anordnung der Messstellen im Probekörper (Längsschnitt)



**Bild 30** Übersicht über die Anordnung der Thermoleitungen in den verschiedenen Messebenen von 20 mm bis 300 mm

Wie bereits im Abschnitt 4.2 beschrieben, erfolgte bei der Herstellung der fasermodifizierten Tunnelbetonrezepturen die Zugabe der PP-Fasern in den Zwangsmischer der Transportbetonanlage durch eine kleine Öffnung auf der Oberseite des Mischwerkes erst nachdem der Frischbeton bereits gemischt worden ist. Eine spezielle Dosiereinrichtung für die PP-Faserzugabe existierte nicht.



**Bild 31** Schalung der Probekörper für die Tunnelchalensegmente der geschlossenen Bauweise

Im Einzelnen wurde bei der Herstellung der fasermodifizierten Tunnelbetonrezepturen wie folgt vorgegangen:

- Zugabe der trockenen Betonausgangsstoffe (Gesteinskörnungen, Zement, Steinkohleflugasche),
- Zugabe des Wassers (abzüglich des zuvor ermittelten Feuchtegehalts der Gesteinskörnungen) sowie gleichzeitige Zugabe des Betonzusatzmittels und
- händische Zugabe der Fasern in den Zwangsmischer.

Nach der Herstellung im Transportbetonwerk wurden vor Ort erstmals die Frischbetoneigenschaften (Ausbreitmaß, Frischbetonrohddichte, Luftporengehalt und bei den fasermodifizierten Betonrezepturen auch die Faserverteilung im Frischbeton) ca. zehn Minuten nach Beendigung des Mischvorganges bestimmt.

Ein zweites Mal wurden anschließend die Frischbetoneigenschaften nach dem Transport mit einem Fahrmischer zur Produktionshalle der HOCHTIEF Construction AG bestimmt. Die Transportzeit zum Herstellungsort der Probekörper betrug ca. 35 bis 45 Minuten. Eine Übersicht über die ermittelten Festbetoneigenschaften kann der Tabelle 10 entnommen werden.

Zu jedem großmaßstäblichen Probekörper wurden ergänzend jeweils 18 Würfel ( $a = 150 \text{ mm}$ ) zur Bestimmung der Festbetoneigenschaften erstellt. An diesen Probekörpern wurden die Druckfestigkeiten der Betonkonzeptionen nach einem, nach sieben, nach 28 sowie am Tage der Brandprüfung an jeweils 3 Probekörpern ermittelt. Zusätzlich wurde auch bei den großmaßstäblichen Probekörpern GB3 und GB4 die Druckfestigkeit nach 12 Stunden ermittelt. Des Weiteren wurde am Tag der Brandprüfung auch an jeweils drei Probekörpern der

Feuchtegehalt durch das Darrtrocknen bei  $105^\circ\text{C}$  im Trockenofen ermittelt. Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen sowie der Ermittlung des Feuchtegehaltes können ebenfalls der Tabelle 10 entnommen werden.

Anhand der bestimmten Frisch- und Festbetonergebnisse für die Betone der geschlossenen Bauweise können die nachfolgenden Zusammenfassungen abgeleitet werden:

- Die erreichten Ausbreitmaße lagen unterhalb der anvisierten Zielwerte. Die vorhandenen Ausbreitmaße konnten mit Ausnahme der Mischung für den Probekörper GB2 über den Zeitraum des Transportes bis zum Einbau in die Schalung gehalten bzw. leicht gesteigert werden.
- Die im Betonwerk nach 10 Minuten ermittelten Frischbetonkonsistenzen weichen nur geringfügig von den rechnerisch ermittelten Frischbetonkonsistenzen der Mischungsrechnungen ab (vgl. Anlage 1).
- Mit Durchschnittswerten von  $1,78 \text{ kg/m}^3$  bei der Mischung für den Probekörper GB2 und mit  $1,68 \text{ kg/m}^3$  bei der Mischung für den Probekörper GB4 wurden bei der Ermittlung des Fasergehaltes im Frischbeton jeweils nur 89 % (GB2) und 84 % (GB4) des theoretisch vorhandenen Fasergehaltes ermittelt.
- Bei der Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der erzielten Frischbetonkonsistenzen müssen die geringen Temperaturen der Umgebungsluft bei der Herstellung der Probekörper sowie die daraus resultierenden niedrigen Temperaturen des Frischbetons berücksichtigt werden.
- Anhand der ermittelten Werte für die Druckfestigkeiten können die Betone der geschlossenen Bauweise alle mindestens der Festigkeitsklasse C30/37 zugeordnet werden.
- Anhand der Begleitprobekörper (150er Würfel) wurde für die Tunnelbetonrezepturen Feuchtegehalte von 3,75 M.-% bis 4,51 M.-% bestimmt.

Tabelle 10 Frisch- und Festbetoneigenschaften der großmaßstäblichen Probekörper - geschlossene Bauweise

Allgemeines					
Bezeichnung des Probekörpers		GB1	GB2	GB3	GB4
Rezeptnummer					
(theoretischer) Fasergehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	--	2,0	--	2,0
äquivalenter Wasserzementwert (w/z) <sub>eq.</sub>		0,50	0,50	0,50	0,50
Herstelldatum		08.12.2008	11.12.2008	17.12.2008	15.12.2008
Frischbetoneigenschaften (Werk)					
Ausbreitmaß a <sub>1</sub>	[cm]	42	36	32	29
Frischbetonrohddichte ρ <sub>1</sub> <sup>1)</sup>	[kg/m <sup>3</sup> ]	2370	2380	2350	2360
Luftgehalt	[Vol.-%]	2,40	3,45	1,80	1,90
Fasergehalt Probe 1	[kg/m <sup>3</sup> ]	--	1,61	--	1,70
Fasergehalt Probe 2	[kg/m <sup>3</sup> ]	--	1,90	--	1,72
Fasergehalt Probe 3	[kg/m <sup>3</sup> ]	--	1,82	--	1,62
Mittelwert ermittelter Fasergehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	--	1,78	--	1,68
Differenz der Fasermenge zu 2,0 kg/m <sup>3</sup>		--	0,22	--	0,32
Differenz der Fasermenge	[M.-%]	--	11,19	--	15,98
Frischbetontemperatur	[°C]	11,2	8,5	10,5	10,2
Außentemperatur	[°C]	2,6	2,7	3,0	2,9
Innentemperatur (Halle/Labor)	[°C]	17	15	15	16
Frischbetoneigenschaften (Produktionshalle)					
Ausbreitmaß a <sub>2</sub>	[cm]	46	33	37	38 <sup>4)</sup>
Frischbetonrohddichte ρ <sub>2</sub> <sup>2)</sup>	[kg/m <sup>3</sup> ]	2359	2334	2354	2285
Frischbetontemperatur	[°C]	12	11	11	11
Innentemperatur (Produktionshalle)	[°C]	13	13	13	13
Festbetoneigenschaften					
Druckfestigkeit 12 h	[N/mm <sup>2</sup> ]	--	--	2,0	3,8 <sup>5)</sup>
Druckfestigkeit 24 h	[N/mm <sup>2</sup> ]	13	15	14	14
Druckfestigkeit 7 d	[N/mm <sup>2</sup> ]	36	37	36	35
Druckfestigkeit 28 d	[N/mm <sup>2</sup> ]	48	49	48	44
Druckfestigkeit am Tag der Brandprüfung	[N/mm <sup>2</sup> ]	55	50	45	48
Feuchtegehalt am Tag der Brandprüfung <sup>3)</sup>	[M.-%]	4,51	3,75	3,85	4,15

Anmerkungen:

- 1) Die Frischbetonrohddichte wurde anhand der Masse des Luftporentopfes (8l) ermittelt.
- 2) Die Frischbetonrohddichte wurde aus dem Durchschnittswert aller hergestellten Würfelschalungen ermittelt.
- 3) Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Darrtrocknung, Angabe des Feuchtegehaltes in Masseprozent bezogen auf die Trockenmasse  $\Rightarrow F = (m_{\text{feucht}} - m_{\text{trocken}}) / m_{\text{trocken}}$
- 4) Das Ausbreitmaß konnte erst nach einer zusätzlichen Zugabemenge von 4 Litern Wasser und zusätzlichen 0,2 M.-% Fließmitte erreicht werden. Aus der zusätzliche Wasserzugabe resultierte im Anschluss ein effektiver w/z-Wert von  $(w/z)_{\text{eq}} = 0,51$ .
- 5) Aus drei Begleitprobekörpern konnte nur ein Druckfestigkeitswert ermittelt werden.

Abweichend von der Faserzugabe zum Trockengemisch wurden bei der Herstellung der großmaßstäblichen Probekörper aus technologischen und Dosierungsgründen, die PP-Fasern dem Frischbeton zugegeben. Beim Vergleich der bestimmten Kennwerte für die Faserverteilung im Frischbeton zwischen den beiden Zugabevarianten (Tabelle 5 und Tabelle 10) kann festgestellt werden, dass bei den Laborversuchen am 75 l-Mischer sowohl eine homogenere Faserverteilung als auch eine größere Gesamtfasermenge ermittelt wurde.

Anhand der erzielten Ergebnisse lässt sich die Empfehlung ableiten, dass die Zugabe der Fasern zum Trockengemisch favorisiert werden sollte. Auf jeden Fall sollten beide möglichen

Zugabevarianten (Zugabe der Fasern zum Trocken- oder Feuchtgemisch) im Rahmen von Eignungsversuchen, das jeweils optimale Mischregime und die ggf. erforderlichen Nachmischzeiten (nach der PP-Faserzugabe) ermittelt werden, um somit eine homogene Faserverteilung sowie die geforderten Einbaukonsistenzen sicherzustellen. Insgesamt wird festgehalten, dass bei einer baupraktischen Anwendung der PP-Fasern in ZTV-ING-konformen Tunnelbetonrezepturen unbedingt eine ausreichende Überwachung der Faserverteilung und des Fasergehaltes zur Gewährleistung der Qualität des Frischbetons durchgeführt werden muss.

## 5.3 Probekörper für die offene Bauweise

### 5.3.1 Probekörpergeometrie

Zusätzlich zur bereits beschriebenen Belastungseinrichtung zum Eintrag von vertikalen und horizontalen Lasten existiert an der MFPA Leipzig GmbH ein weiterer Belastungsrahmen, mit dem es möglich ist, Lasten einaxial in Richtung der Längsachse des Probekörpers während des Brandversuches einzutragen. Dieser Belastungsrahmen wurde zum Beispiel zur Bewertung der Betonrezeptur des City Tunnels in Malmö sowie für weitere Projekte genutzt. Im folgenden Bild 32 wird die beschriebene Belastungseinrichtung dargestellt.



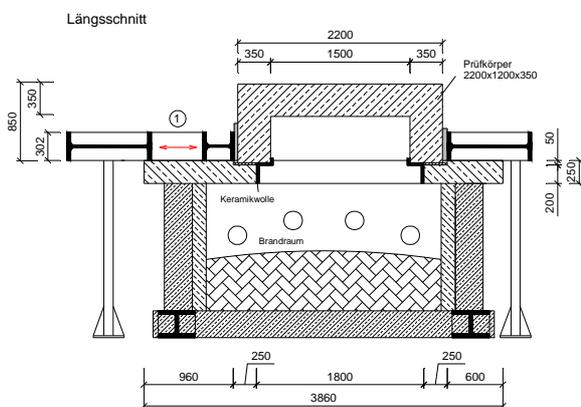
**Bild 32** Belastungseinrichtung für die Durchführung der Versuche an den Rahmenecken

Ziel der experimentellen Untersuchungen war es, im Rahmen der zu untersuchenden Betonkonzeptionen für die offene Bauweise einen Probekörper zu entwerfen, der möglichst großmaßstäblich eine Rahmenecke in einem Tunnelbauwerk der offenen Bauweise simuliert.

Rahmenecken, die in der offenen Bauweise erstellt werden, bestehen im Regelfall aus Bauteilen mit einer Dicke von mindestens 60...80 cm. Mit der vorhandenen Belastungseinrichtung und der zugehörigen Auflager- und Abdeckplatte für den Tunnelofen kann jedoch lediglich eine direkt beflamnte Fläche eines Probekörpers von maximal 180 x 120 cm beansprucht werden.

Unter Berücksichtigung der geometrischen Abmessungen des vorhandenen Tunnelofens mit der zugehörigen Belastungseinrichtung wurde für die Untersuchungen ein skaliertes Probekörper in Form einer Rahmenkonstruktion mit den geometrischen Abmessungen von 2200 x 1200 x 850 mm<sup>3</sup> und einer Bauteildicke von  $d = 35$  cm (Mindestbauteildicke gemäß ZTV-ING) mit dem Forschungsgeber abgestimmt.

Eine Übersichtsskizze über den geplanten Prüfaufbau mit dem Querschnitt des Probekörpers und der Darstellung der Lasteinleitung kann der nachfolgenden Übersichtsskizze in Bild 33 entnommen werden.



**Bild 33** Schematischer Versuchsaufbau und Abmessungen des festgelegten Probekörpers

### 5.3.2 Statische Bemessung

Zur Bewertung der ZTV-ING-konformen Referenz- und Faserbetone für die offene Bauweise wurde im Bezug auf reale Tunnelbauwerke ein skaliertes Probekörper entworfen. Auf Grund der reduzierten Bauteilquerschnitte war es im Vorfeld der Untersuchungen notwendig, dass auch die in einem realen Tunnelquerschnitt der offenen Bauweise (Rahmenecke) vorhandenen Schnittgrößen sowie die daraus resultierenden Spannungszustände im Bauteil auf die veränderte Geometrie angepasst werden.

Die äußeren Einwirkungen wurden über einen Vergleichsspannungsnachweis so ausgewählt, dass sich während der Versuchsbelastungen an den Innen- und Außenseiten des Probekörperquerschnitts reale Spannungszustände einstellen.

Die horizontale Einwirkung wurde mit  $H = 410$  kN festgelegt und vor der statischen Bemessung mit der Betreuungsgruppe des Forschungsvorhabens abgestimmt. Die ständigen Einwirkungen in Form des Eigengewichtes des Probekörpers wurden bei der statischen Bemessung des Probekörpers mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 1,35 nach DIN 1054 (GZ1b, LF1) berücksichtigt. Für die durch die Belastungseinrichtungen eingetragenen Einwirkungen (Lastfall 2) wurde bei der Bemessung des skalierten Bauteils der Teilsicherheitsbeiwert mit 1,0 angenommen.

Auf den gemäß ZTV-ING, Teil 5.2, Abs. 10.3.3, geforderten vereinfachten rechnerischen Nachweis

des Lastfalls Brand, unter Ansatz eines Temperaturgradienten von 50 K, wurde bei der Bearbeitung dieses Projektes verzichtet. Die getroffene Festlegung wird mit der Durchführung der Brandversuche an den skalierten Probekörpern mit der Einleitung der konstanten Belastung und der einseitigen Temperaturbeanspruchung durch die ZTV-ING-Kurve begründet. Die statische Bemessung des Probekörpers kann der Anlage 4 entnommen werden.

Die aus der statischen Bemessung und aus der Wahl der skalierten Probekörpergeometrie resultierenden Schal- und Bewehrungspläne können der Anlage 5 entnommen werden.

### 5.3.3 Herstellung der Probekörper

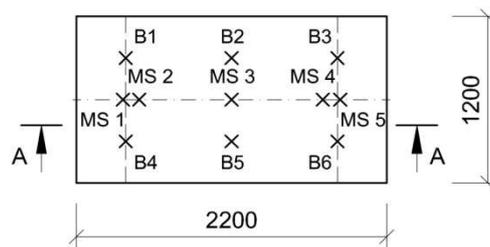
Zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen an den beschriebenen skalierten Probekörpern der geschlossenen Bauweise wurden zwei skalierte großmaßstäbliche Probekörper hergestellt. Es wurde ein Probekörper mit der festgelegten Referenzbetonmischung und ein Probekörper mit der fasermofizierten Betonkonzeption (Rezepturen mit der Nr. 223 und 225) gemäß der Anlage 1 hergestellt.

Gemäß den Anforderungen der ZTV-ING wurde zusätzlich bei dem Probekörper ohne Faserzugabe die konstruktive Mattenbewehrung N94 auf der Innenseite der Deckenplatte des Probekörpers angeordnet. Diese konstruktive Bewehrung sollte entsprechend ZTV-ING, Teil 5, 10.3.2, (2), das Abplatzen des Betons ohne Faserzugabe im Brandfall verhindern und somit das Stahlbetonbauteil im Brandfall wirkungsvoll schützen.

Analog zu den originalmaßstäblichen Probekörpern der geschlossenen Bauweise wurden auch bei den skalierten Bauteilen für die offene Bauweise Messpunkte für die Aufzeichnung der Temperaturen in den verschiedenen Tiefen der Probekörper angeordnet. Insgesamt wurden in jedem Probekörper fünf Messstellen MS1 bis MS5 angeordnet. An jedem dieser Messpunkte wurden in den acht Messebenen von 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200 und 300 mm Thermoelemente zur Bestimmung des Durchwärmungsverhaltens installiert. Ergänzend dazu wurden auch in dieser Versuchsreihe sechs zusätzliche, einzelne Messstellen B1 bis B6 in Höhe der tragenden Bewehrung angeordnet.

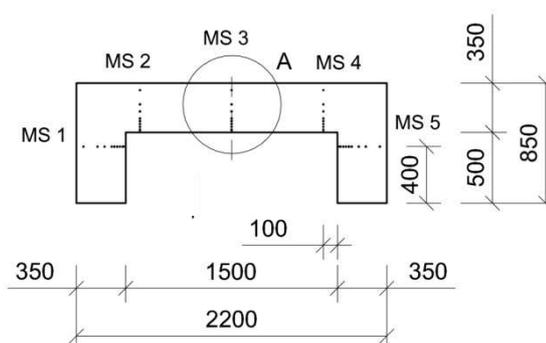
Eine Übersicht über die Anordnung der Messstellen in den Probekörpern kann den nachfolgenden grafischen Darstellungen (Bild 34 bis Bild 36) entnommen werden.

Grundriss



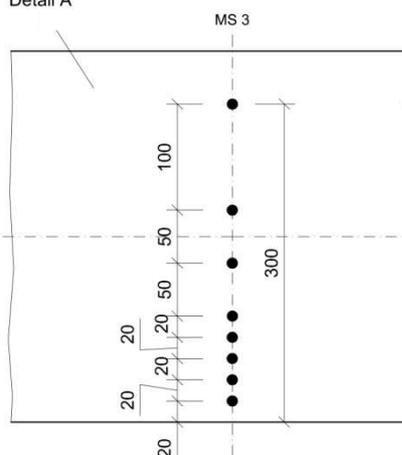
**Bild 34** Anordnung der Messstellen im Probekörper  
 - an fünf Messpunkten wurden spezielle Messleitern mit jeweils acht Messpunkten MS 1 bis MS 3 angeordnet  
 - die sechs zusätzlichen einzelnen Thermoelemente wurden jeweils an der tragenden Bewehrung in einer Messtiefe von 6 cm installiert

Schnitt A-A



**Bild 35** Übersicht über die Anordnung der Messstellen im Probekörper (Längsschnitt A-A)

Detail A



**Bild 36** Übersicht über die Anordnung der Thermoleitungen in den verschiedenen Messebenen von 20 mm bis 300 mm

Im folgenden Bild 37 ist ergänzend die Schalung für die Probekörper der offenen Bauweise mit den bereits installierten Thermoleitungen für die Temperaturmessung abgebildet.



**Bild 37** Schalung der Probekörper für die Tunnelchalensegmente der geschlossenen Bauweise

Die Betone für die Probekörper der offenen Bauweise (vgl. Anlage 1, Rezept.-Nr. 223 und 225) wurden mit dem gleichen Mischregime wie für die Probekörper der geschlossenen Bauweise im Transportbetonwerk der Fa. Waibel in Frankfurt a. M. hergestellt. An anschließend wurden die Betone mit einem Transportbetonmischer zur Versuchshalle der HOCHTIEF Construction AG in Mörfelden-Walldorf gefahren und da in die vorbereitete Schalung gefüllt. Die während der Herstellung ermittelten Frischbetoneigenschaften und die zugehörigen Festbetoneigenschaften können der Tabelle 11 auf der nächsten Seite entnommen werden.

Anhand der bestimmten Frisch- und Festbetonergebnisse für die Betone der geschlossenen Bauweise können die nachfolgenden Zusammenfassungen abgeleitet werden:

- Am Faserbeton wurde bei der Herstellung des Probekörpers mit  $a = 40 \text{ cm}$  ein sehr geringes Ausbreitmaß ermittelt, dass nur unter der zusätzlichen Zugabe von  $0,2 \text{ M.-%}$  Fließmittel und einer zusätzlichen Wassermenge von  $4 \text{ Litern}$  erreicht werden konnte.
- Die Frischbetonkonsistenz des Referenzbetons blieb auch bis zum Einbau in die Schalung konstant bzw. hat sich über den Zeitraum von  $45 \text{ Minuten}$  leicht erhöht.
- Analog zur Herstellung der Probekörper für die geschlossene Bauweise müssen auch hier die niedrigen Temperaturen der Umgebungsluft sowie die daraus resultierenden niedrigen Frischbetontemperaturen bei der Bewertung der erzielten Konsistenzen berücksichtigt werden.
- Mit dem ermittelten Fasergehalt von  $1,69 \text{ kg/m}^3$  konnten auch bei diesem Faserbeton nur  $84,5 \text{ %}$  der zugegebenen Fasermenge im Beton rückgewonnen werden.

- Anhand der ermittelten Werte für die Druckfestigkeiten können die Betone der geschlossenen Bauweise alle mindestens der Festigkeitsklasse C30/37 zugeordnet werden.
- Anhand der Begleitprobekörper ( $150\text{er}$  Würfel) wurde für die Tunnelbetonrezeptur Feuchtegehalte von  $4,26 \text{ M.-%}$  für den Referenzbeton und von  $3,66 \text{ M.-%}$  für den Faserbeton bestimmt.

Mit den erzielten Ergebnissen dieser Versuchsreihe hinsichtlich der Faserverteilung und des tatsächlich vorhandenen Fasergehaltes im Frischbeton wird die in Abschnitt 5.2.3 gegebenen Empfehlung für eine Faserzugabe zum Trockengemisch der Betonausgangsstoffe verstärkt. Auf jeden Fall sollten auch bei der Herstellung von ZTV-ING-konformen Tunnelbetonen der offenen Bauweise darauf geachtet werden, dass anhand von Eignungsversuchen eine homogene Faserverteilung und ein größtmöglicher Fasergehalt an tatsächlich vorhandenen PP-Fasern im Frischbeton nachgewiesen und gewährleistet wird.

Tabelle 11 Frisch- und Festbetoneigenschaften der großmaßstäblichen Probekörper - offene Bauweise

<b>Allgemeines</b>			
Bezeichnung des Probekörpers		<b>OB1</b>	<b>OB2</b>
Rezepturnummer		225	223
(theoretischer) Fasergehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	--	2,0
Wasserzementwert (w/z)		0,50	0,50
Herstelldatum		08.12.2008	11.12.2008
<b>Frischbetoneigenschaften (Werk)</b>			
Ausbreitmaß a <sub>1</sub>	[cm]	53	30
Frischbetonrohddichte ρ <sub>1</sub> <sup>1)</sup>	[kg/m <sup>3</sup> ]	2300	2360
Luftgehalt	[Vol.-%]	2,90	3,90
Fasergehalt Probe 1	[kg/m <sup>3</sup> ]	--	1,69 <sup>5)</sup>
Fasergehalt Probe 2	[kg/m <sup>3</sup> ]	--	--
Fasergehalt Probe 3	[kg/m <sup>3</sup> ]	--	--
Mittelwert ermittelter Fasergehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	--	1,69
Differenz der Fasermenge zu 2,0 kg/m <sup>3</sup>			--
Differenz der Fasermenge	[M.-%]	--	15,35
Frischbetontemperatur	[°C]	8	12,2
Außentemperatur	[°C]	2	3,2
Innentemperatur (Halle/Labor)	[°C]	17	16
<b>Frischbetoneigenschaften (Produktionshalle)</b>			
Ausbreitmaß a <sub>2</sub>	[cm]	55	40 <sup>6)</sup>
Frischbetonrohddichte ρ <sub>2</sub> <sup>2)</sup>	[kg/m <sup>3</sup> ]	2232	2283
Frischbetontemperatur	[°C]	8	15
Innentemperatur (Produktionshalle)	[°C]	13	13
<b>Festbetoneigenschaften</b>			
Druckfestigkeit 12 h <sup>3)</sup>	[N/mm <sup>2</sup> ]	--	--
Druckfestigkeit 24 h	[N/mm <sup>2</sup> ]	10	19
Druckfestigkeit 7 d	[N/mm <sup>2</sup> ]	24	41
Druckfestigkeit 28 d	[N/mm <sup>2</sup> ]	43	52
Druckfestigkeit am Tag der Brandprüfung	[N/mm <sup>2</sup> ]	51	58
Feuchtegehalt am Tag der Brandprüfung <sup>4)</sup>	[M.-%]	4,26	3,66

Anmerkungen:

- 1) Die Frischbetonrohddichte wurde anhand der Masse des Luftporentopfes (8l) ermittelt.
- 2) Die Frischbetonrohddichte wurde aus dem Durchschnittswert aller hergestellten Würfelschalungen ermittelt.
- 3) Es wurden keine Festigkeitskennwerte nach 12 Stunden ermittelt.
- 4) Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Darrtrocknung, Angabe des Feuchtegehaltes in Masseprozent bezogen auf die Trockenmasse  $\Rightarrow F = (m_{\text{feucht}} - m_{\text{trocken}}) / m_{\text{trocken}}$
- 5) Bei der Ermittlung des Fasergehaltes und der Faserverteilung wurden alle drei entnommenen Einzelproben im gleichen Aufbewahrungsgefäß eingelagert. Der Wert entspricht dem Mittelwert aus allen „Einzelproben“.
- 6) Das Ausbreitmaß konnte erst nach einer zusätzlichen Zugabemenge von 4 Litern Wasser und zusätzlichen 0,2 M.-% Fließmitte erreicht werden. Dem nach ergibt sich für diese Mischungskonzeption ein effektiver Wasserzementwert von w/z = 0,51.

## 6 Durchführung der Großbrandversuche

### 6.1 Allgemeines

Insgesamt wurden zur Verifizierung und Validierung des Einflusses von PP-Fasern auf ZTV-ING-konforme Tunnelbetone sechs großmaßstäbliche Probekörper mit unterschiedlichen geometrischen Abmessungen und Betonzusammensetzungen untersucht. Im Einzelnen wurden an den vier Probekörpern der geschlossenen Bauweise jeweils ein Probekörper mit Referenzbeton und ein Probekörper mit der fasermodifizierten Betonkonzeption einer unbelasteten und einer belasteten Bauteilprüfung unter der einseitigen Brandbeanspruchung durch die ZTV-ING-Kurve unterzogen.

Bei den Probekörpern der offenen Bauweise wurden an beiden Probekörpern (Referenzbeton und Faserbeton mit  $2,0 \text{ kg/m}^3$  PP-Fasern) belasteten Prüfung, ebenfalls unter der einseitigen Brandbeanspruchung durch die ZTV-ING-Kurve durchgeführt.

Zur Beurteilung der Brandversuche an den Probekörpern wurden (getrennt nach geschlossener und offener Bauweise) die nachfolgend aufgeführten Punkte zur Bewertung des Brand- und Abplatzverhaltens der Probekörper herangezogen:

- Bestimmung der Masse der Probekörper vor und direkt nach dem Brandversuch,
- Aufnahme von optischen und akustischen Prüfbeobachtungen während des Brandversuches,
- Aufzeichnung und Auswertung der Temperaturerhöhung im Probekörper an den Messstellen in den verschiedenen Messebenen (vgl. dazu auch die Abschnitte 5.2.3 und 5.3.3),
- Ermittlung der Abplatztiefen durch geodätische Aufnahme der Probekörper mittels eines Tachymeters vor und nach der Brandbeanspruchung.

Die Beschreibung der geprüften Probekörper mit deren geometrischen Abmessungen und den jeweils verwendeten Tunnelbetonrezepturen können den zuvor aufgeführten Abschnitt 5.2.3 für die Probekörper der geschlossenen Bauweise und dem Abschnitt 5.3.3 für die Probekörper der offenen Bauweise entnommen werden.

In den nachfolgenden Abschnitten wird ausführlich der konstruktiven Aufbau, die Prüfbedingungen sowie die Ergebnisse der geprüften unbelasteten und belasteten Tunnelinnenschalensegmente für die geschlossene Bauweise und der horizontal belasteten, skalierten Rahmenecken für die offene

Bauweise unter der einseitigen Brandbeanspruchung durch die ZTV-ING-Kurve beschrieben.

### 6.2 Durchführung der Großbrandversuche an den Probekörpern für die geschlossene Bauweise

#### 6.2.1 Allgemeines

Folgende vier Probekörper in Form eines großmaßstäblichen Tunnelchalensegmentes wurden im Rahmen der zwei unbelasteten und der zwei belasteten Großbrandversuche untersucht.

**Tabelle 12** Probekörper – Herstellung u. Prüfung

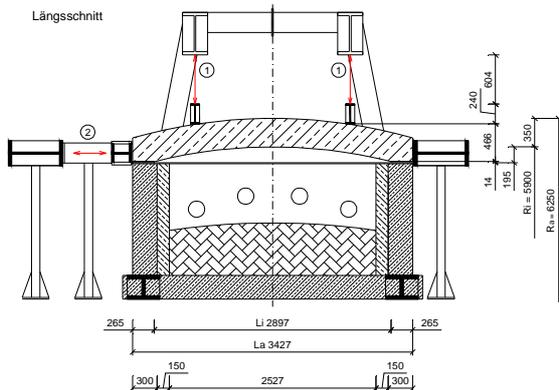
	GB1	GB2	GB3	GB4
<b>Rezeptur</b>	224	222	224	222
<b>Fasergehalt [kg/m<sup>3</sup>]</b>	--	2,0 kg/m <sup>3</sup>	--	2,0 kg/m <sup>3</sup>
<b>Herstellung</b>	08.12.08	11.12.08	17.12.08	15.12.08
<b>Prüfdatum</b>	11.03.09	13.03.09	18.03.09	24.03.09
<b>Alter in [d]</b>	93	92	91	99
<b>Belastung</b>	--	--	ja	ja

Die jeweils zugehörigen Frisch- und Festbetoneigenschaften können der Übersicht in Tabelle 10 entnommen werden.

#### 6.2.2 Prüfaufbau

Zur Durchführung der belasteten Brandversuche wurde der Tunnelofen der MFPA Leipzig GmbH mit der zugehörigen vertikalen und horizontalen Belastungseinheit verwendet. Die einseitige Beflammung der Tunnelinnenschalensegmente von der Unterseite erfolgte durch acht Dieselmotoren, die an den beiden Längswänden des Ofens angeordnet sind.

Die Belastung der Probekörper erfolgte sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung über jeweils vier hydraulische Druckzylinder. Die Belastung wurde über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten. Die vertikale Lasteinleitung erfolgte an zwei Lastangriffspunkten, an denen im Abstand von  $a = 1,90 \text{ m}$  eine konstante Linienlast über die Breite des Tübbings eingeleitet wurde. Die gleichmäßige Lastverteilung der punktuell eingetragenen vertikalen Lasten wurde über Stahltraversen erreicht. Horizontal wurden die vorgegebenen Belastungen ebenfalls über vier hydraulische Druckzylinder und eine Stahltraverse in den Probekörper eingeleitet. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus kann dem folgenden Bild 38 entnommen werden.



**Bild 38** Schematischer Versuchsaufbau und Abmessungen des festgelegten Prüfkörpers

Im Bereich der Auflagerpunkte auf dem Tunnelofen wurde die horizontale Verschiebung zum Abbau der thermischen Zwangskräfte durch Gleitlager aus Polytetrafluorethylen (PTFE) sichergestellt.

Bei den beiden unbelasteten Brandversuchen wurden außer der einseitigen thermischen Beanspruchung keine zusätzlichen äußeren Lasten in die Probekörper eingetragen.

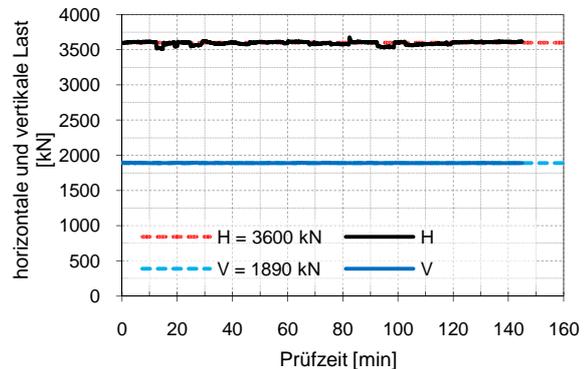
Zur Durchführung der belasteten Brandversuche wurde wie bereits beschrieben, der Tunnelofen mit der bestehenden Belastungsrahmen zum Eintrag von definierten horizontalen und vertikalen Belastungen genutzt. Die damit verbundenen geometrischen Zwangspunkte wurden bei der Ermittlung der äußeren vertikalen und horizontalen Einwirkungen und bei der statischen Bemessung der Probekörper mit berücksichtigt.

Entsprechend der gewählten und abgestimmten Belastungsvorgaben ergab sich für die Bauteilveruche an den großmaßstäblichen Probekörpern für die geschlossene Bauweise eine vertikale Gesamtbelastung von  $\Sigma V = 1900 \text{ kN}$ . Abzüglich des Eigengewichtes der Belastungstraverse zum Eintrag von  $1000 \text{ kg}$  (entspricht ca.  $10 \text{ kN}$ ) wurde für die Versuchsbelastung eine einzutragende Last von  $\Sigma V = 1890 \text{ kN}$  ermittelt.

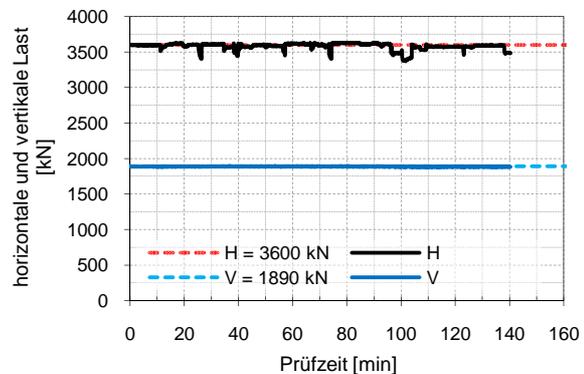
Die horizontalen Einwirkungen wurden entsprechend der statischen Schnittgrößenermittlung mit einer Kraft von  $\Sigma H = 3600 \text{ kN}$  festgelegt.

Nach dem Eintrag der Lasten (jeweils 15 Minuten vor dem Start der Brandprüfung) wurden die Lasten über den gesamten Zeitraum der beiden Prüfungen konstant gehalten.

Den nachfolgenden beiden grafischen Darstellungen in Bild 39 und Bild 40 können die, aus den aufgezeichneten Versuchsdaten erstellten, Last-Zeit-Diagramme der beiden belasteten Prüfungen entnommen werden.



**Bild 39** Last-Zeit-Diagramm - horizontale und vertikale Belastung von Probekörper GB3 - Referenzbeton



**Bild 40** Last-Zeit-Diagramm - horizontale und vertikale Belastung von Probekörper GB4 - Faserbeton ( $2,0 \text{ kg/m}^3$ )

### 6.2.3 Thermische Beanspruchung

Analog zu den Vorversuchen an den kleinmaßstäblichen Probekörpern wurden die unbelasteten und belasteten großmaßstäblichen Tunnelsegmenten der geschlossenen Bauweise ebenfalls über Dauer von 140 Minuten mit dem Temperatur-Zeit-Verlauf gemäß ZTV-ING, Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 1 geschlossene Bauweise, Abs. 10.2 [2] beansprucht.

Wie bereits beschrieben wurde, erfolgte die einseitige Beflammung der originalmaßstäblichen Tunnelinnenschalensegmente von der Unterseite durch acht Dieselbrenner, die an den beiden Längswänden des Ofens angeordnet sind. Die Steuerung der Temperaturen im Brandraum wurde die manuelle Bedienung der Dieselbrenner durch Fachpersonal der MFPA Leipzig GmbH durchgeführt. Zur Messung der Temperaturen wurden dabei je Prüfung zwei spezielle Platin-Rhodium-Thermoelemente vom Typ S mit einem Messbereich von bis zu  $1600 \text{ C}$  verwendet. Diese wurden im Scheitelpunkt direkt unterhalb der Oberfläche der brandbeanspruchten Seite der Tunnelinnen-

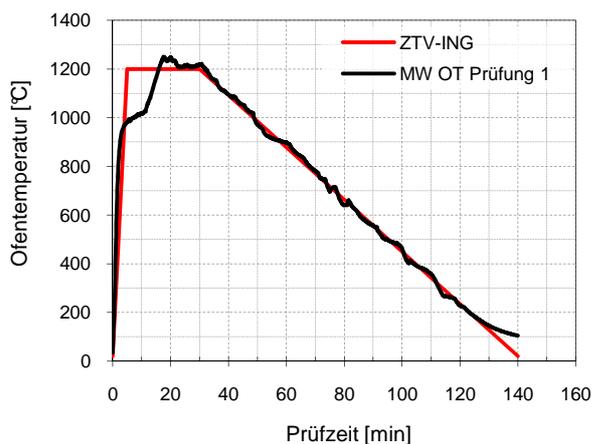
schalensegmente angeordnet. Der Abstand der Thermoelemente zum Rand des Probekörpers betrug jeweils 600 mm. Der zeitliche Verlauf der Temperatur-Zeit-Kurven der beiden ersten, unbelasteten Prüfungen kann den folgenden grafischen Abbildungen Bild 41 und Bild 43 entnommen werden:

Anhand der beiden Temperatur-Zeit-Kurven für die unbelasteten Versuche ist zu erkennen, dass im ersten Brandversuch an dem Referenzprobekörper die Temperaturen ab ca. 1000°C kurzzeitig nur sehr flach anstiegen. Wie in den beiden Temperatur-Zeit-Kurven (siehe Bild 42 und Bild 44) der belasteten Bauteilprüfungen zu entnehmen ist, kann auch dort diese Beobachtung getätigt werden.

