

## Schlussbericht

Betreff:



Teilvorhaben: Kurzzeitdynamische Baugrund-Bauwerks-Interaktion und  
Entwicklung brandbeständiger ultrahochfester Betone

Teilbereich: Entwicklung brandbeständiger ultrahochfester Betone für  
hochdynamische Beanspruchungen

Auftraggeber:

Bundesministerium für Bildung und Forschung  
53175 Bonn



Berichtersteller:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller

Förderkennzeichen.:

13N9609

Berichtsdatum: 31.10.2011

Textseiten: 51

Anlagen: 1

Bearbeiter/in:

Dipl.-Ing. Jennifer C. Scheydt

Durchwahl:

+49 721 608-46763

E-Mail:

jennifer.scheydt@kit.edu

Ausfertigungen:

1fach: Auftraggeber

1fach: IMB Karlsruhe

Abt. Baustoffe und Betonbau

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Durchführung des Forschungsvorhabens</b> .....	<b>3</b>
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
1.3	Kooperationen .....	5
1.4	Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens.....	6
<b>2</b>	<b>Darstellung der erzielten Ergebnisse</b> .....	<b>11</b>
2.1	AP 2-2: Komponentenentwicklung und Qualifizierung in einer Laborumgebung.....	11
2.2	AP 3-2: Kopplung/Verbindungssystem für dynamische Belastungen.....	11
2.2.1	Versuche zur Auswahl eines geeigneten Verpressmaterials.....	12
2.2.2	Herstellung der Versuchskörper und des Versuchsstands.....	14
2.2.3	Versuchsdurchführung.....	16
2.3	AP 3-3: Duktiler Hochleistungsbeton bei hochdynamischer Beanspruchung.....	18
2.3.1	Möglichkeiten zur Maximierung der Duktilität des Festbetons.....	18
2.3.2	Mörtel- und Betonentwicklung im Labormaßstab.....	21
2.3.3	Einsatz einer Faserbewehrung zur Erhöhung des Widerstands gegenüber hochdynamischer Beanspruchung.....	24
2.3.4	Charakterisierung des Frischbetonverhaltens im Technikumsmaßstab.....	33
2.3.5	Charakterisierung des Festbetonverhaltens.....	34
2.3.6	Versuche zur Hochtemperaturbeaufschlagung.....	37
<b>3</b>	<b>Vergleich der erreichten Ergebnisse mit den Projektzielen</b> .....	<b>43</b>
3.1	Anforderungen an die Betonherstellung und die Tübbingproduktion.....	43
3.2	Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften des entwickelten Betons.....	43
3.3	Anforderungen an den Widerstand des entwickelten Betons gegenüber hochdynamischen Lasten.....	44
<b>4</b>	<b>Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen</b> .....	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>Normen und Richtlinien</b> .....	<b>51</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>52</b>

## **1 Durchführung des Forschungsvorhabens**

Beim Forschungsvorhaben AISIS (Automatisierte Informationsgewinnung und Schutz kritischer Infrastruktur im Katastrophenfall) handelt es sich um ein Verbundprojekt, das im Rahmen des Programms "Forschung für die zivile Sicherheit" der Bundesregierung als Teil der Hightech-Strategie durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wurde.

### **1.1 Aufgabenstellung**

Das Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Abteilung Baustoffe und Betonbau, war im Rahmen des Verbundprojekts AISIS mit der Durchführung des Teilprojekts *Kurzzeitdynamische Baugrund-Bauwerks-Interaktion und Entwicklung brandbeständiger ultrahochfester Betone* (Teilbereich *Entwicklung brandbeständiger ultrahochfester Betone für hochdynamische Beanspruchungen*) betraut.

Insgesamt wurden am IMB drei Arbeitspakete (AP) innerhalb des Verbundprojekts AISIS bearbeitet, deren Ziele nachfolgend in Kürze zusammengefasst sind. Aus Abbildung 1 ist zu entnehmen, wie die jeweiligen Arbeitspakete des IMB in das Gesamtvorhaben AISIS eingebunden waren.

#### AP 2-2: Komponentenentwicklung und Qualifizierung in einer Laborumgebung

Innerhalb von AP 2-2 war die Eignung von sog. „Energietübbing“ zur Energiegewinnung durch die Nutzung thermischer Gradienten zu überprüfen, die mit Absorbieren zur Gewinnung geothermischer Energie ausgestattet waren. Insbesondere sollten Erkenntnisse zur Auswirkung der Temperaturgradienten auf den Beton (Rissbildung) gewonnen werden.

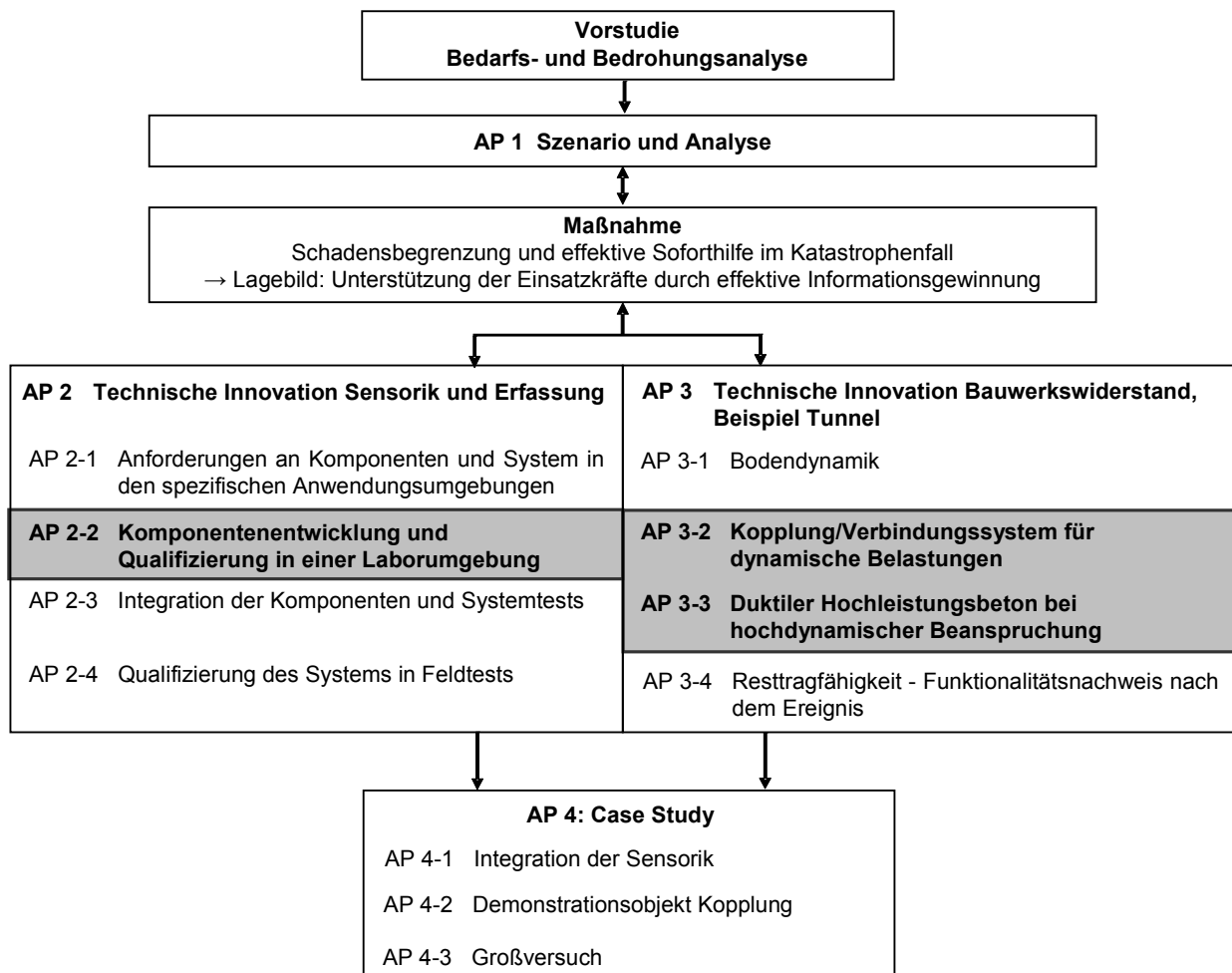
#### AP 3-2: Kopplung/Verbindungssystem für dynamische Belastungen

Ziel dieses Arbeitspakets war die Untersuchung der Wirkungsweise verschiedener Kopplungen, mit denen die einzelnen Tübbing-Elemente miteinander verbunden waren, vor allem im Hinblick auf eine hochdynamische Beanspruchung. Hierzu wurden Bauteilversuche an großformatigen Tübbingmodellen durchgeführt.

#### AP 3-3: Duktiler Hochleistungsbeton bei hochdynamischer Beanspruchung

Innerhalb von AP 3-3 sollte ein ultrahochfester Beton entwickelt und charakterisiert werden, der einen maximalen Widerstand sowohl gegenüber einer Hochtemperaturbeanspruchung als auch gegenüber einer hochdynamischen Beanspruchung aufweist. Die Betonentwicklung sollte nach Möglichkeit unter Einsatz der im Betonfertigteilwerk der Fa. Rekers vorhandenen Ausgangsstoffe erfolgen.

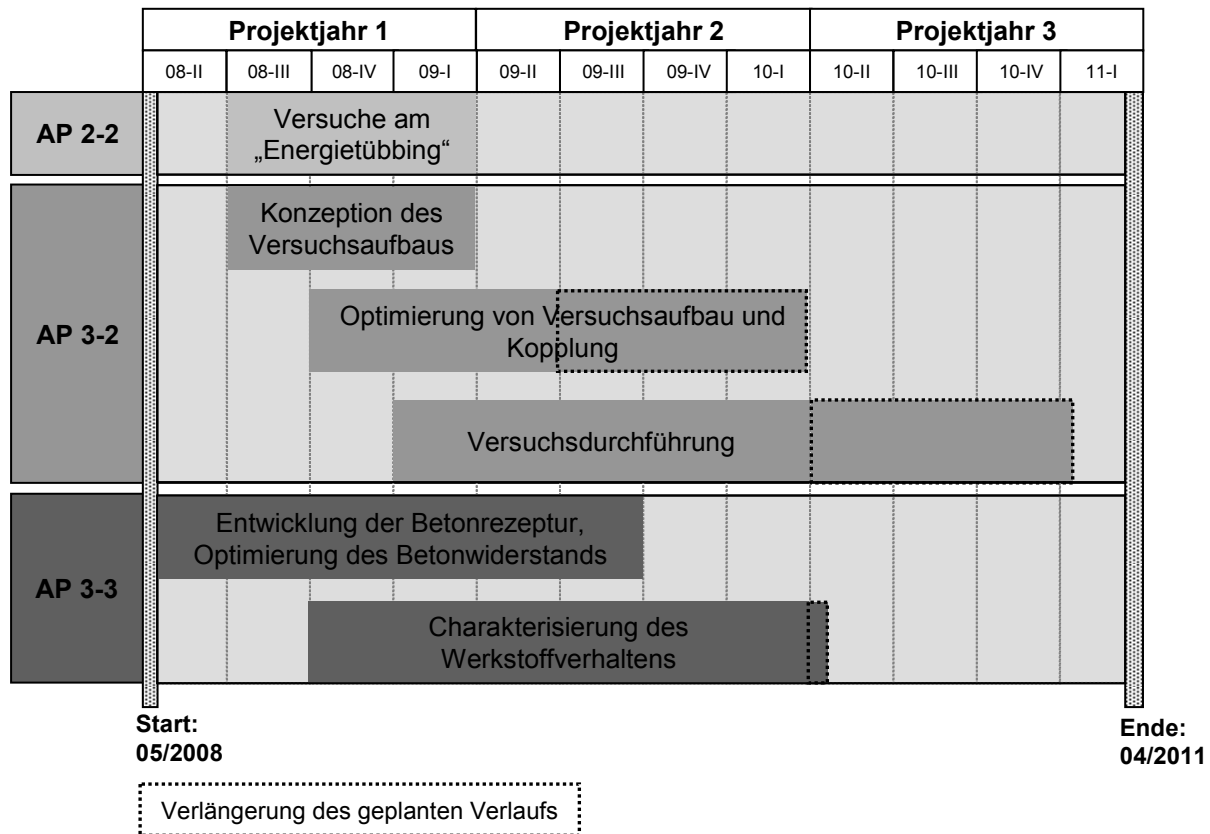
Die Arbeiten in AP 3-3 stellten den Schwerpunkt innerhalb des am IMB bearbeiteten Teilprojekts dar.



**Abbildung 1:** Übersicht über das Forschungsvorhaben AISIS mit Einordnung der am IMB bearbeiteten Arbeitspakete (markiert)

## 1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablaufplan zur Durchführung der Arbeitspakete 2-2, 3-2 und 3-3 am IMB ist in Abbildung 2 dargestellt.



**Abbildung 2:** Ablaufplan zur Durchführung der Arbeitspakete 2-2, 2-3 und 3-3 am IMB

Die Laufzeiten der Arbeiten in AP 3-2 zur Optimierung des Versuchsaufbaus und der Kopplung sowie zur Versuchsdurchführung wie auch die Arbeiten in AP 3-3 zur Charakterisierung des Werkstoffverhaltens des entwickelten Betons wurden verlängert. Die Gesamtlaufzeit des Teilprojekts blieb hiervon unberührt.

## 1.3 Kooperationen

Innerhalb der AP 2-2 und 3-2 fand eine enge Zusammenarbeit des IMB vor allem mit den Projektpartnern Ed. Züblin AG und Rekers Betonwerk GmbH & Co. KG (nachfolgend Fa. Rekers) statt.

Die Ed. Züblin AG stellte dem IMB zum einen den „Energietübbing“ zur Qualifizierung des Tübbingverhaltens infolge von Temperaturgradienten zur Verfügung. Zudem erfolgte die Untersuchung der Tübbingkopplung in enger Absprache mit der Ed. Züblin AG. Diese übernahm die Konzeption der Tübbingkopplung und die Bemessung der großformatigen Tübbingmodelle, während das IMB die großformatigen Bauteilversuche an den Tübbingmodellen konzipierte und durchführte. Darüber hinaus wurden in Absprache mit der Ed. Züblin AG Anforderungen an die mechanischen Kennwerte des zu entwickelnden Betons festgelegt.

Die Entwicklung eines ultrahochfesten Betons mit erhöhtem Widerstand gegenüber einer Brandbeanspruchung und hochdynamischen Lasten erfolgte im regen Dialog mit der Fa. Rekers, aus dem Anforderungen an die Verarbeitbarkeit des Frischbetons und an die Verfahren zur Herstellung des Betons resultierten.

Außerdem wurde die Temperaturkurve zur Untersuchung der Hochtemperaturbeständigkeit des entwickelten Betons in Absprache mit dem Technischen Hilfswerk (THW) und der Ed. Züblin AG festgelegt.

Das Ernst-Mach-Institut untersuchte im Rahmen des Projekts den Widerstand des entwickelten Betons bei hochdynamischer Beanspruchung unter Anwendung eines Split-Hopkinson-Bars, der sich im Besitz des IMB befindet. Hierzu stellte das IMB dem Ernst-Mach-Institut geeignete Probekörper aus dem entwickelten ultrahochfesten Beton zur Verfügung.

Neben den nachfolgend dargelegten, am IMB erzielten Ergebnissen sind weitere Ergebnisse zu den genannten Schnittstellen daher auch den Berichten der entsprechenden Kooperationspartner zu entnehmen.

#### **1.4 Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens**

Stahlbeton ist bei Explosionsereignissen nur bedingt widerstandsfähig, da die Komponente Beton aufgrund des spröden Verhaltens frühzeitig versagt. Im Nahbereich von Detonationen ist deshalb stets mit erheblichen Schädigungen zu rechnen und nur bei starken Bauteildimensionierungen („Bunker-Bauweise“) die Perforation auszuschließen. Durch den Einsatz von Faserbeton mit hohen Festigkeiten kann die Schädigung drastisch reduziert werden.

Untersuchungen zum Verhalten des ultrahochfesten Betons Ductal<sup>®</sup> unter hochdynamischer Beanspruchung (Split-Hopkinson-Bar, Bauteiluntersuchungen bei Beschuss und Explosion) wurden in Zusammenarbeit von Ductal<sup>®</sup> (VSL Australia Pty Ltd) und der Universität Melbourne durchgeführt /Rebentrost08/. Rebentrost et al. machen keine detaillierten Angaben zur Zusammensetzung der untersuchten Betone. Sie geben lediglich an, dass es sich bei den untersuchten Betonen um faserbewehrte Feinkornbetone mit Druckfestigkeiten im Bereich von 160 bis 200 N/mm<sup>2</sup> und einer Biegezugfestigkeit im Bereich zwischen 30 und 40 N/mm<sup>2</sup> handelte. Generell zeigte der untersuchte Beton nur geringfügige Schäden infolge der hochdynamischen Beanspruchung, weshalb er sich nach Rebentrost et al. besonders für den Einsatz in gefährdeter Infrastruktur eignet.

Auch Farnam et al. führten Untersuchungen zum Widerstand von ultrahochfestem Feinkornbeton, der nach dem SIFCON-Verfahren hergestellt worden war, gegenüber hochdynamischer Beanspruchung durch /Farnam08/. Als Beanspruchung diente ein Stahlprojektil ( $d/h = 50 \text{ mm}/550 \text{ mm}$ , Gewicht 8,5 kg), das aus einer Distanz von 1 m mit einer Geschwindigkeit von 4,23 m/s periodisch auf die Betonplatten ( $300 \times 300 \times 23 \text{ mm}^3$  bzw.  $300 \times 300 \times 40 \text{ mm}^3$ ) aufprallte. Erfasst wurde die Durchbiegung der Platten in Abhängigkeit der Aufprall-Anzahl sowie die zum Versagen der Platten benötigte Aufprall-Anzahl. Zur Steigerung der Duktilität des Betons wurden Stahl-, Alloy- und Polypropylenfasern mit Gehalten zwischen 0,4 und 4 Vol.-% eingesetzt. Teilweise wurden die Fasern kombiniert (Stahl- und Polypropylenfasern). Farnam et al. stellten fest, dass die Anwendung von Alloy- und Polypropylenfasern den Widerstand gegenüber dem Anprall nur geringfügig beeinflusste. Beim Einsatz von Stahlfasern nahm die Duktilität des Betons mit zunehmendem Fasergehalt und zunehmender Faserlänge zu.

Nöldgen et al. /Nöldgen08/ untersuchten mit Hilfe von Computersimulationen die Auswirkungen eines Flugzeuganpralls an Elemente aus ultrahochfestem Beton in einem Hochhaus. Der von Nöldgen et al. untersuchte ultrahochfeste Grobkornbeton (Stahlfasergehalt 2,5 Vol.-%) wies eine um den Faktor 108 bis 165 höhere Bruchenergie auf (ermittelt unter statischen Bedingungen) als konventioneller, unbewehrter Beton (C25/30). Erste Simulationsergebnisse zeigten einen signifikant höheren Widerstand des ultrahochfesten Betons gegenüber der hochdynamischen Last im Vergleich zum konventionellen Beton.

Großbrandversuche an Tübbingen führten Dehn et al. im Rahmen der Planung des City-Tunnels in Leipzig durch /Dehn06/. Hierbei wurden Stahlbetontübbinge der Betonfestigkeitsklassen C45/55 und C50/60 mit einem Polypropylenfasergehalt von 0, 2, 3 und 4 kg/m<sup>3</sup> Beton geprüft. Die Brandbeanspruchung erfolgte auf Grundlage der Temperatur-Zeit-Kurve des Eisenbahn-Bundesamtes (EBA-Brandkurve). Während der Brandeinwirkungsdauer von 170 Minuten wurden die Tübbinge zusätzlich mit einer Normalkraft von 2600 kN/m beaufschlagt.

Bei den Tübbingen, die ohne Faserbewehrung hergestellt worden waren, konnten massive Abplatzungen beobachtet werden (vgl. Abbildung 3). Die Tübbinge, bei denen Polypropylenfasern zum Einsatz kamen, bildeten lediglich feine Längs- und Querrisse mit einer Rissöffnung von ca. 0,1 mm aus (vgl. Abbildung 4). Durch eine Steigerung des Faseranteils von 2 auf 4 kg/m<sup>3</sup> konnte keine weitere Verbesserung des Brandverhaltens beobachtet werden.

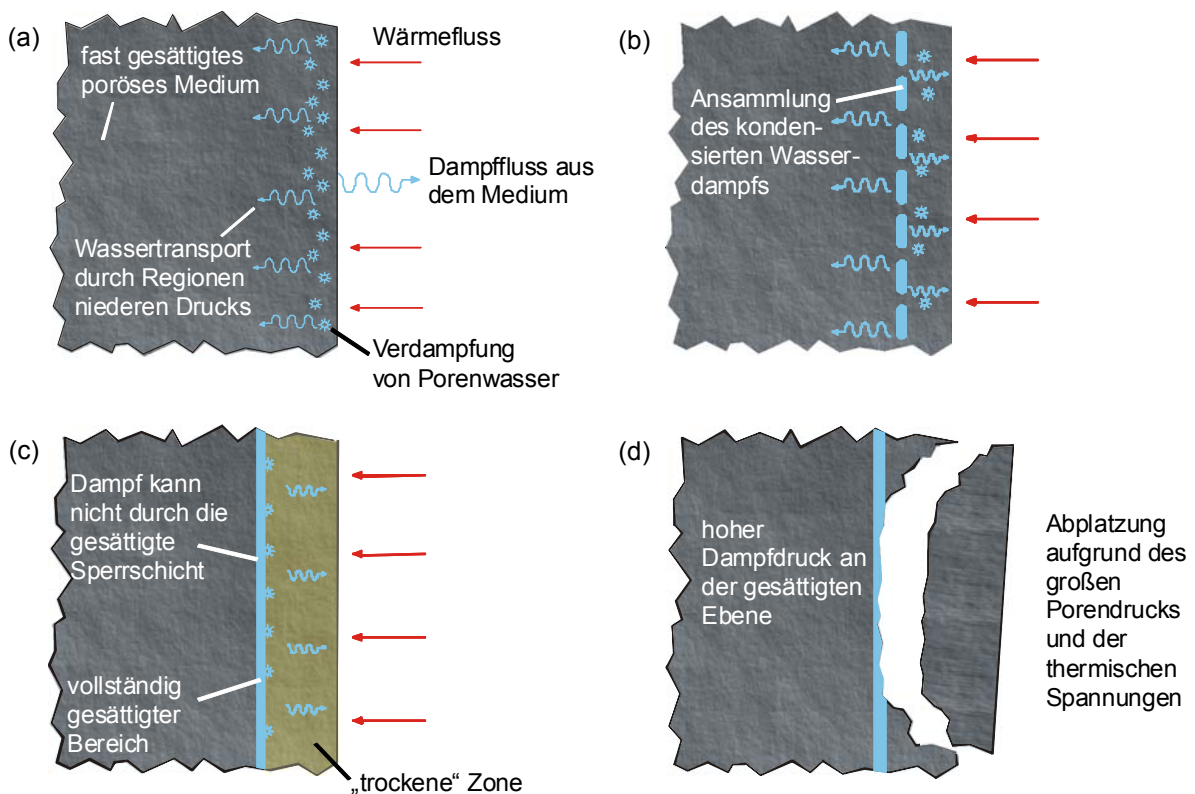


**Abbildung 3:** Tübbinge ohne Polypropylenfaserzusatz nach dem Brandversuch (links) und Detailaufnahme (rechts) /Dehn06/



**Abbildung 4:** Tübbinge mit 2 kg/m<sup>3</sup> Polypropylenfaserzusatz nach dem Brandversuch (links) und Detailaufnahme (rechts) /Dehn06/

Abbildung 5 veranschaulicht den Versagensmechanismus von Beton im Brandfall. Infolge der hohen Temperaturen entstehen hohe Dampfdrücke beim Verdampfen des Wassers im Betoninnern. Kann der Wasserdampf aufgrund eines dichten Porensystems nicht entweichen, entstehen oberflächennahe Ablplatzungen. Die Wirkungsweise von Polypropylenfasern in normal- und hochfestem Beton im Brandfall beruht auf dem Prinzip, dass die Fasern bei hohen Temperaturen aufschmelzen und somit Hohlräume hinterlassen, die dann als Austrittswege für das verdampfende Wasser im Inneren des Betons fungieren.

