

## **Technischer Bericht**

**BTe-TB-B1749  
vom 31. Januar 2006**

Herstellung und Verarbeitung von selbst-  
verdichtendem Beton (SVB)  
als Transportbeton der  
Festigkeitsklassen C 25/30 und C 30/37  
unter Praxisbedingungen

**AiF-Vorhaben Nr. 13925 N**

Projektleiter	Dr.-Ing. Eberhard Siebel
Sachbearbeiter	Dr.-Ing. Wolfgang Breit
Auftraggeber	Arbeitsgemeinschaft industrieller For- schungsvereinigungen AiF „Otto von Guericke“ e.V. Hauptgeschäftsstelle Bayenthalgürtel 23  50968 Köln
Auftragsdatum	01.10.2003
Aktenzeichen	AiF-Vorhaben Nr. 13925 N Antrags Nr. N11676/02

*Der Technische Bericht umfasst 139 Seiten.*

Der vorliegende ausführliche Schlussbericht enthält zusammenfassend die Problemstellung und die Beschreibung der in der Zeit vom 01.10.2003 bis 30.09.2005 im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, durchgeführten Untersuchungen zum Forschungsvorhaben „Herstellung und Verarbeitung von selbstverdichtendem Beton (SVB) als Transportbeton der Festigkeitsklassen C 25/30 und C 30/37 unter Verwendung der vorhandenen Anlagen und Rohstoffe“ sowie eine Darstellung der Ergebnisse und der daraus resultierenden Schlussfolgerungen. Das Forschungsvorhaben wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministers für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) gefördert.

Ziel dieser Arbeit war es, die Einflüsse auf den SVB systematisch zu analysieren und zu charakterisieren, um die Herstellung und den Einsatz von SVB als Transportbeton unter Verwendung der typischen vorhandenen Anlagen und Rohstoffe zielsicher zu ermöglichen. So sollte ein wesentlicher Beitrag geleistet werden, um den SVB als Transportbeton gemäß DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-2 genau so sicher wie Rüttelbeton einsetzen zu können.

Die Ergebnisse zeigen auf der einen Seite, dass durch gezielte Wasser- und Fließmittelgehalte die Verarbeitbarkeitseigenschaften zeitlich sehr genau gesteuert werden können. Auf der anderen Seite untermauern die Ergebnisse, dass Schwankungen der Wasser- und Fließmittelgehalte sehr genau beherrscht und beobachtet werden müssen. Die Untersuchungsergebnisse unterstreichen die Bedeutung von sorgfältig geplanten Vorversuchen sowie Erst- und Kontrollprüfungen bei Herstellung und Verarbeitung von SVB als Transportbeton.

Um die Ergebnisse der Laborbetone zu überprüfen, wurden SVBs in zwei Transportbetonwerken hergestellt und die Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht. Zunächst wurde anhand von Vormischungen die Übertragbarkeit der Laborbetone auf die Praxisbedingungen der Transportbetonwerke geprüft. Anschließend wurden in den Kombinationen Hochofenzement und Steinkohlenflugasche sowie Portlandzement und Kalksteinmehl Probewände betoniert.

Aus den erzielten Ergebnissen wurde ein Beurteilungskonzept für die Verarbeitbarkeit von SVB entwickelt. Feste Grenzwerte oder Verarbeitbarkeitsklassen sind hier weder zweckmäßig noch geeignet, SVB zu erfassen. Bei der Rezepturenentwicklung und in der Erstprüfung ermittelt der Betonhersteller in Frisch- und Festbetonprüfungen den optimalen Verarbeitbarkeitsbereich für seinen SVB. Der optimale Verarbeitbarkeitsbereich ist dadurch gekennzeichnet, dass der Beton ausreichend fließt, entlüftet und sedimentationsstabil ist. Um für alle Formen des SVB einheitliche Regeln und Bewertungsmaßstäbe zu setzen, wurde ein Verfahren zur Bestimmung des Verarbeitbarkeitsbereiches von SVB vorgeschlagen („SVB-Verarbeitungsfenster“). Dieses, auf der Basis der vielen Untersuchungen entwickelte, verifizierte und validierte Verfahren, wurde als Anhang Q in der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Selbstverdichtender Beton“ aufgenommen:

Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit SVB wird in der Erstprüfung, während der werkseigenen Produktionskontrolle des Herstellers und bei der Übergabe des Betons auf der Baustelle die Ermittlung des Setzfließmaßes und der Trichterauslaufzeit gefordert. Dabei bereitet die Ermittlung der Trichterauslaufzeit bei der Übergabe von SVB als Transportbeton unter Baustellenbedingungen häufig Probleme. Um den Prüfaufwand bei der Übergabe von SVB als Transportbeton zu vereinfachen, wurde mit dem „Auslaufkegel“ ein baustellentaugliches Prüfgerät entwickelt, mit dem die beiden maßgeblichen Prüfwerte – Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit - zur Beschreibung der geforderten Frischbetoneigenschaften eines SVB in einem einzigen Versuch zuverlässig ermittelt werden können. Der Auslaufkegel stellt eine Alternative zur Ermittlung der Viskosität von SVB dar, die besonders bei der Annahmeprüfung auf der Baustelle vorteilhaft eingesetzt werden kann.

**„Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht“**

**INHALT**

	Seite
<b>1</b>	<b>FORSCHUNGSTHEMA ..... 1</b>
<b>2</b>	<b>WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE WIRTSCHAFTLICHE PROBLEMSTELLUNG ..... 1</b>
2.1	Einführung..... 1
2.2	Selbstverdichtender Beton ..... 1
2.2.1	Allgemeines ..... 1
2.2.2	Mehlkorn-Typ ..... 2
2.2.3	Kombinationstyp..... 3
2.2.4	Stabilisierer-Typ ..... 3
2.3	Problemstellung ..... 3
2.3.1	Allgemeines ..... 3
2.3.2	Herstellung von SVB als Transportbeton..... 4
2.3.3	Transport von SVB..... 4
<b>3</b>	<b>FORSCHUNGSZIEL UND WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG..... 6</b>
3.1	Ziel..... 6
3.2	Wirtschaftliche Bedeutung..... 6
<b>4</b>	<b>LÖSUNGSWEG UND ZEITPLAN ..... 8</b>
4.1	Lösungsweg..... 8
4.2	Zeitplan ..... 9
<b>5</b>	<b>UNTERSUCHUNGEN ..... 10</b>
5.1	Allgemeines ..... 10
5.2	Ausgangsstoffe ..... 10
5.2.1	Allgemeines ..... 10
5.2.2	Zement und Zusatzstoffe..... 10
5.2.3	Zusatzmittel..... 11
5.2.4	Gesteinskörnung ..... 12
5.2.5	Zugabewasser..... 12
5.3	Bestimmung der Sättigungswassergehalte mit dem $\beta_p$ -Wert Verfahren..... 12
5.4	Betone – Herstellung und Untersuchungsumfang ..... 14
5.4.1	Übersicht der hergestellten Betone ..... 14
5.4.2	Herstellung..... 15
5.4.3	Frischbetonprüfungen ..... 15
5.4.4	Festbetonprüfungen ..... 16
5.5	Frischbetonergebnisse ..... 16
5.5.1	Serie 1 - Laborbetone in der Kombination Hochofenzement / Flugasche mit Innenbauteilanforderungen..... 16
5.5.1.1	Variation des Wassergehalts..... 16
5.5.1.2	Variation des Fließmittelgehalts ..... 17
5.5.2	Serie 1 - Laborbetone in der Kombination Hochofenzement / Flugasche mit Außenbauteilanforderungen ..... 18

5.5.2.1	Allgemeines .....	18
5.5.2.2	Variation des Fließmittelgehalts .....	18
5.5.2.3	Variation des Wassergehalts.....	19
5.5.3	Serie 1 - Laborbetone in der Kombination Portlandzement / Kalksteinmehl mit Innenbauteilanforderungen.....	19
5.5.3.1	Variation des Wassergehalts.....	19
5.5.3.2	Variation des Fließmittelgehalts .....	20
5.5.4	Serie 1 - Laborbetone in der Kombination Portlandzement / Kalksteinmehl mit Außenbauteilanforderungen .....	21
5.5.5	Serie 1 - Laborbetone Kombination Portlandzement / Kalksteinmehl mit erhöhtem Leimvolumen .....	22
5.5.6	Serie 2 - Laborbetone in der Kombination Hochofenzement / Flugasche mit Innenbauteilanforderungen.....	23
5.5.7	Serie 2 - Laborbetone in der Kombination Hochofenzement / Flugasche mit Außenbauteilanforderungen .....	24
5.5.7.1	Variation des Fließmittel- und Wassergehalts .....	24
5.5.7.2	Einfluss der Temperatur auf die Verflüssigung .....	25
5.5.7.2.1	Allgemeines .....	25
5.5.7.2.2	Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeit.....	25
5.5.8	Serie 2 - Laborbetone in der Kombination Portlandzement / Kalksteinmehl mit Innenbauteilanforderungen.....	26
5.5.8.1	Variation des Fließmittel- und Wassergehalts .....	26
5.5.8.2	Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeit.....	27
5.6	Festbetonergebnisse der Laborbetone .....	28
5.7	Zusammenfassung – Laborbetone .....	28
5.8	Überprüfung der Frischbetoneigenschaften an einem im Transportbetonwerk hergestellten SVB .....	29
5.8.1	Praxisversuch 1.....	29
5.8.2	Praxisversuch 2 - Vormischung.....	30
5.8.3	Praxisversuch 3 – Wand 1 .....	32
5.8.4	Praxisversuch 4 – Wand 2 .....	33
5.8.5	Praxisversuch 5 – Wand 3 .....	34
5.8.6	Zusammenfassung - Praxisversuche .....	36
<b>6</b>	<b>BEURTEILUNG DER VERARBEITBARKEIT VON SVB.....</b>	<b>37</b>
6.1	Allgemeines .....	37
6.2	Bestimmung des SVB-Verarbeitungsfensters.....	37
6.3	Umsetzung für die praktische Anwendung .....	38
<b>7</b>	<b>ENTWICKLUNG EINES PRAXISTAUGLICHEN PRÜFVERFAHRENS FÜR SVB.....</b>	<b>39</b>
7.1	Allgemeines .....	39
7.2	Auslaufkegel .....	39
7.3	Frischbetonuntersuchungen.....	39
7.3.1	Zusammensetzung der Betone .....	39
7.3.2	Herstellung und Prüfungen.....	40
7.3.3	Ermittlung der Frischbetoneigenschaften mit dem Auslaufkegel.....	40
7.3.3.1	Allgemeines .....	40
7.3.3.2	Ermittlung der Frischbetoneigenschaften von SVB „AK-02“.....	40
7.3.3.3	Ermittlung der Frischbetoneigenschaften von SVB „AK-05“ .....	41
7.4	Gegenüberstellung Auslaufrichter und Auslaufkegel .....	42

7.5	Erprobung des Auslaufkegels in der Praxis .....	43
7.6	Zusammenfassung – Praxistaugliches Prüfverfahren.....	45
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN.....</b>	<b>47</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAPHISCHE.....</b>	<b>51</b>
9.1	Mitgliedsvereinigung .....	51
9.2	Forschungsstelle .....	51
<b>10</b>	<b>ADMINISTRATIVE ANGABEN .....</b>	<b>51</b>
<b>11</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>52</b>
<b>12</b>	<b>VERZEICHNIS DER TABELLEN AUS ANHANG A .....</b>	<b>55</b>
<b>13</b>	<b>VERZEICHNIS DER BILDER AUS DEN ANHÄNGEN B, C UND D.....</b>	<b>56</b>
13.1	Verzeichnis der Bilder aus Anhang B .....	56
13.2	Verzeichnis der Bilder aus Anhang C .....	59
13.3	Verzeichnis der Bilder aus Anhang D .....	61

#### **ANHANG A – TABELLEN**

<b>Tabelle A1 bis A13.....</b>	<b>A1 bis A12</b>
--------------------------------	-------------------

#### **ANHANG B – BILDER**

<b>Bild B1 bis B79 .....</b>	<b>B1 bis B40</b>
------------------------------	-------------------

#### **ANHANG C – FOTOS**

<b>Bild C1 bis C68 .....</b>	<b>C1 bis C17</b>
------------------------------	-------------------

<b>ANHANG D - PRÜFVERFAHREN .....</b>	<b>D1 bis D4</b>
---------------------------------------	------------------

## **1            Forschungsthema**

Herstellung und Verarbeitung von selbstverdichtendem Beton (SVB) als Transportbeton der Festigkeitsklassen C 25/30 und C 30/37 unter Verwendung der vorhandenen Anlagen und Rohstoffe.

## **2            Wissenschaftlich-technische wirtschaftliche Problemstellung**

### **2.1          Einführung**

Beton ist ein vielseitiger und leistungsfähiger Baustoff. Damit er seine geplanten Festbetoneigenschaften entwickeln kann, muss der Beton im frischen Zustand fachgerecht eingebaut, verdichtet und nachbehandelt werden. Übliche Betone nach DIN 1045-2 sind Rüttelbetone. Sie müssen durch intensiven Energieeintrag zum Fließen gebracht werden, so dass die Gesteinskörnungen ihre dichteste Lage erreichen und der Beton entlüften kann. Aus diesen Verarbeitungsgründen enthielten Rüttelbetone entweder mehr Zementleim oder einen durch Wasser verflüssigten Zementleim. Die verbesserte Verarbeitung wurde insbesondere durch die Wasserzugabe mit Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseinbußen erkaufte. Durch die Fortschritte auf dem Gebiet der verflüssigenden Zusatzmittel lassen sich mittlerweile die Eigenschaften Konsistenz und Festigkeit fast vollständig voneinander entkoppeln [1-5]. Betone mit niedrigen Wasserzementwerten und dadurch hoher Festigkeit und Dichtheit lassen sich durch Hochleistungsfließmittel bei sachgerechter Dosierung in weiche bzw. „fließfähige“ Konsistenzen überführen. Derzeit werden weitgehend weiche Betone des Regelkonsistenzbereichs F3 und F4 eingesetzt. Sie sind zwar leichter zu verarbeiten, müssen jedoch immer noch mit dem Rüttler verdichtet werden. Das fehlerfreie Einbauen von Rüttelbeton erfordert zudem gut geschultes, qualifiziertes Personal, das nicht mehr überall verfügbar ist. Fehlstellen mit großen Haufwerksporen, sogenannten „Kiesnester“, in Betonbauteilen infolge unzureichender und fehlerhafter Verdichtung oder Entmischung stellen immer noch ein häufig auftretendes Qualitätsproblem, insbesondere bei Sichtbeton, dar.

Sichtbeton findet zur Zeit durch neue architektonische Konzepte wieder großen Zuspruch. Dabei sind, durch das Einbauverfahren bedingt, oft die Schüttgrenzen sichtbar. Ebenfalls kann es zu unterschiedlichen Farbgebungen des Betons innerhalb eines Betonierabschnittes kommen, die durch variierende Wasserzementwerte und durch unterschiedlich intensives Rütteln hervorgerufen werden.

Des Weiteren werden durch den hohen Verdichtungs- und Verarbeitungsaufwand die Einbauleistungen und durch den entstehenden Rüttlerlärm die Einbauzeiten begrenzt, was sich in den Baukosten und in der Bauzeit eines Gebäudes oder Bauteils niederschlägt.

### **2.2          Selbstverdichtender Beton**

#### **2.2.1        Allgemeines**

Durch die volle Nutzung der Möglichkeiten des 5-Stoff-Systems Beton (Zement, Gesteinskörnung, Zusatzmittel, Zusatzstoffe, Wasser) lassen sich Betone entwerfen, die unter dem Einfluss der Schwerkraft bis zur Selbstnivellierung zäh wie Honig fließen, während des Fließens vollständig entlüften und dabei jeden Hohlraum und alle Bewehrungszwischenräume innerhalb einer Schalung ausfüllen. Der sogenannte „Selbstverdichtende Beton“ (SVB) ist so

beschaffen, dass er praktisch keine Fließgrenze mehr aufweist, sich nicht entmischt - kein Wasserabsetzen (Bluten) sowie kein Sedimentieren des Grobkorns - und nicht von Bewehrungshindernissen blockiert werden.

Rheologisch verhält sich SVB im Wesentlichen wie eine Newtonflüssigkeit (Fließgrenze  $\tau_0$  gegen NULL) mit hoher Viskosität. Zusätzliche Verdichtungsenergie ist beim Einbau nicht nötig [1, 6-12]. Dieses gegenüber Rüttelbeton völlig andere Frischbetonverhalten wird durch ein großes Volumen eines optimierten Mörtels erreicht, in dem die groben Gesteinskörner entmischungsfrei „schwimmen“ können. Kennzeichen dieser Betone ist daher im Gegensatz zu konventionellen Rüttelbetonen ein erhöhter Mehlkorngelalt sowie ein Setzfließmaß (Ausbreitmaß, das ohne Schlag bestimmt wird) von deutlich über 550 mm. Wegen der in Deutschland zunächst fehlenden Erfahrung bei der Herstellung und Verarbeitung von selbstverdichtenden Betonen, besonders bei der Beurteilung der Mischungsstabilität, und der noch nicht ganz geklärten Auswirkungen auf die Festbetoneigenschaften durfte SVB in tragenden Konstruktionen nur mit Zustimmung im Einzelfall oder allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung eingesetzt werden. Festigkeits- und Dauerhaftigkeitsuntersuchungen an selbstverdichtenden Betonen haben in der Tendenz gezeigt, dass sie im Vergleich zu normalen Rüttelbetonen vergleichbarer Festigkeitsklassen bei sorgfältiger Zusammensetzung praktisch keine Nachteile aufweisen [1, 3, 12-15].

Mit der Technologie des selbstverdichtenden Betons lässt sich der Beton weiter qualitativ verbessern, da eine häufige Fehlerquelle für schadhafte Beton, das unvollständige Verdichten, ausgeschaltet wird. Außerdem entfallen die gesundheitlichen Risiken durch Übertragen der Vibration des Rüttlers auf den Körper, durch Lärm und durch Hebearbeiten in oft gebückter Haltung, die hohen Anforderungen an die Kenntnis des Personals und die Beanspruchung der Schalung durch die Rüttler. Erwartet werden zudem erheblich verbesserte Sichtbetoneigenschaften (wenig Poren, gleichmäßige Farbgebung).

Es existieren verschiedene empirische Rezeptentwicklungsmethoden. Kategorisiert werden diese Methoden nach der Art, wie die erforderliche Viskosität erzielt wird [3, 5-8, 18, 19].

### 2.2.2 Mehlkorn-Typ

Der erste Typ wird durch den „General Purpose Approach“ (GPA) nach OKAMURA beschrieben, der auf stabilisierende Betonzusatzmittel verzichtet („Powder Type“) und die bisher wichtigste Grundlage zur Entwicklung selbstverdichtender Betone darstellt. Mit ausgewählten Anteilen verschiedener Korngruppen vom  $\mu$ - bis in den cm-Bereich wird über Eignungsprüfungen in der Reihenfolge Leimviskosität, Mörtelkonsistenz und Betonkonsistenz der geeignete SVB entwickelt. Erst wenn der Beton ein bestimmtes Setzfließmaß (Maß für Fließfähigkeit) in Verbindung mit einer bestimmten relativen Trichter-Auslaufgeschwindigkeit (Maß für Viskosität) aufweist, ist die richtige Betonzusammensetzung gefunden [3, 6-8, 15, 18].

Um auf jeden Fall das Blockieren, also das Ansammeln von Gesteinskörnungen vor Bewehrungshindernissen beim Fließen zu umgehen, liefert der GPA pauschal einen hohen Leimgehalt [20]. In den Ansätzen von TANGTERMSIRIKUL und VAN [21] und darauf aufbauend von PETERSSON, BILLBERG und VAN [22, 23] wird das Blockierkriterium bei der Rezeptentwicklung besonders berücksichtigt und versucht, die geringste Leimmenge für blockierungsfreies Fließen zu bestimmen. Weiterhin kennt die Literatur Ansätze, um aus Ausgangskomponenten wie Gesteinskörnungsart, -form und -gehalt über Packungsdichten und Fließversuche Vorhersagen für die rheologischen Größen Fließgrenze und dynamische Viskosität zu treffen [20, 24] und sie in blockierungsfreie Bereiche einzuteilen. Diese Verfahren sind stark vom

verwendeten Fließmittel und von den Ausgangsstoffen abhängig und liefern zum Teil widersprüchliche Ergebnisse.

### 2.2.3 Kombinationstyp

Ein weiterer Typ („Combination Type“) verbindet den „Mehlkorn-Typ“ mit der Zugabe eines stabilisierenden Zusatzmittels (Stabilisator ST). Die Mischungsrezeptur wird nach dem GPA oder einem ähnlichen Verfahren ermittelt. Die Zugabe geringer Mengen eines Stabilisators soll den SVB unempfindlicher gegen Schwankungen im Mehlkornaufbau und im Wassergehalt machen, indem das Wasserrückhaltevermögen erhöht wird [6-9].

### 2.2.4 Stabilisierer-Typ

Das dritte Verfahren zur Herstellung von SVB beruht auf der Verwendung eines übliches Mehlkornvolumen, das in der Regel DIN 1045 entspricht, eines üblichen Wassergehalts und größerer Mengen an Stabilisatoren (ST), um das für die Selbstverdichtung erforderliche tragfähige Leimvolumen zu erzielen. Dieser in der Literatur [6-8] als „Viscosity Agent Type“ bezeichnete SVB entspricht eher einem Unterwasserbeton und ist als Konstruktionsbeton praktisch unerprobt. Volle selbstverdichtende Eigenschaften sind mit diesem Beton nicht zu erreichen [6].

## 2.3 Problemstellung

### 2.3.1 Allgemeines

Aufgrund der besonderen Frischbetoneigenschaften zählt der selbstverdichtende Beton zu den Hochleistungsbetonen. Wie bei anderen Hochleistungsbetonen (z. B. hochfester Beton, säureresistenter Beton) werden die speziellen, von üblichen Normalbetonen abweichenden Eigenschaften dieser Betone nur durch konsequente Optimierung, sowohl der einzelnen Ausgangsstoffe als auch der Zusammensetzung, erreicht. Das Frischbetonsystem des SVB funktioniert nur in engen Grenzen. Die folgenden Beispiele verdeutlichen die Empfindlichkeit dieses Betons:

Um die für die Selbstverdichtung geforderten Frischbetoneigenschaften zu erzielen, muss zum Beispiel das Setzfließmaß auf  $\pm 5$  cm eingestellt werden. Abweichungen in der Oberflächenfeuchte des Zuschlags von 0,5 % (entspricht je nach Zusammensetzung 5-8 l/m<sup>3</sup> Wasser) können bereits eine Abweichung im Setzfließmaß in dieser Größe zur Folge haben. Ebenfalls hat der Feinheitsmodul der Feinstoffe einen erheblichen Einfluss auf das Setzfließmaß. Eine Abweichung von 0,2 % kann eine Veränderung des Setzfließmaßes zwischen 10 cm und 15 cm bewirken [9, 10, 18]. Zudem ist die Dosiergenauigkeit der Mischanlage zu beachten. Insgesamt gesehen überlagern sich die unterschiedlichen Effekte, die dann ungünstigstenfalls zum Verlust der Verarbeitbarkeit des SVB entweder durch mangelndes Fließvermögen oder durch Sedimentation führen können.

Weiterhin ist es bereits beim Rüttelbeton schwierig, die erforderliche Verarbeitbarkeit (Konsistenz) über die vorgesehene Verarbeitungszeit (Wirkungsdauer der verflüssigenden Beton-zusatzmittel, Vermeidung von Fehlreaktionen...) einzustellen [25, 26]. Während dort jedoch Konsistenzschwankungen durch gezielten Rüttlereinsatz eventuell ausgeglichen werden können, entfällt diese Möglichkeit beim SVB. Durch seinen speziellen Aufbau würde er bei



einer Rüttelverdichtung seine Homogenität verlieren. Deshalb darf sich die Konsistenz während der notwendigen Verarbeitungsdauer nur in engen Grenzen ändern.

Trotz der vielen vorteilhaften Eigenschaften und des damit verbundenen Innovationspotentials dieses Werkstoffes lagen in Deutschland vor einigen Jahren nur wenig Erfahrungen mit SVB vor. National und international, vor allem in den Niederlanden, ist das Hauptanwendungsgebiet zur Zeit der Fertigteilwerkbereich, da hier das komplizierte Frischbetonsystem durch kurze Produktionswege, schnelle Verarbeitungszeiten und relativ konstante Herstellungsbedingungen besser beherrschbar ist. Will man SVB im Transportbetonbereich nutzen, müssen nicht ausreichend geklärte Fragestellungen bei Herstellung, Transport und Einbau gelöst werden.

### 2.3.2 Herstellung von SVB als Transportbeton

Im Bereich Herstellung sind die Schwankungsbreiten der verschiedenen Einflüsse wie zum Beispiel die wechselnde Eigenfeuchte des Sandes oder die Schwankungen in den Korneigenschaften nicht immer hinreichend bekannt oder steuerbar. Angestrebt wird die Entwicklung robuster SVB-Rezepturen, die unter den vorhandenen Bedingungen herstellbar sind.

Ein weiteres Problem, das in diesem Bereich berücksichtigt werden muss, sind die im Allgemeinen hohen Festigkeiten der SVB-Betone. Bei der Rezepturentwicklung richtet sich der Wassergehalt nicht nach der gewünschten Festigkeit bei ausreichender Verarbeitbarkeit wie bei Normalbetonen sondern nach dem Wasserrückhaltevermögen des verwendeten Mehlkorns bzw. der verwendeten Mehlkornmischung [6-8]. Das Wasser-Mehlkorn-Verhältnis ist die maßgebende Steuerungsgröße, um die benötigte Stabilität des SVB einzustellen und liegt nach OKAMURA zwischen 0,30 - 0,32 bei Mehlkorngehalten von 500 kg/m<sup>3</sup> bis 600 kg/m<sup>3</sup>. Dadurch werden hohe Packungsdichten im Betongefüge erreicht, die dann auch bei Zementgehalten um 280 kg/m<sup>3</sup> und daraus resultierenden üblichen Wasserzementwerten von 0,5 bis 0,7 zur Erhöhung der Festigkeit führen [16]. Da ferner oft Flugasche wegen ihrer günstigen granulometrischen und rheologischen Eigenschaften [17] als Mehlkorn verwendet wird, wird durch die puzzolanische Reaktion der Flugasche eine weitere Festigkeitssteigerung erreicht. Diese hohen Festigkeiten sind zum Teil aus konstruktiven Gründen nicht sinnvoll (z. B. Rissbreitenbeschränkung) und müssen durch geeignete Zement-Mehlkorn-Kombinationen reduziert werden.

Ergebnisse aus FTB-Forschungsarbeiten [27-29], die vor Antragstellung durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass durch Wahl geeigneter Ausgangsstoffe Festigkeiten im Bereich C 25/30 und C 30/37 zielsicher herstellbar sind.

### 2.3.3 Transport von SVB

In der Transportphase waren vor allem die Einflüsse auf die Konsistenz und die Verarbeitbarkeitszeit des Betons zu klären. Benötigt wird eine Verarbeitbarkeitsdauer von bis zu zwei Stunden. Maßgebliche Einflüsse sind hier die Anfangsreaktionen des Zements, die Auswirkungen der Umgebungstemperatur auf die Wirksamkeit der verflüssigenden Betonzusatzmittel und auf den Wasserhaushalt des Betons sowie die mechanische Belastung durch den Transport im Fahrmischer. Gerade das nicht vorhersehbare, unterschiedliche Verhalten der Hochleistungsverflüssiger in verschiedenen Temperaturbereichen bereitet große Probleme.

Ebenso fehlten Beurteilungskriterien für SVB, wenn er bei der Übergabe auf der Baustelle nicht die benötigten Frischbetoneigenschaften zeigt. So ließ sich bislang nicht eindeutig sagen, ob und wie dem SVB zur Wiederherstellung seiner Frischbetoneigenschaften Fließmittel oder Wasser zudosiert werden kann. (Anmerkung: Da SVB aufgrund seines dichteren Gefüges im Allgemeinen zu höherer Festigkeit neigt, kann, wenn erforderlich, diesem Beton zur Wiederherstellung seiner selbstverdichtenden Eigenschaften im geringen Maße Wasser zudosiert werden, ohne die geforderten Festbetoneigenschaften zu beeinflussen.)

#### 2.2.8 Einbau von SVB

Das Schalungssystem hat maßgeblichen Einfluss auf die Qualität des SVB. Es fehlten im Bereich Einbau systematische Anforderungen an die Schalung wie z. B. Dichtigkeit und Oberflächenbeschaffenheit. Ebenso lagen nicht genügend Erfahrungen zu den unterschiedlichen Einbringverfahren (Einbau mit Kran-Kübel, herkömmliches Einbauen mit Pumpe, Befüllen der Schalung mit Pumpe im steigenden Strom von unten) vor, um im Vorfeld das jeweils optimale Verfahren für die verschiedenen SVB im Hinblick auf Dauerhaftigkeit und Oberflächenausbildung auswählen zu können.

### **3 Forschungsziel und wirtschaftliche Bedeutung**

#### **3.1 Ziel**

Ziel dieser Arbeit war es, die Einflüsse auf den selbstverdichtenden Beton systematisch zu analysieren und zu charakterisieren, um die Herstellung und den Einsatz von SVB als Transportbeton unter Verwendung der typischen vorhandenen Anlagen und Rohstoffe zielsicher zu ermöglichen. So sollte ein wesentlicher Beitrag geleistet werden, um den SVB als Transportbeton gemäß DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-2 genau so sicher wie Rüttelbeton einsetzen zu können.

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens sollten es ermöglichen, einen Qualitätssicherungsrahmenplan aufzustellen, der alle qualitätssichernden Maßnahmen von der Bereitstellung der Betonausgangsstoffe über die Durchführung und Auswertung der Erst- und Konformitätsprüfungen bis hin zu den Korrekturmaßnahmen zur Berücksichtigung unterschiedlicher Randbedingungen bei Transport, Temperatur und Einbau enthält. Dieser Rahmenplan dient dem einzelnen Transportbetonwerk als Modell für eine Ausarbeitung eines anlagebezogenen Qualitätssicherungssystems.