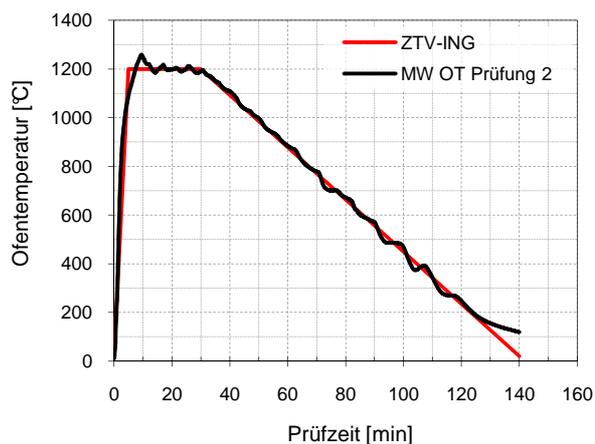
Da diese Prüfbeobachtung auch bei anderen Tunnelbrandversuchen an Tunnelbetonen ohne Faserzugabe aufgenommen werden konnte, wird angenommen, dass die zahlreichen Abplatzungen der Betone ohne Faserzugabe und die dadurch

freigelegten kühleren Betonschichten einen Anstieg der Temperaturen trotz voller Brennerleistungen verhindern. Anhand der später aufgeführten Ergebnisse ist jedoch zu erkennen, dass diese Probekörper dennoch eine erhebliche Schädigung durch die erreichten Temperaturen erfahren haben.

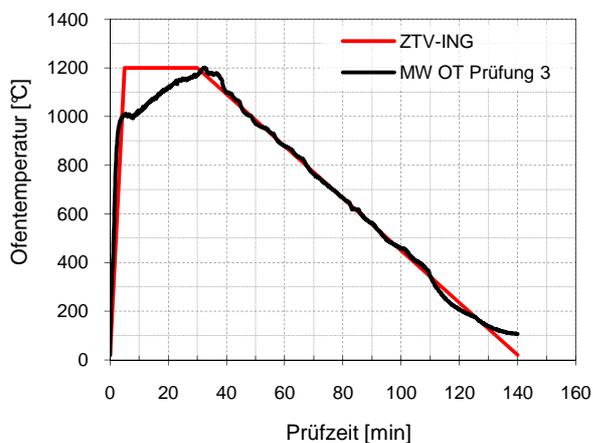
An allen vier Temperatur-Zeit-Kurven ist zu erkennen, dass eine Abkühlung des Brandraumes maximal bis zu einer Temperatur von ca. 150°C möglich ist. Eine weitere Abkühlung konnte aus versuchstechnischen Gründen nicht erreicht werden. Die Wände des Ofens speichern während des Brandversuches über die Heizphase von 30 Minuten so viel Wärmeenergie, dass eine weitere, schnelle Abkühlung des Brandraumes durch die Lüfter der Brenner nicht möglich war.



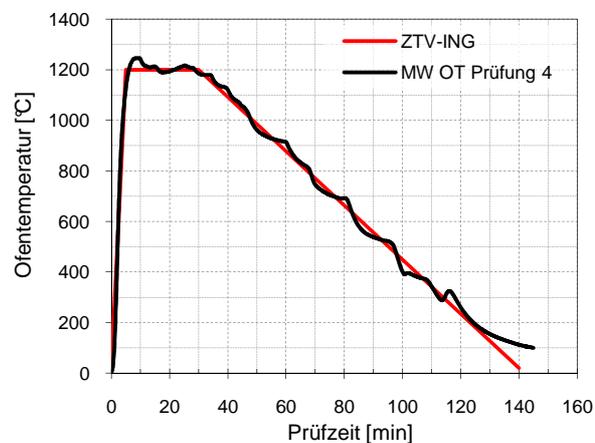
**Bild 41** Temperatur-Zeit-Diagramm - Probekörper GB1 unbelasteter Versuch – Referenzbeton



**Bild 42** Temperatur-Zeit-Diagramm – Probekörper GB2 unbelasteter Versuch – Faserbeton (2,0 kg/m<sup>3</sup>)



**Bild 43** Temperatur-Zeit-Diagramm – Probekörper GB3 belasteter Versuch – Referenzbeton



**Bild 44** Temperatur-Zeit-Diagramm - Probekörper GB4 belasteter Versuch – Faserbeton (2,0 kg/m<sup>3</sup>)

### 6.2.4 Messtechnik in den Probekörpern

Neben der bereits beschriebenen Messtechnik zur Steuerung des Brandraumes wurde während der Brandversuche auch jeweils der Temperaturanstieg in den verschiedenen Messebenen der großmaßstäblichen Probekörper ermittelt. Dazu wurden die im Abschnitt 5.2.3 beschriebenen drei Messstellen festgelegt. An jedem dieser Messpunkte wurden jeweils über einen spezielle Abstandshalter acht Thermoelemente in den Messtiefen von 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200 und 300 mm von der beflaminten Tübbingoberfläche aus angeordnet. Die grafische Übersicht über die Anordnung der Thermoelemente kann den grafischen Darstellungen in Bild 28 bis Bild 30 entnommen werden. Die Befestigung der Abstandshalter mit den Temperaturmessfühlern erfolgte an der Bewehrung der Tunnelinnenschalensegmente.

Zur Aufzeichnung der Verformungen am Probekörper wurden je Versuch zwei potentiometrische Wegaufnehmer zur Messung der horizontalen Verformungen und drei potentiometrische Wegaufnehmer zur Messung der vertikalen Verformungen angeordnet. Während der Brandversuche wurden alle Daten der Brandraumtemperaturen, der Temperaturerhöhung in den Probekörpern sowie der Verformungen alle 10 Sekunden gemessen und mittels geeigneter EDV aufgezeichnet.

Die Bestimmung der Massen der Probekörper vor und nach dem Brandversuchen erfolgte unter Zuhilfenahme einer geeichten Kranwaage mit einem maximalen Messbereich von 8000 kg bei einer Ablesbarkeit des Displays im Massebereich bis 6000 kg von 2 kg und im Massebereich > 6000 kg von 5 kg.

### 6.2.5 Durchführung und Prüfbeobachtungen

Die während der vier Brandversuche aufgenommenen Beobachtungen werden nachfolgend kurz zusammengefasst. Die grafischen Auswertungen der Temperaturerhöhungen in den vier Probekörpern können den grafischen Darstellungen Bild 47 bis Bild 54 auf den nächsten Seiten entnommen werden. Die Beobachtungen an den Tunnelinnenschalensegmenten nach der Brandbeanspruchung können Bild 67 bis Bild 70 oder der Anlage 6 entnommen werden.

Während der Brandprüfungen konnten sowohl bei der unbelasteten als auch bei der belasteten Prüfung an den beiden Probekörpern aus Referenzbeton ähnliche Beobachtungen aufgenommen werden. Nach dem Start der Prüfung konnten bei

beiden Probekörpern nach ca. 1:30 bis 2:00 Minuten deutliche Abplatzgeräusche und auch visuell sichtbare Abplatzungen an der brandbeanspruchten Seite aufgenommen werden. Nach jeweils 7:30 Minuten der Brandbeanspruchung war bei beiden Probekörpern die tragende Bewehrung freiliegend und deutlich sichtbar. Einblicke in den Brandraum während der Prüfung an den Probekörpern GB1 und GB3 können den folgenden Abbildungen in Bild 45 und in Bild 46 entnommen werden.

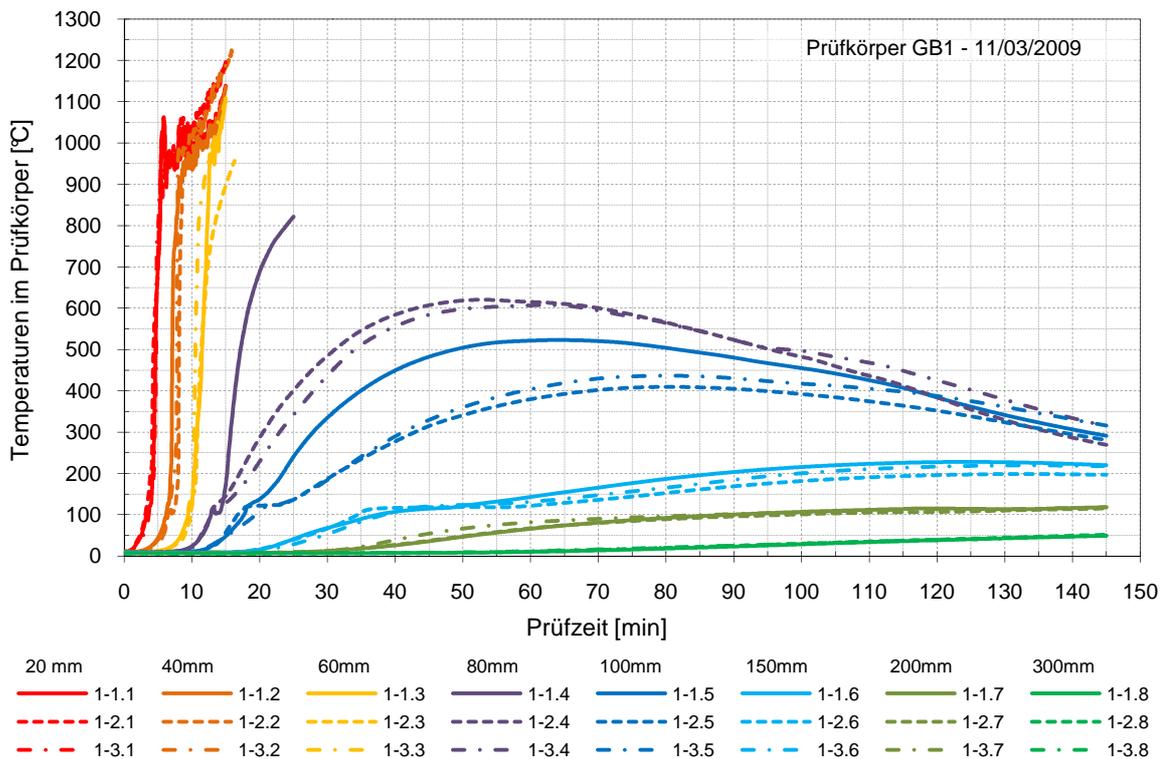


**Bild 45** Blick in den Brandraum - Probekörper GB1 mit freiliegender Bewehrung während der Versuchsdurchführung

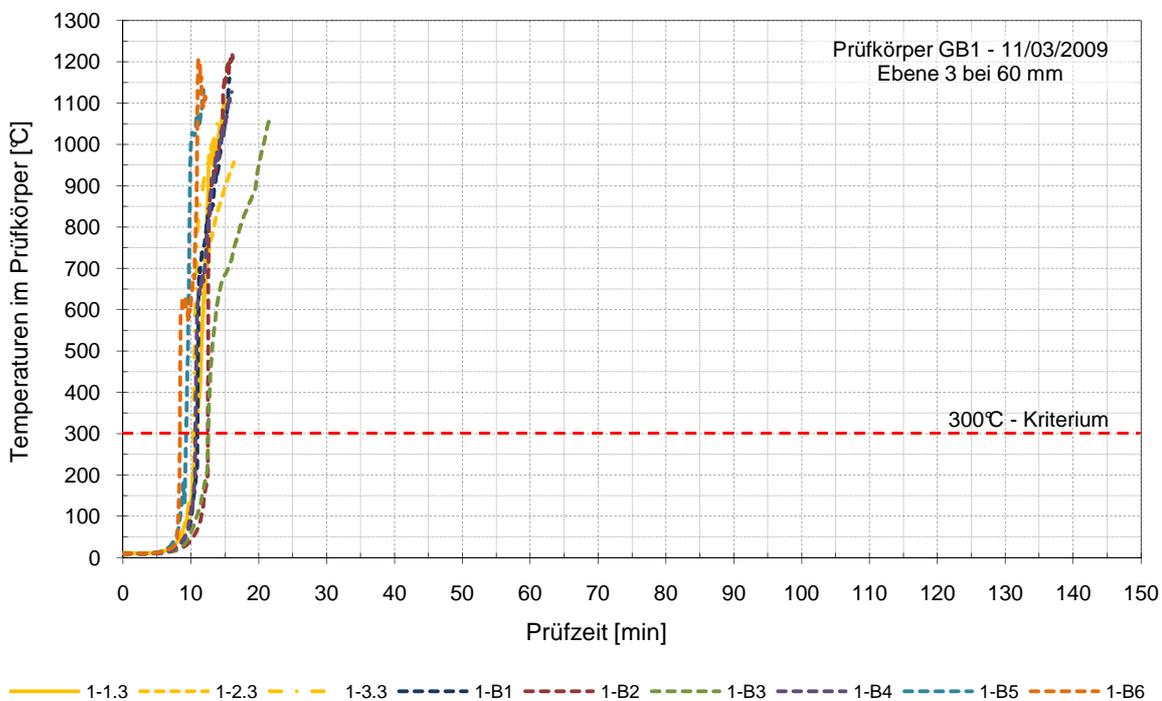


**Bild 46** Blick in den Brandraum - Probekörper GB3 mit freiliegender Bewehrung während der Versuchsdurchführung

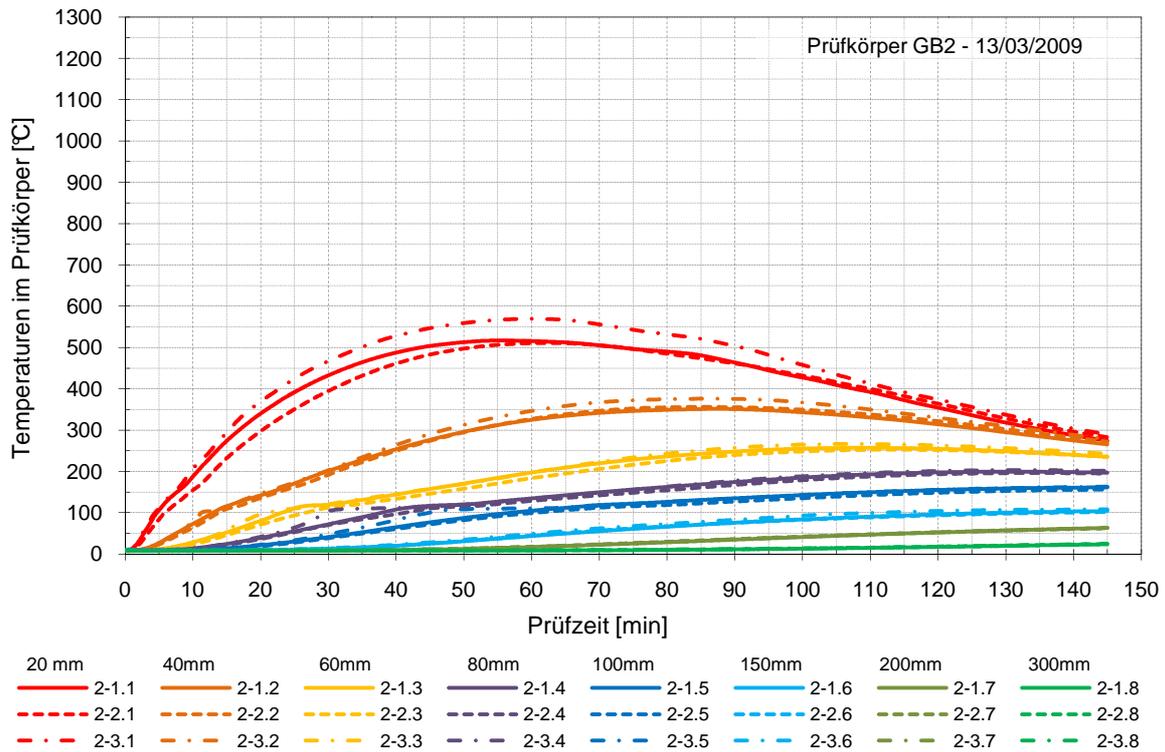
Bei den beiden Probekörpern mit den fasermodifizierten Betonen konnten ebenfalls bei beiden Versuchen ähnliche Beobachtungen aufgenommen werden. Beim Probekörper GB2 waren nach dem Start der Prüfung nach ca. 2 Minuten leichte Abplatzungen erkennbar. Während der restlichen Prüfzeit konnten bei beiden Probekörpern keine weiteren Beobachtungen aufgenommen werden.



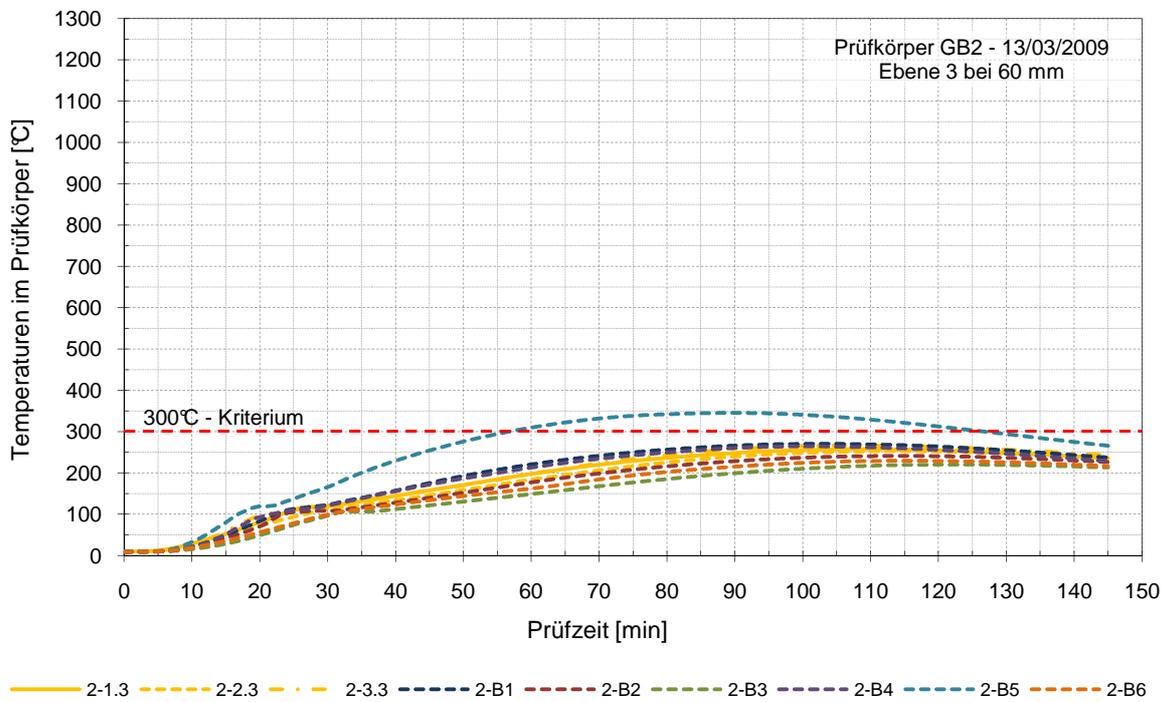
**Bild 47** Temperaturerhöhung im Probekörper GB1 aus Referenzbeton - unbelastete Prüfung



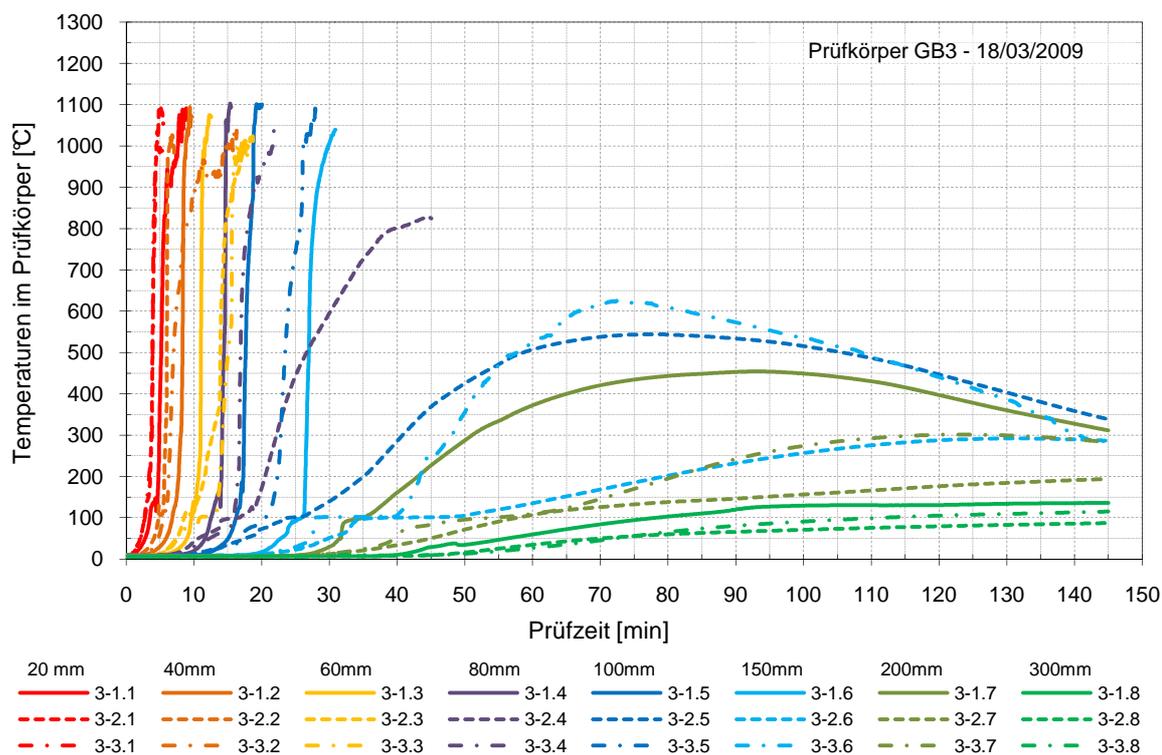
**Bild 48** Temperaturerhöhung im Probekörper GB1 (Referenzbeton) in der Messebene 3 an der tragenden Bewehrung in 60 mm - unbelastete Prüfung



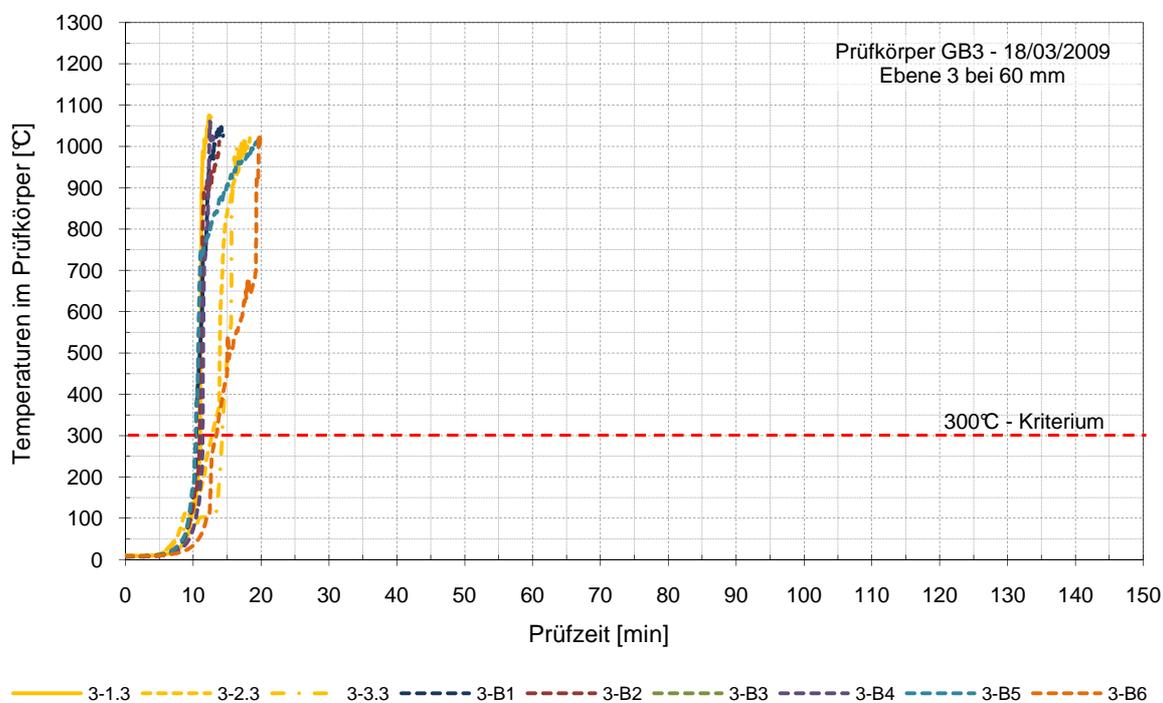
**Bild 49** Temperaturerhöhung im Probekörper GB2 aus Faserbeton mit 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP-Fasern - unbelastete Prüfung



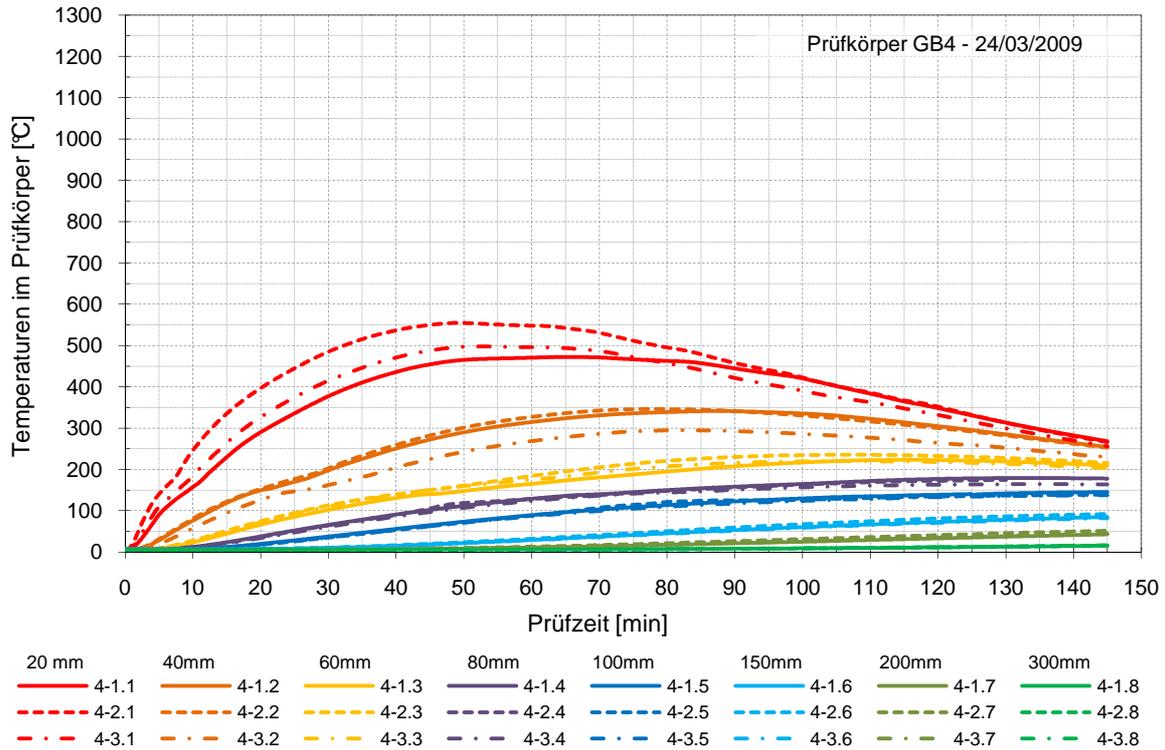
**Bild 50** Temperaturerhöhung im Probekörper GB2 aus Faserbeton mit 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP-Fasern in der Messebene 3 an der tragenden Bewehrung in 60 mm - unbelastete Prüfung



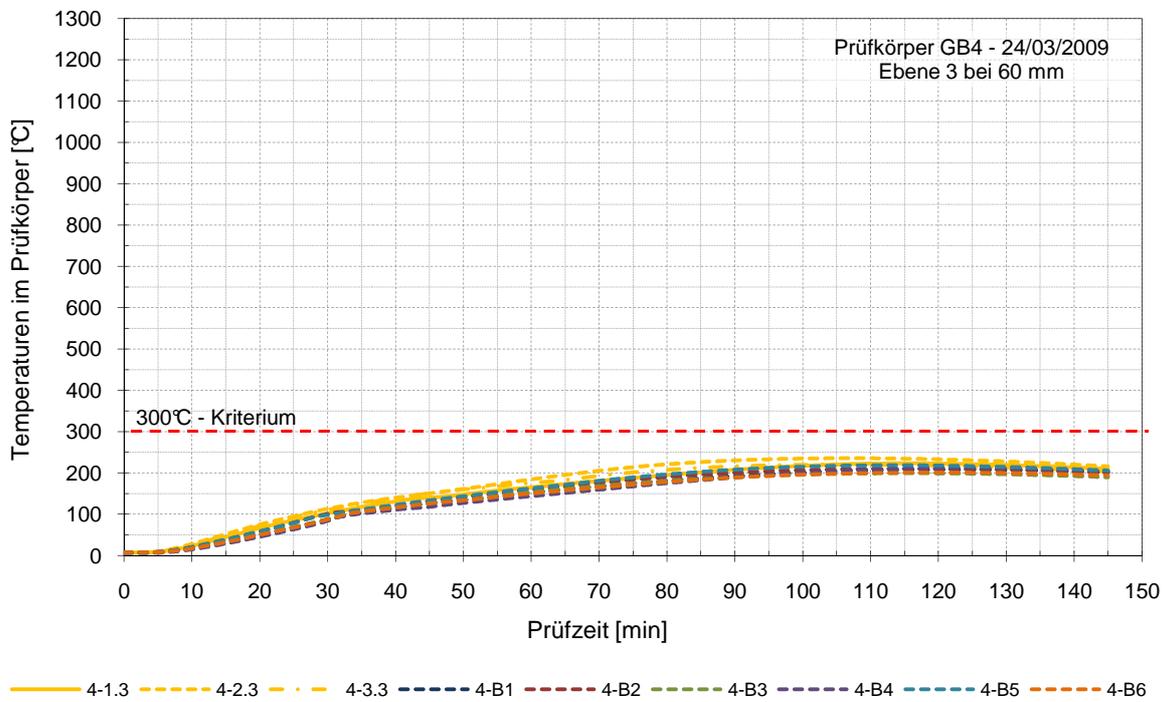
**Bild 51** Temperaturerhöhung im Probekörper GB3 aus Referenzbeton - belastete Prüfung



**Bild 52** Temperaturerhöhung im Probekörper GB3 aus Referenzbeton in der Messebene 3 an der tragenden Bewehrung in 60 mm - belastete Prüfung



**Bild 53** Temperaturerhöhung im Probekörper GB4 aus Faserbeton mit 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP-Fasern - belastete Prüfung



**Bild 54** Temperaturerhöhung im Probekörper GB4 aus Faserbeton mit 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP-Fasern in der Messebene 3 an der tragenden Bewehrung in 60 mm - belastete Prüfung

### 6.2.6 Bestimmung der Masseverluste

Die Massen der geprüften Probekörper wurden direkt vor dem Einbau auf dem Tunnelofen und direkt nach dem Abheben der Probekörper vom Tunnelofen nach dem Brandversuch durch eine speziell geeichte Kranwaage, mit einem Ablesebereich von 2,0 kg im Massebereich bis 6000 kg und einem Ablesebereich von 5,0 kg ab einem Gewicht von 6000 kg, ermittelt.

Die aus den Massebestimmungen berechneten Masseverluste der Probekörper GB1 bis GB4 infolge der Brandeinwirkung können der tabellarischen Übersicht in Tabelle 13 entnommen werden.

Deutlich ist der Unterschied zwischen den Referenzbetonen ohne PP-Fasern und den fasermodifizierten Betonrezepturen zu erkennen. Bei den fasermodifizierten Betonen wurden mit 3,23 % und 1,81 % deutlich geringere Masseverluste als bei den Betonen ohne PP-Fasern ermittelt. Der höhere Masseverlust beim Probekörper GB2 wird mit den spontanen, lokalen Abplatzungen in den ersten Prüfminuten erklärt. Es wird die Vermutung angestellt, dass es ggf. in diesen Bereichen lokale Stellen gab bei denen die Faserkonzentration nicht ausgereicht hat, um auch lokale, oberflächliche Abplatzungen zu verhindern. In Verbindung mit den ermittelten Ergebnissen der Abplatztiefen wird insgesamt der Masseverlust der fasermodifizierten Tunnelbetonrezepturen als unkritisch bewertet.

Beim Vergleich der Masseverluste der Referenzbetone ist deutlich erkennbar, dass der Probekörper GB3, der zusätzlich durch die äußeren vertikalen und horizontalen Einwirkungen beansprucht wurde einen um ca. 11 % höheren Masseverlust als der unbelastet geprüfte Probekörper GB1 erfahren hat.

Der schädigende Einfluss der zusätzlichen äußeren Belastung wird ergänzend dadurch bestätigt, dass an den Begleitprobekörpern des Probekörpers GB1 zum Prüfzeitpunkt mit 4,51 M.-% ein um 0,66 M.-% höherer Feuchtegehalt (vgl. Tabelle 10) ermittelt wurde als an den als an den Begleitprobekörpern des Tunnelsegmentes GB3.

### 6.2.7 Bestimmung der Abplatztiefen

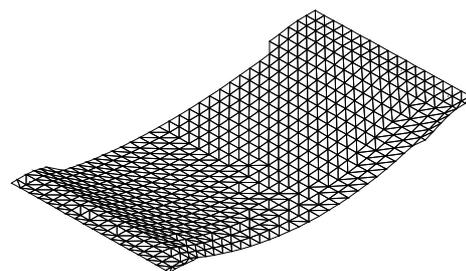
Neben der zuvor beschriebenen Bewertung des Masseverlustes der Probekörper durch die Brandbeanspruchung sollte vor allem auch die Bestimmung der Abplatztiefen zur Bewertung und des Vergleiches der einzelnen Rezepturen ohne Fasern und der fasermodifizierten Tunnelbetonrezepturen herangezogen werden. Dafür wurde jeweils die brandzugewandte Seite der

Stahlbetonprüfkörper sowohl vor als auch direkt nach dem Abheben der Probekörper vom Tunnelofen unter Zuhilfenahme eines Tachymeters, einem geodätischen Messinstrument, vermessen. Eine fotografische Abbildung dieses Messgerätes kann dem folgenden Bild 55 entnommen werden.

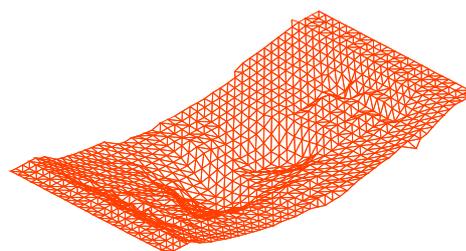


**Bild 55** Tachymeter: verwendetes geodätisches Messinstrument zur Bestimmung der Abplatztiefen

Die gewonnenen Datenmengen wurden durch verschiedene Computerprogramme so aufbereitet, dass zunächst Oberflächennetze der Probekörperoberfläche vor und nach der Brandbeanspruchung erzeugt werden konnten. Eine schematische Darstellung der generierten Oberflächennetze kann den beiden folgenden Grafiken in Bild 57 und Bild 57 entnommen werden.



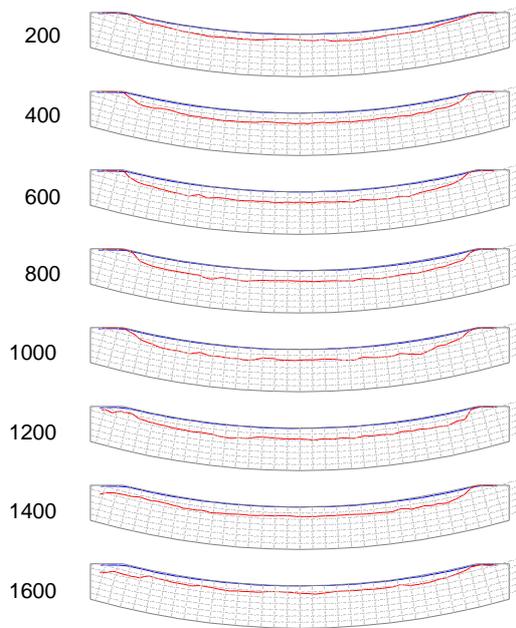
**Bild 56** Oberflächennetz vor der Brandbeanspruchung



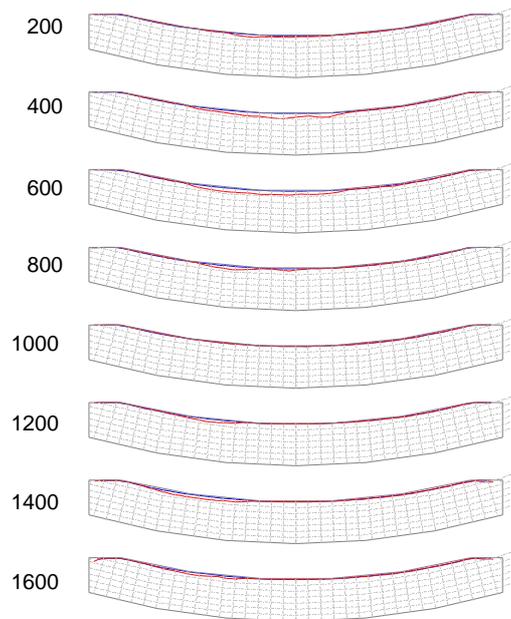
**Bild 57** Beispiel eines generierten Oberflächennetzes der brandbeanspruchten Oberfläche

Nach der grafischen Generierung und Überlagerung der Oberflächennetze wurden für jeden Probekörper acht Schnittbilder über die Längsachse des Probekörpers im Abstand von  $a = 200$  mm erzeugt, aus denen die Abplatztiefen ausgelesen werden konnten. Die Übersicht der einzeln, er-

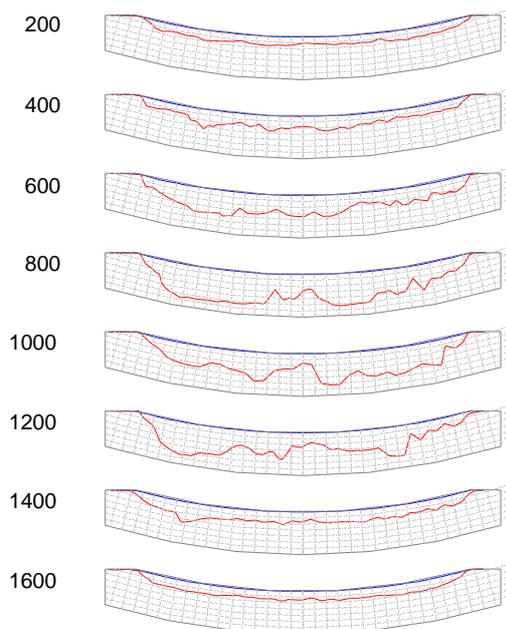
zeugten Tiefenprofile kann den folgenden grafischen Abbildungen Bild 58 bis Bild 61 entnommen werden.