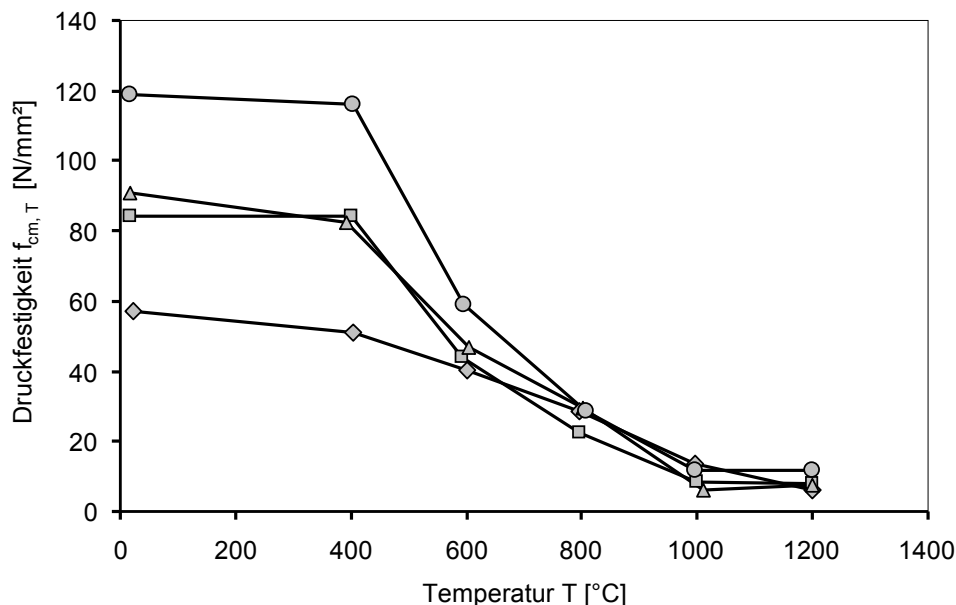


**Abbildung 5:** Ablauf des Versagensmechanismus von Beton im Brandfall, nach /Schneider03/



Nur wenige Forschungsprojekte befassten sich zum Zeitpunkt des Projektstarts mit dem Versagensmechanismus im Brandfall sowie dem Brandwiderstand speziell von ultrahochfestem Beton /Müller07/. In der Literatur kontrovers diskutiert wird die Frage, inwieweit das Verhalten konventioneller Betone auf das Verhalten von ultrahochfestem Beton übertragbar ist, da sich das Mikrogefüge der Betone hinsichtlich der Porosität deutlich unterscheidet. Schneider et al. vermuten, dass Polypropylenfasern für ultrahochfeste Betone ungeeignet sind, da sie beim Aufschmelzen anders als in konventionellen Betonen kein Kapillarsystem ausbilden und die Faserschmelze zusätzliche Spannungen im Betongefüge verursachen kann /Schneider03/.

In Versuchen zum Brandwiderstand von UHPC an der Universität Kassel sowie an der Universität Leipzig hat sich gezeigt, dass ultrahochfeste Betone, die lediglich unter Zugabe einer Stahlfaserbewehrung hergestellt wurden, keinen ausreichenden Feuerwiderstand aufweisen /Schneider03, Bornemann02/. Die bisherigen Versuchsergebnisse zur Auswirkung der Zugabe von Polypropylenfasern auf das Brandverhalten weichen voneinander ab. Während an der Universität Leipzig nach Zugabe von Polypropylenfasern sogar eine Verschlechterung des Brandwiderstands festgestellt wurde /Schneider03/, zeigten die an der Uni Kassel geprüften Betone bei einer Zugabe von Polypropylenfasern einen ausreichenden Brandwiderstand /Bornemann02/. Erste Versuche aus Leipzig und München an brandbeanspruchten Probekörpern unter gleichzeitiger statischer Lasteinwirkung legten den Schluss nahe, dass infolge der zusätzlichen Spannungen und Dehnungen früher Abplatzungen auftreten, so dass die Feuerwiderstandsklasse des Bauteils gemindert wird /Heinz04/.



**Abbildung 6:** Druckfestigkeit  $f_{cm,T}$  verschiedener Betone infolge der Beaufschlagung mit der Temperatur  $T$  ( $f_{cm,20^\circ\text{C}} = 57/84/91/118 \text{ N/mm}^2$ , Zement: CEM I, Zuschlag: Granit)

Schneider und Horvath befassten sich speziell mit der Thematik des Brandschutzes von Tunnelbauten /Horvath04, Schneider06/. Das Abplatzen von UHPC im Brandfall bezeichnet Horvath als „besonders schwieriges Problem“, dem am besten durch die Kombination von PP-Fasern und die Zugabe von Nanosilika anstelle von Mikrosilika begegnet werden kann /Horvath04/.

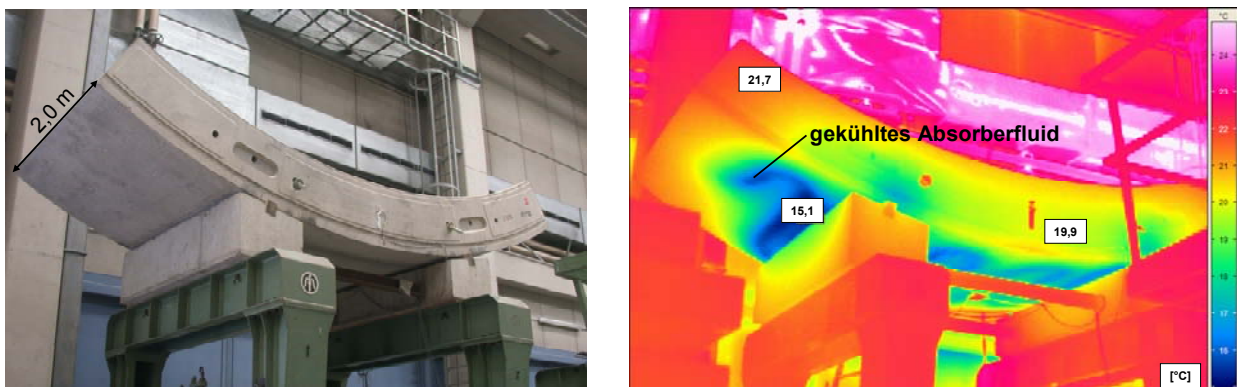
Einen Überblick über das mechanische Verhalten von hochfestem und ultrahochfestem Beton unter bzw. nach einer Brandbeanspruchung geben Bamonte et al. /Bamonte08/. Sie fassen zusammen, dass mit steigender Betonfestigkeit auch der relative Abfall der mechanischen Eigenschaften infolge einer Hochtemperaturbeanspruchung zunimmt (vgl. Abbildung 6). Stärker betroffen als die Druckfestigkeit sind hierbei die Zugfestigkeit und der E-Modul.

## 2 Darstellung der erzielten Ergebnisse

Die Ergebnisse, die im Rahmen des Teilvorhabens *Kurzzeitdynamische Baugrund-Bauwerks-Interaktion und Entwicklung brandbeständiger ultrahochfester Betone* (Teilbereich *Entwicklung brandbeständiger ultrahochfester Betone für hochdynamische Beanspruchungen*) am IMB erzielt wurden, sind nachfolgend dargelegt.

### 2.1 AP 2-2: Komponentenentwicklung und Qualifizierung in einer Laborumgebung

Innerhalb von AP 2-2 wurde dem IMB von der Ed. Züblin AG ein mit Absorberleitungen ausgestatteter „Energietübbing“ (Breite = 2,0 m, Dicke = 0,6 m, Länge = 5,04 m, Innenradius = 4,8 m) zur Verfügung gestellt, dessen Verhalten infolge einer zyklischen Temperaturbeaufschlagung erfasst wurde.



**Abbildung 7:** Aufnahmen des „Energietübbings“ (mit der Fotokamera (links) und der Wärmebildkamera (rechts) während der Simulation einer Heizphase (Absorberfluid gekühlt)

Während mittels einer Wärmepumpe verschiedene jahreszeitabhängige Heiz-Kühlphasen im Tübbing simuliert wurden, wurde der Temperaturverlauf im Tübbing mit Hilfe einer Wärmebildkamera erfasst. Abbildung 7 zeigt den Tübbing im Versuch während der Simulation der Heizphase. Gleichzeitig wurde die Rissentwicklung infolge der Temperaturbeaufschlagung erfasst. Im Laufe der Versuche wuchs die Anzahl der Risse von 20 vor Beginn der Beaufschlagung auf 32 Risse nach Versuchsende an. Alle Risse traten lediglich oberflächlich an der Außenseite auf (Rissbreite maximal 0,15 mm) und beeinträchtigen somit weder die Dauerhaftigkeit noch die Dichtigkeit des Bauteils. Es kann also davon ausgegangen werden, dass eine Nutzung in einem dem Versuch vergleichbaren Temperaturbereich keinen negativen Einfluss auf den Beton hat.

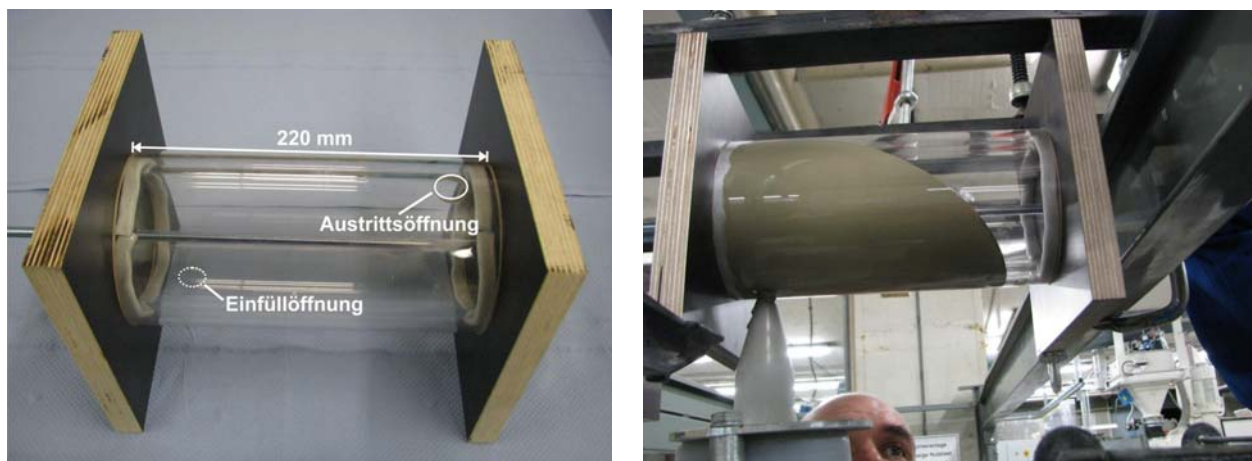
Weitere Ausführungen zu den Versuchen sind den Berichten der Ed. Züblin AG zu entnehmen.

### 2.2 AP 3-2: Kopplung/Verbindungssystem für dynamische Belastungen

Die Bearbeitung des Arbeitspakets AP 3-2 erfolgte in enger Kooperation mit der Ed. Züblin AG. Untersucht wurde das Tragverhalten zweier durch einen Stahlbolzen gekoppelter Stahlbetonplatten (realmaßstäbliches, ebenes Tübbingmodell). Aufgabe des IMB war zunächst die Durchführung von Versuchen zur Auswahl eines geeigneten Verpressmaterials. Im Anschluss erfolgten die Herstellung der realmaßstäblichen, ebenen Tübbingmodelle, der Aufbau des Versuchsstands sowie die Versuchsdurchführung am IMB. Insgesamt wurden vier großformatige Bauteilversuche durchgeführt.

### 2.2.1 Versuche zur Auswahl eines geeigneten Verpressmaterials

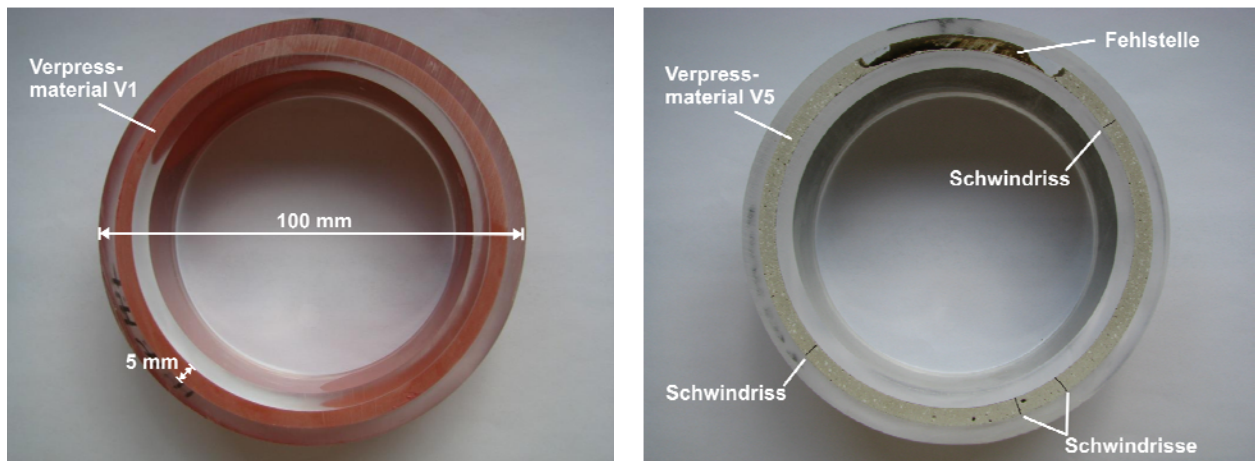
Zunächst wurde die Wirkungsweise der unterschiedlichen Materialien charakterisiert, die zum Verpressen des Zwischenraums zwischen Kopplungselement und Tübbing zur Auswahl standen. Um das Materialverhalten während des Verpressvorgangs beurteilen zu können, wurde ein Versuchsaufbau aus zylindrischen Hohlprofilen (Plexiglas) konzipiert und am IMB gefertigt, siehe auch Abbildung 8. Hierbei wurden die Materialien vor allem danach beurteilt, ob sie in der Lage waren, den Hohlraum ohne Fehlstellen und Lufteinschlüsse auszufüllen. Außerdem wurde die Verarbeitbarkeit und Anwenderfreundlichkeit der Materialien bewertet.



**Abbildung 8:** Versuchsaufbau zur Beurteilung der Verpressmaterialien (links) und Verpressarbeiten (rechts)

Insgesamt wurden fünf Verpressmaterialien hinsichtlich ihrer Eignung untersucht. Hierbei handelte es sich um jeweils zwei Verpressmörtel und zwei Materialien auf Polyurethanbasis sowie um ein Material auf Epoxidharzbasis, siehe auch Anhang A, Tabelle A-1.

Während des Verpressvorgangs wurden die zwei Komponenten des Verpressmaterials V1 automatisch in der mitgelieferten Kartuschenspritze vermischt. Die Anwendung des Materials war dadurch unkompliziert und die Verpressarbeiten konnten schnell und sauber durchgeführt werden. Die beiden Komponenten der Materialien V2 und V3 waren vor dem Einsatz unter Anwendung eines manuell bedienbaren Rührgeräts zu mischen, wodurch die Verpressarbeiten mit einem zeitlich höheren Aufwand verbunden waren. Für das Verpressen kam eine Kartuschenspritze des Herstellers zum Einsatz. Die Verpressmörtel V4 und V5 mussten vor dem Verpressen unter Wasserzugabe in einem Mörtelmischer angerührt werden. Der Hersteller stellte kein Gerät zur Verfügung, das zum Verpressen der Mörtel eingesetzt werden konnte, was die Verpressarbeiten deutlich erschwerte. Verpresst wurde schließlich unter Anwendung der Kartuschen und der Kartuschenspritze, mit denen auch die Materialien V2 und V3 verpresst worden waren. Die Verpressarbeiten der Materialien V4 und V5 gestalteten sich somit als sehr aufwendig und nicht anwenderfreundlich.

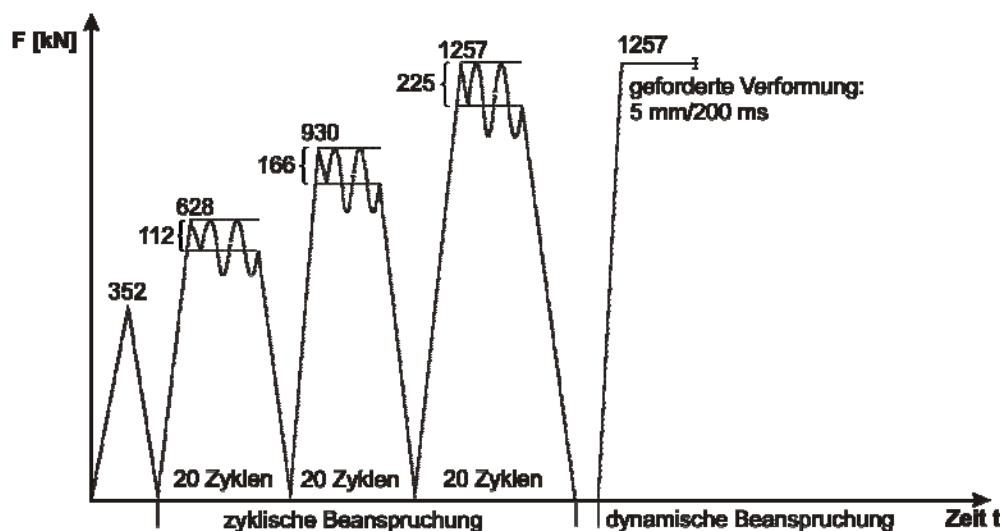


**Abbildung 9:** Schnitt durch das mit dem Material V1 (links) bzw. V5 (rechts) verpresste Hohlprofil

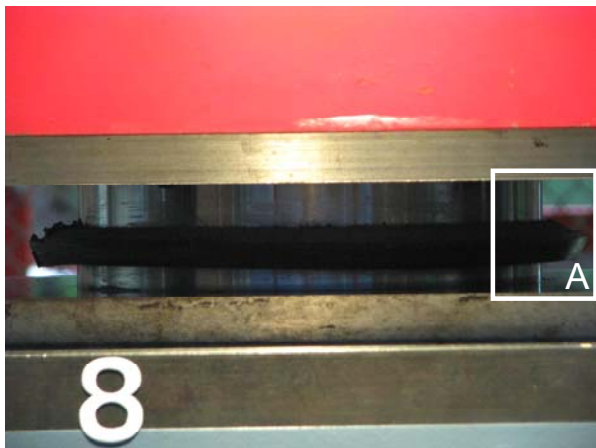
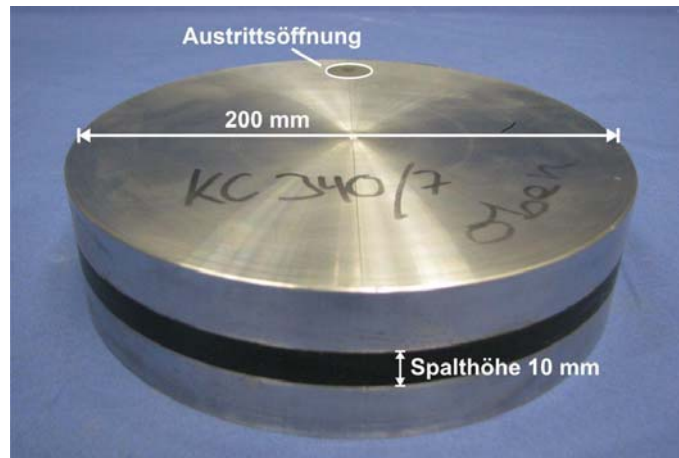
Abbildung 9 zeigt exemplarisch einen Schnitt durch ein mit dem Material V1 (links) bzw. V5 (rechts) verpresstes Hohlprofil. Wie die Auswertung der Schnitte durch die Hohlprofile zeigte, traten vor allem bei den Verpressmaterialien V4 und V5 deutliche Fehlstellen und auch Schwindrisse auf. Die Materialien V2 und V3 ließen sich ohne größere Lufteinschlüsse verpressen, insbesondere aber führte das Material V1 zu einem fehlerfrei verpressten Zwischenraum.

Auf Grundlage der Versuche zu den verpressten Hohlprofilen erwies sich demnach das Material V1 wegen der anwenderfreundlichen Verarbeitbarkeit sowie der fehlerfreien Zwischenraumverfüllung als das für die Verpressarbeiten am besten geeignete Material.

Neben den Hohlprofilen wurde ein weiterer Versuchsaufbau zur Prüfung der Verpressmaterialien unter statischer und dynamischer Beanspruchung konzipiert. Hierzu wurden Stahlplatten mit einer Spalthöhe von 10 mm verpresst und nach dem Aushärten des Materials zyklisch belastet. Das eingesetzte Lastregime der statischen und dynamischen Beanspruchung ist in Abbildung 10 dargestellt. Abbildung 11 zeigt exemplarisch einen mit dem Verpressmaterial V3 verpressten Probekörper vor dem Versuch (oben) bzw. während der Versuchsdurchführung (unten).



**Abbildung 10:** Beanspruchungsregime bei der Prüfung der verpressten Stahlplatten



**Abbildung 11:** Verpresste Stahlplatten vor Versuchsbeginn (oben) und während des Versuchs (unten links) mit Detail (unten rechts)

Die Versuchsergebnisse zu den verpressten Hohlprofilen und Stahlplatten wurden an die Ed. Züblin AG übergeben und dort ausgewertet. Weitere Ausführungen hierzu sind den Berichten der Ed. Züblin AG zu entnehmen.

Die Auswahl des Verpressmaterials, das bei der Untersuchung des Tragverhaltens der Kopplung am realmaßstäblichen Tübbingmodell zur Anwendung kommen sollte (vgl. Kapitel 2.2.2), erfolgte schließlich durch die Ed. Züblin AG auf Grundlage der Ergebnisse zu den verpressten Hohlprofilen sowie der Ergebnisse zu den verpressten Stahlplatten.

## 2.2.2 Herstellung der Versuchskörper und des Versuchsstands

Der Versuchsaufbau, der zur Untersuchung der Tübbingkopplung am realmaßstäblichen Tübbingmodell konzipiert wurde, ist in Abbildung 13 schematisch dargestellt. Hierbei handelte es sich um zwei Stahlbetonplatten, die durch einen Stahlbolzen verbunden waren. Der Stahlbolzen war wiederum in einem mit dem Bewehrungskorb verschweißten Stahlbauteil eingebracht (vgl. Abbildung 12, b). Der Spalt wurde mit Hilfe von Schläuchen verpresst (vgl. Abbildung 12, c). Als Verpressmaterial kam das im Rahmen der Vorversuche ausgewählte Material V1 zum Einsatz (siehe Kapitel 2.2.1). Konstruktive Details des realmaßstäblichen Tübbingmodells sind den Berichten der Ed. Züblin AG zu entnehmen.

(a)



(b)



(c)



(d)



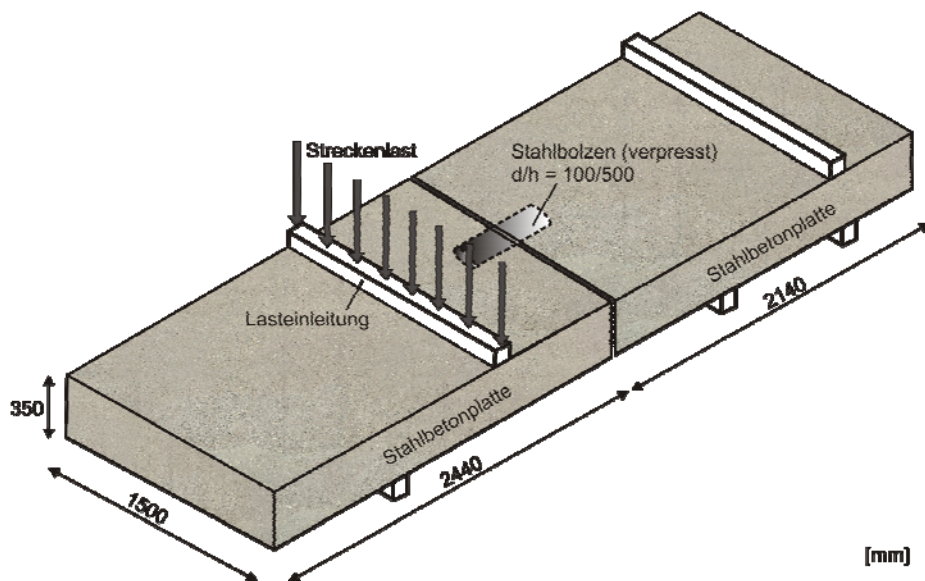
(e)



(f)



**Abbildung 12:** Herstellung des Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Tragverhaltens der Kopplung:  
(a) Herstellung der Bewehrungskörbe, (b) Einschweißen des Stahlbauteils zur Aufnahme des Stahlbolzens, (c) fertiggestellte Bewehrungskörbe mit Verpressschläuchen, (d) Betonage der Bauteile, (e) Aufbau des Versuchsstands, (f) Verpressen des Stahlbolzens

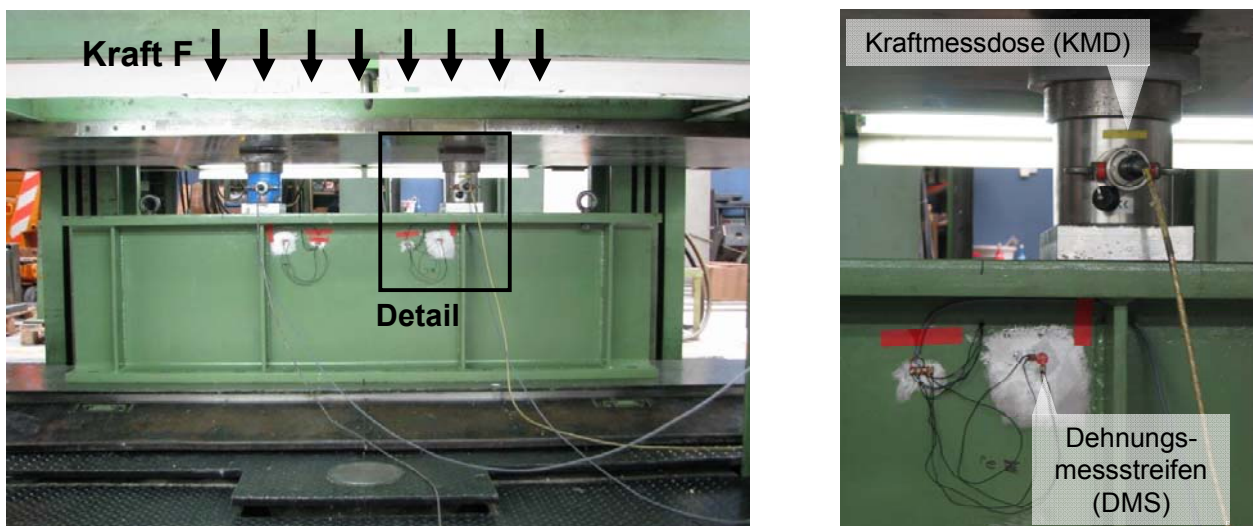


**Abbildung 13:** Versuchsaufbau zur Untersuchung des Tragverhaltens der Kopplung zweier Stahlbetonplatten (realmaßstäbliches, ebenes Tübbingmodell)

Die Herstellung der Versuchskörper erfolgte an der ebenfalls vom Projektnehmer geführten Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA Karlsruhe). In Abbildung 12 sind die verschiedenen Stationen der Herstellung dargestellt.