#### **3.2 Wirtschaftliche Bedeutung**

Selbstverdichtender Beton kann durch die Vermeidung von Betonierfehlern die Qualität und die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen bzw. Betonbauwerken verbessern, Personal- und Einbaukosten senken sowie gesundheitliche Risiken durch Lärm und Vibration vermindern [1, 3, 5, 7, 8, 10, 13, 14, 18, 30-33]. Seine Verwendung durch die beantragte Forschung zu fördern, bedeutete im einzelnen:

Vermeidung von Betonierfehlern: Durch selbstverdichtenden Beton kann die Qualität des Betonbauteils bzw. des Betonbauwerks weiter vom Einfluss menschlicher Unzulänglichkeiten entkoppelt und weiter automatisiert [7, 8, 13, 14, 18]. Zu kurzes oder zu langes mechanisches Rütteln kann entweder zu Hohlräumen (große Porosität und unzureichender Verbund mit der Bewehrung) oder zu Entmischungen (Kiesnester, absandende Oberflächen) im Beton führen. Der Beton erreicht dann seine angestrebten Eigenschaften wie Festigkeit und Dauerhaftigkeit vielfach nicht. Das Selbstverdichtungsvermögen hingegen stellt eine homogene Betonstruktur sicher.

Bedingt durch ein unsachgemäßes Verdichten können ferner unansehnliche Oberflächen entstehen. Durch die Selbstverdichtung werden ansprechende, porenarme Sichtbetonflächen erreicht. Der Wasserzementwert bleibt über die gesamte Höhe des Bauteils konstant, wodurch eine gleichmäßige Farbe erzielt wird [1, 5, 10, 18, 30, 34].

Auch bei dichter Bewehrung wird eine gleichmäßig hohe Betonqualität erreicht. Schwer zugängliche Stellen können betoniert werden, Rüttellücken entfallen und Betonierabschnitte sind günstiger wählbar [1, 3, 5-7, 9-11, 14, 15, 18, 30, 33]. Somit wird durch das Selbstverdichtungsvermögen dieses Betons das Einbringen eines vollständig verdichteten Betons erleichtert, aufwendiges Nachbessern vermieden und die Ausschussquote gesenkt.

geringerer Personalaufwand und höhere Einbauleistung: Der Einbauvorgang kann vereinfacht werden, wodurch sich das Arbeitstempo und die Gesamtleistung bei geringerem Personalaufwand erhöht [3, 18, 30, 34, 35].

Reduzierung der Lärmbelastung und der gesundheitlichen Risiken: Da SVB keine mechanische Verdichtungsarbeit benötigt, wird er auch „Stiller Beton“ genannt. Die Lautstärke auf der Baustelle bzw. im Fertigteilwerk und in der Umgebung wird reduziert. Neben Vermeidung der Umweltbelastung „Lärm“ zugunsten des Baustellenpersonals und der Anwohner wird hierdurch auch ein längeres Arbeiten - gerade in städtischen Gegenden - ermöglicht [3, 5, 7, 10, 13, 15, 18, 30, 34]. Außerdem entfallen die gesundheitlichen Risiken, die durch die Verdichtungsarbeit mit Innenrüttlern entstehen, z. B. das „Weiße-Finger-Syndrom“ durch Übertragen der Vibration des Rüttlers auf den Körper [13] sowie Hebearbeiten in oft gebückter Haltung.

größere Entwurfsfreiheit: Durch selbstverdichtenden Beton wird dem Planer eine größere Entwurfsfreiheit ermöglicht. Nicht mehr der Baustoff Beton, sondern die Schalungstechnik begrenzt unter Umständen die Einsatzmöglichkeiten [7, 8, 18, 34].

Korrekturmöglichkeiten: Verbesserte Kenntnisse der Einflüsse auf den frischen SVB, über Abnahmekriterien und über evtl. Korrekturmöglichkeiten machen den Beton beherrschbarer und sicherer. Zeigt ein SVB auf der Baustelle nicht die benötigten Frischbetoneigenschaften, könnten diese durch gezielte Korrekturmaßnahmen wiederhergestellt werden.

Da der größte Teil der Betonproduktion in Deutschland auf den Transportbetonbereich entfällt (57 % des Zementverbrauchs in Deutschland [36]), ist es von großer Bedeutung, SVB als Transportbeton sicher herstellen und verarbeiten zu können.

Die Technologie der selbstverdichtenden Betone mit ihren oben beschriebenen Vorteilen stünde durch die verbesserten Kenntnisse einer breiten klein- und mittelständischen Hersteller- und Anwendergruppe zur Verfügung. Zwar muss jeder Hersteller „seinen“ SVB auf die eigenen Ausgangsstoffe und Produktionsanlagen anpassen und ihn mit größter Sorgfalt herstellen. Jedoch sollten die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens, besonders zur Schwankungsbreite und zu Korrekturmöglichkeiten, dazu beitragen, dass der SVB auch in Deutschland sicher hergestellt in der Praxis Verwendung findet.

Selbstverdichtender Beton ist aufgrund des erhöhten Materialaufwands (größerer Mehlkorngehalt, höhere Fließmitteldosierung) teurer als herkömmlicher Rüttelbeton [37, 38]. Dem gegenüber stehen Einsparungen durch den geringeren Verarbeitungsaufwand und durch ein konstanteres Endprodukt. So könnten qualitativ bessere Betonbauteile am Ende zu marktgerechten Preisen angeboten werden. Dies bedeutet einen Gewinn sowohl für den Betonabnehmer als auch für den Betonhersteller.

## 4 Lösungsweg und Zeitplan

### 4.1 Lösungsweg

Dieses Forschungsvorhaben wurde von der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB) in enger Zusammenarbeit mit den Mitgliedswerken durchgeführt. Von den Mitgliedsunternehmen wurden die für das Forschungsvorhaben notwendigen Mischanlagen, Fahrmi-scher sowie Einbaugeräte bereit gestellt.

Die Laboruntersuchungen dienten dazu, die unter Praxisbedingungen festgestellten Haupt-einflussgrößen durch Parameterstudien zu hinterlegen, um daraus robuste Lösungen für den Praxisbetrieb abzuleiten und zu erproben.

Die Ziele dieses Forschungsvorhabens sollten erreicht werden durch:

- Rezepturenentwicklung für praxisgebräuchliche Betonsorten (Beton für die Anforderungen der Expositions-kategorie XC1/XC2, Beton für die Anforderungen der Expositions-kategorie XC4/XF1), jeweils mit geeigneten Zement-Mehlkorn-Kombinationen. Die Untersuchungen zum Einfluss von Schwankungen im Wassergehalt und zum Temperaturbereich sowie zu den Einbauverfahren wurden an SVB der verschiedenen Sorten und jeweils aus geeigneten Kombinationen aller Ausgangsstoffe durchgeführt.
- Untersuchungen zum Einfluss der Mischreihenfolge auf die Frischbetoneigenschaften selbstverdichtender Betone sowie zum Einfluss der Dosiergenauigkeit der Transportbetonanlage, der eingetragenen Mischenergie sowie der Feuchtegehaltsbestimmung der Sandfraktionen.
- Untersuchungen an den optimierten Betonen zu Schwankungen im Wassergehalt. Als Richtgröße sollte eine Schwankungsbreite von  $\Delta w = \pm 7 \text{ l/m}^3$  dienen, die dann bis zu den Grenzen ausgelotet wird.
- Untersuchungen an den optimierten Betonen in unterschiedlichen Temperaturbereichen. Dabei wurden in den vorbereitenden Laboruntersuchungen Umgebungstemperaturen von  $T = 30^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$  und  $T < 10^\circ\text{C}$  in klimatisierten Räumen eingestellt. Die Ausgangsstoffe wurden durch Vorlagerung an die entsprechenden Temperaturen angepasst. Die entsprechenden Praxisuntersuchungen wurden jahreszeitlich angepasst durchgeführt.
- Untersuchungen zum Einfluss des Transportvorgangs und der Transportzeit auf die Konsistenz (z. B. Chargengröße, Bewegungsenergie, Nachmischen, Verdunstungsrate)
- Erarbeitung von Beurteilungskriterien für die Abnahme von SVB auf der Baustelle und Erarbeitung von Entscheidungskriterien für Korrekturmöglichkeiten bei Verarbeitbarkeitsverlust des SVB (z. B. mangelnde Fließfähigkeit, falsche Viskosität, Charakterisierung der Stabilität,...). Dabei sollten unter anderem die vom Sachverständigen-Ausschuss festgelegten Prüfkriterien angewandt und hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit beurteilt werden.
- Von charakteristischen SVB wurden wichtige Gebrauchseigenschaften ermittelt (Festigkeit, Frostwiderstand, Spannungs-Dehnungs-Verhalten, Elastizitätsmodul, lastfreie Formänderungen).
- Kontinuierliche Überprüfung der Laborergebnisse durch anschließende Praxisversuche (Herstellung der entsprechenden Betone auf Mischanlagen der Transportbetonindustrie, Transport in Fahrmischern und Überprüfung der Verarbeitbarkeit beim Einbau)
- Im Bereich Einbau sollen Probebauteile aus SVB als Transportbeton hergestellt werden. Dabei soll die Anforderungen an die Schalung (z. B. Dichtigkeit und Oberflächen) untersucht werden. Anhand von Bohrkernen, die aus den Probebauteilen entnommen wurden, wurde die Homogenität der Mischung beurteilt; ferner wurden die üblichen Festbetonkenngrößen bestimmt.



## **5 Untersuchungen**

### **5.1 Allgemeines**

Die anfänglichen Laboruntersuchungen sowie erste Praxisuntersuchungen wurden zunächst durch das Transportbetonwerk 1 begleitet. Diese Untersuchungen werden im Folgenden als „Serie 1“ bezeichnet. Nachdem während des laufenden Forschungsvorhabens das Transportbetonwerk 1 nicht mehr zur Verfügung stand, musste ein neuer Partner für das Forschungsvorhaben gefunden werden.

Für die Durchführung der weiteren Praxisversuche hatte sich das Transportbetonwerk 2 bereit erklärt. Die Untersuchungen, die im Zusammenhang mit dem Kooperationspartner Transportbetonwerk 2 stehen, werden im Folgenden als „Serie 2“ bezeichnet.

Die im Forschungsvorhaben eingesetzten Ausgangsstoffe wurden sowohl auf die im Transportbetonwerk 1 als auch auf die im Transportbetonwerk 2 vorhandenen Ausgangsstoffe abgestimmt.

Mit dem Wechsel der Kooperationspartner war auch ein Wechsel der Ausgangsstoffe (insbesondere Zement und Zusatzmittel) verbunden. Der Untersuchungsaufwand musste daher insofern erweitert werden, als dass die Vorabstimmung in den Laboruntersuchungen zweifach ausgeführt werden musste. Als weitere Einschränkung ergab sich, dass zwar mit beiden Kooperationspartnern die Zemente CEM I und CEM III untersucht werden konnten, jedoch der Einsatz von CEM II-Zementen (CEM II/A-LL und CEM II/B-S) nicht möglich war. Dies ist insofern unkritisch, da mit den untersuchten SVB-Kombinationen CEM I und Kalksteinmehl sowie CEM III und Flugasche, die Einflüsse bezüglich der Verwendung von CEM II-Zementen weitgehend abgedeckt sind.

### **5.2 Ausgangsstoffe**

#### **5.2.1 Allgemeines**

In Abstimmung mit den im ausgewählten Transportbetonunternehmen zum Einsatz kommenden Ausgangsstoffen (Zement, Zusatzstoff, Zusatzmittel, Gesteinskörnung), wurden die folgenden Ausgangsstoffe beschafft:

#### **5.2.2 Zement und Zusatzstoffe**

In die Untersuchungen der Serie 1 und 2 wurden jeweils folgende Zemente und Zusatzstoffe einbezogen:

- Portlandzement CEM I 32,5 R nach DIN EN 197-1
- Hochofenzement CEM III/A 32,5 nach DIN EN 197-1
- Kalksteinmehl der Güteklasse LL
- Steinkohlenflugasche nach DIN EN 450

An den Ausgangsstoffen wurden chemisch-mineralogische und physikalische Untersuchungen durchgeführt. Die chemische Zusammensetzung der mehlfeinen Stoffe wurde mit der Röntgenfluoreszenzanalyse ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen A1 und A2, Anhang A, zusammengestellt.

Zur Beschreibung der physikalischen Eigenschaften der mehlfeinen Stoffe wurden die Korngrößenverteilungen mit dem Lasergranulometer bestimmt, die spezifischen Oberflächen nach Blaine gemessen, der Wasseranspruch für Normsteife ermittelt sowie an den Zementen die Druck- und Biegezugfestigkeitsentwicklung an Normmörteln, der Erstarrungsbeginn nach Vicat und die Raumbeständigkeit nach Le Chatelier bestimmt. Die Ergebnisse der Zementuntersuchungen können der Tabelle A3, Anhang A, entnommen werden, die Ergebnisse der Zusatzstoffuntersuchungen wurden in Tabelle A4, Anhang A, zusammengefasst. Die grafische Darstellung der Korngrößenverteilung der verwendeten Zemente und Zusatzstoffe geht aus den Bildern B1 und B2, Anhang B, hervor.

Sowohl die verwendeten Zemente als auch die eingesetzten Zusatzstoffe erfüllten die normgemäßen Anforderungen.

### 5.2.3 Zusatzmittel

Für das Forschungsvorhaben wurden im Rahmen der Untersuchungen der Serie 1 vier Fließmittel mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung auf der Wirkstoffbasis Polycarboxylatether (PCE) verwendet, die nach Angaben der Hersteller für den Einsatz im Transportbetonbereich geeignet sind. Von diesen Fließmitteln wurde der Feststoffgehalt durch Abdampfen nach EN 480-8 bestimmt. Der Feststoffgehalt der untersuchten Fließmittel lag bei rd. 35 M.-%. Aufzeichnungen der Infrarotspektrogramme zeigten, dass die Wirkstoffe der vier Zusatzmittel nicht identisch waren. Untersuchungen im Viskomat NT zur Ermittlung der Sättigungskurven [25] lieferten jedoch nahezu identische Sättigungsdosierungen von rd. 0,25 M.-% Fließmittel bezogen auf die Masse des Zements bei geringfügig voneinander abweichenden Scherwiderständen.

Nach umfangreichen Voruntersuchungen an den Fließmitteln sowie an Leimen und Betonen wurde für die Hauptuntersuchungen der Serie 1 ein Fließmittel ausgewählt, das sich bezüglich Verflüssigung und Wirkungsdauer in beiden Feinstoffkombinationen (Portlandzement und Kalksteinmehl sowie Hochofenzement und Flugasche) als besonders günstig erwiesen hatte. Die unterschiedliche zeitabhängige Verflüssigungswirkung der Fließmittel wurde an einer Standardbetonzusammensetzung ( $z = 300 \text{ kg/m}^3$ ;  $ZS = 250 \text{ kg/m}^3$ ;  $w = 175 \text{ l/m}^3$ ) ermittelt (siehe Bild B3, Anhang B). Diese Standardbetone wurden mit den verschiedenen Fließmitteln auf ein Anfangssetzfließmaß mit Blockierring von etwa 75 cm eingestellt. Danach wurde im Abstand von jeweils 30 min die Prüfung des Setzfließmaßes mit Blockierring wiederholt.

Von Seiten des Transportbetonwerks 2 wurde für die Untersuchungen der Serie 2 ein weiteres Fließmittel auf der Wirkstoffbasis Polycarboxylatether vorgegeben, das nach Angabe des Herstellers für den Einsatz im Transportbeton geeignet ist. Von dem Fließmittel wurde der Feststoffgehalt durch Abdampfen nach DIN EN 480-8 bestimmt. Der Feststoffgehalt des untersuchten Fließmittel lag bei rd. 16 M.-%. Die Dichte des Fließmittels betrug  $1,04 \text{ mg/l}$ , der pH-Wert 8,83, der Brechungsindex 1,3594 und die Oberflächenspannung  $28,1 \text{ mN/mm}$  gemessen bei  $22,7 \text{ °C}$ . Bild B4, Anhang B, zeigt exemplarisch die Aufzeichnung des Infrarotspektrogramms dieses PCE-Fließmittels. Das Infrarotspektrogramm kann als Identifikationsmerkmal für spätere Lieferungen dienen.



#### 5.2.4 Gesteinskörnung

Als Gesteinskörnungen kamen Rheinsand und Rheinkies zum Einsatz. Der Sand und der Kies waren jeweils oberflächentrocken und kernfeucht. Da der Sand gerade bei SVB einen großen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit hat, wurde für die Betonuntersuchungen jeweils Sand aus den entsprechenden Transportbetonwerken, in dem die Laborergebnisse überprüft werden sollten, verwendet. Bild B5, Anhang B, zeigt die Sieblinie des Laborsandes, der im FIZ eingesetzt wird, sowie die Sieblinie des Sandes, der im Transportbetonwerk (Serie 1) verwendet wurde. Als grobe Gesteinskörnung (2 mm bis 16 mm) wurde der Standardkies aus dem Raum Düsseldorf eingesetzt.

Um das Blockieren zu vermeiden, wurde eine Sieblinie in Anlehnung an **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**6] entworfen und dann in Betonversuchen optimiert. Gute Ergebnisse wurden mit der Sieblinie 4 (siehe Bild B6, Anhang B) erzielt. Die Sieblinien 2 und 3 erfüllten in Verbindung mit dem niedrigsten Leimvolumen von rd. 360 l/m<sup>3</sup> (Kombination Portlandzement mit Kalksteinmehl für Außenbauteilbedingungen) sowohl im Box Test als auch bei der Blockierprüfung nicht die Anforderungen für blockierungsfreies Fließen. Die Sieblinien 1 und 4 waren so gewählt, dass mit dem niedrigsten Leimvolumen von rd. 360 l/m<sup>3</sup> (Kombination Portlandzement mit Kalksteinmehl für Außenbauteilbedingungen) in allen Fällen blockierungsfreies Fließen sichergestellt war. In den weiteren Betonversuchen kam die Sieblinie 4 zum Einsatz. Die Dichte des Sandes und der groben Gesteinskörnung betrug  $\rho = 2,6 \text{ kg/dm}^3$ . Die Ermittlung des Blockierverhaltens und die Überprüfung der Verarbeitbarkeit erfolgte mit dem Box Test sowie mit dem Setzfließmaß mit Blockierring. Das Leimvolumen und die Abstufung der Gesteinskörnungen (0/2 = 42 M.-%, 2/8 = 29 M.-%, 8/16 = 29 M.-%) waren so gewählt, dass in allen Fällen blockierungsfreies Fließen sichergestellt war.

#### 5.2.5 Zugabewasser

Alle Untersuchungen im Labor des FIZ wurden mit Wasser aus dem Leitungsnetz der Stadt Düsseldorf durchgeführt. Bei den Praxisversuchen wurde jeweils das am Standort zur Verfügung stehende Wasser verwendet.

### 5.3 Bestimmung der Sättigungswassergehalte mit dem $\beta_p$ -Wert Verfahren

Mit Hilfe des  $\beta_p$ -Wert Verfahrens wurden die Sättigungswassergehalte folgender Ausgangsstoffe bzw. Kombinationen der Ausgangsstoffe untersucht:

- Portlandzement CEM I 32,5 R
- Hochofenzement CEM III/A 32,5 R-NW
- Kalksteinmehl
- Flugasche
- Portlandzement CEM I 32,5 R plus Kalksteinmehl (für Außenbauteilanwendungen)
- Hochofenzement CEM III/A 32,5 R-NW plus Flugasche (für Innenbauteil- und Außenbauteilanwendungen)

Für die späteren Betonherstellungen wurden die Kombinationen CEM I 32,5 R und Kalksteinmehl sowie CEM III/A 32,5 und Steinkohlenflugasche gewählt. Die Zusammensetzung des Mehlkorngemisches im Beton richtete sich nach dem Mindestzementgehalt sowie nach

dem höchstzulässigen Wasserzementwert für die Expositionsklasse XC1/XC2 gemäß DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 bei einem gesamten Mehlkorngehalt von rd.  $550 \text{ kg/m}^3$ . Daraus ergab sich für die Kombination „Innenbauteilbeton“ ein Zementgehalt von  $240 \text{ kg/m}^3$  und ein Zusatzstoffgehalt von  $310 \text{ kg/m}^3$  sowie für die Kombination „Außenbauteilbeton“ ein Zementgehalt von  $270 \text{ kg/m}^3$  und ein Zusatzstoffgehalt von  $280 \text{ kg/m}^3$ . Die Sättigungswassergehalte wurden an den entsprechenden Mehlkornmischungen in den jeweils im Beton zum Einsatz kommenden Verhältnissen ermittelt.

Die Bestimmung des  $\beta_p$ -Werts erfolgte nach folgender Prüfprozedur:

- Das zu prüfende Mehlkorn nach Vorgabe einwiegen und in den sauberen und trockenen Mischertopf füllen.
- Wassermenge nach Vorgabe in einem Messzylinder einwiegen
- Werden mehr als 2 mehlfeine Stoffe verwendet, wird das Mehlkorngemisch im Mischer auf niedrigster Stufe 2 min homogenisiert.
- Wasser langsam ( $\sim 5 \text{ s}$ ) in den laufenden Mischer geben und 30 s bei niedrigster Stufe mischen
- 30 s Mischpause, während der ersten 15 s den an der Wand oberhalb des Leimniveaus des Mischertopfs anhaftenden Leim mit dem Einfüll-Löffel abschaben, danach den Leim mit dem Löffel gut bis auf den Grund durchrühren
- 90 s bei mittlerer Stufe mischen
- Ausbreitplatte mit feuchtem Tuch abwischen
- Konusform mit Einfüllaufsatz mittig auf Ausbreitplatte zentrieren
- Konusform mit Leim füllen und überstehenden Leim sorgfältig mit dem Einfüllaufsatz plan abstreichen.
- Konusform gerade nach oben heben
- Durchmesser (d) des Kuchens in zwei Richtungen rechtwinklig zueinander auf 1 mm genau messen ( $d_1$  und  $d_2$ ).
- Wird die zeitabhängige  $\beta_p$ -Wert Entwicklung untersucht, ist die Prüfung sinngemäß zu den vorgegebenen Prüfzeitpunkten zu wiederholen. Dabei wird der Leim vor der Prüfung nicht aufgemischt, sondern nur mit dem Einfüll-Löffel durchgerührt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Ermittlung des Startwassergehalts mit dem  $\beta_p$ -Wert Verfahren sind für die Ausgangsstoffe der Serie 1 in Bild B7, Anhang B, sowie für die entsprechenden Mehlkornmischungen in Bild B8, Anhang B, dargestellt. Die grafische Auswertung der Untersuchungen für die Kombinationsvarianten der Ausgangsstoffe der Serie 2 geht aus den Bildern B9, B10 und B11, Anhang B, hervor.

Es ist anzumerken, dass das  $\beta_p$ -Wert Verfahren nach Okamura höhere Wassergehalte liefert, als für den daraus herzustellenden SVB benötigt wurden. Daher sind die Startwassergehalte im Vergleich zu den ermittelten  $\beta_p$ -Werten um 10 % reduziert worden. Ferner geht aus den Untersuchungen hervor, dass in diesen beiden Feinststoffkombinationen der Einfluss der unterschiedlichen Mehlkornzusammensetzungen entsprechend den Anforderungen der beiden Betonsorten „Innenbauteil“ und „Außenbauteil“ auf den Wasseranspruch eine untergeordnete Rolle spielt. In dem betrachteten Bereich wurden jeweils nahezu die gleichen Wasseransprüche ermittelt.

## 5.4 Betone – Herstellung und Untersuchungsumfang

### 5.4.1 Übersicht der hergestellten Betone

Für die Betonherstellungen wurden die Mehlkornkombinationen Portlandzement CEM I 32,5 R und Kalksteinmehl sowie Hochofenzement CEM III/A 32,5 und Steinkohlenflugasche gewählt. Die Zusammensetzung des Mehlkorngemisches im Beton richtete sich nach dem Mindestzementgehalt sowie nach dem höchstzulässigen Wasserzementwert für die Expositions-klasse XC1/XC2 bzw. XC4/XF1 gemäß DIN EN 206-1 und DIN 1045-2.

Es wurden drei leimreiche Betone mit Anforderungen an Innenbauteile (XC1/XC2) mit einem Mindestzementgehalt von  $240 \text{ kg/m}^3$  und einem Zusatzstoffgehalt von  $310 \text{ kg/m}^3$  für die Kombinationen Portlandzement/Kalksteinmehl sowie Hochofenzement/Flugasche untersucht. Der Mehlkorngehalt betrug rund  $550 \text{ kg/m}^3$ . Die untersuchten Betonzusammensetzungen gehen aus den Tabellen A5, A6 und A9, Anhang A, hervor. In der Prüfserie 1 wurden 13 Betone und in der Prüfserie 2 sechs Betone hergestellt; insgesamt wurden 19 Betone in der Rubrik Innenbauteilanforderungen untersucht.

Im Bereich der Außenbauteilbetone (XC4/XF1) wurden vier leimreiche Betone mit einem Mindestzementgehalt von  $270 \text{ kg/m}^3$  und einem Wasserzementwert von  $w/z \leq 0,60$  mit den Mehlkornkombinationen Hochofenzement CEM III/A 32,5 mit Flugasche und Portlandzement CEM I 32,5 R mit Kalksteinmehl entwickelt. Die untersuchten Betonzusammensetzungen gehen aus den Tabelle A7, A8, A10 und A11, Anhang A, hervor. In der Prüfserie 1 wurden neun Betone und in der Prüfserie 2 17 Betone hergestellt; insgesamt wurden 26 Betone in der Rubrik Außenbauteilanforderungen untersucht.

Insgesamt wurden im Rahmen der Laboruntersuchungen 45 Betone hergestellt.

Folgende Abkürzungen werden im Folgenden zur Bezeichnung verwendet:

PK	Kombination Portlandzement CEM I 32,5 R / Kalksteinmehl KSM
HF	Kombination Hochofenzement CEM III/A 32,5 / Steinkohlenflugasche SFA
AK	Betone zur Untersuchung des Auslaufkegels
SVB	selbstverdichtende Praxisbetone
1	Serie 1
2	Serie 2
<hr/>	
i	Innenbauteilanforderungen
a	Außenbauteilanforderungen
P	Praxisbetone
<hr/>	
xx	fortlaufende Nummerierung der Betone

Beispiel: **HF2-i-03**: Kombination Hochofenzement CEM III/A 32,5 / Steinkohlenflugasche SFA; Serie 2; Innenbauteilanforderungen; fortlaufende Nummerierung Beton Nr. 3

Untersucht wurde der Einfluss der Wasser- und Fließmitteldosierung auf den zeitabhängigen Verlauf. Die Verarbeitbarkeitszeit sollte zwei Stunden und die Schwankungsbreite der Wasserdosierung etwa  $\Delta w \sim \pm 7 \text{ l}$  betragen. Im Wesentlichen wurden an diesen Stellen die Grenzbereiche überprüft. Es wurden jeweils die Auswirkungen auf den zeitlichen Verlauf des Setzfließmaßes, auf die Trichtergeschwindigkeit und die Steighöhe im Box Test untersucht. Des Weiteren wurde die Veränderung der Verarbeitbarkeitseigenschaften bei verschiedenen Fließmittelgehalten untersucht. Zusätzlich wurde orientierend der Einfluss der Wasser- und Fließmitteldosierung auf den zeitabhängigen Verlauf der Verarbeitungseigenschaften selbst-

verdichtender Betone bei gleichem Mehlkornvolumen der beiden Mehlkornkombinationen untersucht.

Nach Ermittlung des Einflusses des Wassergehalts auf die Verarbeitungseigenschaften der selbstverdichtenden Betone wurde an ausgewählten Betonen der Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften innerhalb der Temperaturbereiche  $T_1 < 10^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 20^\circ\text{C}$  und  $T_3 \sim 30^\circ\text{C}$  ermittelt (Betonzusammensetzung siehe Tabellen A10 und A11, Anhang A).

Als ergänzender Versuchsparameter wurde im Rahmen von Frischbetonprüfungen die Nachdosierbarkeit von Fließmittel untersucht.

Die ursprünglich geplante Entwicklung leimarmen Betone für die Anforderungen der Expositions-kategorie XC1/XC2 mit einem Mehlkorngesamt von rd.  $450 \text{ kg/m}^3$  wurde während der laufenden Arbeiten zurückgestellt, da sich die Arbeiten an der Einstellung der zeitabhängigen Verarbeitbarkeitseigenschaften an den leimreichen Betonen sehr umfangreich gestalteten. Ferner wäre ein Absenken des Leimvolumens durch die Reduzierung des Mehlkornanteils zu diesem Zeitpunkt noch nicht zielführend gewesen, da die Einstellung des zeitabhängigen Verarbeitbarkeitsverhaltens der leimarmen Betone in diesen Zement-Feinstoffkombinationen nur mit einem sehr hohen Aufwand möglich gewesen wäre.

#### 5.4.2 Herstellung

Bei der Herstellung selbstverdichtender Betone ist es wichtig, eine möglichst gute Homogenisierung der Feinstoffe sowie die vollständige Aktivierung des Fließmittels zu erreichen. Hierzu wurden verschiedene Mischreihenfolgen getestet. Bei der günstigsten Mischreihenfolge wurden die Betonausgangsstoffe in der Reihenfolge: Gesteinskörnung, Zement, Zusatzstoff in einen 250 l fassenden Labortellermischer gefüllt und unter Zugabe von zwei Drittel des Zugabewassers vorgemischt. Danach wurde das letzte Drittel Zugabewasser mit dem Fließmittel zugegeben und der Beton weitere drei Minuten gemischt.