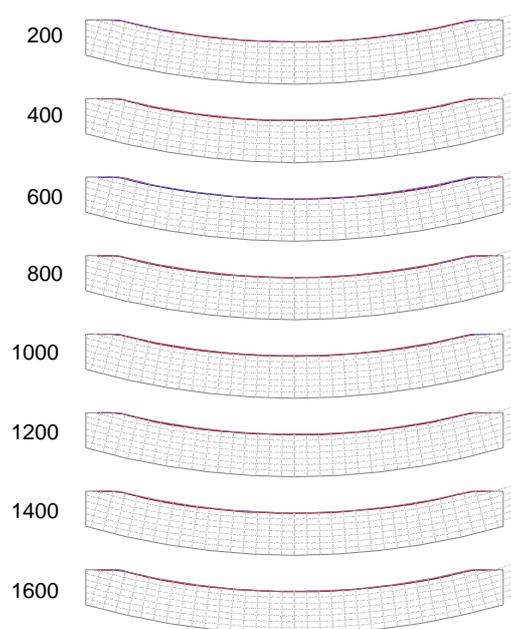
**Bild 58** Tiefenprofil der Abplatzungen - Probekörper GB1 - unbelastete Prüfung am Referenzbeton



**Bild 59** Tiefenprofil der Abplatzungen - Probekörper GB2 - unbelastete Prüfung am Faserbeton (2,0 kg/m<sup>3</sup> PP)

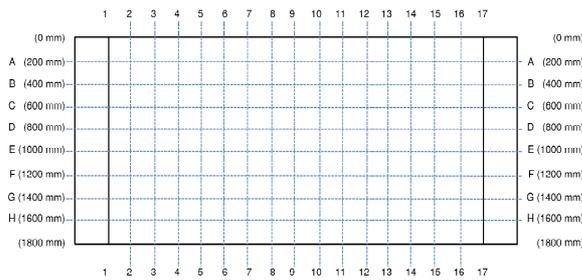


**Bild 60** Tiefenprofil der Abplatzungen - Probekörper GB3 - belastete Prüfung am Referenzbeton



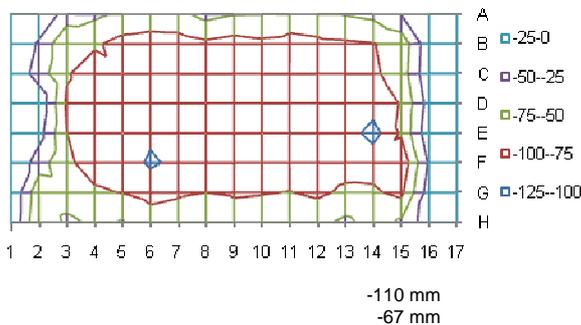
**Bild 61** Tiefenprofil der Abplatzungen - Probekörper GB4 - belastete Prüfung am Faserbeton (2,0 kg/m<sup>3</sup> PP)

In einem weiteren Bearbeitungsschritt wurden aus den zusammengestellten acht Tiefenprofilen je Probekörper über die Abwicklung der gekrümmten Oberfläche der Probekörper auf der brandzugewandten Seite, ebenfalls in einem Abstand der Messpunkte von ca. 200 mm, die zugehörigen Schädigungstiefen ermittelt. Die geometrische Zuordnung der einzelnen Messpunkte kann der nachfolgenden grafischen Abbildung in Bild 62 entnommen werden.



**Bild 62** Schematische Darstellung des Messrasters zur Bestimmung der Abplatztiefen

Wie schon augenscheinlich bei der Schadensaufnahme der Probekörper deutlich zu erkennen war, weisen die Probekörper mit den Referenzbetonen GB1 und GB3 sowohl die größten Maximalwerte der Abplatztiefen als auch die größeren Durchschnittswerte auf. Den Ergebnissen der Bestimmung der maximalen und mittleren Abplatztiefen ist darüber hinaus zu entnehmen, dass der belastete Probekörper GB3 mit dem Maximalwert der von -271 mm und mit einem Durchschnittswert von -110 mm im Vergleich zum unbelasteten Probekörper deutlich größere Abplatzungen infolge der

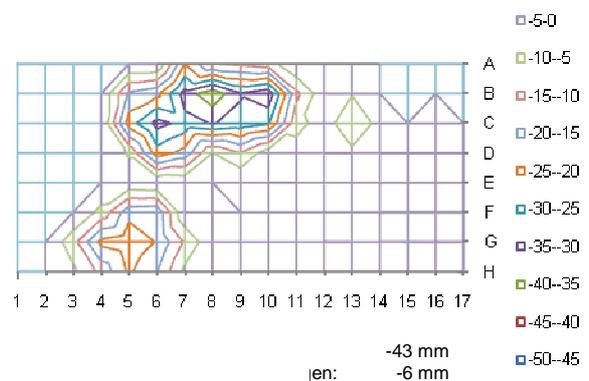


**Bild 63** Flächendiagramm Abplatzungen - Probekörper GB1 unbelastete Prüfung am Referenzbeton

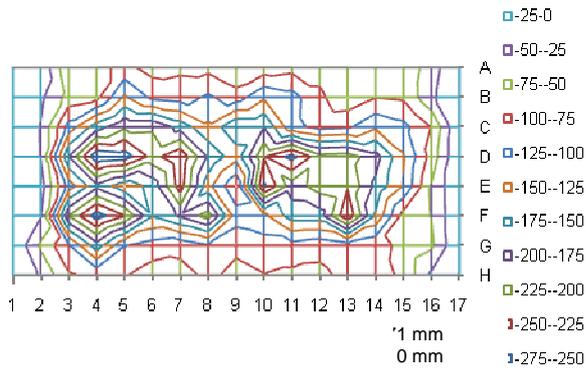
Brandbeanspruchung durch die ZTV-ING Kurve erfahren hat. Am unbelasteten Probekörper GB1 wurden bei der Maximalwertbestimmung mit -110 mm nur ca. 41 % des ermittelten Maximalwertes vom belasteten Probekörper GB3 aufgenommen. Mit -67 mm betrug in diesem Fall die durchschnittliche Abplatztiefe über das gesamte Messraster lediglich ca. 60 % der berechneten durchschnittlichen Abplatztiefe am belasteten Probekörper GB3.

Bei den fasermodifizierten Betonen war zu erkennen, dass analog zu den bestimmten Masseverlusten ebenfalls am belasteten Probekörper GB4 sowohl in der Maximalwert als auch in der Durchschnittswertermittlung der Abplatztiefen einen geringeren Wert ermittelt wurde. Die Erklärung der experimentell erhaltenen Tatsache, dass der belastete Probekörper der fasermodifizierten Betonkonzeptionen sowohl einen geringeren Maximalwert als auch einen kleineren Durchschnittswert wird auch hier in den ggf. aufgetretenen lokalen Stellen mit unzureichender Menge an Faserbewehrung gesucht. Ein Indiz für diese Vermutung kann in der, beim Probekörper GB2 festgestellten, stärker variierenden Faserverteilung im Frischbeton gesehen werden (vgl. dazu Tabelle 10).

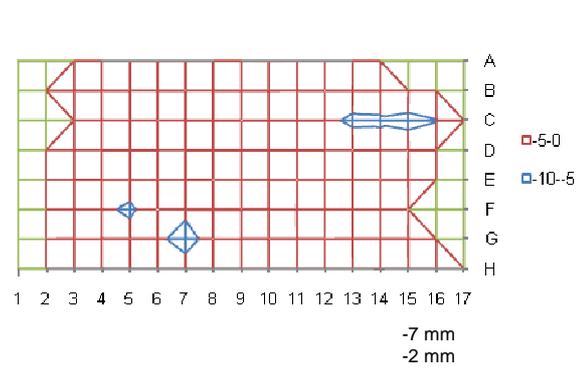
Die grafische Auswertung der ermittelten Werte für die mittleren und maximalen Abplatztiefen kann in den folgenden Flächendiagrammen in Bild 63 bis Bild 66 entnommen werden.



**Bild 64** Flächendiagramm Abplatzungen - Probekörper GB2 unbelastete Prüfung am Faserbeton



**Bild 65** Flächendiagramm Abplatzungen - Probekörper GB3 belastete Prüfung am Referenzbeton



**Bild 66** Tiefenprofil der Abplatzungen - Probekörper GB4 belastete Prüfung am Faserbeton



**Bild 67** Probekörper GB1 (Referenzbeton) nach der unbelasteten Brandbeanspruchung



**Bild 68** Probekörper GB2 (Faserbeton mit 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP-Fasern) nach der unbelasteten Brandbeanspruchung



**Bild 69** Probekörper GB3 (Referenzbeton) nach der belasteten Brandbeanspruchung



**Bild 70** Probekörper GB4 (Faserbeton mit 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP-Fasern) nach der belasteten Brandbeanspruchung

**Tabelle 13** Zusammenfassung der Ausgangsdaten der Probekörper sowie der Ergebnisse der einseitigen Brandbeanspruchung durch die ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Kurve

<b>Allgemeines</b>					
Bezeichnung der Probekörper		<b>GB 1</b>	<b>GB2</b>	<b>GB3</b>	<b>GB4</b>
zugegebener Fasergehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	--	2,0	--	2,0
ermittelter Fasergehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	--	1,78	--	1,68
Ausbreitmaß beim Einbau in die Schalung	[cm]	46	33	37	38
Belastung des Probekörpers		--	--	ja	ja
<b>Massebestimmung an den Probekörpern</b>					
vor dem Brandversuch	[kg]	5188	5260	5295	5072
direkt nach dem Brandversuch	[kg]	4352	5090	3856	4980
Masseverlust	[kg]	836	170	1439	92
Masseverlust	[M.-%]	16,11	3,23	27,18	1,81
<b>Abplatztiefen</b>					
Maximalwert der Abplatztiefen	[mm]	-110	-43	-271	-7
Durchschnittswert	[mm]	-67	-6	-110	-2

### 6.2.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln“ wurden für die geschlossene Bauweise vier Probekörper mit ZTV-ING-konformen Tunnelbetonrezepturen hergestellt. Es wurden jeweils zwei der Probekörper mit einem Referenzbeton ohne Faserzugabe und zwei der Probekörper mit einer fasermodifizierten Betonrezeptur mit einem PP-Fasergehalt von 2,0 kg/m<sup>3</sup> hergestellt. Der Referenzprobekörper GB1 und der fasermodifizierte Probekörper GB2 wurden unbelastet unter der einseitigen Beanspruchung durch die ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Kurve über die Dauer von 140 Minuten geprüft. In der zweiten Versuchsreihe wurden der Probekörper GB3 (Referenzbeton) und der Probekörper GB4 (Faserbeton) unter der zusätzlichen mechanischen Einwirkung von horizontalen und vertikalen Beanspruchungen untersucht.

Wie bereits beschrieben, ist bei der Herstellung der fasermodifizierten Tunnelbetone darauf zu achten, dass eine homogene Faserverteilung im Frischbeton erreicht wird. Es wird seitens des Forschers empfohlen, dass bei der Anwendung von PP-fasermodifizierten Tunnelbetonen anhand von großvolumigen Eignungsmischungen die jeweils erforderlichen Mischregime in Verbindung mit ggf. erforderlichen Nachmischzeiten nach der PP-Faserzugabe ermittelt werden, damit sowohl die geforderte Frischbetonkonsistenz als auch der Nachweis der Faserverteilung und des Fasergehaltes erbracht wird. Wenn möglich, sollten die Fasern dem Trockengemisch zugegeben werden.

Beim Vergleich der Ergebnisse der beiden Prüfungen an den Referenzbetonen ist deutlich zu erkennen, dass am belasteten Probekörper eine deutlich größere Schädigung als am unbelasteten Probe-

körper aufgetreten ist. In beiden Prüfungen wurden die Tunnelelemente so stark geschädigt, dass die, aus den Abplatzungen resultierende Verringerung des Querschnitts deutlich bis hinter die tragende Bewehrung reichten. Im Gegensatz dazu konnte an den fasermodifizierten Probekörpern eine deutliche Reduzierung der Abplatzungen erreicht werden. Bei diesen beiden Prüfungen wurde zwar am unbelasteten Probekörper GB2 mit -43 mm zwar größere maximale Abplatztiefen als am belasteten Probekörper GB4 mit -7 mm festgestellt, aber insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die Zugabe von 2,0 kg/m<sup>3</sup> an PP-Fasern zu einer wirksamen Reduzierung des Abplatzverhaltens der ZTV-ING-konformen Tunnelbetonrezepturen geführt hat.

Den grafischen Auswertungen der Temperaturen in den Bildern 47 bis 54 kann zusätzlich entnommen werden, dass die fasermodifizierten Tunnelbetone auch einen wirksamen Schutz für die tragende Bewehrung darstellen. Mit Ausnahme einer Messstelle am Probekörper GB 2 (an der auch das Maximum der lokalen Abplatzung aufgetreten war) konnte der Nachweis erbracht werden, dass durch die gewählte Tunnelbetonrezeptur mit der zusätzlichen Faserbewehrung die gemäß ZTV-ING beschriebene kritische Temperatur von maximal 300°C an der tragenden Bewehrung nicht überschritten wird. Bei der Bewertung der Ergebnisse der Temperaturerhöhungen an den fasermodifizierten Probekörpern konnte kein expliziter Einfluss der Belastung auf das Durchwärmungsverhalten der Tunnelbetone festgestellt werden.

## 6.3 Durchführung der Großbrandversuche an den Probekörpern für die offene Bauweise

### 6.3.1 Allgemeines

Bei der zweiten Versuchsreihe der belasteten Brandversuche an großmaßstäblichen Probekörpern wurden Forschungsprojekt zwei skalierte großmaßstäbliche Rahmenecken auf deren Brand- und Abplatzverhalten unter der einseitigen Brandbeanspruchung und der zusätzlichen horizontalen Lasteinwirkung untersucht. Die Bezeichnung der Probekörper sowie die zugehörigen Herstell- und Prüfdaten können der folgenden Tabelle 14 entnommen werden.

**Tabelle 14** Probekörper – Herstellung u. Prüfung

Bezeichnung	OB1	OB2
Rezeptur	225	223
Fasergehalt	-- <sup>1)</sup>	2,0 kg/m <sup>3</sup>
Herstellung	08.12.08	11.12.08
Prüfdatum	14.04.09	21.04.09
Alter in [d]	127	131
Belastung	ja	ja

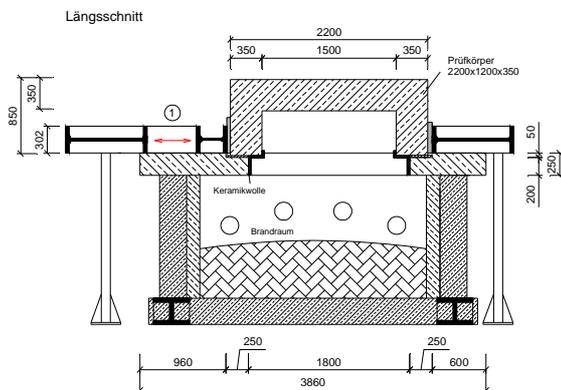
<sup>1)</sup> Beim Probekörper OB1 wurde als konstruktive Maßnahme die Mattenbewehrung N94 gemäß ZTV-ING, 5.2, 10.3.2 (2), eingebaut.

Die zu den einzelnen Probekörpern ermittelten Frisch- und Festbetoneigenschaften sind im Abschnitt 5.3.3 in der Tabelle 11 aufgeführt.

### 6.3.2 Prüfaufbau

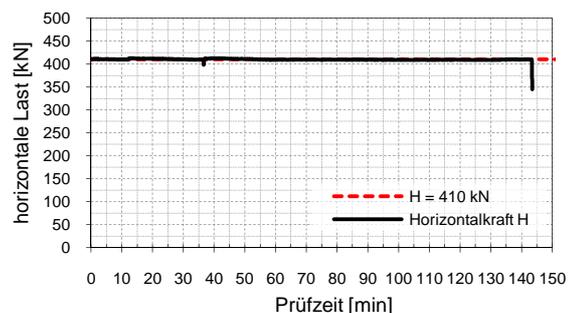
Zur Durchführung der horizontal belasteten Großbrandversuche an den skalierten Rahmenecken wurde der Tunnelofen der MFPA Leipzig GmbH mit der zugehörigen horizontalen Belastungseinheit und der Auflagerplatte mit der horizontalen Öffnung von 1800 x 1240 mm zur direkten Beflammung des Probekörpers verwendet. Die einseitige Beflammung der Probekörper von der Unterseite erfolgte durch acht Dieselmotoren, die an beiden Seiten der Längswände des Tunnelofens angeordnet sind. Der gemäß Statik vorgesehene horizontale Lasteintrag erfolgte bei beiden Prüfungen über zwei hydraulische Druckzylinder. Die Belastung der Probekörper wurde über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten. Die gleichmäßige Lastverteilung der punktuell eingetragenen Kräfte wurde über eine horizontal verschiebliche Lasttraverse erreicht. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit den geometrischen Abmessungen des Probekörpern und der Darstellung des Lasteintrages durch die hydraulischen Druck-

zylinder kann der folgenden grafischen Darstellung im Bild 71 entnommen werden.

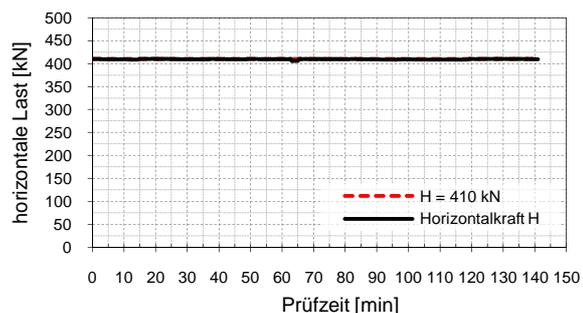


**Bild 71** Schematischer Versuchsaufbau und Abmessungen des festgelegten Probekörpers für die offene Bauweise

Im Bereich der Auflagerpunkte auf dem Tunnelofen wurde die horizontale Verschiebung zum Abbau von auftretenden thermischen Zwangskräften durch Gleitlager aus Polytetrafluorethylen (PTFE) sichergestellt. Die entsprechend der statischen Bemessung festgelegte horizontale Last von  $H = 410$  kN wurde bei jedem Brandversuch ca. 15 Minuten vor Beginn der Prüfung in den Probekörper eingetragen und über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten. Den beiden grafischen Darstellungen in Bild 72 und Bild 73 können die Last-Zeit-Diagramme der beiden belasteten Prüfungen entnommen werden.



**Bild 72** Last-Zeit-Diagramm - Probekörper OB1 belastete Prüfung am Referenzbeton

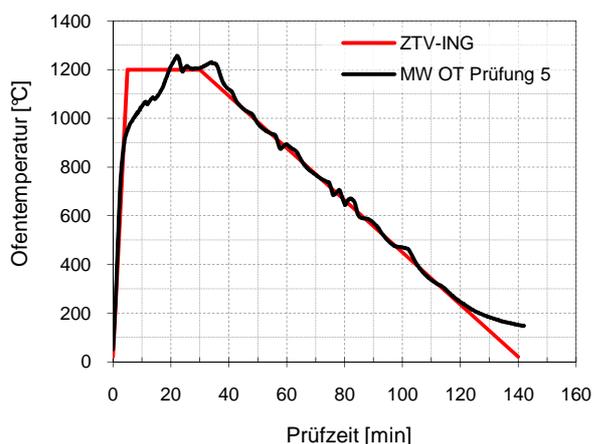


**Bild 73** Last-Zeit-Diagramm - Probekörper OB2 belastete Prüfung am Faserbeton (2,0 kg/m<sup>3</sup> PP-Fasern)

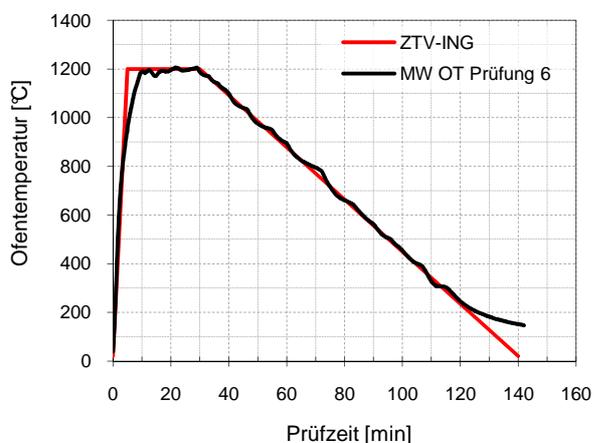
### 6.3.3 Thermische Beanspruchung

Wie bei den zuvor beschriebenen experimentellen Untersuchungen wurden auch die belasteten Probekörper der offenen Bauweise durch die Temperatur-Zeit-Kurve gemäß ZTV-ING, Teil 5, Tunnelbau, Abschnitt 1 geschlossene Bauweise, Abs. 10.2 [2] beansprucht. Die Steuerung der Brandraumtemperatur erfolgte je Prüfung durch drei spezielle Platin-Rhodium-Thermoelemente vom Typ S mit einem Messbereich von bis zu 1600°C. Die drei Thermoelemente wurden jeweils in der Längsachse der Probekörper in den beiden Eckbereichen sowie im Mittelpunkt der Längsachse angeordnet.

Der zeitliche Verlauf der Temperatur-Zeit-Kurven der beiden Prüfungen können den beiden nachfolgenden grafischen Abbildungen Bild 74 und Bild 75 entnommen werden.



**Bild 74** Temperatur-Zeit-Diagramm - Probekörper OB1 belastete Prüfung am Referenzbeton



**Bild 75** Temperatur-Zeit-Diagramm – Probekörper OB2 belastete Prüfung am Faserbeton

Beim Vergleich dieser beiden Kurven ist auch hier in Analogie zu den anderen Brandversuchen an

den Referenzbetonen, dass der Brandraum infolge der auftretenden Abplatzungen ab 1000°C nicht mehr so schnell aufgeheizt wird. Bei der Temperatur-Zeit-Kurve des zweiten Versuches ist ebenfalls zu erkennen, dass der vorgegebene Anstieg gemäß der ZTV-ING Kurve nicht mehr vollständig eingehalten werden konnte. Die Ursache für diese Tatsache wird seitens der MFPA Leipzig GmbH in der deutlichen Vergrößerung des Brandraumes durch den Aufsatz der Rahmenecke gesehen.

### 6.3.4 Messtechnik

Auch in den großmaßstäblichen skalierten Rahmenecken wurden zur Ermittlung des Temperaturanstieges im Probekörper die speziellen Abstandshalter mit den daran befestigten Thermoelementen eingebaut. Die Lage der fünf Messstellen wurde im Abschnitt 5.3.3 ausführlich beschrieben.

An jedem Messpunkt wurden jeweils acht Thermoelemente in den Messtiefen von 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200 und 300 mm von der beflammt Tübbingoberfläche aus angeordnet. Die grafische Übersicht über die Anordnung der Thermoelemente kann den grafischen Darstellungen in Bild 34 bis Bild 36 entnommen werden. Die Befestigung der Abstandshalter mit den daran befestigten Temperaturmessfühlern erfolgte an der statisch erforderlichen Bewehrung.

Zur Aufzeichnung der Verformungen am Probekörper wurden je Versuch zwei potentiometrische Wegaufnehmer zur Messung der horizontalen Verformungen und drei potentiometrische Wegaufnehmer zur Messung der vertikalen Verformungen angeordnet.

Während der Brandversuche wurden alle Daten der Brandraumtemperaturen, der Temperaturerhöhung in den Probekörpern sowie der Verformungen alle 10 Sekunden gemessen und mittels geeigneter EDV aufgezeichnet.

Die Bestimmung der Massen der Probekörper vor und nach dem Brandversuchen erfolgte unter Zuhilfenahme einer geeichten Kranwaage mit einem maximalen Messbereich von 8000 kg bei einer Ablesbarkeit des Displays im Massebereich bis 6000 kg von 2 kg und im Massebereich > 6000 kg von 5 kg.

### 6.3.5 Durchführung und Prüfbeobachtungen

Die während der beiden Brandversuche aufgenommenen Beobachtungen werden nachfolgend zusammengefasst. Die grafischen Auswertungen der Temperaturerhöhungen in den beiden Probekörpern können den Grafiken in Bild 80 bis Bild 83 entnommen werden. Die grafischen Auswertungen der Verformungen können der Anlage 9 entnommen werden.

Nach dem Start der Prüfung am Probekörper OB1 konnte wie bei den anderen Prüfungen an den Referenzbetonen, innerhalb der ersten ca. 2 Minuten sicht- und hörbare Abplatzungen festgestellt werden. Jedoch wurden die typischen, lauten Abplatzgeräusche erst nach ca. 13 Minuten aufgenommen. Es wird vermutet, dass bis zu diesem Zeitpunkt die konstruktive Mattenbewehrung N94 die großen, schollenförmigen Abplatzungen behindert haben. Anhand der Schadensaufnahme nach

der Prüfung war jedoch deutlich erkennbar, dass trotz des Einbaus der konstruktiven Mattenbewehrung N94 die tiefen Abplatzungen an dem Referenzbeton (offene Bauweise) nicht verhindert werden konnte. Die Beobachtungen am Probekörper OB1 können Bild 76 und Bild 77 oder der Fotodokumentation in Anlage 8 entnommen werden.

Bei dem fasermodifizierten Probekörper OB2 wurden während des Brandversuches keine hörbaren Abplatzgeräusche aufgenommen werden. Nach dem Brandversuch konnte jedoch visuell aufgenommen werden, dass es im oberflächennahen Bereich doch lokale Abplatzungen aufgetreten sind. Eine Übersicht über die Oberflächenbeschaffenheit des Probekörpers OB2 nach dem Brandversuch kann den fotografischen Darstellungen in Bild 78 und Bild 79 oder in der Anlage 8 entnommen werden.



**Bild 76** Probekörper OB1 aus Referenzbeton und mit der N94-Matte nach der Brandbeanspruchung



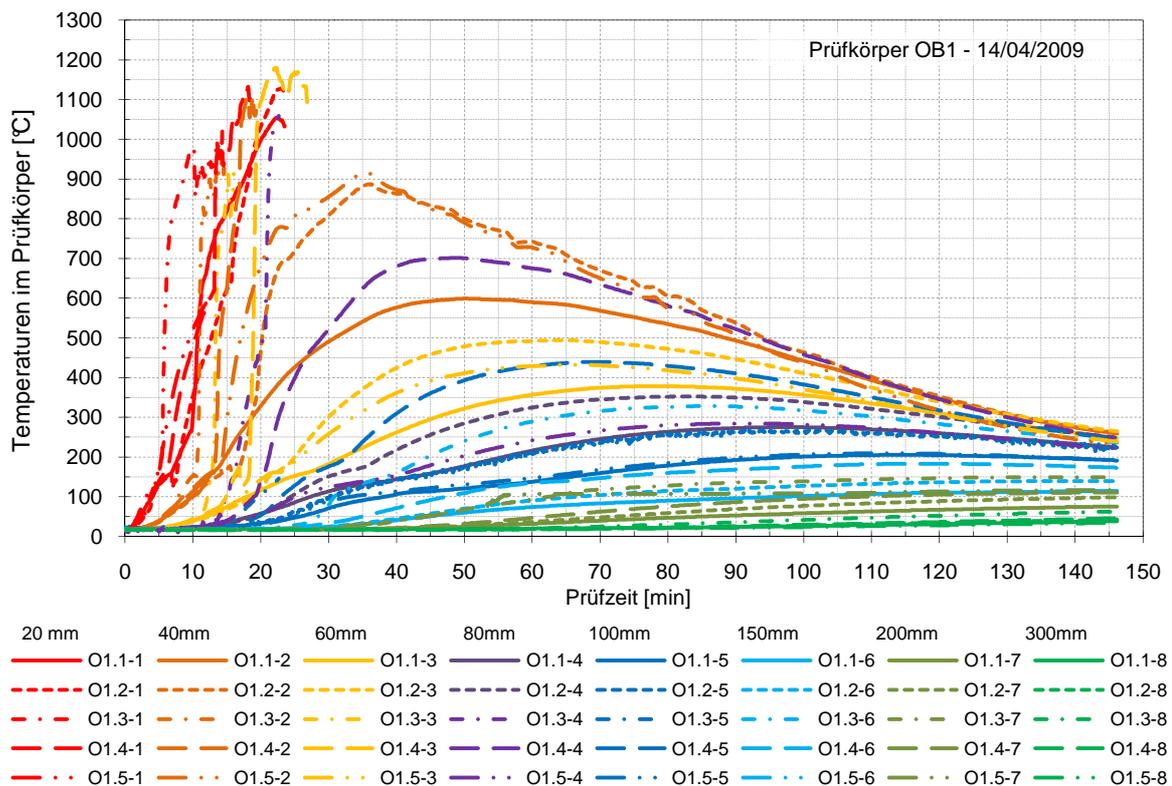
**Bild 77** Probekörper OB1 aus Referenzbeton und mit der N94-Matte nach der Brandbeanspruchung



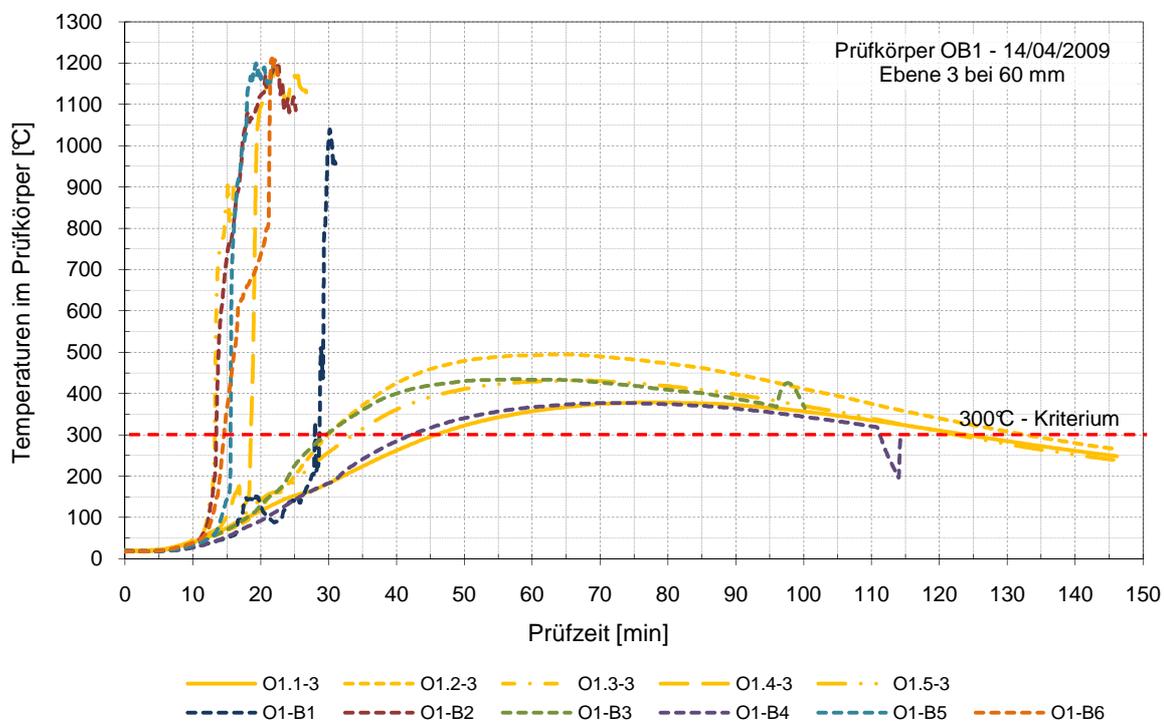
**Bild 78** Probekörper GB2 (Faserbeton) nach der unbelasteten Brandbeanspruchung



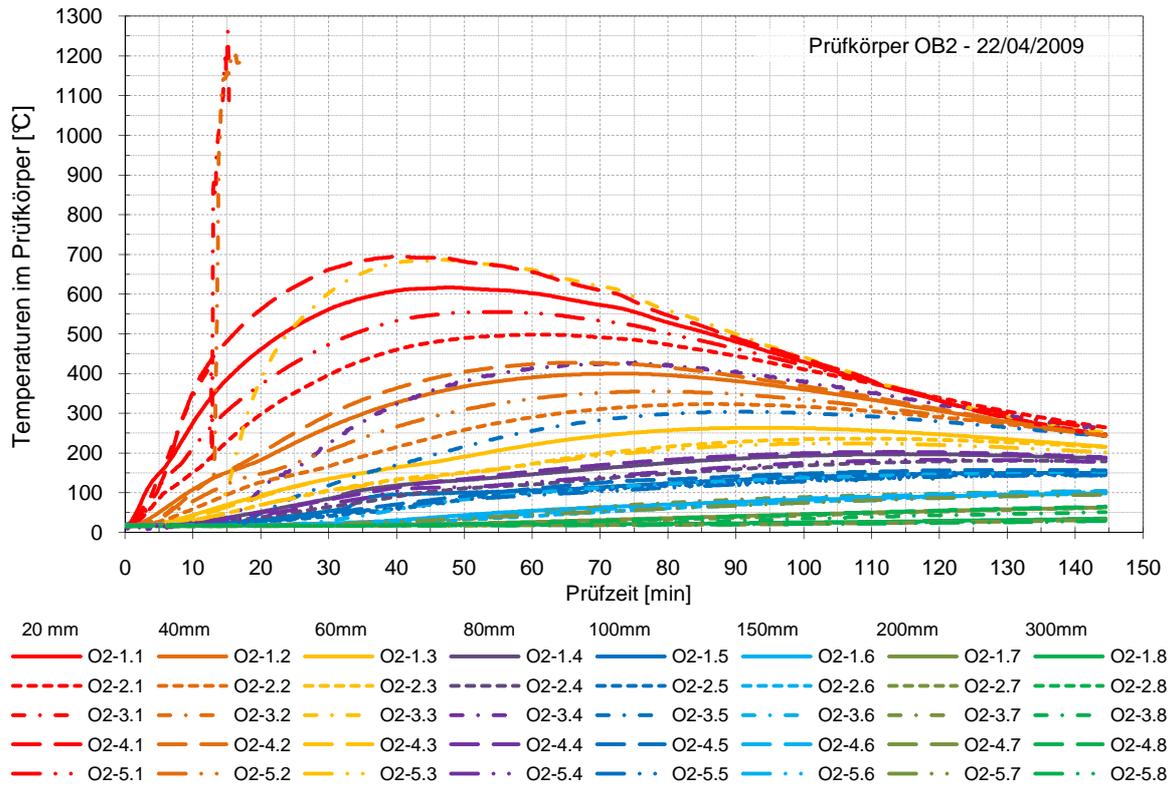
**Bild 79** Probekörper GB4 (Faserbeton) nach der belasteten Brandbeanspruchung



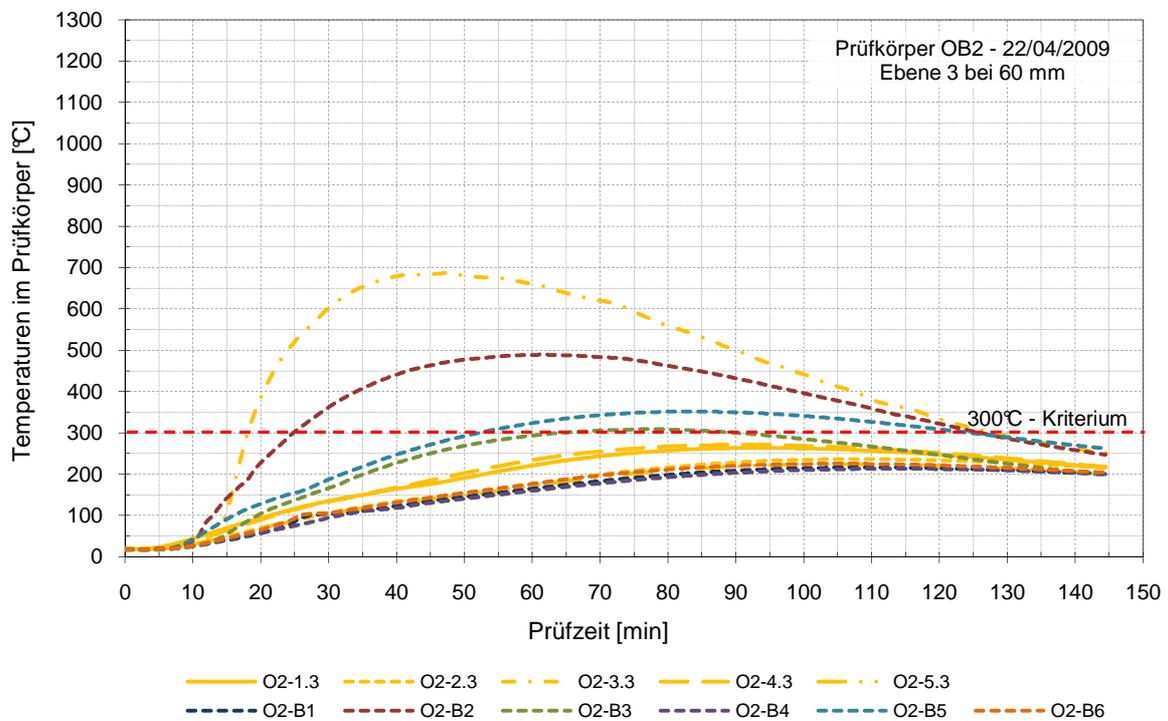
**Bild 80** Temperaturerhöhung im Probekörper OB1 - belastete Prüfung am Referenzbeton



**Bild 81** Temperaturerhöhung im Probekörper OB1 in der Messebene 3 an der tragenden Bewehrung in 60 mm - belastete Prüfung am Referenzbeton



**Bild 82** Temperaturerhöhung im Probekörper OB2 - belastete Prüfung am Faserbeton mit 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP-Fasern



**Bild 83** Temperaturerhöhung im Probekörper OB2 in der Messebene 3 an der tragenden Bewehrung in 60 mm - belastete Prüfung am Faserbeton mit 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP-Fasern

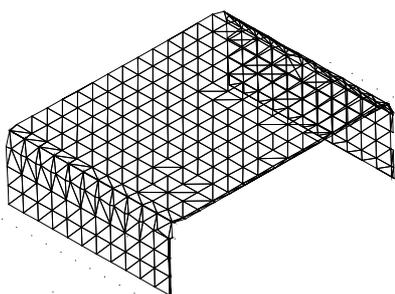
### 6.3.6 Bestimmung der Masseverluste

Analog zu den Versuchen an den großmaßstäblichen Tunnelinnenschalensegmenten wurden die Massen der geprüften Probekörper direkt vor dem Einbau auf dem Tunnelofen und direkt nach dem Abheben vom Tunnelofen nach dem Brandversuch bestimmt. Dazu wurde ebenfalls eine spezielle, geeichte Kranwaage mit einem Ablesbereich von 2,0 kg im Massebereich zwischen 0 und 6000 kg und einem Ablesbereich von 5,0 kg ab einem Gewicht von 6000 kg verwendet.