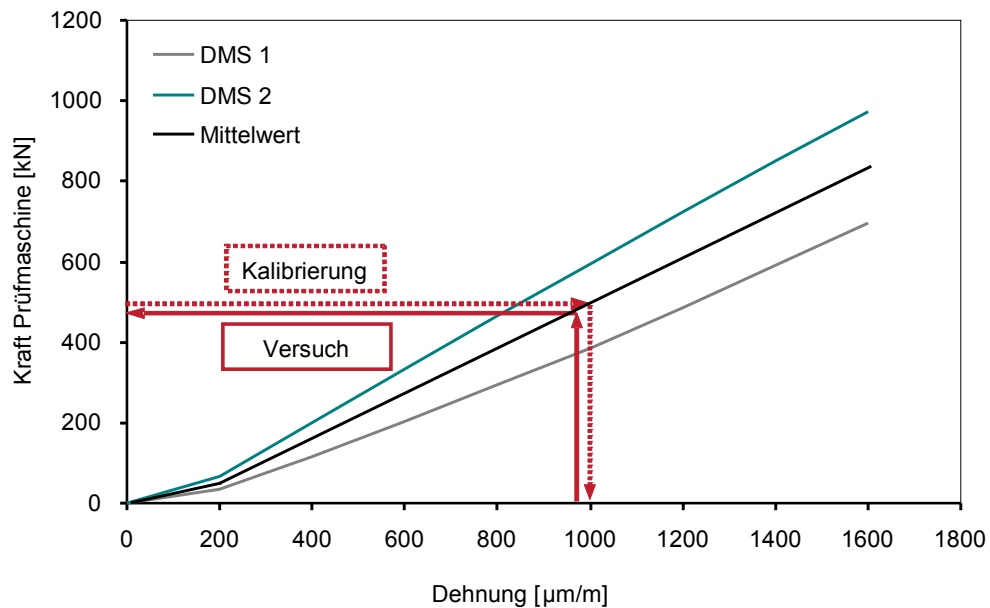
### 2.2.3 Versuchsdurchführung

Während der Versuchsdurchführung zur Untersuchung des Tragverhaltens der Kopplung sollte das Kraft-Verformungsverhalten des Versuchskörpers sowie die aus der Beanspruchung resultierenden Auflagerkräfte erfasst werden.



**Abbildung 14:** Versuchsaufbau zur Kalibrierung des Stahlträgers zur Erfassung der Auflagerkraft





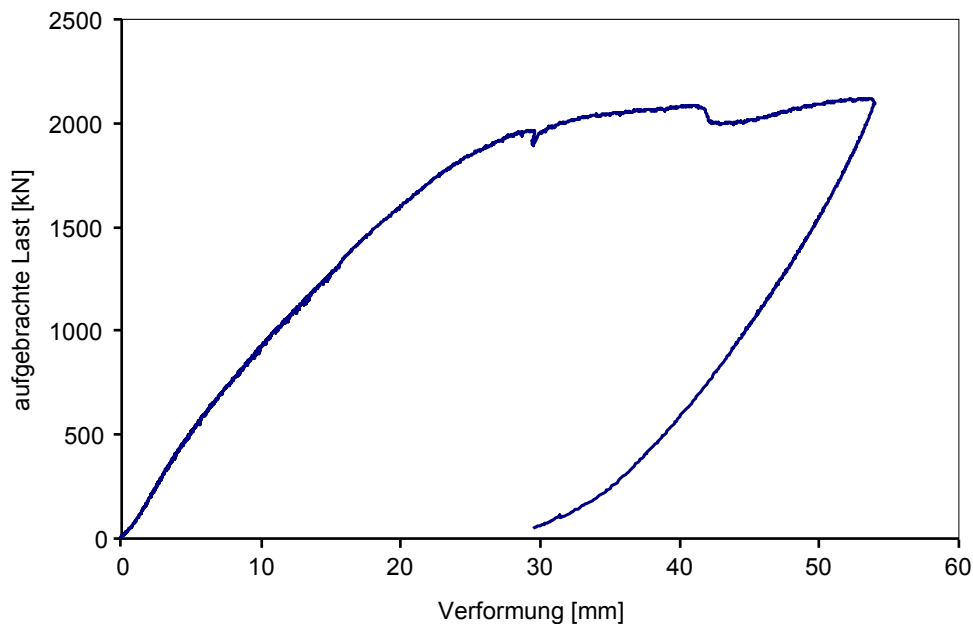
**Abbildung 15:** Diagramm zur Ermittlung der dehnungsabhängigen Auflagerkraft

Die Erfassung der Auflagerkräfte erfolgte mit Hilfe eines kalibrierten Stahlträgers (HEM 650). Zur Kalibrierung wurde die aus der aufgebracht Kraft resultierende Dehnung des Stahlträgers in einem Vorversuch erfasst (Versuchsaufbau siehe Abbildung 14), woraus das in Abbildung 15 dargestellte Diagramm ermittelt wurde. Aus der Kenntnis der Dehnung des Stahlträgers während des Bauteilversuchs war es unter Anwendung dieses Diagramms dann umgekehrt möglich, auf die wirkende Auflagerkraft zu schließen.



**Abbildung 16:** Versuchsaufbau während des Versuchs (links) und induktive Wegaufnehmer zur Erfassung der Bauteilverformung (rechts)

Das Kraft-Verformungsverhalten der Bauteile während des Versuchs wurde mit Hilfe von insgesamt 14 induktiven Wegaufnehmern bzw. Seilzügen erfasst. In Abbildung 16 ist der mit Messtechnik ausgestattete Versuchsaufbau abgebildet.



**Abbildung 17:** Verformung im Bereich der Lasteinleitung in Abhängigkeit der auf das Bauteil aufgetragenen Last (exemplarisch)

Ein aus den Bauteilversuchen resultierendes Versuchsergebnis ist in Abbildung 17 exemplarisch dargestellt. Die weiteren Ergebnisse sind in den Berichten der Ed. Züblin AG ausführlich geschildert.

### 2.3 AP 3-3: Duktiler Hochleistungsbeton bei hochdynamischer Beanspruchung

Innerhalb von AP 3-3 war ein ultrahochfester Beton zu entwickeln, der einen maximalen Widerstand sowohl gegenüber einer Hochtemperaturbeanspruchung als auch gegenüber einer hochdynamischen Beanspruchung (z. B. Explosion) aufweist.

Hierzu erfolgte zunächst die Entwicklung eines Feinkornbetons im Labormaßstab. Im Anschluss daran wurden das Frisch- und Festbetonverhalten des entwickelten Betons im Technikumsmaßstab charakterisiert.

#### 2.3.1 Möglichkeiten zur Maximierung der Duktilität des Festbetons

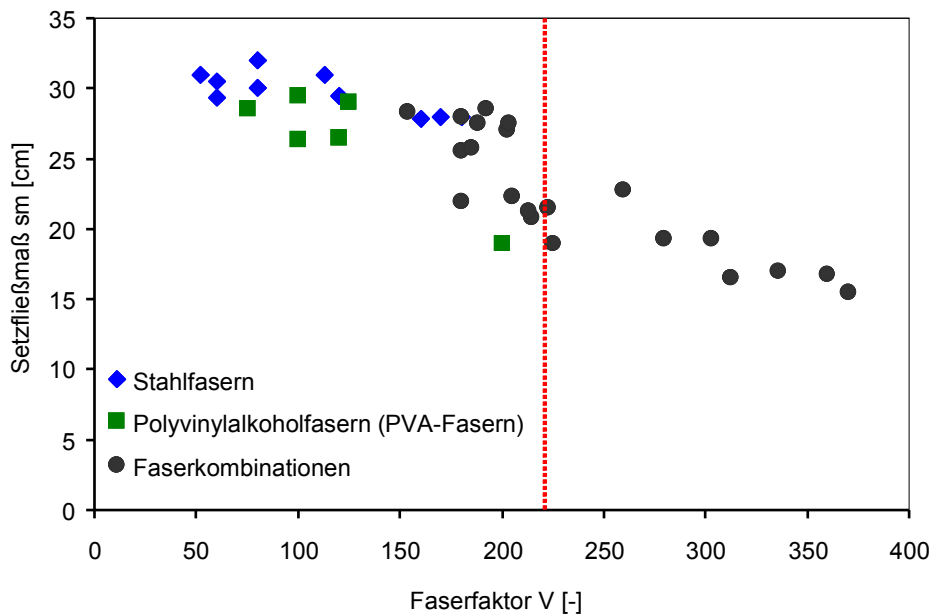
Der Widerstand eines Werkstoffs gegenüber einer hochdynamischen Beanspruchung steigt mit zunehmender Duktilität, also mit zunehmendem Verformungsvermögen. Wesentliches Ziel im Forschungsprojekt AISIS war daher die Maximierung der Duktilität des einzusetzenden Betons, was insbesondere durch den Einsatz einer Faserbewehrung erfolgen sollte. Diese Thematik wurde auch im Rahmen einer Diplomarbeit behandelt, deren Ziel es war, ausgehend von einer Literatursichtung und auf Grundlage eines experimentellen Programms potentielle Wege zur Maximierung der Duktilität von ultrahochfestem Beton aufzuzeigen. Die wesentlichen Ergebnisse der Diplomarbeit /Breiner08/ sind nachfolgend dargelegt.

Im Rahmen des experimentellen Programms wurde zunächst das Frischmörtelverhalten in Abhängigkeit der Faserbewehrung (Faserart, Fasergeometrie) untersucht. Hier erwies sich der so genannte Faserfaktor nach nachfolgender Gleichung /Nakamura05/ als geeigneter Kennwert zur Einstellung der Verarbeitbarkeit des Mörtels.

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{d_i} \cdot V_i$$

mit	V	Faserfaktor [-]
	$l_i$	Länge der i-ten Faser in mm
	$d_i$	Durchmesser der i-ten Faser in mm
	$V_i$	Fasergehalt der i-ten Faser in Vol.-%

Abbildung 18 zeigt exemplarisch das Mörtel-Setzfließmaß  $s_m$  der untersuchten Mörtel (bestimmt in Anlehnung an die DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“) in Abhängigkeit vom Faserfaktor. Um eine gute Verarbeitbarkeit sicherzustellen, sollte der Faserfaktor für Mörtel mit einem Größtkorn von 0,5 mm einen Wert von maximal 220 nicht überschreiten.

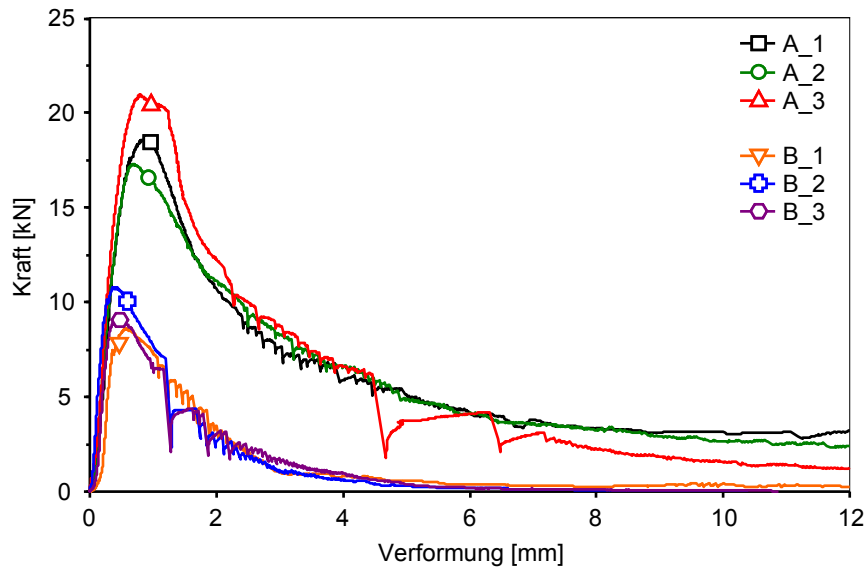


**Abbildung 18:** Setzfließmaß  $s_m$  der untersuchten Mörtel in Abhängigkeit vom Faserfaktor /Breiner08/

Das Kraft-Verformungsverhalten wurde in /Breiner08/ zunächst anhand von Prismen ( $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ) aus faserbewehrtem Mörtel mit Hilfe eines weggesteuerten 4-Punkt-Biegezugversuchs erfasst. Als Maß für die Duktilität wurde die Fläche unter der aufgezeichneten Kurve bis zu einer Durchbiegung von 12 mm – also das zugehörige Integral – herangezogen.

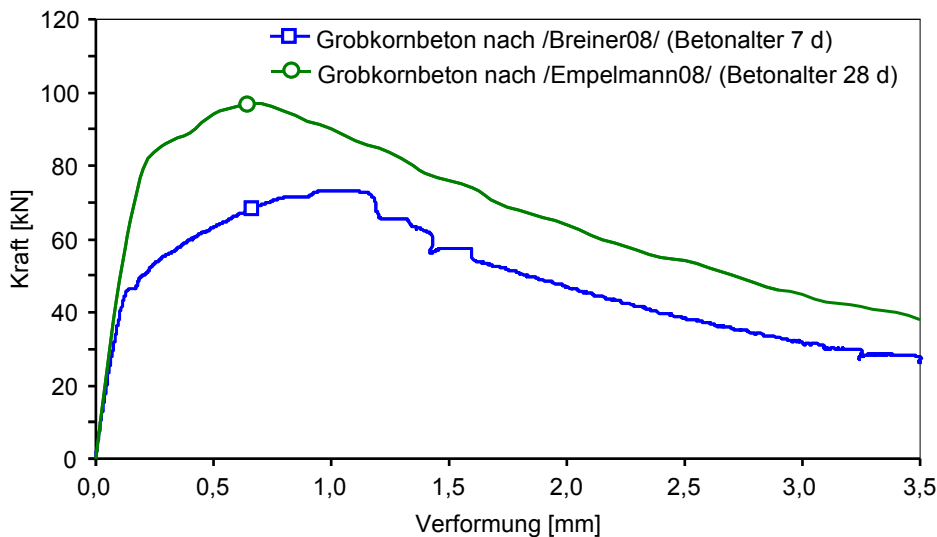
Es hat sich gezeigt, dass die Fasern zur Überbrückung unterschiedlicher Risse möglichst vielfältig abgestuft sein sollten. Der Auszugswiderstand der Fasern ist der maßgebende Faktor, um eine sog. multiple Rissbildung und das Nachbruchverhalten des Betons kontrollieren zu können. Mikrorisse werden durch kurze, hochfeste Stahlfasern am besten überbrückt. Lange, duktile Fasern wie Polyvinylalkoholfasern (PVA-Fasern) oder Stahlfasern verbinden die Rissufer von Makrorissen miteinander und erhöhen die

Duktilität. Unterschiedliche Fasermaterialien ergänzen sich hierbei im Hinblick auf unterschiedliche Anforderungen.



**Abbildung 19:** Kraft-Verformungsverhalten des Mörtels A (Fasercoktail: 1 Vol.-% L/D = 6 mm/0,2 mm, 1 Vol.-% L/D = 9 mm/0,15 mm, 1 Vol.-% L/D = 17 mm/0,15 mm) und des Mörtels B (Stahlfasern: 4 Vol.-% L/D = 6 mm/0,2 mm) (nach /Breiner08/)

In Abbildung 19 ist exemplarisch das Kraft-Verformungsverhalten des Mörtels A (1 Serie = 3 Prismen) mit einem gut abgestuften Fasercoktail aus Stahlfasern (L/D = 6 mm/0,2 mm: 1 Vol.-%, L/D = 9 mm/0,15 mm: 1 Vol.-%, L/D = 17 mm/0,15 mm: 1 Vol.-%) im Vergleich zum Mörtel B abgebildet, der zwar einen höheren Fasergehalt aufweist, aber dem nur eine Stahlfasertypen (L/D = 6 mm/0,2 mm: 4 Vol.-%) zugegeben wurde. Durch das Abstufen der Fasern konnte das Verformungsvermögen des Mörtels deutlich gesteigert werden.



**Abbildung 20:** Kraft-Verformungsverhalten des Grobkornbetons nach /Breiner08/ im Vergleich zu einem ähnlich zusammengesetzten Grobkornbeton nach /Empelmann08/

Da sich in den Mörtelversuchen gezeigt hatte, dass die Zugabe von PVA- und Polypropylenfasern (PP-Fasern) eine multiple Rissbildung begünstigte und demnach zu einem duktileren Nachbruchverhalten führte, wurde für die anschließenden Versuche im Technikummaßstab eine Betonrezeptur herangezogen, die neben Stahlfasern auch PVA- und PP-Fasern enthielt. Zusätzlich wurde eine grobe Gesteinskörnung (Basalt, 2-5 mm) zugegeben. Die Erfassung des Kraft-Verformungsverhaltens erfolgte an einem Balken ( $150 \times 150 \times 700 \text{ mm}^3$ ) in Anlehnung an das DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton /DBV01/. Das Ergebnis ist im Vergleich zu einem ähnlich zusammengesetzten Grobkornbeton nach /Empelmann08/ in Abbildung 20 dargestellt. Während der Beton nach /Breiner08/ mit 1,0 Vol.-% Stahlfasern ( $L/D = 12 \text{ mm}/0,15 \text{ mm}$ ), 2,0 Vol.-% PVA-Fasern ( $L/D = 15 \text{ mm}/0,30 \text{ mm}$ ) und 0,3 Vol.-% PP-Fasern ( $L/D = 3 \text{ mm}/0,02 \text{ mm}$ ) hergestellt wurde, wurden im Beton nach /Empelmann08/ 1,5 Vol.-% Stahlfasern ( $L/D = 17 \text{ mm}/0,15 \text{ mm}$ ) und etwa 0,2 Vol.-% PP-Fasern verwendet. Die Kurvenverläufe unterscheiden sich hauptsächlich hinsichtlich der aufnehmbaren Maximallast, was aber auf das unterschiedliche Prüfalter zurückzuführen ist.

Eine weitere Steigerung der Duktilität kann beim Einsatz einer groben Gesteinskörnung nach /Breiner08/ durch den Einsatz einer längeren Faserbewehrung erzielt werden, die einen hohen Verbund mit dem Betongefüge aufweist (z. B. Stahlfasern,  $L = 30 \text{ mm}$  mit Endhaken). Auch der Verzicht auf eine grobe Gesteinskörnung kann die Duktilität deutlich verbessern, da ultrahochfeste Feinkornbetone in der Regel ein günstigeres Fließverhalten aufweisen, was eine homogene Verteilung der Fasern in der Matrix sicherstellt. Nicht zuletzt sollte bereits die unbewehrte Matrix des Betons hinsichtlich einer Duktilitätssteigerung optimiert werden. Dies kann durch das Einbringen gezielter Schwachstellen in den Beton erfolgen wie z. B. PP-Fasern, die eine multiple Rissbildung initiieren. Durch die Entstehung einer Vielzahl von kleinen Rissen geringer Rissbreiten kann die Ausbildung eines makroskopischen Risses bis zum Erreichen großer Dehnungen verhindert und somit die Duktilität erhöht werden.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche sowie die experimentellen Ergebnisse, die innerhalb der Diplomarbeit erzielt werden konnten, dienen als Grundlage für die weiteren Versuche zur Maximierung der Duktilität im Rahmen von AP 3-3.

### **2.3.2 Mörtel- und Betonentwicklung im Labormaßstab**

Im Zuge der Entwicklung eines Mörtels, der als Grundlage für den zu entwickelnden Beton dienen sollte, wurde geprüft, inwieweit ein Einsatz der im Werk des Projektpartners Fa. Rekers verfügbaren Materialien möglich ist. Außerdem wurde der Mineralcompound „UHPC 7“ eingesetzt, der in einem früheren F+E-Projekt am IMB speziell für den Einsatz von ultrahochfestem Beton im Betonfertigteilwerk entwickelt worden war, siehe hierzu /Scheydt08/. Diese Maßnahmen zielten auf eine Maximierung der Wirtschaftlichkeit des zu entwickelnden Betons ab.

Die Mörtelentwicklung erfolgte ausgehend von einem am IMB entwickelten Referenzmörtel  $M_{\text{ref}}$ , dessen Frisch- und Festmörtelverhalten hinreichend charakterisiert war und der sich bereits beim baupraktischen Einsatz bewährt hatte.

Insgesamt wurden 3 Zemente (CEM1 bis CEM3) sowie 2 Fließmittel auf Polycarboxylatetherbasis (FM2 und FM3), die im Werk der Fa. Rekers zum Einsatz kommen, hinsichtlich ihrer Eignung für die Mörtelentwicklung überprüft. Zusätzlich wurden fünf weitere Fließmittel auf Polycarboxylatetherbasis (FM1 und FM4 bis FM7) für die Versuche herangezogen. Die Zemente sind im Anhang, Tabelle A-2, die Fließmittel in Tabelle A-3 näher charakterisiert. Die Zusammensetzung der untersuchten Mörtel ist ebenfalls dem Anhang (Tabelle A-5) zu entnehmen.

Zur Herstellung der Mörtel wurde ein Mörtelmischer nach DIN EN 196-1 eingesetzt. Sofern die Mörtel bei vorgesehenem Wassergehalt ( $w/z = 0,28$ ) nicht verflüssigt werden konnten, wurde Wasser und ggf. Fließmittel nachdosiert.

Zur Beurteilung der Konsistenz und des Konsistenzerhalts wurde das Setzfließmaß ( $sm$ ) der Mörtel in Anlehnung an die DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ jeweils unmittelbar nach Mischende ( $sm_0$ ) sowie 40 Minuten nach Mischende ( $sm_{40}$ ) bestimmt. Vor der Bestimmung der Setzfließmaße  $sm_{40}$  wurde der Mörtel 30 Sekunden lang aufgemischt.

Das Fließverhalten der Mörtel wurde außerdem mit Hilfe eines Rotationsrheometers charakterisiert. Hierbei wurde insbesondere die Viskosität  $\eta$  ermittelt. Sobald das maximale Drehmoment des Geräts überschritten wurde, was bei sehr steifen Mörteln der Fall war, wurde die Rheometermessung vorzeitig vom Gerät abgebrochen. Die Fließkurven  $\tau(\dot{\gamma})$  der untersuchten Mörtel ließen sich mit Hilfe des Modells nach Cross durch nachfolgende Gleichung beschreiben /Mezger00/:

$$\tau = \dot{\gamma} \cdot \left( \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_b)^n} \right) \quad (1)$$

Das Modell nach Cross geht davon aus, dass die Null-Viskosität  $\eta_0 = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta(\dot{\gamma})$  im Vergleich zur Unendlich-Viskosität  $\eta_{\infty} = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta(\dot{\gamma})$  deutlich größer ist. Mit zunehmender Viskosität  $\eta$  verschlechtert sich das Fließverhalten des Mörtels, weshalb  $\eta$  einen möglichst geringen Wert annehmen sollte. Um ein möglichst gleichmäßiges Frischbetonverhalten unabhängig von der aufgetragenen Schergeschwindigkeit (z. B. Mischintensität) sicherzustellen, sollte außerdem das Verhältnis zwischen Null-Viskosität und Unendlich-Viskosität  $\eta_0/\eta_{\infty}$  möglichst gering sein. Es hat sich gezeigt, dass Mörtel mit einem Setzfließmaß von mindestens 250 mm und einer Nullviskosität von höchstens 1000 Pas zu sehr gut verarbeitbaren ultrahochfesten Betonen führen.