Zur Herstellung der Ausgangsbetone wurde nach dem Vormischen der Feinstoffe und der Gesteinskörnung das gesamte Wasser ohne Fließmittel langsam zugegeben, um die „Null-Konsistenz“ bei optimalem Wassergehalt zu ermitteln. Dies geschah vor dem Hintergrund der Praxisversuche, bei denen sich der benötigte Wassergehalt durch die feuchten Gesteinskörnungen nicht genau einstellen lässt und der optimale Wassergehalt durch stufenweise Wasserdosierung (von der trockenen Seite her kommend) eingestellt werden muss. Das Fließmittel wurde anschließend zugegeben und der Beton ebenfalls drei Minuten gemischt.

#### 5.4.3 Frischbetonprüfungen

Nach Mischungsende wurden folgende Frischbetonprüfungen durchgeführt:

- Setzfließmaß  $s_m$
- Zeit  $t_{500}$ , die der SVB benötigt, um auf einen Durchmesser von 500 mm zu fließen
- relative Trichtergeschwindigkeit  $R = 1/\text{Ausfließzeit } T$
- Steighöhe im Box Test
- Setzfließmaß mit Blockierring  $s_{mR}$

- Zeit  $t_{500R}$ , die der SVB benötigt, um durch den Blockierring auf einen Durchmesser von 500 mm zu fließen
- ggf. zeitabhängige Eintauchtiefe des Tauchstabs

Diese Prüfungen wurden alle 30 min nach kurzem Aufmischen wiederholt. Als Zielvorgabe für die Laborprüfungen galten folgende Anforderungen: Das Setzfließmaß  $sm$  sollte zwischen 60 und 75 cm, die relative Trichtergeschwindigkeit  $R$  zwischen  $0,45$  und  $1,0 \text{ s}^{-1}$  liegen. Im Box Test musste eine Steighöhe von mindestens 32 cm erreicht werden. Als Grenze der Fließfähigkeit wurde ein Setzfließmaß  $sm < 60 \text{ cm}$  festgelegt. Erreichte ein Beton diese Grenze, wurden jeweils 0,2 M.-% Fließmittel in den Mischer nachdosiert und 90 s gemischt. Unmittelbar danach wurden die Frischbetonprüfungen am nachdosierten SVB wiederholt und anschließend im alten Rhythmus fortgeführt.

Detaillierte Beschreibungen der speziellen Frischbetonprüfungen, die für selbstverdichtenden Beton angewandt werden, sind im Anhang D zusammengestellt.

#### 5.4.4 Festbetonprüfungen

Zur Ermittlung wichtiger Gebrauchseigenschaften der hergestellten Betone wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Druckfestigkeit (2, 7 und 28 Tage; Würfel 150 mm)
- Spaltzugfestigkeit (28 Tage; Würfel 150 mm)
- E-Modul (28 Tage; Zylinder 150/300 mm)
- Schwinden (3 Monate unter atmosphärischen Bedingungen  $20^\circ \text{ C}$ , 65 % r.F.; Zylinder 150/300 mm)
- Carbonatisierung (an den gespaltenen Schwind-Probekörpern nach 91 Tagen)

Bei den Außenbauteilbetonen zusätzlich:

- Frostwiderstand (Würfel 100 mm; Würfelverfahren, Wasserfrost)

### 5.5 Frischbetonergebnisse

#### 5.5.1 Serie 1 - Laborbetone in der Kombination Hochofenzement / Flugasche mit Innenbauteilanforderungen

##### 5.5.1.1 Variation des Wassergehalts

In Bild B12, Anhang B, sind die zeitlichen Verläufe der Setzfließmaße für die Betone HF1-i-01, HF1-i-02 und HF1-i-05 dargestellt. Die Bilder B13 bis B15, Anhang B, zeigen für diese Betone jeweils den Verlauf der gemessenen relativen Trichtergeschwindigkeit über dem Setzfließmaß. Sie unterscheiden sich dadurch, dass der Wassergehalt jeweils um den optimalen Wassergehalt von  $175 \text{ l/m}^3$  (HF1-i-02) bei sonst gleicher Zusammensetzung schwankte (siehe Tabelle A5, Anhang A, HF1-i-01 =  $168 \text{ l/m}^3$ , HF1-i-05 =  $181 \text{ l/m}^3$ ). Alle Betone erfüllten die Anforderungen für blockierungsfreies Fließen sowohl im Box Test als auch in der Blockierringprüfung, solange das Setzfließmaß größer 60 cm war. Besonders wurde die Entmischungsneigung der Betone überprüft. Bei Setzfließmaßen über 75 cm oder relativen Trichtergeschwindigkeiten über  $1,0 \text{ s}^{-1}$  war die Mischungsstabilität der hier untersuchten Betone mit einem Mehlkorngesamtgewicht von  $550 \text{ kg/m}^3$  nicht immer gegeben.

Der Beton HF1-i-02 (siehe Bild B14, Anhang B) mit  $175 \text{ l/m}^3$  Wasser war nach der Herstellung sehr weich und neigte mit einem Setzfließmaß von 81 cm und einer relativen Trichtergeschwindigkeit von  $1,13 \text{ s}^{-1}$  zum Sedimentieren. Trotzdem fiel die Verarbeitbarkeit innerhalb von 60 Minuten unter die Verarbeitbarkeitsgrenze ab. Eine optimale selbstverdichtende Eigenschaft besaß der Beton dabei zwischen 20 und 40 min nach Mischungsende. Eine Nachdosierung von 0,2 M.-% Fließmittel nach 60 min brachte den Beton fast wieder in sein Anfangsfließverhalten zurück. Nach einer kurzen Übergangszeit von rd. 15 min erreichte der Beton dann optimale selbstverdichtende Eigenschaften für weitere rd. 70 min.

HF1-i-01 (siehe Bild B13, Anhang B) und HF1-i-05 (siehe Bild B15, Anhang B) zeigten ebenfalls ein erhebliches Ansteifen. HF1-i-01, dem  $7 \text{ l/m}^3$  weniger Wasser als HF1-i-02 zugegeben wurde, zeigte einen schnelleren Abfall der Verarbeitbarkeit als HF1-i-02. Durch die geringere Wasserfilmdicke und durch die neu gebildeten Oberflächen infolge der Anfangsreaktionen des Zements wird die Wirkungsdauer des Fließmittels eingeschränkt. Durch eine Nachdosierung nach 30 min konnte das Mehlkorn wieder dispergiert werden. HF1-i-05 hingegen zeigte wegen des erhöhten Wassergehalts von  $182 \text{ l/m}^3$  eine höhere Fließfähigkeit. Jedoch konnte der Beton erst 30 min nach Mischungsende sicher ohne Entmischung eingebaut werden. Danach wies er für eine volle Stunde die für Selbstverdichtung optimale Verarbeitbarkeit auf. Eine Nachdosierung von 0,2 M.-% Fließmittel im Alter von 120 min brachte den Beton ebenfalls wieder in sein Anfangsfließverhalten zurück und sorgte für eine weitere Verarbeitbarkeitszeit von zwei Stunden.

Erwartungsgemäß wirkten sich Schwankungen im Zugabewassergehalt sowohl auf das Setzfließmaß als auch auf die relative Trichtergeschwindigkeit aus.

#### 5.5.1.2 Variation des Fließmittelgehalts

In Bild B16, Anhang B, sind die zeitlichen Verläufe der Setzfließmaße für die Betone HF1-i-02, HF1-i-03 und HF1-i-04 dargestellt. Die Bilder B14, B17 und B18, Anhang B, zeigen die Verläufe der gemessenen relativen Trichtergeschwindigkeiten über den zugehörigen Setzfließmaßen für die Betone HF1-i-02 bis -04. Diese Betone unterschieden sich dadurch, dass sie bei dem optimalen Wassergehalt von  $175 \text{ l/m}^3$  und sonst gleicher Zusammensetzung unterschiedliche Fließmitteldosierungen aufwiesen (siehe Tabelle A5, Anhang A). Alle Betone erfüllten die Anforderungen an die Steighöhe im Box Test und an das Setzfließmaß mit Blockierring, solange sie eine ausreichende Fließfähigkeit (Setzfließmaß größer 60 cm) aufwiesen. Auch hier war die Stabilität der Mischung gegeben, wenn die Werte Setzfließmaß  $\text{sm} < 75 \text{ cm}$  und rel. Trichtergeschwindigkeit  $R < 1 \text{ s}^{-1}$  betragen.

Bild B17 und B18, Anhang B, verdeutlichen den Einfluss der Fließmittelmenge auf das Setzfließmaß über die Zeit und damit auf die Verarbeitbarkeitszeit. Durch die gegenüber HF1-i-02 etwas erhöhte Fließmitteldosierung konnte die Verarbeitbarkeitszeit deutlich verlängert werden. Entsprechend den höheren Dosierungsmengen waren die Betone HF1-i-03 und HF1-i-04 wegen anfänglicher Entmischungsneigung erst zu späteren Zeitpunkten einbaubar (HF1-i-03 nach rd. 30 min und HF1-i-04 nach rd. 45 min), wiesen dann jedoch eine ausreichend lange Verarbeitbarkeitszeit auf. Darüber hinaus wäre eine weitere Fließmittelnachdosierung zu späteren Zeitpunkten auch möglich gewesen.

## 5.5.2 Serie 1 - Laborbetone in der Kombination Hochofenzement / Flugasche mit Außenbauteilanforderungen

### 5.5.2.1 Allgemeines

Bild B19, Anhang B, zeigt die Verläufe der Setzfließmaße für die Betone der Serie „Außenbauteilbeton“ in der Feinstoffkombination Hochofenzement CEM III/A 32,5 und Steinkohlenflugasche. Aus diesem Bild geht hervor, dass alle Betone dieser Serie im gewählten Schwankungsbereich der Wasser- und Fließmitteldosierung ein sehr hohes, ähnliches Anfangssetzfließmaß zwischen 82 und 84 cm aufwiesen. Insgesamt unterschieden sich die Betone dieser Serie jedoch stark in der zeitlichen Änderung der rel. Trichtergeschwindigkeit, wie im Folgenden gezeigt werden wird.

### 5.5.2.2 Variation des Fließmittelgehalts

In Bild B20, Anhang B, ist der Verlauf der rel. Trichtergeschwindigkeiten über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abh. von der Zeit für den Ausgangsbeton HF1-a-01 dieser Serie dargestellt. Er wies einen Wassergehalt von  $177 \text{ l/m}^3$  bei einer Fließmitteldosierung von 1,0 M.-% auf. Der in Vorversuchen ermittelte Startwassergehalt von  $w = 172 \text{ l/m}^3$  musste für den entsprechenden SVB auf  $177 \text{ l/m}^3$  angepasst werden. Unmittelbar nach dem Mischen besaß der Beton ein relativ hohes Setzfließmaß von 82 cm bei einer rel. Trichtergeschwindigkeit  $R$  von  $0,90 \text{ s}^{-1}$ . In den nächsten 30 min fiel die Verarbeitbarkeit auf ein Setzfließmaß von 73 cm bei einer rel. Trichtergeschwindigkeit von  $0,66 \text{ s}^{-1}$  ab und lag im für Selbstverdichtung optimalen Bereich. In der nächsten Stunde bis 90 min nach Mischungsende veränderte sich hauptsächlich das Setzfließmaß auf 61 cm, während die rel. Trichtergeschwindigkeit mit  $0,56 \text{ s}^{-1}$  relativ konstant blieb. Insgesamt zeigte der Beton HF1-a-01 zwischen 30 und 90 min nach Herstellungsende gute selbstverdichtende Eigenschaften. Die Nachdosierbarkeit wurde in diesem Fall nicht überprüft, wäre aber wie in Bild B19, Anhang B, zu sehen, problemlos möglich gewesen.

Bild B21, Anhang B, zeigt den Verlauf der rel. Trichtergeschwindigkeiten über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für den Beton HF1-a-02. Dieser Beton unterschied sich vom Ausgangsbeton HF1-a-01 durch eine um 0,1 M.-% v. z. erhöhte Fließmitteldosierung von 1,1 M.-% v. z. Die Verarbeitbarkeitseigenschaft des Betons war nach dem Mischungsende mit einem Setzfließmaß von 82 cm und einer rel. Trichtergeschwindigkeit von  $R = 0,84 \text{ s}^{-1}$  mit der des Ausgangsbetons vergleichbar und lag ebenfalls zu diesem Zeitpunkt außerhalb des Einbaubereichs. In den nächsten 30 min fiel die Verarbeitbarkeit auf ein Setzfließmaß von 79 cm bei einer rel. Trichtergeschwindigkeit von  $0,62 \text{ s}^{-1}$  ab. Die Trichtergeschwindigkeit lag in der gleichen Größenordnung wie beim Beton HF1-a-01 nach 30 min, während das zugehörige Setzfließmaß mit 79 cm noch sehr groß war. Der Beton befand sich nach 30 min noch außerhalb des Einbaubereichs. Ab 45 min nach Herstellungsende zeigte der Beton für 75 min optimale selbstverdichtende Eigenschaften. Nach 120 min wies er noch ein Setzfließmaß von 65 cm auf bei einer rel. Trichtergeschwindigkeit von  $0,46 \text{ s}^{-1}$ . Eine Nachdosierung von 0,2 M.-% v. z. Fließmittel nach 120 min erhöhte erwartungsgemäß die Verarbeitbarkeit des Betons. Sie führte zu einem weichen Beton mit einem Setzfließmaß von 78 cm bei einer rel. Trichtergeschwindigkeit von  $0,79 \text{ s}^{-1}$ . In den folgenden gut 30 min veränderte sich die Verarbeitbarkeit des Betons kaum, so dass er in dieser Zeit außerhalb des Einbaubereichs verweilte aber dann für weitere 75 min bis 240 min nach Mischungsende optimale selbstverdichtende Eigenschaften besaß. Eine Nachdosierung von nur 0,1 M.-% wäre in diesem Fall zweckmäßiger gewesen.

In Bild B22, Anhang B, ist der Verlauf der rel. Trichtergeschwindigkeiten über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für den Beton HF1-a-03 dargestellt. Dieser Beton unterschied sich von dem Ausgangsbeton HF1-a-01 durch eine um 0,2 M.-% v. z. erhöhte Fließmitteldosierung von 1,2 M.-% v. z. Wie auch bei HF1-a-02 zu sehen ist, führte die erhöhte Fließmitteldosierung zu einem weichen Beton außerhalb des Einbaubereiches innerhalb der Größenordnung der anderen beiden Betone. HF1-a-03 war erst nach etwa einer Stunde einbaubar und zeigte dann für 90 min bis 180 min nach Herstellungsende optimale selbstverdichtende Eigenschaften. Wie auch in der Serie „Innenbauteilbeton“ mit der selben Mehlkornkombination war durch die Erhöhung der Fließmitteldosierung der Zeitraum der optimalen selbstverdichtenden Eigenschaften steuerbar. Die Erhöhung des Fließmittelgehalts um jeweils 0,1 M.-% v. z. führte zu einer Verlängerung der Einbauzeit von 30 min. Dabei ist zu beachten, dass die Betone innerhalb der etwa gleichen Zeitspanne nach Mischungsende zum Sedimentieren neigten.

#### 5.5.2.3 Variation des Wassergehalts

Bild B23, Anhang B, zeigt den Verlauf der Verarbeitungseigenschaften für den Beton HF1-a-04. Er unterschied sich durch einen im Vergleich zum Ausgangsbeton HF1-a-01 um  $8 \text{ l/m}^3$  reduzierten Wassergehalt von  $169 \text{ l/m}^3$  bei einer Fließmitteldosierung von 1,2 M.-%. Dieser Beton zeigte den nahezu identischen zeitlichen Verlauf des Setzfließmaßes wie der Beton HF1-a-02, siehe Bild B19, Anhang B. Durch den geringeren Wassergehalt wies der Beton jedoch nur relativ geringe Trichtergeschwindigkeiten auf, so dass er trotz ausreichend hoher Setzfließmaße keine optimalen selbstverdichtenden Eigenschaften besaß und nur zwischen 20 und 60 min nach Herstellungsende einbaubar gewesen wäre. Eine Nachdosierung von 0,2 M.-% v. z. Fließmittel nach 120 min führte zwar zu einer Verbesserung des Setzfließmaßes, hatte aber keinen Einfluss auf die rel. Trichtergeschwindigkeit und somit auf das Selbstverdichtungsvermögen.

Bild B24, Anhang B, zeigt den Verlauf der Verarbeitungseigenschaften für den Beton HF1-a-05. Er unterschied sich durch einen im Vergleich zum Ausgangsbeton HF1-a-01 um  $4 \text{ l/m}^3$  erhöhten Wassergehalt von  $181 \text{ l/m}^3$  bei einer Fließmitteldosierung von 1,1 M.-%. Dieser Beton zeigte den nahezu identischen zeitlichen Verlauf des Setzfließmaßes wie der Beton HF1-a-03, siehe Bild B19, Anhang B, besaß aber durch den höheren Wassergehalt eine höhere Trichtergeschwindigkeit. Hier war wie in der Serie „Innenbauteilbeton“ mit der selben Mehlkornkombination auch wieder die Tendenz zu erkennen, dass eine über den optimalen Gehalt an Zugabewasser hinausgehende Wasserdosierung zu weichen Betonen führte, die kaum korrigierbar und erst zu späteren Zeitpunkten einbaubar waren. Sie reagierten ferner sehr sensibel auf eine Fließmittelnachdosierung, da das überschüssige Wasser nahezu sofort wieder freigesetzt wurde.

### 5.5.3 Serie 1 - Laborbetone in der Kombination Portlandzement / Kalksteinmehl mit Innenbauteilanforderungen

#### 5.5.3.1 Variation des Wassergehalts

Bild B25, Anhang B, zeigt den Verlauf der gemessenen Setzfließmaße für die Betone PK1-i-01, -02 und -04 der Serie „Innenbauteilbeton“ in der Feinstoffkombination Portlandzement CEM I 32,5 R / Kalksteinmehl. In Bild B26, Anhang B, ist der zeitliche Verlauf der Trichtergeschwindigkeit  $R$  über dem entsprechenden Setzfließmaß  $sm$  für den in Vorversuchen optimierten Beton PK1-i-01 mit  $173 \text{ l/m}^3$  Wasser und 0,9 M.-% Fließmittel bezogen auf das Ze-



mentgewicht dargestellt. Auch die Betone dieser Kombination zeigten blockierungsfreies Fließen in den Verarbeitbarkeitsprüfungen Box Test und Setzfließmaß mit Blockierring, solange sie eine ausreichende Fließfähigkeit (Setzfließmaß größer 60 cm) aufwiesen. Ebenso war die Stabilität der Mischung gegeben, wenn die Werte Setzfließmaß  $sm < 75$  cm und Trichtergeschwindigkeit  $R < 1 \text{ s}^{-1}$  betragen. PK1-i-01 zeigte ein für die Selbstverdichtung ausreichendes Fließverhalten über 40 min nach Mischungsende. Danach fiel die Fließfähigkeit steil ab, was in erster Linie an einem starken Rückgang des Setzfließmaßes lag. Eine Nachdosierung von 0,2 M.-% Fließmittel v. z nach 60 min brachte den Beton wieder in seine Ausgangsfließfähigkeit zurück und sorgte für weitere 45 min für ausreichende Verarbeitbarkeits-eigenschaften. Danach fiel die Fließfähigkeit, sowohl das Setzfließmaß als auch die rel. Trichtergeschwindigkeit, wieder steil ab. Um dem steilen Abfall der Verarbeitbarkeit entgegenzuwirken, wurde der Wassergehalt um  $2 \text{ l/m}^3$  auf  $175 \text{ l/m}^3$  angepasst und der Fließmittelgehalt auf 1,1 M.-% v. z erhöht.

Bild B27 und B28, Anhang B, zeigen den zeitlichen Verlauf der Fließfähigkeit für die Betone PK1-i-02 und PK1-i-04 im sm-R-Diagramm. PK1-i-04 weist einen Wassergehalt von  $175 \text{ l/m}^3$  auf. PK1-i-02 besitzt im Gegensatz zu PK1-i-04 bei sonst gleicher Zusammensetzung  $7 \text{ l/m}^3$  weniger Wasser. Erwartungsgemäß wirkte sich bei PK1-i-04 die Erhöhung des Wasser- und des Fließmittelgehalts im Vergleich zum Ausgangsbeton PK1-i-01 auf die Fließeigenschaften aus. Bemerkenswert ist, dass dabei in erster Linie die rel. Trichtergeschwindigkeit von  $1,15 \text{ s}^{-1}$  auf  $1,6 \text{ s}^{-1}$  erhöht wurde, während sich das Setzfließmaß nur um etwa 2 cm vergrößerte. Durch diese Veränderungen wurde der zeitliche Verlauf des Setzfließmaßes günstig beeinflusst. Erst nach etwa 75 min erreichte der Beton ein Setzfließmaß von 60 cm. Andererseits war der Beton sehr weich, was an den hohen Trichtergeschwindigkeiten abgelesen werden kann. Im Vergleich zu den Betonen HF1-i-01 bis -05 in der Mehlkornkombination Hochofenzement / Steinkohlenflugasche waren die Betone PK1-i-01 bis -05 auch bei Trichtergeschwindigkeiten bis  $1,2 \text{ s}^{-1}$  einbaubar. Der Beton PK1-i-04 besaß zwischen 30 und 75 min nach Mischungsende selbstverdichtende Eigenschaften. PK1-i-02, dem  $7 \text{ l/m}^3$  Wasser weniger zugegeben wurden, zeigte ein geringes Anfangssetzfließmaß von nur 69 cm bei immer noch erhöhter rel. Trichtergeschwindigkeit von  $1,6 \text{ s}^{-1}$ . Der geringere Wassergehalt machte sich nicht so sehr im zeitlichen Verlauf des Setzfließmaßes sondern im steilen Abfall der rel. Trichtergeschwindigkeit bemerkbar. Durch eine Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z konnten die für Selbstverdichtung benötigten Fließeigenschaften für weitere 30 min wieder hergestellt werden. Danach zeigte der Beton jedoch wieder einen überproportionalen Abfall der Verarbeitbarkeit. Aufgrund der relativ hohen Trichtergeschwindigkeiten der Betone PK1-i-02 und -04 wurde auf die Herstellung von Betonen mit einem Wassergehalt von  $182 \text{ l/m}^3$  verzichtet.

### 5.5.3.2 Variation des Fließmittelgehalts

Bild B29, Anhang B, zeigt den Verlauf der gemessenen Setzfließmaße für die Betone PK1-i-01, -03 und -05. In Bild B30 und B31, Anhang B, ist der zeitliche Verlauf der Fließfähigkeit für die Betone PK1-i-03 und PK1-i-05 im sm-R-Diagramm dargestellt. Die Betone unterscheiden sich von den Betonen PK1-i-02 und PK1-i-04 durch eine Erhöhung der Fließmitteldosierung um 0,1 M.-% auf 1,2 M.-% v. z. In beiden Fällen konnte dadurch keine Verbesserung der Verarbeitbarkeit erzielt werden. Bei PK1-i-03 hatte die Erhöhung des Fließmittelgehalts keinen Einfluß auf das Setzfließmaß und führte nur zu einer verringerten Viskosität. PK1-i-05 zeigte zwar einen günstigen Verlauf des Setzfließmaßes, jedoch blieben die Trichtergeschwindigkeiten über 90 min auf einem relativ hohen Niveau außerhalb des Einbaubereichs. Danach zeigte auch der Beton PK1-i-05 einen rapiden Abfall der Fließfähigkeit.

#### 5.5.4 Serie 1 - Laborbetone in der Kombination Portlandzement / Kalksteinmehl mit Außenbauteilanforderungen

In Bild B32, Anhang B, ist der zeitliche Verlauf der Setzfließmaße der Betone „Außenbauteilbeton“ in der Feinstoffkombination Portlandzement / Kalksteinmehl dargestellt. Diese Betone zeigten das selbe Verhalten wie die Betone für den Anwendungsfall „Innenbauteilbeton“ in der Kombination Portlandzement / Kalksteinmehl: Trotz hoher Wasser- und Fließmitteldosierungen wurde immer nur ein geringes Setzfließmaß von rd. 73 cm bei relativ hohen Trichtergeschwindigkeiten erreicht. Daher wurde in dieser Serie nur der Einfluss des Wassergehalts bei einer konstanten Fließmitteldosierung von 1,2 M.-% v. z auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften untersucht.

Bild B33, Anhang B, zeigt den Verlauf der rel. Trichtergeschwindigkeit über dem Setzfließmaß für den Ausgangsbeton der Serie PK1-a-01 mit einem Wassergehalt von  $172 \text{ l/m}^3$  und einer Fließmitteldosierung von 1,2 M.-% v. z. Dieser Beton besaß wie auch die Betone in der Serie „PK1-i“ ein relativ geringes Setzfließmaß von 72 cm bei einer hohen rel. Trichtergeschwindigkeit  $R$  von  $1,99 \text{ s}^{-1}$ . 30 min nach Mischungsende wies der Beton ein Setzfließmaß von 69 cm auf, wäre aber zu diesem Zeitpunkt wegen der immer noch recht hohen rel. Trichtergeschwindigkeit von  $1,42 \text{ s}^{-1}$  nicht sicher einbaubar gewesen. Nach 60 min erreichte der Beton dann den Einbaubereich und zeigte bis rd. 105 min nach Mischungsende optimale selbstverdichtende Eigenschaften. Danach fiel die Verarbeitbarkeit mit einem Setzfließmaß von nur noch 43 cm und einer rel. Trichtergeschwindigkeit von  $0,46 \text{ s}^{-1}$  stark ab. Eine Nachdosierung von 0,2 M.-% Fließmittel nach 120 min brachte den Beton auf das nahezu gleiche Verarbeitbarkeitsniveau wie 60 min nach Mischungsende zurück. Anschließend zeigte der Beton für weitere 30 min optimale selbstverdichtende Eigenschaften ehe die Verarbeitbarkeit erneut auf ein kaum noch messbares Setzfließmaß von 27 cm abfiel. In Bild B34, Anhang B, ist der Verlauf der Verarbeitbarkeit des Betons PK1-a-02 dargestellt. Er unterschied sich von dem Ausgangsbeton nur durch einen um  $7 \text{ l/m}^3$  geringeren Wassergehalt von  $165 \text{ l/m}^3$ . Der niedrige Wassergehalt führte zu einer verminderten rel. Trichtergeschwindigkeit von  $1,05 \text{ s}^{-1}$  bei einem Setzfließmaß von 71 cm. PK1-a-02 zeigte 60 min nach dem Mischungsende optimale selbstverdichtende Eigenschaften. Danach fiel die Verarbeitbarkeit stark auf ein Setzfließmaß von 36 cm ab. Durch eine Nachdosierung von 0,2 M.-% Fließmittel nach 90 min gelang es kurzzeitig, den Beton noch einmal in den für Selbstverdichtung benötigten Verarbeitbarkeitsbereich zu bringen, ehe die Verarbeitbarkeit wieder auf ein Setzfließmaß von 50 cm und eine kaum noch messbare rel. Trichtergeschwindigkeit abfiel. Die Auswirkung der Erhöhung des Wassergehalts um  $6 \text{ l/m}^3$  von  $172 \text{ l/m}^3$  auf  $178 \text{ l/m}^3$  Wasser auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften ist in Bild B35, Anhang B, erkennbar. Wie auch in den vorherigen Serien führte die Erhöhung zu einem noch weicheren Beton, der erst zu einem späteren Zeitpunkt einbaubar war und zwischen 75 und 105 min nach Herstellungsende selbstverdichtende Eigenschaften besaß. Wie auch PK1-a-01 zeigte PK1-a-03 einen starken Abfall der Verarbeitbarkeit zwischen 90 und 120 min. Durch die Nachdosierung von 0,2 M.-% v. z konnte der Beton für etwa 30 min ebenfalls in den optimalen Bereich zurück gebracht werden, ehe die Verarbeitbarkeit nach 165 min wieder stark abfiel.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Betone sowohl für den Anwendungsbereich „Innenbauteilbeton“ als auch für den Anwendungsfall „Außenbauteilbeton“ in der Kombination Portlandzement / Kalksteinmehl im Gegensatz zu den Betonen mit der Mehlkornkombination Hochofenzement / Steinkohlenflugasche geringere Setzfließmaße bei generell höheren Trichtergeschwindigkeiten erreichten. Eine Verringerung des Wassergehalts führte nicht zu einer Verringerung der rel. Trichtergeschwindigkeit, sondern auch bei höheren Fließmittelgehalten zum frühen Verlust der Verarbeitbarkeit. Fließmittelnachdosierungen

brachten die Betone in den verarbeitungsfähigen Bereich zurück. Jedoch folgte in der Regel nach weiteren 30 min erneut ein steiler Verarbeitbarkeitsabfall. Um die Verarbeitbarkeit dieser Betone weiter zu optimieren, müssten zusätzliche Mehlkorn-Fließmittelkombinationen für diese Ausgangsstoffe getestet werden.

#### 5.5.5 Serie 1 - Laborbetone Kombination Portlandzement / Kalksteinmehl mit erhöhtem Leimvolumen

Bei der Bewertung der Verarbeitbarkeitseigenschaften der Serien Portlandzement / Kalksteinmehl ist im Vergleich zu den Serien Hochofenzement / Steinkohlenflugasche zu beachten, dass das Leimvolumen aufgrund der unterschiedlichen Dichten der Zusatzstoffe (Kalksteinmehl =  $2,7 \text{ kg/m}^3$ , Steinkohlenflugasche =  $2,3 \text{ kg/m}^3$ ) in der Kombination Hochofenzement / Steinkohlenflugasche etwa  $20 \text{ l/m}^3$  größer ist. Daher wurden einige orientierende Untersuchungen an Betonen der Serie Portlandzement / Kalksteinmehl mit einem der Serie Hochofenzement / Steinkohlenflugasche entsprechenden Leimvolumen von rd.  $380 \text{ l/m}^3$  durchgeführt. Die Zusammensetzungen der Betone sind ebenfalls in den Tabellen A6 und A8, Anhang A, aufgeführt.