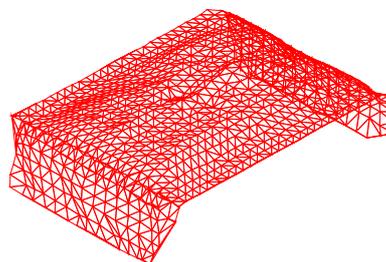
Die aus den Massebestimmungen berechneten Masseverluste der beiden Probekörper OB1 und OB2 infolge der Brandeinwirkungen können der tabellarischen Übersicht in Tabelle 15 entnommen werden. Anhand der visuellen Schadensaufnahmen (siehe Bild 76 bis Bild 79) sowie an den Ergebnissen der berechneten Masseverluste ist zu erkennen, dass trotz des Einbaus der gemäß ZTV-ING Teil 5, 10.3.2, (2) geforderten konstruktiven Mattenbewehrung an der Deckenunterseite des Probekörper mit dem Referenzbeton ein verstärktes Abplatzen nicht verhindert werden konnte. Mit 11 M.-% war der Masseverlust des Probekörpers OB 1 deutlich höher als der Masseverlust von 4,66 M.-% des Probekörpers OB 2, der mit dem fasermodifizierten Tunnelbeton hergestellt wurde.

### 6.3.7 Bestimmung der Abplatztiefen

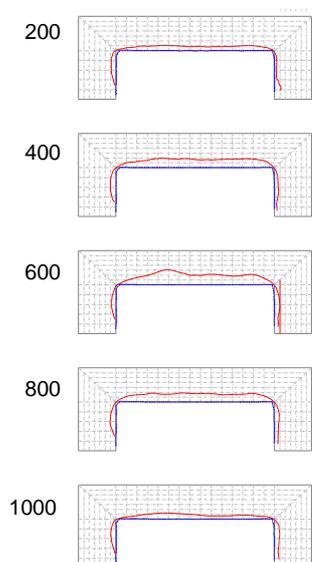
Zur Bestimmung der Abplatztiefen wurde, wie bereits bei den Probekörpern der geschlossenen Bauweise beschrieben vorgegangen. Auch bei den skalierten Probekörpern der offenen Bauweise wurden die einzelnen Innenseiten sowohl vor als auch nach der Brandbeanspruchung mit einem Tachymeter vermessen. Die Datenmengen wurden im Anschluss so aufbereitet, dass aus den generierten Oberflächennetzen (siehe Bild 84 und Bild 85) die Schnittbilder zur Bestimmung der Abplatztiefen erzeugt werden konnten (siehe Bild 86 und Bild 87).



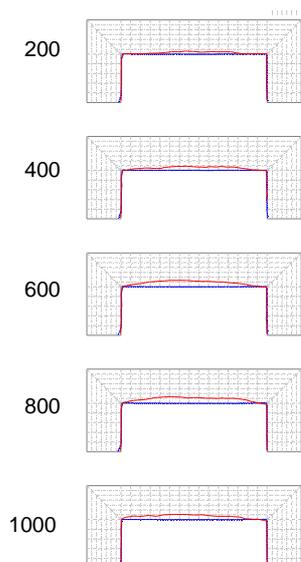
**Bild 84** Oberflächennetz der Probekörper der offenen Bauweise vor der Brandbeanspruchung



**Bild 85** Oberflächennetz der Probekörper der offenen Bauweise nach der Brandbeanspruchung



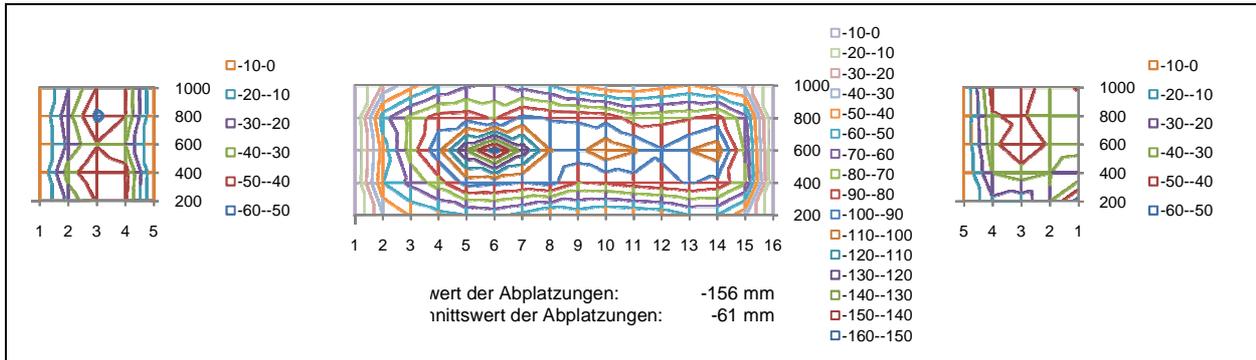
**Bild 86** Tiefenprofil der Abplatzungen - Probekörper OB1



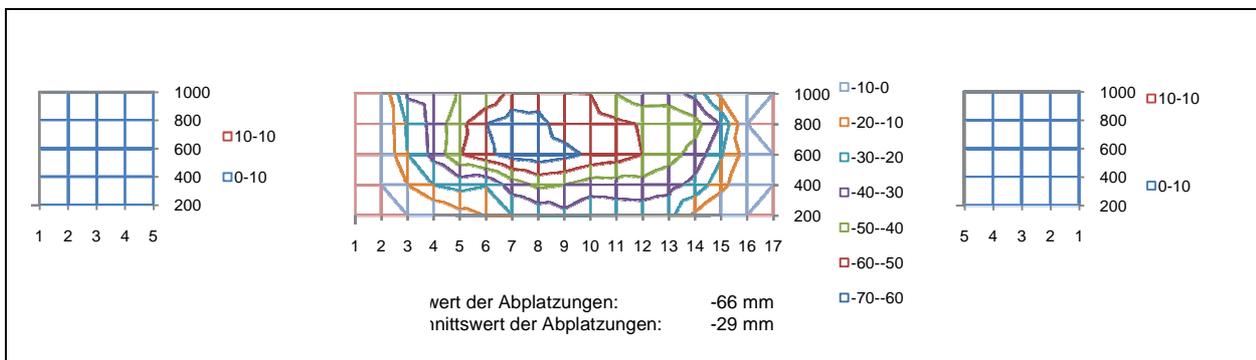
**Bild 87** Tiefenprofil der Abplatzungen - Probekörper OB2

Die grafische Auswertung der ermittelten Werte für die mittleren und maximalen Abplatztiefen können

den Flächendiagrammen in Bild 88 und Bild 89 entnommen werden.



**Bild 88** Resultierende Flächendiagramme der bestimmten Abplatztiefen – Probekörper OB 1 (Referenzbeton mit N94 Bewehrung)



**Bild 89** Resultierende Flächendiagramme der bestimmten Abplatztiefen – Probekörper OB 2 (Faserbeton)

Den aufgeführten Abwicklungen der ermittelten Abplatztiefen ist zu entnehmen, dass bei beiden Probekörpern die maximalen Schädigungen im Bereich der Deckenunterseite der skalierten Rahmenecke aufgetreten sind. Im Gegensatz zum Probekörper OB2 mit der fasermodifizierten Tunnelbetonrezeptur, wurden am Probekörper OB1 mit dem Referenzbeton auch an den beiden Seitenflächen Abplatzungen von bis zu -55 mm festgestellt werden.

Der Maximalwert der Abplatzungen wurde am Probekörper OB1 mit -156 mm aufgenommen. Der Mittelwert der Abplatzungen wurde bei diesem Probekörper an der Unterseite der Decke mit -61 mm bestimmt. Anhand dieser Werte und den Fotos in Bild 76 und Bild 77 ist zu entnehmen, dass auch die konstruktive Anordnung der Mattenbewehrung N94 das Abplatzen des Referenzbetons infolge der hohen Temperaturbeanspruchung durch die ZTV-ING-Kurve nicht verhindern hat.

Beim fasermodifizierten Probekörper wurden deutlich geringere Abplatztiefen festgestellt. Das Maximum an der Deckenfläche betrug -66 mm und im Mittelwert wurden Abplatztiefen von -29 mm ermittelt.

Trotz dem, dass beim fasermodifizierten Probekörper das Maximum der Abplatzungen bis in Höhe der tragenden Bewehrung reichte, wurde auch bei dieser Versuchsreihe eine wirksamen Reduzierung der Abplatzungen durch die Zugabe der PP-Fasern erreicht werden.

Es wird davon ausgegangen, dass die lokal aufgetretenen Abplatzungen an Stellen mit einer unzureichenden Anzahl an wirksamen PP-Fasern aufgetreten sind. Diese Stellen können einerseits durch die späte Faserzugabe zum Frischbeton und der daraus vermuteten unzureichenden Faserverteilung aufgetreten sein. Zusätzlich kann auch die sehr steife Frischbetonkonsistenz dazu geführt haben, dass beim Einbau des Tunnelbetons in die Schalung lokale Stellen mit unterschiedlichen wirksamen Fasergehalten aufgetreten sind.

**Tabelle 15** Zusammenfassung der Ausgangsdaten der Probekörper sowie Ergebnisse der einseitigen Brandbeanspruchung durch die ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Kurve

<b>Allgemeines</b>			
Bezeichnung der Probekörper		<b>OB 1</b>	<b>OB2</b>
Zugegebener Fasergehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	--	2,0
ermittelter Fasergehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	--	1,69
Ausbreitmaß beim Einbau in die Schalung	[cm]	53	30
horizontale Belastung des Probekörpers		ja	ja
<b>Massebestimmung an den Probekörpern</b>			
vor dem Brandversuch	[kg]	3254	3302
direkt nach dem Brandversuch	[kg]	2896	3148
Masseverlust	[kg]	358	154
Masseverlust	[M.-%]	11,00	4,66
<b>Abplatztiefen</b>			
Maximalwert der Abplatztiefen	[mm]	-156	-66
Durchschnittswert	[mm]	-61	-29

### 6.3.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Für die Untersuchungen an ZTV-ING-konformen Tunnelbetonrezepturen zum Brand- und Abplatzverhalten wurden zwei skalierte Rahmen-ecken mit jeweils einer Referenzbetonmischung und einer fasermodifizierten Rezeptur hergestellt. Beide Betone für die offene Bauweise erfüllten die Anforderungen der ZTV-ING. In dem Probekörper mit Referenzbeton wurde zusätzlich zur tragenden Bewehrung auch die konstruktiv geforderte Mattenbewehrung N94 eingebaut. Bei dem fasermodifizierten Probekörper wurde auf diese Maßnahme verzichtet.

Bei der Bewertung der Frischbetoneigenschaften können die gleichen Schlussfolgerungen wie auch bei den Probekörpern der geschlossenen Bauweise getroffen werden.

Es ist außerdem ersichtlich, dass auch bei den Probekörpern mit den fasermodifizierten Tunnelbetonen der offenen Bauweisen ein deutlich besseres Brand- und Abplatzverhalten als an den Referenzbetonen ohne Faserzugabe erzielt wurde. Es wird davon ausgegangen, dass bei einer Verbesserung der Frischbetoneigenschaften und somit auch bei einer homogeneren Faserverteilung im Frischbeton das ermittelte Ergebnis noch verbessert werden kann.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass die konstruktiv angeordnete Mattenbewehrung N94 keinen umfassenden Schutz vor dem Auftreten von tiefen Abplatzungen an dem Referenzbeton ohne Faserzugabe bietet.

Die Beobachtungen während und nach der Brandbeanspruchung haben gezeigt, dass die konstruktive Mattenbewehrung zwar zu Beginn der auftre-

tenden Schädigung die Abplatzungen kurzzeitig behindern kann. Dennoch waren nach der Brandbeanspruchung die Schädigungen am Betonquerschnitt so groß, dass die tragende Bewehrung frei lag.

## 7 Betontechnologische Machbarkeitsstudie

### 7.1 Allgemeines

In Ergänzung zu den bearbeiteten Modulen des bearbeiteten Forschungsprojektes zum „Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln“ wurde der Forschungsnehmer mit dem zusätzlichen Modul zu Durchführung einer betontechnologischen Machbarkeitsstudie beauftragt. In dieser war der Nachweis zu erbringen, dass es bei der Entwicklung und der Herstellung von PP-fasermodifizierten Betonen möglich ist, ZTV-ING-konforme Betonrezepturen mit ausreichend guten Frischbetoneigenschaften herzustellen. Zusätzlich sollten ebenfalls die im Tunnelbau erforderlichen Frühfestigkeiten nachgewiesen werden.

Im Bearbeitungsmodul zur betontechnologischen Machbarkeitsstudie wurden regelkornforme Kunststofffaserbetone für die geschlossene und offene Tunnelbauweise entwickelt, wobei die betontechnologischen Grundsätze nach ZTV-ING, Teil 3 Massivbau, Abschnitt 1 Beton [4], beachtet wurden.

Das ergänzende Modul zur Forschungsarbeit untergliedert sich in zwei Arbeitspakete, wobei Arbeitspaket eins die Laborversuche an der MFPA Leipzig GmbH und Arbeitspaket zwei die Großmisch- sowie Pumpversuche in einem Transportbetonwerk beinhalten. Entsprechend der vorangegangenen Brandversuche wurde für die betontechnologische Machbarkeitsstudie ausschließlich kalzitische Gesteinskörnung verwendet. Als Faserzusatz wurden bei den Untersuchungen die folgenden Kunststofffasern berücksichtigt:

- Polyloc<sup>®</sup> PB Eurofiber  
2,8 dtex ( $\varnothing = 18 \mu\text{m}$ ), Faserlänge 6 mm und
- Baumhüter PB Eurofiber HPR  
1,7 dtex ( $\varnothing = 15 \mu\text{m}$ ), Faserlänge von 6 mm.

Wesentliches Ziel der betontechnologischen Machbarkeitsstudie war es, die ZTV-ING konformen Betonrezepturen so zusammenzustellen, dass die folgenden Vorgaben erfüllt werden:

- Erreichen einer Frischbetonkonsistenz mit einem Ausbreitmaß zwischen 500 mm und 550 mm sowie
- Sicherstellung der erforderlichen Frühfestigkeit von mind.  $3,5 \text{ N/mm}^2$  nach 12 Stunden (Mindestfestigkeit zum Ausschalen).

### 7.2 Arbeitspaket 1 - Laborversuche

Im ersten Entwicklungsschritt wurde eine Reihe von regelkornformen Ausgangskomponenten (vgl. Tabelle 16) auf ihre Eignung zur Herstellung von Faserbetonen für den Bau von Tunnelbauwerken untersucht.

**Tabelle 16** Verwendete Ausgangskomponenten

Wirkungsgruppe	Produktbezeichnung	Hersteller
Zement	CEM I 32,5 R	Schwenk Zement KG
	CEM I 32,5 N-HS	
	CEM I 42,5 R-HS	
	CEM II 32,5 A/LL 32,5 R	
Zusatzstoff Typ II Flugasche	Safament <sup>®</sup> HKV W III	SAFA Saarfilterasche- Vertriebs GmbH Co.KG
	Kreament <sup>®</sup>	Kremer Baustof- fe und Trans- porte GmbH & Co. KG
Zusatzmittel Fließmittel	Glenium <sup>®</sup> Sky 501	BASF SE
	Glenium <sup>®</sup> Sky 592	
	VicoCrete <sup>®</sup> 20 SL	Sika AG
	ViscoCrete <sup>®</sup> P5	
Zusatzmittel Sedimentations- reduzierer	RheoMatrix <sup>®</sup> 100	BASF SE
	ViscoGuard <sup>®</sup> 916	
Zusatzmittel Luftporenbildner	Mischöl LP78 (LP)	

Neben dem im Rahmen der Großbrandversuche untersuchten Bindemittelsystem, bestehend aus einem Zement CEM I 32,5R und eine Steinkohlenflugasche Safament W III, wurden zwei HS-Zemente mit einem geringen Gehalt an  $\text{C}_3\text{A}$  geprüft. In Kombination mit PCE-Fließmittelprodukten besitzen beide HS-Zemente eine sehr gute Verflüssigungswirkung.

Aufgrund der aktuellen, baupraktischen Entwicklungstendenz kamen zusätzlich ein Portlandkompositzement und eine weitere Flugasche zum Einsatz. Neben unterschiedlichen PCE-Fließmitteln wurden weitere Zusatzmittel auf ihre Wechselwirkung mit dem jeweiligen Bindemittel untersucht.

Die systematische Entwicklung der optimierten Betonrezepturen für die offene und geschlossene Bauweise begann mit der Bestimmung des Fließverhaltens der Mischung der einzelnen Ausgangskomponenten in Abhängigkeit des Wassergehaltes. In Anschluss folgte die Variation der einzelnen Zusatzmittel.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden mit einer Vorauswahl an geeigneten Ausgangskomponenten regelkornforme Betone hergestellt. Für die Groß- und Pumpversuche im Transportbetonwerk (Arbeitspaket 2) wurde jeweils eine Rezeptur für die geschlossene und eine Rezeptur für die offene Bauweise im Großmaßstab unter praxisrealen Bedingungen geprüft.

Die Herstellung der Mörtel erfolgte mit einem Mörtelmischer der Firma Testing nach DIN EN 196-1 [10] unter normklimatischen Bedingungen (20°C / 65% rel. Luftfeuchtigkeit). Für sämtliche Mörtelmischungen wurde eine Mischwerkzeuggeschwindigkeit von 140 U/min und eine Mischgesamtzeit von 3 Minuten gewählt. Nach dem Mischvorgang erfolgte die Messung des Setzfließmaßes mit dem Haegermann-Trichter auf einer angefeuchteten Glasplatte.

### 7.2.1 Wasseranspruch des Bindemittels

Der Wasseranspruch der einzelnen Bindemittelkomponenten wurde durch die Variation des Wasserbindemittelwertes (w/b-Wert) anhand des Setzfließmaßes bestimmt. Ein hohes Setzfließmaß bei einem niedrigen w/b-Wert deutet auf einen geringen Wasseranspruch hin. Der Wasseranspruch der untersuchten Bindemittelkomponenten ist in der folgenden Tabelle 17 und in Anlage 10 dargestellt.

**Tabelle 17** Wasseranspruch der Ausgangskomponenten

w/b=w/(z+f)		0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Zement 1	z	CEM I 32,5 R (Schwenk)					
S <sub>m</sub>	cm	-	10,0	-	23,5	26,5	30,5
Zement 2	z	CEM II A/LL 32,5 R (Schwenk)					
S <sub>m</sub>	cm	-	9,5	14,5	16,5	20,5	23,0
Zement 3	z	CEM I 32,5 N-HS (Schwenk)					
S <sub>m</sub>	cm	10	10,5	16,0	30,0	-	-
Flugasche 1	f	Safament W III					
S <sub>m</sub>	cm	-	10,0	23,5	26,5	30,5	-
Flugasche 2	f	Kreament					
S <sub>m</sub>	cm	-	10,0	21,0	28,0	32,0	-

### 7.2.2 Wechselwirkung zwischen PCE-Fließmittel und Bindemittelsystem

Zur Verifizierung der Wechselwirkungen zwischen Polycarboxylatether-Fließmitteln (PCE-FM) und komplexen Bindemittelsystem wurden unter Verwendung konstanter Rezepturen die Transportbetonfließmittel- und die Zemente variiert. Die Fließ-

fähigkeit wurde entsprechend der Beschreibung in Kapitel 7.2 bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Anlage 10 hinterlegt.

Die deutlichste Verflüssigungswirkung wurde mit dem Schwenk CEM I 32,5 N-HS und dem Fließmittel mit der Bezeichnung Sika „ViscoCrete® P5“ erreicht.

Durch die Reduktion der schnell reagierenden Portlandzementklinkerphase C<sub>3</sub>A wurde die Wechselwirkung zwischen C<sub>3</sub>A, Sulfat, Hydratationsprodukten (Ettringit, Syngnit) und den PCE-FM reduziert. Der geringere Verflüssigungseffekt bei den anderen getesteten PCE-FM konnte durch eine erhöhte Dosierungsmenge ausgeglichen werden.

### 7.2.3 Einfluss von weiteren Zusatzmitteln

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zwei verschiedene Sedimentationsreduzierer sowie ein LP-Mittel mit jeweils zwei unterschiedlichen Fließmitteln kombiniert und die verflüssigende Wirkungsweise mit dem Setzfließmaß entsprechend der Beschreibung in Kapitel 7.2 ermittelt.

Die Stabilisierer-Typen „RheoMatrix® 100“ und „Viscoguard 916“ der Firma BASF reduzierten durch ihre Wasserbindung das Fließverhalten des Bindemittelsystems unabhängig vom eingesetzten Fließmittel.

Der synthetische Luftporenbildner „Mischöl LP-78“ von BASF hat bei beiden Fließmittelprodukten durch das Herabsetzen der Oberflächenspannung des Anmachwassers eine plastifizierende Wirkung. Die Ergebnisse sind in Anlage 10 grafisch dargestellt.

### 7.2.4 Beton

Die Konzeption der Mischungsberechnung der Betone erfolgte nach den in Tabelle 1 dargestellten Grenzwerten.

Für die Applikation eines hohen PP-Fasergehalteses ist unter Verwendung eines konstanten Wasserzement-Wertes (w/z-Wertes) nach Auswahl der Ausgangskomponenten meist eine Erhöhung des Bindemittelanteils notwendig.

Die Grenzwerte nach ZTV-ING bzw. DIN 1045-2 [11] sind in der folgenden Tabelle 18 dargestellt.

**Tabelle 18** Weitere Grenzwerte der Betonzusammensetzung für die hier maßgebende Expositionsklasse XF2 nach ZTV-ING bzw. DIN 1045-2

max. Steinkohlenflugaschengehalt	[M.-%v-Z.]	60
max. anrechenbarer Steinkohlenflugaschengehalt bei der geschlossenen Bauweise	[kg/m <sup>3</sup> ]	80
max. Mehlkorngelalt <sup>1</sup>	[kg/m <sup>3</sup> ]	400 bis 450

Aufbauend auf den Ergebnissen der Bindemittel- und Mörtelversuche wurden mit den Laborversuchen am Betonsystem folgende Parameter hinsichtlich einer ausreichenden Konsistenz und Frühfestigkeit variiert:

- Sieblinie,
- Kunststofffaserart,
- Zeitpunkt der Faserzugabe,
- w/z- bzw. (w/z)<sub>eq</sub> - Wert sowie
- die Bindemittelzusammensetzung.

Die Herstellung der Betone erfolgte mit einem 60 Liter Zwangsmischer bei normklimatischen Bedingungen im Betonlabor.

Nach einer Trockenmischdauer von 30 Sekunden erfolgte die Wasserzugabe. Das Fließmittel wurde nach 15 Sekunden hinzugegeben. Nach einer Gesamtmischzeit von 4 Minuten wurde eine Frischbetonprobe für die Messung des Ausbreitmaßes nach DIN EN 12350-5 [12] und einer augenscheinlichen Beurteilung entnommen. Bei einem unzureichenden Zusammenhaltevermögen (Bluten) wurde unter Zugabe des Sedimentationsreduzierers „RheoMatrix® 100“ der Beton erneut für eine 1 min aufgemischt. Im Anschluss erfolgte die erneute Beurteilung des Frischbetons. Im Falle eines sedimentationsfreien Betons wurden Probewürfel hergestellt und nach DIN EN 12390-2 [13] gelagert. Nach 24 Stunden, 7 und 28 Tagen erfolgte die Messung der Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-4 [14] sowie der Festbetonrohddichte nach DIN EN 12390-7 [15].

Die Bezeichnung der nachfolgenden Mischungsrezepturen wird, wie nachfolgend aufgeführt, unterschieden:

- GL: geschlossene Bauweise - Laborversuch,
- OL: offene Bauweise – Laborversuch.

## 7.2.5 Sieblinie

Die Auswahl des Sandes erfolgte durch die Bestimmung des Wasseranspruches nach der DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton [16].

Es wurden zur betontechnologischen Optimierung der Tunnelbetonrezepturen die gleichen kalzitischen Gesteinskörnungen wie bei den Betonrezepturen für die Probekörper der bereits durchgeführten Brandversuche festgelegt. Die beiden kalzitischen Gesteinskörnungen in den Kornfraktionen 2 bis 8 mm und 8 bis 16 mm wurden aus dem Kalksteinbruch Medenbach verwendet.

Ergänzend wurde für die Zusammenstellung der geeigneten Sieblinie für die Versuche zur Machbarkeitsstudie ein quarzitischer Sand der Kornfraktion 2 bis 2 mm aus Rehbach bei Leipzig gewählt.

Infolge von Vorversuchen wurde eine Sieblinie im oberen Bereich zwischen den Regelsieblinien A und B gewählt.

Durch die Steigerung des Feinanteils in GL2 konnte das leichte Absetzen des Zugabewassers in GL1 reduziert und die Konsistenz mit einem Ausbreitmaß von 58 cm deutlich gesteigert werden. Mit den Rezepturen GL3 und GL4 wurde der Zementgehalt von 360 kg/m<sup>3</sup> auf 320 kg/m<sup>3</sup> reduziert und die Masseprozentanteile der kalzitischen Gesteinskörnung weiter verändert. Es konnte mit dieser optimierten Zusammensetzung ein Faserbeton mit einem Ausbreitmaß von >50 cm für die offene Bauweise hergestellt werden. Dieser Konsistenzbereich wurde mit einem erhöhten Zementgehalt von 360 kg/m<sup>3</sup> für die geschlossene Bauweise ebenfalls erreicht.

## 7.2.6 Bindemittelzusammensetzung

Auf Grundlage der durchgeführten Sieblinienoptimierung wurden die einzelnen Ausgangskomponenten: Zement, Flugasche und Fließmittel schrittweise ausgetauscht.

Mit den Zementen: „Schwenk CEM I 42,5 R-HS“ und „Schwenk CEM II A/LL 32,5 R“, der Flugasche: „Safament HKV W III“ und dem Fließmittel „Sika Vicoguard SL“ konnten die sedimentationsstabilsten Betone mit einem Ausbreitmaß > 50 cm hergestellt werden. Mit der Verwendung des Schwenk Zementes CEM I 32,5 R, der Flugasche von Kreament und dem Fließmittel BASF Sky 501 reduzierte sich die Fließfähigkeit des Betons deutlich. Bei entsprechender Erhöhung des Fließmittelgehaltes erhöhte sich die Neigung zum Bluten.

<sup>1</sup> Erhöhung des max. Mehlkorngelaltes um max. 50 kg/m<sup>3</sup>, wenn ein puzzolanisch wirkender Zusatzstoff verwendet wird und der Gesamtmehlkorngelalt größer als 450 kg/m<sup>3</sup> ist, nach DIN 1045-2, „5.2.3 Grenzwerte für die Betonzusammensetzung“ zulässig (Stand:08/2008)

### 7.2.7 Kunststofffaserart

Neben den PP-Fasern vom Typ Polyloc® PB Eurofiber (2,8 dtex / 6 mm Länge) wurden zusätzlich die Fasern vom Typ Baumhüter PB Eurofiber HPR (1,7 dtex, 6 mm Länge) in der Mischung OL4 geprüft.

Durch die Reduktion des Faserdurchmessers vergrößerte sich die relative zum Volumen bezogene Oberfläche. Der dadurch erhöhte Wasseranspruch führte zu einem Herabsetzen der Fließfähigkeit.

### 7.2.8 Zeitpunkt der Faserzugabe

Prinzipiell wurden die Kunststofffasern den Trockenbestandteile hinzugeben. Während des Trockenmischprozesses werden die Faserbündel durch die innere Reibung zwischen den trocknen Bestandteilen aufgeschlossen und homogen in der Matrix verteilt.

Mit den Betonen OL1 und OL3 wurde der Einfluss des Zeitpunktes der Faserzugabe auf die Konsistenz und das Zusammenhaltevermögen des Frischbetons geprüft. Die PP-Fasern wurden bei OL1 der Trockenmischung und bei OL3 der Nassmischung hinzugegeben.

Die Konsistenz und das Zusammenhaltevermögen der Frischbetone wurden durch die unterschiedlichen Zeitpunkte der Faserzugabe nicht verändert. Die Faserverteilung im Frischbeton in Abhängigkeit des Zeitpunktes der Faserzugabe wird in den Großmisch- und Pumpversuchen (Abs. 7.3) betrachtet.

### 7.2.9 $w/z$ - bzw. $(w/z)_{eq}$ -Wert

Der  $(w/z)_{eq}$ -Wert für die geschlossene Bauweise bzw. der  $w/z$ -Wert für die offene Bauweise wurde mit den Betonen GL10 und OL7 von 0,50 auf 0,55 erhöht. Durch die Steigerung des Wassergehaltes konnte der Fließmittelgehalt deutlich auf 0,5 bzw. 0,6 [M.-% v. Z]<sup>2</sup> gesenkt werden. Beide Betone erreichten ein Ausbreitmaß von ca. 50 cm. Tendenziell konnten durch den erhöhten Wassergehalt stabilere Frischbetone hergestellt werden.

### 7.2.10 Festigkeitsentwicklung

Die 24 h Druckfestigkeit wurde vor allem durch die Auswahl des Zementes- sowie des Fließmittelpro-

duktes und weniger vom Bindemittelgehalt beeinflusst.

Die maximalsten 24 h Frühfestigkeiten wurden bei beiden Bauweisen (GL9, OL6) mit dem CEM I 42,5 R-HS erreicht. Mit Ausnahme dieser beiden Betone betrug die Frühfestigkeit zwischen minimal 3,3 und maximal 7,5 [N/mm<sup>2</sup>].

Mit allen Betonrezepturen wurden nach 28 Tagen Betondruckfestigkeiten zwischen 52 N/mm<sup>2</sup> und 54 N/mm<sup>2</sup> erreicht.

Eine deutliche Veränderung der Druckfestigkeit durch Variation des Bindemittel- oder des Wassergehaltes konnte nicht festgestellt.

## 7.3 Arbeitspaket 2: Großmisch- und Pumpversuche

Die Großmisch- und Pumpversuche fanden am 09.11.2009 und am 17.11.2009 im Transportbetonwerk Wachau statt. Unter baupraktischen, erschwerten Bedingungen wurden die Rezepturen für die beiden Bauweisen gemischt, transportiert und gefördert. Der Herstellungsprozess fand bei Außentemperaturen von ca. 6°C bis 10°C und vermehrten Niederschlag statt.

Um die Vergleichbarkeit zu den vorangegangenen Versuchen zu gewähren, wurde in Absprache mit dem Auftraggeber der Portlandzement CEM I 32,5 R verwendet. Es sei darauf hinzuweisen, dass unter Laborbedingungen mit den Zementen: „Schwenk CEM I 42,5 R-HS“ und „Schwenk CEM II A/LL 32,5 R“ sedimentationsfreie Betone mit einem deutlich fließfähigeren Konsistenz hergestellt wurden.

Folgende Parameter wurden im Arbeitspaket 2 untersucht:

- Variation des Zeitpunktes der Kunststofffaserzugabe (Trockengemisch: GG1, OG1, OG3-OG5; Feuchtgemisch: OG2),
- Ermittlung der Frischbeton- und Festbetoneigenschaften,
- Ermittlung der Fasermenge und -verteilung im Frischbeton, visuell und nach dem Auswaschversuch gemäß ÖVBB-Richtlinie [9],
- Einfluss des Nachmischens des Kunststofffaserbetons im Transportbetonfahrmischer auf die Frischbetonkonsistenz,
- Bestimmung des tatsächlichen Wassergehaltes im Frischbeton mittels Darren und

<sup>2</sup> M.-% v. Z. = Masse Prozent bezogen auf den Zementgehalt

- Verifizierung des Einflusses eines Pumpvorganges auf die Frischbetonkonsistenz sowie auf die Faserverteilung.

Zusätzlich wurde der Einfluss des Sedimentationsreduzierers auf die Frischbetoneigenschaften an einem Beton (OG5) exemplarisch betrachtet.

Die Bezeichnung der nachfolgenden Mischungsrezepturen wird, wie nachfolgend aufgeführt, unterschieden:

- GG: geschlossene Bauweise – Großversuch,
- OG: offene Bauweise – Großversuch.

### 7.3.1 Geschlossene Bauweise

Für die geschlossene Bauweise wurden am 09.11.2009 zwei Chargen (1 m<sup>3</sup> und 2 m<sup>3</sup>) hergestellt. Die Rezeptur ist mit den Frischbeton- sowie Festbetonergebnissen und einer entsprechenden Fotodokumentation in der Anlage 12 hinterlegt.

Für die Rezeptur GG1 betrug das Ausbreitmaß vor dem Pumpvorgang 42 cm. Ein Bluten konnte visuell nicht festgestellt werden. Während der Messung wurde der Frischbeton bei geringer Mischintensität im Transportfahrzeug zum Pumpenfahrzeug transportiert. Für das Anpumpen befindet sich anfänglich im Pumpsystem eine Wassermenge von ca. 30 Litern. Aus diesem Grund wurden die ersten 0,3 m<sup>3</sup> des Frischbetons verworfen. Die restliche Menge wurde für 5 Minuten mit einer 24 m Autobetonpumpe im Pumpenkreislauf ständige gefördert (siehe Anlage 12, Abb. 97). Im Anschluss erfolgte die Messung des Ausbreitmaßes, die Herstellung der Probekörper und die Ermittlung der Fasermenge sowie -verteilung mittels Auswaschversuch nach [9].

Durch den Transport- und den Förderprozess konnte ein Verflüssigungseffekt festgestellt werden. Das Ausbreitmaß konnte von 42 cm auf 47,5 cm gesteigert werden. Ein leichtes Bluten in Form von Wasserabsonderungen konnte visuell festgestellt werden. Ein Sedimentieren der Kunststofffasern, der Flugasche oder des Fließmittels wurde visuell nicht festgestellt. Unter Laborbedingungen wurde mit dieser Rezeptur ein sedimentationsfreier Frischbeton (GL10) mit einem Ausbreitmaß von 49,5 cm hergestellt.

Es ist zu vermuten, dass der zusätzliche Energieeintrag in das Frischbetonsystem durch den Transport- und Förderprozess zu einem Aufschließen der sich bildenden ersten Hydratations-Agglomeraten führt (dispersiven Mischen). Gleichzeitig werden deplatzierte Reaktionspartner durch

das distributive Mischen im Frischbetongefüge homogen verteilt und somit gleichzeitig der Wirkungsgrad des Fließmittels gesteigert [17].

Durch die geringe Umgebungstemperatur während des Herstellprozesses betrug die 12 h Druckfestigkeit mit dieser Rezeptur 3,2 N/mm<sup>2</sup>. Es ist davon auszugehen, dass bei entsprechend höheren Umgebungstemperaturen die Reaktionsgeschwindigkeit der Hydratationsvorgänge größer ist und eine Frühfestigkeit von 3,5 N/mm<sup>2</sup> erreicht wird.

### 7.3.2 Offene Bauweise

Die Betonagen für die offene Bauweise erfolgten aufgrund technischer Probleme der Dosiereinrichtung an zwei unterschiedlichen Tagen mit zwei unterschiedlichen Zementen. Zum Einsatz kam am 09.11.2009 der Portlandkompositzement CEM II A-LL 42,5 N für die Betone OG1-OG3 und am 17.11.2009 der Portlandzement CEM I 32,5 R für die Betone OG4-OG5. Die Rezepturen blieben mit Ausnahme der Zementart unverändert.