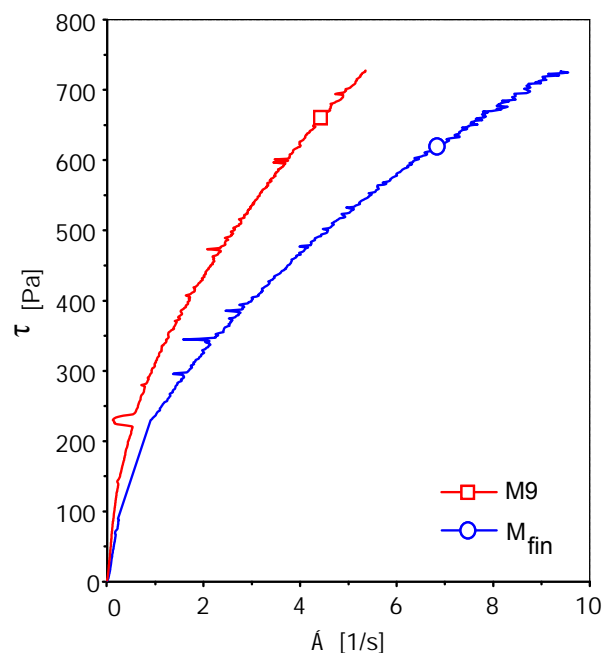
Aus den untersuchten Mörteln wurden Probekörper (Prismen,  $h \times b \times l = 40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ) hergestellt, die im Mörtelalter von einem Tag entformt wurden. Das Festmörtelverhalten der jeweiligen Versuchsserien (1 Serie = 3 Probekörper) wurde im Mörtelalter von 7 Tagen nach 6-tägiger Lagerung bei 20 °C und 90 % r. F. untersucht. Hierbei wurden die Druck- und die Biegezugfestigkeit der Prismen nach DIN EN 196-1 bestimmt. Unbewehrte ultrahochfeste Mörtel weisen unter den gegebenen Lagerungsbedingungen im Betonalter von 7 Tagen erfahrungsgemäß Druckfestigkeiten im Bereich von 100 N/mm<sup>2</sup> und Biegezugfestigkeiten von mindestens 10 N/mm<sup>2</sup> auf.

Die aus der rheologischen Untersuchung resultierenden Viskositäten  $\eta_0$  und  $\eta_{\infty}$ , die Setzfließmaße  $sm_0$  und  $sm_{40}$  sowie die Festmörtelkennwerte sind im Anhang, Tabelle A-9 angegeben.

Wie zu erkennen ist, führte der Einsatz des Zements CEM1 unabhängig vom Fließmittel zu einer sehr hohen Viskosität ( $\eta_0 \geq 1,8 \cdot 10^4 \text{ Pas}$ ) und zu geringen Setzfließmaßen ( $sm_0 \leq 135 \text{ mm}$ ), also zu Mörteln mit einem ungünstigen Frischmörtelverhalten. Mit Druckfestigkeiten  $R_{c,7}$  zwischen 94,4 und 110,1 N/mm<sup>2</sup> und Biegezugfestigkeiten  $R_{f,7}$  zwischen 14,8 und 22,3 N/mm<sup>2</sup> liegen alle Mörtel zwar im Bereich ultrahochfester Mörtel, aufgrund der ungünstigen Frischmörtel Eigenschaften wurde der Einsatz des Zements CEM1 jedoch nicht weiterverfolgt.

Die Fließmittel FM3 und FM4 führten auch in Kombination mit den Zementen CEM2 und CEM3 trotz einer erhöhten Zugabewassermenge zu sehr schlecht verarbeitbaren Mörteln. Diese Fließmittel eigneten sich daher weniger für den Einsatz im ultrahochfestem Beton.

Insbesondere durch die Kombination des Zements CEM3 und des Fließmittels FM1 (Mörtel M9) konnte ein günstiges Frischmörtelverhalten erzielt werden. Mit einer Nullviskosität  $\eta_0$  von 1126 Pas, einer Unendlich-Viskosität  $\eta_\infty$  von 63 Pas und einem Setzfließmaß  $sm_0$  von 218 mm war der Mörtel gut verarbeitbar. Zudem zeigte der Mörtel mit einer Druckfestigkeit  $R_{c,7}$  von 107,9 N/mm<sup>2</sup> und einer Biegezugfestigkeit  $R_{c,f}$  von 21,8 N/mm<sup>2</sup> ein günstiges Festmörtelverhalten.



**Abbildung 21:** Fließkurven der Mörtel M9 und M<sub>fin</sub> im Vergleich

Der Mörtel M9 wurde daher weiter optimiert. Durch eine Erhöhung der Zugabewassermenge um 7 % wurde die Viskosität sowie das Setzfließmaß an die am IMB vorhandene Referenzmischung M<sub>ref</sub> angepasst (vgl. Tabelle 1). Abbildung 21 zeigt exemplarisch die Fließkurven der Mischungen M9 und der optimierten Mischung M<sub>fin</sub> im Vergleich. Ein Konsistenzverlust konnte nicht festgestellt werden ( $sm_0 = sm_{40} = 245$  mm). Ein Rückgang der Druckfestigkeit  $R_{c,7}$  infolge der Erhöhung der Zugabewassermenge wurde nicht beobachtet, die Biegezugfestigkeit  $R_{f,7}$  ging um etwa 20 % auf 17,5 N/mm<sup>2</sup> zurück (vgl. Tabelle 1).

**Tabelle 1:** Frisch- und Festmörtelkennwerte des optimierten Mörtels  $M_{fin}$  im Vergleich zum Mörtel M9 und zum Referenzmörtel  $M_{ref}$

Mörtel	CEM	FM	Viskosität			Setzfließmaß		Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit
			$\eta_0$ [Pas]	$\eta_\infty$ [Pas]	$\eta_0/\eta_\infty$ [-]	$sm_0$ [cm]	$sm_{40}$ [cm]	$R_{c,7}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{f,7}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
M9	CEM3	FM1	1126	63	18	218	230	107,9 (4,9)	21,8 (0,5)
$M_{fin}$	CEM3	FM1	447	38	12	245	245	114,9 (2,1)	17,5 (0,1)
$M_{ref}$	-	-	552	31	18	255	255	93,1 (9,5)	11,7 (1,4)

Werte in Klammern: Standardabweichung [N/mm<sup>2</sup>]

Der unter Kombination des Zements CEM3 und des Fließmittels FM1 optimierte Mörtel  $M_{fin}$  diente als Grundlage für die weiteren Versuche, die im Rahmen von AP 3-3 durchgeführt wurden.

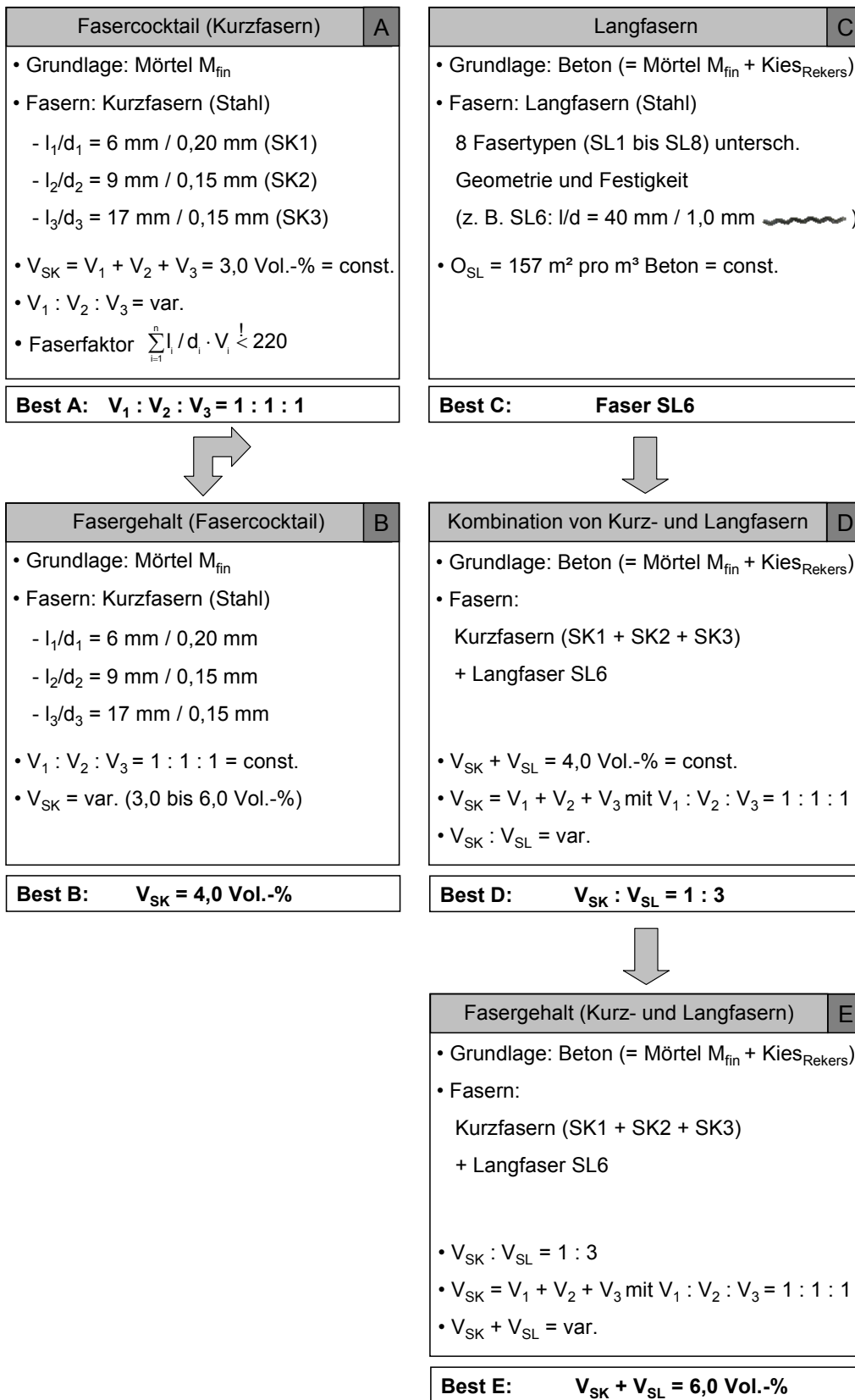
### 2.3.3 Einsatz einer Faserbewehrung zur Erhöhung des Widerstands gegenüber hochdynamischer Beanspruchung

Aus der zur Thematik bearbeiteten Diplomarbeit /Breiner08/ war bekannt, dass die eingesetzten Fasern zur Überbrückung unterschiedlicher Risse möglichst vielfältig abgestuft sein sollten. Mikrorisse werden durch kurze, hochfeste Stahlfasern am besten überbrückt. Lange, duktile Fasern wie z. B. Stahlfasern verbinden die Rissufer von Makrorissen miteinander und erhöhen die Duktilität.

Aufbauend auf /Breiner08/ wurde innerhalb von AP 3-3 der Einsatz eines Stahlfasercocktails aus drei geraden, unprofilieren Stahlfasertypen unterschiedlicher Geometrie (Kurzfasern SK1 bis SK3,  $6 \text{ mm} \leq l \leq 17 \text{ mm}$ ,  $d \approx 0,20 \text{ mm}$ ) im optimierten Mörtel  $M_{fin}$  (Größtkorn 0,5 mm) untersucht. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit war zunächst geplant, für die im Projekt abschließend vorgesehene Tübbingherstellung einen ultrahochfesten Grobkornbeton (Größtkorn 8 mm) einzusetzen. Da die Faserlänge nach /Breiner08/ beim Einsatz im Grobkornbeton mindestens das 5fache des Größtkorns betragen sollte, wurden daher zusätzlich längere Stahlfasern hinsichtlich ihrer Eignung überprüft (Langfasern SL1 bis SL8,  $30 \text{ mm} \leq l \leq 40 \text{ mm}$ ,  $0,5 \text{ mm} \leq d \leq 2,0 \text{ mm}$ ). Außerdem wurde die Wirksamkeit einer Kombination aus Kurzfasern und Langfasern untersucht. Zur Untersuchung der Langfasern und der Kombination aus Kurz- und Langfasern wurde ein Grobkornbeton eingesetzt, der aus der Kombination des Mörtels  $M_{fin}$  mit dem Kies der Fa. Rekers (Volumenanteil 24 %) hervorging.

Abbildung 22 gibt einen Überblick über das im Rahmen von AP 3-3 bearbeitete Versuchsprogramm zur Maximierung der Betonduktilität. Das Versuchsprogramm besteht aus fünf Optimierungsschritten A bis E, die in den nachfolgenden Kapiteln 2.3.3.1 bis 2.3.3.3 ausführlich erläutert sind.



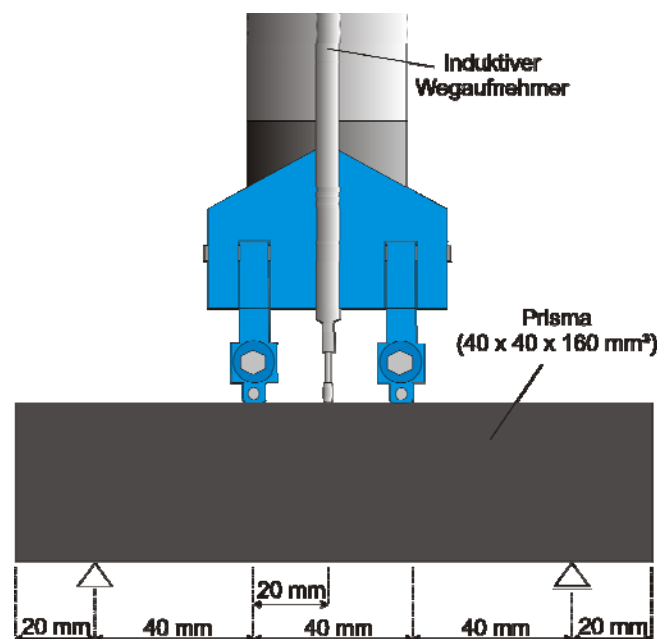


**Abbildung 22:** Übersicht über das Versuchsprogramm zur Maximierung der Betonduktilität

Die Eigenschaften der verschiedenen Stahlfasertypen sind dem Anhang, Tabelle A-4 zu entnehmen. Die Zusammensetzung der untersuchten Mörtel und Betone ist den Tabellen A-6 bis A-8 zu entnehmen.

Die Herstellung der Mörtel erfolgte unter Einsatz eines Mörtelmischers nach DIN EN 196-1. Für die Herstellung der Betone kam ein Mischer gleicher Bauart, aber mit größerem Nennvolumen ( $5 \text{ dm}^3$ ) zur Anwendung. Die Faserzugabe erfolgte jeweils auf den verflüssigten Mörtel bzw. Beton. Nach Mischende wurde zunächst die Verarbeitbarkeit der Mörtel bzw. Betone untersucht. Hierzu wurde das Ausbreitmaß nach DIN EN 1015-3 sowie die Temperatur bestimmt.

Zur Quantifizierung der Duktilität wurden verformungsgeregelte 4-Punkt-Biegezugversuche an Prismen ( $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ) durchgeführt, und das Verformungsverhalten wurde mittels induktiver Wegaufnehmer erfasst. Bis zu einer Verformung von 2 mm betrug die Belastungsgeschwindigkeit  $0,4 \text{ mm/min}$ . Anschließend wurde diese auf  $1 \text{ mm/min}$  erhöht. Die Verformung wurde bis zu einer Gesamtverschiebung von 12 mm erfasst. Pro Serie wurden drei Probekörper geprüft. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 23 dargestellt. Als Maß für die Duktilität wurde die Fläche unter den sich ergebenden Kraft-Verformungskurven ermittelt. Je größer die ermittelte Fläche ist, umso größer ist die Duktilität des Mörtels bzw. Betons. Ferner wurde aus der im verformungsgeregelten 4-Punkt-Biegezugversuch ermittelten Maximallast die zugehörige Biegezugfestigkeit  $R_{f,KV}$  nach DIN EN 196-1 bestimmt.



**Abbildung 23:** Versuchsaufbau im verformungsgeregelten 4-Punkt-Biegezugversuch

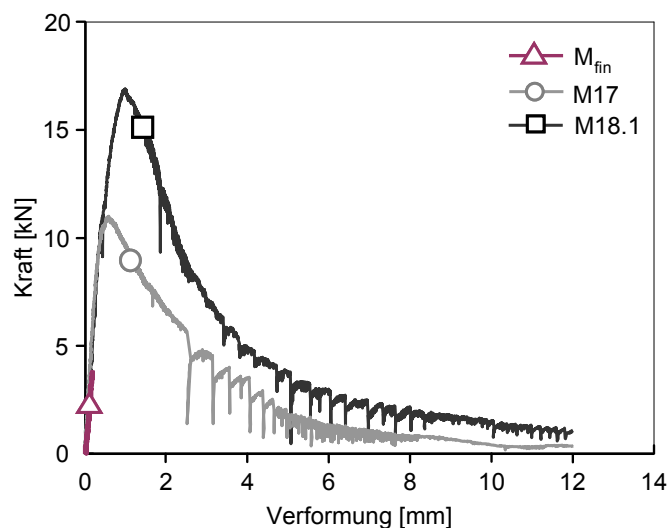
Die Herstellung der Prismen für die Biegezugprüfung erfolgte für die untersuchten faserbewehrten Mörtel mit Hilfe von Prismenschalungen. Da das Format der Prismenschalungen zu klein war, um für die mit Langfasern bewehrten Betone eine homogene Grobkorn- und Faserverteilung sicherzustellen, wurden aus den Grobkornbetonen Quader hergestellt ( $200 \times 200 \times 100 \text{ mm}^3$ ), aus denen Prismen im erforderlichen Format herausgesägt wurden. Die Mörtel bzw. Betone wurden nach der Probekörperherstellung 15 Sekunden lang mit Hilfe einer Rüttelplatte verdichtet (Amplitude =  $0,3 \text{ mm}$ ). Nach dem Erhärten wurden die Probekörper ggf. gesägt und bis zur Prüfung bei  $20 \text{ °C}$  und  $65 \text{ \% r. F.}$  gelagert.

### 2.3.3.1 Zusammenstellung eines Fasercocktails aus kurzen Stahlfasern (Optimierungsschritt A) und Anpassung des Fasergehalts im Mörtel (Optimierungsschritt B)

Ausgehend von den in /Breiner08/ erzielten Ergebnissen sollte zunächst ein Fasercocktail aus kurzen Stahlfasern (Fasern SK1 bis SK3, vgl. Anhang, Tabelle A-4) zusammengestellt werden, siehe hierzu auch Abbildung 22. Der Fasergehalt wurde konstant gehalten (3,0 Vol.-%), wobei die Volumenverhältnisse der einzelnen Fasertypen variiert wurden. Bei der Auswahl der Volumenverhältnisse wurde beachtet, dass der Faserfaktor wie in /Breiner08/ empfohlen einen Wert von 220 nicht überschreitet.

Die Frischmörteleigenschaften sind Tabelle A-10 zu entnehmen, die Ergebnisse des 4-Punkt-Biegezugversuchs sind in Tabelle A-11 zusammengestellt. Abbildung 24 zeigt außerdem exemplarisch ein Kraft-Verformungsdiagramm der Mörtel  $M_{fin}$  (also des unbewehrten und daher sehr spröde versagenden Mörtels), M17 und M18.1.

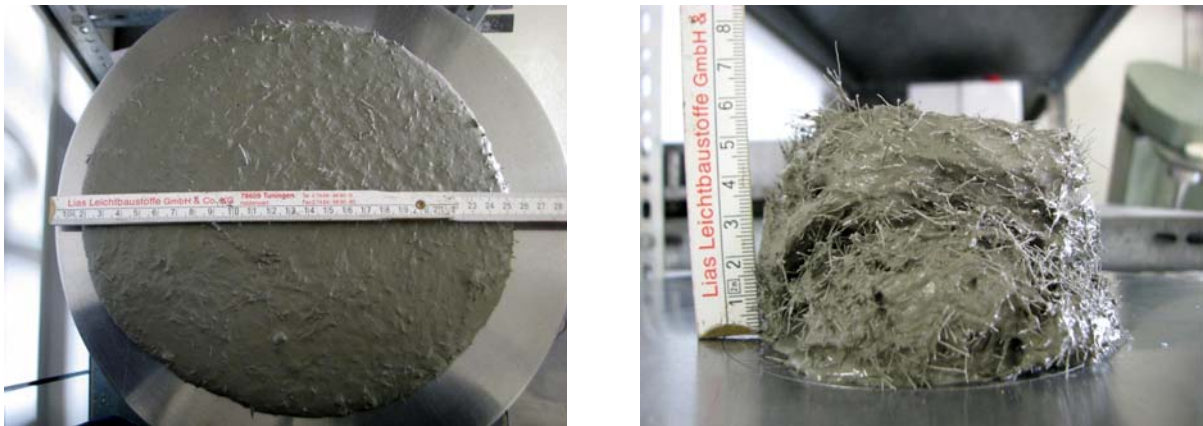
Generell waren durch die Faserzugabe weder eine signifikante Zunahme der Frischmörteltemperatur noch ein Rückgang des Ausbreitmaßes festzustellen. Das Verformungsvermögen des Mörtels konnte durch die Faserzugabe deutlich erhöht werden. Das Integral I konnte von 0,50 Nm (Mörtel  $M_{fin}$  ohne Faserbewehrung) auf bis zu 57,4 Nm (M18.1) gesteigert werden. Die maximale Duktilität wurde somit für die Faserkombination 1,0 SK1 : 1,0 SK2 : 1,0 SK3 erzielt. Auch die Biegezugfestigkeit  $R_{f,KV}$  war für diese Faserkombination maximal ( $R_{f,KV} = 30,2 \text{ N/mm}^2$ ) und konnte im Vergleich zur faserlosen Mischung  $M_{fin}$  um den Faktor 3,4 gesteigert werden.



**Abbildung 24:** Kraft-Verformungsdiagramme der Mörtel  $M_{fin}$ , M17 und M18.1

Im sich anschließenden Optimierungsschritt B wurde der Fasergehalt im Mörtel variiert. Das Verhältnis der Fasertypen SK1 bis SK3, das sich in Optimierungsschritt A als am günstigsten erwiesen hatte, wurde beibehalten (1,0 SK1 : 1,0 SK2 : 1,0 SK3), siehe auch Abbildung 22.

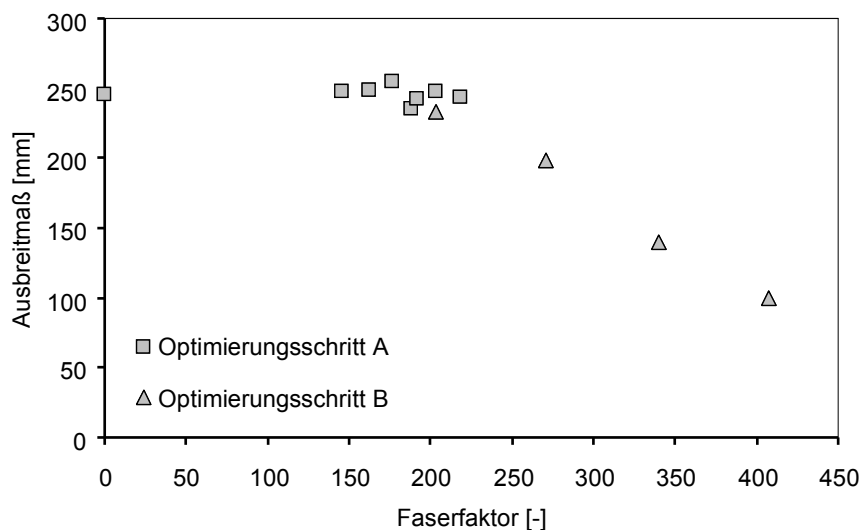
Zu erwähnen ist, dass der Optimierungsschritt B unter Anwendung einer neuen Charge Zement CEM3 durchgeführt wurde. Wie die Wiederholung der Mischung M18.1 zeigte, waren leichte Abweichungen hinsichtlich der Frisch- und Festmörteleigenschaften der ansonsten identischen Mischungen M18.1 und M18.2 zu beobachten. Dies konnte auf schwankende Zementeigenschaften zurückgeführt werden.



**Abbildung 25:** Ausbreitmaß der Mörtel M18.2 (links, Draufsicht) und M25 (rechts, Ansicht)

Abbildung 25 zeigt das Ausbreitmaß des gut verarbeitbaren Mörtels M18.2 (3,0 Vol.-% Fasern, Faserfaktor 203) und des sehr schwer verarbeitbaren Mörtels M25 (6,0 Vol.-% Fasern, Faserfaktor 407), der eine starke Faseragglomeration zeigte.

Die Ergebnisse aus Optimierungsschritt B untermauerten die Empfehlung aus /Breiner08/, den Faserfaktor auf maximal 220 zu beschränken, da das Ausbreitmaß und somit die Verarbeitbarkeit des Frischmörtels ab diesem Wert merklich zurückging, vgl. Abbildung 26 sowie Anhang, Tabelle A-12. Zudem war mit zunehmendem Faserbewehrungsgrad auch eine erhöhte Frischmörteltemperatur von bis zu 31,5 °C (Mörtel M25) zu beobachten.



**Abbildung 26:** Ausbreitmaß in den Optimierungsschritten A und B in Abhängigkeit vom Faserfaktor

Das größte Integral I und damit das günstigste Nachbruchverhalten in Optimierungsschritt B zeigte der hochgradig faserbewehrte Mörtel M25. Dieser Mörtel schied aufgrund seiner ungünstigen Verarbeitbarkeit für eine Bauteilherstellung jedoch aus. Stattdessen wurde der Mörtel M23 (4,0 Vol.-% Fasern, Faserfaktor 271) weiterverfolgt, der neben einer hinreichend guten Verarbeitbarkeit (Ausbreitmaß = 198 mm) auch eine hohe Duktilität aufwies (Integral I = 49,9 Nm), vgl. Tabellen A-12 und A-13.