Bild B36, Anhang B, zeigt den Verlauf der Betone PK1-i-06 bis -08. Der Beton PK1-i-06 war so zusammengesetzt, dass die Zusammensetzung des Leimes (Zement, Kalksteinmehl, Wasser) im gleichen Verhältnis zum Ausgangsbeton der Serie PK1-i auf das benötigte Leimvolumen angehoben wurde. Durch den höheren Leimgehalt wurde ein Setzfließmaß unmittelbar nach Mischungsende von 80 cm bei einer rel. Trichtergeschwindigkeit von  $1,31 \text{ s}^{-1}$  erreicht, siehe Bild B37, Anhang B. Der Beton besaß nach 30 min optimale Verarbeitbarkeitseigenschaften und hielt diese über 50 min bei. Nach 90 min wurde die Verarbeitbarkeit durch eine Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z wieder in den optimalen Bereich gebracht. Danach zeigte der Beton über weitere 35 min ausreichende selbstverdichtende Eigenschaften. In Bild B38, Anhang B, ist der Einfluss eines um  $7 \text{ l/m}^3$  verringerten Wassergehalts auf die Verarbeitungseigenschaften dargestellt. Bis auf die damit verbundene Reduzierung der Viskosität besaß dieser Beton qualitativ den gleichen Verlauf der Verarbeitbarkeit wie der Beton PK1-i-06. In Bild B39, Anhang B, ist Verlauf der Verarbeitbarkeit des Betons PK1-i-08 dargestellt. Der Beton war so zusammengesetzt, dass das benötigte Leimvolumen von rd.  $380 \text{ l/m}^3$  nur durch die Anhebung des Kalksteinmehlgehalts erzeugt wurde. Hier ist wieder der charakteristische Verlauf der Verarbeitbarkeit für diese Mehlkornzusammensetzung zu erkennen: Eine anfänglich hohe rel. Trichtergeschwindigkeit bei einem mittleren Setzfließmaß zeigte in 60 min einen starken Abfall der Verarbeitbarkeit. Durch eine Nachdosierung von 0,2 M.-% v. z Fließmittel konnte der Beton wieder in den benötigten Verarbeitbarkeitsbereich gebracht werden.

Bild 40, Anhang B, zeigt den Verlauf des Setzfließmaßes über der Zeit für den Beton PK1-a-06. Bei diesem Beton wurde ebenfalls das benötigte Leimvolumen von  $380 \text{ l/m}^3$  durch die Anhebung des Kalksteinmehlanteils eingestellt. In Bild B41, Anhang B, sind die zugehörigen Trichtergeschwindigkeiten über dem Setzfließmaß dargestellt. Trotz des erhöhten Leimvolumens und einer Fließmitteldosierung von 1,1 M.-% v. z wurde nach dem Mischungsende nur ein Setzfließmaß von 75 cm erreicht. Der Beton besaß 40 min lang optimale selbstverdichtende Eigenschaften. Danach fiel die Verarbeitbarkeit wieder stark auf ein Setzfließmaß von 41 cm und einer nicht mehr messbaren rel. Trichtergeschwindigkeit ab. Eine Nachdosierung von 0,2 M.-% v. z brachte den Beton bei einer reduzierten Trichtergeschwindigkeit wieder in den Bereich der Ausgangsverarbeitbarkeit zurück und sorgte für rund weitere 60 min für selbstverdichtende Eigenschaften.

Durch den im Vergleich zur Serie Portlandzement / Kalksteinmehl um rd. 20 l/m<sup>3</sup> höheren Leimgehalt konnte die Verarbeitbarkeit geringfügig verbessert werden. Der charakteristische Verlauf der Verarbeitbarkeitseigenschaften, der auf das Zusammenwirken der gewählten Zement-Fließmittelkombination zurückzuführen ist, blieb indes bestehen.

#### 5.5.6 Serie 2 - Laborbetone in der Kombination Hochofenzement / Flugasche mit Innenbauteilanforderungen

Bild B42, Anhang B, zeigt die Verläufe der Setzfließmaße für die Betone der Serie „Innenbauteilbeton“ in der Feinststoffkombination Hochofenzement CEM III/A 32,5 und Steinkohlenflugasche.

Aus der Kombination der Frisch- und Festbetonprüfungen konnte ein Bereich abgeleitet werden, in dem die Betone der Serie HF2-i selbstverdichtende Eigenschaften aufwiesen: Bei Setzfließmaßen über 810 mm oder Trichterauslaufzeiten unter 12 Sekunden war die Mischungsstabilität der hier untersuchten Betone nicht immer gegeben. Lagen die Werte für das Setzfließmaß unter 700 mm und die Trichterauslaufzeit über 22 Sekunden, war die Selbstentlüftung der Betone nicht mehr ausreichend.

Die Betone HF2-i-01, -02, -03 und -05 wiesen den optimierten Wassergehalt von 168 l/m<sup>3</sup> auf, siehe Tabelle A9, Anhang A. Sie unterschieden sich voneinander durch eine steigende Fließmitteldosierung um jeweils 0,1 M.-% v. z. von 0,8 bis 0,9 M.-% v. z.

HF2-i-03 mit einem Fließmittelgehalt von 0,8 M.-% v. z zeigte nach der Herstellung keine ausreichenden Verarbeitbarkeitseigenschaften, siehe Bild B43, Anhang B. Die Fließmitteldosierung lag noch unterhalb der Sättigungsdosierung, was im Vergleich mit den anderen Betonen der Serie HF2-i neben dem geringeren Setzfließmaß im besonderen an der hohen Trichterauslaufzeit zu erkennen war. Trotz des optimalen Wassergehalts war noch so viel Wasser in Agglomeraten der mehlfeinen Stoffe rheologisch unwirksam gebunden, dass der Beton 30 Sekunden benötigte, um auszufließen. Erst durch eine zweimalige Fließmittelnachdosierung von jeweils 0,2 M.-% v. z konnten selbstverdichtende Eigenschaften für 30 Minuten eingestellt werden. Die Erhöhung der anfänglichen Fließmitteldosierung um 0,1 M.-% v. z auf 0,9 M.-% v. z bei HF2-i-02 brachte eine ausreichende Dispergierung des Mehlkorns. Dieser Beton besaß die ersten 20 Minuten nach Mischungsende selbstverdichtende Eigenschaften. Jedoch war die Wirkung des Fließmittel zeitlich stark begrenzt, so dass es zu einer starken Reagglomeration kam, die im Wesentlichen die Trichterauslaufzeit stark beeinflusste. Eine Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 60 Minuten führte zur Wiederherstellung der selbstverdichtenden Eigenschaften für weitere 30 Minuten in der Größe der Verarbeitbarkeit direkt nach Mischungsende, siehe Bild B45, Anhang B. Da auch die Trichterauslaufzeit durch die erneute Dispergierung den Ausgangswert erreichte, kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Beton den gleichen Wassergehalt nach 60 Minuten wie zum Zeitpunkt des Mischungsendes besaß.

Durch eine weitere Steigerung des Fließmittelgehalts auf 1,0 M.-% v. z bei HF2-i-01 konnte das Setzfließmaß noch einmal vergrößert werden, während sich die Trichterauslaufzeit kaum veränderte, siehe Bild B43, Anhang B. HF2-i-01 besaß selbstverdichtende Eigenschaften zwischen 30 und 60 Minuten nach Mischungsende. Die Erhöhung des Fließmittelgehalts führte zu einer zeitlichen Verschiebung der selbstverdichtenden Eigenschaften zu späteren Zeitpunkten hin. Jedoch war auch hier der Verarbeitbarkeitsverlust infolge einer stark ansteigenden Trichterauslaufzeit am größten.

Durch eine Fließmitteldosierung von 1,1 M.-% v. z bei HF2-i-05 konnten die Verarbeitbarkeitseigenschaften im Vergleich zu HF2-i-01 nicht weiter verbessert werden. Zwar konnten die Trichterausfließzeiten über 60 Minuten im benötigten Rahmen gehalten werden. Dafür zeigten die zugehörigen Setzfließmaße zu große Werte von über 810 mm. Als das Setzfließmaß den für Selbstverdichtung erforderlichen Bereich nach ca. 70 Minuten erreichte, war die Trichterausfließzeit so hoch, dass keine Selbstentlüftung mehr gegeben war.

HF2-i-04 und HF2-i-06 besaßen einen im Vergleich zum optimalen Wassergehalt um  $7 \text{ l/m}^3$  erhöhten Wassergehalt von  $175 \text{ l/m}^3$ , siehe Tabelle A9, Anhang A. HF2-i-04 zeigte im Vergleich zu HF2-i-03 mit gleichem Fließmittelgehalt etwas verbesserte Fließeigenschaften unmittelbar nach dem Mischungsende, siehe Bild B44, Anhang B. Trotz des erhöhten Wassergehalts bewegte sich der Verarbeitbarkeitsverlust im gleichen Rahmen. Durch eine Fließmittelnachdosierung in Höhe von 0,2 M.-% v. z nach 30 Minuten konnten die selbstverdichtenden Eigenschaften für weitere 30 Minuten wiederhergestellt werden, siehe Bild B45, Anhang B.

HF2-i-06 mit einem Fließmittelgehalt von 0,9 M.-% v. z bei einem Wassergehalt von  $175 \text{ l/m}^3$  besaß zwischen 20 und 50 Minuten nach Mischungsende selbstverdichtende Eigenschaften. Jedoch war der Verarbeitbarkeitsverlust hier ebenfalls sehr ausgeprägt, siehe Bild B44, Anhang B. Durch eine Fließmittelnachdosierung in Höhe von 0,2 M.-% v. z nach 90 Minuten konnten die selbstverdichtenden Eigenschaften für weitere 30 Minuten wiederhergestellt werden, siehe Bild B45, Anhang B.

Die weitere Erhöhung der Fließmitteldosierung hätte bei dem erhöhten Wassergehalt von  $175 \text{ l/m}^3$  zum gleichen Verlauf wie bei HF2-i-05 geführt. Die Verbesserung der Trichterauslaufzeit wäre durch zu große Setzfließmaße im entscheidenden Zeitrahmen aufgehoben worden.

Zusammenfassend zeigt Bild B46, Anhang B, den Einfluss der Fließmitteldosierung für einen Wassergehalt von  $168 \text{ l/m}^3$  auf den Bearbeitungsbeginn und die Zeitdauer der Verarbeitbarkeit.

#### 5.5.7 Serie 2 - Laborbetone in der Kombination Hochofenzement / Flugasche mit Außenbauteilanforderungen

##### 5.5.7.1 Variation des Fließmittel- und Wassergehalts

Die Betone der Serie HF2-a wiesen selbstverdichtende Eigenschaften bei Setzfließmaßen zwischen 690 und 810 mm sowie Trichterauslaufzeiten zwischen 7 und 15 Sekunden auf. Bild B47, Anhang B, zeigt die Verläufe der Setzfließmaße für die Betone der Serie „Außenbauteilbeton“ in der Feinstoffkombination Hochofenzement und Steinkohlenflugasche.

Der Beton HF2-a-02 mit optimiertem Wassergehalt von  $173 \text{ l/m}^3$ , siehe Tabelle A10, Anhang A, zeigte ähnliche Verarbeitbarkeitseigenschaften wie der Beton HF2-i-04. Unmittelbar nach Mischungsende fiel die Verarbeitbarkeit stark ab, so dass selbstverdichtende Eigenschaften nur zwischen 10 und 20 Minuten nach Mischungsende vorlagen, siehe Bild B48, Anhang B. Durch eine Fließmittelnachdosierung in Höhe von 0,4 M.-% v. z nach 30 Minuten, die mit einer Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% des Fließmittels vergleichbar war, welches für die Serie HF2-i verwandt wurde, konnten die selbstverdichtenden Eigenschaften für weitere 40 Minuten wiederhergestellt werden, siehe Bild B49, Anhang B.

In Beton HF2-a-03 wurde der Fließmittelgehalt um 0,2 auf 2,4 M.-% v. z erhöht. Dieser Beton neigte nach dem Mischungsende zum Sedimentieren. 30 Minuten nach Mischungsende besaß der Beton für 30 Minuten selbstverdichtende Eigenschaften, siehe Bild B48, Anhang B. Eine Fließmittelnachdosierung nach 90 Minuten in Höhe von 0,4 M.-% v. z brachte den Beton wieder nahezu in die Anfangsfließfähigkeit zurück und sorgte für weitere 40 Minuten für selbstverdichtenden Eigenschaften, siehe Bild B49, Anhang B.

HF2-a-04 enthielt einen, auf den optimalen Wassergehalt bezogenen, um  $7 \text{ l/m}^3$  erhöhten Wassergehalt. Im Vergleich zu HF2-a-02 mit gleichem Fließmittelgehalt wurde das anfängliche Fließverhalten kaum beeinflusst. Der Beton besaß nach etwa 15 Minuten für 30 weitere Minuten selbstverdichtende Eigenschaften, siehe Bild B48, Anhang B. Durch eine Fließmittelnachdosierung in Höhe von 0,4 M.-% v. z nach 60 Minuten konnten selbstverdichtende Eigenschaften für weitere 40 Minuten wiederhergestellt werden, ehe die Werte für das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit den Bereich für die Selbstverdichtung verließen, siehe Bild B49, Anhang B. Eine höhere Fließmitteldosierung bei erhöhtem Wassergehalt von  $180 \text{ l/m}^3$  hätte, wie bei Beton HF2-i-05, zu einem zum Sedimentieren neigendem Beton geführt, der, wenn überhaupt, nur zu späten Zeitpunkten einbaubar gewesen wäre.

#### 5.5.7.2 Einfluss der Temperatur auf die Verflüssigung

##### 5.5.7.2.1 Allgemeines

Neben den Wasser- und Fließmittelgehalten hat die Temperatur einen großen Einfluss auf die Verflüssigung und die Verarbeitbarkeitseigenschaften. Um diesen Einfluss darstellen zu können, wurden an selbstverdichtenden Mörteln und an selbstverdichtenden Betonen Untersuchungen zum Fließverhalten in unterschiedlichen Temperaturbereichen durchgeführt. Es wurden die Prüftemperaturen 8, 20 und 30 °C gewählt.

Auf die Darstellung der Ergebnisse der Mörteluntersuchungen wird an dieser Stelle nicht eingegangen. Diese sind ausführlich bei KORDTS [39] beschrieben.

##### 5.5.7.2.2 Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeit

Aufbauend auf den Mörteluntersuchungen [39] wurde der Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone der Serie HF2-a durchgeführt. Als Referenzbeton wurde HF2-a-03 gewählt. Die Zusammensetzungen der Betone sind in Tabelle A10, Anhang A, dargestellt. Die Ausgangsstoffe wurden so vortemperiert, dass die Betone ebenfalls Frischbetontemperaturen von ca. 8, 20 und 30 °C besaßen.

Die Betone der Serie HF2-a wiesen bei einer Prüftemperatur von 20 °C selbstverdichtende Eigenschaften bei Setzfließmaßen zwischen 690 und 810 mm sowie Trichterauslaufzeiten zwischen 7 und 15 Sekunden auf, siehe Abschnitt 5.5.7.1. Bild B50, Anhang B, zeigt die Verläufe der Setzfließmaße in Abhängigkeit von der Temperatur.

Die Bilder B51 und B52, Anhang B, fassen die Ergebnisse zur Ermittlung des zeitabhängigen Verarbeitbarkeitsverhaltens zusammen und zeigen die Zeiträume nach Mischungsende, in denen die Betone in Abhängigkeit von der Temperatur selbstverdichtende Eigenschaften aufwiesen.

HF2-a-03 mit einem Fließmittelgehalt von 2,4 M.-% v. z neigte nach dem Mischungsende zum Sedimentieren. 30 Minuten später besaß der Beton selbstverdichtende Eigenschaften, die er für weitere 30 Minuten behielt, siehe Bild B51, Anhang B.

Bei einer Prüftemperatur von 8 °C zeigte HF2-a-07 eine veränderte zeitabhängige Verarbeitbarkeit, siehe Bild B51, Anhang B. Der Beton verweilte nach Mischungsende länger im instabilen Bereich. Zwischen 40 und 75 Minuten nach Mischungsende besaß HF2-a-07 selbstverdichtende Eigenschaften.

Die Erhöhung der Temperatur auf 30 °C führte bei zu einem sehr schnellem Verarbeitbarkeitsverlust. Eine doppelte Nachdosierung im Rahmen der Vorversuchsbetone von 2 x 0,2 M.-% v. z brachte den Beton in den optimalen Bereich zurück und sorgte für selbstverdichtende Eigenschaften von rund einer Stunde. HF2-a-06 mit einer Fließmitteldosierung von 2,8 M.-% v. z besaß unmittelbar nach dem Mischungsende die Ausgangsverarbeitbarkeit von HF2-a-03. Er erreichte nach etwa 20 Minuten den Bereich der Verarbeitbarkeit für Selbstverdichtung und wies bis 80 Minuten nach Mischungsende selbstverdichtende Eigenschaften auf, siehe Bild B52, Anhang B. Bild C1, Anhang C, zeigt die optische Charakterisierung des Betons HF2-a-06 zu den Messzeitpunkten 15, 30, 45, 60, 75 und 120 Minuten. Aus der Darstellung können gleichermaßen die Frischbetonkenngrößen Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit entnommen werden. Zum Zeitpunkt 120 Minuten kann man erkennen, dass die Selbstentlüftung nicht mehr gegeben war.

Analog zu den Mörtelprüfungen zeigte sich, dass mit abnehmender Temperatur der Beton bei gleichem Fließmittelgehalt länger zum Sedimentieren neigte, ehe er den Bereich für Selbstverdichtung erreichte, siehe Bild B51, Anhang B. Der Verarbeitbarkeitszeitraum, in dem HF2-a-07 selbstverdichtende Eigenschaften besaß, betrug wie bei HF2-a-03 rund 30 Minuten. Durch die Erhöhung der Fließmitteldosierung auf 2,8 M.-% v. z konnte bei 30 °C für den Beton HF2-a-06 ein entsprechender Verarbeitbarkeitsverlauf eingestellt werden.

Die Betonversuche bestätigten das in den Mörtelversuchen gefundene Verhalten, dass die durch die Temperatur beeinflussten unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten zwischen Zement, Zusatzstoff und Fließmittel zu unterschiedlichen Fließmitteldepots führen, die eine längere bzw. kürzere Verarbeitbarkeit des Betons gewährleisten und damit maßgeblich den Verarbeitbarkeitszeitraum beeinflussen. Bei den Betonen war der Einfluss der höheren Temperaturen auf die Verarbeitbarkeits-eigenschaften ausgeprägter als bei den Mörteln. Dieses Verhalten kann durch die im Vergleich erhöhte Gesteinskörnungsoberfläche und das größere Temperaturreervoir der groben Gesteinskörnungen erklärt werden.

#### 5.5.8 Serie 2 - Laborbetone in der Kombination Portlandzement / Kalksteinmehl mit Innenbauteilanforderungen

##### 5.5.8.1 Variation des Fließmittel- und Wassergehalts

Die Betone der Serie PK2-a wiesen selbstverdichtende Eigenschaften bei Setzfließmaßen zwischen 650 und 750 mm sowie Trichterauslaufzeiten zwischen 10 und 22 Sekunden auf. Die Bilder B53 und B55, Anhang B, zeigen die Verläufe der Setzfließmaße für die Betone der Serie „Außenbauteilbeton“ in der Feinstoffkombination Portlandzement und Kalksteinmehl für unterschiedliche Fließmitteldosierungen und Wassergehalte.

Der Beton PK2-a-01 mit einer Fließmitteldosierung von 2,0 M.-% v. z wies keine selbstverdichtende Eigenschaften auf. Dreimalige Fließmittelnachdosierungen von 0,2 M.-% v. z führten erst zu einer geringfügigen Verbesserung. Aus diesem Grund wurde für Beton PK2-a-02

eine Ausgangskonzentration des Fließmittels von 2,6 M.-% v. z gewählt. Für diesen Beton sowie für den Beton PK2-a-03 mit einer Fließmitteldosierung von 2,8 M.-% v. z wurde jedoch ein rascher Abfall des Setzfließmaßes innerhalb von nur 15 Minuten nach Mischungsende beobachtet, wie aus Bild B53, Anhang B, hervorgeht. Ausreichend gute selbstverdichtende Eigenschaften konnten nicht erzielt werden. Wie aus Bild B54, Anhang B, zu erkennen ist, konnte erst eine weitere Erhöhung der Fließmitteldosierung auf 3,0 M.-% v. z für den Beton PK2-a-05 und 3,3 M.-% v. z für den Beton PK2-a-09 selbstverdichtende Eigenschaften sicherstellen. Für PK2-a-05 waren diese für einen Zeitraum von etwa 60 Minuten gegeben, für PK2-a-09 für ca. 120 Minuten.

Der Einfluss der Variation des Wassergehalts bei gleicher Fließmitteldosierung geht aus den Bildern B55 und B56, Anhang B, hervor. Die Darstellung der Setzfließmaße in Bild B55, Anhang B, zeigt, dass der Betone PK2-a-08 mit einem Wassergehalt von  $170 \text{ l/m}^3$  und einem Fließmittelgehalt von 3,3 M.-% v. z ein vergleichbares zeitliches Verhalten der Setzfließmaße aufweist, wie der Beton PK2-a-05 mit einem Wassergehalt von  $177 \text{ l/m}^3$  und einem Fließmittelgehalt von 3,0 M.-% v. z. Aus Bild B56, Anhang B, geht jedoch hervor, dass PK2-a-08 nur sehr kurze Zeit selbstverdichtende Eigenschaften aufweist, während PK2-a-05 etwa 60 Minuten gut verarbeitbar ist. Hinsichtlich der Setzfließmaße (Bild B55, Anhang B) zeigen die Betone PK2-a-09 mit einem Wassergehalt von  $177 \text{ l/m}^3$  und einem Fließmittelgehalt von 3,3 M.-% v. z und PK2-a-07 mit einem Wassergehalt von  $183 \text{ l/m}^3$  und einem Fließmittelgehalt von 3,0 M.-% v. z vergleichbares Verhalten auf. Wie in Bild B56, Anhang B, zu erkennen ist, führte bei gleicher Fließmitteldosierung die Erhöhung des Wassergehaltes um  $7 \text{ l/m}^3$  bzw.  $6 \text{ l/m}^3$  zu selbstverdichtenden Eigenschaften, die über einen Zeitraum von ca. 120 Minuten gegeben waren. Die optische Charakterisierung ist beispielhaft für den Beton PK2-a-07 mit einem Wassergehalt von  $183 \text{ l/m}^3$  und einem Fließmittelgehalt von 3,0 M.-% v. z in Bild C2, Anhang C, dargestellt. Bis zum Messzeitpunkt von ca. 15 Minuten nach Mischungsende kann Sedimentation beobachtet werden. Probleme hinsichtlich der Selbstentlüftung lagen zum Messzeitpunkt 120 Minuten noch nicht vor.

#### 5.5.8.2 Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeit

Für die Serie PK2-a wurde wie für die Serie HF2-a der Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeit untersucht. Die Betone der Serie PK2-a wiesen bei einer Prüftemperatur von  $20^\circ\text{C}$  selbstverdichtende Eigenschaften bei Setzfließmaßen zwischen 650 und 750 mm sowie Trichterauslaufzeiten zwischen 10 und 22 Sekunden auf, siehe Abschnitt 5.5.8.2. Bild B57, Anhang B, zeigt die Verläufe der Setzfließmaße in Abhängigkeit von der Temperatur.

In den Bildern B58 und B59, Anhang B, sind die Ergebnisse zur Ermittlung des zeitabhängigen Verarbeitbarkeitsverhaltens zusammengefasst. Ferner zeigen sie die Zeiträume nach Mischungsende, in denen die Betone in Abhängigkeit von der Temperatur selbstverdichtende Eigenschaften aufwiesen.

Ausgehend von einer Temperatur von  $20^\circ\text{C}$  für Beton PK2-a-09 mit dem optimalen Wassergehalt von  $177 \text{ l/m}^3$  und einer Fließmitteldosierung von 3,3 M.-% v. z wurde der Beton bei einer Prüftemperatur von  $8^\circ\text{C}$  und  $30^\circ\text{C}$  untersucht. Durch die Erhöhung auf  $30^\circ\text{C}$  wurden die selbstverdichtenden Eigenschaften, die bei  $20^\circ\text{C}$  für ca. 120 Minuten vorlagen, auf ca. 40 Minuten reduziert. Gegenüber dem Beton von  $20^\circ\text{C}$ , der erst nach ca. 30 Minuten einbaubar gewesen ist, lagen für den Beton bei  $30^\circ\text{C}$  unmittelbar selbstverdichtende Eigenschaften vor. Um die Verarbeitbarkeit des Betons PK2-a-06 sicherzustellen, wurde der Fließmittelgehalt von 3,3 M.-% v. z. um 0,3 M.-% reduziert. Es konnten selbstverdichtende Eigenschaften über einen Zeitraum von ca. 90 Minuten gewährleistet werden.



## 5.6 Festbetonergebnisse der Laborbetone

Die untersuchten Betone wiesen anforderungsgemäße Festbetoneigenschaften auf. Die Festbetonergebnisse (Druck- und Spaltzugfestigkeit, statischer E-Modul, Carbonatisierungstiefe und Abwitterung) sind in Tabellen A5 bis A11, Anhang A, zusammengefasst. Die Bilder B60 und B62, Anhang B, zeigen das Schwindverhalten der Betone für den Anwendungsfall „Innenbauteilbeton“. Für den Anwendungsfall „Außenbauteilbeton“ kann das Schwindverhalten den Bildern B61 und B63, Anhang B, entnommen werden. Die Abwitterung bei Frostbeanspruchung der Außenbauteilbetone geht aus den Bildern B64 und B65, Anhang B, hervor. Für die Betone der Serie 2 wurden nur noch stichpunktartig Festbetonergebnisse geprüft, da der Schwerpunkt in diesem Forschungsvorhaben auf den Frischbetoneigenschaften lag.

## 5.7 Zusammenfassung – Laborbetone

In diesem Forschungsvorhaben wurden die Einflüsse des Wasser- und Fließmittelgehalts auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften von selbstverdichtenden Transportbetonen in unterschiedlichen Zusammensetzungen untersucht. Hierzu wurden selbstverdichtende Betone mit den Ausgangsstoffen Portlandzement, Hochofenzement, Kalksteinmehl sowie Steinkohlenflugasche aus Transportbetonwerken entwickelt.

Die im Forschungsvorhaben eingesetzten Ausgangsstoffe wurden auf die in den Transportbetonwerken 1 und 2 vorhandenen Ausgangsstoffe abgestimmt.

Als Variation der Zusammensetzung wurde die Zugabewassermenge um etwa  $7 \text{ l/m}^3$  gegenüber den in Voruntersuchungen festgelegten Betonrezepturen variiert. Als Maßnahme zur Korrektur nicht mehr ausreichend verarbeitbarer Betone wurde eine Fließmittelnachdosierung von bis zu 0,2 M.-% v. z. untersucht. Alle untersuchten Betone besaßen anforderungsgemäße Festbetoneigenschaften.

Die Veränderungen der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone wurden in Abhängigkeit vom Setzfließmaß und von der relativen Trichtergeschwindigkeit dargestellt. In einer solchen Darstellung kann ein Bereich abgegrenzt werden, innerhalb dessen erfahrungsgemäß ausreichend gute Verarbeitbarkeitseigenschaften, d. h. eine ausreichende Fließfähigkeit, Entlüftung und Mischungsstabilität, selbstverdichtender Betone gegeben sind. Korrekturmaßnahmen für das Fließverhalten lassen sich hier gezielt einleiten und beurteilen.

Die erzielten Ergebnisse, die im Rahmen der Frischbetonuntersuchungen an Laborbetonen erzielt wurden, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Sollzusammensetzung selbstverdichtender Betone muss durch Erstprüfungen auf der Basis der zum Einsatz kommenden mehlfinen Stoffe und Gesteinskörnungen ermittelt werden.
- Es konnten für alle Betone der Serie 1 und 2 für die Kombinationen Hochofenzement und Flugasche bzw. Portlandzement und Kalksteinmehl jeweils für Innen- und Außenbauteilanforderungen Verarbeitungsbereiche anhand der Unter- und Obergrenzen für Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit (bzw. rel. Trichtergeschwindigkeit) festgelegt werden.
- Im Hinblick auf die Ist-Zusammensetzung sind besonders die Auswirkungen von Schwankungen im Gesamtwassergehalt auf das Setzfließmaß zu berücksichtigen. Durch Erstversuche sind die vertretbaren Schwankungsbreiten zu ermitteln.

- Abweichungen im Zugabewassergehalt von rd. 7 l/m<sup>3</sup> veränderten in diesen Versuchen bereits die Fließfähigkeit und die Mischungsstabilität merklich. Dabei ist in der Regel ein Beton mit einem geringeren Wassergehalt besser zu korrigieren als ein Beton mit zu hohem Wassergehalt.
- Etwas erhöhte Setzfließmaße bzw. relative Trichtergeschwindigkeiten nach dem Mischen verringern sich bei den hier untersuchten Betonen infolge des Ansteifens bereits innerhalb kurzer Zeiten.
- Bei nicht mehr ausreichenden Setzfließmaßen und Trichtergeschwindigkeiten konnten durch eine Nachdosierung des Fließmittels ausreichende Verarbeitungseigenschaften selbst nach längeren Transport- bzw. Lagerzeiten wieder eingestellt werden.
- Die Betonversuche bestätigten, dass die durch die Temperatur beeinflussten unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten zwischen Zement, Zusatzstoff und Fließmittel zu unterschiedlichen Fließmitteldépôts führen, die eine längere bzw. kürzere Verarbeitbarkeit des Betons gewährleisten und damit maßgeblich den Verarbeitbarkeitszeitraum beeinflussen.
- Um während eines ausreichenden Zeitraums optimale selbstverdichtende Eigenschaften aufrechtzuerhalten, sind die Einflüsse der Wechselwirkungen zwischen Mehlkorn und Fließmittel auf das Fließmaß durch entsprechende Vorversuche an Standardbeton zu überprüfen.