Mit den Betonen OG1 und OG2 konnte vor dem Pumpvorgang die gewünschte Konsistenz von  $\geq 50,0$  cm erreicht werden. Der Beton OG3 erreichte mit 48,5 cm den Zielwert nicht. Ähnlich wie bei dem Beton der offenen Bauweise hatte der Transport- und Förderprozess einen verflüssigenden Effekt. Das Ausbreitmaß vergrößert sich mit Ausnahme des Betons OG2 um 4 cm bis 6 cm. Alle Betone gaben geringe Mengen an überschüssigen Wasser ab, wobei sich prinzipiell mit steigender Konsistenz der Effekt verstärkte.

Mit der Zugabe von 0,8 M.-% v. Z. Sedimentationsreduzierers verbesserte sich das Zusammenhaltevermögen und reduzierte sich die Konsistenz deutlich. Ein Gehalt von  $\leq 0,5$  M.-% v. Z. sollte zur Steuerung der Frischbetoneigenschaften ausreichen.

Mit den Betonen für die offenen Bauweise (OG1-OG5) wurde der Einfluss des Zeitpunktes der Faserzugabe auf die Frischbetoneigenschaften betrachtet. Die Faserzugabe erfolgte für den Beton OG2 auf das Feuchtgemisch. Für alle anderen Betone wurden die Fasern auf das Trockengemisch dosiert. Der Zeitpunkt der Faserzugabe (Trocken- oder Feuchtgemisch) hatte keinen Einfluss auf die Konsistenz und das Zusammenhaltevermögen des Frischbetons.

Der Fasergehalt sowie die Faserverteilung wurden nach dem Misch-, Transport- und Förderprozess für die Betone OG1 und OG2 bestimmt. Der Einfluss des Förderprozess wurde mit der Messung

des Fasergehaltes vor und nach dem Förderprozess am Beton OG3 betrachtet. Aus dem Vergleich aller drei Messungen lässt sich der Einfluss des Transportprozesses ableiten. Der Zeitpunkt der Faserzugabe während des Mischprozesses (Faserzugabe auf: Trockengemisch-OG1, Feuchtgemisch-OG2) und des Förderprozesses hat keinen deutlichen Einfluss auf den Fasergehalt und die Faserverteilung im Frischbeton. Aus dem Vergleich zwischen OG1-OG2 und OG3 zeigt sich ein deutlicher Einfluss des Transportprozesses durch den Fahrmischer. So war der Fasergehalt nach dem Transportvorgang um 12,5 M.-% (OG1) bzw. 15 M.-% (OG2) höher als davor. Vermutlich wird durch den zusätzlichen Energieeintrag in den Frischbeton eine homogenere Faserverteilung erreicht. Ähnlich wie bei den vorangegangenen Untersuchungen wurde im Mittel ein Verlust des Fasermaterials während des Herstellprozesses festgestellt.

Nach dem Misch-, Transport- und Förderprozess wurde der tatsächliche Wassergehalt im Frischbeton mittels Darren bestimmt. Die Darrmessung ergab ein Wassergehalt von 7,3 M.-%. Dies entspricht bei einer Frischbetonrohddichte von  $2350 \text{ kg/m}^3$  einem Wassergehalt von  $171,5 \text{ kg/m}^3$ . Im Transportbetonwerk wurde für diesen Beton ein Wassergehalt von  $180 \text{ kg/m}^3$  verwendet. Da die Messung ca. 2 Stunden nach dem ersten Wasserkontakt durchgeführt wurde, ist davon auszugehen, dass sich erste Hydratationsprodukte gebildet haben, die während des Darrens nicht dehydriert werden. Zusätzlich können geringe Mengen an Feuchtigkeit dem Frischbeton durch Verdunstungs- und Anfeuchteffekte im Transportbetonfahrmischer entzogen werden.

Ungeachtet des höheren Bindemittelgehaltes und des geringeren w/b-Wertes wurde bei den Betonen der geschlossenen Bauweise geringere 12 h Frühfestigkeiten gemessen. Ein entscheidender Grund hierfür ist der im Vergleich zur offenen Bauweise erhöhte Fließmittelgehalt. So können PCE-Fließmitteln die Zementhydratation und die Reaktion der reaktiven Betonzusatzstoffe deutlich verzögern [18], [19]. Dieser Effekt konnte mit den Betonen OL2 und OL7 im Labormaßstab ebenfalls gemessen werden. Die verzögernde Wirkungsweise hat prinzipiell keinen Einfluss auf die 28. Tage Festigkeit.

## 7.4 Zusammenfassung

Die Laborversuche haben gezeigt, dass die Herstellung von Betonen mit einer Frischbetonkonsistenz zwischen 500 mm und 550 mm Ausbreitmaß

bei Druckfestigkeiten von ca.  $3,0 \text{ N/mm}^2$  nach 12 Stunden mit einer optimierten Rezeptur möglich ist. Es wurde aber auch deutlich, dass solche Betone mit dieser hohen Fließfähigkeit sensibel - gegenüber z.B. Veränderungen in der Zusammensetzung - reagieren.

Mit den Zementen „Schwenk CEM I 42,5 R-HS“ und „Schwenk CEM II A/LL 32,5 R“, der Flugasche „Safament HKV W III“ und dem Fließmittel „Sika VicoCrete SL“ konnten die sedimentationsstabilsten sowie fließfähigsten Betone hergestellt werden.

Mit den Großmisch- und Pumpversuche konnte der Einfluss des Misch-, Transport- und Förderprozesses dargestellt werden. So stellt sich durch den Transport- und Förderprozess eine Nachverflüssigung ein. Entgegen vorangegangener Ergebnisse zeigt sich, dass der Zeitpunkt der Faserzugabe nur bedingt Einfluss auf die erzielten Frischbetonkonsistenzen hatte. Die Faserauswaschversuche zeigen eine Reduktion des Fasergehaltes zwischen min. 5,5 M.-% und max. 20 M.-% während des Herstellungsprozesses. Zur Senkung des Verlustes an PP-Fasern wird die Verwendung einer maschinellen Dosiereinrichtung im Mischwerk empfohlen. Um eine homogene Faserverteilung zu gewährleisten, sollte der Frischbeton mit einer ausreichend langen Nassmischphase in der Mischanlage bzw. im Transportfahrzeug gemischt werden. Im Rahmen der Qualitätssicherung sind sowohl die Nachweise für die geforderte Frischbetonkonsistenz als auch für die homogene Faserverteilung und den Fasergehalt zu erbringen.

Die mit den baupraktischen Umgebungsbedingungen einhergehenden geringeren Außentemperaturen führten bei allen Betonen zu geringeren 12 Stunden Druckfestigkeiten (im Bereich zwischen  $1,9 \text{ N/mm}^2$  und  $3,2 \text{ N/mm}^2$ ). Die Mindestdruckfestigkeitsklasse C30/37 für die maßgebende Expositionsklasse XF2 nach ZTV-ING wurde mit allen Betonen im Labor- und Großmaßstab deutlich erreicht.

## 8 Zusammenfassung

Mit dem bearbeiteten Forschungsprojekt zum „Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln“ sollte der Einfluss von Kunststofffasern auf das Brand- und Abplatzverhalten von Tunnelbetonen unter der besonderen Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen in Straßentunneln verifiziert und validiert werden. Dabei wurde untersucht, inwieweit sich mit Kunststofffasern modifizierte Tunnelbetone, die entsprechend ihrer Betonzusammensetzung nach den gültigen Vorgaben der ZTV-ING zusammengesetzt wurden, für den Straßentunnelbau als bauliche Brandschutzmaßnahme eignen.

Zunächst wurden in einem ersten Bearbeitungsschritt ZTV-ING-konforme Tunnelbetonrezepturen, getrennt nach der geschlossenen und der offenen Bauweise, unter der Zugabe von verschiedenen Kunststofffasermengen hergestellt und in verifizierenden Tunnelbrandversuchen das Verhalten an kleimaßstäblichen Probekörper bei der fünfseitigen Brandbeanspruchung untersucht.

Den Schwerpunkt der Arbeit stellten jedoch belastete und unbelastete Tunnelbrandversuche an großmaßstäblichen Probekörpern dar. Insgesamt wurden zur Bestimmung des Einflusses der Kunststofffasern auf das Brand- und Abplatzverhalten ZTV-ING-konformer Tunnelbetone sechs großmaßstäbliche Probekörper mit unterschiedlichen geometrischen Abmessungen und Betonzusammensetzungen hergestellt und geprüft.

Im Einzelnen wurden an vier Probekörpern für die geschlossene Bauweise jeweils ein Probekörper mit Referenzbeton und ein Probekörper mit einem fasermodifizierten Tunnelbeton einer unbelasteten und einer belasteten Bauteilprüfung unter der einseitigen Brandbeanspruchung durch die ZTV-ING-Kurve unterzogen. Bei den Probekörpern der offenen Bauweise wurden an zwei Probekörpern (Referenzbeton und Faserbeton mit jeweils  $2,0 \text{ kg/m}^3$  PP-Fasern) belastete Prüfungen, ebenfalls unter der einseitigen Brandbeanspruchung durch die ZTV-ING-Kurve, durchgeführt.

Die Ergebnisse der verschiedenen Herstellungsvarianten hinsichtlich der Faserzugabe (Zugabe zum Trocken- oder Feuchtmisch der Betonausgangsstoffe) haben gezeigt, dass die Zugabe der Fasern zum Trockengemisch hinsichtlich der angestrebten homogenen Faserverteilung und der ermittelten Fasermenge im Frischbeton zu günstigeren Ergebnissen bezüglich der Frischbeton- und der Brandprüfungen geführt haben. Es wird daher empfohlen, dass die Zugabe der Kunststofffasern möglichst zum Trockengemisch erfolgen sollte, so-

fern in den Herstellwerken die dazu entsprechenden Dosiereinrichtungen vorhanden sind. Es wird weiterhin empfohlen, dass bei der Anwendung von kunststofffasermodifizierten Tunnelbetonen zunächst anhand von großvolumigen Eignungsmischungen, das jeweils erforderliche Mischregime in Verbindung mit ggf. erforderlichen Nachmischzeiten nach der PP-Faserzugabe ermittelt wird. Im Rahmen der Qualitätssicherung sind damit sowohl die Nachweise für die geforderte Frischbetonkonsistenz als auch für die homogene Faserverteilung und den Fasergehalt zu erbringen.

Die Brandversuche an den großmaßstäblichen Probekörpern haben in beiden Versuchsserien, d. h. für die geschlossene und offene Bauweise, gezeigt, dass die Zugabe von  $2,0 \text{ kg/m}^3$  PP-Fasern eine deutliche Verbesserung des Brand- und Abplatzverhalten von Betonen im Straßentunnelbau bewirken. Die brandschutztechnische Wirksamkeit der PP-Fasern mit den verwendeten geometrischen Abmessungen von  $2,8 \text{ dtex} / 6 \text{ mm}$  Länge konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen für die brandbeanspruchten Betonrezepturen eindeutig bestätigt werden.

Es konnte anhand der verwendeten Tunnelbetonrezepturen der Nachweis erbracht werden, dass nur mit der zusätzlichen Zugabe der kunststofffasern ein ausreichend wirksamer Schutz für die tragende Bewehrung existiert und die gemäß ZTV-ING geforderte Unterschreitung des sogenannten  $300^\circ\text{C}$  Kriteriums annähernd bzw. planmäßig eingehalten werden kann.

Die experimentellen Untersuchungen an den skalierten, Rahmenecken ohne Fasern haben des Weiteren ergeben, dass die gemäß ZTV-ING, Teil 5, 10.3.2, (2), in den Deckenbereichen einzubauende konstruktive Mattenbewehrung (N94) das Abplatzen infolge der einseitigen Brandbeanspruchung nicht hinreichend verhindern konnte.

Die ergänzend durchgeführte betontechnologische Machbarkeitsstudie hat gezeigt, dass die Herstellung von Betonen mit einer Frischbetonkonsistenz zwischen  $500 \text{ mm}$  und  $550 \text{ mm}$  Ausbreitmaß bei Druckfestigkeiten von ca.  $3,0 \text{ N/mm}^2$  nach 12 Stunden mit einer optimierten Rezeptur möglich ist. Es wurde aber auch deutlich, dass solche Betone mit dieser hohen Fließfähigkeit sensibel - gegenüber z.B. Veränderungen in den Ausgangsstoffen - reagieren.

## 9 Literatur

- [1] Dehn, F.; Hauswaldt, S.; Juknat, M.: Grundsätzliche Überlegungen zur Brandprüfung von Tunnelbauteilen; in: Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), Heft 12, Seiten 869-875; Ernst und Sohn Verlag; Berlin, 2009.
- [2] Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S1056: ZTV-ING, Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 1, geschlossene Bauweise, Stand 12/2007.
- [3] Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S1056: ZTV-ING, Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 2, offene Bauweise, Stand 12/2007.
- [4] Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S1056: ZTV-ING, Teil 3 Massivbau, Abschnitt 1, Beton, Stand 07/2006.
- [5] DIN EN 197-1:2004: Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung EN 197-1:2000 + A1:2004
- [6] Bundesverband für Kraftwerksnebenprodukte: BKV-Merkblatt – Tunnelbauwerke, Ausgabe 2004
- [7] DIN Fachbericht 100: Beton - Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- [8] DIN EN 450-1: Flugasche für Beton - Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung EN 450-1:2005+A1:2007
- [9] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB): Richtlinie „Erhöhter Brandschutz mit Beton mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“; Ausgabe Juli 2005.
- [10] DIN EN 196-1: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Ausgabe: Mai 2005
- [11] DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Ausgabe: August 2008
- [12] DIN EN 12350-5: Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß, Juni 2000
- [13] DIN EN 12390-2 Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für die Festigkeitsprüfungen, Ausgabe: Dezember 2000
- [14] DIN EN 12390-4 Prüfung von Festbeton - Teil 4: Bestimmung der Druckfestigkeit, Anforderungen an Prüfmaschinen, Ausgabe: August 2009
- [15] DIN EN 12390-7 Prüfung von Festbeton - Teil : Dichte von Festbeton, Ausgabe: Juli 2009
- [16] DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton, Teil 2, Anhang P.2, Ausgabe: November 2003
- [17] Dehn, F., Orgass, M., König, A.: Influence of different mixing parameters on fresh properties of Ultra High Strength Hybrid Fibre Concrete (HFC). In: BetonWerk International (BW*i*), ad-media Verlag, Köln, Mai 2007
- [18] König, A.: Wechselwirkung zwischen polymeren Fließmitteln und komplexen Bindemittelsystemen, unveröffentlicht
- [19] Rößler, C.: Hydratation, Fließfähigkeit und Festigkeitsentwicklung von Portlandzement – Einfluss von Fließmitteln, Alkalisulfaten und des Abbindereglers, Dissertation 2006, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Weimar

## 10 Anlagenverzeichnis

- Anlage 1 Mischungsberechnungen für die großmaßstäblichen Probekörper
- Anlage 2 Statische Bemessung der Probekörper für die geschlossene Bauweise
- Anlage 3 Schal- und Bewehrungspläne der Probekörper für die geschlossene Bauweise
- Anlage 4 Statische Bemessung der Probekörper für die offene Bauweise
- Anlage 5 Schal- und Bewehrungspläne der Probekörper für die offene Bauweise
- Anlage 6 Fotodokumentation der großmaßstäblichen Brandversuche an den Probekörpern für die geschlossene Bauweise
- Anlage 7 Aufgenommene Verformungen der Brandversuche an den Probekörpern der geschlossenen Bauweise
- Anlage 8 Fotodokumentation der großmaßstäblichen Brandversuche an den Probekörpern für die geschlossene Bauweise
- Anlage 9 Aufgenommene Verformungen der Brandversuche an den Probekörpern der offenen Bauweise
- Anlage 10 Betontechnologischen Machbarkeitsstudie: Laborversuche-Bindemittel
- Anlage 11 Betontechnologischen Machbarkeitsstudie: Laborversuche-Beton
- Anlage 12 Betontechnologischen Machbarkeitsstudie: Großmisch- und Pumpversuche

## **Anlage 1**

Mischungsberechnungen für die großmaßstäblichen Probekörper

## Mischungsberechnung für die geschlossene Bauweise - Referenzbeton

**MISCHUNGSBERECHNUNG**

ABRUFNUMMER	224	Betongüte	C30/37	Exp.klasse	XF2
SORTENUMMER	224	XC4 ; XF2 ; XA1			
max W/Z	0,50	min Z	320 kg/m <sup>3</sup>	Konsistenz	F4
FESTIGKEITSENTWICKLUNG	m	Mittel		ÜBERWACHUNG S KLASSE	2
Besondere Eigenschaften	Lager-/Verkehrsflächen ohne Taumittel				
max Mehlkorn	bis C 50/60: Z<=300 -> 400 Bei Z>=350 -> 450 dann Tab.F4.2				Druckfestigkeit f <sub>w</sub> 56 TAGE
Zement	CEM I 32,5 R	HD	310 kg/m <sup>3</sup>		
Zement	0	0	0 kg/m <sup>3</sup>		
Zusatzstoff	SFA		80 kg/m <sup>3</sup>		
Zusatzstoff	0		0 kg/m <sup>3</sup>		
Wasser	170 kg/m <sup>3</sup>	w/z-Wert: 0,55	w/(z+0,4*f): 0,50		
Luftporen	1,6 %				
Zusatzmittel	FM 503	BASF	Zugabe	0,20 %	
Zusatzmittel	0	0	Zugabe	0,00 %	
Zusatzmittel	0	0	Zugabe	0,00 %	
Besonderes					

**BERECHNUNG**

Stoffraum	Mehlkorn - Feinstsand				Mörtelgehalt	
	G < 0,125 mm		G < 0,25 mm			
Zement	100 dm <sup>3</sup>				Zement	100 dm <sup>3</sup>
Wasser	170 dm <sup>3</sup>				Wasser	170 dm <sup>3</sup>
Luftporen	16 dm <sup>3</sup>	G = 14 kg	G = 63 kg		Luftporen	16 dm <sup>3</sup>
Zusatzstoff	34 dm <sup>3</sup>	Z = 310 kg	Z = 310 kg		Zusatz	34 dm <sup>3</sup>
Summe	320 dm <sup>3</sup>	F = 80 kg	F = 80 kg		Körnung	277 dm <sup>3</sup>
Volumen G	680 dm <sup>3</sup>	Summe 404 kg	Summe 453 kg		Summe	597 dm <sup>3</sup>

**ZUSAMMENSETZUNG FÜR 1m<sup>3</sup> VERDICHETEN FRISCHBETON**

Korngruppe	Stoffraum		Rohdichte	Körnung trocken	Eigenfeuchte		Körnung feucht	Labor Mischung
	%	dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg	%	kg	kg	60,00 dm <sup>3</sup>
Sand 0-2	40	272	2,60	707	5	35	742	42,41 kg
KALKSTEINSPPLITT 2-8	20	136	2,70	367	3	11	378	22,02 kg
KALKSTEINSPPLITT8-16	40	272	2,70	734	1	7	741	44,04 kg
Kies 16-32	0	0	2,62	0	1	0	0	0,00 kg
Summe	100	680	-	1808	-	54	1862	108,47 kg
Zugabewasser						116	116	
Wassergehalt				170	-			10,20 kg
Zementgehalt				310			310	18,60 kg
Zusatzstoff				80			80	4,80 kg
Frischbetongewicht				2368 kg/m <sup>3</sup>			2368 kg/m <sup>3</sup>	142 kg/m <sup>3</sup>
Zusatzmittelgehalt	FM 503			0,62 kg			0,62 kg	0,04 kg
Zusatzmittelgehalt	0			0,00 kg			0,00 kg	0,00 kg
Zusatzmittelgehalt	0			0,00 kg			0,00 kg	0,00 kg

Frankfurt, den

01.07.09

Prüfstellenleiter: \_\_\_\_\_

Mischungsberechnung für die geschlossene Bauweise mit  $2,0 \text{ kg/m}^3$  PP-Fasern

### MISCHUNGSBERECHNUNG

ABRUFNUMMER	222	Betongüte	C30/37	Exp.klasse	XF2
SORTENUMMER	222			XF1;XA1	
max W/Z	0,50	min Z	320 kg/m <sup>3</sup>	Konsistenz	F4
FESTIGKEITSENTWICKLUNG	m	Mittel		ÜBERWACHUNG S KLASSE	2
Besondere Eigenschaften bewehrte und bewitterte Außenbauteile, bei Frost-und chemisch schwachem Angriff					
max Mehlkorn	bis C 50/60: Z<=300 -> 400 Bei Z>=350 -> 450 dann Tab.F4.2			DRUCKFESTIGKEIT f <sub>w</sub> 56 TAGE	
Zement	CEM I 32,5 R	HD LEIMEN	310 kg/m <sup>3</sup>		
Zement	0	0	0 kg/m <sup>3</sup>		
Zusatzstoff	SFA		80 kg/m <sup>3</sup>		
Zusatzstoff	PP FASERN		2 kg/m <sup>3</sup>		
Wasser	170 kg/m <sup>3</sup>	w/z-Wert: 0,55	w/(z+0,4*f): 0,50		
Luftporen	1,6 %				
Zusatzmittel	FM 503	BASF	Zugabe	0,50 %	
Zusatzmittel	0	0	Zugabe	0,00 %	
Zusatzmittel	0	0	Zugabe	0,00 %	
Besonderes					

### BERECHNUNG

Stoffraum		Mehlkorn - Feinstsand		Mörtelgehalt	
Zement	100 dm <sup>3</sup>	G < 0,125 mm		Zement	100 dm <sup>3</sup>
Wasser	170 dm <sup>3</sup>	G < 0,25 mm		Wasser	170 dm <sup>3</sup>
Luftporen	16 dm <sup>3</sup>	G = 6 kg	G = 114 kg	Luftporen	16 dm <sup>3</sup>
Zusatzstoff	36 dm <sup>3</sup>	Z = 310 kg	Z = 310 kg	Zusatz	36 dm <sup>3</sup>
Summe	322 dm <sup>3</sup>	F = 80 kg	F = 80 kg	Körnung	261 dm <sup>3</sup>
Volumen G	678 dm <sup>3</sup>	Summe	396 kg	Summe	583 dm <sup>3</sup>

### ZUSAMMENSETZUNG FÜR 1m<sup>3</sup> VERDICHETEN FRISCHBETON

Korngruppe	Stoffraum		Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Körnung trocken kg	Eigenfeuchte		Körnung feucht kg	Labor Mischung 60,00 dm <sup>3</sup>
	%	dm <sup>3</sup>			%	kg		
Sand 0-2	40	271	2,60	705	5	35	740	42,29 kg
KALKSTEINSPPLIT 2-8	20	136	2,70	366	3	11	377	21,96 kg
KALKSTEINSPPLIT 8-16	40	271	2,70	732	1	7	739	43,91 kg
Kies 16-32	0	0	2,62	0	1	0	0	0,00 kg
Summe	100	678	-	1803	-	54	1856	108,16 kg
Zugabewasser						116	116	
Wassergehalt				170	-			10,20 kg
Zementgehalt				310			310	18,60 kg
Zusatzstoff				80			80	4,80 kg
Frischbetongewicht				2363 kg/m <sup>3</sup>			2363 kg/m <sup>3</sup>	142 kg/m <sup>3</sup>
Zusatzmittelgehalt		FM 503		1,55 kg			1,55 kg	0,09 kg
Zusatzmittelgehalt		0		0,00 kg			0,00 kg	0,00 kg
Zusatzmittelgehalt		0		0,00 kg			0,00 kg	0,00 kg

Frankfurt, den

01.07.09

Prüfstellenleiter: \_\_\_\_\_

## Mischungsberechnung für die offene Bauweise - Referenzbeton

**MISCHUNGSBERECHNUNG**

ABRUFNUMMER	225	Betongüte	C30/37	Exp.klasse	XF2
SORTENUMMER	225				XF1;XA1
max W/Z	0,50	min Z	320 kg/m <sup>3</sup>	Konsistenz	F4
FESTIGKEITSENTWICKLUNG	m	Mittel		ÜBERWACHUNG S KLASSE	2
Besondere Eigenschaften bewehrte und bewitterte Außenbauteile, bei Frost-und chemisch schwachem Angriff					
max Mehlkorn	bis C 50/60: Z<=300 -> 400 Bei Z>=350 -> 450 dann Tab.F4.2			DRUCKFESTIGKEIT f <sub>w</sub> 56 TAGE	
Zement	CEM I 32,5 R	HD LEIMEN	340 kg/m <sup>3</sup>		
Zement	0	0	0 kg/m <sup>3</sup>		
Zusatzstoff	SFA		80 kg/m <sup>3</sup>		
Zusatzstoff	0		0 kg/m <sup>3</sup>		
Wasser	170 kg/m <sup>3</sup>	w/z-Wert: 0,50	w/(z+0,4*f): 0,46		
Luftporen	1,6 %				
Zusatzmittel	FM 503	BASF	Zugabe	0,40 %	
Zusatzmittel	0	0	Zugabe	0,00 %	
Zusatzmittel	0	0	Zugabe	0,00 %	
Besonderes					

**BERECHNUNG**

Stoffraum		Mehlkorn - Feinstsand		Mörtelgehalt	
		G < 0,125 mm	G < 0,25 mm	Zement	
Zement	110 dm <sup>3</sup>			Zement	110 dm <sup>3</sup>
Wasser	170 dm <sup>3</sup>			Wasser	170 dm <sup>3</sup>
Luftporen	16 dm <sup>3</sup>			Luftporen	16 dm <sup>3</sup>
Zusatzstoff	34 dm <sup>3</sup>			Zusatz	34 dm <sup>3</sup>
Summe	330 dm <sup>3</sup>			Körnung	273 dm <sup>3</sup>
Volumen G	670 dm <sup>3</sup>			Summe	603 dm <sup>3</sup>
		G = 14 kg	G = 62 kg		
		Z = 340 kg	Z = 340 kg		
		F = 80 kg	F = 80 kg		
		Summe 434 kg	Summe 482 kg		

**ZUSAMMENSETZUNG FÜR 1m<sup>3</sup> VERDICHETEN FRISCHBETON**

Korngruppe	Stoffraum		Rohdichte	Körnung trocken	Eigenfeuchte		Körnung feucht	Labor Mischung
	%	dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg	%	kg	kg	60,00 dm <sup>3</sup>
Sand 0-2	40	268	2,60	697	5	35	732	41,81 kg
KALKSTEINSPLITT 2-8	20	134	2,70	362	3	11	373	21,71 kg
KALKSTEINSPLITT 8-16	40	268	2,70	724	1	7	731	43,42 kg
Kies 16-32	0	0	2,62	0	1	0	0	0,00 kg
Summe	100	670	-	1782	-	53	1835	106,93 kg
Zugabewasser						117	117	
Wassergehalt				170	-			10,20 kg
Zementgehalt				340			340	20,40 kg
Zusatzstoff				80			80	4,80 kg
Frischbetongewicht				2372 kg/m <sup>3</sup>			2372 kg/m <sup>3</sup>	142 kg/m <sup>3</sup>
Zusatzmittelgehalt		FM 503		1,36 kg			1,36 kg	0,08 kg
Zusatzmittelgehalt		0		0,00 kg			0,00 kg	0,00 kg
Zusatzmittelgehalt		0		0,00 kg			0,00 kg	0,00 kg

Frankfurt, den

01.07.09

Prüfstellenleiter: \_\_\_\_\_

Mischungsberechnung für die offene Bauweise mit 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP-Fasern

### MISCHUNGSBERECHNUNG

ABRUFNUMMER	223	Betongüte	C30/37	Exp.klasse	XF2
SORTENUMMER	223				XF1;XA1
max W/Z	0,50	min Z	320 kg/m <sup>3</sup>	Konsistenz	F4
FESTIGKEITSENTWICKLUNG	m	Mittel		ÜBERWACHUNG S KLASSE	2
Besondere Eigenschaften bewehrte und bewitterte Außenbauteile, bei Frost- und chemisch schwachem Angriff					
max Mehlkorn	bis C 50/60: Z<=300 -> 400 Bei Z>=350 -> 450 dann Tab.F4.2			DRUCKFESTIGKEIT f <sub>w</sub> 56 TAGE	
Zement	CEM I 32,5 R	HD LEIMEN	340 kg/m <sup>3</sup>		
Zement	0	0	0 kg/m <sup>3</sup>		
Zusatzstoff	SFA		80 kg/m <sup>3</sup>		
Zusatzstoff	PP FASERN		2 kg/m <sup>3</sup>		
Wasser	170 kg/m <sup>3</sup>	w/z-Wert: 0,50	w/(z+0,4*f): 0,46		
Luftporen	1,6 %				
Zusatzmittel	FM 503	BASF	Zugabe	0,80 %	
Zusatzmittel	0	0	Zugabe	0,00 %	
Zusatzmittel	0	0	Zugabe	0,00 %	
Besonderes					

### BERECHNUNG

Stoffraum		Mehlkorn - Feinstsand		Mörtelgehalt	
Zement	110 dm <sup>3</sup>	G < 0,125 mm	G < 0,25 mm	Zement	110 dm <sup>3</sup>
Wasser	170 dm <sup>3</sup>			Wasser	170 dm <sup>3</sup>
Luftporen	16 dm <sup>3</sup>	G = 6 kg	G = 112 kg	Luftporen	16 dm <sup>3</sup>
Zusatzstoff	36 dm <sup>3</sup>	Z = 340 kg	Z = 340 kg	Zusatz	36 dm <sup>3</sup>
Summe	332 dm <sup>3</sup>	F = 80 kg	F = 80 kg	Körnung	257 dm <sup>3</sup>
Volumen G	668 dm <sup>3</sup>	Summe	426 kg	Summe	589 dm <sup>3</sup>
			Summe	532 kg	

### ZUSAMMENSETZUNG FÜR 1m<sup>3</sup> VERDICHETEN FRISCHBETON

Korngruppe	Stoffraum		Rohdichte	Körnung trocken	Eigenfeuchte		Körnung feucht	Labor Mischung
	%	dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg	%	kg	kg	60,00 dm <sup>3</sup>
Sand 0-2	40	267	2,60	695	5	35	729	41,68 kg
KALKSTEINSPPLIT 2-8	20	134	2,70	361	3	11	372	21,64 kg
KALKSTEINSPPLIT 8-16	40	267	2,70	721	1	7	729	43,29 kg
Kies 16-32	0	0	2,62	0	1	0	0	0,00 kg
Summe	100	668	-	1777	-	53	1830	106,61 kg
Zugabewasser						117	117	
Wassergehalt				170	-			10,20 kg
Zementgehalt				340			340	20,40 kg
Zusatzstoff				80			80	4,80 kg
Frischbetongewicht				2367 kg/m <sup>3</sup>			2367 kg/m <sup>3</sup>	142 kg/m <sup>3</sup>
Zusatzmittelgehalt		FM 503		2,72 kg			2,72 kg	0,16 kg
Zusatzmittelgehalt		0		0,00 kg			0,00 kg	0,00 kg
Zusatzmittelgehalt		0		0,00 kg			0,00 kg	0,00 kg

Frankfurt, den

01.07.09

Prüfstellenleiter: \_\_\_\_\_



**Anlage 2**  
**Statische Bemessung der Probekörper für die geschlossene Bauweise**

VERFASGER : MFPA PROGRAMM : WINGRAF VERSION 14.66-23 (c) SOFISTIK AG		
BAUWERK : Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton	ASB NR. :	DATUM : 31.08.2008
<p><b>System:</b></p> <p>Alle Lasten, Schnittgrößen und die Bewehrungsangaben beziehen sich auf die Breite des Versuchskörpers.</p> <p>Systemausschnitt Stäbe Struktur</p> <p>M 1 : 22</p>		
<p><b>Eigengewicht:</b></p> <p>Systemausschnitt Stäbe Alle Lasten, Lastfall 1 G1 FT , (1 cm im Raum = Unit) Stabeigengewicht in global Z (Unit=56.7 kN/m  (Max=15.8))</p> <p>M 1 : 22</p>		
<p><b>Versuchsbelastung:</b></p> <p>Systemausschnitt Stäbe Alle Lasten, Lastfall 2 Belastung , (1 cm im Raum = Unit) Knotenlast (Kraft) Vektor (Unit=3922. kN  (Max=3600.))</p> <p>M 1 : 25</p>		
BAUTEIL : BLOCK : VORGANG :	ARCHIV NR	

VERFASSER : MPPA PROGRAMM : WINGRAF VERSION 14.66-23 (c) SOFISTIK AG																				
BAUWERK : Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton ASB NR. :		DATUM : 31.08.2008																		
<p><b>N:</b> Eigengewicht</p> <table border="1"> <caption>Normal Force (N) Data</caption> <thead> <tr> <th>Position (m)</th> <th>Normal Force (kN)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0</td><td>-1.42</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>-6.00</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>-4.93</td></tr> <tr><td>1.5</td><td>-3.11</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>-1.80</td></tr> <tr><td>2.5</td><td>-0.857</td></tr> <tr><td>3.0</td><td>-0.0858</td></tr> <tr><td>3.5</td><td>-7.42</td></tr> </tbody> </table>			Position (m)	Normal Force (kN)	0.0	-1.42	0.5	-6.00	1.0	-4.93	1.5	-3.11	2.0	-1.80	2.5	-0.857	3.0	-0.0858	3.5	-7.42
Position (m)	Normal Force (kN)																			
0.0	-1.42																			
0.5	-6.00																			
1.0	-4.93																			
1.5	-3.11																			
2.0	-1.80																			
2.5	-0.857																			
3.0	-0.0858																			
3.5	-7.42																			
Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Normalkraft Nx, Lastfall 1 Gl FT , 1 cm im Raum = 9.80 kN (Min=-7.42) (Max= 5.1174e-09)		M 1 : 23																		
<p><b>My:</b></p> <table border="1"> <caption>Bending Moment (My) Data</caption> <thead> <tr> <th>Position (m)</th> <th>Bending Moment (kNm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0</td><td>3.42</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>9.80</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>15.0</td></tr> <tr><td>1.5</td><td>18.6</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>21.2</td></tr> <tr><td>2.5</td><td>22.8</td></tr> <tr><td>3.0</td><td>23.3</td></tr> <tr><td>3.5</td><td>3.42</td></tr> </tbody> </table>			Position (m)	Bending Moment (kNm)	0.0	3.42	0.5	9.80	1.0	15.0	1.5	18.6	2.0	21.2	2.5	22.8	3.0	23.3	3.5	3.42
Position (m)	Bending Moment (kNm)																			
0.0	3.42																			
0.5	9.80																			
1.0	15.0																			
1.5	18.6																			
2.0	21.2																			
2.5	22.8																			
3.0	23.3																			
3.5	3.42																			
Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Biegemoment My, Lastfall 1 Gl FT , 1 cm im Raum = 39.2 kNm (Min=-7.5332e-10) (Max=23.3)		M 1 : 22																		
<p><b>Vz:</b></p> <table border="1"> <caption>Shear Force (Vz) Data</caption> <thead> <tr> <th>Position (m)</th> <th>Shear Force (kN)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0</td><td>26.3</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>24.5</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>20.3</td></tr> <tr><td>1.5</td><td>16.0</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>12.1</td></tr> <tr><td>2.5</td><td>8.09</td></tr> <tr><td>3.0</td><td>4.05</td></tr> <tr><td>3.5</td><td>-26.3</td></tr> </tbody> </table>			Position (m)	Shear Force (kN)	0.0	26.3	0.5	24.5	1.0	20.3	1.5	16.0	2.0	12.1	2.5	8.09	3.0	4.05	3.5	-26.3
Position (m)	Shear Force (kN)																			
0.0	26.3																			
0.5	24.5																			
1.0	20.3																			
1.5	16.0																			
2.0	12.1																			
2.5	8.09																			
3.0	4.05																			
3.5	-26.3																			
Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Querkraft Vz, Lastfall 1 Gl FT , 1 cm im Raum = 39.2 kN (Min=-26.3) (Max=26.3)		M 1 : 22																		
BAUTEIL : BLOCK : VORGANG :		ARCHIV NR																		

VERFASSEN : MFPA PROGRAMM : WINGRAF VERSION 14.06-23 (c) SOFISTIK AG		
BAUWERK : Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton	ASB NR. :	DATUM : 31.08.2008
<p>N:</p> <p style="text-align: center;">Versuchsbelastung</p>		
Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Normalkraft Nx, Lastfall 2 Belastung , 1 cm im Raum = 3922. kN (Min=-3723.) (Max=-3561.)		M 1 : 23
<p>My:</p>		
Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Biegemoment My, Lastfall 2 Belastung , 1 cm im Raum = 392.2 kNm (Min=-233.4) (Max=79.8)		M 1 : 22
<p>Vz:</p>		
Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Querkraft Vz, Lastfall 2 Belastung , 1 cm im Raum = 980.5 kN (Min=-531.7) (Max=531.7)		M 1 : 22
BAUTEIL : BLOCK : VORGANG :	ARCHIV NR	

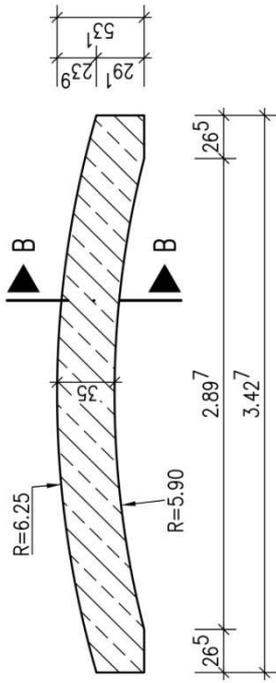
VERFASSER : MFPA PROGRAMM : WINGRAF VERSION 14.66-23 (c) SOFISTIK AG		
BAUWERK : Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton	ASE NR. :	DATUM : 31.08.2008
<p>außen:</p> <p style="text-align: center;">gewählt: Ø 10-15</p>		
Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Längsbewehrung Rang 1, Bemessungsfall 101 , 1 cm im Raum = 9.80 cm <sup>2</sup> (Max=8.85)		M 1 : 22
<p>innen:</p> <p style="text-align: center;">gewählt: Ø 10-15</p>		
Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Längsbewehrung Rang 2, Bemessungsfall 101 , 1 cm im Raum = 9.80 cm <sup>2</sup> (Max=8.85)		M 1 : 22
<p style="text-align: center;">keine Schubbewehrung erforderlich</p>		
Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Bügelbewehrung Rang 8 : KEINE Werte gefunden		M 1 : 22
BAUTEIL : BLOCK : VORGANG :	ARCHIV NR	



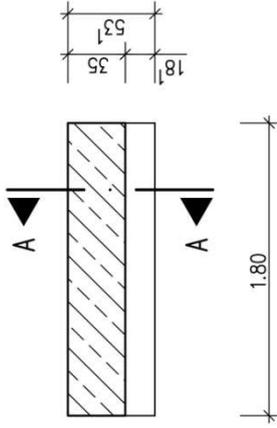
### **Anlage 3**

**Schal- und Bewehrungsplan der Prüfkörper für die geschlossene Bauweise**

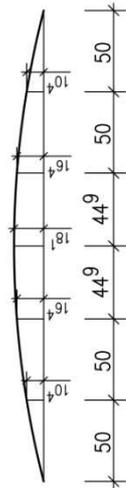
**Schnitt A-A**



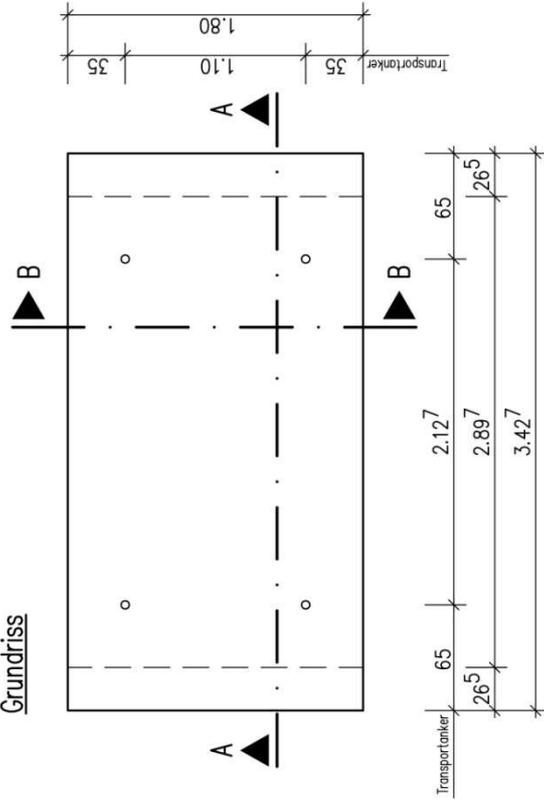
**Schnitt B-B**



**Unterseite:**



**Grundriss**



**MATERIAL:**  
Beton C30/37 Expositionsklasse: XF2 / XD2

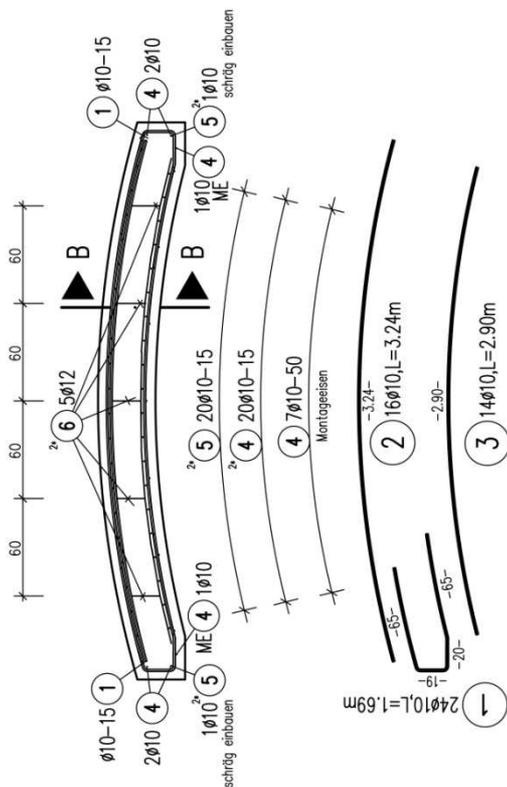
**Transportanker:**  
4 Stk. Pfeiler Wellenanker – kurze Form Rd30 (4to)  
Schrägzugbewehrung gemäß Herstellerangaben einbauen!  
Maximaler Schrägzugwinkel von 30° ist einzuhalten!  
Transport nur mit 4-strängigen Gefährde mit Ausgleichswippe !