### 2.3.3.2 Auswahl einer geeigneten Langfaser zur Maximierung der Duktilität von ultrahochfestem Beton (Optimierungsschritt C)

Innerhalb von Optimierungsschritt C wurde der Einsatz von Langfasern unterschiedlicher Geometrie ( $30 \text{ mm} \leq L \leq 40 \text{ mm}$ ,  $0,5 \text{ mm} \leq D \leq 2,0 \text{ mm}$ ) im ultrahochfesten Beton ( $M_{\text{fin}} + \text{Kies}_{\text{Rekers}}$ ) untersucht. Eine unterschiedliche Beschaffenheit der Fasern (gewellt, profiliert, mit Endhaken etc.) sollte dazu dienen, den Verbund zwischen Faser und Matrix und somit die Duktilität des Betons zu verbessern. Insgesamt wurde die Eignung von acht Langfasertypen (SL1 bis SL8) überprüft. Eine Übersicht über die verwendeten Fasern ist im Anhang, Tabelle A-4 gegeben.

Der Verbund zwischen Faser und Matrix und somit der Auszugswiderstand der Fasern hängt unmittelbar mit der Kontaktfläche zwischen Faser und Matrix zusammen. Daher wurde im Versuchsprogramm der Oberflächenanteil  $O_{\text{SL}}$  der Fasern im Beton konstant gehalten ( $O_{\text{SL}} = 157 \text{ m}^2$  pro  $\text{m}^3$  Beton, vgl. auch Abbildung 22). Bei konstanter Faseroberfläche zeigte sich somit in den Versuchen zum Kraft-Verformungsverhalten, welche Fasergeometrie und -beschaffenheit zum größten Auszugswiderstand und demnach zum günstigsten Nachbruchverhalten führte.

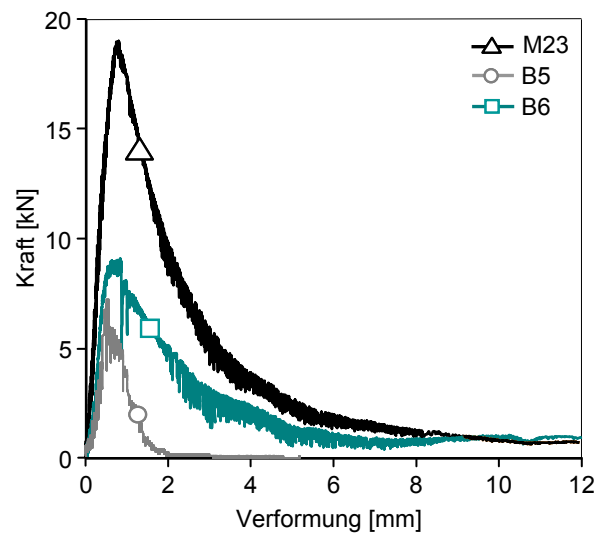
Die Ergebnisse der Frisch- und Festbetonuntersuchungen sind in den Tabellen A-14 und A-15 zusammengestellt. Während im faserlosen Beton B0 das Ausbreitmaß 225 mm betrug, war durch die Faserzugabe ein deutlicher Rückgang der Konsistenz zwischen 18 % (Beton B8) und 43 % (Beton B3) zu verzeichnen, vgl. auch Abbildung 27. Somit waren die faserbewehrten Betone deutlich schlechter verarbeitbar als die faserbewehrten Mörtel (vgl. Optimierungsschritte A und B). Anders als bei den im Mörtel eingesetzten glatten, unprofilierten Stahlfasern war kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen dem Faservolumen und der Verarbeitbarkeit festzustellen, was auf die sehr unterschiedliche Beschaffenheit der Fasern zurückzuführen ist. Fasern mit Endhaken beeinflussten das Ausbreitmaß auch bei geringeren Fasergehalten ungünstiger als gerade Fasern.



**Abbildung 27:** Ausbreitmaß der Betone B0 (225 mm, links), B8 (185 mm, Mitte) und B3 (129 mm, rechts)

Die Frischbetontemperatur stieg durch die Faserzugabe im Vergleich zur Nullmischung B0 ohne Fasern ( $T = 25,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) um bis zu  $5,2 \text{ }^\circ\text{C}$  (Beton B1) an.

Die aus dem 4-Punkt-Biegezugversuch resultierenden Integrale der Betone B1 bis B8 waren mit  $I = 6,8 \text{ Nm}$  (Beton B5) bis  $I = 30,0 \text{ Nmm}$  (Beton B6) deutlich geringer als die Integrale des optimierten Mörtels M23 ( $I = 49,9 \text{ Nm}$ ). Dies ist anhand ausgewählter Kraft-Verformungsdiagramme in Abbildung 28 veranschaulicht.



**Abbildung 28:** Kraft-Verformungsdiagramm des Mörtels M23 sowie der Betone B5 und B6

Generell zeigten die Ergebnisse der 4-Punkt-Biegezugversuche an den Betonen eine größere Streuung als die Versuche an den faserbewehrten Mörteln (vgl. Tabellen A-11, A-13 und A-15). Dies ist maßgeblich darauf zurückzuführen, dass der Größtkorndurchmesser sowie die Faserlänge im Verhältnis zum Probekörpervolumen größer sind als bei den untersuchten Mörteln, was Inhomogenitäten und somit die Streuung der Prüfergebnisse begünstigt.

Trotz der Streuung der Integrale I und der Biegezugfestigkeit  $R_{f,KV}$  war dennoch klar erkennbar, dass der Beton B6 unter Verwendung der gewellten Faser SL6 das größte Verformungsvermögen aufwies (vgl. auch Anhang, Tabelle A-15). Daher wurde die Anwendung der Faser SL6 weiterverfolgt.

### 2.3.3.3 Kombination von Kurz- und Langfasern zur Maximierung der Duktilität von ultrahochfestem Beton (Optimierungsschritte D und E)

Durch die Kombination von Kurz- und Langfasern sollte die Duktilität des Betons gesteigert werden. Neben der Faser SL6 kam daher der in Schritt A optimierte Fasercocktail zum Einsatz, siehe auch Abbildung 22. Während in Optimierungsschritt D zunächst der Gesamtfasergehalt konstant gehalten wurde (4,0 Vol.-%), wurde das Verhältnis zwischen Lang- und Kurzfaservolumen variiert.

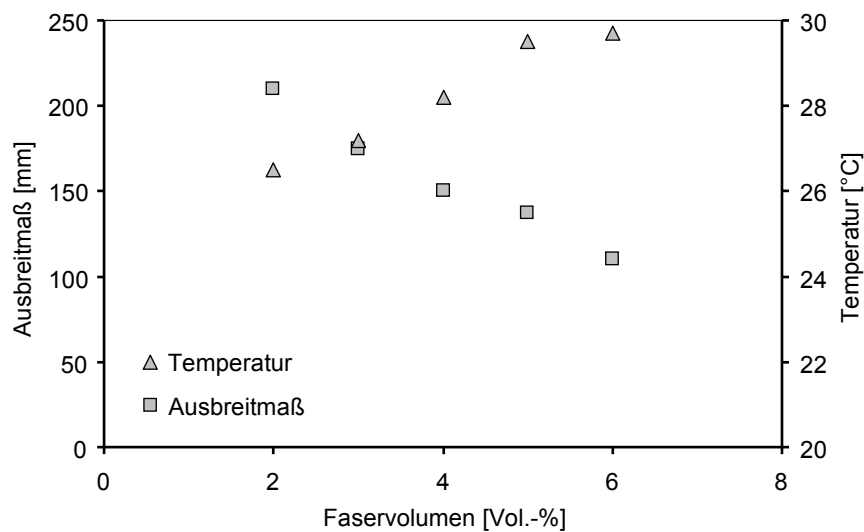
Die Ergebnisse der Frisch- und Festbetonuntersuchungen sind in den Tabellen A-16 und A-17 zusammengestellt. Wie hieraus zu erkennen ist, verschlechterte sich das Ausbreitmaß mit zunehmendem Volumenanteil der Kurzfaserbewehrung von 150 mm (Beton B9,  $V_{SK} : V_{SL} = 1,0 : 3,0$ ) auf 110 mm (Beton B12,  $V_{SK} : V_{SL} = 2,5 : 1,5$ ), siehe auch Abbildung 29. Der Beton B12 war nur noch eingeschränkt verarbeitbar.



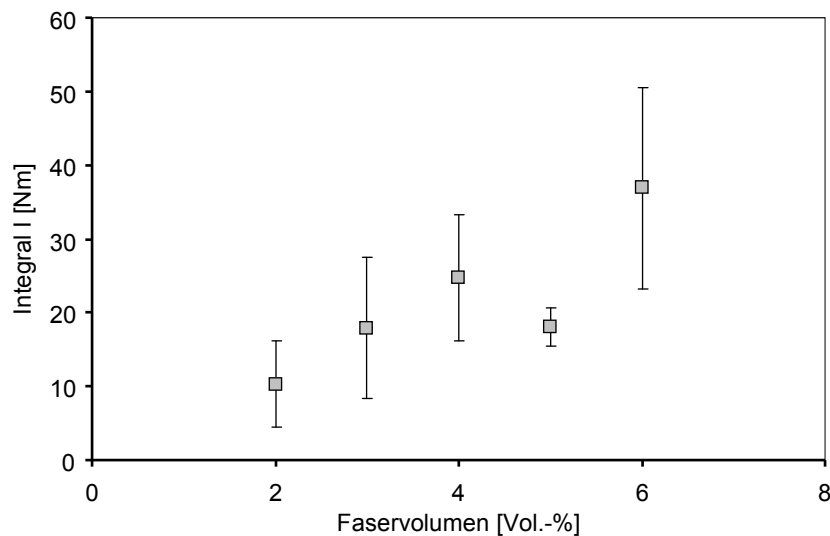
**Abbildung 29:** Ausbreitmaß der Betone B9 (150 mm, links) und B12 (110 mm, rechts)

Die Duktilität konnte durch die Kombination aus Kurz- und Langfasern nicht gesteigert werden. Als am günstigsten erwies sich der Beton B9, der mit 24,7 Nm ein um bis zu 90 % höheres Integral aufwies als die Betone B10 bis B12.

In einem weiteren Optimierungsschritt E wurde untersucht, ob die Duktilität bei einer Kombination der Kurz- und Langfasern durch eine Erhöhung des Faservolumens gesteigert werden kann. Das Faserverhältnis aus Beton B9 ( $V_{SK} : V_{SL} = 1,0 : 3,0$ ) wurde beibehalten, vgl. auch Abbildung 22.



**Abbildung 30:** Ausbreitmaß und Frischmörteltemperatur in Optimierungsschritt E in Abhängigkeit des Faservolumens



**Abbildung 31:** Integral I in Optimierungsschritt E in Abhängigkeit des Faservolumens

Mit zunehmendem Fasergehalt waren eine deutliche Zunahme der Temperatur sowie eine Abnahme des Ausbreitmaßes festzustellen (vgl. auch Abbildung 30 sowie Anhang, Tabelle A-18). Gleichzeitig konnte – trotz ausgeprägter Streuung – mit Zunahme des Faserbewehrungsgrads auch eine Zunahme des Integrals und damit der Duktilität beobachtet werden (Abbildung 31 sowie Tabelle A-19).

Allerdings konnte auch durch eine Erhöhung des Faservolumens auf 6 Vol.-% (Beton B16) nicht die Duktilität des Mörtels M23 (Integral I = 49,9 Nm) erzielt werden. Eine weitere Erhöhung des Faservolumens war sowohl wirtschaftlich als auch vor dem Hintergrund einer Verarbeitung des Frischbetons nicht vertretbar.

#### **2.3.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Mörtel- und Betonentwicklung im Labormaßstab**

In den Versuchen zur Optimierung der Duktilität wurde das maximale Verformungsvermögen für den Mörtel M23 unter Einsatz von 4,0 Vol.-% der Stahlfasern SK1, SK2 und SK3 ( $V_1 : V_2 : V_3 = 1 : 1 : 1$ ) erzielt. Die stahlfaserbewehrten Betone zeigten eine deutlich geringere Duktilität. Zudem waren die faserbewehrten Betone deutlich schlechter verarbeitbar als die faserbewehrten Mörtel. Für das weitere Vorgehen im Rahmen von AP 3-3 kam daher der Mörtel M23 zum Einsatz.



### 2.3.4 Charakterisierung des Frischbetonverhaltens im Technikumsmaßstab

Die Zusammensetzung des im Technikumsmaßstab charakterisierten Feinkornbetons „AISIS“ entspricht derjenigen des Mörtels M23 (siehe Kapitel 2.3.3). Allerdings enthält der Feinkornbeton „AISIS“ zusätzlich Polypropylenfasern zur Erhöhung des Hochtemperaturwiderstands. Die Zusammensetzung des Feinkornbetons „AISIS“ ist Tabelle 2 zu entnehmen.

**Tabelle 2:** Zusammensetzung des entwickelten Feinkornbetons „AISIS“

Stahlfasern <sup>1)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]			PP-Fasern <sup>1)2)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	UHPC 7 <sup>1)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	CEM3 <sup>1)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	FM1 <sup>1)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]	w/z [-]	w/b [-]
SK1	SK2	SK3							
104,7	104,7	104,7	5,5	1226,7	702,0	36,7	187,6	0,30	0,23
<sup>1)</sup> siehe hierzu Anhang, Tabelle A-4 <sup>2)</sup> Polypropylenfasern									

Das Anmischen des Betons erfolgte im Technikum in einem speziell für ultrahochfesten Beton geeigneten Hochleistungsmischer. Die Mischreihenfolge ist nachfolgend angegeben:

- Vormischen der Trockenkomponenten (Zement (CEM), UHPC 7, Polypropylenfasern)
- Wasserzugabe
- Fließmittelzugabe → Fortsetzen des Mischvorgangs bis zur Verflüssigung des Betons
- Stahlfaserzugabe (auf den verflüssigten Beton)

Nach Mischende wurden die Frischbetoneigenschaften des Feinkornbetons „AISIS“ untersucht. Die ermittelten Kennwerte sowie die angewendeten Regelwerke sind in Tabelle 3 aufgeführt. Infolge der Faserzugabe war ein leichter Anstieg der Frischbetontemperatur zu verzeichnen. Die Faserverteilung im Frischbeton war gleichmäßig und es waren keine Faseragglomerationen zu beobachten (vgl. Abbildung 32). Mit einem Ausbreitmaß von 500 mm kann der Beton „AISIS“ der Konsistenzklasse F4 nach DIN EN 206-1 zugeordnet werden. Die Frischbetontemperatur nach Faserzugabe betrug 26,5 °C und liegt somit deutlich höher als bei konventionellem Beton, was auf die hohe Packungsdichte der Ausgangsstoffe, den geringen Wassergehalt sowie den hohen Fasergehalt zurückgeführt werden kann. Aufgrund der erhöhten Temperatur bildete der Frischbeton bereits wenige Minuten nach Mischende eine so genannte „Elefantenhaut“ aus, die für die wasserarmen ultrahochfesten Betone typisch ist. Die Verarbeitung des Betons musste daher zügig nach Mischende erfolgen.

**Tabelle 3:** Frischbetonkennwerte des Feinkornbetons „AISIS“

Rohdichte <sup>1)</sup> [kg/dm <sup>3</sup> ]	Temperatur [° C]		Luftporengehalt <sup>2)</sup> [Vol.-%]	Ausbreitmaß <sup>3)</sup> [mm]
	vor Faserzugabe	nach Faserzugabe		
2,47	25,0	26,5	3,9	500 (F4)
<sup>1)</sup> DIN EN 12350-6 <sup>2)</sup> DIN EN 12350-7 <sup>3)</sup> DIN EN 12350-5				



**Abbildung 32:** Ausbreitmaß des Feinkornbetons „AISIS“

Im Anschluss an die Frischbetoncharakterisierung erfolgte die Probekörperherstellung. Nach dem Befüllen der Schalungen wurde der Beton mit Hilfe einer Rüttelplatte verdichtet. Alle Probekörper wurden nach ihrer Herstellung nach DIN EN 12390-2 gelagert und im Betonalter von einem Tag entformt.

### 2.3.5 Charakterisierung des Festbetonverhaltens

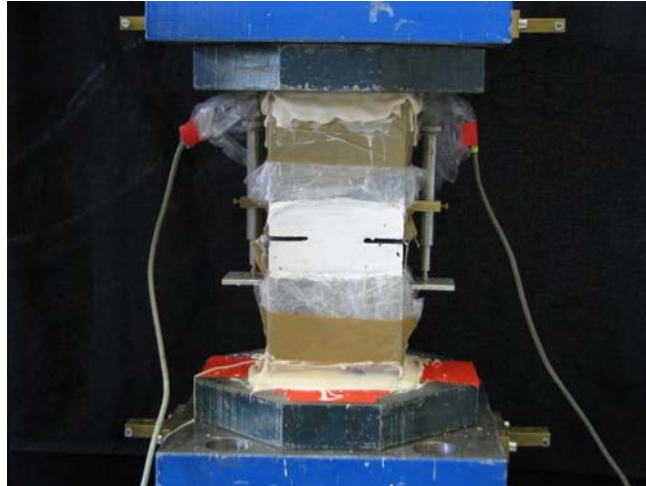
Im Rahmen der Charakterisierung der Festbetoneigenschaften erfolgte zunächst die Bestimmung der Festbetonrohichte  $D_{28}$  nach DIN EN 12390-7. Zur Bestimmung der mechanischen Kennwerte im Betonalter von 28 Tagen wurde die Druckfestigkeit  $f_{cm,cube,28}$  (Würfel,  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ ), die Biegezugfestigkeit  $f_{ct,28}$  (4-Punkt-Biegezugversuch, Balken,  $100 \times 100 \times 570 \text{ mm}^3$ ) sowie der Elastizitätsmodul (E-Modul)  $E_{b,28}$  (Zylinder,  $d/h = 150/300 \text{ mm}$ ) ermittelt. Die entsprechenden Regelwerke sowie die resultierenden Kennwerte sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Die Nettozugfestigkeit  $f_{tn,28}$  sowie die Bruchenergie  $G_{F,28}$  wurde aus Versuchen zum Kraft-Verformungsverhalten in einachsigen Zugversuchen mit Behinderung der Probenverdrehung an gekerbten Probekörpern ( $100 \times 100 \times 220 \text{ mm}$ , Kerbtiefe  $2 \times 30 \text{ mm}$ ) in Anlehnung an frühere Forschungsprojekte am IMB bestimmt, siehe hierzu /Mechtcherine00/ und /Kessler-Kramer02/. Die Probe wurde unter Anwendung eines schnell erhärtenden, zweikomponentigen Klebstoffs auf Methyl-Methacrylatbasis zwischen die verdrehungsfreien Lasteinleitungsplatten geklebt.

**Tabelle 4:** Festbetonkennwerte des Feinkornbetons „AISIS“

Druckfestigkeit $f_{cm,cube,28}^{1)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul $E_{b,28}^{2)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Biegezugfestigkeit $f_{ct,28}^{3)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Nettozugfestigkeit $f_{tn,28}^{4)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchenergie $G_{F,28}^{4)}$ [N/m]
134 (4,5)	41.700 (600)	22 (3,2)	15	$35 \cdot 10^3$
<sup>1)</sup> DIN EN 12390-3 <sup>2)</sup> DIN 1048-5 <sup>3)</sup> DIN EN 12390-5 <sup>4)</sup> ermittelt in Anlehnung an /Mechtcherine00/ und /Kessler-Kramer02/				

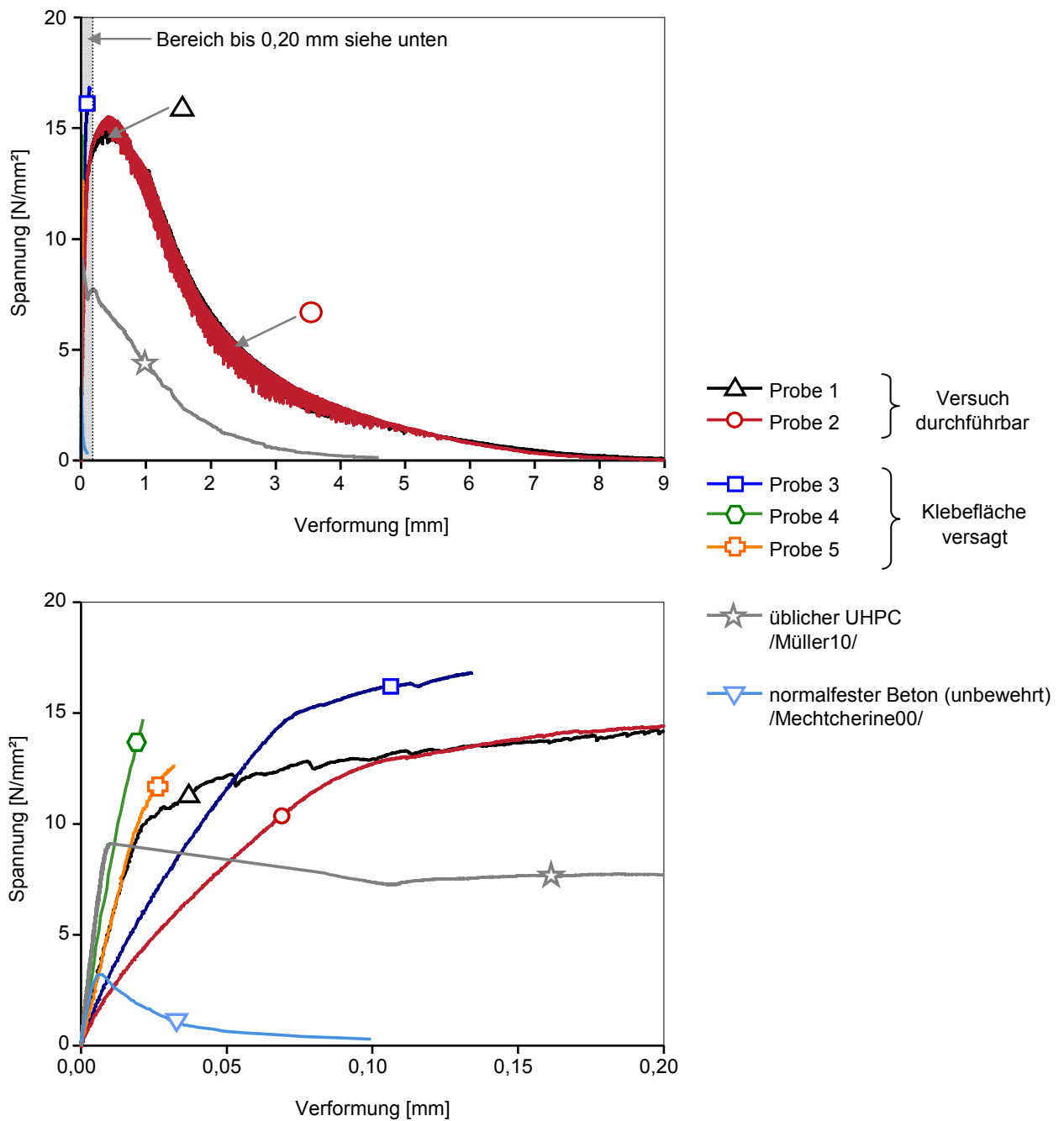
Um ein lokales Austrocknen der Proben während des Einbaus in den Versuchsstand zu verhindern, wurden die Proben mit PE-Folie umhüllt und erst unmittelbar vor Beginn der Versuchsdurchführung freigelegt. In Abbildung 33 ist der eingesetzte Versuchsaufbau abgebildet.