Die Ergebnisse zeigen auf der einen Seite, dass durch gezielte Wasser- und Fließmittelgehalte die Verarbeitbarkeitseigenschaften zeitlich sehr genau gesteuert werden können. Auf der anderen Seite untermauern die Ergebnisse, dass Schwankungen der Wasser- und Fließmittelgehalte sehr genau beherrscht und beobachtet werden müssen. Die Untersuchungsergebnisse unterstreichen die Bedeutung von sorgfältig geplanten Vorversuchen sowie Erst- und Kontrollprüfungen bei Herstellung und Verarbeitung von SVB als Transportbeton.

## **5.8 Überprüfung der Frischbetoneigenschaften an einem im Transportbetonwerk hergestellten SVB**

### **5.8.1 Praxisversuch 1**

Um die Ergebnisse der Laborbetone der Serie 1 zu überprüfen, wurde ein selbstverdichtender Beton SVB1-P-01 (siehe Tabelle A12, Anhang A) mit einer Zusammensetzung entsprechend HF1-i-03 (siehe Tabelle A5, Anhang A) im Transportbetonwerk 1 hergestellt und seine Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht. Bild C3, Anhang C, zeigt die Transportbetonanlage 1.

Dabei war besonders zu beachten, dass die Gesteinskörnungen je nach Fraktion Eigenfeuchten von 1 M.-% bis 5 M.-% aufwiesen. Dies erschwerte auf der einen Seite eine genaue Wasserdosierung. Auf der anderen Seite sind diese Gesteinskörnungen in der Regel wassergesättigt, so dass ein Wasserverlust durch Saugen nicht eintritt. Zur Herstellung des SVB wurde folgende Vorgehensweise gewählt. Um zu vermeiden, dass dem Beton mehr Wasser als benötigt zugegeben wird, wurde unter Berücksichtigung der Eigenfeuchte etwa 10 l Wasser pro m<sup>3</sup> Beton planmäßig weniger eingewogen. Die Ausgangskonsistenz des SVB ohne Fließmittel wurde dann augenscheinlich durch weitere Wasserzugabe eingestellt. Danach wurde 90 % der vorgesehenen Fließmittelmenge zugegeben und der Beton ausreichend gemischt. Anschließend wurden die Fließfähigkeit und die Viskosität des SVB mit dem Setzfließmaß und zugehöriger  $t_{500}$ -Zeit überprüft, erforderlichenfalls durch weitere Fließmittelzu-

gabe auf den Wert des planmäßigen Ausgangsfließmaßes gebracht und dann in einen Fahrmischer gefüllt.

Die Chargengröße betrug jeweils  $1,5 \text{ m}^3$ . Nach 30 min und 60 min wurde das Setzfließmaß mit zugehöriger  $t_{500}$ -Zeit, die Trichterausfließzeit und die Steighöhe im Box Test ermittelt.

Folgendermaßen wurde bei der Vormischung vorgegangen:

09:00 Uhr Mischung wie vorgesehen, FM auf 0,8 M.-% v. z. reduziert  
09:05 Uhr Wasserzugabe ~ 5 l, nach Augenschein FM nachdosiert  
09:15 Uhr Mischungsende 1,  $sm = 76 \text{ cm}$ ,  $t_{500} = 4,1 \text{ s}$   
0,1 M.-% v. z. FM nachdosiert  
09:30 Uhr Mischungsende 2,  $sm = 60 \text{ cm}$ ,  $t_{500} = 5,1 \text{ s}$   
0,1 M.-% v. z. FM nachdosiert  
09:35 Uhr Mischungsende 3,  $sm = 67 \text{ cm}$ ,  $t_{500} = 5,3 \text{ s}$   
Befüllen des Fahrmischers  
10:00 Uhr Überprüfung des Frischbetons:  $sm = 63 \text{ cm}$ ,  $t_{500} = 5,7 \text{ s}$   
Trichter = 11,2 s, BoxTest B = 33 cm (97 %)

Folgendermaßen wurde bei der Hauptmischung für SVB1-P-01 vorgegangen:

11:00 Uhr Mischung wie vorgesehen, FM auf 1,1 M.-% v. z. reduziert  
11:01 Uhr Wasserzugabe, FM-Zugabe (3 min Mischzeit nach FM)  
11:05 Uhr Mischungsende 1,  $sm = 80 \text{ cm}$ ,  $t_{500} = 3,8 \text{ s}$  (siehe Bild C4, Anhang C)  
Befüllen des Fahrmischers  
11:25 Uhr Überprüfung des Frischbetons:  $sm = 72 \text{ cm}$ ,  $t_{500} = 5,7 \text{ s}$   
Trichter = 10,0 s, BoxTest B = 34 cm (100 %)  
11:55 Uhr Überprüfung des Frischbetons:  $sm = 72 \text{ cm}$ ,  $t_{500} = 5,5 \text{ s}$   
Trichter = 10,2 s, BoxTest B = 34 cm (100 %)

Bild B66, Anhang B, zeigt den zeitlichen Verlauf des Setzfließmaßes des SVB1-P-01 und den Vergleich mit den entsprechenden Laborbetonen. Durch die größere Mischungsmenge und durch die ständige Bewegung in der Fahrmischertrommel hatte der SVB1-P-01 nach 30 min einen etwas günstigeren zeitlichen Verlauf des Fließverhaltens. Bild B67, Anhang B, zeigt den zeitlichen Verlauf der  $t_{500}$ -Zeit als Kenngröße für die dynamische Viskosität sowie der Gleichmäßigkeit der Mischungszusammensetzung. Auch hier reiht sich der Praxisbeton in das Verhalten der Laborbetone ein.

Nachdem während des laufenden Forschungsvorhabens das Transportbetonwerk 1 nicht mehr für weitere Untersuchungen zur Verfügung stand, wurden alle weiteren Praxisuntersuchungen in Kooperation mit dem Transportbetonwerk 2 durchgeführt. Auf die Ergebnisse dieser Praxisuntersuchungen wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

### 5.8.2 Praxisversuch 2 - Vormischung

Der Praxisversuch 2 diente dazu, die Transportbetonanlage des Transportbetonwerks 2 kennen zulernen. Um die Ergebnisse der Laborbetone der Serie 2 in der Kombination Hochofenzement und Steinkohlenflugasche zu überprüfen, wurde daher ein selbstverdichtender Beton SVB2-P-02 (siehe Tabelle A12, Anhang A) mit einer Zusammensetzung entsprechend HF2-a-03 (siehe Tabelle A10, Anhang A) im Transportbetonwerk 2 hergestellt und seine

Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht. Bild C5, Anhang C, zeigt Bilder der des Praxistests und die durchgeführten Frischbetonprüfungen.

Auch hier war zu beachten, dass die Gesteinskörnungen je nach Fraktion Eigenfeuchten von 1 M.-% bis 5 M.-% aufwiesen. Auf die Problematik bezüglich der genauen Wasserdosierung wurde bereits in Abschnitt 5.8.1 eingegangen.

Zur Herstellung des SVB wurde wiederum unter Berücksichtigung der Eigenfeuchte etwa 10 l Wasser pro m<sup>3</sup> Beton planmäßig weniger eingewogen. Die Ausgangskonsistenz des SVB ohne Fließmittel wurde dann augenscheinlich durch weitere Wasserzugabe eingestellt. Danach wurde 100 % der vorgesehenen Fließmittelmenge zugegeben und der Beton ausreichend gemischt. Anschließend wurden die Fließfähigkeit und die Viskosität des SVB mit dem Setzfließmaß und der Trichterauslaufzeit überprüft, erforderlichenfalls durch weitere Fließmittelzugabe auf den Wert des planmäßigen Ausgangsfließmaßes gebracht und dann in einen Fahrmischer gefüllt.

Die Chargengröße betrug 2,0 m<sup>3</sup>. Zu festgelegten Zeiten wurde das Setzfließmaß, die Trichterauslaufzeit und die Steighöhe im Box Test ermittelt.

Folgendermaßen wurde bei der Vormischung vorgegangen:  
(Außentemperatur 4 °C, Frischbetontemperatur 16 °C)

12:00 Uhr Mischung wie vorgesehen, FM 2,4 M.-% v. z.  
12:05 Uhr Wasserzugabe ~ 10 l  
12:10 Uhr Wasserzugabe ~ 5 l  
12:15 Uhr Mischungsende 1,  $sm_{0min} = 88$  cm  
Befüllen des Fahrmischers  
12:35 Uhr Überprüfung des Frischbetons:  $sm_{20min} = 83$  cm, Trichter = 7,1 s,  
BoxTest B = 34 cm (100 %)  
13:00 Uhr Überprüfung des Frischbetons:  $sm_{45min} = 68$  cm, Trichter = 7,2 s,  
BoxTest B = 34 cm (100 %)  
Herstellung von Probekörpern  
Festbetonergebnisse siehe Tabelle A12, Anhang A  
13:25 Uhr Überprüfung des Frischbetons:  $sm_{70min} = 58$  cm, Trichter = 10,7 s,  
BoxTest B = 32,5 cm (96 %)

Bild B68, Anhang B, zeigt den zeitlichen Verlauf des Setzfließmaßes des SVB2-P-02 und den Vergleich mit dem entsprechenden Laborbeton HF2-a-03. Obwohl durch die größere Mischungsmenge und durch die ständige Bewegung in der Fahrmischertrommel ein etwas günstigerer zeitlicher Verlauf des Fließverhaltens für den Beton SVB2-P-02 zu erwarten gewesen wäre, stellten sich im Praxisversuch 2 für den Praxisbeton leicht ungünstiger Bedingungen ein. Diese können im Wesentlichen auf den Einfluss der Temperatur zurückgeführt werden. Während der Laborbeton das Verhalten bei konstant 20 °C darstellt, lagen die Außentemperaturen bei der Herstellung von SVB2-P-02 bei ca. 4 °C, die Frischbetontemperatur betrug 16 °C. Bild B69, Anhang B, zeigt den zeitlichen Verlauf der Trichterauslaufzeit in Abhängigkeit vom Setzfließmaß für den Praxisbeton SVB2-P-02 und den Vergleich mit dem entsprechenden Laborbeton HF2-a-03. Der Verarbeitbarkeitsbereich mit Setzfließmaßen zwischen 680 mm und 820 mm sowie Trichterauslaufzeiten zwischen 7 s und 15 s wurden für einen Zeitraum von ca. 20 Minuten erzielt. Nach ca. 40 Minuten hat der Praxisbeton den festgelegten Verarbeitbarkeitsbereich verlassen.

### 5.8.3 Praxisversuch 3 – Wand 1

Auf der Basis der an der Vormischung im Praxisversuch 2 gewonnenen Erkenntnisse, sollten im Praxisversuch 3 praktische Erfahrungen bei der Herstellung von Bauteilen gewonnen werden. Hierzu hatte sich Transportbetonwerk 2 bereit erklärt, Probewände erstellen zu lassen. Bild C6, Anhang C, zeigt den Grundriss der Probewand 1 und 2, die in zwei Betonierabschnitten (Praxisversuch 3 und Praxisversuch 4) hergestellt wurde. Im Rahmen des Praxisversuchs 3 wurde die Probewand 1 errichtet. Die Probewand weist eine Wandstärke von 0,30 m auf. Die Höhe wurde auf 1,25 m begrenzt, da der Beton unmittelbar aus dem Fahrnischer in die Schalung eingebracht wurde. Auf den Einsatz einer Betonpumpe musste aus Kostengründen verzichtet werden. Auf die unterschiedlichen Möglichkeiten des Beton Einbringens wird in Abschnitt 7.5 weiter eingegangen. Die Wand besteht aus zwei rechtwinkligen Wandteilen mit Längen von ca 7,5 m und 10,5 m. Somit stand eine maximale Fließlänge von ca. 18 m für den Beton zur Verfügung.

Zur Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Schalungsoberflächen wurde die Schalung der Wand auf der Außenseite mit neuen Schaltafeln erstellt, auf der Innenseite wurden gebrauchte Schaltafeln verwandt (siehe Bild C10, Anhang C). Des Weiteren wurden diverse Strukturelemente auf den Schaltafeln der Außenseite appliziert, um nach der Herstellung die Oberflächenstrukturen beurteilen zu können (siehe Bilder C8 und C9, Anhang C). Die Bilder C7 bis C11, Anhang C, zeigen die Errichtung der Schalung zur Herstellung der Probewand 1. Bild C11, Anhang C, gibt einen Gesamteindruck der geschalteten Probewand 1.

Die Zusammensetzung des Betons SVB2-P-03 in der Kombination Hochofenzement und Steinkohlenflugasche geht aus Tabelle A12, Anhang A, hervor. Sie entspricht der Zusammensetzung der Vormischung SVB2-P-02 (siehe Tabelle A12, Anhang A) bzw. dem Laborbeton HF2-a-03 (siehe Tabelle A10, Anhang A).

Zur Herstellung des SVB wurde im Gegensatz zur Vormischung der gesamte Wasseranteil sofort eingewogen. Die Chargengröße betrug  $2,0 \text{ m}^3$ . Es wurden vier Chargen hergestellt und in einen Fahrnischer mit  $8 \text{ m}^3$  Füllvermögen eingefüllt. Die Mischzeit für eine Charge betrug ca. 10 Minuten. Die vier Teilchargen wurden im Fahrnischer homogenisiert. Die Frischbetontemperatur betrug ca.  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ . Zu festgelegten Zeiten wurde das Setzfließmaß, die Trichterausfließzeit und die Steighöhe im Box Test ermittelt. Die Bilder C12 bzw. C13, Anhang C, zeigen die Ergebnisse zu den Messzeitpunkten  $t = 40$  Minuten bzw. 85 Minuten. 105 Minuten nach Herstellung wurde beschlossen, den Beton einzubauen, obwohl der planmäßige Verarbeitbarkeitsbereich noch nicht erreicht wurde und ggf. mit Sedimentation gerechnet werden musste.

Bild B70, Anhang B, zeigt die Verarbeitbarkeitseigenschaften des SVB2-P-03 in Abhängigkeit von der Zeit. Daraus geht hervor, dass der Beton zu keinem Zeitpunkt den Verarbeitbarkeitsbereich erreicht hat. Es lag der Verdacht nahe, dass dieser Effekt auf den Wassergehalt zurückzuführen ist. Um dies zu untersuchen, wurde der Wassergehalt mittels Darrprüfung bestimmt. Die Ergebnisse der Darrprüfung zeigten, dass der planmäßige Wassergehalt um ca.  $11 \text{ l/m}^3$  überschritten wurde. Wie sich im Nachhinein herausstellte, konnte der höhere Wassergehalt auf die Messeinrichtung zur Bestimmung der Eigenfeuchte des Sandes zurückgeführt werden. Zum Herstellungszeitpunkt des SVB2-P-03 wurde eine um ca. 2 % zu niedrige Eigenfeuchte des Sandes gemessen.

Die Bilder C14 bis C16, Anhang C, zeigen das Einbringen des Betons in die Schalung und geben einen Eindruck über die Selbstnivellierungseigenschaften des Betons. Der Beton konnte den vorhandenen Fließweg von 18 m zurücklegen. Die Höhendifferenz zwischen voller Füllhöhe des Betons an der Einfüllstelle und der Füllhöhe des Betons an der Stelle mit

dem weitestem Fließweg betrug ca. 50 cm. Der Fahrmischer wurde an zwei weiteren Einfüllstellen platziert, um die Wand vollständig mit Beton zu füllen.

Nach einer Nachbehandlungsdauer von sieben Tagen wurde die Wand ausgeschalt. Die Bilder C17 bis C23, Anhang C, zeigen die ausgeschaltete Wand und die Oberflächeneigenschaften des Betons. Trotz der zuvor beschriebenen Probleme bei der Betonherstellung wies die Wand eine sehr homogene porenfreie Oberfläche auf. Die applizierten Strukturelemente wurden vollständig in der Betonoberfläche abgebildet. Die Herstellung von Stegen mit einer Höhe und Breite von ca. 10 mm (siehe Bild C18, Anhang C) ist hervorragend gelungen. Der Einfluss von alter und neuer Schalung stellte sich sehr deutlich dar. Während die Außenseite über eine sehr gleichmäßige Oberfläche verfügte, gab die mit den gebrauchten Schaltafeln hergestellte Innenseite den Zustand der Schaltafeloberfläche eins zu eins wider (siehe Bilder C22 und C23, Anhang C). Während der Wandabschluss augenscheinlich keine Sedimentationserscheinungen aufwies, konnten an der von der Einfüllstelle am weitesten entfernt gelegenen Wandstelle Strukturprobleme im Beton festgestellt werden (siehe Bild C21, Anhang C), d. h. es hat vermutlich eine Sedimentation durch das Fließen des Betons über die lange Einbau- bzw. Fließstrecke stattgefunden.

Zur Überprüfung der Homogenität des Betons wurden Bohrkern aus der Wand entnommen. Die Bilder C53 und C54, Anhang C, zeigen die Entnahmestellen der Bohrkern in der Wand 1. Die Bohrkernprobe 3 wurde im Bereich der Einfüllstelle entnommen, die Bohrkernprobe 4 an der von der Einfüllstelle am weitesten entfernt gelegenen Wandstelle. Bild C56, Anhang C, zeigt die Bohrkernproben 3 und 4. Während der Bohrkern 3 nur leichte Sedimentationserscheinungen an der Einfülloberseite aufweist, können am Bohrkern 4 sehr deutliche Sedimentationen festgestellt werden (siehe auch Bild C57, Anhang C). Es können zwei Bereiche unterschieden werden. Für den unteren Bereich gilt, dass der Beton nicht in der Lage war, das Grobkorn über die Distanz von 18 m zu transportieren. Der obere Bereich ergab sich durch unmittelbare Sedimentation des Betons nach Umsetzen des Fahrmischer an diese Position. Mit einer Sedimentation war aufgrund der Messergebnisse (siehe Bild 70, Anhang B) zu rechnen. Sie sind im Wesentlichen auf den zu hohen unplanmäßigen Wassergehalt zurückzuführen.

#### 5.8.4 Praxisversuch 4 – Wand 2

Auf der Basis der im Praxisversuch 3 (Herstellung von Wand 1) gewonnenen Erkenntnisse, sollten im Praxisversuch 4 die Probleme, die sich infolge der Wasserüberdosierung ergeben hatten, vermieden werden. Bild C6, Anhang C, zeigt den Grundriss der Probewand 2, die unmittelbar an die Wand 1 anschließt. Im Rahmen des Praxisversuchs 4 wurde die Probewand 2 errichtet. Entsprechend der Probewand 1 weist auch die Probewand 2 eine Wandstärke von 0,30 m auf. Die Höhe wurde auf 1,25 m begrenzt, da der Beton unmittelbar aus dem Fahrmischer in die Schalung eingebracht wurde. Die Wand besteht wiederum aus zwei rechtwinkligen Wandteilen mit Längen von ca. 2,0 m und 9,5 m. Somit stand eine maximale Fließlänge von ca. 11,5 m für den Beton zur Verfügung.

Zur Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Schalungsoberflächen wurde auch hier die Schalung der Wand auf der Außenseite mit neuen Schaltafeln erstellt, auf der Innenseite wurden gebrauchte Schaltafeln verwandt. Des Weiteren wurden auch in der Probewand 2 diverse Strukturelemente auf den Schaltafeln der Außenseite appliziert, um nach der Herstellung die Oberflächenstrukturen beurteilen zu können. Bild C24, Anhang C, gibt einen Gesamteindruck der geschalteten Probewand 2.

Die Zusammensetzung des Betons SVB2-P-04 in der Kombination Hochofenzement und Steinkohlenflugasche geht aus Tabelle A12, Anhang A, hervor. Sie entspricht der Zusammensetzung der Vormischung SVB2-P-02 sowie der Praxismischung SVB2-P-03 (siehe Tabelle A12, Anhang A) bzw. dem Laborbeton HF2-a-03 (siehe Tabelle A10, Anhang A).

Zur Herstellung des SVB wurde nach Kontrolle der Sonde zur Bestimmung der Eigenfeuchte des Sandes der gesamte Wasseranteil sofort eingewogen. Die Chargengröße betrug  $2,0 \text{ m}^3$ . Es wurden zwei Chargen hergestellt und in einen Fahrmischer mit  $6 \text{ m}^3$  Füllvermögen eingefüllt. Die Mischzeit für eine Charge betrug ca. 10 Minuten. Die zwei Teilchargen wurden im Fahrmischer homogenisiert. Die Frischbetontemperatur betrug ca.  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ . Zu festgelegten Zeiten wurde das Setzfließmaß, die Trichterausfließzeit und die Steighöhe im Box Test ermittelt. Die Bilder C25, Anhang C, zeigt das Ergebnis zum Messzeitpunkt  $t = 20$  Minuten. Der Beton befand sich zu diesem Zeitpunkt bereits im Verarbeitbarkeitsbereich und wurde daher sofort in die Probewand 2 eingebracht. Bild B70, Anhang B, zeigt die Verarbeitbarkeits-eigenschaften des SVB2-P-04 in Abhängigkeit von der Zeit. Aufgrund der hohen Außen- und Frischbetontemperaturen musste damit gerechnet werden, dass der Beton nur für kurze Zeit im optimalen Verarbeitbarkeitsbereich bleibt.

Die Bilder C26 bis C30, Anhang C, zeigen das Einbringen des Betons in die Schalung. Der Beton konnte den vorhandenen Fließweg von  $11,5 \text{ m}$  zurücklegen. Die Höhendifferenz zwischen voller Füllhöhe des Betons an der Einfüllstelle und der Füllhöhe des Betons an der Stelle mit dem weitestem Fließweg betrug ca.  $25 \text{ cm}$ . Der Fahrmischer wurde an einer weiteren Einfüllstelle platziert, um die Wand vollständig mit Beton zu füllen.

Nach einer Nachbehandlungsdauer von sieben Tagen wurde die Wand ausgeschalt. Die Bilder C31 bis C36, Anhang C, zeigen die ausgeschaltete Wand und die Oberflächeneigenschaften des Betons. Die applizierten Strukturelemente wurden wiederum vollständig in der Betonoberfläche abgebildet (siehe Bilder C33 und C34, Anhang C). Der Einfluss von alter und neuer Schalung stellte sich in gleicher Art und Weise dar, wie er bereits bei der Probewand 1 beobachtet wurde (siehe Bilder C35 und C36, Anhang C). Augenscheinlich wurden im Gegensatz zur Probewand 1 keine Sedimentationserscheinungen beobachtet. Wie aus den Bildern C37 und C38, Anhang C, hervorgeht, wurde in beiden Wandbauteilen eine nahezu identische Oberflächenfarbe erzielt. Augenscheinlich ist nicht zu erkennen, dass es sich um unterschiedliche Betonherstellungen handelt, die im Abstand von ca. zwei Monaten ausgeführt wurden.

Zur Überprüfung der Homogenität des Betons wurden ebenfalls Bohrkern aus der Wand 2 entnommen. Die Bilder C53 und C54, Anhang C, zeigen die Entnahmestellen der Bohrkern in der Wand 2. Die Bohrkernprobe 1 wurde im Bereich der Einfüllstelle entnommen, die Bohrkernprobe 2 an der von der Einfüllstelle am weitesten entfernt gelegenen Wandstelle. Bild C55, Anhang C, zeigt die Bohrkernproben 1 und 2. Es konnten keine Sedimentationserscheinungen festgestellt werden.

#### 5.8.5 Praxisversuch 5 – Wand 3

Nachdem für die Kombination Hochofenzement und Steinkohlenflugasche erfolgreiche Praxisversuche durchgeführt werden konnten, sollte im Praxisversuch 5 die Kombination Portlandzement und Kalksteinmehl untersucht werden. Im Rahmen des Praxisversuchs 5 wurde die Probewand 3 errichtet. Bild C39, Anhang C, zeigt den Grundriss der Probewand 3 sowie die eingeschaltete Wand kurz vor dem Betonieren. Die Probewand weist eine Wandstärke von  $0,30 \text{ m}$  auf. Die Höhe wurde wie zuvor auf  $1,25 \text{ m}$  begrenzt, da der Beton unmittelbar aus

dem Fahrmischer in die Schalung eingebracht wurde. Die Wand weist eine Länge von ca 15 m auf.

Auf der Sichtseite der Wand wurden vom Transportbetonwerk 2 die Firmenlogos auf den Schaltafeln der Außenseite appliziert (siehe Bilder C40, C50 bis C52, Anhang C).

Die Zusammensetzung des Betons SVB2-P-05 in der Kombination Portlandzement und Kalksteinmehl geht aus Tabelle A12, Anhang A, hervor. Sie entspricht der Zusammensetzung des Laborbetons PK2-a-05 (siehe Tabelle A11, Anhang A).

Zur Herstellung des SVB wurde der gesamte Wasseranteil sofort eingewogen. Die Chargengröße betrug  $2,0 \text{ m}^3$ . Aufgrund der Tatsache, dass das Transportbetonwerk über keine Silo verfügte, in dem Kalksteinmehl bevorratet wurde, musste das Kalksteinmehl händisch über den Gesteinkörnungskübel in die Mischtrommel aufgegeben werden. Es wurden drei Chargen hergestellt und in einen Fahrmischer mit  $8 \text{ m}^3$  Füllvermögen eingefüllt. Die Mischzeit für eine Charge betrug ca. 10 Minuten. Die drei Teilchargen wurden im Fahrmischer homogenisiert. Die Frischbetontemperatur betrug ca.  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Zu festgelegten Zeiten wurde das Setzfließmaß, die Trichterausfließzeit und die Steighöhe im Box Test ermittelt. Die Bilder C41 bzw. C42, Anhang C, zeigen die Ergebnisse zu den Messzeitpunkten  $t = 5$  Minuten bzw. 60 Minuten. 65 Minuten nach Herstellung wurde der Beton eingebaut.

Die Bilder B71 bzw. B72, Anhang B, zeigen die zeitliche Entwicklung des Setzfließmaßes bzw. der Trichterauslaufzeit. Während der zeitliche Verlauf des Setzfließmaßes als weitgehend gleich bezeichnet werden kann, wurde ein deutlicher Unterschied im Verhalten der Trichterauslaufzeit beobachtet. Gegenüber dem Laborbeton wies der Praxisbeton SVB2-P-05 deutlich geringere Trichterauslaufzeiten auf, die über die zeitliche Entwicklung gleich um etwa 5 s niedriger lagen (siehe Bild B72, Anhang B). Diese Parallelverschiebung der Trichterauslaufzeit führt in der Darstellung der Trichterauslaufzeit in Abhängigkeit vom Setzfließmaß (siehe Bild B73, Anhang B) ebenfalls zu einer Parallelverschiebung.

Die Bilder C43 bis C47, Anhang C, zeigen das Einbringen des Betons. Der Beton konnte den vorhandenen Fließweg von 15 m zurücklegen. Die Höhendifferenz zwischen voller Füllhöhe des Betons an der Einfüllstelle und der Füllhöhe des Betons an der Stelle mit dem weitestem Fließweg betrug ca. 30 cm. Der Fahrmischer wurde an einer weiteren Einfüllstelle platziert, um die Wand vollständig mit Beton zu füllen.

Nach einer Nachbehandlungsdauer von sieben Tagen wurde die Wand ausgeschalt. Die Bilder C48 bis C52, Anhang C, zeigen die ausgeschaltete Wand und die Oberflächeneigenschaften des Betons. Beim Ausschalen wurde festgestellt, dass die Haftung zwischen Schaltafel und Beton deutlich ausgeprägter war, als bei den zuvor hergestellten Wänden in der Kombination Hochofenzement und Steinkohlenflugasche. Aufgrund der hohen Kräfte, die zum Ausschalen notwendig waren, sind z. T. die Kantenbereiche der Firmenlogos beschädigt worden. Ferner wurde beobachtet, dass die verspachtelten Bereiche der Schraubenköpfe mit denen die Firmenlogos an der Schalung befestigt wurden, in die Betonoberfläche eingebunden wurden (siehe Bilder C50 und C51, Anhang C). Insgesamt wurde eine verstärkte Porenbildung bei der Probewand 3 beobachtet (siehe Bild C49, Anhang C). Zum Teil waren die Poren durch dünne Leimschichten überdeckt und konnten leicht frei gelegt werden. Offensichtlich konnte die Luft, die sich in den schalungsnahen Bereichen ansammelte nicht ausreichend entlüften und führte zu den erläuterten z. T. direkt sichtbaren und z. T. leicht überdeckten Luftporenbildungen.

Zur Überprüfung der Homogenität des Betons wurden Bohrkerne aus der Wand entnommen. Die Bilder C53 und C58, Anhang C, zeigen die Entnahmestellen der Bohrkerne in der Wand



3. Um die Gesamtansicht der Wand mit den Firmenlogos nicht zu beeinträchtigen wurden die Bohrkerne der Rückseite der Wand entnommen. Die Bilder C59 und C60, Anhang C, zeigen die Bohrkernproben 5 bis 8. Es konnten keine Sedimentationserscheinungen festgestellt werden.

#### 5.8.6 Zusammenfassung - Praxisversuche

Um die Ergebnisse der Laborbetone zu überprüfen, wurden selbstverdichtende Betone in zwei Transportbetonwerken hergestellt und die Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht. Zunächst wurde anhand von Vormischungen die Übertragbarkeit der Laborbetone auf die Praxisbedingungen der Transportbetonwerke geprüft. Anschließend wurden in den Kombinationen Hochofenzement und Steinkohlenflugasche sowie Portlandzement und Kalksteinmehl Probewände betoniert. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Ergebnisse und Erkenntnisse, die in den Laboruntersuchungen erzielt wurden, wurden in vergleichbarer Form in den Praxisversuchen vorgefunden.
- Die genaue Kenntnis der Eigenfeuchte der Sandfraktionen spielt eine bedeutende Rolle bei der Herstellung selbstverdichtender Betone. Fehlbestimmungen können zu Abweichungen im Wassergehalt führen, die die Verarbeitbarkeit eines selbstverdichtenden Betons nicht mehr sicherstellen.
- Die Praxisversuche bestätigten, dass die durch die Temperatur beeinflussten unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten zwischen Zement, Zusatzstoff und Fließmittel zu unterschiedlichen Fließmitteldépôts führen, die eine längere bzw. kürzere Verarbeitbarkeit des Betons gewährleisten und damit maßgeblich den Verarbeitbarkeitszeitraum beeinflussen.
- Bezüglich der Dichtigkeit der Schalung wurden keine Probleme beobachtet.
- Die Wände wiesen für die verwendete Kombination von Hochofenzement und Flugasche sehr homogene porenfreie Oberflächen auf. Die applizierten Strukturelemente wurden vollständig in der Betonoberfläche abgebildet. Die Herstellung von filigranen Elementen erwies sich als gut ausführbar.
- Für die verwendete Kombination von Portlandzement und Kalksteinmehl erwies sich das Ausschalen aufgrund einer ausgeprägten Haftung zwischen Schaltafel und Beton deutlich schwieriger als bei der Kombination von Hochofenzement und Flugasche. Es wurde eine verstärkte Porenbildung beobachtet. Zum Teil waren die Poren durch dünne Leimschichten überdeckt und konnten leicht frei gelegt werden. Offensichtlich konnte die Luft, die sich in den schalungsnahen Bereichen ansammelte nicht ausreichend entlüften und führte zu den erläuterten z. T. direkt sichtbaren und z. T. leicht überdeckten Luftporenbildungen.
- Der Einfluss von alter und neuer Schalung stellte sich sehr deutlich dar. Während die Außenseite über eine sehr gleichmäßige Oberfläche verfügte, gab die mit den gebrauchten Schaltafeln hergestellte Innenseite den Zustand der Schaltafeloberfläche wider.