Alle Körperkanten sind mit Dreikantkantenleisten  
1.5 x 1.5 cm zu brechen.

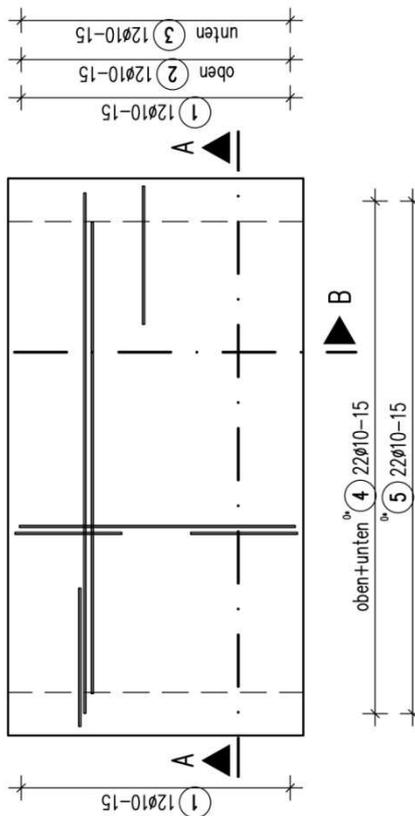
Prozesshaft	Schalplan	Ausführungsplanung	M 1:25
Bauzeit	Großmaßstäblicher Prüfkörper geschlossene Bauweise – Ausschnitt R0 10,5T Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln	geprüft:	Projekt Nr.
Verfahren		d	Zielung Nr. 301 e
		c	Bearbeiter
		b	Jahr
		a	Datum 07.07.2008
		geprüft	Abkürz
		Name	

**MFPA Leipzig**  
Gesellschaft für Materialforschung und  
Prüfungsinstitut für das Bauwesen Leipzig mbH

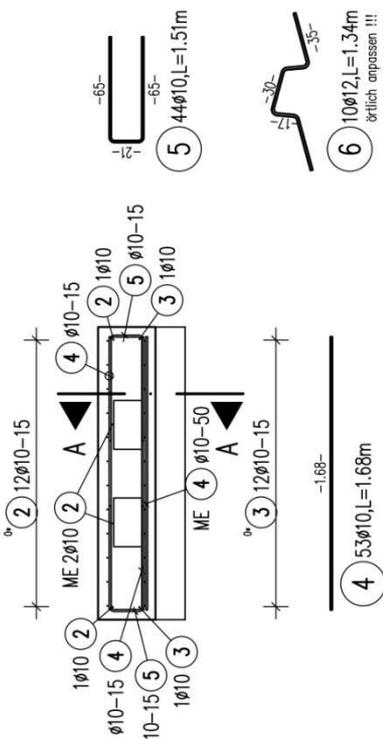
**Schnitt A-A**



**Grundriss**



**Schnitt B-B**



Schräglagereibewehrung Transportanker.  
Einbau gemäß Herstellerangaben!

**BETONDECKUNG** norm. G:  
innen/unten 6 cm  
außen/oben 5 cm

**MATERIAL:**  
Betonstahl BST 500S  
Prüfkörper mit Referenzbeton:  
Beton C30/37 Expositionsklasse: XF2 / XD2  
Prüfkörper mit Faserbeton:  
Faserbeton C30/37 Expositionsklasse: XF2 / XD2

Formblatt	Bewehrungsplan	Ausführungsplanung	M 1:25
Beschriftung	Großmaßstäblicher Prüfkörper geschlossene Bauweise – Ausschnitt RA 10,5T	geprüft:	Projekt Nr.
Verfahren	Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln		Zeichnung Nr. BBl a
		d	Bezeichnet
		c	Maßstab
		b	Datum
		a	06.08.2008
			gezeichnet
			Name

**MFPA Leipzig**  
Gesellschaft für Materialforschung und  
Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH



**Anlage 4**  
**Statische Bemessung der Probekörper für die offene Bauweise**

VERFASSEN : MFEA PROGRAMM : WINGRAF VERSION 14.66-23 (c) SOFISTIK AG		
BAUWERK : Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton	ASE NR. :	DATUM : 31.08.2000
System:		
Alle Lasten, Schnittgrößen und die Bewehrungsangaben beziehen sich auf die Breite des Versuchskörpers.		
-0,50    0,00    0,50    1,00    1,50    2,00    2,50    m		
$\bar{x}$ Systemausschnitt Stäbe z Struktur		M 1 : 25
Eigengewicht:		
-0,50    0,00    0,50    1,00    1,50    2,00    2,50    m		
$\bar{x}$ Systemausschnitt Stäbe z Alle Lasten, Lastfall 1 Gl FT , (1 cm im Raum = Unit) Stabeigengewicht in global z (Unit=56.7 kN/m ) (Max=10.5)		M 1 : 25
Versuchsbelastung:		
-1,00    -0,50    0,00    0,50    1,00    1,50    2,00    2,50    m		
$\bar{x}$ Systemausschnitt Stäbe z Alle Lasten, Lastfall 2 Belastung , (1 cm im Raum = Unit) Knotenlast. (Kraft) Vektor (Unit=980.5 kN ) (Max=410.0)		M 1 : 25
BAUTEIL : BLOCK : VORGANG :	ARCHIV NR	

VERFASSER : PROGRAMM :	MFFA WINGRAF VERSION 14.66-23 (c) SOFISTIK AG	
BAUWERK :	Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton	ASB NR. : DATUM : 31.08.2008
N:	Eigengewicht	
	Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Normalkraft Nx, Lastfall 1 G1 FT , 1 cm im Raum = 19.6 kN (Min=-16.8) (Max=-2.0464e-12)	M 1 : 20
My:		
	Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Biegemoment My, Lastfall 1 G1 FT , 1 cm im Raum = 9.80 kNm (Min=-8.4790e-11) (Max=4.49)	M 1 : 20
Vz:		
	Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Querkraft Vz, Lastfall 1 G1 FT , 1 cm im Raum = 9.80 kN (Min=-9.71) (Max=9.71)	M 1 : 22
BAUTEIL : BLOCK : VORGANG :		ARCHIV NR

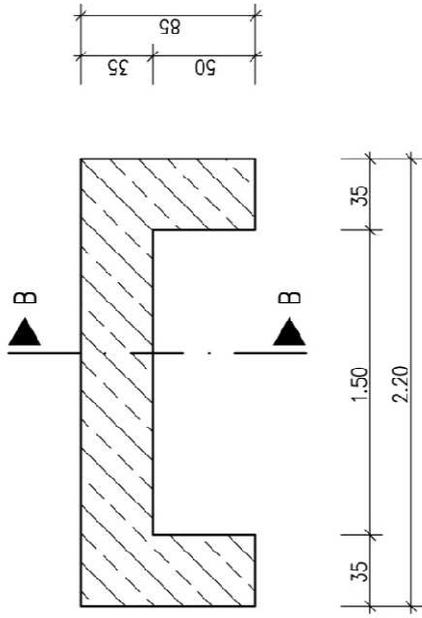
VERFASSEN : MFFA PROGRAMM : WINGRAF VERSION 14.66-23 (c) SOFISTIK AG		
BAUWERK : Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton	ASB NR. :	DATUM : 31.08.2000
N:		
Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Normalkraft Nx, Lastfall 2 Belastung , 1 cm im Raum = 980.5 kN (Min=-410.0) (Max= 2.8771e-09)		M 1 : 20
My:		
Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Biegemoment My, Lastfall 2 Belastung , 1 cm im Raum = 392.2 kNm (Min=-214.8) (Max= 3.4315e-09)		M 1 : 24
Vz:		
Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Querkraft Vz, Lastfall 2 Belastung , 1 cm im Raum = 980.5 kN (Min=-410.0) (Max=410.0)		M 1 : 20
BAUTEIL : BLOCK : VORGANG :	ARCHIV NR	

VERFASSER : MPPA PROGRAMM : WINGRAF VERSION 14.66-23 (c) SOFISTIK AG		
BAUWERK : Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton	ASB NR. :	DATUM : 31.08.2008
<p style="text-align: center;">gewählt: 9 Ø 20</p>		
Systemausschnitt Stäbe Mindest-Stabelemente , Längsbewehrung Rang 1, 1 cm im Raum = 36.1 cm <sup>2</sup> (Max=24.8)		M 1 : 20
<p style="text-align: center;">gewählt: 9 Ø 12 (Mindestbewehrung)</p>		
Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Längsbewehrung Rang 2, Bemessungsfall 101 , 1 cm im Raum = 9.80 cm <sup>2</sup> (Max=5.69)		M 1 : 20
<p style="text-align: center;">gewählt: Ø 12 - 10 4-schnittig</p>		
Systemausschnitt Stäbe Stabelemente , Bügelbewehrung Rang 8, Bemessungsfall 101 , 1 cm im Raum = 39.2 cm <sup>2</sup> /m (Max=34.5)		M 1 : 20
BAUTEIL : BLOCK : VORGANG :	ARCHIV NR	

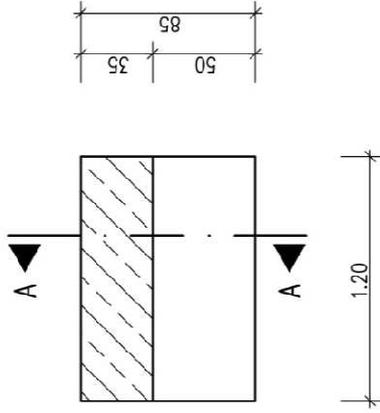


**Anlage 5**  
**Schal- und Bewehrungspläne der Probekörper für die offene Bauweise**

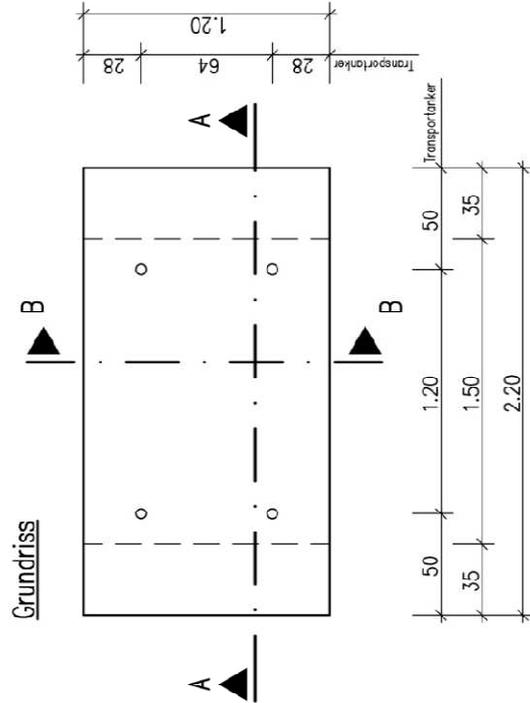
Schnitt A-A



Schnitt B-B



Grundriss



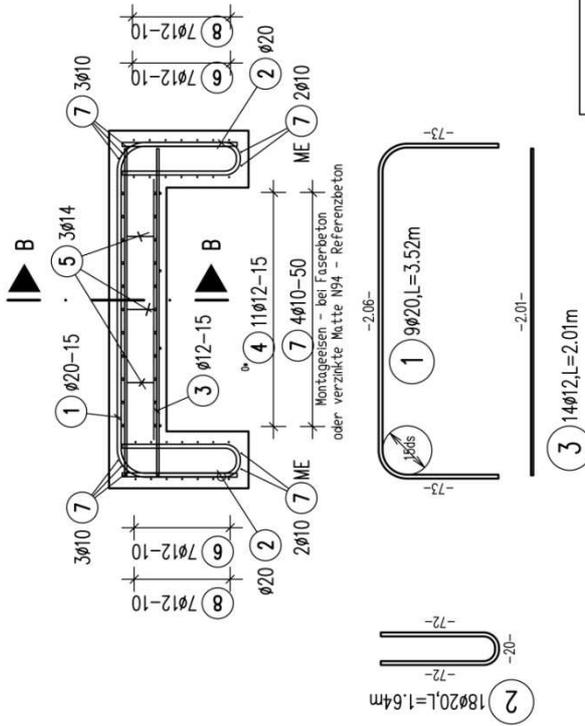
**MATERIAL:**  
 Beton C30/37 Expositionsklasse: XF2 / XD2

**Transportanker:**  
 4 Stk. Pfeifer Wellenanker – kurze Form Rd30 (4to)  
 Schrägzugbewehrung gemäß Herstellerangaben einbauen!  
 Maximaler Schrägzugwinkel von 30° ist anzuhalten!

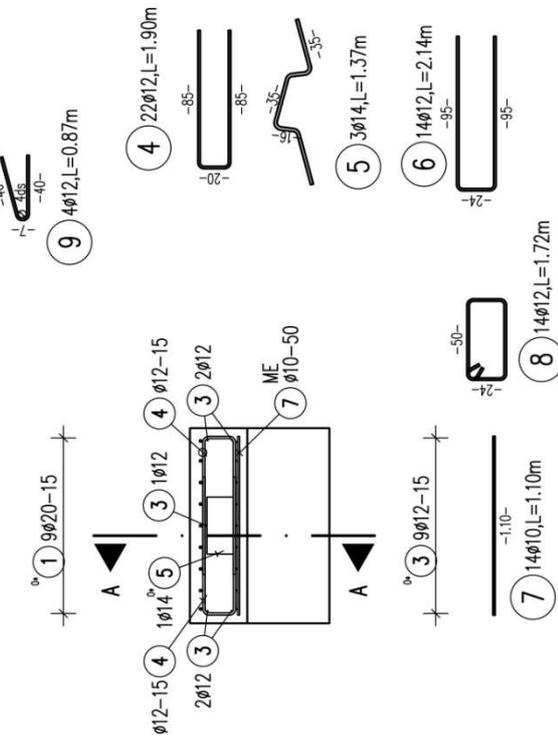
Alle Körperkanten sind mit Dreikantkanteisen  
 1.5 x 1.5 cm zu brechen.

Prüfblatt	Schalplan	Ausführungsplanung	M 1:20
Standort	Größtmögliche Prüfkörper offene Bauweise – Rahmenecke im Tunnelbauwerk	Projekt:	Projekt N.:
Verfahren	Bruch- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln	a	Zeichnung Nr.:
		b	502 a
		c	Hersteller:
		d	06.08.2008
			Abmaß:
			Datum:
			07.07.2008
			gezeichnet:
			Notizen:
 <b>MFPFA Leipzig</b> Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH			

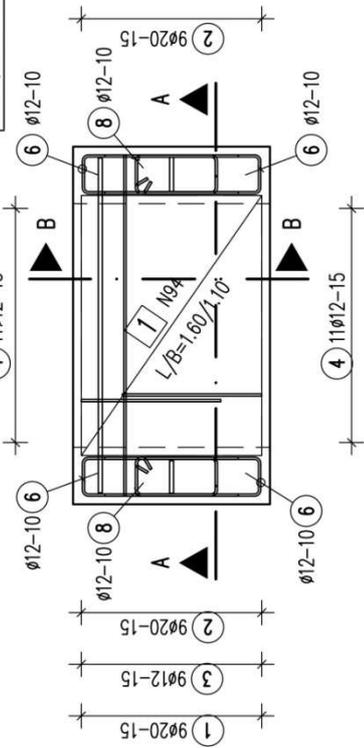
**Schnitt A-A**



**Schnitt B-B**



**Grundriss**



**BETONDECKUNG norm. c:**  
 innen/unten - BST: 6 cm  
 unten - N94: 2 cm  
 außen/oben - BST: 5 cm

**MATERIAL:**  
 Betonstahl BST 500S  
 Prüfkörper mit Referenzbeton:  
 Beton C30/37 Expositionsklasse: XF2 / XD2  
 Ausführung mit verzinkter Mattenbewehrung N94 innerhalb der Betondeckung!  
 Prüfkörper mit Faserbeton:  
 Faserbeton C30/37 Expositionsklasse: XF2 / XD2  
 Ausführung ohne verzinkte Mattenbewehrung N94 innerhalb der Betondeckung!

Projekt	Bewehrungsplan	Ausführungsplanung	M 1:25
Bezeichnet	Großmaßstäblicher Prüfkörper	geprüft:	Projekt Nr.
Verhalten	offene Bauweise - Rahmenecke im Tunnelbauwerk		Zeichnung Nr.
	Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton		BBZ z.
	in Straßentunneln		Bezeichnet
		d	Abtest
		e	Abtest
		f	Urtum
		g	Abtest
		h	geprüft
			Name

**MFPFA Leipzig**  
 Gesellschaft für Materialforschung und  
 Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

Schrägzugbewehrung, Transportanker.  
 Einbau gemäß Herstellerangaben.





**Anlage 6**  
**Fotodokumentation der großmaßstäblichen Brandversuche**  
**der geschlossenen Bauweise**

Fotodokumentation der großmaßstäblichen unbelasteten Prüfung 1 am Probekörper GB1 (Referenzbeton)



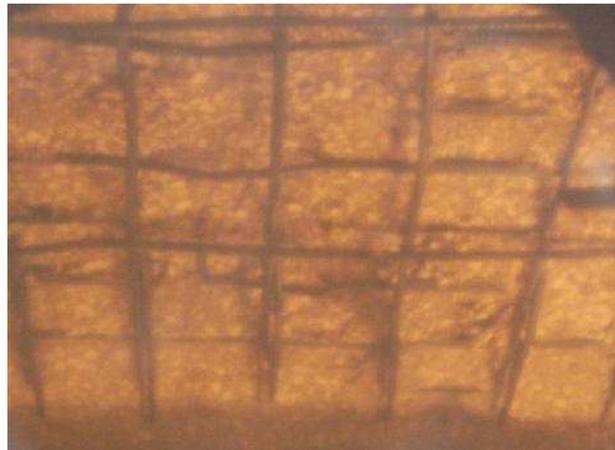
**Bild 90** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 91** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 92** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 93** Detailaufnahme – Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 94** Probekörper GB1 (Referenzbeton) auf dem Tunnelofen nach Beendigung der Brandbeanspruchung



**Bild 95** Probekörper GB1 (Referenzbeton) nach der Brandbeanspruchung beim Abheben vom Tunnelofen



**Bild 96** Probekörper GB1 (Referenzbeton) beim Abheben vom Tunnelofen



**Bild 97** Rückseite des Probekörpers GB1 (Referenzbeton) nach dem Brandversuch



**Bild 98** Brandbeanspruchte Seite des Probekörpers GB1 (Referenzbeton) nach dem Brandversuch



**Bild 99** Brandbeanspruchte Seite des Probekörpers GB1 (Referenzbeton) nach dem Brandversuch



**Bild 100** Detailansicht der brandbeanspruchten Seite des Probekörpers GB1 (Referenzbeton)



**Bild 101** Brandbeanspruchte Seite des Probekörpers GB1 (Referenzbeton) nach dem Brandversuch

*Fotodokumentation der großmaßstäblichen unbelasteten Prüfung 2 am Probekörper GB2 (Faserbeton)*



**Bild 102** Probekörper GB2 (Faserbeton 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP) vor der Prüfung



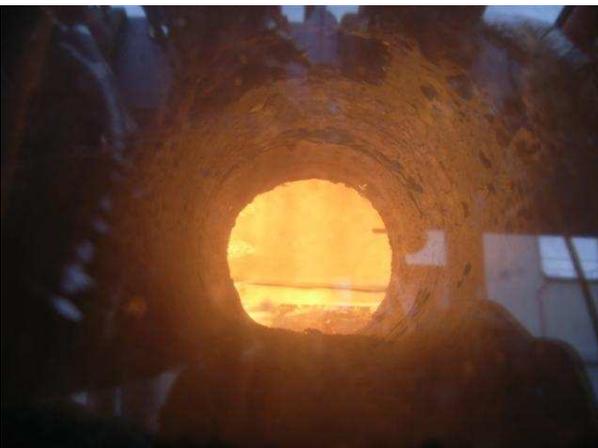
**Bild 103** Probekörper GB2 (Faserbeton 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP) auf dem Tunnelofen vor der unbelasteten Tunnelbrandprüfung



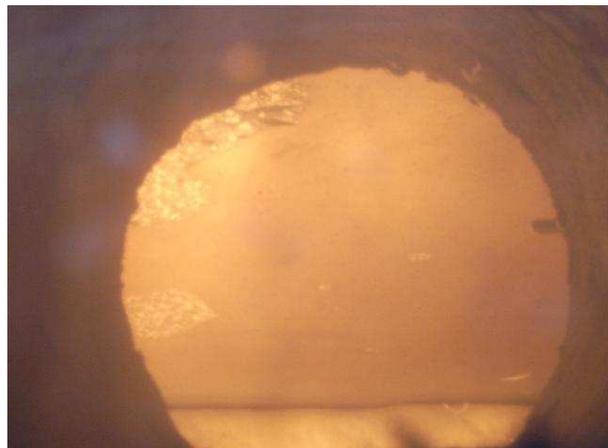
**Bild 104** Probekörper GB2 (Faserbeton 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP) auf dem Tunnelofen vor der unbelasteten Tunnelbrandprüfung



**Bild 105** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 106** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 107** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 108** Probekörper GB2 (Faserbeton 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP) nach Beendigung der Brandbeanspruchung



**Bild 109** Brandbeanspruchte Seite des Probekörpers GB2 (Faserbeton 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP)



**Bild 110** Detailansicht der brandbeanspruchten Seite



**Bild 111** Detailansicht der brandbeanspruchten Seite



**Bild 112** Brandbeanspruchte Seite des Probekörpers GB2 (Faserbeton 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP)

*Fotodokumentation der großmaßstäblichen belasteten Prüfung 3 am Probekörper GB3 (Referenzbeton)*



**Bild 113** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



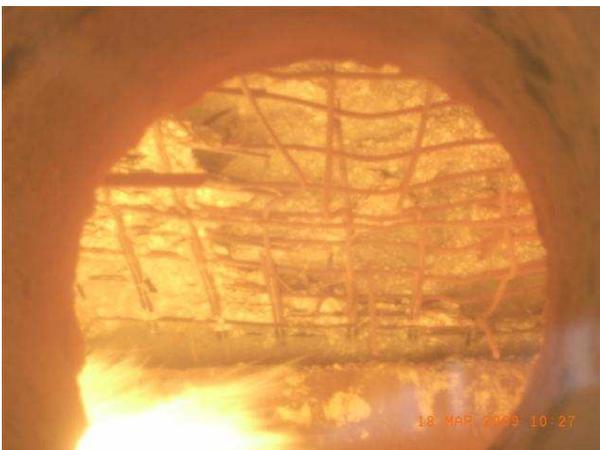
**Bild 114** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 115** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 116** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 117** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 118** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 119** Probekörper GB3 (Referenzbeton) nach der Prüfung



**Bild 120** Probekörper GB3 (Referenzbeton) brandbeanspruchte Seite



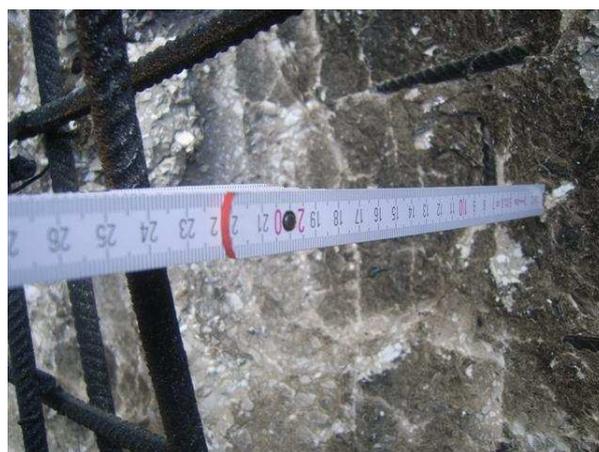
**Bild 121** Detailansicht der brandbeanspruchten Seite am Probekörper GB3 (Referenzbeton)



**Bild 122** Detailansicht der brandbeanspruchten Seite am Probekörper GB3 (Referenzbeton)



**Bild 123** Detailansicht der brandbeanspruchten Seite am Probekörper GB3 (Referenzbeton)



**Bild 124** Detailansicht der brandbeanspruchten Seite am Probekörper GB3 (Referenzbeton)

*Fotodokumentation der großmaßstäblichen belasteten Prüfung 4 am Probekörper GB4 (Faserbeton)*



**Bild 125** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 126** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 127** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 128** Blick auf die vertikale Belastungseinrichtung



**Bild 129** Versuchsaufbau nach der Prüfung sowie Autokran zum Abheben des Prüfaufbaus



**Bild 130** Abheben des Probekörpers GB4 (Faserbeton 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP) vom Tunnelofen nach dem Brandversuch



**Bild 131** Brandbeanspruchte Seite des Probekörpers GB4 (Faserbeton 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP)



**Bild 132** Brandbeanspruchte Seite des Probekörpers GB4 (Faserbeton 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP)



**Bild 133** Brandbeanspruchte Seite des Probekörpers GB4 (Faserbeton 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP)

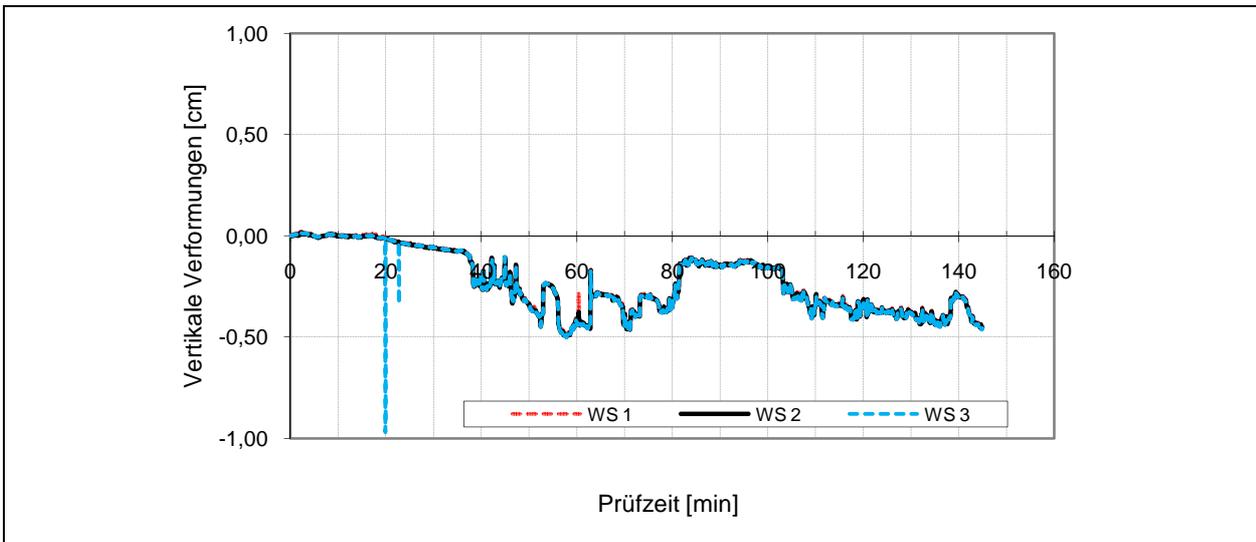


**Bild 134** Brandbeanspruchte Seite des Probekörpers GB4 (Faserbeton 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP)

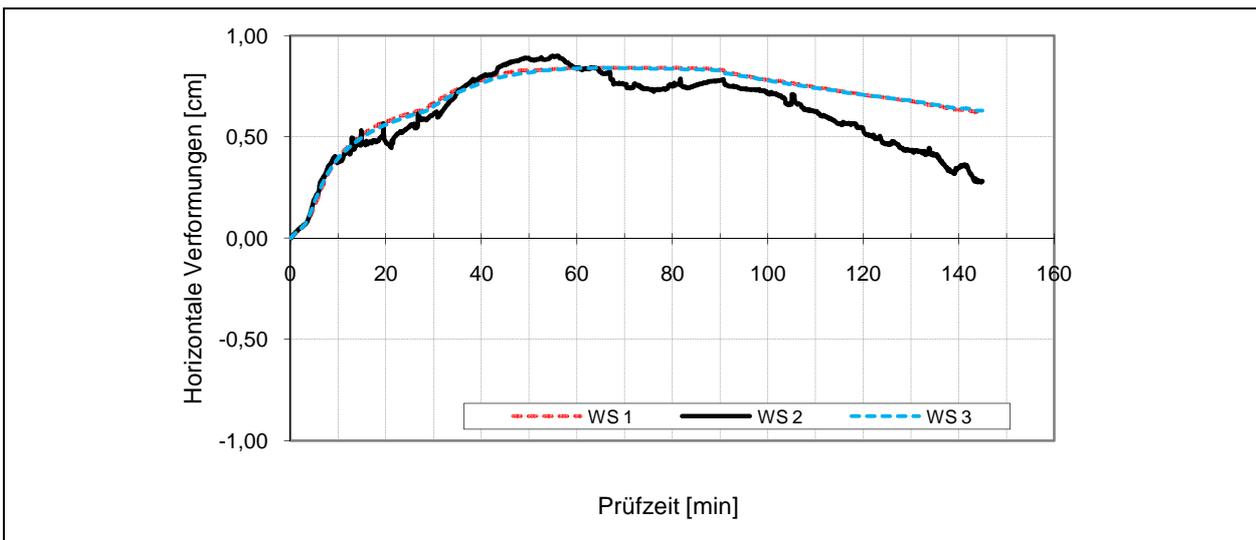


**Anlage 7**  
**Darstellung der ermittelten Verformungen**  
**an den Probekörpern der geschlossenen Bauweise**

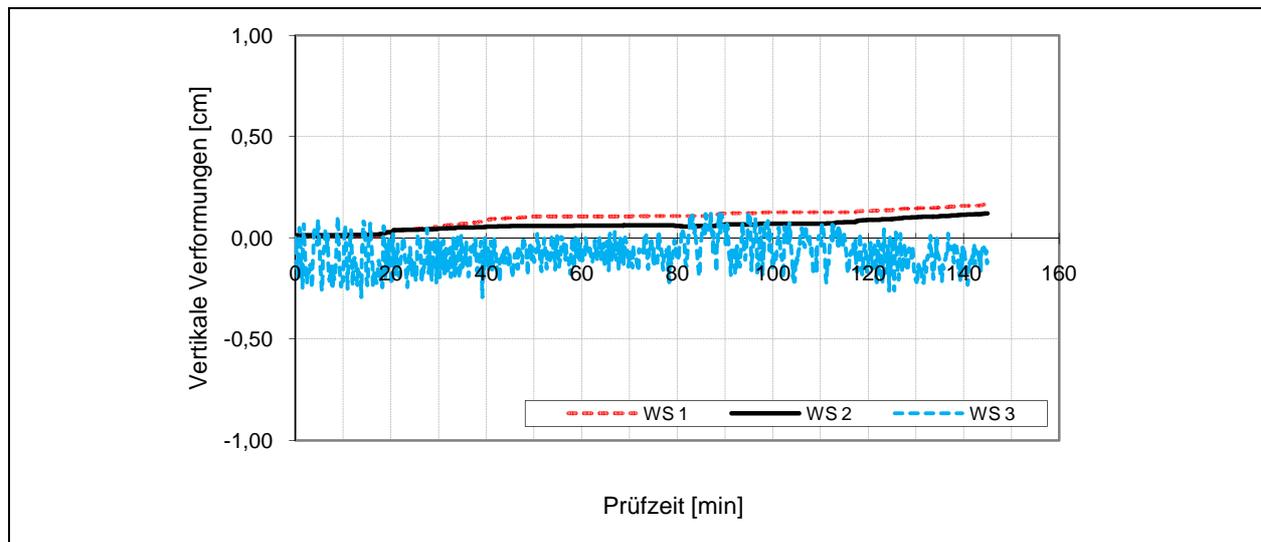
Darstellung der vertikalen Verformungen aus Versuch 1 – Probekörper GB1



Darstellung der vertikalen Verformungen aus Versuch 2 – Probekörper GB2



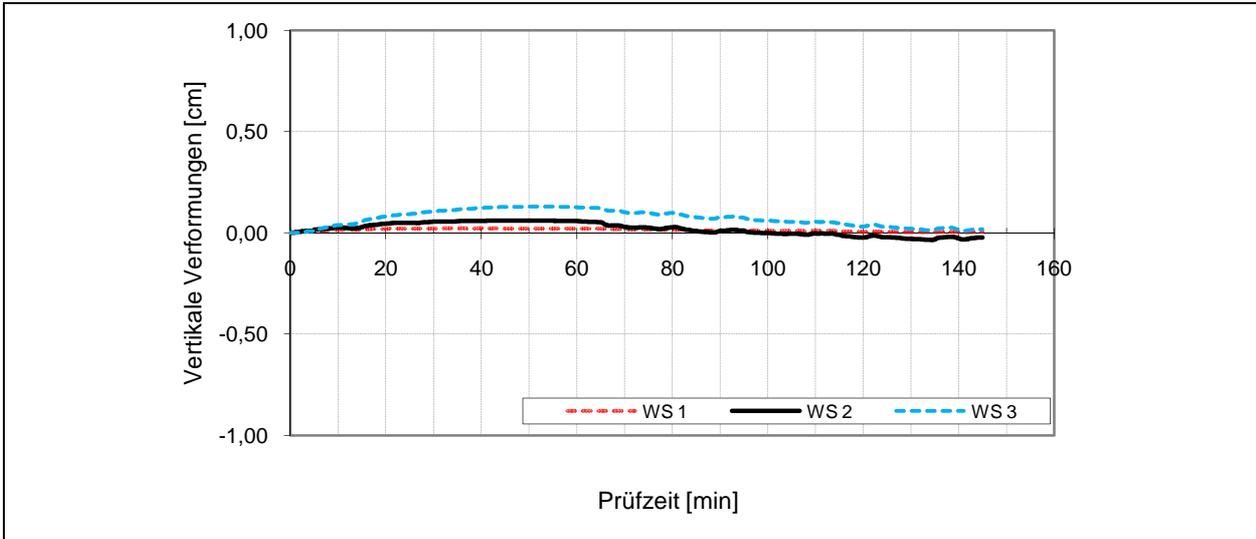
Darstellung der vertikalen Verformungen aus Versuch 3 – Probekörper GB3