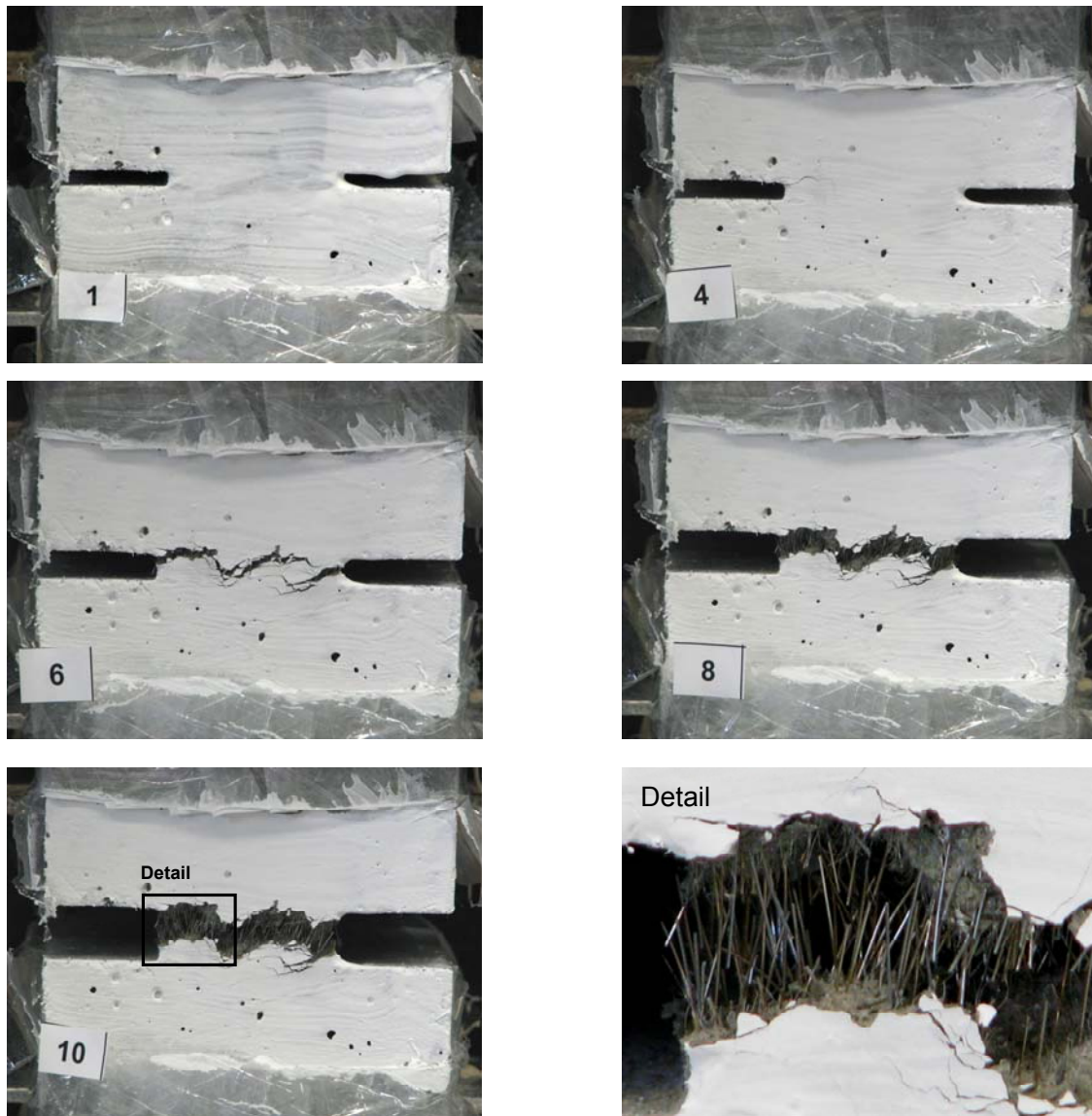
**Abbildung 33:** Versuchsaufbau zur Durchführung der einachsigen Zugversuche

Ein derartiger Versuchsaufbau stellt auch bei der Prüfung konventioneller Betone eine Herausforderung dar, da es äußerst schwierig ist, die Klebeflächen zwischen Betonprobe und Stahlplatten fehlerfrei auszuführen, weshalb es häufig noch vor Erreichen der Zugfestigkeit des Beton zu einem vorzeitigen Versagen einer Klebefläche kommt. Für ultrahochfeste Betone, ist die Wahrscheinlichkeit des frühzeitigen Versagens einer Klebefuge aufgrund der im Vergleich zu konventionellem, unbewehrten Beton sehr hohen Zugfestigkeit noch deutlich höher.

Auch im hier geschilderten Forschungsprojekt waren die Versuche zur einachsigen Zugfestigkeit des Feinkornbetons „AISIS“ erschwert. Nur an zwei Probekörpern war der Versuch bis zum Erreichen der Zugfestigkeit durchführbar, in den übrigen Fällen erfolgte ein frühzeitiges Versagen einer Klebefläche. Die in allen durchgeführten Versuchen erzielten Diagramme zum Kraft-Verformungsverhalten des Feinkornbetons „AISIS“ sind in Abbildung 34 dargestellt, die zugehörigen Kennwerte ( $f_{t,28}$ ,  $G_{F,28}$ ) sind Tabelle 4 zu entnehmen. In Abbildung 35 ist zusätzlich der Zustand des Probekörpers in unterschiedlichen Stadien des Versuchs abgebildet.



**Abbildung 34:** Diagramme zum Kraft-Verformungsverhalten des Feinkornbetons „AISIS“ im einachsigen Zugversuch (oben: Verformungsbereich 0 bis 9 mm, unten: Verformungsbereich 0 bis 0,20 mm)



**Abbildung 35:** Probekörper in unterschiedlichen Stadien des Zugversuchs mit Detail (ausgezogene Stahlfasern im Bereich des Trennrisses)

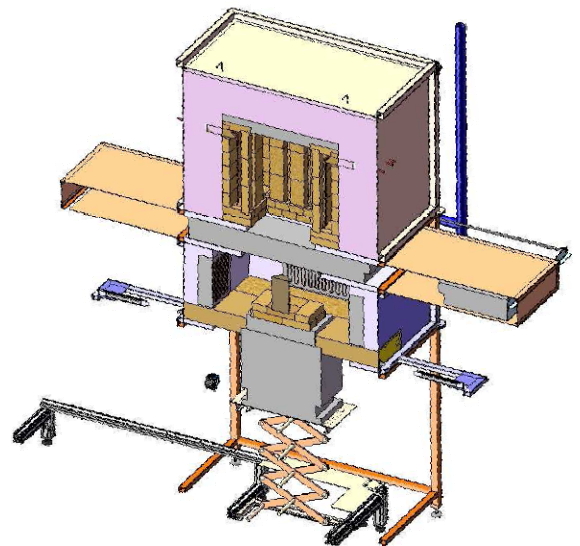
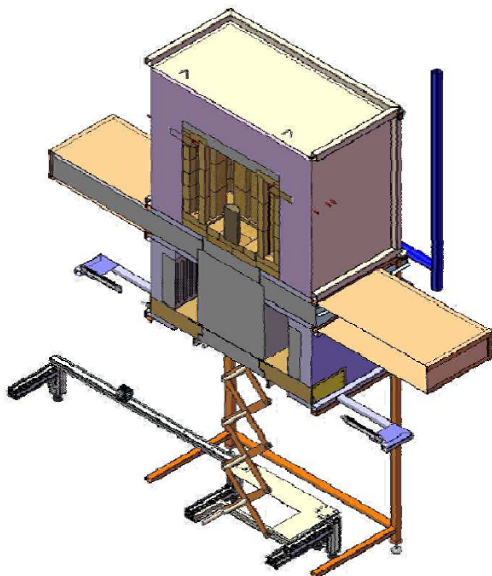
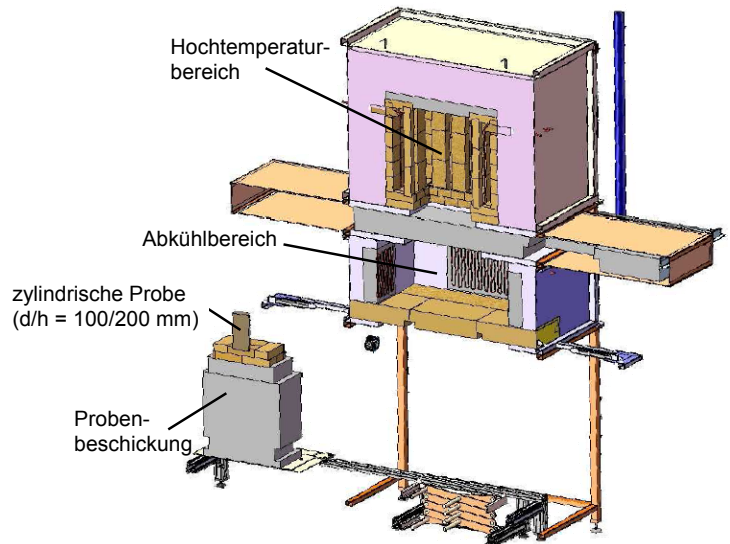
Im Vergleich zu konventionellem, unbewehrten Beton sowie üblichen ultrahochfesten Betonen, die nicht hinsichtlich der Duktilität optimiert wurden, zeigt der Beton „AISIS“ mit einer Nettzugfestigkeit  $f_{tn,28}$  von  $15 \text{ N/mm}^2$  und einer Bruchenergie  $G_{F,28}$  von  $35 \cdot 10^3 \text{ N/m}$  deutlich höhere Werte.

Weitere Versuche zum Widerstand des am IMB entwickelten Betons gegenüber einer hochdynamischen Beanspruchung wurden im Rahmen von AP 3-3 am Ernst-Mach-Institut unter Verwendung des Split-Hopkinson-Bar durchgeführt (siehe hierzu Berichte des Ernst-Mach-Instituts).

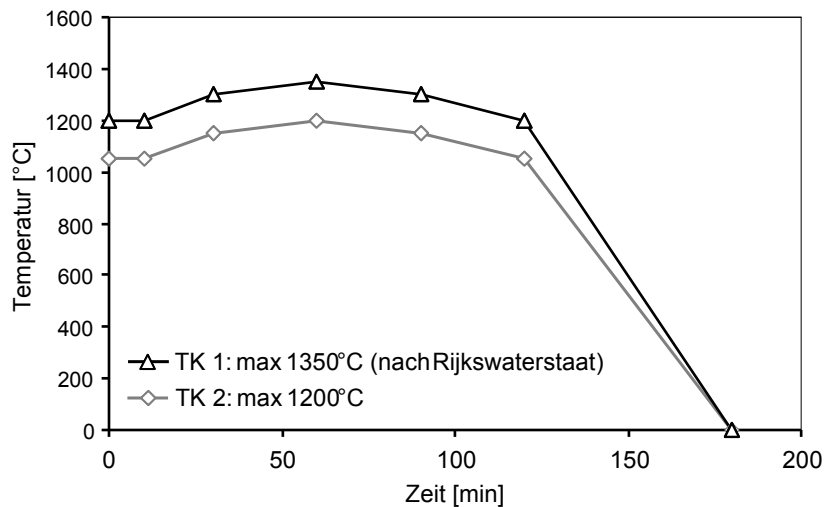
### 2.3.6 Versuche zur Hochtemperaturbeaufschlagung

Die Versuche zur Hochtemperaturbeaufschlagung wurden unter Einsatz der aus Projektmitteln beschafften Hochtemperaturprüfeinrichtung (Abbildung 36) durchgeführt. Die Hochtemperaturprüfeinrichtung wird

elektronisch betrieben, d. h. es erfolgte keine direkte Beflammung der eingestellten Proben. (Anm.: Aufgrund dessen ist im Rahmen des Projekts vom Begriff „Hochtemperaturwiderstand“ anstelle von „Brandwiderstand“ die Rede.)



**Abbildung 36:** Foto (oben links) und Prinzipskizze (Querschnitt) der beschafften Hochtemperaturprüfeinrichtung (oben rechts: vor Beschickung, unten links: Probe im Hochtemperaturbereich, unten rechts: Probe im Abkühlbereich)



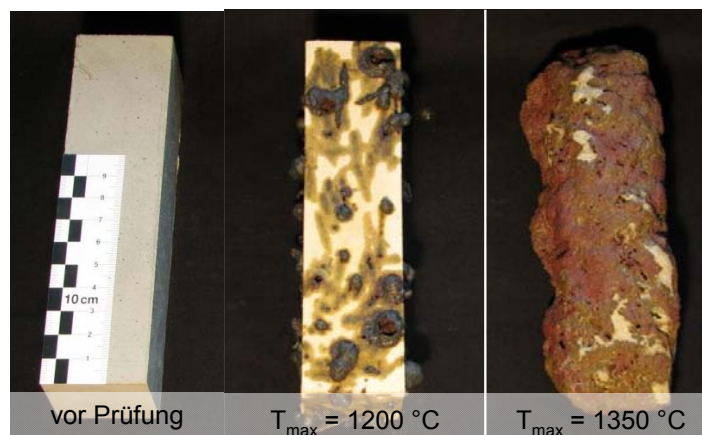
**Abbildung 37:** Temperatur-Zeitkurven für die Prüfung des Hochtemperaturwiderstands von Beton im Projekt AISIS

In Absprache mit dem THW und der Ed. Züblin AG wurden die Prüfbedingungen festgelegt, die der Prüfung des Hochtemperaturwiderstands des zu entwickelnden Betons zugrunde gelegt werden sollten.

Als Grundlage für die Prüfung des Hochtemperaturverhaltens im Rahmen der Betonentwicklung wurde die „Rijkswaterstaat-Brandkurve“ nach niederländischer Norm /GT-98063-1a/ gewählt (vgl. Abbildung 37).

Um den Lastfall Abkühlung ebenfalls nachzustellen, sollte der Probekörper nach 2-stündiger Hochtemperaturprüfung innerhalb von 60 Minuten auf ca. 20 °C abgekühlt werden. Mit Prüftemperaturen bis zu 1350 °C basiert diese Kurve auf der Annahme eines sehr einwirkungsintensiven Lastfalls („worst case scenario“), wie er bei einem Tunnelbrand durchaus auftreten kann.

In Vorversuchen wurden zunächst Versuche zum Verhalten des Betons bei einer Temperaturbeaufschlagung nach der „Rijkswaterstaat-Kurve“ durchgeführt. Hierzu kamen Prismen (40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>) aus ultrahochfestem Feinkornbeton zum Einsatz, die mit 2,5 Vol.-% Stahlfasern bewehrt waren, und denen zur Erhöhung des Hochtemperaturwiderstands außerdem 0,3 Vol.-% Polypropylenfasern (PP-Fasern) zugegeben worden waren.



**Abbildung 38:** Proben nach den Vorversuchen zur Hochtemperaturbeaufschlagung

Das Ergebnis der Vorversuche ist in Abbildung 38 im Vergleich zu einem Probekörper ohne Temperaturbeaufschlagung (links) zu sehen. Infolge von Temperaturen bis maximal 1350 °C kam es zu einem Aufschmelzen des Betons (Abbildung 38, rechts). Daher wurden die Versuche zusätzlich unter Anwendung der Temperaturkurve TK2 mit einer Maximaltemperatur von 1200 °C durchgeführt. Wie aus Abbildung 38 (Mitte) zu erkennen ist, blieben die Probekörper hierbei weitestgehend formstabil.

Da die Hochtemperaturprüfeinrichtung durch die Betonschmelze beschädigt werden kann und zudem eine Festigkeitsprüfung der Probekörper nach der Temperaturbeaufschlagung bei einem Formverlust nicht möglich ist, wurden die weiteren Versuche zur Optimierung des Hochtemperaturwiderstands unter Zugrundelegung der Kurve TK2 durchgeführt.

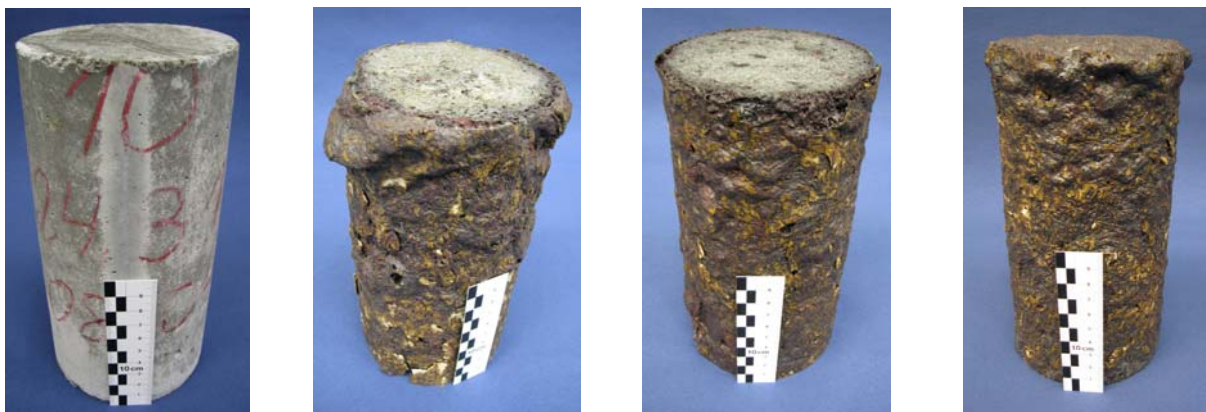
Für die weiteren Versuche zur Hochtemperaturbeaufschlagung kamen Zylinder (d/h = 100/200 mm) zum Einsatz. Untersucht wurde zum einen die Resttragfähigkeit der Betone (siehe Kapitel 2.3.6.1) sowie die Veränderung des Porenraums und des Phasenbestands (siehe Kapitel 2.3.6.2) infolge der Hochtemperaturbelastung.

### 2.3.6.1 Resttragfähigkeit

Für die Untersuchung der Resttragfähigkeit wurde die Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 an Serien bestehend aus jeweils drei Probekörpern geprüft.

Die Probekörperserien unterschieden sich bezüglich der Zugabemengen an Polypropylenfasern, die üblicher Weise zur Steigerung der Brandbeständigkeit von Beton zugegeben werden. Im Brandfall schmelzen die PP-Fasern auf und schaffen einen Porenraum, durch den verdampfendes Wasser entweichen kann, wodurch Abplatzungen der Betonoberfläche infolge von Sprengdrücken minimiert werden (siehe auch Kapitel 1.3). Die Betonproben enthielten jeweils 0 Vol.-%, 0,3 Vol.-% und 0,6 Vol.-% PP-Fasern.

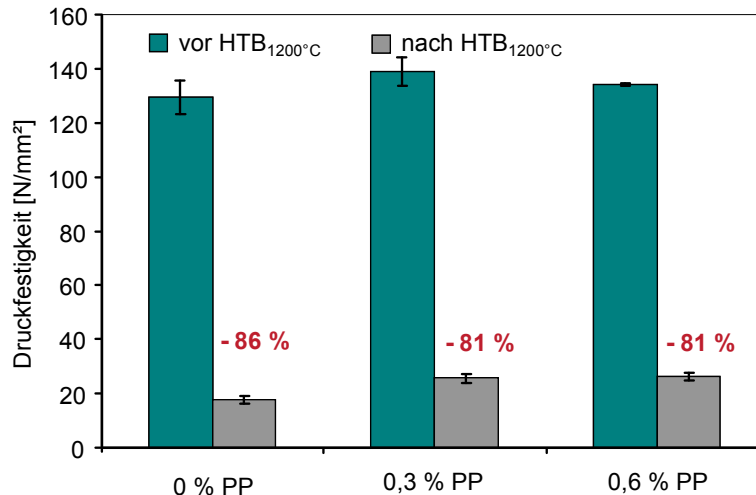
Parallel zu den hochtemperaturbeaufschlagten Probekörpern wurden im selben Betonalter auch normgelagerte (DIN EN 12390-2) Referenzproben mit gleichem PP-Fasergehalt wie die erhitzten Proben geprüft. Vor der Druckfestigkeitsprüfung wurden die hochtemperaturbeaufschlagten Probekörper an den Stirnseiten planparallel geschliffen.



**Abbildung 39:** Betonzyylinder vor (links) und nach der Hochtemperaturbeaufschlagung (v. l. n. r.: 0 Vol.-%, 0,3 Vol.-%, 0,6 Vol.-% PP-Fasern)



Das Erscheinungsbild der Probekörper vor und nach der Hochtemperaturbeaufschlagung ist in Abbildung 39 dargestellt. Es ist erkennbar, dass tendenziell eine Abnahme der Deformationen und Abplatzungen mit zunehmendem PP-Fasergehalt festzustellen war.



**Abbildung 40:** Druckfestigkeit vor und nach der Hochtemperaturbeaufschlagung (HTB)

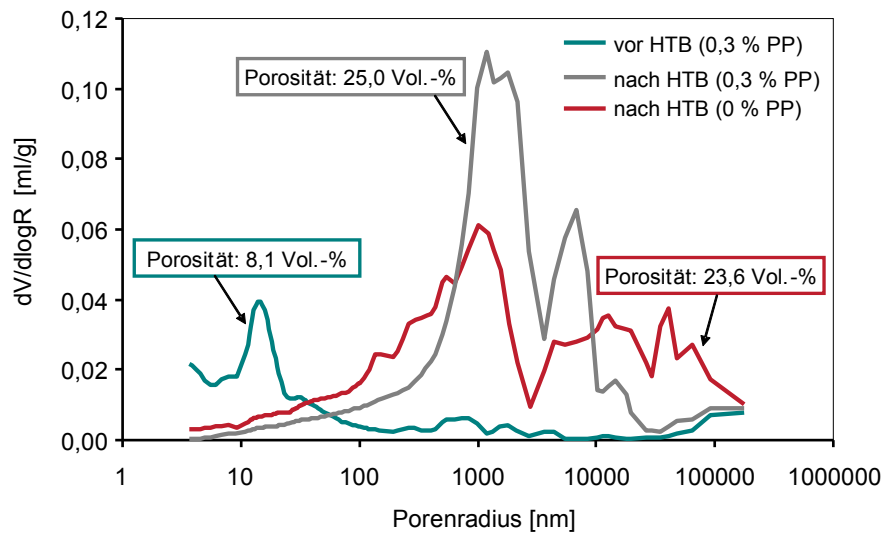
Die Druckfestigkeit der Zylinder vor und nach der Hochtemperaturbeaufschlagung ist Abbildung 40 zu entnehmen. Mit Werten im Bereich zwischen 130 und 140 N/mm<sup>2</sup> lag die Druckfestigkeit vor der Hochtemperaturbeaufschlagung im erwarteten Bereich (vgl. auch Kapitel 2.3.4.2). Der mit 86 % stärkste Rückgang der Druckfestigkeit war für die Prüfkörper ohne PP-Faserezusatz festzustellen. Ein Zusatz von 0,3 Vol.-% bzw. 0,6 Vol.-% PP-Fasern führte zu einem leicht geringeren Rückgang der Druckfestigkeit um 81 % auf 26 N/mm<sup>2</sup>.

Für die endgültige Zusammensetzung des Feinkornbetons „AISIS“ wurde eine Zugabemenge von 0,6 Vol.-% PP-Fasern gewählt.

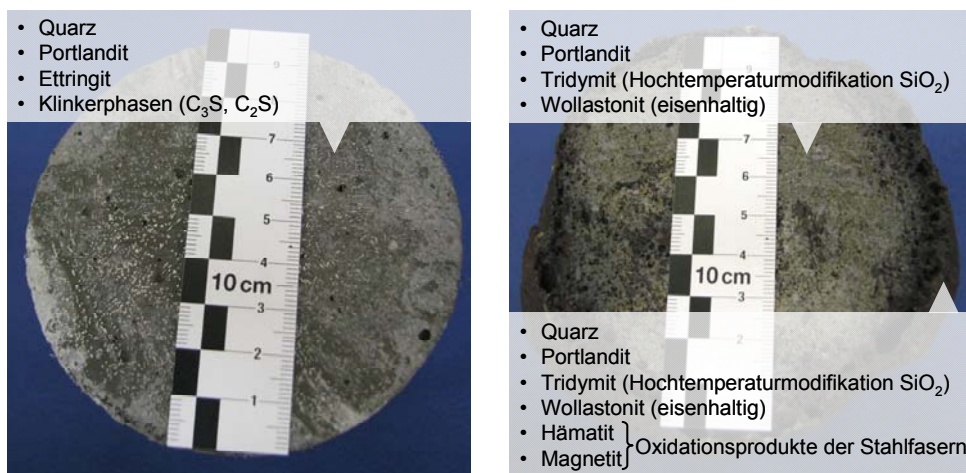
### 2.3.6.2 Porenraum und Phasenbestand

Neben den Untersuchungen zur Resttragfähigkeit wurde auch die Veränderung des Porenraums infolge der Hochtemperaturbeaufschlagung mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie erfasst. Für die Prüfung wurden Bohrkern (d/h = 15/20 mm) aus dem Probeninnern der in Abbildung 39 dargestellten Zylinder entnommen. Im Vorfeld der Prüfung wurden die Bohrkern 12 Stunden bei 105 °C getrocknet. Der maximale Intrusionsdruck betrug 2060 bar. Die Auswertung der Messung erfolgte unter Zugrundelegung eines Kontaktwinkels von 141,3° sowie einer Oberflächenspannung des Quecksilbers von 0,485 N/m. Die Ergebnisse sind in Abbildung 41 dargestellt.

Wie aus Abbildung 41 hervorgeht, war infolge der Hochtemperaturprüfung eine Zunahme der Porosität um den Faktor drei zu beobachten. Dies ist auf das Austreiben nicht nur des physikalisch, sondern auch des chemisch gebundenen Wassers und die mit dem Wasserdampfaustritt verbundene Ausweitung der Transportwege sowie auf die Zunahme von Mikrorissen zurückzuführen.



**Abbildung 41:** Porenradienverteilung und Porosität vor und nach der Hochtemperaturbeaufschlagung (HTB)



**Abbildung 42:** Phasenbestand vor (links) und nach (rechts) der Hochtemperaturbeaufschlagung

Der Phasenbestand der Betone vor und nach der Hochtemperaturbeaufschlagung wurde mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 42 zusammengefasst. Vor der Hochtemperaturbeaufschlagung waren hauptsächlich Quarz (aus Sand/Quarzmehl), Portlandit und Ettringit (Hydratationsprodukte des Zements) und – wie für den wasserarmen UHPC üblich – unhydratisierte Klinkerphasen des Zements nachweisbar. Im Innern des temperaturbeaufschlagten Zylinders war neben Quarz und Portlandit auch die  $SiO_2$ -Hochtemperaturmodifikation Tridymit sowie eisenhaltiges Wollastonit zu beobachten. Im Bereich der Mantelfläche waren zusätzlich Hämatit und Magnetit, also Oxidationsprodukte der Stahlfasern, erkennbar.