## 6 Beurteilung der Verarbeitbarkeit von SVB

### 6.1 Allgemeines

Feste Grenzwerte oder Verarbeitbarkeitsklassen sind weder zweckmäßig noch geeignet, selbstverdichtende Betone (SVB) zu erfassen. Bei der Rezeptentwicklung und in der Erstprüfung ermittelt der Betonhersteller in Frisch- und Festbetonprüfungen den optimalen Verarbeitbarkeitsbereich für seinen SVB. Der optimale Verarbeitbarkeitsbereich ist dadurch gekennzeichnet, dass der Beton ausreichend fließt, entlüftet und sedimentationsstabil ist. Um für alle Formen des selbstverdichtenden Betons einheitliche Regeln und Bewertungsmaßstäbe zu setzen, wird im Folgenden ein Verfahren zur Bestimmung des Verarbeitbarkeitsbereiches von SVB vorgeschlagen („SVB-Verarbeitungsfenster“).

### 6.2 Bestimmung des SVB-Verarbeitungsfensters

(1) Als Messverfahren zur Bestimmung des Fließverhaltens von SVB haben sich das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit bzw. die Fließzeit bewährt. Während das Setzfließmaß überwiegend von der Fließgrenze beeinflusst wird, hängt die Trichterauslaufzeit bzw. die Fließzeit hauptsächlich von der Viskosität ab. Zur Ermittlung des optimalen Verarbeitbarkeitsbereiches werden zu den Frischbetonprüfungen Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit bzw. Fließzeit Probekörper hergestellt, um das Gefüge des Betons im erhärteten Endzustand zu begutachten sowie der zugehörige Luftgehalt gemessen. Für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit des SVB wird in einem Diagramm die Trichterauslaufzeit  $T$  bzw. die Fließzeit in Abhängigkeit vom Setzfließmaß  $sm$  aufgetragen, siehe Bild 6.2.1. In diesem Diagramm kann für den SVB ein Bereich durch Festlegung von unteren und oberen Grenzwerten für Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit bzw. Fließzeit eingegrenzt werden („SVB-Verarbeitungsfenster“), in dem eine ausreichend fließfähige und entmischungarme Verarbeitbarkeit vorliegt, blockierungsfreies Fließen vorausgesetzt. Das blockierungsfreie Fließen wird separat mit U-Box, L-Box oder Blockierring ermittelt. Außerhalb des SVB-Verarbeitungsfensters liegen Betonzusammensetzungen, die zu Sedimentation neigen bzw. nicht ausreichend entlüften (Lufteinschluss) oder nicht ausreichend fließen (Stagnation).

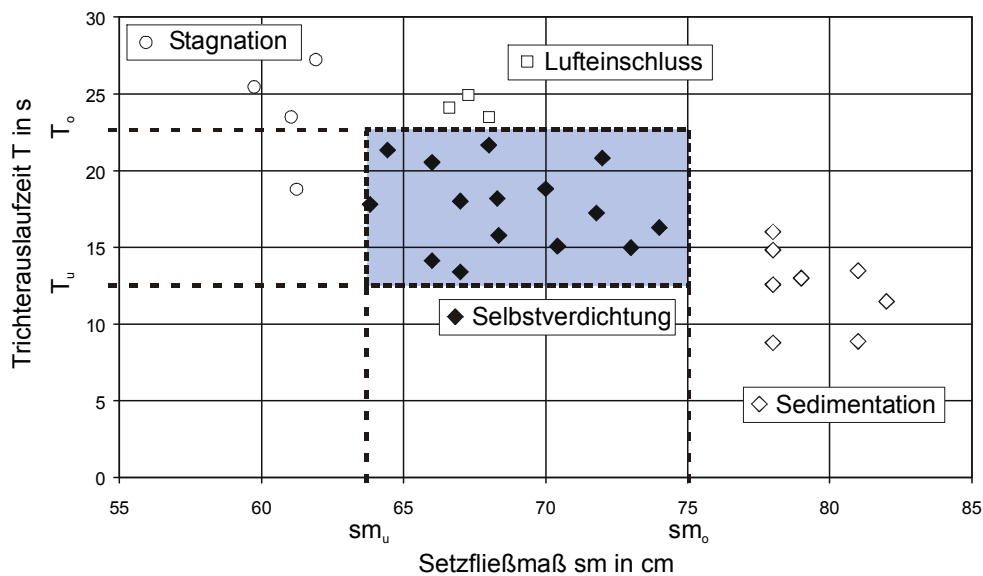


Bild 6.2.1: Verarbeitbarkeitsbereich für einen SVB

(2) Durch die festgelegten unteren und oberen Grenzwerte für Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit bzw. Fließzeit werden der Zielwert und die zulässigen Abweichungen vom Zielwert wie folgt bestimmt:

Zielwert des Setzfließmaßes  $sm$ :  $sm = (sm_u + sm_o) / 2$

zulässige Abweichung vom Zielwert:  $\Delta sm = \pm (sm_o - sm_u) / 2$

Zielwert der Trichterauslaufzeit  $T$ :  $T = (T_u + T_o) / 2$

zulässige Abweichung vom Zielwert:  $\Delta T = \pm (T_o - T_u) / 2$

Zielwert der Fließzeit  $t_{500}$ :  $t_{500} = (t_{500,u} + t_{500,o}) / 2$

zulässige Abweichung vom Zielwert:  $\Delta t_{500} = \pm (t_{500,o} - t_{500,u}) / 2$

(3) Da manche SVB unterschiedliches Verhalten in verschiedenen Temperaturbereichen zeigen, muss in der Erstprüfung der zum Einsatz kommende Temperaturbereich nachgewiesen werden. Ggf. müssen in Abhängigkeit von der Temperatur unterschiedliche SVB-Verarbeitungsfenster festgelegt werden.

(4) Der Hersteller gibt die Zielwerte und zulässigen Abweichungen für das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit bzw. die Fließzeit für Selbstverdichtung an.

(5) Die Grenzen des Fensters müssen in einer laufenden Produktion durch die Eigenüberwachung kontinuierlich überprüft werden, da sie sich durch Schwankungen der Ausgangsstoffe verändern können.

(6) Befindet sich mindestens ein Wert nicht im Fenster, wird der Beton verworfen oder es müssen geeignete Korrekturmaßnahmen (z.B. Fließmittelnachdosierung) eingeleitet werden, um den SVB wieder in den Verarbeitbarkeitsbereich zu bringen.

### 6.3 Umsetzung für die praktische Anwendung

Dieses, auf der Basis der vielen Untersuchungen entwickelte, verifizierte und validierte Verfahren, wurde als Anhang Q in der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Selbstverdichtender Beton“ aufgenommen:

Anhang Q (informativ): Verfahren zur Bestimmung des Verarbeitbarkeitsbereiches von SVB - „SVB-Verarbeitungsfenster“

## **7 Entwicklung eines praxistauglichen Prüfverfahrens für SVB**

### **7.1 Allgemeines**

Die in Abschnitt 6.2 beschriebene „Fensterlösung“ für SVB ermöglicht dem Hersteller von selbstverdichtendem Beton, die Verarbeitbarkeitseigenschaften seines SVB in Frisch- und Festbetonuntersuchungen zu ermitteln und in der Erstprüfung zu belegen. Der Hersteller sichert die Eigenschaft „Selbstverdichtung“ zu und gibt die Zielwerte und zulässigen Abweichungen für das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit an. Die Grenzen des Fensters müssen in der laufenden Produktion durch die Eigenüberwachung kontinuierlich überprüft werden, da sie sich durch Schwankungen der Ausgangsstoffe verändern können. Befindet sich mindestens ein Wert z. B. bei der Übergabe vor dem Einbau nicht im Fenster, wird der Beton verworfen oder es müssen geeignete Korrekturmaßnahmen (z. B. Fließmittelnachdosierung) eingeleitet werden, um den SVB wieder in den Verarbeitbarkeitsbereich, d. h. in die Grenzen des nachgewiesenen SVB-Fensters, zu bringen.

Um den Prüfaufwand bei der Übergabe von selbstverdichtendem Beton als Transportbeton auf der Baustelle zu verringern, darf gemäß der SVB-Richtlinie alternativ zur Trichterauslaufzeit die Fließzeit verwendet werden, wenn in der Erstprüfung ein eindeutiger Zusammenhang zur Trichterauslaufzeit nachgewiesen wird.

Ziel war es, auf der Basis der bereits etablierten und anerkannten Prüfverfahren ein einfaches, baustellentaugliches Prüfgerät zu entwickeln, mit dem gleichzeitig das Setzfließmaß und ein gut auflösender und messbarer Prüfwert für die Viskosität ermittelt werden kann.

### **7.2 Auslaufkegel**

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist auch die Möglichkeit untersucht worden, einen Setztrichter so zu modifizieren, dass damit auch reproduzierbar und ausreichend auflösend Auslaufzeiten gemessen werden können [42, 43]. Durch die Verlängerung des Setztrichters auf unterschiedliche Auslaufquerschnitte unter Beibehaltung der Kegelneigung und des zu prüfenden Betonvolumens ließen sich die Auslaufzeiten variieren. Dazu wurde ein handelsüblicher Setztrichter auf eine Halterung mit Stativ montiert, der durch einen Schieber in der Halterung an der Unterseite verschlossen werden konnte. An der Unterseite der Halterung ließen sich verschiedene Auslaufdüsen mit den Durchmessern 50, 60, 70 und 80 mm anbringen. Das Stativ war so eingestellt, dass sich der Setztrichter 300 mm über der Ausbreitplatte befand. Die Bilder C61 bis C63, Anhang C, zeigen den Setztrichter, die Setztrichterhalterung, vier verschiedene Auslaufquerschnitte und den Schieber. Der montierte Auslaufkegel mit dem geringsten Auslaufquerschnitt mit einem Durchmesser von 50 mm ist in Bild C62, Anhang C, dargestellt.

Die Herstellung des Auslaufkegels erfolgte nach Angaben des FIZ durch die Firma Testing – Bluhm & Feuerherdt, Berlin.

### **7.3 Frischbetonuntersuchungen**

#### **7.3.1 Zusammensetzung der Betone**

Zur Ermittlung der Auslaufzeiten mit dem Auslaufkegel wurden sechs unterschiedlich zusammengesetzte selbstverdichtende Betone hergestellt. Dabei handelte es sich jeweils um Betone des Mehlkorntyps. Als Zement wurde ein Portlandzement CEM I 32,5 R sowie ein

Hochofenzement CEM III/A 32,5 N und als Zusatzstoff Kalksteinmehl sowie Flugasche verwendet. Der Mehlkorngelbalt aus Zement und Zusatzstoff betrug  $550 \text{ kg/m}^3$ . Als Zugabewasser kam Leitungswasser der Stadt Düsseldorf zum Einsatz. Der Wassergehalt entsprach dem in Vorversuchen (siehe Abschnitt 5.5) ermittelten optimalen Wassergehalt. Die Gesteinskörnung bestand aus Rheinsand und Rheinkies mit einem Größtkorn von 16 mm. Sie war kernfeucht und oberflächentrocken. Das Leimvolumen und die Sieblinie der Gesteinskörnung waren so gewählt, dass in allen Fällen blockierungsfreies Fließen sichergestellt war. Durch die Kombination der Ausgangsstoffe und deren Proportionierung wurde nahezu der gesamte rheologische Bereich vom niedrigviskosen bis zum höherviskosen selbstverdichtendem Beton abgedeckt. Die Zusammensetzungen der Betone sind in Tabelle A13, Anhang A, aufgeführt.

### 7.3.2 Herstellung und Prüfungen

Die Betonausgangsstoffe wurden in der Reihenfolge Gesteinskörnung, Zement und Flugasche, Zugabewasser vorgemischt und nach Zugabe des Fließmittels in einem 250 l fassenden Laborzwangsmischer 3 Minuten lang gemischt.

Nach dem Mischen wurde das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit sowie einmal die Blockierneigung mit dem Box-Test des Betons ermittelt (Prüfverfahren siehe Anhang D). Danach wurde an einer einmal hergestellten Betonmischung mit dem Auslaufkegel und den verschiedenen Auslaufdüsen in der Reihenfolge 80, 70, 60 und 50 mm die Auslaufzeit und das resultierende Setzfließmaß gemessen. Um auszuschließen, dass die Auslaufzeiten während der Prüfserie durch ein Ansteifen des selbstverdichtenden Betons beeinflusst wurden, wurden abschließend noch einmal das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit bestimmt. Die Durchführung der Prüfungen eines einmal hergestellten Betons dauerte für eine Serie rund 25 min.

Erreichte dieser Beton die Grenze der Fließfähigkeit für Selbstverdichtung wurde Fließmittel in Höhe von 0,2 bis 0,4 M.-% v. z in den Mischer nachdosiert und 90 s gemischt. Danach wurde an dem so modifizierten Beton (z.B. AK-02 in den Bildern B74 und B75, Anhang B) erneut die Prüfserie im alten Rhythmus durchgeführt.

### 7.3.3 Ermittlung der Frischbetoneigenschaften mit dem Auslaufkegel

#### 7.3.3.1 Allgemeines

Im Folgenden wird stellvertretend an den selbstverdichtenden Betonen AK-02 in der Kombination Portlandzement und Kalksteinmehl und AK-05 in der Kombination Portlandzement und Flugasche die Ermittlung der Frischbetoneigenschaften mit dem Auslaufkegel dargestellt.

#### 7.3.3.2 Ermittlung der Frischbetoneigenschaften von SVB „AK-02“

Die Bilder B74 und B75, Anhang B, zeigen die Frischbetoneigenschaften von AK-02 in drei hintereinander folgenden Prüfserien. In Bild B74, Anhang B, ist die jeweilige Auslaufzeit über dem verwendeten Auslauftrichter bzw. Auslaufkegel aufgetragen. Dabei ist T die Trichterauslaufzeit, während die Zahlen 100 bis 50 dem Auslaufdurchmesser des Auslaufkegels in Millimetern entsprechen. In Bild B75, Anhang B, sind die zugehörigen Setzfließmaße über den

entsprechenden Auslaufdurchmesser dargestellt. Bild C65, Anhang C, zeigt die Ermittlung der Auslaufzeit und des Setzfließmaßes mit dem Auslaufkegel und dem 60-mm- und 80-mm-Durchmesser.

Die Serie AK-02-1 wurde unmittelbar nach dem Mischungsende durchgeführt. Der Vergleich der Setzfließmaße und Trichterauslaufzeiten zu Beginn der Serie mit den Werten am Ende nach rund einer halben Stunde ergibt einen Anstieg der Trichterauslaufzeit von  $T_a = 10$  s auf  $T_e = 16$  s (s. Bild B74, Anhang B) sowie einen Abfall des Setzfließmaßes von  $sm_a = 720$  mm auf  $sm_e = 600$  mm (s. Bild B75, Anhang B). Diese Veränderungen der rheologischen Eigenschaften sind auf ein Ansteifen des Betons während der Prüfungen zurückzuführen, so dass die Werte dieser Serie nicht hinreichend geeignet sind, den Einfluss des Auslaufquerschnitts auf die Auslaufzeit und das Setzfließmaß zu bewerten.

Eine Fließmittelnachdosierung nach Abschluss der Serie AK-02-1 zum Zeitpunkt 30 Minuten nach Mischungsende in Höhe von 0,2 M.-% v. z führte zur Serie AK-02-2. Sie brachte den Beton in die anfängliche Fließfähigkeit sowohl im Hinblick auf das Setzfließmaß als auch auf die Trichterauslaufzeit zurück und sorgte für gleichbleibende rheologische Eigenschaften. Dies kann wiederum durch den Vergleich der Werte für die Trichterauslaufzeit und das Setzfließmaß am Anfang und am Ende dieser Serie gesehen werden ( $T_a = 9$  s,  $T_e = 10$  s;  $sm_a = 720$  mm,  $sm_e = 710$  mm). Die Auslaufzeit veränderte sich in Abhängigkeit des Auslaufquerschnitts des jeweiligen Kegels, während das Setzfließmaß kaum beeinflusst wurde. Nach Abschluss der Serie AK-02-2 wurden die Prüfungen nach einer Pause von weiteren 15 Minuten (75 min nach Herstellungsende) am gleichen Beton in der Serie AK-02-3 wiederholt. Wiederum veränderten sich die rheologischen Eigenschaften des Betons während des Prüfzeitraums kaum ( $T_a = 13$  s,  $T_e = 15$  s;  $sm_a = 650$  mm,  $sm_e = 640$  mm). Ebenfalls hatte der verwendete Auslaufquerschnitt des jeweiligen Kegels kaum einen Einfluss auf das sich ergebende Setzfließmaß.

Die Serien AK-02-2 und AK-02-3 sind geeignet, um Aussagen zum Ausfließverhalten des Betons in Abhängigkeit unterschiedlicher Ausfließquerschnitte zu treffen, da der Einfluss des Verarbeitbarkeitsabfalls nahezu unterdrückt werden konnte.

#### 7.3.3.3 Ermittlung der Frischbetoneigenschaften von SVB „AK-05“

Die Bilder B76 und B77, Anhang B, zeigen die Frischbetoneigenschaften von AK-05 für die drei nacheinander durchgeführten Prüfserien. In Bild B76, Anhang B, ist die jeweilige Auslaufzeit über dem verwendeten Auslauftrichter bzw. Auslaufkegel aufgetragen. In Bild B77, Anhang B, sind die zugehörigen Setzfließmaße über den entsprechenden Auslaufdurchmesser dargestellt.

Die Serie AK-05-1 wurde unmittelbar nach dem Mischungsende durchgeführt. Der Vergleich der Trichterauslaufzeiten und Setzfließmaße zu Beginn und nach etwa 25 Minuten am Ende der Serie ergibt einen überproportionalen Anstieg der Trichterauslaufzeit ( $T_a = 12$  s,  $T_e = 19$  s, s. Bild B76, Anhang B) sowie einen starken Abfall des Setzfließmaßes ( $sm_a = 710$  mm,  $sm_e = 500$  mm, s. Bild B77, Anhang B). Die Veränderungen der rheologischen Eigenschaften sind, wie bereits bei Mischung AK-02-1 beobachtet, auf eine Reagglomeration der Feinstoffe im Beton zurückzuführen, so dass die Werte dieser Serie ebenfalls nicht geeignet sind, um den Einfluss des Auslaufquerschnitts auf die Auslaufzeit und das Setzfließmaß zu bewerten.

Eine Fließmittelnachdosierung in Höhe von 0,4 M.-% v. z 30 Minuten nach Mischungsende führte zur Serie AK-05-2. Sie erhöhte die Fließfähigkeit sowohl im Hinblick auf das Setz-

fließmaß als auch auf die Trichterauslaufzeit und sorgte für gleichbleibende rheologische Eigenschaften. Dies wird wiederum durch den Vergleich der Werte für die Trichterauslaufzeit und das Setzfließmaß am Anfang und am Ende der Serie bestätigt ( $T_a = 9$  s,  $T_e = 13$  s;  $sm_a = 770$  mm,  $sm_e = 780$  mm). Die Auslaufzeit veränderte sich in Abhängigkeit des Auslaufquerschnitts des jeweiligen Kegels, während das Setzfließmaß kaum beeinflusst wurde. Nach Abschluss der Serie AK-05-2 wurden die Prüfungen nach einer Pause von weiteren 30 Minuten (90 min nach Herstellungsende) in der Serie AK-05-3 wiederholt. Auch hier veränderten sich die rheologischen Eigenschaften des Betons während des Prüfzeitraumes kaum ( $T_a = 12$  s,  $T_e = 16$  s;  $sm_a = 620$  mm,  $sm_e = 590$  mm). Der verwendete Auslaufquerschnitt des jeweiligen Kegels hatte wie bei AK-05-2 wiederum kaum einen Einfluss auf das resultierende Setzfließmaß.

Die Serien AK-05-2 und AK-05-3 waren somit ebenfalls geeignet, um Aussagen zum Ausfließverhalten des Betons in Abhängigkeit unterschiedlicher Ausfließquerschnitte zu treffen, da der Einfluss des Verarbeitbarkeitsabfalls nahezu unterdrückt werden konnte.

#### 7.4 Gegenüberstellung Auslauftrichter und Auslaufkegel

Die Ergebnisse der Frischbetonuntersuchungen an den sechs Betonen AK-01 bis –06, siehe Tabelle A13, Anhang A, sind in Bild B78, Anhang B, zusammengefasst. Für die Auswertung wurden die Serien verwendet, in denen kein relevanter Verarbeitbarkeitsabfall auftrat. Die Veränderungen der Auslaufzeiten der verschiedenen Auslaufkegel im Vergleich zur Auslaufzeit des Trichters sind daher allein auf die unterschiedlichen Querschnitte zurückzuführen.

Bild B78, Anhang B, zeigt die Auslaufzeiten der Kegel mit den Auslaufdurchmessern 80, 70 und 60 mm über der Trichterauslaufzeit für die untersuchten Betone. Es ergab sich in allen Fällen eine lineare Abhängigkeit zwischen der jeweiligen Kegelauslaufzeit und der Trichterauslaufzeit mit einem Bestimmtheitsmaß von über 90 %. Während sich die Ausfließzeiten der Auslaufkegel mit einem Durchmesser von 80 und 70 mm unterproportional zur Trichterauslaufzeit verhielten, wies der Auslaufkegel mit dem Durchmesser von 60 mm ein leicht überproportionales Auslaufverhalten auf. Der Auslaufkegel mit dem 50-mm-Durchmesser besaß zwar eine lineare Abhängigkeit mit den Trichterauslaufzeiten für die untersuchten Betone. Er führte aber zu sehr hohen Auslaufzeiten, die baupraktisch als ungünstig angesehen werden können. Daher wurde der 50-mm-Auslaufquerschnitt aus der weiteren Betrachtung ausgenommen. Zusätzlich ist zu beachten, dass bereits bei dem 50-mm-Durchmesser die Sieblinie und die Blockierneigung des SVB einen Einfluss auf die Kegelauslaufzeit ausüben können.

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse wurde ein Kegel-Auslaufquerschnitt mit einem Durchmesser von 63,5 mm berechnet, der zu einer nahezu direkten Korrelation mit der Trichterauslaufzeit führte [42, 43].

Für die Untersuchungen wurde der Prototyp des Auslaufkegels mit einem Trennschieber versehen, um mit einem Kegel bei konstantem Betonvolumen die verschiedenen Auslaufquerschnitte zu untersuchen. Baupraktisch erweist sich ein Trennschieber jedoch als nachteilhaft, so dass der endgültige Auslaufkegel mit einer leicht zu handhabenden und reinigenden Klappe am Kegelauslauf versehen wurde.

## 7.5 Erprobung des Auslaufkegels in der Praxis

Nachdem in den Laborversuchen gezeigt werden konnte, dass der Auslaufkegel ein geeignetes Prüfverfahren darstellt, mit dem Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit - zur Beschreibung der geforderten Frischbetoneigenschaften eines SVB – Fließgrenze und Viskosität - in einem einzigen Versuch zuverlässig ermittelt werden können, wurde das Prüfequipment auf seine Baustellentauglichkeit in der Praxis geprüft. Hierzu wurde im Vorfeld ein Messprotokoll für selbstverdichtenden Beton und F6 Beton (Praxistest-Auslaufkegel) in Zusammenarbeit mit der Betreuungsgruppe entwickelt (siehe Bild C68, Anhang C). Ferner wurden fünf weitere Auslaufkegel hergestellt, die in den Mitgliedsfirmen des Bundesverband der Transportbetonindustrie zum Einsatz kamen. Messergebnisse, die mit dem Auslaufkegel erzielt wurden, sollten unter Verwendung des entwickelten Messprotokolls dem FIZ zur Auswertung zur Verfügung gestellt werden. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung lagen seitens der Mitgliedsfirmen des Bundesverband der Transportbetonindustrie keine weiteren Ergebnisse zum Auslaufkegel vor, so dass ausschließlich auf die vom FIZ erzeugten Ergebnisse in die Auswertung mit aufgenommen wurden.

Folgende Baustellen bzw. Transportbetonwerke wurden im Rahmen der Sammlung von Praxiserkenntnissen beprobt:

- A Dortmund, Transportbetonwerk und Baustelle
- im Transportbetonwerk wurden 2 Mischungen jeweils 5, 30 und 60 min nach Mischungsende beprobt
  - an der 3. Mischung erfolgte die Beprobung nach Mischungsende im Transportbetonwerk, nach dem Transport zur Baustelle bei der Übergabe sowie abschließend am Schlauchende der Betonpumpleitung
  - Betonzusammensetzung:  
CEM III/A 42,5 N, Zementgehalt  $z = 300 \text{ kg/m}^3$   
Steinkohlenflugasche, Zusatzstoffgehalt  $f = 240 \text{ kg/m}^3$   
Wassergehalt  $w = 170 \text{ kg/m}^3$   
Gesteinskörnung Kalksteinsplitt  
Betonzusatzmittel Fließmittel auf PCE Basis  
insgesamt liegen 9 Messungen vor
- B Köln, Baustelle
- Herstellung erfolgte im Transportbetonwerk, Fahrzeit ca. 50 Minuten, Beton wurde bei Ankunft an der Baustelle und nach 30 Minuten beprobt
  - Betonzusammensetzung:  
CEM I 32,5 R, Zementgehalt  $z = 350 \text{ kg/m}^3$   
Kalksteinmehl, Zusatzstoffgehalt  $f = 250 \text{ kg/m}^3$   
Wassergehalt  $w = 175 \text{ kg/m}^3$   
Gesteinskörnung Rheinsand/-kies  
Betonzusatzmittel Fließmittel auf PCE Basis  
insgesamt liegen 2 Messungen vor
- C Düsseldorf, Baustelle
- Herstellung erfolgte im Transportbetonwerk, Fahrzeit ca. 20 Minuten, Beton wurde bei Ankunft an der Baustelle und nach 60 und 90 Minuten beprobt
  - Betonzusammensetzung:  
CEM I 42,5 R, Zementgehalt  $z = 300 \text{ kg/m}^3$   
Steinkohlenflugasche, Zusatzstoffgehalt  $f = 250 \text{ kg/m}^3$   
Wassergehalt  $w = 175 \text{ kg/m}^3$   
Gesteinskörnung Rheinsand/-kies



Betonzusatzmittel Fließmittel auf PCE Basis  
insgesamt liegen 3 Messungen vor

- D Dortmund, Transportbetonwerk (siehe A)  
- im Transportbetonwerk wurden 5 Fahrnischer jeweils 5, 30 und 60 min nach Mischungsende beprobt  
insgesamt liegen 15 Messungen vor
- E Karlsruhe, Baustelle  
- Herstellung erfolgte im Transportbetonwerk, Fahrzeit ca. 20 bis 30 Minuten  
Betone wurden jeweils bei Ankunft auf der Baustelle und nach 60 Minuten beprobt,  
insgesamt wurden sechs Fahrnischer beprobt  
- Betonzusammensetzung:  
CEM I 42,5 R, Zementgehalt  $z = 350 \text{ kg/m}^3$   
Steinkohlenflugasche, Zusatzstoffgehalt  $f = 200 \text{ kg/m}^3$   
Wassergehalt  $w = 193 \text{ kg/m}^3$   
Gesteinskörnung Moräne/Oberrhein  
Betonzusatzmittel Fließmittel auf PCE Basis  
insgesamt liegen 12 Messungen vor
- F Betonfertigteilwerk  
- Betonzusammensetzung:  
CEM I 52,5, Zementgehalt ca.  $z \approx 380 \text{ bis } 400 \text{ kg/m}^3$   
Steinkohlenflugasche, Zusatzstoffgehalt (nicht angegeben)  
Wassergehalt  $w = 170 \text{ kg/m}^3$   
Betonzusatzmittel Fließmittel auf PCE Basis  
insgesamt liegen 6 Messungen vor
- G Malmö, Baustelle  
- Baustelle Citytunnel der Bilfinger Berger AG, Ortbetonherstellung in Feldfabrik  
Betonrezeptur war noch in der Entwicklungsphase  
die Messungen wurden von den Mitarbeitern der Fa. Bilfinger Berger AG durchgeführt  
(siehe Bilder C66 und C67, Anhang C)  
- Betonzusammensetzung:  
CEM I 42, Zementgehalt ca.  $z \approx 410 \text{ kg/m}^3$   
Kalksteinmehl, Zusatzstoffgehalt ca.  $k \approx 150 \text{ kg/m}^3$   
Mikrosilika, Zusatzstoffgehalt ca.  $s \approx 23 \text{ kg/m}^3$   
Wassergehalt  $w \approx 150 \text{ kg/m}^3$   
Polypropylenfasern  
Betonzusatzmittel Fließmittel auf PCE Basis und LP-Bildner  
insgesamt liegen 13 Messungen vor

Die vorliegenden Messergebnisse wurden in Bild B79, Anhang B, zusammengestellt. Für alle untersuchten Betone der Baustellen bzw. Transportbetonwerke ergab sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Trichterauslaufzeit und der Kegelauslaufzeit. Insofern bestätigen sich die in den Laboruntersuchungen vorgefundenen Zusammenhänge auch unter Praxisbedingungen. Der in den Laboruntersuchungen für einen Auslaufdurchmesser von 63,5 mm ermittelten Zusammenhang von 1:1 für die Trichter- und Kegelauslaufzeit wurde in der Praxis nicht vorgefunden. Es zeigte sich, dass die Betone der Praxis im Vergleich zu den Laborbetonen geringere Auslaufzeiten aufwiesen.