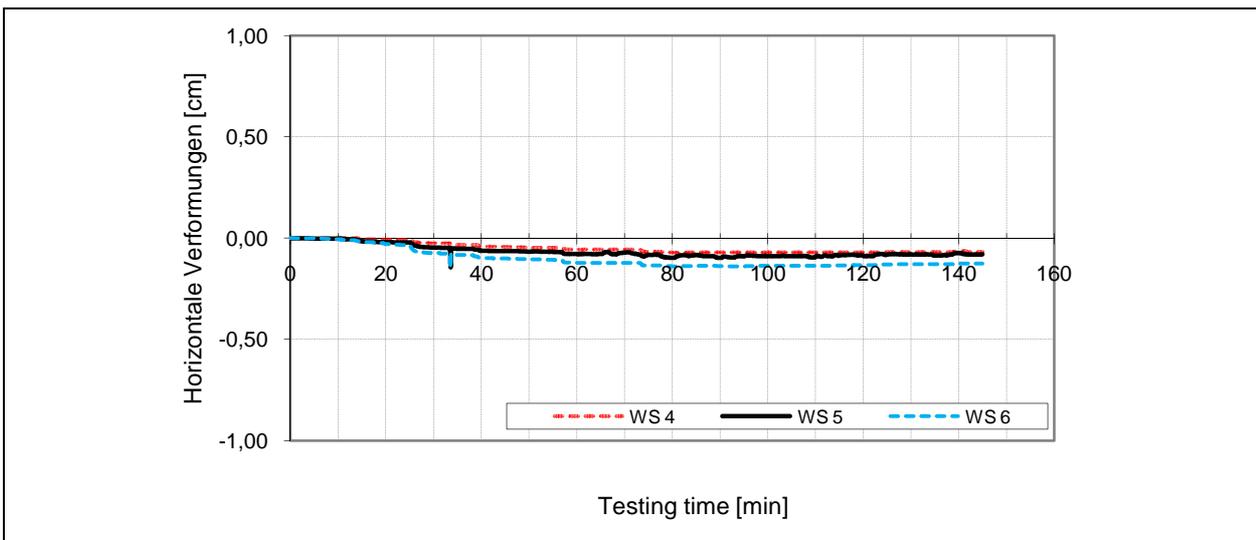
Darstellung der horizontalen Verformungen aus Versuch 3 – Probekörper GB3

es wurde keine horizontale Verformungen gemessen

Darstellung der vertikalen Verformungen aus Versuch 4 – Probekörper GB4



Darstellung der horizontalen Verformungen aus Versuch 4 – Probekörper GB4



**Anlage 8**  
**Fotodokumentation der großmaßstäblichen Brandversuche**  
**der offenen Bauweise**

*Fotodokumentation der großmaßstäblichen belasteten Prüfung 5 am Probekörper OB1 (Referenzbeton)*



**Bild 135** Probekörper OB1 (Referenzbeton) vor der Brandbeanspruchung



**Bild 136** Einbau des Probekörpers OB1 (Referenzbeton) in den Brandprüfstand



**Bild 137** Probekörper OB1 (Referenzbeton) vor der Brandprüfung



**Bild 138** Probekörpers OB1 (Referenzbeton) im eingebauten Zustand



**Bild 139** Blick in den Brandraum während der Prüfung



**Bild 140** Außenseite des Probekörpers OB1 (Referenzbeton) nach der Brandbeanspruchung



**Bild 141** Abheben des Probekörpers nach der Prüfung vom Tunnelofen



**Bild 142** Probekörper nach der Brandbeanspruchung



**Bild 143** Probekörper nach der Brandbeanspruchung



**Bild 144** Probekörper nach der Brandbeanspruchung



**Bild 145** Detailansicht des Probekörpers nach der Brandbeanspruchung

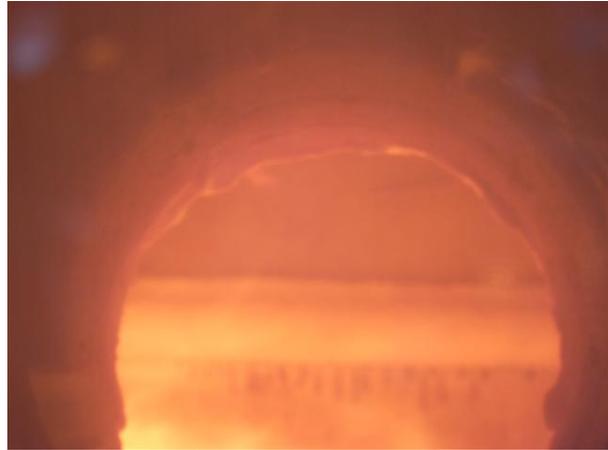


**Bild 146** Detailansicht des Probekörpers nach der Brandbeanspruchung

*Fotodokumentation der großmaßstäblichen belasteten Prüfung 6 am Probekörper OB2 (Faserbeton)*



**Bild 147** Blick auf den Versuchsaufbau während der Brandbeanspruchung



**Bild 148** Blick in den Brandraum während der Brandbeanspruchung



**Bild 149** Blick auf den Versuchsaufbau während der Brandbeanspruchung



**Bild 150** Brandbeanspruchte Seite des Probekörpers OB2 (Faserbeton 2,0kg/m<sup>3</sup> PP)



**Bild 151** Brandbeanspruchte Seite des Probekörpers OB2 (Faserbeton 2,0kg/m<sup>3</sup> PP)



**Bild 152** Brandbeanspruchte Seite des Probekörpers OB2 (Faserbeton 2,0kg/m<sup>3</sup> PP)



**Bild 153** Brandbeanspruchte Seite des Probekörpers OB2 (Faserbeton 2,0kg/m<sup>3</sup> PP)

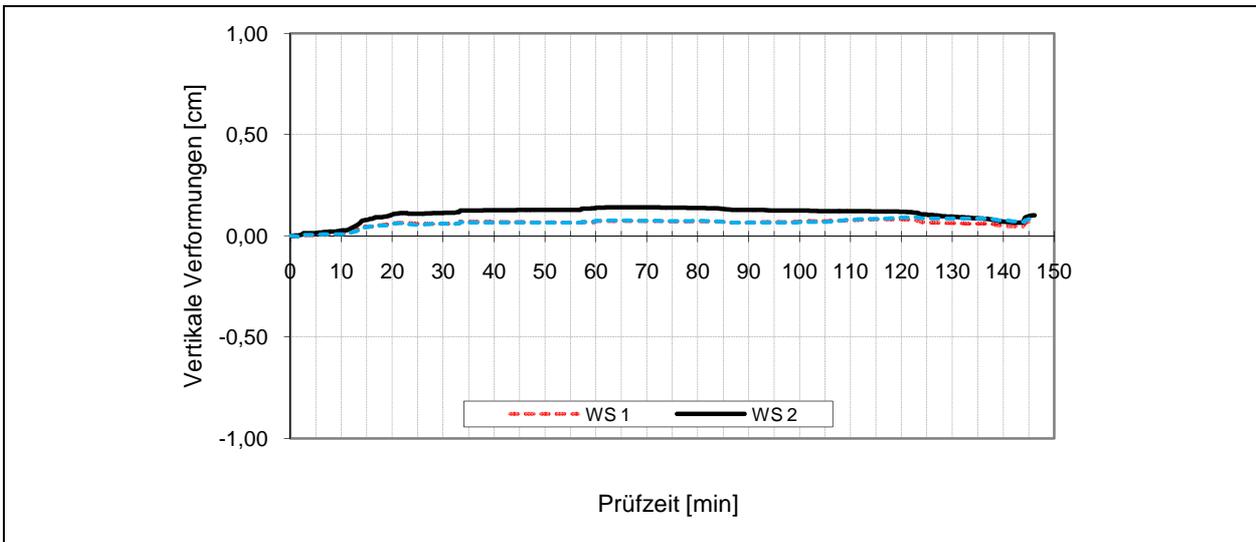


**Bild 154** Detailansicht

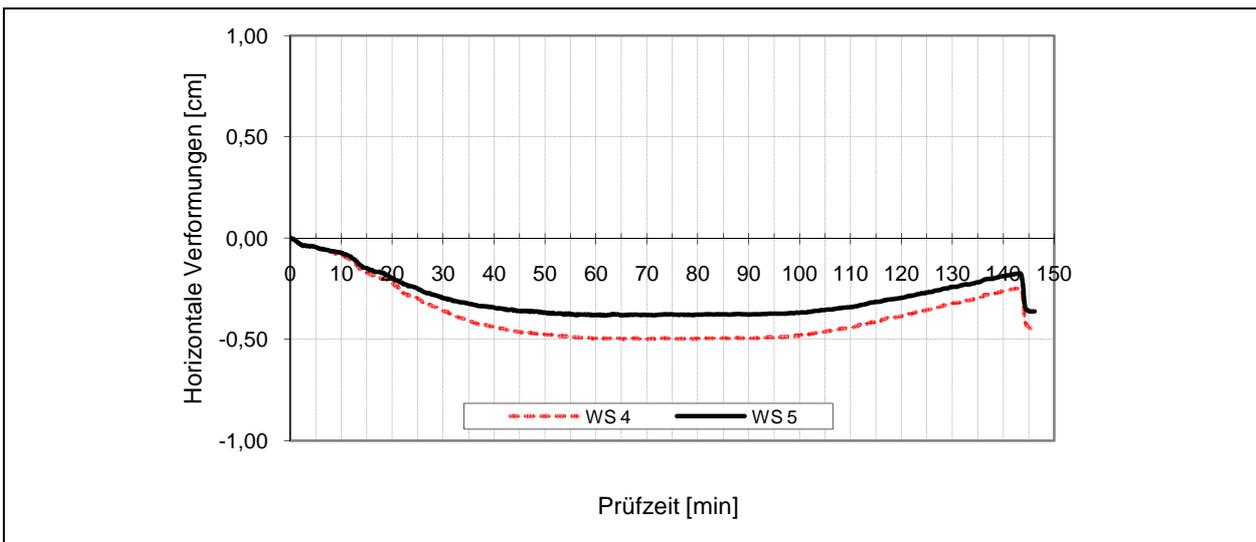


**Anlage 9**  
**Darstellung der ermittelten Verformungen an**  
**den Probekörpern der offenen Bauweise**

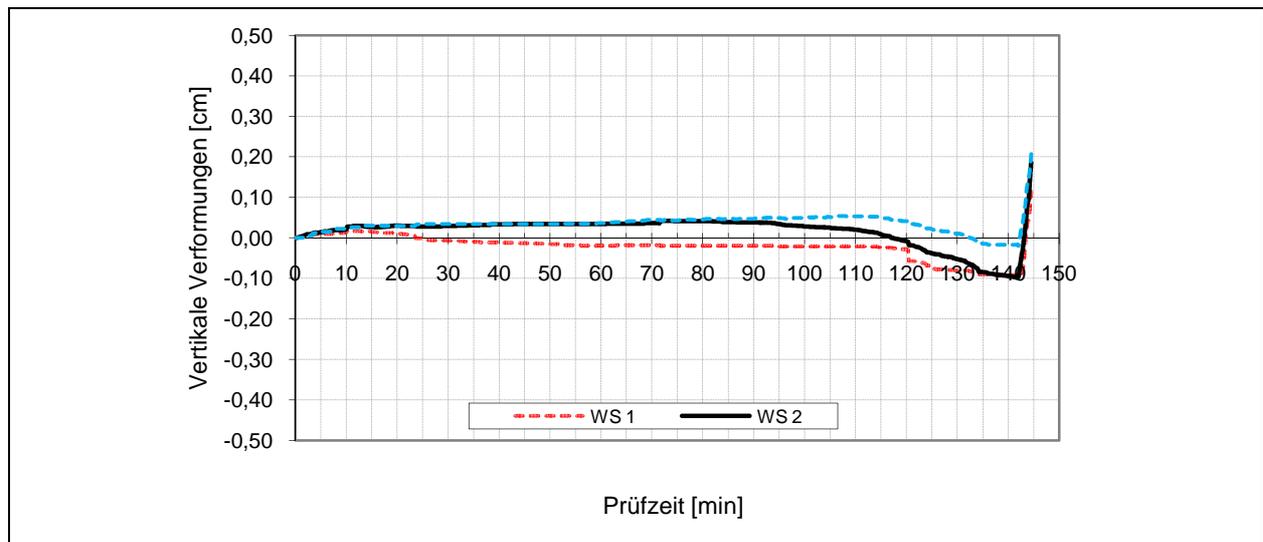
Darstellung der vertikalen Verformungen aus Versuch 5 – Probekörper OB1



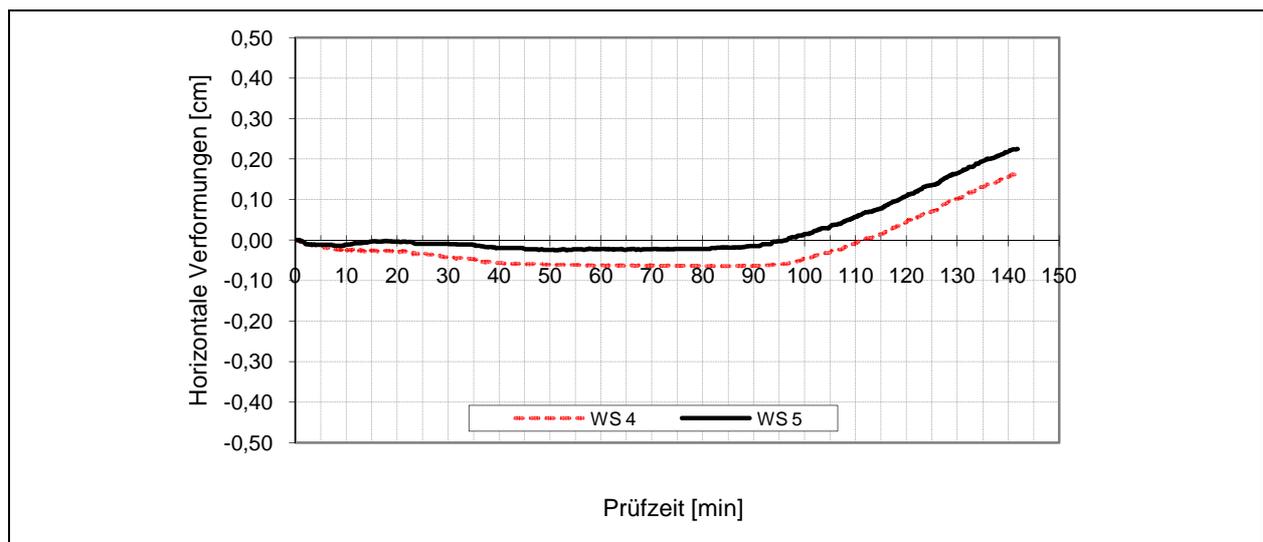
Darstellung der horizontalen Verformungen aus Versuch 5 – Probekörper OB1



Darstellung der vertikalen Verformungen aus Versuch 6 – Probekörper OB2



Darstellung der horizontalen Verformungen aus Versuch 6 – Probekörper OB2

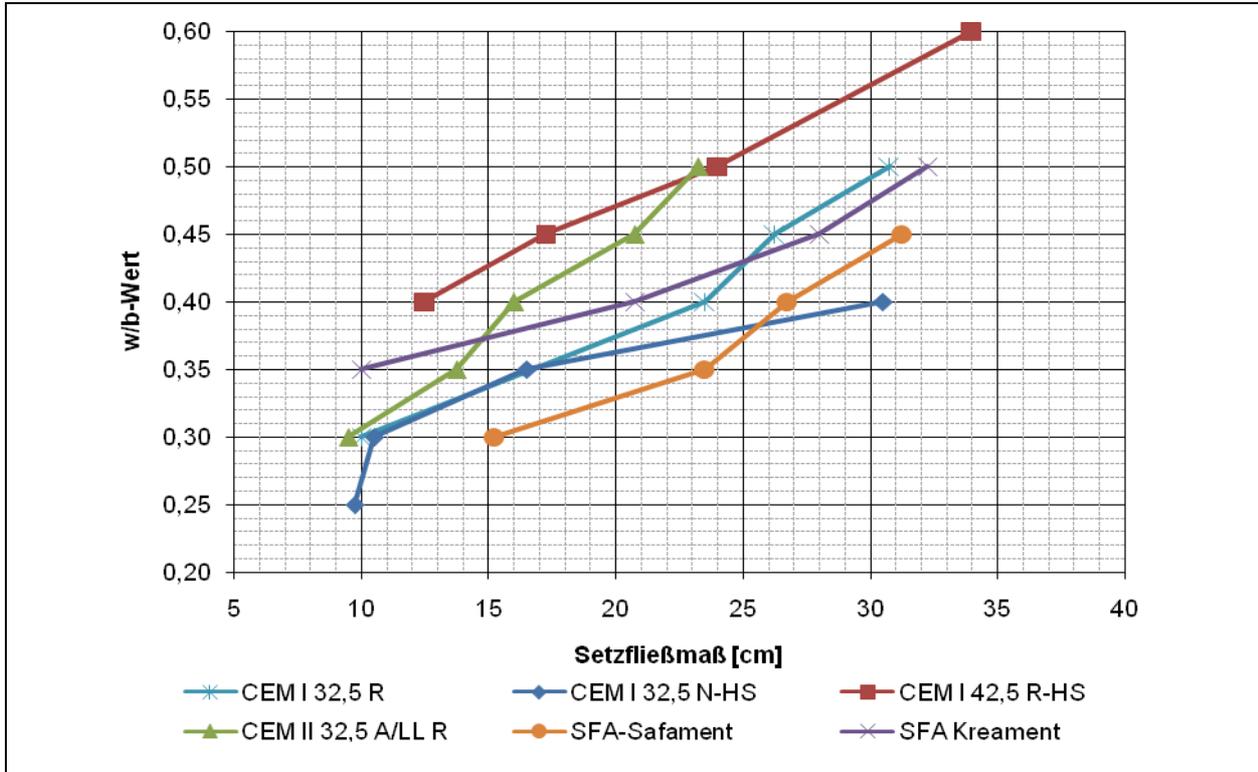




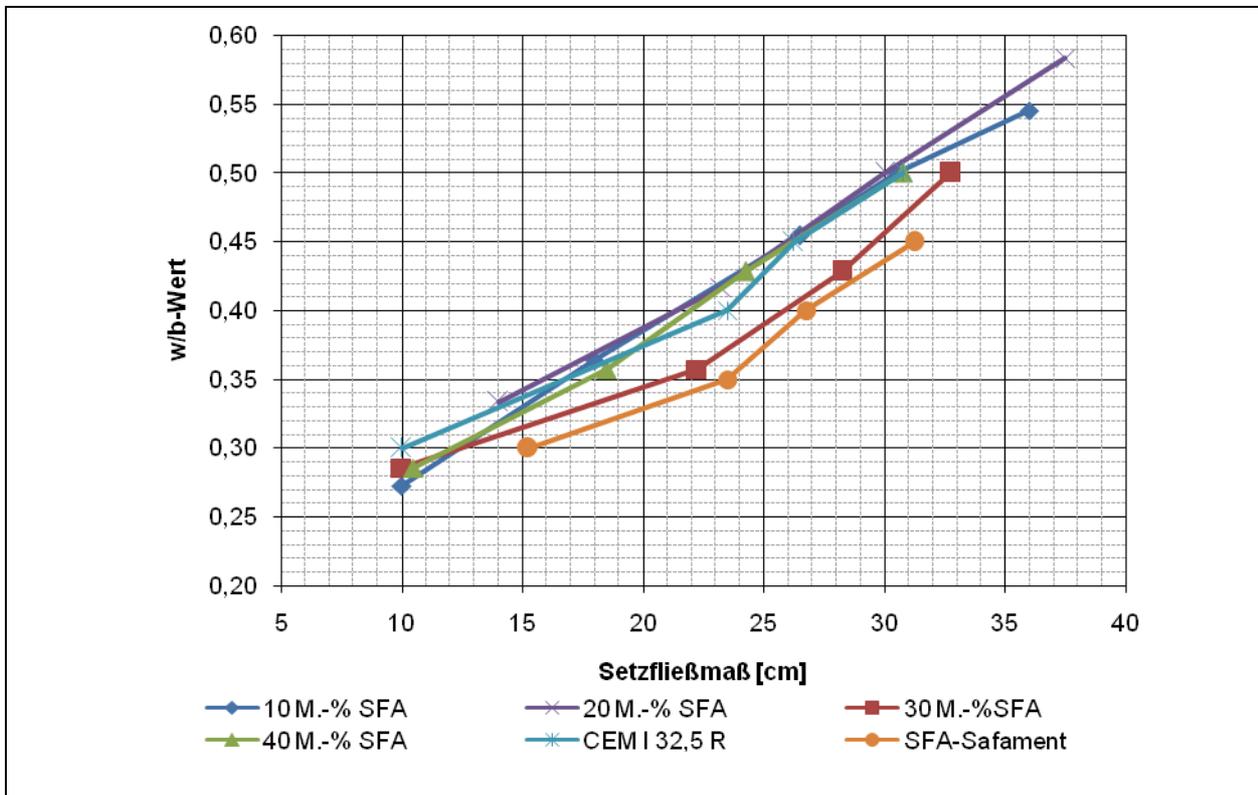
**Anlage 10**

**Betontechnologische Machbarkeitsstudie: Laborversuche - Bindemittel**

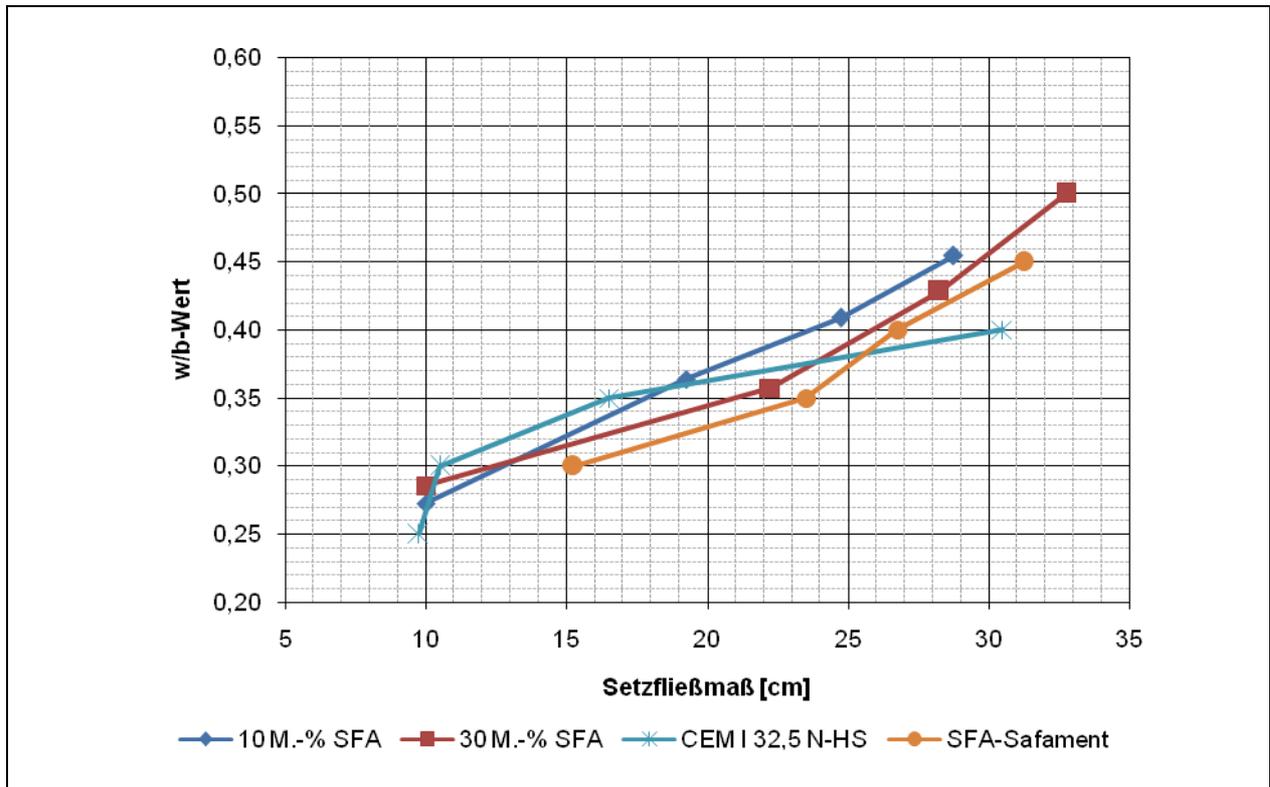
Darstellung des Wasseranspruches verschiedener Bindemittelkomponenten



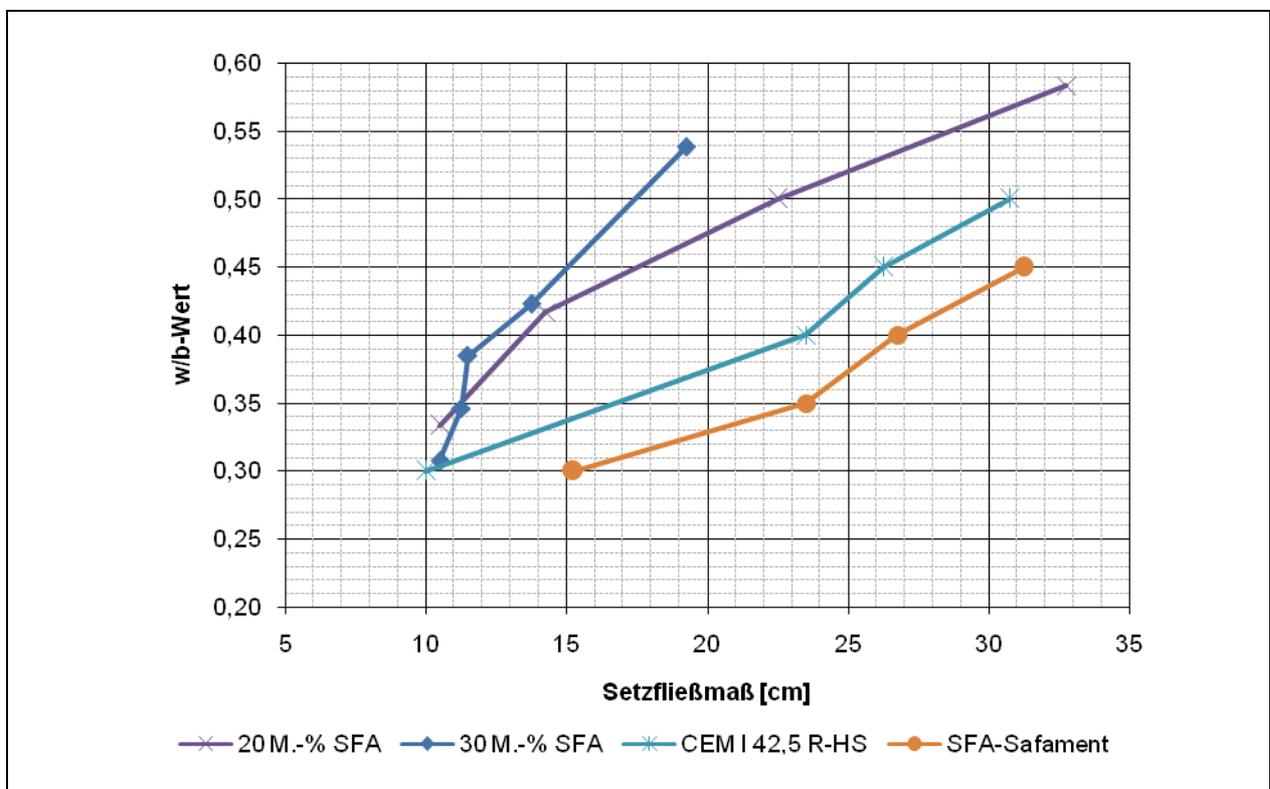
Darstellung des Wasseranspruches des Bindemittelsystems: CEM I 32,5 R + SFA-Safament



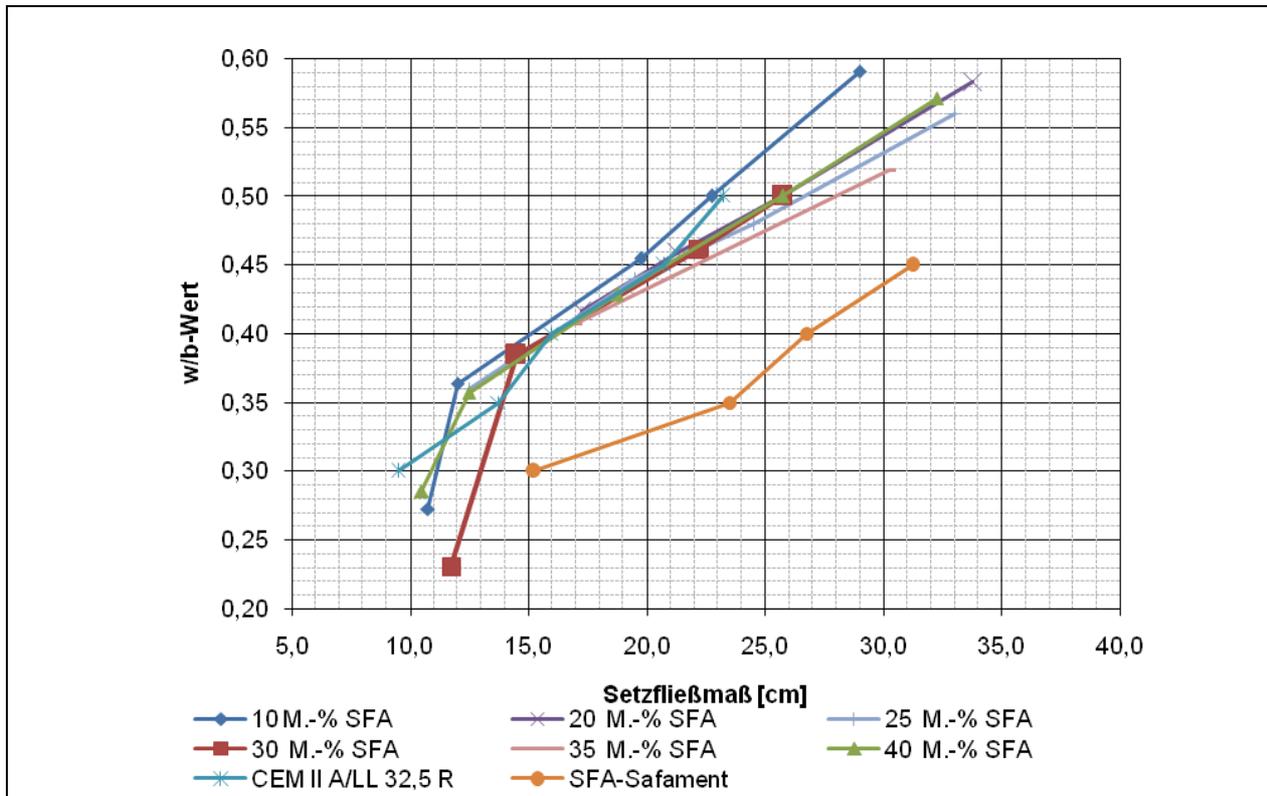
Darstellung des Wasseranspruches des Bindemittelsystems: CEM I 32,5 N-HS + SFA-Safament



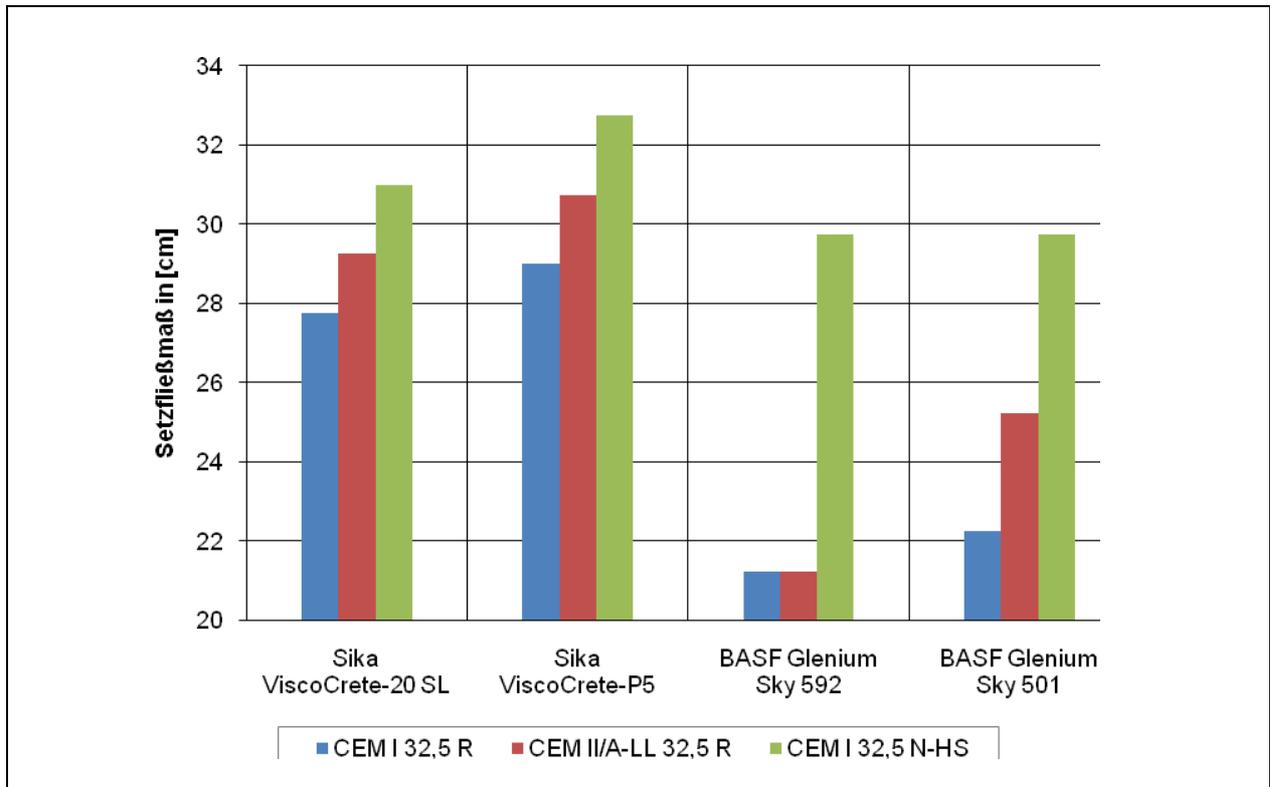
Darstellung des Wasseranspruches des Bindemittelsystems: CEM I 42,5 R-HS + SFA-Safament



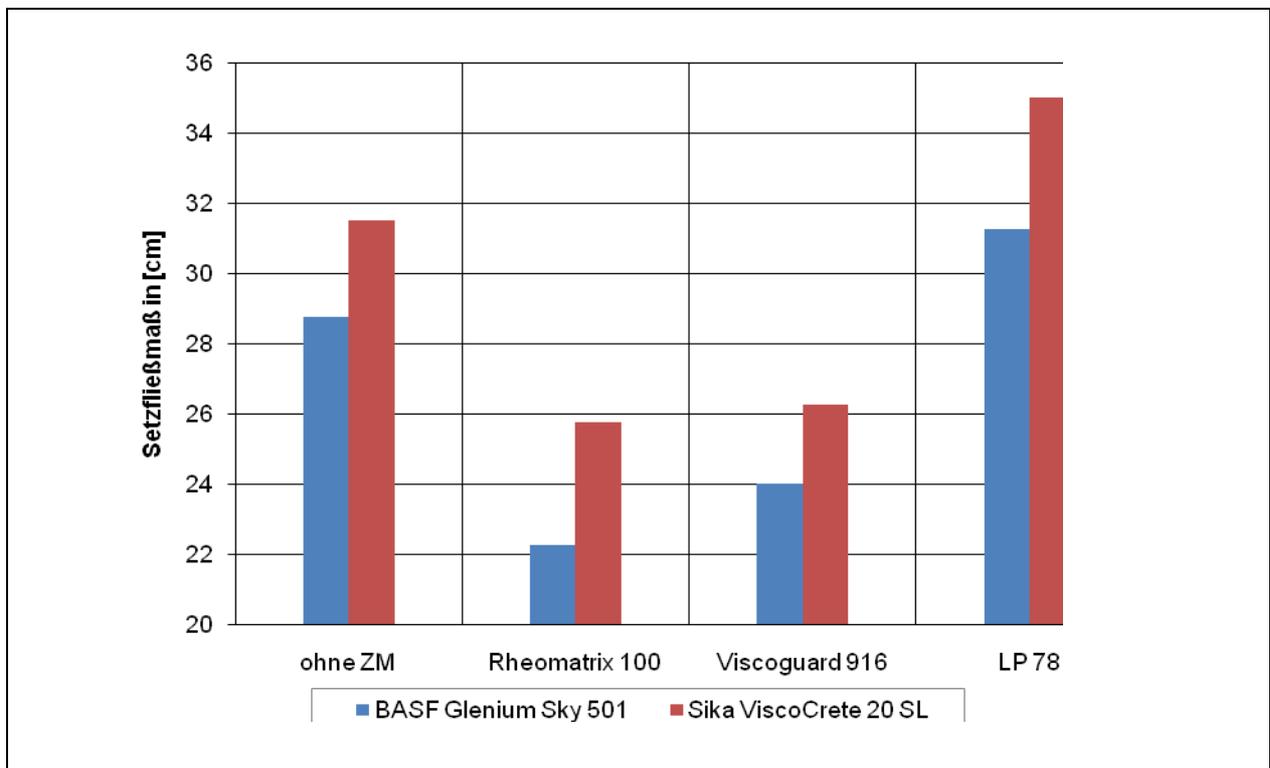
Darstellung des Wasseranspruches des Bindemittelsystems: CEM II A/LL 32,5 R + SFA-Safament