### **3 Vergleich der erreichten Ergebnisse mit den Projektzielen**

Innerhalb der Arbeitspakete AP 2-2 und 3-2 wurden alle gesetzten Ziele erreicht, d. h. alle am IMB durchgeführten Versuche wurden zur Zufriedenstellung aller beteiligten Projektpartner konzipiert und durchgeführt.

Bei einer Betonentwicklung werden meist von unterschiedlichen Seiten (Planer, Betonproduzent, Fertigteilwerk, Anwender etc.) sehr verschiedene, zum Teil gegenläufige Anforderungen an den zu entwickelnden Beton gestellt. Meistens ist es nicht möglich, einen Beton zu entwickeln, der alle Anforderungen erfüllt. Der Betontechnologe muss dann vielmehr abwägen, welche Betoneigenschaften zugunsten anderer Betoneigenschaften untergeordnet zu betrachten sind. Das Endprodukt stellt somit in der Regel einen Kompromiss dar, mit dem nach Möglichkeit alle involvierten Parteien konform gehen, wie dies auch im Projekt AISIS der Fall war.

Die im Projekt AISIS angestrebten und erreichten Zielen der Betonentwicklung im Rahmen von AP 3-3 sind nachfolgend geschildert.

#### **3.1 Anforderungen an die Betonherstellung und an die Tübbingproduktion**

Bei der Betonentwicklung sollten die im Fertigteilwerk der Fa. Rekers für die Betonherstellung eingesetzten Ausgangsmaterialien berücksichtigt werden. Der Einsatz einer groben Gesteinskörnung erwies sich jedoch als nicht zielführend (vgl. Kapitel 2.3), d. h. von der Verwendung von Kies der Körnung 2/8 wurde abgesehen. Als günstig hinsichtlich der Betoneigenschaften sowie der Wirtschaftlichkeit wurde der Einsatz des Mineralcompounds „UHPC 7“ bewertet, der am IMB in einem früheren Forschungsvorhaben entwickelt worden war, siehe hierzu /Scheidt08/. Aufgrund der Verwendung dieses Mineralcompounds (Körnung 0 bis 0,5 mm) erübrigte sich auch der Einsatz des werkseigenen Sands (Körnung 0/2 mm) der Fa. Rekers.

Verwendet werden konnte der werkseigene Zement der Fa. Rekers (CEM3, siehe hierzu Anhang, Tabelle A-4). Aufgrund der Verwendung dieses Zements war eine Maximierung der Fließfähigkeit des Frischbetons nicht möglich. Die intensive Abstimmung von Fließmittel und Zement (vgl. Kapitel 2.3) ermöglichte aber eine Optimierung des Frischbetonverhaltens.

Die Prototypherstellung im Werk der Fa. Rekers zeigte, dass der Beton auch im Betonfertigteilwerk mit der dort vorhandenen Technik gut anzumischen war. Es konnte eine ausreichende Fließfähigkeit erzielt werden (siehe hierzu Berichte der Fa. Rekers). Aufgrund der hohen Fließmittelmengen im ultrahochfesten Beton ist allerdings nicht die so genannte Grünstandfestigkeit des Frischbetons zu erzielen, wie sie bei der Tübbingproduktion normalerweise für die im Werk der Fa. Rekers vorhandene Fertigungstechnik benötigt wird. Dies machte eine Weiterentwicklung der Fertigungstechnik durch die Fa. Rekers erforderlich. Unter Einsatz dieser weiterentwickelten Fertigungstechnik wurde zum Abschluss der Kooperation mit der Fa. Rekers ein Tübbing aus dem entwickelten ultrahochfesten Beton hergestellt (siehe hierzu Berichte der Fa. Rekers).

#### **3.2 Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften des entwickelten Betons**

Nach Aussage der Ed. Züblin AG kann der Tübbingquerschnitt maximal auf einen Werte von 25 cm reduziert werden. Aus dieser Abmessung resultierten als Kennwerte (Designwerte) für den zu entwickelnden Beton eine Druckfestigkeit von 80 N/mm<sup>2</sup> und eine zentrische Zugfestigkeit von 8 N/mm<sup>2</sup>. Unter Zugrun-

delegung des Sachstandsberichts Ultrahochfester Beton /DAfStb08/ ergaben sich hieraus eine charakteristische Druckfestigkeit  $f_{ck}$  von 141 N/mm<sup>2</sup> sowie eine charakteristische zentrische Zugfestigkeit  $f_{ctk}$  von 21 N/mm<sup>2</sup>.

Diese Kennwerte konnten im Projekt nicht erreicht werden. Die Druckfestigkeit lag mit 134 N/mm<sup>2</sup> um 5 % unter der geforderten Festigkeit. Die zentrische Zugfestigkeit konnte aus versuchstechnischen Gründen nur an gekerbten Proben bestimmt werden (vgl. Kapitel 2.3.5) und betrug 15 N/mm<sup>2</sup>. Bei der Prüfung ungekerbter Proben ist eine höhere Zugfestigkeit zu erwarten.

Ein maßgebender Grund für diese geringeren Festigkeiten war zum einen der Verzicht auf eine grobe, hochfeste Gesteinskörnung zugunsten der Duktilität des Festbetons. Zum anderen zog die Verwendung des Zements CEM3 der Fa. Rekers Einbußen hinsichtlich der Verarbeitbarkeit des Betons nach sich, woraus sich wiederum Einbußen hinsichtlich der erreichbaren Festigkeit ergaben.

### **3.3 Anforderungen an den Hochtemperaturwiderstand des entwickelten Betons**

In Absprache mit dem THW und der Ed. Züblin AG wurde als Grundlage für die Prüfung des Hochtemperaturverhaltens des entwickelten Betons die „Rijkswaterstaat-Brandkurve“ nach niederländischer Norm (GT-98063-1a) gewählt. Mit einer maximalen Temperatur von 1350 °C stellte sich diese Kurve jedoch als ungeeignet heraus, da diese Temperaturen zu einem Schmelzen der Betonoberfläche führten, was eine anschließende Prüfung der Betonproben erschwerte. Daher wurde ersatzweise eine Temperaturkurve in Anlehnung an die „Rijkswaterstaat-Brandkurve“ mit einer maximalen Temperatur von 1200 °C eingesetzt, was das Prüfen der Probekörper im Anschluss an die Hochtemperaturbeanspruchung ermöglichte.

### **3.4 Anforderungen an den Widerstand des entwickelten Betons gegenüber hochdynamischer Beanspruchung**

Die Versuche zum Widerstand des entwickelten Betons gegenüber einer hochdynamischen Beanspruchung wurden in Kooperation mit dem Ernst-Mach-Institut durchgeführt. Quantitative Angaben zur benötigten Bruchenergie oder zum erforderlichen Verformungsvermögen des zu entwickelnden Betons wurden vom Ernst-Mach-Institut im Vorfeld der Versuche nicht gemacht. Der zu entwickelnde Beton sollte generell ein möglichst duktilen Nachbruchverhalten aufweisen. Diese Anforderung wurde vom entwickelten Beton erfüllt.

#### 4 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurde an weiteren Forschungseinrichtungen zu ähnlichen Themenbereichen ebenfalls Forschung betrieben. Die in den jeweiligen Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse sind nachfolgend zusammengefasst wiedergegeben.

Neuere Ergebnisse des in /Nöldgen08/ beschriebenen Versuchsprogramms werden in /Riedel10/ und /Nöldgen09/ weiter ausgeführt. In /Nöldgen10/ werden neben Computersimulationen insbesondere Ergebnisse beschrieben, die im Rahmen eines experimentellen Programms zum Flugzeuganprall erzielt wurden. In statischen Versuchen zur Bruchenergie wurde der Einfluss der Stahlfaserbewehrung eines ultrahochfesten Grobkornbetons auf die Bruchenergie untersucht. Durch die Erhöhung der Zugabemenge an Stahlfasern von 1,0 Vol.-% auf 2,5 Vol.-% konnte die Bruchenergie von 10.290 N/m auf 13.935 N/m – also um 35 % – gesteigert werden. Die Druckfestigkeit des faserlosen ultrahochfesten Betons betrug 152,9 N/mm<sup>2</sup> und nahm durch die Faserzugabe um 13 % (bei einer Faserzugabe von 1 Vol.-%) bzw. um 36 % (bei einer Faserzugabe von 2,5 Vol.-%) zu. Die Zugfestigkeit ohne Stahlfaserzugabe betrug 6 N/mm<sup>2</sup>. Durch die Zugabe von 1 Vol.-% Stahlfasern wurde hier eine Steigerung um 10 % (bei einer Faserzugabe von 1 Vol.-%) bzw. um 57 % (bei einer Faserzugabe von 2,5 Vol.-%) erzielt.

In Versuchen unter Einsatz des Split-Hopkinson-Bars wurde die dynamische Bruchenergie ermittelt /Nöldgen09/. Diese betrug beim ultrahochfesten Beton mit einer Faserzugabe von 1 Vol.-% 10.070 N/m und bei einer Faserzugabe von 2,5 % 11.290 N/m. Bei Untersuchungen zum Dynamic Increase Factor (DIF, Verhältniswert der dynamischen zur statischen Festigkeit) konnte der Trend einer geringeren Festigkeitssteigerung mit zunehmender Betondruckfestigkeit bestätigt werden. Bei der Untersuchung der Bruchfläche der untersuchten Betone war durchgängig ein Faserauszug zu beobachten, also kein Versagen der Fasern infolge der Zugbeanspruchung.

Versuche zum Beschuss von faserbewehrten (1 Vol.-%) und zusätzlich stabstahlbewehrten Platten aus ultrahochfestem Beton (1000 x 1000 x ca. 30 mm<sup>3</sup>) im Rahmen des bereits in /Nöldgen08/ vorgestellten Versuchsprogramms werden in /Riedel10/ dargelegt. Die untersuchten Platten wurden mit einem Stahlgeschoss mit verschiedenen Geschwindigkeiten beschossen. Erst bei Geschwindigkeiten von mehr als 320 m/s wurden die Platten vom Geschoss perforiert. Die Rissöffnungen im Bereich des beschädigten Betons wurden von den Stahlfasern überbrückt, wodurch auch nach Schadenseintritt der Zusammenhalt des Gefüges gewährleistet war. Durch die Verwendung des ultrahochfesten Betons konnte die Rate an absorbierter Energie um 110 % verglichen mit konventionellem Beton (C25/30) gesteigert werden.

Weitere Ergebnisse des zuvor beschriebenen Versuchsprogramms sind /Nöldgen10/ zu entnehmen.

Missemer et al. untersuchten die Wirksamkeit verschiedener Kunststofffasern bei der Brandbeaufschlagung von ultrahochfestem Beton /Missemer10/. Sie stellten fest, dass der Einsatz von Polymethylmethacrylatfasern (PMMA-Fasern) sowie von Polyvinylalkoholfasern (PVA-Fasern) nicht zur Steigerung des Brandwiderstands von UHPC geeignet ist. Vielmehr eignen sich Polypropylen- (PP-Fasern) sowie Polyethylenfasern (PE-Fasern). Die Unterschiede hinsichtlich der Wirksamkeit ergeben sich aus unterschiedlichen Schmelztemperaturen sowie aus einem unterschiedlichen Erscheinungsbild des Faserbetts nach dem Aufschmelzen. Während PP- und PE-Fasern bereits bei Temperaturen von bis zu 165 °C schmelzen, liegt die Schmelztemperatur von PVA-Fasern bei ca. 240 °C. Missemer et al. stellten fest, dass der geringere Brandwiderstand von Beton mit PVA-Fasern auf das spätere Aufschmelzen der Fasern und das damit verbundene spätere Ausbilden von Transportkanälen für den entweichenden Wasserdampf verbunden ist. Die geringere Wirksamkeit der PMMA-Fasern führten sie darauf zurück, dass das nach

dem Aufschmelzen zurückbleibende Faserbett sehr glatt war und nur wenige, sehr feine Risse aufwies. Im Gegensatz dazu zeigte das Faserbett beim Einsatz von PP- bzw. PE-Fasern eine raue Oberfläche mit einer ausgeprägten Bildung von Rissen, die dem Wasserdampf zusätzlichen Ausweichraum bieten.

Neben experimentellen Untersuchungen existieren außerdem zunehmend Bestrebungen, das Verhalten von Beton unter Brandbeanspruchung zu modellieren (siehe z. B. /Lottmann09/) bzw. mit Hilfe von Computerprogrammen zu simulieren (siehe z. B. /Zhang09/).

## 5 Zusammenfassung

Die Entwicklung der letzten Jahre hat gezeigt, dass ultrahochfeste Betone immer häufiger baupraktisch zur Anwendung kommen. Durch den Einsatz derartiger Betone können sowohl sehr schlanke, filigrane als auch sehr dauerhafte Bauwerke und Bauteile hergestellt werden. Es ist daher davon auszugehen, dass die Nachfrage nach ultrahochfesten Betonen in den kommenden Jahren generell zunimmt.

Der im Rahmen des Projekts AISIS zu entwickelnde Beton zeichnet sich neben einer sehr hohen Festigkeit und Dauerhaftigkeit außerdem durch einen sehr hohen Widerstand sowohl gegenüber einer Hochtemperatur- als auch gegenüber einer Explosionsbeanspruchung aus. Da auf dem Markt bislang kein derartiger Beton existiert, ist nicht nur auf nationaler sondern auch auf internationaler Ebene eine verstärkte Nachfrage nach diesen Spezialbetonen für den Bau gefährdeter Infrastruktur zu erwarten.

Da zum Materialverhalten ultrahochfester Betone bei extrem hohen Temperaturen und unter hochdynamischer Beanspruchung bisher nur sehr wenige Forschungsergebnisse existieren, stellen die Ergebnisse, die im Rahmen dieses Teilvorhabens im Projekt AISIS erzielt wurden, nicht zuletzt einen Fortschritt bezüglich der Kenntnis des Materialverhaltens des Werkstoffs dar. Die umfangreiche Kenntnis des Werkstoffverhaltens ist wiederum Voraussetzung für die Akzeptanz beim potentiellen Anwender und dem damit verbundenen baupraktischen Einsatz.

Der Widerstand des entwickelten Betons gegenüber einer Hochtemperaturbeanspruchung wurde im Rahmen des dargestellten Forschungsvorhabens an kleinformatischen Probekörpern (Zylinder,  $d/h = 100/200$  mm) im elektrisch betriebenen Hochtemperaturofen bestimmt. Im Vorfeld eines Praxiseinsatzes des entwickelten Betons in einem Bauteil, bei dem mit einer Brandbeanspruchung zu rechnen ist, sollten nach Empfehlungen von Dehn et al. /Dehn09/ zusätzlich Versuche an Großbauteilen unter direkter Beflammung und nach Möglichkeit gleichzeitig einwirkender mechanischer Beanspruchung realisiert werden. Derartige Versuche waren im Rahmen des Verbundprojekts AISIS aus Zeit- und Kostengründen nicht umsetzbar.

Die innerhalb des Verbundprojekts AISIS, Teilprojekt *Kurzzeitdynamische Baugrund-Bauwerks-Interaktion und Entwicklung brandbeständiger ultrahochfester Betone* (Teilbereich *Entwicklung brandbeständiger ultrahochfester Betone für hochdynamische Beanspruchungen*) erzielten Ergebnisse sollen in einer noch festzulegenden Fachzeitschrift veröffentlicht werden.

## 6 Literatur

- /Bamonte08/ Bamonte, P., Gambarova, P. G., Meda, A.: Today's concrete exposed to fire – test results and sectional analysis. In: Structural Concrete 9 (2008), Nr. 1, S. 19-29
- /Bornemann02/ Bornemann, R., Schmidt, M.; Vellmer, C.: Brandverhalten ultra-hochfester Betone. In: Beton 9 (2002), S. 418-422
- /Breiner08/ Breiner, R. D.: Entwicklung eines ultrahochfesten Betons für hochdynamische Beanspruchungen. Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Diplomarbeit, 2008
- /Dehn06/ Dehn, F.; Werther, N.; Knitl, J.: Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig. In: Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), Nr. 8, S. 631-636
- /Dehn09/ Dehn, F., Hauswaldt, S., Juknat, M.: Grundsätzliche Überlegungen zur Brandprüfung von Tunnelbauteilen. In: Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), Nr. 12, S. 869-875
- /Empelmann08/ Empelmann, M., Teutsch, M., Steven, G.: Improvement of the Post Fracture Behaviour of UHPC by Fibres. In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Fehling, E., Schmidt, M., Stürwald, S. (Hrsg.), Kassel University Press, Kassel, 2008, S. 177-184
- /Farnam08/ Farnam, Y., Shekarchi, M., Mirdamadi, A.: Experimental investigation of impact behaviour of high strength fiber reinforced concrete panels. In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Fehling, E., Schmidt, M., Stürwald, S. (Hrsg.), Kassel University Press, Kassel, 2008, S. 751-758
- /Heinz04/ Heinz, D.; Dehn, F.; Urbonas, L.: Fire Resistance of Ultra High Performance Concrete (UHPC) – Testing of Laboratory Samples and Columns under Load. In: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Schmidt, M., Fehling, E., Geisenhanslüke, C. (Hrsg.), Kassel University Press, Kassel, 2004, S. 703-715
- /Herold06/ Herold, G., Scheydt, J. C., Müller, H. S.: Entwicklung und Dauerhaftigkeit ultrahochfester Betone. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 72 (2006), Nr. 10, S. 4-14
- /Horvath04/ Horvath, J.: Brandverhalten von Hochleistungsbetonen. In: Zement + Beton (3) 2004, S. 38-39
- /Kessler-Kramer02/ Kessler-Kramer, C.: Zugtragverhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung. Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Dissertation, 2002
- /Lappa06/ Lappa, E.: Fatigue failure properties of high and ultra high strength fibre reinforced concrete. In: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International PhD Symposium in Civil Engineering, Zurich, 2006, S. 86-87 + CD-ROM



- /Lottman09/ Lottmann, B. B. G., Koenders, E. A. B., Walraven, J. C.: Towards a Model for Fire Resistant Design of Concrete Elements. In: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure. Dehn, F., Koenders, E. A. B. (Hrsg.), Leipzig, 2009, S. 533-544
- /Mechtcherine00/ Mechtcherine, V.: Bruchmechanische und fraktologische Untersuchungen zur Rissausbreitung in Beton. Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Dissertation, 2000
- /Mezger00/ Mezger, T.: Das Rheologie-Handbuch. Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern. Zorll, U. (Hrsg.), Vincentz Verlag, Hannover, 2000
- /Missemer10/ Missemer, L., Ouedraogo, E., Malécot, Y., Rogat, D., Clergue, C.: Effect of polymer fibres inclusion in fire spalling of ultra-high performance concrete. In: Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures – High Performance, Fiber Reinforced Concrete, Special Loadings and Structural Applications (FraMCoS), Oh, B. H. et al. (Hrsg.), Jeju (Korea), 2010
- /Müller07/ Müller, H. S., Scheydt, J. C., Burkart, I.: Frisch- und Festbetoneigenschaften ultrahochfester Betone. In: Tagungsband zur Fachtagung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton 2007, Berlin, März 2007, S. A30-A38
- /Müller10/ Müller, H. S., Scheydt, J. C.: Entwicklung eines ultrahochfesten Betons und zugehörige Herstellverfahren für die Produktion im Betonfertigteilwerk. Teilprojekt: Entwicklung eines für den Betonfertigteilbau geeigneten UHPC. Abschlussbericht zum AiF Geschäftszeichen KF0494801SU7, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, 2010
- /Nakamura05/ Nakamura, S.: Fluidity of Hybrid Fiber Concrete Containing PVA Fibers of Multiple Combinations. In: ETH Gest Academic Report Part 3, ETH Zürich, Zürich, 2005
- /Nöldgen08/ Nöldgen, M., Riedel, W., Fehling, E., Thoma, K.: Impact on structural Ultra High Performance Concrete (UHPC) elements in high-rise buildings. In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Fehling, E., Schmidt, M., Stürwald, S. (Hrsg.), Kassel University Press, Kassel, 2008, S. 735-742
- /Nöldgen09/ Nöldgen, M., Millon, O., Thoma, K., Fehling, E.: Hochdynamische Materialeigenschaften von Ultrahochleistungsbeton (UHPC). In: Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), Nr. 11, S. 717-727
- /Nöldgen107/ Nöldgen, M.: Modellierung von ultrahochfestem Beton (UHPC) unter Impaktbelastung – Auslegung eines Hochhauskerns gegen Flugzeuganprall. Dissertation, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität Kassel, 2010
- /Puntke02/ Puntke, W.: Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken. In: Beton 52 (2002), Nr. 5, S. 242-248

- /Rebentrost08/ Rebentrost, M., Wight, G.: Behaviour and Resistance of Ultra High Performance Concrete to Blast Effects. In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Fehling, E., Schmidt, M., Stürwald, S. (Hrsg.), Kassel University Press, Kassel, 2008, S. 735-742
- /Riedel10/ Riedel, W., Nöldgen, M., Straßburger, E., Thoma, K., Fehling, E.: Local damage to Ultra High Performance Concrete structures caused by an impact of aircraft engine missiles. In: Nuclear Engineering and Design (240) 2010, S. 2633-2642
- /Scheydt08/ Scheydt, J. C., Herold, G., Müller, H. S., Kuhnt, M.: Development and Application of UHPC Convenience Blends. In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Fehling, E., Schmidt, M., Stürwald, S. (Hrsg.), Kassel University Press, Kassel, 2008, S. 69-76
- /Schmidt05/ Schmidt, M.; Fehling, E. (Hrsg.): Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC). Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 1, Universität Kassel, Kassel University Press, Kassel 2005
- /Schneider03/ Schneider, U.; Horvath, J.; Dehn, F.: Abplatzverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) unter Brandbeanspruchung. ARCONIS Spezial 2, Fraunhofer Irb Verlag, Auflage 1, Juni 2003, S. 66-68
- /Schneider06/ Schneider, U.; Horvath, J.: Brandschutz-Praxis in Tunnelbauten. Brandverhalten, Brandschutzmaßnahmen, Sanierung. Bauwerk Verlag, Berlin, 2006
- /Zhang09/ Zhang, H., Davie, C. T.: Finite Element Analysis of Pore Pressures and Thermally Induced Stresses for Spalling of Concrete Exposed to Elevated Temperatures. In: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure. Dehn, F., Koenders, E. A. B. (Hrsg.), Leipzig, 2009, S. 484-494

## 7 Normen und Richtlinien

- DIN EN 196-1 Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Beuth Verlag, Berlin, Mai 2005
- DIN EN 206-1 Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Beuth Verlag, Berlin, 2000
- DIN EN 12350-5 Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- DIN EN 12350-6 Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohddichte. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- DIN EN 12350-7 Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- DIN EN 12390-2 Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- DIN EN 12390-3 Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- DIN EN 12390-5 Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- DIN EN 12390-7 Prüfung von Festbeton - Teil 7: Dichte von Festbeton. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- DIN 1048-5 Prüfverfahren für Beton – Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Beuth Verlag, Berlin, 1991
- DIN EN 196-1 Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Beuth Verlag, Berlin, Mai 2005
- DIN EN 1015-3 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch), Berlin, Juni 2004
- GT-98063-1a Fire Protection for Tunnels. Part 1: Fire Test Procedure. Directorate-General of Public Works and Water Management, Civil Engineering Division, Tunneling Department, Document number GT-98036-1a, Niederlande, 1999
- DAfStb RiLi SVB Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2003
- DBV01 Beton- und Bautechnik-Verein E. V. (Hrsg.): DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton. Eigenverlag des DBV, Berlin, 2001
- DAfStb08 Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Heft 561, Beuth Verlag, Berlin, 2008

## A Anhang

**Tabelle A-1:** Produktbeschreibung der untersuchten Verpressmaterialien

Material	Produktbeschreibung (Herstellerangaben)
V1	2-Komponenten-Foliengebilde auf Epoxidharzbasis zur Kartuschenanwendung
V2	hartelastisch aushärtendes, handverarbeitbares 2-Komponenten-Kunststoffsystem auf Polyurethanbasis
V3	elastisch aushärtendes, handverarbeitbares 2-Komponenten-Kunststoffsystem auf Polyurethanbasis
V4	mineralischer Baustoff (Mörtel), verarbeitbar nach Wasserzugabe
V5	mineralischer, polymervergüteter Baustoff (Mörtel), verarbeitbar nach Wasserzugabe

**Tabelle A-2:** Zemente für die Mörtelentwicklung

Bezeichnung	Typ	Dichte <sup>1)</sup> [kg/dm <sup>3</sup> ]	Blaine-Wert <sup>2)</sup> [cm <sup>2</sup> /g]	Wasseranspruch <sup>3)</sup> [Vol.-%]
CEM1	CEM I 52,5 R	3,09	4 000 – 4 200	43,6
CEM2	CEM I 42,5 R-HS/NA	3,19	5 000 – 5 200	39,9
CEM3	CEM I 52,5 N	3,11 (0,03) <sup>4)</sup>	4 028	41,5 (1,4) <sup>4)</sup>