Die Handhabung des Auslaufkegels mit Klappverschluss (siehe Bild C67, Anhang C) unter den Bedingungen der Baustelle haben sich, insbesondere im direkten Vergleich zum Auslauftrichter, als sehr vorteilhaft herausgestellt. Die relevanten Frischbetonkenngrößen für selbstverdichtenden Beton können mit nur einem Prüfverfahren bestimmt werden. Dabei wird der Zeitaufwand sowohl für die Durchführung der Messungen als auch für den Reinigungsaufwand deutlich reduziert.

Im Rahmen der Erprobung des Auslaufkegels in der Praxis konnten bei den Baustellenbe- probungen (A, B, C, E) das Einbringen des Betons in die Schalung begutachtet werden. Die Betone wurden im Transportbetonwerk hergestellt und mit Fahrmischern zur Baustelle gelie- fert. Es kamen bei den unterschiedlichen Baustellen weitgehend alle üblichen Einbauverfah- ren (Kran/Kübelverfahren, Betonpumpe, etc.) zum Einsatz. Der Einbau der Betone erfolgte planmäßig ohne den Einsatz von Verdichtungsenergie. Die Betone verfügten sowohl über selbstverdichtende als auch weitgehend selbstnivellierende Eigenschaften. Im Bereich der Schalungsöffnungen musste, um einen gleichmäßigen Betonfüllgrad zu erzielen, z. T. die Anzahl der Einfüllstellen erhöht werden (d. h. geringere Abstände der Einfüllstellen). Bei den begleiteten Baustellen konnten keine signifikanten Probleme beim Betoneinbau festgestellt werden.

## **7.6 Zusammenfassung – Praxistaugliches Prüfverfahren**

Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit selbstverdichtender Betone wird in der Erstprüfung, während der werkseigenen Produktionskontrolle des Herstellers und bei der Übergabe des Betons auf der Baustelle die Ermittlung des Setzfließmaßes und der Trichterauslaufzeit ge- fordert. Dabei bereitet die Ermittlung der Trichterauslaufzeit bei der Übergabe von SVB als Transportbeton unter Baustellenbedingungen häufig Probleme. Um den Prüfaufwand bei der Übergabe von selbstverdichtendem Beton als Transportbeton zu vereinfachen, wurde mit dem „Auslaufkegel“ ein baustellentaugliches Prüfgerät entwickelt, mit dem die beiden maß- geblichen Prüfwerte – Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit - zur Beschreibung der geforder- ten Frischbetoneigenschaften eines SVB – Fließgrenze und Viskosität - in einem einzigen Versuch zuverlässig ermittelt werden können.

- Bei dem Auslaufkegel wurde ein handelsüblicher Setztrichter auf eine entsprechende Stativhalterung montiert und an der Unterseite über einen Schieber verschlossen.
- Die an der Unterseite der Halterung angebrachte Auslaufdüse mit einem Auslaufdurch- messer von 63,5 mm führte sowohl bei niedrigviskosen als auch bei höherviskosen selbstverdichtenden Laborbetonen zu gleichen Auslaufzeiten, wie sie mit dem bisheri- gen Auslauftrichter erzielt werden.
- Die Untersuchungen zur Erprobung des Auslaufkegels in der Praxis haben gezeigt, dass die Betone der Praxis im Vergleich zu den Laborbetonen geringere Auslaufzeiten, sowohl mit dem Auslauftrichter als auch dem Auslaufkegel, aufwiesen.
- Das gleichzeitig gemessene Setzfließmaß wird im Vergleich zum herkömmlichen Setz- trichter durch die verjüngte Form nicht beeinflusst.
- Die Handhabung des Auslaufkegels mit Klappverschluss unter den Bedingungen der Baustelle haben sich, insbesondere im direkten Vergleich zum Auslauftrichter, als sehr vorteilhaft herausgestellt.
- Die relevanten Frischbetonkenngrößen für selbstverdichtenden Beton können mit nur einem Prüfverfahren bestimmt werden. Dabei wird der Zeitaufwand sowohl für die Durchführung der Messungen als auch für den Reinigungsaufwand deutlich reduziert.

Der Auslaufkegel stellt somit eine Alternative zur Ermittlung der Viskosität selbstverdichtender Betone dar, die besonders bei der Annahmeprüfung auf der Baustelle vorteilhaft eingesetzt werden kann.

## 8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ziel dieser Arbeit war es, die Einflüsse auf den selbstverdichtenden Beton systematisch zu analysieren und zu charakterisieren, um die Herstellung und den Einsatz von SVB als Transportbeton unter Verwendung der typischen vorhandenen Anlagen und Rohstoffe zielsicher zu ermöglichen. So sollte ein wesentlicher Beitrag geleistet werden, um den SVB als Transportbeton gemäß DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-2 genau so sicher wie Rüttelbeton einsetzen zu können.

In diesem Forschungsvorhaben wurden die Einflüsse des Wasser- und Fließmittelgehalts auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften von selbstverdichtenden Transportbetonen in unterschiedlichen Zusammensetzungen untersucht. Hierzu wurden selbstverdichtende Betone mit den Ausgangsstoffen Portlandzement, Hochofenzement, Kalksteinmehl sowie Steinkohlenflugasche aus Transportbetonwerken entwickelt.

Die im Forschungsvorhaben eingesetzten Ausgangsstoffe wurden sowohl auf die im Transportbetonwerk 1 als auch auf die im Transportbetonwerk 2 vorhandenen Ausgangsstoffe abgestimmt.

Als Variation der Zusammensetzung wurde die Zugabewassermenge um etwa  $7 \text{ l/m}^3$  gegenüber den in Voruntersuchungen festgelegten Betonrezepturen variiert. Als Maßnahme zur Korrektur nicht mehr ausreichend verarbeitbarer Betone wurde eine Fließmittelnachdosierung von bis zu 0,2 M.-% v. z. untersucht. Alle untersuchten Betone besaßen anforderungsgemäße Festbetoneigenschaften.

Die Veränderungen der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone wurden in Abhängigkeit vom Setzfließmaß und von der relativen Trichtergeschwindigkeit dargestellt. In einer solchen Darstellung kann ein Bereich abgegrenzt werden, innerhalb dessen erfahrungsgemäß ausreichend gute Verarbeitbarkeitseigenschaften, d. h. eine ausreichende Fließfähigkeit, Entlüftung und Mischungsstabilität, selbstverdichtender Betone gegeben sind. Korrekturmaßnahmen für das Fließverhalten lassen sich hier gezielt einleiten und beurteilen.

Die erzielten Ergebnisse, die im Rahmen der Frischbetonuntersuchungen an Laborbetonen erzielt wurden, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Sollzusammensetzung selbstverdichtender Betone muss durch Erstprüfungen auf der Basis der zum Einsatz kommenden mehlfinen Stoffe und Gesteinskörnungen ermittelt werden.
- Es konnten für alle Betone der Serie 1 und 2 für die Kombinationen Hochofenzement und Flugasche bzw. Portlandzement und Kalksteinmehl jeweils für Innen- und Außenbauteilanforderungen Verarbeitungsbereiche anhand der Unter- und Obergrenzen für Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit (bzw. rel. Trichtergeschwindigkeit) festgelegt werden.
- Im Hinblick auf die Ist-Zusammensetzung sind besonders die Auswirkungen von Schwankungen im Gesamtwassergehalt auf das Setzfließmaß zu berücksichtigen. Durch Erstversuche sind die vertretbaren Schwankungsbreiten zu ermitteln.
- Abweichungen im Zugabewassergehalt von rd.  $7 \text{ l/m}^3$  veränderten in diesen Versuchen bereits die Fließfähigkeit und die Mischungsstabilität merklich. Dabei ist in der Regel ein Beton mit einem geringeren Wassergehalt besser zu korrigieren als ein Beton mit zu hohem Wassergehalt.

- Etwas erhöhte Setzfließmaße bzw. relative Trichtergeschwindigkeiten nach dem Mischen verringern sich bei den hier untersuchten Betonen infolge des Ansteifens bereits innerhalb kurzer Zeiten.
- Bei nicht mehr ausreichenden Setzfließmaßen und Trichtergeschwindigkeiten konnten durch eine Nachdosierung des Fließmittels ausreichende Verarbeitungseigenschaften selbst nach längeren Transport- bzw. Lagerzeiten wieder eingestellt werden.
- Die Betonversuche bestätigten, dass die durch die Temperatur beeinflussten unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten zwischen Zement, Zusatzstoff und Fließmittel zu unterschiedlichen Fließmitteldépôts führen, die eine längere bzw. kürzere Verarbeitbarkeit des Betons gewährleisten und damit maßgeblich den Verarbeitbarkeitszeitraum beeinflussen.
- Um während eines ausreichenden Zeitraums optimale selbstverdichtende Eigenschaften aufrechtzuerhalten, sind die Einflüsse der Wechselwirkungen zwischen Mehlkorn und Fließmittel auf das Fließmaß durch entsprechende Vorversuche an Standardbeton zu überprüfen.

Die Ergebnisse zeigen auf der einen Seite, dass durch gezielte Wasser- und Fließmittelgehalte die Verarbeitbarkeitseigenschaften zeitlich sehr genau gesteuert werden können. Auf der anderen Seite untermauern die Ergebnisse, dass Schwankungen der Wasser- und Fließmittelgehalte sehr genau beherrscht und beobachtet werden müssen. Die Untersuchungsergebnisse unterstreichen die Bedeutung von sorgfältig geplanten Vorversuchen sowie Erst- und Kontrollprüfungen bei Herstellung und Verarbeitung von SVB als Transportbeton.

Um die Ergebnisse der Laborbetone zu überprüfen, wurden selbstverdichtende Betone in zwei Transportbetonwerken hergestellt und die Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht. Zunächst wurde anhand von Vormischungen die Übertragbarkeit der Laborbetone auf die Praxisbedingungen der Transportbetonwerke geprüft. Anschließend wurden in den Kombinationen Hochofenzement und Steinkohlenflugasche sowie Portlandzement und Kalksteinmehl Probewände betoniert. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Ergebnisse und Erkenntnisse, die in den Laboruntersuchungen erzielt wurden, wurden in vergleichbarer Form in den Praxisversuchen vorgefunden.
- Die genaue Kenntnis der Eigenfeuchte der Sandfraktionen spielt eine bedeutende Rolle bei der Herstellung selbstverdichtender Betone. Fehlbestimmungen können zu Abweichungen im Wassergehalt führen, die die Verarbeitbarkeit eines selbstverdichtenden Betons nicht mehr sicherstellen.
- Die Praxisversuche bestätigten, dass die durch die Temperatur beeinflussten unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten zwischen Zement, Zusatzstoff und Fließmittel zu unterschiedlichen Fließmitteldépôts führen, die eine längere bzw. kürzere Verarbeitbarkeit des Betons gewährleisten und damit maßgeblich den Verarbeitbarkeitszeitraum beeinflussen.
- Bezüglich der Dichtigkeit der Schalung wurden keine Probleme beobachtet.
- Die Wände wiesen für die verwendete Kombination von Hochofenzement und Flugasche sehr homogene porenfreie Oberflächen auf. Die applizierten Strukturelemente wurden vollständig in der Betonoberfläche abgebildet. Die Herstellung von filigranen Elementen erwies sich als gut ausführbar.

- Für die verwendete Kombination von Portlandzement und Kalksteinmehl erwies sich das Ausschalen aufgrund einer ausgeprägten Haftung zwischen Schaltafel und Beton deutlich schwieriger als bei der Kombination von Hochofenzement und Flugasche. Es wurde eine verstärkte Porenbildung beobachtet. Zum Teil waren die Poren durch dünne Leimschichten überdeckt und konnten leicht frei gelegt werden. Offensichtlich konnte die Luft, die sich in den schalungsnahen Bereichen ansammelte nicht ausreichend entlüften und führte zu den erläuterten z. T. direkt sichtbaren und z. T. leicht überdeckten Luftporenbildungen.
- Der Einfluss von alter und neuer Schalung stellte sich sehr deutlich dar. Während die Außenseite über eine sehr gleichmäßige Oberfläche verfügte, gab die mit den gebrauchten Schaltafeln hergestellte Innenseite den Zustand der Schaltafeloberfläche wider.

Aus den zuvor erzielten Ergebnissen wurde ein Beurteilungskonzept für die Verarbeitbarkeit von SVB entwickelt. Feste Grenzwerte oder Verarbeitbarkeitsklassen sind hier weder zweckmäßig noch geeignet, selbstverdichtende Betone (SVB) zu erfassen. Bei der Rezeptentwicklung und in der Erstprüfung ermittelt der Betonhersteller in Frisch- und Festbetonprüfungen den optimalen Verarbeitbarkeitsbereich für seinen SVB. Der optimale Verarbeitbarkeitsbereich ist dadurch gekennzeichnet, dass der Beton ausreichend fließt, entlüftet und sedimentationsstabil ist. Um für alle Formen des selbstverdichtenden Betons einheitliche Regeln und Bewertungsmaßstäbe zu setzen, wurde ein Verfahren zur Bestimmung des Verarbeitbarkeitsbereiches von SVB vorgeschlagen („SVB-Verarbeitungsfenster“). Dieses, auf der Basis der vielen Untersuchungen entwickelte, verifizierte und validierte Verfahren, wurde als Anhang Q in der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Selbstverdichtender Beton“ aufgenommen:

Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit selbstverdichtender Betone wird in der Erstprüfung, während der werkseigenen Produktionskontrolle des Herstellers und bei der Übergabe des Betons auf der Baustelle die Ermittlung des Setzfließmaßes und der Trichterauslaufzeit gefordert. Dabei bereitet die Ermittlung der Trichterauslaufzeit bei der Übergabe von SVB als Transportbeton unter Baustellenbedingungen häufig Probleme. Um den Prüfaufwand bei der Übergabe von selbstverdichtendem Beton als Transportbeton zu vereinfachen, wurde mit dem „Auslaufkegel“ ein baustellentaugliches Prüfgerät entwickelt, mit dem die beiden maßgeblichen Prüfwerte – Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit - zur Beschreibung der geforderten Frischbetoneigenschaften eines SVB – Fließgrenze und Viskosität - in einem einzigen Versuch zuverlässig ermittelt werden können.

- Bei dem Auslaufkegel wurde ein handelsüblicher Setztrichter auf eine entsprechende Stativhalterung montiert und an der Unterseite über einen Schieber verschlossen.
- Die an der Unterseite der Halterung angebrachte Auslaufdüse mit einem Auslaufdurchmesser von 63,5 mm führte sowohl bei niedrigviskosen als auch bei höherviskosen selbstverdichtenden Laborbetonen zu gleichen Auslaufzeiten, wie sie mit dem bisherigen Auslauftrichter erzielt werden.
- Die Untersuchungen zur Erprobung des Auslaufkegels in der Praxis haben gezeigt, dass die Betone der Praxis im Vergleich zu den Laborbetonen geringere Auslaufzeiten, sowohl mit dem Auslauftrichter als auch dem Auslaufkegel, aufwiesen.
- Das gleichzeitig gemessene Setzfließmaß wird im Vergleich zum herkömmlichen Setztrichter durch die verjüngte Form nicht beeinflusst.

- Die Handhabung des Auslaufkegels mit Klappverschluss unter den Bedingungen der Baustelle haben sich, insbesondere im direkten Vergleich zum Auslaufrichter, als sehr vorteilhaft herausgestellt.
- Die relevanten Frischbetonkenngrößen für selbstverdichtenden Beton können mit nur einem Prüfverfahren bestimmt werden. Dabei wird der Zeitaufwand sowohl für die Durchführung der Messungen als auch für den Reinigungsaufwand deutlich reduziert.

Der Auslaufkegel stellt somit eine Alternative zur Ermittlung der Viskosität selbstverdichtender Betone dar, die besonders bei der Annahmeproofung auf der Baustelle vorteilhaft eingesetzt werden kann.

Die Ziele dieses Forschungsvorhabens wurden erreicht.

## **9 Bibliographische**

### **9.1 Mitgliedsvereinigung**

Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. (FTB)

Nimmendohrstraße 124

D-47475 Kamp-Lintfort

Tel.: 02842 / 90-4069

Fax: 02842 / 90-9841

Email: [olaf.assbrock@baustoffverbaende.de](mailto:olaf.assbrock@baustoffverbaende.de)

Geschäftsführer der Forschungsgemeinschaft: Dr.-Ing. Olaf Aßbrock

### **9.2 Forschungsstelle**

Forschungsinstitut der Zementindustrie

Tannenstraße 2-4

D-40476 Düsseldorf

Postfach 301063

D-40410 Düsseldorf

Tel.: 0211 / 45 78-1

Fax: 0211 / 45 78-296

Mail: [info@vdz-online.de](mailto:info@vdz-online.de)

Leiter der Forschungsstelle: Dr. rer. nat. Martin Schneider

Projektleiter: Dr.-Ing. Eberhard Siebel  
Tel.: 0211 / 45 78-222  
Fax: 0211 / 45 78-219  
Email: [sb@vdz-online.de](mailto:sb@vdz-online.de)

Sachbearbeiter: Dr.-Ing. Wolfgang Breit  
Tel.: 0211 / 45 78-367  
Fax: 0211 / 45 78-219  
Email: [bre@vdz-online.de](mailto:bre@vdz-online.de)

## **10 Administrative Angaben**

AiF-Nr.: 13925 N  
Bewilligte Mittel: 165.400,00 €  
Bewilligungszeitraum: 01.10.2003 bis 30.09.2005  
Berichtszeitraum: 01.10.2003 bis 30.09.2005

Berichte: 1. Zwischenbericht vom 16. März 2004  
2. Zwischenbericht vom 21. März 2005  
Abschlussbericht vom 22. Dezember 2005

Sitzungen der Betreuungsgruppe: 1. Sitzung am 30. Juli 2005  
2. Sitzung am 17. November 2005  
3. Sitzung am 17. Februar 2004  
4. Sitzung am 20. September 2004  
5. Sitzung am 18. Januar 2005  
6. Sitzung am 15. November 2005



## 11 Literatur

- [1] Grube, H. ; Rickert, J.: Selbstverdichtender Beton : Ein weiterer Entwicklungsschritt des 5-Stoff-Systems Beton. In: Beton 49 (1999), Nr. 4, S. 239-243
- [2] Ohta, A. ; Sugiyama, T. ; Tanaka, Y.: Fluidizing Mechanism and Application of Polycarboxylate-Based Superplasticizers. In: Malhotra, V.M. (Ed.): Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete : Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference Rome, Italy, 1997. Detroit, Mi. : American Concrete Institute, ACI, 1997 (ACI Publication SP 173), S. 359-378
- [3] Jacobs, F. ; Hunkeler, F. ; Slumpf, J.: Self Compacting Concrete. In: Schweizer Ingenieur und Architekt (1999), Nr. 12, S. 4-8
- [4] Spanka, G. ; Grube, H.: Rheologische Eigenschaften von Zementleimen und deren Auswirkungen auf die Verarbeitungseigenschaften von Frischbeton. In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 13. Internationale Baustofftagung : 24. - 26. September 1997 Weimar Tagungsbericht Band 1. Weimar, 1997, S. 1-0301 bis 1-0312
- [5] Clergue, C.: Un exemple d'application de béton auto-plaçant. In: Journée Technique de L'industrie Cimentière, 21 Janvier 1998
- [6] Okamura, H. ; Ozawa, K.: Mix Design for Self-Compacting Concrete. In: Concrete Library of JSCE (1995), Nr. 25, S. 107-120
- [7] Takada, K. ; Pelova, G.I. ; Walraven, J. C.: Influence of Mixing Efficiency on the Mixture Proportion of General Purpose Self-Compacting Concrete. In: Aitcin, Pierre-Claude ; Delagrave, Yves (Ed.): International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes : Volume 2 ; Sherbrooke '98. Sherbrooke : Univ. of Sherbrooke, 1998, S. 19-39
- [8] Takada, K. ; Pelova, G.I. ; Walraven, J. C.: Self-Compacting Concrete Produced by Japanese Method with Dutch Materials. In: Portuguese Ready Mixed Concrete Association, APEB (Ed.): Proceedings of the 12th European ready mixed concrete congress : Ermco 1998. Lissabon, 1998, S. 775-785
- [9] Yurugi, M. ; Sakai, G.: A Proven QA System for Flowable Concrete. In: Concrete International 20 (1998), Nr. 10, S. 44-48
- [10] Steigenberger, J.: Selbstverdichtender Beton (SCC) : Anwendung im Fertigteilwerk. In: Zement und Beton (1998), Nr. 4, S. 8-9
- [11] Rols, S. ; Ambroise, J. ; Péra, J.: Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete. In: Cement and Concrete Research 29 (1999), Nr. 2, S. 261-266
- [12] Oppikofer, R. ; Schlumpf, J.: Selbstverdichtender Beton im Praxiseinsatz. In: Schweizer Baublatt (1999), Nr. 49, S. 22-24
- [13] Bartos, P.J.M. ; Grauers, M.: Self-compacting concrete. In: Concrete 33 (1999), Nr. 4, S. 9-13
- [14] Beaupré, D. ; Lacombe, P. ; Khayat K. H.: Laboratory investigation of rheological properties and scaling resistance of air entrained self-consolidating concrete. In: Materials and Structures/Matériaux et Construction 32 (1999), Nr. 217, S. 235-240
- [15] Petersson, Ö. ; Billberg, P. ; Österberg, T.: Applications of Self Compacting Concrete for Bridge Castings. In: Proceedings of International Workshop on self-compacting concrete / Ozawa, Kazumasa ; Ouchi, Masahiro (Ed.). - Kochi : Univ. of Technology, 1999
- [16] Reschke, T.: Der Einfluß der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton. Düsseldorf : Verl. Bau + Technik, 2001 (Schriftenreihe der Zementindustrie 62)
- [17] Sybertz, F.: Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff. Berlin : Beuth, 1993 (Schriftenreihe des DAfStb 434)

- [18] Walraven, J. C. ; Takada, K.: Selbstverdichtender Beton. In: Zement und Beton (1999), Nr. 1, S. 23-26
- [19] Germann, A. ; Lunk, P.: Self Compacting Concrete – Praktische Erfahrungen und Perspektiven. In: **MBT**, S. 33-44
- [20] Sedran, T. ; de Larrard, F.: Optimazion of Self Compacting Concrete Thanks to Packing Model. In: Skarendahl, A. ; Petersson, Ö. (Ed.): 1st International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete. Cachan : Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions, RILEM, 1999 (RILEM Proceedings PRO7), S. 321-332
- [21] Tangtermsirikul, S ; Bui, K.V.: Blocking Criteria for Aggregate Phase of Self-Compacting High Performance Concrete. In: Proceedings of Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering. Bangkok, Thailand, 1995, S 58-69
- [22] Petersson, O ; Billberg, P. ; Van, B. K.: A Model for Self Compacting Concrete. In: Production methods and workability of concrete : Proceedings of the International RILEM Conference ; Paisley, Scotland June 3-5, 1996. London : Spon, 1996 (RILEM Proceedings 32), S. 483-492
- [23] Petersson, O ; Billberg, P.: Investigation on Blocking on Self-Compacting Concrete with Different Maximum Aggregate Size and Use of Viscosity Agent Instead of Filler. In: Skarendahl, A. ; Petersson, Ö. (Ed.): 1st International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete. Cachan : Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions, RILEM, 1999 (RILEM Proceedings PRO7), S. 333-344
- [24] Oh, S. G. ; Noguchi, T. ; Tomosawa, F.: Toward Mix Design for Rheology of Self-Compacting Concrete. In: Skarendahl, A. ; Petersson, Ö. (Ed.): 1st International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete. Cachan : Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions, RILEM, 1999 (RILEM Proceedings PRO7), S. 361-372
- [25] Spanka, G. ; Grube, H. ; Thielen, G.: Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel. Teil 1 In: Beton 45 (1995), Nr. 11, S. 802-808; Teil 2 In: Beton 45 (1995), Nr. 12, S. 876-881
- [26] Thielen, G. ; Spanka, G. ; Grube, H.: Regelung der Konsistenz von Beton durch Fließmittel. In: Beton 47 (1997), Nr. 8, S. 470-475
- [27] Kordts, S. ; Siebel, E.: Selbstverdichtender Beton als Transportbeton. Düsseldorf : Forschungsinstitut der Zementindustrie, 2002 (Forschungsbericht BTe-TB-B1668)
- [28] Kordts, S. ; Grube, H.: Steuerung der Verarbeitungseigenschaften von Selbstverdichtendem Beton als Transportbeton. In: Beton 52 (2002), Nr. 4, S. 217-223
- [29] Kordts, S.: Selbstverdichtender Beton. In : Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ (Hrsg.): Beiträge zum 41. Forschungskolloquium des DAfStb am 11. und 12. Juli 2002 im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf. Düsseldorf, 2002 (DAfStb - Forschungskolloquium 41), S. 109-120
- [30] Hunkeler, F. ; Jacobs, F.: Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton. Technische Informationen Self Compacting Concrete (SCC), S. 1-4
- [31] Tarlet, A.: Développement et perspectives des bétons auto-plaçants. Journée Technique de l'Industrie Cimentière. Paris, 21.01.1998
- [32] Rational Production and Improved Working Environment through Using Self Compacting Concrete. In: European Commission, Industrial & Materials Technologies Programme ; European Council for Construction Research, Development and Innovation, ECCREDI (Ed.): Environmentally friendly construction technologies : 2nd Annual Workshop Technical Contributions ; Brussels, Belgium November 16th-17th, 1998. Brüssel, 1998, o.S.