Darstellung der Fließfähigkeit in Abhängigkeit der Fließmittel-/ Bindemittel- Wechselwirkungsweise



Darstellung des Einflusses von weiteren Zusatzmittelprodukten auf das Fließverhalten des Bindemittelsystems



*Fotodokumentation des Wasseranspruches der Bindemittelkomponenten bei konstanten  $w/b=0,40$*



**Bild 155** CEM I 32,5 R,  $s_m^1=23,5$  cm



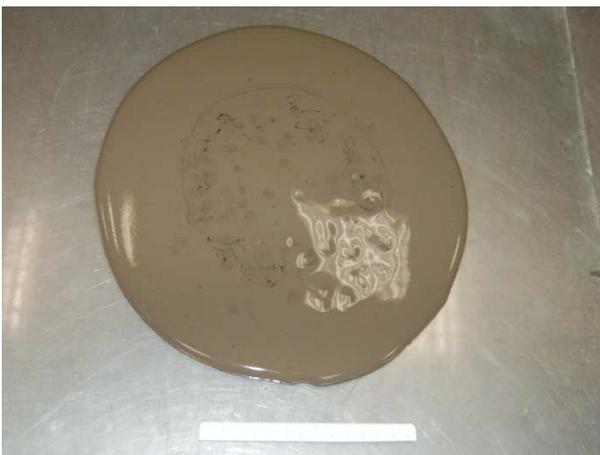
**Bild 156** CEM I 32,5 N-HS,  $s_m^1=30,5$  cm



**Bild 157** CEM I 42,5 R-HS,  $s_m^1=12,5$  cm



**Bild 158** CEM II A/LL 32,5 R,  $s_m^1=16,0$  cm



**Bild 159** Steinkohlenflugasche Safament,  $s_m^1=31,0$  cm



**Bild 160** Steinkohlenflugasche Kreament,  $s_m^1=28,0$  cm

<sup>1</sup>  $s_m$  = Mittelwert des Setzfließmaßes mit dem Haegemann-Trichter

**Anlage 11**  
**Betontechnologische Machbarkeitsstudie: Laborversuche – Beton**

## Mischungsberechnung für die geschlossene Bauweise – Laborversuche: Sieblinienoptimierung

Stoffbezeichnung	Einheit	Produktbeschreibung	GL <sup>2</sup> 1	GL2	GL3	GL4
Zement <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	CEM II A/LL 32,5 R	360	360	320	320
Flugasche	M.-%v.Z.	Safament HKV W III	35	35	35	35
Zugabewasser	kg/m <sup>3</sup>	Zugabewasser	193	196	174	174
Fließmittel	M.-%v.Z.	Sika ViscoCrete SL	0,5	0,75	0,7	0,7
PP-Fasern <sup>4</sup>	kg/m <sup>3</sup>	2,8dtex 6,0 mm	2	2	2	2
Sand 0-2	M.-%	Rehbach	<sup>5</sup> 30	37	37	37
Kalkstein 2-8	M.-%	Medenbach	40	33	33	30
Kalkstein 8-16	M.-%	Medenbach	30	30	30	33

## Mischungsberechnung für die geschlossene Bauweise – Laborversuche: alternative Ausgangsstoffe und Einfluss des Wassergehaltes

Stoffbezeichnung	Einheit	GL5		GL6		GL7	
Zement <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	CEM II A/LL 32,5 R	320	CEM II A/LL 32,5 R	320	CEM I 32,5 R	320
Flugasche	M.-%v.Z.	Safament HKV W III	35	Kreament	35	Safament HKV W III	35
Zugabewasser	kg/m <sup>3</sup>	Zugabewasser	173	Zugabewasser	173	Zugabewasser	173
Fließmittel	M.-%v.Z.	BASF Sky 501	1,3	Sika ViscoCrete SL	1,1	Sika ViscoCrete SL	1
PP-Fasern <sup>4</sup>	kg/m <sup>3</sup>	2,8dtex 6,0 mm	2	2,8dtex 6,0 mm	2	2,8dtex 6,0 mm	2
Sand 0-2	M.-%	Rehbach	37	Rehbach	37	Rehbach	37
Kalkstein 2-8	M.-%	Medenbach	33	Medenbach	33	Medenbach	33
Kalkstein 8-16	M.-%	Medenbach	30	Medenbach	30	Medenbach	30

Stoffbezeichnung	Einheit	GL8		GL9		GL10	
Zement <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	CEM I 32,5 R	320	CEM I 42,5 R-HS	320	CEM I 32,5 R	320
Flugasche	M.-%v.Z.	Safament HKV W III	35	Safament HKV W III	35	Safament HKV W III	35
Zugabewasser	kg/m <sup>3</sup>	Zugabewasser	173	Zugabewasser	173	Zugabewasser	194
Fließmittel	M.-%v.Z.	Sika ViscoCrete SL	1,2	BASF Sky 501	1,5	BASF Sky 501	0,6
PP-Fasern <sup>4</sup>	kg/m <sup>3</sup>	2,8dtex 6,0 mm	2	2,8dtex 6,0 mm	2	2,8dtex 6,0 mm	2
Sand 0-2	M.-%	Rehbach	37	Rehbach	37	Rehbach	37
Kalkstein 2-8	M.-%	Medenbach	33	Medenbach	33	Medenbach	33
Kalkstein 8-16	M.-%	Medenbach	30	Medenbach	30	Medenbach	30

<sup>2</sup> GL = Geschlossene Bauweise, Laborversuch<sup>3</sup> Zement = alle Zemente stammen von Schwenk, Zementwerk Bernburg<sup>4</sup> PB EUROFIBER CUT FT<sup>5</sup>   = variiertes Parameter

Mischungsberechnung für die offene Bauweise – Laborversuche: alternative Ausgangsstoffe, Einfluss des Wassergehaltes und Einfluss des Zeitpunktes der Faserzugabe

Stoffbezeichnung	Einheit	OL1 <sup>6</sup>		OL2		OL3 (PP-Faserzugabe auf Nassgemisch)	
Zement <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	CEM II A/LL 32,5 R	360	CEM I 32,5 R	360	CEM II A/LL 32,5 R	360
Flugasche	M.-%v.Z.	Safament HKV W III	35	Safament HKV W III	35	Safament HKV W III	35
Zugabewasser	kg/m <sup>3</sup>	Zugabewasser	178	Zugabewasser	178	Zugabewasser	178
Fließmittel	M.-%v.Z.	Sika ViscoCrete SL	0,7	Sika ViscoCrete SL	1	Sika ViscoCrete SL	0,9
PP-Fasern <sup>4</sup>	kg/m <sup>3</sup>	2,8dtex 6,0 mm	2	2,8dtex 6,0 mm	2	2,8dtex 6,0 mm	2
Sand 0-2	M.-%	Rehbach	37	Rehbach	37	Rehbach	37
Kalkstein 2-8	M.-%	Medenbach	33	Medenbach	33	Medenbach	33
Kalkstein 8-16	M.-%	Medenbach	30	Medenbach	30	Medenbach	30

Stoffbezeichnung	Einheit	OL4		OL5		OL6	
Zement <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	CEM II A/LL 32,5 R	360	CEM I 32,5 R	360	CEM I 42,5 R-HS	360
Flugasche	M.-%v.Z.	Safament HKV W III	35	Safament HKV W III	35	Safament HKV W III	35
Zugabewasser	kg/m <sup>3</sup>	Zugabewasser	178	Zugabewasser	178	Zugabewasser	178
Fließmittel	M.-%v.Z.	Sika ViscoCrete SL	0,8	BASF Sky 501	1,8	BASF Sky 501	1,8
PP-Fasern <sup>4</sup>	kg/m <sup>3</sup>	1,7 dtex 6,0 mm <sup>7</sup>	2	2,8dtex 6,0 mm	2	2,8dtex 6,0 mm	2
Sand 0-2	M.-%	Rehbach	37	Rehbach	37	Rehbach	37
Kalkstein 2-8	M.-%	Medenbach	33	Medenbach	33	Medenbach	33
Kalkstein 8-16	M.-%	Medenbach	30	Medenbach	30	Medenbach	30

Stoffbezeichnung	Einheit	OL7	
Zement <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	CEM I 32,5 R	360
Flugasche	M.-%v.Z.	Safament HKV W III	35
Zugabewasser	kg/m <sup>3</sup>	Zugabewasser	197
Fließmittel	M.-%v.Z.	BASF Sky 501	0,5
PP-Fasern <sup>4</sup>	kg/m <sup>3</sup>	2,8dtex 6,0 mm	2
Sand 0-2	M.-%	Rehbach	37
Kalkstein 2-8	M.-%	Medenbach	33
Kalkstein 8-16	M.-%	Medenbach	30

<sup>6</sup> OL = Offene Bauweise, Laborversuch

<sup>7</sup> HPR PP-Faser

## Laborversuche: Frischbetonergebnisse

Beton Bezeichnung	Herstellungsdatum	Umgebungs- temperatur	Ausbreitmaß $a_0$ nach DIN EN 12350-5	Augenscheinliches Bluten	Zugabe des Sedimentations- reduzierer	Sedimentations- reduzierer Rheomatrix 100 SR	Ausbreitmaß $a_m$ nach DIN EN 12350-5	Herstellung von Probewürfel für die	Anzahl der Probewürfel
		°C	x/ y mm	1=kein bis 5=deutlich	Ja/ Nein	M.-%v.Z.	x/ y mm	Ja/ Nein	Stk
<b>Geschlossene Bauweise: Laborversuche</b>									
GL1	13. Okt	18	510/ 530	4	Ja	1,5	500/ 500	Ja	6
GL2	13. Okt	18	580/ 580	1	Nein	-	-	Ja	3
GL3	13. Okt	18	520/ 530	3	Ja	1,5	520/550	Ja	3
GL4	13. Okt	18	510/ 510	2	Nein	-	-	Ja	3
GL5	14. Okt	18	500/ 500	2	Nein	-	-	Ja	6
GL6	14. Okt	18	510/ 510	2	Ja	1,5	470/ 450	Ja	6
GL7	14. Okt	18	470/ 480	2	Nein	-	-	Ja	6
GL8	03. Nov	18	470/ 470	4	Nein	-	-	Nein	-
GL9	03. Nov	18	490/ 500	2	Nein	-	-	Ja	6
GL10	03. Nov	18	490/ 500	1	Nein	-	-	Ja	6
<b>Offene Bauweise: Laborversuche</b>									
OL1	14. Okt	18	510/ 500	1	Nein	-	-	Ja	6
OL2	14. Okt	18	520/ 520	2	Nein	-	-	Ja	6
OL3	14. Okt	18	510/ 510	1	Nein	-	-	Ja	6
OL4	14. Okt	18	480/ 490	2	Nein	-	-	Ja	6
OL5	20. Okt	18	490/ 490	1	Nein	-	-	Ja	6
OL6	20. Okt	18	520/ 520	2	Nein	-	-	Ja	6
OL7	03. Nov	18	500/ 500	1	Nein	-	-	Ja	6

## Laborversuche: Festbetonergebnisse

<b>Geschlossene Bauweise: Zementgehalt 360 kg/m<sup>3</sup></b>											
Beton-bezeichnung	Zeit-punkt	Rohdichte - 15x15x15 [cm] Würfel				Druckfestigkeit - 15x15x15 [cm] Würfel					
		1	2	Mittelw.	Standardabw.	1	2	Mittelw.	Standardabw.		
GL1	1d	2355	2318	2337	26	kg/m <sup>3</sup>	4,0	4,0	4,0	0,0	N/mm <sup>2</sup>
GL1	7d	2345	2346	2346	1	kg/m <sup>3</sup>	37,1	36,5	36,8	0,4	N/mm <sup>2</sup>
GL1	28d	2328	2344	2336	11	kg/m <sup>3</sup>	52,1	53,5	52,8	1,0	N/mm <sup>2</sup>
GL2	1d	2321	2362	2342	29	kg/m <sup>3</sup>	4,9	5,1	5,0	0,1	N/mm <sup>2</sup>
GL2	28d	2315	-	2315	-	kg/m <sup>3</sup>	53,2	-	53,2	-	N/mm <sup>2</sup>
<b>Geschlossene Bauweise: Zementgehalt 320 kg/m<sup>3</sup></b>											
Beton-bezeichnung	Zeit-punkt	Rohdichte - 15x15x15 [cm] Würfel				Druckfestigkeit - 15x15x15 [cm] Würfel					
		1	2	Mittelw.	Standardabw.	1	2	Mittelw.	Standardabw.		
GL3	1d	2376	-	2376	-	kg/m <sup>3</sup>	3,3	-	3,3	-	N/mm <sup>2</sup>
GL3	7d	2375	-	2375	-	kg/m <sup>3</sup>	35,1	-	35,1	-	N/mm <sup>2</sup>
GL3	28d	2334	-	2334	-	kg/m <sup>3</sup>	53,7	-	53,7	-	N/mm <sup>2</sup>
GL4	1d	2372	-	2372	-	kg/m <sup>3</sup>	5,6	-	5,6	-	N/mm <sup>2</sup>
GL4	7d	2364	-	2364	-	kg/m <sup>3</sup>	35,4	-	35,4	-	N/mm <sup>2</sup>
GL4	28d	2326	-	2326	-	kg/m <sup>3</sup>	53,3	-	53,3	-	N/mm <sup>2</sup>
GL5	1d	2363	2363	2363	0	kg/m <sup>3</sup>	7,3	7,3	7,3	0,0	N/mm <sup>2</sup>
GL5	7d	2344	2372	2358	20	kg/m <sup>3</sup>	33,4	31,3	32,4	1,4	N/mm <sup>2</sup>
GL5	28d	2346	2331	2338	10	kg/m <sup>3</sup>	48,3	47,5	47,9	0,6	N/mm <sup>2</sup>
GL6	1d	2338	2335	2337	2	kg/m <sup>3</sup>	7,3	7,6	7,5	0,2	N/mm <sup>2</sup>
GL6	7d	2357	2341	2349	11	kg/m <sup>3</sup>	38,1	38,2	38,2	0,1	N/mm <sup>2</sup>
GL6	28d	2301	2305	2303	3	kg/m <sup>3</sup>	58,4	52,0	55,2	4,5	N/mm <sup>2</sup>
GL7	1d	2346	2359	2353	9	kg/m <sup>3</sup>	3,9	4,0	4,0	0,1	N/mm <sup>2</sup>
GL7	7d	2357	2369	2363	8	kg/m <sup>3</sup>	34,3	36,4	35,4	1,5	N/mm <sup>2</sup>
GL7	28d	2354	2342	2348	8	kg/m <sup>3</sup>	55,4	54,0	54,7	1,0	N/mm <sup>2</sup>
GL9	1d	2389	2381	2385	6	kg/m <sup>3</sup>	13,8	13,4	13,6	0,3	N/mm <sup>2</sup>
GL9	7d	2381	2375	2378	5	kg/m <sup>3</sup>	43,6	45,8	44,7	1,6	N/mm <sup>2</sup>
GL9	28d	2341	2354	2347	9	kg/m <sup>3</sup>	64,9	62,2	63,6	1,8	N/mm <sup>2</sup>
GL10	1d	2361	2361	2361	0	kg/m <sup>3</sup>	5,1	5,4	5,0	0,2	N/mm <sup>2</sup>
GL10	7d	2334	2337	2336	2	kg/m <sup>3</sup>	30,1	30,6	30,3	0,3	N/mm <sup>2</sup>
GL10	28d	2300	2277	2288	16	kg/m <sup>3</sup>	43,6	44,7	44,1	0,8	N/mm <sup>2</sup>
<b>Offene Bauweise: Zementgehalt 360 kg/m<sup>3</sup></b>											
Beton-bezeichnung	Zeit-punkt	Rohdichte - 15x15x15 [cm] Würfel				Druckfestigkeit - 15x15x15 [cm] Würfel					
		1	2	Mittelw.	Standardabw.	1	2	Mittelw.	Standardabw.		
OL1	1d	2340	2338	2339	1	kg/m <sup>3</sup>	6,6	6,5	6,6	0,1	N/mm <sup>2</sup>
OL1	7d	2362	2366	2364	3	kg/m <sup>3</sup>	36,6	39,2	37,9	1,8	N/mm <sup>2</sup>
OL1	28d	2349	2351	2350	1	kg/m <sup>3</sup>	62,4	61,6	62,0	0,6	N/mm <sup>2</sup>
OL2	1d	2347	2345	2346	1	kg/m <sup>3</sup>	3,6	3,6	3,6	0,0	N/mm <sup>2</sup>
OL2	7d	2361	2358	2360	2	kg/m <sup>3</sup>	43,2	41,6	42,4	1,1	N/mm <sup>2</sup>
OL2	28d	2338	2349	2344	8	kg/m <sup>3</sup>	62,1	59,5	60,8	1,8	N/mm <sup>2</sup>
OL4	1d	2343	2340	2342	2	kg/m <sup>3</sup>	7,4	7,4	7,4	0,0	N/mm <sup>2</sup>
OL4	7d	2379	2353	2366	18	kg/m <sup>3</sup>	42,0	43,4	42,7	1,0	N/mm <sup>2</sup>
OL4	28d	2341	2345	2343	3	kg/m <sup>3</sup>	61,7	58,7	60,2	2,1	N/mm <sup>2</sup>
OL5	1d	2375	2365	2370	7	kg/m <sup>3</sup>	9,1	8,8	9,0	0,2	N/mm <sup>2</sup>
OL5	7d	2359	2365	2362	4	kg/m <sup>3</sup>	39,1	38,0	38,6	0,8	N/mm <sup>2</sup>
OL5	28d	2332	2333	2333	0	kg/m <sup>3</sup>	51,4	55,5	53,5	2,9	N/mm <sup>2</sup>
OL6	1d	2368	2381	2375	9	kg/m <sup>3</sup>	17,3	17,0	17,2	0,2	N/mm <sup>2</sup>
OL6	7d	2394	2397	2396	2	kg/m <sup>3</sup>	51,1	50,3	50,7	0,6	N/mm <sup>2</sup>
OL6	28d	2358	2368	2363	7	kg/m <sup>3</sup>	72,3	69,1	70,7	2,3	N/mm <sup>2</sup>
OL7	1d	2348	2349	2349	1	kg/m <sup>3</sup>	6,3	6,6	6,5	0,2	N/mm <sup>2</sup>
OL7	7d	2337	2336	2337	1	kg/m <sup>3</sup>	35,6	35,9	36,0	0,2	N/mm <sup>2</sup>
OL7	28d	2321	2304	2312	13	kg/m <sup>3</sup>	51,9	51,3	51,6	0,4	N/mm <sup>2</sup>

*Fotodokumentation der Konsistenz der Betone für die geschlossene Bauweise im Versuchslabor*



**Bild 161** Beton GL1,  $ao^8=52$  cm,  $am^9=50,0$  cm



**Bild 162** Beton GL2,  $ao^8=58,0$  cm



**Bild 163** Beton GL3,  $ao^8=52,5$  cm,  $am^9=53,5$  cm



**Bild 164** Beton GL4,  $ao^8=51,0$  cm



**Bild 165** Beton GL5,  $ao^8=50,0$  cm



**Bild 166** Beton GL6,  $ao^8=51,0$  cm,  $am^9=46,0$  cm

<sup>8</sup>  $ao$  = Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 ohne Zugabe eines Sedimentationsreduzierer

<sup>9</sup>  $am$  = Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 mit Zugabe eines Sedimentationsreduzierer

*Fotodokumentation der Konsistenz der Betone für die geschlossene Bauweise im Versuchslabor*



**Bild 167** Beton GL7,  $ao^8=47,5$  cm



**Bild 168** Beton GL8,  $ao^8=47,0$  cm



**Bild 169** Beton GL9,  $ao^8=49,5$  cm



**Bild 170** Beton GL10,  $ao^8=49,5$  cm

*Fotodokumentation der Konsistenz der Betone für die offene Bauweise im Versuchslabor*



**Bild 171** Beton OL1,  $ao^8=50,5$  cm



**Bild 172** Beton OL2,  $ao^8=52,0$  cm



**Bild 173** Beton OL3,  $ao^8=51,0$  cm



**Bild 174** Beton OL4,  $ao^8=48,5$  cm



**Bild 175** Beton OL5,  $ao^8=49,0$ cm



**Bild 176** Beton OL6,  $ao^8=52,0$ cm

*Fotodokumentation der Konsistenz der Betone für die offene Bauweise im Versuchslabor*



**Bild 177** Beton OL7,  $a_0^{\text{e}}=50,0$  cm



**Anlage 12**  
**Betontechnologische Machbarkeitsstudie: Groß- und Pumpversuche**

## Mischungsberechnung für die Großversuche

Stoffbezeichnung	Einheit	GG1 <sup>10</sup>		OG1-OG3 <sup>11</sup>	
Zement	kg/m <sup>3</sup>	CEM I 32,5 R	320	CEM II/A-LL 42,5 N <sup>12</sup>	360
Flugasche	M.-%v.Z.	Safament HKV W III	35	Safament HKV W III	35
Zugabewasser <sup>13</sup>	kg/m <sup>3</sup>	Zugabewasser <sup>13</sup>	176	Zugabewasser <sup>13</sup>	180
Fließmittel	M.-%v.Z.	Sky 501	1,5	Sky 501	1,8
PP-Fasern <sup>4</sup>	kg/m <sup>3</sup>	2,8dtex 6,0 mm	2	2,8dtex 6,0 mm	2
Sand 0-2	M.-%	Rehbach	37	Rehbach	37
Kalkstein 2-8	M.-%	Medenbach	33	Medenbach	33
Kalkstein 8-16	M.-%	Medenbach	30	Medenbach	30
Stoffbezeichnung	Einheit	OG4 <sup>11</sup>		OG5 <sup>11</sup>	
Zement	kg/m <sup>3</sup>	CEM I 32,5 R	360	CEM I 32,5 R	360
Flugasche	M.-%v.Z.	Safament HKV W III	35	Safament HKV W III	35
Zugabewasser <sup>13</sup>	kg/m <sup>3</sup>	Zugabewasser <sup>13</sup>	180	Zugabewasser <sup>13</sup>	180
Fließmittel	M.-%v.Z.	Sky 501	1,8	Sky 501	1,8
PP-Fasern <sup>4</sup>	kg/m <sup>3</sup>	2,8dtex 6,0 mm	2	2,8dtex 6,0 mm	2
Sand 0-2	M.-%	Rehbach	37	Rehbach	37
Kalkstein 2-8	M.-%	Medenbach	33	Medenbach	33
Kalkstein 8-16	M.-%	Medenbach	30	Medenbach	30

## Groß- und Pumpversuche: Frischbetonergebnisse

Bezeichnung der Betone	Herstellungsdatum	Umgebungs- temperatur	Frischbeton- temperatur	Ausbreitmaß a <sub>0</sub> vor Pumpprozess nach DIN EN 12350-5	Augenscheinliches Bluten	Ausbreitmaß a <sub>0</sub> nach Pumpprozess nach DIN EN 12350-5	Augenscheinliches Bluten	Herstellung von Probewürfeln für Druckfestigkeit	Herstellung Probewürfel
		°C	°C	x/ y [mm]	[1=kein bis 5=deutlich]	x/ y [mm]	[1=kein bis 5=deutlich]	Ja/ Nein	[Stk]
<b>Geschlossene Bauweise: Groß-/ Pumpversuche</b>									
GG1	09. Nov	6	10	410/ 430	2	475/480	2	Ja	9
<b>Offene Bauweise: Groß-/ Pumpversuche</b>									
OG1	09. Nov	6,0	8,0	500/ 500	2	-	-	Ja	9
OG2	09. Nov	6,0	11,5	530/ 520	3	520/530	4		
OG3	09. Nov	6,0	11,5	490/ 480	2	520/ 530	4		
OG4	17. Nov	9,0	12,0	480/ 490	3	530/ 530	5	Ja	3
OG5	17. Nov	9,0	15,0	430/ 440	1	480/ 490	2	Ja	6
OG5 <sup>14</sup>	17. Nov	-	-	-	-	430/ 430	1	Nein	-

<sup>10</sup> GG = Geschlossene Bauweise, Großversuch<sup>11</sup> OG = Offene Bauweise, Großversuch<sup>12</sup> Aufgrund technischer Probleme der Dosiereinrichtung im Transportwerk musste ein anderer Zement verwendet werden.<sup>13</sup> Aufgrund inhomogener Feuchteverteilung im Silospeicher musste der Wassergehalt für jede Mischung geringfügig variiert werden.<sup>14</sup> Nachdosierung des Sedimentationsreduzierer „RheoMatrix 100“ 0,8 M.-%v.Z. im Fahrzeugmischer bei maximaler Mischleistung und einer Mischzeit von zwei Minuten

## Groß- und Pumpversuche: Fasergehalt und Faserverteilung

Probenbezeichnung	Einheit	OG1-1	OG1-2	OG1-3	OG2-1	OG2-2	OG2-3	OG3-1 Vor Pumpen	OG3-2 Nach Pumpen
		Zugabe der PP-Fasern auf das Trockenge- misch <sup>15</sup>			Zugabe der PP-Fasern auf das Nassgemisch <sup>15</sup>			Zugabe der PP- Fasern auf das Trockengemisch <sup>16</sup>	
Filterpapier 20 °C	g	2,53	2,82	2,46	2,77	2,600	2,56	2,50	2,56
Filterpapier 105 °C	g	2,43	2,70	2,33	2,66	2,52	2,43	2,44	2,50
Trockenmasse Filterpapier+PP- Faser 105°C	g	6,83	7,32	7,00	7,48	7,25	8,20	6,57	6,62
Trockenmasse PP-Faser 105°C	g	4,40	4,62	4,67	4,82	4,73	5,77	4,13	4,12
Tiegel 105 °C	g	98,94	98,39	75,16	111,13	102,86	78,76	98,39	111,13
Tiegel + PP-Faser- Rest 450 °C	g	99,44	99,3	75,64	112,09	103,76	80,10	99,05	111,84
PP-Faser-Rest 450 °C	g	0,50	0,91	0,48	0,96	0,90	1,34	0,66	0,71
Rohdichte Frischbeton	kg/m <sup>3</sup>	2340	2340	2340	2335	2335	2335	2334	2334
Frischbetonmasse	g	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
<b>Fasergehalt</b>		<b>1,83</b>	<b>1,74</b>	<b>1,96</b>	<b>1,80</b>	<b>1,79</b>	<b>2,07</b>	<b>1,62</b>	<b>1,59</b>
Mittelwert	kg/m <sup>3</sup>	<b>1,84</b>			<b>1,89</b>			<b>1,61</b>	
Standardabweichung		0,11			0,16			0,02	

<sup>15</sup> Faserauswaschversuch nach dem Transport- und Förderprozess durchgeführt

<sup>16</sup> Faserauswaschversuch vor dem Transportprozess durchgeführt

## Groß- und Pumpversuche: Festbetonergebnisse

<b>Geschlossene Bauweise: Zementgehalt 320 kg/m<sup>3</sup></b>													
Bezeichnung	Zeitpunkt	Rohdichte - 15x15x15 [cm] Würfel						Druckfestigkeit - 15x15x15 [cm] Würfel					
		1	2	3	Mittelw.	Standardabw.	1	2	3	Mittelw.	Standardabw.		
GG1	12h	2346	2308	2311	2322	21	kg/m <sup>3</sup>	3,2	3,5	2,9	3,2 <sup>17</sup>	0,3	N/mm <sup>2</sup>
GG1	24h	2310	2308	2303	2307	4	kg/m <sup>3</sup>	17,2	17,2	17,6	17,3 <sup>17</sup>	0,2	N/mm <sup>2</sup>
GG1	28d	2281	2280	2278	2280	2	kg/m <sup>3</sup>	51,2	52,1	48,2	50,5	2,0	N/mm <sup>2</sup>
<b>Offene Bauweise: Zementgehalt 360 kg/m<sup>3</sup></b>													
Bezeichnung	Zeitpunkt	Rohdichte - 15x15x15 [cm] Würfel						Druckfestigkeit - 15x15x15 [cm] Würfel					
		1	2	3	Mittelw.	Standardabw.	1	2	3	Mittelw.	Standardabw.		
OG1+OG2	12h	2376	2364	2382	2374	9	kg/m <sup>3</sup>	2,5	2,5	2,6	2,5 <sup>17</sup>	0,1	N/mm <sup>2</sup>
OG1+OG2	24h	2337	2337	2342	2338	3	kg/m <sup>3</sup>	17,3	17,4	17,5	17,4 <sup>17</sup>	0,1	N/mm <sup>2</sup>
OG1+OG2	28d	2308	2306	2320	2311	8	kg/m <sup>3</sup>	49,7	49,8	51,2	50,3	0,8	N/mm <sup>2</sup>
OG4	12h	2438	2438	2405	2420	17	kg/m <sup>3</sup>	1,8	1,9	1,9	1,9 <sup>18</sup>	0,1	N/mm <sup>2</sup>
OG5	12h	2404	2400	2397	2400	4	kg/m <sup>3</sup>	2,0	2,1	2,0	2,0 <sup>18</sup>	0,1	N/mm <sup>2</sup>
OG5	28d	2394	2393	2393	2393	1	kg/m <sup>3</sup>	56,4	53,9	58,1	56,1	2,1	N/mm <sup>2</sup>

<sup>17</sup> Gemessene Frühfestigkeit bei einer Betoniertemperatur von 6 °C<sup>18</sup> Gemessene Frühfestigkeit bei einer Betoniertemperatur von 9 °C, Proben wurden nach ca. 3 h ab Herstellung nochmal transportiert

*Fotodokumentation der Konsistenz der Betone für die geschlossene Bauweise im Transportbetonwerk*



**Bild 178** Beton GG1,  $ao^8=42,0$  cm, vor Pumpvorgang



**Bild 179** Beton GG1,  $ao^8=47,5$  cm, nach Pumpvorgang



*Fotodokumentation der Konsistenz der Betone für die offene Bauweise im Transportbetonwerk*



**Bild 180** Beton OG1,  $a_0^8=50,0$  cm, vor Pumpvorgang



**Bild 181** Beton OG2,  $a_0^8=52,5$  cm, vor Pumpvorgang



**Bild 182** Beton OG2,  $a_0^8=52,5$  cm, nach Pumpvorgang





**Bild 183** Beton OG3,  $ao^8=48,5$  cm, vor Pumpvorgang



**Bild 184** Beton OG3,  $ao^8=52,5$  cm, nach Pumpvorgang



**Bild 185** PP-Faserzugabe auf die Trockenmischung bei allen Betonen mit Ausnahme von Beton OG3



**Bild 186** Simulation des Förderprozesses (Pumpvorganges)



**Bild 187** Beton OG4,  $a_0=48,5$  cm, vor Pumpvorgang



**Bild 188** Beton OG4,  $a_0=53,0$  cm, nach Pumpvorgang



**Bild 189** Beton OG5,  $a_0=43,5\text{cm}$ , vor Pumpvorgang



**Bild 190** Beton OG5,  $a_0=48,5\text{cm}$ , nach Pumpvorgang



**Bild 191** Beton OG5,  $a_m=43,0\text{cm}$ , nach Pumpvorgang mit 0,8 M.-% v.Z. Sedimentationsreduzierer



## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

#### 1995

- B 6: Zur Berechnung von Platten mit schwacher Querbewehrung  
Kaschner € 11,50
- B 7: Erprobung von dichten lärmindernden Fahrbahnbelägen  
für Brücken  
Sczyslo € 12,50
- B 8: Untersuchungen am Brückenbelag einer orthotropen Fahr-  
bahnplatte  
Krieger, Rath € 17,50
- B 9: Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethode bei Beton-  
brücken  
Krieger € 13,00
- B 10: Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln  
Maaß, Krieger € 12,50

#### 1996

- B 11: Fahrbahnbeläge auf Sohlen von Trogbauwerken  
Wruck € 12,00
- B 12: Temperaturmessungen bei der Verbreiterung der Rodenkir-  
chener Brücke  
Goebel € 15,50
- B 13: Strukturanalyse von Beton  
Gatz, Gusia € 11,00

#### 1997

- B 14: Verhalten von Fahrbahnübergängen aus Asphalt infolge  
Horizontallasten  
Krieger, Rath € 16,00
- B 15: Temperaturbeanspruchung im Beton und Betonerersatz beim  
Einbau von Abdichtungen  
Großmann, Budnik, Maaß € 14,50
- B 16: Seilverfüllmittel – Mechanische Randbedingungen für Brük-  
kenseile  
Eilers, Hemmert-Halswick € 27,50
- B 17: Bohrverfahren zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe  
und des Chloridgehaltes von Beton  
Gatz, Gusia, Kuhl € 14,00

#### 1998

- B 18: Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode  
für Betonbrücken  
Krieger, Krause, Wiggerhauser € 16,50
- B 19: Untersuchung von unbelasteten und künstlich belasteten  
Beschichtungen  
Schröder € 11,00
- B 20: Reaktionsharzgebundene Dünnbeläge auf Stahl  
Eilers, Ritter € 12,50
- B 21: Windlasten für Brücken nach ENV 1991-3  
Krieger € 10,50

#### 1999

- B 22: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbau-  
werken  
Haardt € 11,50

- B 23: Bewertung und Oberflächenvorbereitung schwieriger  
Untergründe  
Schröder, Sczyslo € 11,00

- B 24: Erarbeitung einer ZTV für reaktionsharzgebundene Dünn-  
beläge auf Stahl  
Eilers, Stoll € 11,00

- B 25: Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von  
Brücken- und Ingenieurbauwerken  
Haardt € 12,50

- B 26: Einsatzmöglichkeiten von Kletterrobotern bei der Bauwerks-  
prüfung  
Krieger, Rath, Berthold € 10,50

- B 27: Dynamische Untersuchungen an reaktionsharzgebundenen  
Dünnbelägen  
Eilers, Ritter, Stoll € 11,00

#### 2000

- B 28: Erfassung und Bewertung von reaktionsharzgebundenen  
Dünnbelägen auf Stahl  
Eilers € 11,00

- B 29: Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Karbo-  
natisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton  
Gatz, Quaas € 12,00

- B 30: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutions-  
arme Spritzbetone  
Heimbecher € 11,00

- B 31: Verträglichkeit von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen  
mit Abdichtungssystemen nach den ZTV-BEL-ST  
Eilers, Stoll € 10,50

- B 32: Das Programm ISOCORRAG: Ermittlung von Korrosivitäts-  
kategorien aus Massenverlusten  
Schröder € 11,50

- B 33: Bewehrung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen  
Fahrbahnplatten  
Eilers, Sczyslo € 17,00

- B 34: Neue reaktionsharzgebundene Dünnbeläge als Fahrbahn-  
beläge auf einem D-Brücken-Gerät  
Eilers, Ritter € 13,00

#### 2001

- B 35: Bewehrung von Brückenbelägen auf Betonbauwerken  
Wruck € 11,50

- B 36: Fahrbahnübergänge aus Asphalt  
Wruck € 11,00

- B 37: Messung der Hydrophobierungsqualität  
Hörner, von Witzhausen, Gatz € 11,00

- B 38: Materialtechnische Untersuchungen beim Abbruch der  
Talbrücke Haiger  
Krause, Wiggerhauser, Krieger € 17,00

- B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken  
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

#### 2003

- B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti  
von Weschpfennig € 11,50

- B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahrbahn-  
tafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht  
Eilers, Kuchler, Quaas € 12,50

- B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau  
Städling, Krocker € 12,00

- B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das  
deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2  
Haardt € 13,50

- B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung  
Hemmert-Halswick, Ullrich € 12,50

- B 45: Erfahrungssamlungen:  
**Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile**  
 Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken  
 Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus wetterfesten Stählen  
 Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brückenseilen und -kabeln  
 Hemmert-Halswick € 13,00

## 2004

- B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im Tunnelbau  
 Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

## 2005

- B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken  
 Steinauer, Scharnigg € 13,50

## 2006

- B 48: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von Brückenbauwerken  
 Holst, Streicher, Gardei, Kohl, Wöstmann, Wiggenseuser € 15,00  
 B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haftung von Epoxidharz  
 Raupach, Rößler € 13,50  
 B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3  
 Holst € 13,50  
 B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen Hydrophobierungsmitteln  
 Panzer, Hörner, Kropf € 12,50  
 B 52: Brückenseile mit Galfan-Überzug – Untersuchung der Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen  
 Friedrich, Staeck € 14,50  
 B 53: Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen  
 Tauscher € 14,50  
 B 54: Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Rath, Berthold, Lähner € 12,50

## 2007

- B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50  
 B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositions-kategorie XF2  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50  
 B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Steinauer, Mayer, Kündig € 26,50  
 B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel  
 Sistenich € 14,50

## 2008

- B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme  
 Schröder € 12,50

- B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung - Bewehrung  
 Schröder € 13,50  
 B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten  
 Schröder, Staeck € 13,00  
 B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff  
 Eilers € 12,00  
 B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint € 17,50  
 B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositions-kategorie XF4  
 Bramshuber, Spörel, Warkus € 12,50

## 2009

- B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega € 14,50  
 B 66: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln  
 Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann, Baltzer, Riepe, Kündig € 14,00  
 B 67: Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln  
 Blossfeld € 17,50  
 B 68: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler € 29,50  
 B 69: Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln  
 Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger € 18,50  
 B 70: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen  
 Tauscher € 14,50

## 2010

- B 71: Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßentunnelbau  
 Kuhlmann, Euler € 22,50  
 B 72: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen  
 Weschpennig, Kropf, von Witzhausen € 13,50  
 B 73: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König € 21,00

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW  
 Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
 Postfach 10 11 10  
 D-27511 Bremerhaven  
 Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
 Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
 Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
 Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.