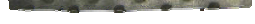




<sup>1)</sup> ermittelt am IMB durch Helium-Pyknometrie  
<sup>2)</sup> Herstellerangabe  
<sup>3)</sup> ermittelt am IMB nach dem Verfahren nach /Puntke02/  
<sup>4)</sup> Mittelwert aus 4 Einzelwerten (Werte in Klammern: Standardabweichung)

**Tabelle A-3:** Fließmittel für die Mörtelentwicklung

Bezeichnung	Feststoffgehalt [M.-%]	Dichte <sup>1)</sup> [kg/dm <sup>3</sup> ]
FM1	29,8 <sup>1)</sup>	1,06 <sup>1)</sup>
FM2	28,0 <sup>1)</sup>	1,06 <sup>1)</sup>
FM3	30,2 <sup>1)</sup>	1,07 <sup>1)</sup>
FM4	39,0 <sup>1)</sup>	1,09 <sup>1)</sup>
FM5	40,5 <sup>1)</sup>	1,09 <sup>1)</sup>
FM6	31,0 <sup>2)</sup>	1,08 <sup>2)</sup>
FM7	30,0 <sup>2)</sup>	1,07 <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> ermittelt am IMB  
<sup>2)</sup> Herstellerangaben

**Tabelle A-4:** Eigenschaften der eingesetzten Stahlfasern (Herstellerangaben)

Bezeichnung	Länge [mm]	Durchmesser [mm]	L/D [-]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Form
SL1	30	0,60	50	k. A.	
SL2	30	0,50	60	1 200	
SL3	36	0,70	51	>1 250	
SL4	35	0,80	44	1 200	
SL5	30	1,7/0,5 <sup>1)</sup>	-	770	
SL6	40	1,0	40	2 400	
SL7	35	2,0/0,5 <sup>1)</sup>	-	430	
SL8	35	2,0/0,5 <sup>1)</sup>	-	800	
SK1	6	0,20	30	k. A.	
SK2	9	0,15	60	2 100	
SK3	17	0,15	113	2 044	

<sup>1)</sup> eckiger Faserquerschnitt; Angabe von Faserbreite/Faserdicke anstelle des Faserdurchmessers

**Tabelle A-5:** Zusammensetzung der Mörtel M1 bis M15 und M<sub>fin</sub>

Mörtel	UHPC 7 <sup>1)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	Zement		Fließmittel		Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]	w/z [-]	w/b [-]
		Typ	Einwaage [kg/m <sup>3</sup> ]	Typ	Einwaage [kg/m <sup>3</sup> ]			
M1	1334	CEM1	751	FM1	38	186	0,28	0,21
M2				FM2	49	213	0,33	0,25
M3				FM3	47	222	0,34	0,26
M4				FM4	32	234	0,34	0,26
M5	1324	CEM2	770	FM1	39	191	0,28	0,21
M6				FM2	43	202	0,30	0,22
M7				FM3	41	210	0,31	0,24
M8				FM4	30	220	0,31	0,24
M9	1329	CEM3	761	FM1	38	189	0,28	0,21
M10				FM2	47	207	0,31	0,24
M11				FM3	46	220	0,33	0,25
M12				FM4	32	237	0,34	0,26
M13				FM5	29	213	0,30	0,23
M14				FM6	39	199	0,30	0,23
M15				FM7	43	210	0,32	0,24
M <sub>fin</sub>	1329	CEM3	761	FM1	39	203	0,30	0,22

<sup>1)</sup> Mineralcompound (siehe hierzu /Scheydt08/)

**Tabelle A-6:** Zusammensetzung der im Rahmen der Optimierungsschritte A und B untersuchten Mörtel M16 bis M25

Mörtel	Stahlfasern <sup>1)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]			UHPC 7 <sup>2)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	CEM3 [kg/m <sup>3</sup> ]	FM1 [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]	w/z [-]	w/b [-]
	SK1	SK2	SK3						
M16	157	39	39	1289	738	39	197	0,30	0,22
M17	118	79	39						
M18	79	79	79						
M19	39	118	79						
M20	118	39	79						
M21	79	118	39						
M22	39	157	39						
M23	105	105	105	1275	729	38	195	0,30	0,22
M24	131	131	131	1261	722	38	193		
M25	157	157	157	1248	714	37	191		

<sup>1)</sup> Beschreibung der Fasertypen siehe Tabelle A-4  
<sup>2)</sup> Mineralcompound (siehe hierzu /Scheydt08/)

**Tabelle A-7:** Zusammensetzung der im Rahmen von Optimierungsschritt C untersuchten Betone B0 bis B8

Beton	Stahlfasern <sup>1)</sup>		Kies <sup>2)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	UHPC 7 <sup>3)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	CEM3 [kg/m <sup>3</sup> ]	FM1 [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]	w/z [-]	w/b [-]
	Typ	Einwaage [kg/dm <sup>3</sup> ]							
B0	-	0	636	973	557	29	149	0,30	0,22
B1	SL1	196		939	538	28	144		
B2	SL2	163		945	541	28	145		
B3	SL3	230		934	534	28	143		
B4	SL4	253		930	532	28	142		
B5	SL5	248		930	532	28	142		
B6	SL6	336		916	524	28	140		
B7	SL7	337		915	524	27	140		
B8	SL8	283		925	529	28	141		

<sup>1)</sup> Beschreibung der Fasertypen siehe Tabelle A-4  
<sup>2)</sup> Fa. Rekers  
<sup>3)</sup> Mineralcompound (siehe hierzu /Scheydt08/)

**Tabelle A-8:** Zusammensetzung der im Rahmen von Optimierungsschritt D und E untersuchten Betone B9 bis B16

Beton	Stahlfasern <sup>1)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]		Kies <sup>2)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	UHPC 7 <sup>3)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	CEM3 [kg/m <sup>3</sup> ]	FM1 [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]	w/z [-]	w/b [-]
	SK1+SK2+SK3	SL6							
B9	79	235	636	919	526	27	140	0,30	0,22
B10	118	196							
B11	157	157							
B12	196	118							
B13	39	118	636	946	541	28	145	0,30	0,22
B14	59	177		933	536	28	143		
B15	98	294		906	518	27	139		
B16	118	353		893	511	27	136		

<sup>1)</sup> Beschreibung der Fasertypen siehe Tabelle A-4  
<sup>2)</sup> Fa. Rekers  
<sup>3)</sup> Mineralcompound (siehe hierzu /Scheydt08/)

**Tabelle A-9:** Frisch- und Festmörteleigenschaften der Mörtel M1 bis M15

Mörtel	CEM	FM	Viskosität			Setzfließmaß		Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit
			$\eta_0$ [Pas]	$\eta_\infty$ [Pas]	$\eta_0/\eta_\infty$ [-]	$sm_0$ [cm]	$sm_{40}$ [cm]	$R_{c,7}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{f,7}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
M1	CEM1	FM1	$2,8 \cdot 10^5$	$6,4 \cdot 10^4$	4	97	120	110,1 (1,3)	22,3 (1,5)
M2		FM2	$1,8 \cdot 10^4$	488	37	135	133	94,4 (2,1)	16,2 (1,1)
M3		FM3	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>		90	95	96,1 (1,9)	15,4 (0,2)
M4		FM4	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>		124	- <sup>2)</sup>	97,2 (0,3)	14,8 (1,2)
M5	CEM2	FM1	1693	59	29	197	210	108,8 (4,7)	19,3 (1,3)
M6		FM2	4167	667	6	143	148	97,6 (2,6)	16,2 (0,7)
M7		FM3	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>		98	103	97,5 (1,8)	14,9 (1,0)
M8		FM4	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>		139	- <sup>2)</sup>	104,0 (3,2)	15,7 (0,5)
M9	CEM3	FM1	1126	63	18	218	230	107,9 (4,9)	21,8 (0,5)
M10		FM2	2470	83	30	174	203	103,4 (2,7)	18,8 (1,1)
M11		FM3	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>		135	153	101,7 (1,3)	19,0 (0,6)
M12		FM4	- <sup>2)</sup>	- <sup>2)</sup>		193	- <sup>2)</sup>	102,4 (0,9)	15,9 (0,7)
M13		FM5	1260	42	30	208	239	111,4 (1,7)	14,8 (1,1)
M14		FM6	3502	83	42	196	187	110,9 (2,7)	19,5 (1,0)
M15		FM7	6295	111	57	172	157	101,8 (3,1)	22,5 (1,1)

Werte in Klammer: Standardabweichung [N/mm<sup>2</sup>]  
<sup>1)</sup> Abbruch der Messung durch das Gerät (Mörtel zu steif)  
<sup>2)</sup> nicht ermittelt



**Tabelle A-10:** Frischmörteleigenschaften der Mörtel M16 bis M22 im Vergleich zum Mörtel M<sub>fin</sub> (Optimierungsschritt A)

Mörtel	Faserzusammensetzung <sup>1)</sup>	Faserfaktor [-]	Ausbreitmaß [mm]	Temperatur [°C]
M16	2,0 SK1 : 0,5 SK2 : 0,5 SK3	146	248	28,3
M17	1,5 SK1 : 1,0 SK2 : 0,5 SK3	162	249	29,0
M18.1	1,0 SK1 : 1,0 SK2 : 1,0 SK3	203	248	28,3
M19	0,5 SK1 : 1,5 SK2 : 1,0 SK3	218	243	28,7
M20	1,5 SK1 : 0,5 SK2 : 1,0 SK3	188	235	28,7
M21	1,0 SK1 : 1,5 SK2 : 0,5 SK3	177	252	28,6
M22	0,5 SK1 : 2,0 SK2 : 0,5 SK3	192	242	28,9
M <sub>fin</sub>	-	0	246	28,5

<sup>1)</sup> Beschreibung der Fasertypen siehe Tabelle A-4

**Tabelle A-11:** Ergebnisse des 4-Punkt-Biegezugversuchs der Mörtel M16 bis M22 im Vergleich zum Mörtel M<sub>fin</sub> (Optimierungsschritt A)

Mörtel	Faserzusammensetzung <sup>1)</sup>	Faserfaktor [-]	Integral I [Nm]		Biegezugfestigkeit R <sub>f,kv</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	
			MW	STABW	MW	STABW
M16	2,0 SK1 : 0,5 SK2 : 0,5 SK3	146	35,4	4,3	21,4	1,7
M17	1,5 SK1 : 1,0 SK2 : 0,5 SK3	162	38,0	4,9	21,8	0,8
M18.1	1,0 SK1 : 1,0 SK2 : 1,0 SK3	203	57,4	1,7	30,2	2,3
M19	0,5 SK1 : 1,5 SK2 : 1,0 SK3	218	49,3	4,5	27,4	0,2
M20	1,5 SK1 : 0,5 SK2 : 1,0 SK3	188	48,5	6,7	26,6	3,6
M21	1,0 SK1 : 1,5 SK2 : 0,5 SK3	177	46,6	9,7	26,4	3,9
M22	0,5 SK1 : 2,0 SK2 : 0,5 SK3	192	41,5	4,6	24,0	2,6
M <sub>fin</sub>	-	-	0,50	0,1	9,0	1,7

MW: Mittelwert

STABW: Standardabweichung

<sup>1)</sup> Beschreibung der Fasertypen siehe Tabelle A-4

**Tabelle A-12:** Frischmörteleigenschaften der Mörtel M18.2 bis M25 im Vergleich zum Mörtel  $M_{fin}$  (Optimierungsschritt B)

Mörtel	Faservolumen $V_{SK}$ [Vol.-%]	Faserfaktor [-]	Ausbreitmaß [mm]	Temperatur [°C]
M18.2	3,0	203	233	29,6
M23	4,0	271	198	30,0
M24	5,0	340	140	30,4
M25	6,0	407	100 <sup>1)</sup>	31,5
$M_{fin}$	0,0	0	246	28,5

<sup>1)</sup> Konus bleibt stehen (Mörtel zu steif)

**Tabelle A-13:** Ergebnisse des 4-Punkt-Biegezugversuchs der Mörtel M18.2 bis M25 im Vergleich zum Mörtel  $M_{fin}$  (Optimierungsschritt B)

Mörtel	Faservolumen $V_{SK}$ [Vol.-%]	Faserfaktor [-]	Integral I [Nm]		Biegezugfestigkeit $R_{f,kv}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
			MW	STABW	MW	STABW
M18.2	3,0	203	38,4	3,1	25,3	3,9
M23	4,0	271	49,9	3,6	33,9	2,3
M24	5,0	340	36,9	10,3	25,4	4,1
M25	6,0	407	58,74	14,8	33,6	1,7
$M_{fin}$	-	-	0,50	0,1	9,0	1,7

MW: Mittelwert  
 STABW: Standardabweichung

**Tabelle A-14:** Frischmörteleigenschaften der Betone B1 bis B8 im Vergleich zum Beton B0 (Optimierungsschritt C)

Beton	Faseroberfläche $O_{SL}$ [m <sup>2</sup> pro m <sup>3</sup> Beton]	Faservolumen $V_{SL}$ [Vol.-%]	Ausbreitmaß [mm]	Temperatur [°C]
B1	157	2,50	168	30,4
B2		2,07	142	27,3
B3		2,93	129	29,1
B4		3,22	135	27,2
B5		3,16	153	27,0
B6		4,28	149	27,3
B7		4,29	160	27,8
B8		3,61	185	27,5
B0	0	0,00	225	25,2

**Tabelle A-15:** Ergebnisse des 4-Punkt-Biegezugversuchs der Betone B1 bis B8 im Vergleich zum Beton B0 (Optimierungsschritt C)

Beton	Faseroberfläche $O_{SL}$ [m <sup>2</sup> pro m <sup>3</sup> Beton]	Faservolumen $V_{SL}$ [Vol.-%]	Integral I [Nm]		Biegezugfestigkeit $R_{f,KV}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
			MW	STABW	MW	STABW
B1	157	2,50	21,9	1,4	18,0	3,4
B2		2,07	12,8	3,9	15,8	1,5
B3		2,93	13,7	5,1	12,5	1,3
B4		3,22	15,9	1,0	14,6	3,0
B5		3,16	6,8	2,7	13,1	0,4
B6		4,28	30,0	6,8	18,1	0,9
B7		4,29	9,6	4,9	10,5	1,7
B8		3,61	12,9	2,5	9,7	1,1
B0	0	0,00	0,5	0,2	8,2	1,3

MW: Mittelwert  
 STABW: Standardabweichung

**Tabelle A-16:** Frischmörteleigenschaften der Betone B9 bis B12 (Optimierungsschritt D)

Beton	Faserzusammensetzung $V_{SK} : V_{SL}$	Ausbreitmaß [mm]	Temperatur [°C]
B9	1,0 : 3,0	150	28,2
B10	1,5 : 2,5	128	28,1
B11	2,0 : 2,0	111	31,1
B12	2,5 : 1,5	110	28,7

**Tabelle A-17:** Ergebnisse des 4-Punkt-Biegezugversuchs der Betone B9 bis B12 (Optimierungsschritt D)

Beton	Faserzusammensetzung $V_{SK} : V_{SL}$	Integral I [Nm]		Biegezugfestigkeit $R_{f,KV}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
		MW	STABW	MW	STABW
B9	1,0 : 3,0	24,7	8,5	16,3	5,1
B10	1,5 : 2,5	13,1	3,1	14,6	5,1
B11	2,0 : 2,0	17,6	6,7	13,8	5,1
B12	2,5 : 1,5	14,1	3,1	13,3	1,3

MW: Mittelwert  
 STABW: Standardabweichung

**Tabelle A-18:** Frischmörteleigenschaften der Betone B9 und B13 bis B16 (Optimierungsschritt E)

Beton	Fasermzusammensetzung $V_{SK} : V_{SL}$	Faservolumen [Vol.-%]	Ausbreitmaß [mm]	Temperatur [°C]
B13	1,0 : 3,0	2,0	210	26,5
B14		3,0	175	27,2
B9		4,0	150	28,2
B15		5,0	137	29,5
B16		6,0	110	29,7

**Tabelle A-19:** Ergebnisse des 4-Punkt-Biegezugversuchs der Betone B9 und B13 bis B16 (Optimierungsschritt E)

Beton	Fasermzusammensetzung $V_{SK} : V_{SL}$	Faservolumen [Vol.-%]	Integral I [Nm]		Biegezugfestigkeit $R_{f,KV}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
			MW	STABW	MW	STABW
B13	1,0 : 3,0	2,0	10,3	5,9	10,5	3,8
B14		3,0	17,9	9,5	15,5	1,3
B9		4,0	24,7	8,5	16,3	5,1
B15		5,0	18,0	2,6	13,6	1,9
B16		6,0	36,9	13,6	22,1	9,2

MW: Mittelwert

STABW: Standardabweichung

## Berichtsblatt – Anlage zum Schlussbericht (13N9609)

<b>1. ISBN oder ISSN</b> -	<b>2. Berichtsart</b> Schlussbericht		
<b>3. Titel</b> Entwicklung brandbeständiger ultrahochfester Betone für hochdynamische Beanspruchungen			
<b>4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]</b> Müller, Harald S. Scheydt, Jennifer C.	<b>5. Abschlussdatum des Vorhabens</b> 31.10.2011		
	<b>6. Veröffentlichungsdatum</b> 31.10.2011		
	<b>7. Form der Publikation</b> geplant		
<b>8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)</b>  Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB) Abteilung Baustoffe und Betonbau	<b>9. Ber.Nr. durchführende Institution</b> 08 60 62 0408		
	<b>10. Förderkennzeichen</b> 13N9609		
	<b>11. Seitenzahl</b> 60		
<b>12. Fördernde Institution (Name, Adresse)</b>  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	<b>13. Literaturangaben</b> 30		
	<b>14. Tabellen</b> 23		
	<b>15. Abbildungen</b> 42		
<b>16. Zusätzliche Angaben</b> -			
<b>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</b>  <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; border: none;">                     Dr.-Ing. Karin Wey                      Fachkoordinatorin Sicherheitsforschung                      Abteilung EINS - Sicherheitsforschung                      Projektträger des Bundesministeriums für Bildung und Forschung                      VDI Technologiezentrum GmbH                      VDI-Platz 1                      40468 Düsseldorf                       Datum: 31.10.2011                 </td> <td style="width: 50%; border: none;">                     TIB/UB Hannover                      Deutsche Forschungsberichte                      Welfengarten 1 B                      30167 Hannover                       Datum: 04.11.2011                 </td> </tr> </table>		Dr.-Ing. Karin Wey Fachkoordinatorin Sicherheitsforschung Abteilung EINS - Sicherheitsforschung Projektträger des Bundesministeriums für Bildung und Forschung VDI Technologiezentrum GmbH VDI-Platz 1 40468 Düsseldorf  Datum: 31.10.2011	TIB/UB Hannover Deutsche Forschungsberichte Welfengarten 1 B 30167 Hannover  Datum: 04.11.2011
Dr.-Ing. Karin Wey Fachkoordinatorin Sicherheitsforschung Abteilung EINS - Sicherheitsforschung Projektträger des Bundesministeriums für Bildung und Forschung VDI Technologiezentrum GmbH VDI-Platz 1 40468 Düsseldorf  Datum: 31.10.2011	TIB/UB Hannover Deutsche Forschungsberichte Welfengarten 1 B 30167 Hannover  Datum: 04.11.2011		
<b>18. Kurzfassung</b>  <p>Beim Forschungsvorhaben AISIS (Automatisierte Informationsgewinnung und Schutz kritischer Infrastruktur im Katastrophenfall) handelt es sich um ein Verbundprojekt, das im Rahmen des Programms "Forschung für die zivile Sicherheit" der Bundesregierung als Teil der Hightech-Strategie durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde.</p> <p>Das Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Abteilung Baustoffe und Betonbau, war im Rahmen des Verbundprojekts AISIS mit der Durchführung des Teilprojekts <i>Entwicklung brandbeständiger ultrahochfester Betone für hochdynamische Beanspruchungen</i> betraut.</p> <p>Im Rahmen der Bearbeitung des Teilprojekts erfolgte die Entwicklung eines ultrahochfesten Betons, der sowohl gegenüber einer Brandbeanspruchung als auch gegenüber hochdynamischer Beanspruchung (z. B. Explosion) einen im Vergleich zu konventionellem Beton erhöhten Widerstand aufweist. Das Verformungsvermögen und damit der Widerstand des Betons gegenüber hochdynamischen Lasten wurden durch den Einsatz einer Stahlfaserbewehrung maximiert. Die Maximierung des Widerstands gegenüber einer Brandbeanspruchung erfolgte durch Zugabe von Polypropylenfasern. Der Beton wurde insbesondere für den Einsatz in Infrastrukturen entwickelt, die gegenüber Anschlägen oder Katastrophen besonders gefährdet sind.</p> <p>Neben der Betonentwicklung wurden im Rahmen des Teilprojekts in Zusammenarbeit mit weiteren Projektpartnern großmaßstäbliche Versuche zur Kopplung von Bauteilelementen für den Tunnelbau (Tübbing) durchgeführt. Hierbei wurde das Verformungsverhalten der gekoppelten Bauteilelemente unter Lasteinwirkung untersucht.</p> <p>Die im Rahmen des Teilprojekts <i>Entwicklung brandbeständiger ultrahochfester Betone für hochdynamische Beanspruchungen</i> erzielten Ergebnisse sind im vorliegenden Schlussbericht dargestellt.</p>			
<b>19. Schlagwörter</b> Beton, hochdynamische Beanspruchung, Brandbeanspruchung, Faserbeton, ultrahochfester Beton, Bauteilversuche			
<b>20. Verlag</b> -	<b>21. Preis</b> -		

**Document Control Sheet – Report No. 13N9609**

<b>1. ISBN oder ISSN</b> -	<b>2. type of document</b> report		
<b>3. title</b> Entwicklung brandbeständiger ultrahochfester Betone für hochdynamische Beanspruchungen (Development of an ultra high strength concrete with increased resistance to fire and explosive loading)			
<b>4. author(s) [family name(s), first name(s)]</b> Müller, Harald S. Scheydt, Jennifer C.	<b>5. end of project</b> 2011-10-31		
	<b>6. publication date</b> 2011-10-31		
	<b>7. form of publication</b> planned		
<b>8. performing organization(s) (name, address)</b>  Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB) Abteilung Baustoffe und Betonbau 76128 Karlsruhe	<b>9. originator's report no.</b> 08 60 62 0408		
	<b>10. reference no.</b> 13N9609		
	<b>11. no. of pages</b> 60		
<b>12. sponsoring agency (name, address)</b>  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	<b>13. no. of references</b> 30		
	<b>14. no. of tables</b> 23		
	<b>15. no. of figures</b> 42		
<b>16. supplementary notes</b> -			
<b>17. presented at (title, place, date)</b>  <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;">                 Dr.-Ing. Karin Wey                  Fachkoordinatorin Sicherheitsforschung                  Abteilung EINS - Sicherheitsforschung                  Projektträger des Bundesministeriums für Bildung und Forschung                  VDI Technologiezentrum GmbH                  VDI-Platz 1                  40468 Düsseldorf                   date: 2011-10-31             </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;">                 TIB/UB Hannover                  Deutsche Forschungsberichte                  Welfengarten 1 B                  30167 Hannover                   date: 2011-11-04             </td> </tr> </table>		Dr.-Ing. Karin Wey Fachkoordinatorin Sicherheitsforschung Abteilung EINS - Sicherheitsforschung Projektträger des Bundesministeriums für Bildung und Forschung VDI Technologiezentrum GmbH VDI-Platz 1 40468 Düsseldorf  date: 2011-10-31	TIB/UB Hannover Deutsche Forschungsberichte Welfengarten 1 B 30167 Hannover  date: 2011-11-04
Dr.-Ing. Karin Wey Fachkoordinatorin Sicherheitsforschung Abteilung EINS - Sicherheitsforschung Projektträger des Bundesministeriums für Bildung und Forschung VDI Technologiezentrum GmbH VDI-Platz 1 40468 Düsseldorf  date: 2011-10-31	TIB/UB Hannover Deutsche Forschungsberichte Welfengarten 1 B 30167 Hannover  date: 2011-11-04		
<b>18. abstract</b>  <p>The joint research project <i>AISIS</i> dealt with the automated generation of information and protection of critical infrastructures in the event of a disaster. The project was supported by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF). It was part of the programme "Research for Civil Security" and the high-tech strategy of the German government.</p> <p>Within the subproject <i>Development of an ultra high strength concrete with increased resistance to fire and explosive loading</i> the Institute of Concrete Structures and Building Materials developed an ultra high strength concrete with increased resistance to high static and dynamic loads (especially explosive loading and fire). These properties were achieved by an improved mix design and by the addition of an optimised steel and polypropylene fibre composition. The developed concrete is especially suited for the use in infrastructures that are threatened by fire and explosive loading.</p> <p>Besides, also experiments on large scale coupled tubbing segments were carried out. Here, the load induced deformation behaviour of the coupled segments was investigated.</p> <p>The results gained within the subproject <i>Development of an ultra high strength concrete with increased resistance to fire and explosive loading</i> are presented in this report.</p>			
<b>19. keywords</b> concrete, fibre reinforcement, ultra high performance concrete, explosive loading, fire exposure, coupled tubbing segments, high temperature load			
<b>20. publisher</b> -	<b>21. price</b> -		