- [33] Pichler, R.: Anwendung von SCC auf der Baustelle. In: Zement und Beton (1998), Nr. 4, S. 10-11
- [34] Schlumpf, J. ; Oppikofer, R.: Selbstverdichtender Beton (SCC). In: Tunnel 18 (1999), Nr. 4, S. 87-93
- [35] Karner, A.: Millennium Tower Self Compacting Concrete. In: Zement und Beton (1998), Nr. 4, S. 4-7
- [36] Informationszentrum Beton (Hrsg.): Zementverbrauch nach Verwendungsarten und Baubereichen. November 2000
- [37] Selbstverdichtender Beton : Eine Chance für neue Qualität von Sichtbeton; Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999), Nr. 12, S. 536
- [38] Kladensky, M.: Baubetriebliche Analyse der Vor- und Nachteile von SCC-Beton gegenüber Normalbeton. In: Zement und Beton (2000), Nr. 4, S. 20-21
- [39] Kordts, S.: Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone. Düsseldorf : Verl. Bau + Technik, 2005 (Schriftenreihe der Zementindustrie 66)
- [40] Kordts, S. ; Breit, W.: Beurteilung der Frischbetoneigenschaften von selbstverdichtendem Beton. In: Beton 53 (2003), Nr. 11, S. 565-571
- [41] Kordts, S. ; Breit, W.: Controlling the workability properties of self-compacting concrete used as ready-mixed concrete, Rilem Proceedings PRO 33, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Self-Compacting Concrete (Wallevik, O.; Nielsson, I. (Ed.)), 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland, S. 220-231
- [42] Kordts, S. ; Breit, W.: Kombiniertes Prüfverfahren zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit von SVB – Auslaufkegel. In: Beton 54 (2004), Nr. 4, S. 213-219
- [43] Kordts, S. ; Breit, W.: The flow cone for assessing the workability of SCC. In: Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete ; Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete Beton - SCC 2005, Vol. 2. Addison (Shah, Surendra P. (Ed.)), S. 751-756

## 12 Verzeichnis der Tabellen aus Anhang A

- Tabelle A1: Zusammensetzung der Zemente und Zusatzstoffe – Serie 1
- Tabelle A2: Zusammensetzung der Zemente und Zusatzstoffe – Serie 2
- Tabelle A3: Ergebnisse der physikalischen Prüfungen an den Zementen der Serie 1 und Serie 2
- Tabelle A4: Ergebnisse der physikalischen Prüfungen an den Betonzusatzstoffen der Serie 1 und Serie 2
- Tabelle A5: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Hochofenzement und Flugasche) der Serie 1 für Innenbauteilbeton der Expositionsclassen XC1/XC2 (Laborbetone)
- Tabelle A6: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Kombination Portlandzement und Kalksteinmehl) der Serie 1 für Innenbauteilbeton der Expositionsclassen XC1/XC2 (Laborbetone)
- Tabelle A7: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Kombination Hochofenzement und Flugasche) der Serie 1 für Außenbauteilbeton der Expositionsclassen XC4/XF1
- Tabelle A8: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Kombination Portlandzement und Kalksteinmehl) der Serie 1 für Außenbauteilbeton der Expositionsclassen XC4/XF1
- Tabelle A9: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Kombination Hochofenzement und Flugasche) der Serie 2 für Innenbauteilbeton der Expositionsclassen XC1/XC2 (Laborbetone)
- Tabelle A10: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Kombination Hochofenzement und Flugasche) der Serie 2 für Außenbauteilbeton der Expositionsclassen XC4/XF1
- Tabelle A11: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Kombination Portlandzement und Kalksteinmehl) der Serie 2 für Außenbauteilbeton der Expositionsclassen XC4/XF1
- Tabelle A12: Praxisbetone – Herstellungen in Transportbetonwerken
- Tabelle A13: Betone zur Überprüfung des Auslaufkegels

## **13 Verzeichnis der Bilder aus den Anhängen B, C und D**

### **13.1 Verzeichnis der Bilder aus Anhang B**

- Bild B1: Korngrößenverteilung der Zemente der Serie 1 und 2 (Serie 2 – CEM I 32,5 R wurde nicht bestimmt)
- Bild B2: Korngrößenverteilung der Zusatzstoffe der Serie 1 und 2 (Serie 2 – KSM wurde nicht bestimmt)
- Bild B3: Untersuchte PCE-Fließmittel für die Untersuchung der Serie 1
- Bild B4: Infrarotspektrogramm des verwendeten Betonzusatzmittels für Serie 2 auf Wirkstoffbasis Polycarboxylateher
- Bild B5: Sieblinie der verwendeten Sande 0/2 mm
- Bild B6: Untersuchte Sieblinien (in den weiteren Untersuchungen wurde Sieblinie 4 verwendet)
- Bild B7:  $\beta_P$ -Wert Bestimmung an den Ausgangsstoffen der Serie 1
- Bild B8:  $\beta_P$ -Wert Bestimmung an den Mehlkorgemischen der Serie 1
- Bild B9:  $\beta_P$ -Wert Bestimmung am Mehlkorgemisch der Serie 2 - CEM III / Flugasche für Innenbauteilbedingungen
- Bild B10:  $\beta_P$ -Wert Bestimmung am Mehlkorgemisch der Serie 2 - CEM III / Flugasche für Innenbauteilbedingungen
- Bild B11:  $\beta_P$ -Wert Bestimmung am Mehlkorgemisch der Serie 2 - CEM I / Kalksteinmehl für Außenbauteilbedingungen
- Bild B12: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone HF1-i-01, -02 und -05 mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten
- Bild B13: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-i-01 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 30 min
- Bild B14: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-i-02 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 60 min
- Bild B15: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-i-05 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 120 min
- Bild B16: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone HF1-i-02, -03 und -04 mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten
- Bild B17: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-i-03
- Bild B18: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-i-04
- Bild B19: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone HF1-a mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten
- Bild B20: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-a-01
- Bild B21: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-a-02 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 120 min
- Bild B22: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-a-03

- Bild B23: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-a-04 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 120 min
- Bild B24: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-a-05
- Bild B25: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone PK1-i mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten
- Bild B26: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-01 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 60 min
- Bild B27: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-02 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 90 min
- Bild B28: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-04
- Bild B29: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone PK1-i mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten
- Bild B30: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-03 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 90 min
- Bild B31: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-05
- Bild B32: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone PK1-a mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten
- Bild B33: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-a-01 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 120 min
- Bild B34: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-a-02 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 90 min
- Bild B35: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-a-03 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 120 min
- Bild B36: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone PK1-i-06, -07 und 08 mit erhöhtem Leimvolumen von rd. 380 l/m<sup>3</sup>
- Bild B37: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-06 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 90 min
- Bild B38: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-07 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 90 min
- Bild B39: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-08 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 60 min
- Bild B40: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für den Beton PK1-a-04 mit erhöhtem Leimvolumen von rd. 380 l/m<sup>3</sup>
- Bild B41: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-a-04 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 60 min

- Bild B42: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone HF2-i mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten
- Bild B43: Verlauf der Verarbeitbarkeit der Betone HF2-i-01, -02, -03 und -05
- Bild B44: Verlauf der Verarbeitbarkeit der Betone HF2-i-02 und -03, sowie -04 und -06
- Bild B45: Einfluss der Fließmitteldosierung auf die Verarbeitbarkeit der Betone HF2-i-02, -04 und -06
- Bild B46: Einfluss der Fließmitteldosierung auf den Beginn der Verarbeitbarkeit und die Verarbeitbarkeitszeit für Betone der Serie HF2-i mit einem Wassergehalt von  $168 \text{ l/m}^3$
- Bild B47: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone HF2-a mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten
- Bild B48: Verlauf der Verarbeitbarkeit der Betone HF2-a-02, -03 und -04
- Bild B49: Einfluss der Fließmitteldosierung auf die Verarbeitbarkeit der Betone HF2-a-02, -03 und -04
- Bild B50: Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeit der Betone HF2-a-03, -06 und -07
- Bild B51: Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für Betone HF2-a-07 und -03 bei  $8 \text{ °C}$  und  $20 \text{ °C}$
- Bild B52: Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für Betone HF2-a-03 und -06 bei  $20 \text{ °C}$  und  $30 \text{ °C}$
- Bild B53: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone PK2-a mit unterschiedlichen Fließmittelgehalten
- Bild B54: Einfluss der Fließmitteldosierung auf die Verarbeitbarkeit der Betone PK2-a-02, -03, -05 und -09
- Bild B55: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone PK2-a mit unterschiedlichen Wassergehalten
- Bild B56: Einfluss des Wassergehalts auf die Verarbeitbarkeit der Betone PK2-a-08 und -09 sowie -05 und -07
- Bild B57: Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeit der Betone PK2-a-06 bei  $8 \text{ °C}$ , -09 bei  $20 \text{ °C}$  und -10 bei  $30 \text{ °C}$
- Bild B58: Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für Betone PK2-a-06 bei  $8 \text{ °C}$ , -09 bei  $20 \text{ °C}$  und -10 bei  $30 \text{ °C}$
- Bild B59: Einfluss der Fließmitteldosierung auf den Beginn der Verarbeitbarkeit und die Verarbeitbarkeitszeit für Betone der Serie PK2-a mit einem Wassergehalt von  $177 \text{ l/m}^3$
- Bild B60: Schwindverformung der Betone der Serie 1 in der Mehlkornkombination Hochofenzement / Flugasche für Innenbauteilbedingungen (geprüft an Zylindern  $150/300 \text{ mm}$ , 1d Schalung, dann  $20 \text{ °C}/65 \text{ \% r.F.}$ )
- Bild B61: Schwindverformung der Betone der Serie 1 in der Mehlkornkombination Hochofenzement / Flugasche für Außenbauteilbedingungen (geprüft an Zylindern  $150/300 \text{ mm}$ , 1d Schalung, dann  $20 \text{ °C}/65 \text{ \% r.F.}$ )
- Bild B62: Schwindverformung der Betone der Serie 1 in der Mehlkornkombination Portlandzement / Kalksteinmehl für Innenbauteilbedingungen (geprüft an Zylindern  $150/300 \text{ mm}$ , 1d Schalung, dann  $20 \text{ °C}/65 \text{ \% r.F.}$ )
- Bild B63: Schwindverformung der Betone der Serie 1 in der Mehlkornkombination Portlandzement / Kalksteinmehl für Außenbauteilbedingungen (geprüft an Zylindern  $150/300 \text{ mm}$ , 1d Schalung, dann  $20 \text{ °C}/65 \text{ \% r.F.}$ )

- Bild B64: Abwitterung der Betone der Serie 1 in der Mehlkornkombination Hochofenzement / Flugasche für Außenbauteilbedingungen bei Frostbeanspruchung (100 Frosttauwechsel (FTW), 2 FTW pro Tag, Wasserfrost, Würfelverfahren)
- Bild B65: Abwitterung der Betone der Serie 1 in der Mehlkornkombination Portlandzement / Kalksteinmehl für Außenbauteilbedingungen bei Frostbeanspruchung (100 Frosttauwechsel (FTW), 2 FTW pro Tag, Wasserfrost, Würfelverfahren)
- Bild B66: Zeitlicher Verlauf des Setzfließmaßes des SVB1-P-01 und Vergleich mit den entsprechenden Laborbetonen
- Bild B67: Zeitlicher Verlauf der t500-Zeit des SVB1-P-01 und Vergleich mit den entsprechenden Laborbetonen
- Bild B68: Praxisversuch 2 - Zeitlicher Verlauf des Setzfließmaßes des SVB2-P-02 und Vergleich mit dem entsprechenden Laborbeton der Serie HF2-a
- Bild B69: Praxisversuch 2 - Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für Beton SVB2-P-02 und den entsprechenden Laborbeton der Serie HF2-a
- Bild B70: Praxisversuch 2 bis 4 - Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für Beton SVB2-P und den entsprechenden Laborbeton der Serie HF2-a  
Veränderung der Auslaufzeit in Abhängigkeit vom Durchmesser des Auslaufkegels und zeitliche Entwicklung für AK-02
- Bild B71: Praxisversuch 5 - Zeitlicher Verlauf des Setzfließmaßes des SVB2-P-05 und Vergleich mit dem entsprechenden Laborbeton der Serie PK2-a-05
- Bild B72: Praxisversuch 5 - Zeitlicher Verlauf der Trichterauslaufzeit des SVB2-P-05 und Vergleich mit dem entsprechenden Laborbeton der Serie PK2-a-05
- Bild B73: Praxisversuch 5 - Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für Beton SVB2-P-05 und dem entsprechenden Laborbeton PK2-a-05
- Bild B74: Veränderung der Auslaufzeit in Abhängigkeit vom Durchmesser des Auslaufkegels und zeitliche Entwicklung für AK-02
- Bild B75: Veränderung des Setzfließmaßes in Abhängigkeit vom Durchmesser des Auslaufkegels und zeitliche Entwicklung für AK-02
- Bild B76: Veränderung der Auslaufzeit in Abhängigkeit vom Durchmesser des Auslaufkegels und zeitliche Entwicklung für AK-05
- Bild B77: Veränderung des Setzfließmaßes in Abhängigkeit vom Durchmesser des Auslaufkegels und zeitliche Entwicklung für AK-05
- Bild B78: Zusammenhang zwischen Trichterauslaufzeit und Kegelauslaufzeit in Abhängigkeit vom Auslaufquerschnitt für alle untersuchten SVB
- Bild B79: Zusammenhang zwischen Trichterauslaufzeit und Kegelauslaufzeit – Ergebnisse aus Praxisuntersuchungen

### 13.2 Verzeichnis der Bilder aus Anhang C

- Bild C1: Optische Charakterisierung - Verarbeitbarkeit bei 30 °C - Beton HF2-a-06  
( $T = 30\text{ °C}$ ,  $w = 173\text{ l/m}^3$ ,  $FM = 2,8\text{ M.-% v. z}$ )
- Bild C2: Optische Charakterisierung - Verarbeitbarkeit bei 20 °C - Beton PK2-a-07  
( $T = 20\text{ °C}$ ,  $w = 183\text{ l/m}^3$ ,  $FM = 3,0\text{ M.-% v. z}$ )
- Bild C3: Transportbetonanlage 1 – Praxistest 1
- Bild C4: Setzfließmaßbestimmung – Praxistest
- Bild C5: Praxistest 2 – Transportbetonanlage 2
- Bild C6: Probewand 1 (Abschnitt 1) und Probewand 2 (Abschnitt 2)
- Bild C7: Probewand 1 – Abschnitt 1 - Schalung



- Bild C8: Probewand 1 – Abschnitt 1 - Schalung  
Bild C7: Probewand 1 – Abschnitt 1 - Schalung  
Bild C8: Probewand 1 – Abschnitt 1 - Schalung  
Bild C9: Probewand 1 – Abschnitt 1 - Schalung  
Bild C10: Probewand 1 – Abschnitt 1 - Schalung  
Bild C11: Probewand 1 – Abschnitt 1 - Gesamtübersicht  
Bild C12: Betonage Abschnitt 1 (t = 40 min, sm = 89 cm, T = 5 s)  
Bild C13: Betonage Abschnitt 1 (t = 85 min, sm = 79 cm, T = 6 s)  
Bild C14: Betonage Abschnitt 1 - Einbaubeginn 105 Minuten nach Herstellung  
Bild C15: Betonage Abschnitt 1 - Herstellung  
Bild C16: Betonage Abschnitt 1 - Herstellung  
Bild C17: Betonage Abschnitt 1 – Einfluss der Schaloberfläche  
Bild C18: Betonage Abschnitt 1 – Einfluss der Schaloberfläche  
Bild C19: Betonage Abschnitt 1 – Einfluss der Schaloberfläche  
Bild C20: Betonage Abschnitt 1 – Einfluss der Schaloberfläche  
Bild C21: Betonage Abschnitt 1 – Sedimentationseffekt  
Bild C22: Betonage Abschnitt 1 – Einfluss der Schaloberfläche  
Bild C23: Betonage Abschnitt 1 – Einfluss der Schaloberfläche  
Bild C24: Probewand 2 – Abschnitt 2 - Schalung  
Bild C25: Betonage Wand 2 (t = 20 min, sm = 75 cm, T = 8 s)  
Bild C26: Betonage Wand 2 - Herstellung  
Bild C27: Betonage Wand 2 - Herstellung  
Bild C28: Betonage Wand 2 - Herstellung  
Bild C29: Betonage Wand 2 - Herstellung  
Bild C30: Betonage Wand 2 - Herstellung  
Bild C31: Betonage Wand 2 - Einfluss der Schaloberfläche  
Bild C32: Betonage Wand 2 - Einfluss der Schaloberfläche  
Bild C33: Betonage Wand 2 - Einfluss der Schaloberfläche  
Bild C34: Betonage Wand 2 - Einfluss der Schaloberfläche  
Bild C35: Betonage Wand 2 - Einfluss der Schaloberfläche  
Bild C36: Betonage Wand 2 – Einfluss der Schaloberfläche  
Bild C37: Ansatz Wand 2 (Abschnitt 2) an Wand 1 (Abschnitt 1)  
Bild C38: Probewand 1 (Abschnitt 1) und Probewand 2 (Abschnitt 2)  
Bild C39: Probewand 3  
Bild C40: Probewand 3 - Schalung  
Bild C41: Betonage Probewand 3 (t = 5 min, sm = 75 cm, T = 5,4 s)  
Bild C42: Betonage Probewand 3 (t = 60 min, sm = 65 cm, T = 9,8 s)  
Bild C43: Betonage Probewand 3 - Einbau t = 65 min  
Bild C44: Betonage Probewand 3 - Herstellung  
Bild C45: Betonage Probewand 3 - Herstellung  
Bild C46: Betonage Probewand 3 - Herstellung  
Bild C47: Betonage Probewand 3 - Herstellung  
Bild C48: Probewand 3 - Ausschalen  
Bild C49: Probewand 3 - Ausschalen  
Bild C50: Probewand 3 - Ausschalen - Oberflächeneigenschaften

- Bild C51: Probewand 3 - Ausschalen - Oberflächeneigenschaften
- Bild C52: Probewand 3 – Ausschalen - Oberflächeneigenschaften - Gesamtübersicht
- Bild C53: Bohrkernentnahmestellen an den Probewänden 1, 2 und 3 - Übersichtsplan
- Bild C54: Bohrkernentnahme an Wand 1 und 2
- Bild C55: Bohrkern Wand 2, Pos. 1 und Pos. 2
- Bild C56: Bohrkern Wand 1, Pos. 3 und Pos. 4
- Bild C57: Bohrkern Wand 1, Pos. 4 - Detail
- Bild C58: Bohrkernentnahme an Wand 3
- Bild C59: Bohrkerne Wand 3, Pos. 5 / 6
- Bild C60: Bohrkerne Wand 3, Pos. 7 / 8
- Bild C61: Prototyp Auslaufkegel
- Bild C62: Auslaufkegel - Auslaufbereich
- Bild C63: Auslaufkegel - Ausläufe
- Bild C64: Auslaufkegel in der Anwendung
- Bild C65: Auslaufkegel – Ausfließverhalten bei unterschiedlichen Ausläufen
- Bild C66: Betonherstellung Malmö
- Bild C67: Auslaufkegel - Praxiseinsatz in Malmö
- Bild C68: Messprotokoll für selbstverdichtenden und F6 Beton (Praxistest-Auslaufkegel)

### **13.3 Verzeichnis der Bilder aus Anhang D**

- Bild D1: Setzfließmaßprüfung
- Bild D2: Auslauftrichter für SVB
- Bild D3: Mantel- und Bruchflächen zylinderförmiger Probekörper zur Begutachtung der Verarbeitbarkeitseigenschaften von SVB (linker Zylinder Stagnation, mittlerer Zylinder Selbstverdichtung, rechter Zylinder Sedimentation)
- Bild D4: Blockierring zur Bestimmung der Blockierneigung
- Bild D5: Box Test zur Bestimmung der Blockierneigung

## ANHANG A - Tabellen

Tabelle A1: Zusammensetzung der Zemente und Zusatzstoffe – Serie 1

Bestandteil	Einheit	CEM I 32,5 R	CEM III/A 32,5	SFA	KSM
1	2	3	4	5	6
Wasser	%	0,73	0,75	0,28	0,13
Kohlendioxid	%	2,03	0,42	0,06	43,57
Silizium(IV)-oxid	%	20,12	29,95	45,33	0,47
Aluminiumoxid	%	5,84	9,74	28,98	0,01
Titandioxid	%	0,27	0,47	1,18	0,03
Phosphor(V)-oxid	%	0,10	0,04	0,78	0,01
Eisen(III)-oxid	%	2,51	1,10	10,59	0,01
Mangan(III)-oxid	%	0,06	0,23	0,15	0,02
Calciumoxid	%	62,90	48,16	4,06	55,19
Magnesiumoxid	%	1,21	5,69	2,14	0,42
Sulfat aus SO <sub>3</sub>	%	3,10	2,24	0,64	0,03
Kaliumoxid	%	0,98	0,63	3,13	0,02
Natriumoxid	%	0,14	0,26	1,16	0,01
Natriumäquivalent	%	0,78	0,67	3,22	0,02
Hüttensandgehalt	%	-	64	-	-

Tabelle A2: Zusammensetzung der Zemente und Zusatzstoffe – Serie 2

Bestandteil	Einheit	CEM I 32,5 R	CEM III/A 32,5	SFA	KSM
1	2	3	4	5	6
Wasser	%	1,39	0,71	0,23	0,25
Kohlendioxid	%	0,59	2,11	0,08	42,49
Silizium(IV)-oxid	%	21,88	27,63	49,40	0,87
Aluminiumoxid	%	4,52	8,39	26,55	0,13
Titandioxid	%	0,25	0,49	1,09	0,05
Phosphor(V)-oxid	%	0,16	0,03	0,25	0,03
Eisen(III)-oxid	%	4,10	0,96	7,52	0,11
Mangan(III)-oxid	%	0,08	0,18	0,13	0,02
Calciumoxid	%	62,03	49,62	3,44	55,21
Magnesiumoxid	%	1,09	5,88	2,76	0,42
Sulfat aus SO <sub>3</sub>	%	2,94	2,74	0,45	0,01
Kaliumoxid	%	0,73	0,59	3,83	0,03
Natriumoxid	%	0,25	0,28	1,10	0,03
Natriumäquivalent	%	0,73	0,67	3,62	0,05
Hüttensandgehalt	%	-	69	-	-

Tabelle A3: Ergebnisse der physikalischen Prüfungen an den Zementen der Serie 1 und Serie 2

Eigenschaft			Zement Serie 1		Zement Serie 2	
			CEM I 32,5 R	CEM III/A 32,5	CEM I 32,5 R	CEM III/A 32,5
1	2	3	4	5	6	7
Dichte		g/cm <sup>3</sup>	3,11	2,98	3,10	2,96
Druckfestigkeit	2d	N/mm <sup>2</sup>	23,9	8,5	19,5	9,4
	7d	N/mm <sup>2</sup>	38,6	24,7	n.b.	25,1
	28d	N/mm <sup>2</sup>	46,1	52,0	44,8	43,8
Biegezugfestigkeit	2d	N/mm <sup>2</sup>	4,7	2,0	4,7	2,7
	7d	N/mm <sup>2</sup>	6,9	5,3	n.b.	5,7
	28d	N/mm <sup>2</sup>	8,3	8,4	8,4	10,5
Erstarren	Beginn	min	195	195	225	185
Wasseranspruch		%	25,5	30,5	29,0	29,0
Normsteifemaß		mm	5	6	5	7
Raumbeständigkeit	Le Chatelier	mm	1	0	1	1
Mahlfeinheit		cm <sup>2</sup> /g	3.330	4.110	3.300	3.590

n.b. = nicht bestimmt

Tabelle A4: Ergebnisse der physikalischen Prüfungen an den Betonzusatzstoffen der Serie 1 und Serie 2

Eigenschaft			Zusatzstoff Serie 1		Zusatzstoff Serie 2	
			SFA	KSM	SFA	KSM
1	2	3	4	5	6	
Dichte		g/cm <sup>3</sup>	2,28	2,71	2,25	2,70
Wasseranspruch		%	31,5	21,0	26,0	n.b.
Normsteifemaß		mm	7	6	6	n.b.
Mahlfeinheit		cm <sup>2</sup> /g	3.340	4.555	2.965	5.085

n.b. = nicht bestimmt

Tabelle A5: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Hochofenzement und Flugasche) der Serie 1 für Innenbauteilbeton der Expositionsklassen XC1/XC2 (Laborbetone)

Bezeichnung	Einheit	HF1-i-01	HF1-i-02	HF1-i-03	HF1-i-04	HF1-i-05	
1	2	3	4	5	6	7	
Zementart		CEM III/A 32,5 R-NW					
Zementgehalt	kg/m <sup>3</sup>	240	240	240	240	240	
Zusatzart		Flugasche					
Zusatzstoff	kg/m <sup>3</sup>	310	310	310	310	310	
Wassergehalt	kg/m <sup>3</sup>	168	175	175	175	181	
(w/z) <sub>eq</sub> <sup>1)</sup>	-	0,62	0,64	0,64	0,64	0,67	
Zusatzmittel	M.-% v.z	1,0	1,0	1,1	1,2	1,0	
Gesteinskörnung	kg/m <sup>3</sup>	1.566	1.548	1.548	1.548	1.532	
Luft	Vol.-%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
Festbetonergebnisse							
Druckfestigkeit	2d	N/mm <sup>2</sup>	46,4	25,0	7,8	7,6	n.b.
	7d	N/mm <sup>2</sup>	27,4	26,2	25,0	23,7	23,0
	28d	N/mm <sup>2</sup>	50,5	44,4	46,4	47,1	46,2
Spaltzugfestigkeit	28d	N/mm <sup>2</sup>	4,1	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
E-Modul	28d	N/mm <sup>2</sup>	28.000	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Carbonatisierung	91d	mm	8,1	8,8	9,7	10,2	9,8
Schwindmaß	91d	mm/m	0,37	0,38	0,39	0,41	0,41

1) k = 0,4; angerechnete Flugasche = 0,33-z

n.b. = nicht bestimmt

Tabelle A6: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Kombination Portlandzement und Kalksteinmehl) der Serie 1 für Innenbauteilbeton der Expositionsklassen XC1/XC2 (Laborbetone)

Bezeichnung	Einheit	PK1-i-01	PK1-i-02	PK1-i-03	PK1-i-04	PK1-i-05	PK1-i-06	PK1-i-07	PK1-i-08	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Zementart		CEM I 32,5 R								
Zementgehalt	kg/m <sup>3</sup>	240	240	240	240	240	256,4	256,4	240	
Zusatzart		Kalksteinmehl								
Zusatzstoff	kg/m <sup>3</sup>	310	310	310	310	310	331,2	331,2	348	
Wassergehalt	kg/m <sup>3</sup>	173	168	168	175	175	182	175	177	
(w/z) <sub>eq</sub>	-	0,72	0,70	0,70	0,73	0,73	0,71	0,68	0,74	
Zusatzmittel	M.-%v.z	0,9	1,1	1,2	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1	
Gesteinskörnung	kg/m <sup>3</sup>	1.611	1.624	1.624	1.606	1.606	1.549	1.567	1.560	
Luft	Vol.-%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
Festbetonergebnisse										
Druckfestigkeit	2d	N/mm <sup>2</sup>	19,4	n.b.	17,3	13,6	17,1	22,4	17,3	16,6
	7d	N/mm <sup>2</sup>	26,5	23,4	24,3	19,6	25,9	29,3	24,0	23,3
	28d	N/mm <sup>2</sup>	37,8	34,6	37,3	30,2	37,1	42,6	35,7	24,7
Spaltzugfestigkeit	28d	N/mm <sup>2</sup>	2,8	2,7	2,8	2,3	2,5	3,1	n.b.	2,7
E-Modul	28d	kN/mm <sup>2</sup>	26,2	n.b.	n.b.	22,4	24,0	26,0	n.b.	n.b.
Carbonatisierung	91d	mm	5,7	7,0	7,5	8,2	5,6	5,2	5,6	6,9
Schwindmaß	91d	mm/m	0,37	0,44	0,44	0,46	0,44	0,33	0,31	0,42

n.b. = nicht bestimmt

Tabelle A7: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Kombination Hochofenzement und Flugasche) der Serie 1 für Außenbauteilbeton der Expositionsclassen XC4/XF1

Bezeichnung	Einheit	HF1-a-01	HF1-a-02	HF1-a-03	HF1-a-04	HF1-a-05	
1	2	3	4	5	6	7	
Zementart		CEM III/A 32,5 R-NW					
Zementgehalt	kg/m <sup>3</sup>	270	270	270	270	270	
Zusatzart		Flugasche					
Zusatzstoff	kg/m <sup>3</sup>	280	280	280	280	280	
Wassergehalt	kg/m <sup>3</sup>	177	177	177	169	181	
(w/z) <sub>eq</sub> <sup>1)</sup>	-	0,58	0,58	0,58	0,55	0,59	
Zusatzmittel	M.-% v.z	1,0	1,1	1,2	1,2	1,1	
Gesteinskörnung	kg/m <sup>3</sup>	1.550	1.550	1.550	1.571	1.534	
Luft	Vol.-%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
Festbetonergebnisse							
Druckfestigkeit	2d	N/mm <sup>2</sup>	8,2	9,2	7,5	11,5	n.b.
	7d	N/mm <sup>2</sup>	30,8	28,2	26,8	32,3	25,8
	28d	N/mm <sup>2</sup>	50,7	51,9	50,5	58,4	50,0
Spaltzugfestigkeit	28d	N/mm <sup>2</sup>	4,1	4,0	3,6	4,0	3,9
E-Modul	28d	N/mm <sup>2</sup>	28.500	27.900	28.600	29.400	n.b.
Carbonatisierung	91d	mm	9,0	7,6	9,0	5,8	9,3
Schwindmaß	91d	mm/m	0,38	0,43	0,41	0,35	0,37
Abwitterung (FTW)	100	M.-%	n.b.	2,1	1,4	1,9	3,8

1) k = 0,4; angerechnete Flugasche = 0,33-z

n.b. = nicht bestimmt



Tabelle A8: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Kombination Portlandzement und Kalksteinmehl) der Serie 1 für Außenbauteilbeton der Expositionsklassen XC4/XF1

Bezeichnung	Einheit	PK1-a-01	PK1-a-02	PK1-a-03	PK1-a-04	
1	2	3	4	5	6	
Zementart		CEM I 32,5 R				
Zementgehalt	kg/m <sup>3</sup>	285	285	285	285	
Zusatzart		Kalksteinmehl				
Zusatzstoff	kg/m <sup>3</sup>	265	265	265	303	
Wassergehalt	kg/m <sup>3</sup>	172	165	178	175	
(w/z) <sub>eq</sub>	-	0,60	0,58	0,62	0,61	
Zusatzmittel	M.-% v.z	1,2	1,2	1,2	1,1	
Gesteinskörnung	kg/m <sup>3</sup>	1.620	1.638	1.604	1.575	
Luft	Vol.-%	1,5	1,5	1,5	1,5	
Festbetonergebnisse						
Druckfestigkeit	2d	N/mm <sup>2</sup>	n.b.	21,5	n.b.	21,4
	7d	N/mm <sup>2</sup>	26,7	29,3	26,5	2,4
	28d	N/mm <sup>2</sup>	37,5	42,9	37,3	40,8
Spaltzugfestigkeit	28d	N/mm <sup>2</sup>	2,6	n.b.	2,9	3,4
E-Modul	28d	N/mm <sup>2</sup>	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Carbonatisierung	91d	mm	7,2	6,2	7,2	7,2
Schwindmaß	91d	mm/m	0,46	0,40	0,46	0,46
Abwitterung (FTW)	100	M.-%	0,3	0,2	0,7	0,7

n.b. = nicht bestimmt

Tabelle A9: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Kombination Hochofenzement und Flugasche) der Serie 2 für Innenbauteilbeton der Expositionsklassen XC1/XC2 (Laborbetone)

Bezeichnung	Einheit	HF2-i-01	HF2-i-02	HF2-i-03	HF2-i-04	HF2-i-05	HF2-i-06	
1	2	3	4	5	6	7	8	
Zementart		CEM III/A 32,5 R-NW						
Zementgehalt	kg/m <sup>3</sup>	240	240	240	240	240	240	
Zusatzart		Flugasche						
Zusatzstoff	kg/m <sup>3</sup>	310	310	310	310	310	310	
Wassergehalt	kg/m <sup>3</sup>	168	168	168	175	168	175	
(w/z) <sub>eq</sub>	-	0,62	0,62	0,62	0,64	0,62	0,64	
Zusatzmittel	M.-% v.z	1,0	0,9	0,8	0,8	1,1	0,9	
Gesteinskörnung	kg/m <sup>3</sup>	1.549	1.549	1.549	1.531	1.548	1.531	
Luft	Vol.-%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
Festbetonergebnisse								
Druckfestigkeit	2d	N/mm <sup>2</sup>	2,8 <sup>1)</sup>	n.b.	n.b.	n.b.	3,7 <sup>1)</sup>	n.b.
	7d	N/mm <sup>2</sup>	27,7	30,3	n.b.	28,7	31,0	27,6
	28d	N/mm <sup>2</sup>	50,1	51,3	n.b.	47,8	54,6	45,8
Spaltzugfestigkeit	28d	N/mm <sup>2</sup>	3,8	3,8	n.b.	3,6	3,8	3,8
E-Modul	28d	kN/mm <sup>2</sup>	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2,28	2,28	n.b.	2,27	2,29	2,27	

Tabelle A10: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Kombination Hochofenzement und Flugasche) der Serie 2 für Außenbauteilbeton der Expositionsklassen XC4/XF1

Bezeichnung	Einheit	HF2-a-01	HF2-a-02	HF2-a-03	HF2-a-04	HF2-a-05	HF2-a-06	HF2-a-07	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Zementart		CEM III/A 32,5 R-NW							
Zementgehalt	kg/m <sup>3</sup>	270	270	270	270	270	270	270	
Zusatzart		Flugasche							
Zusatzstoff	kg/m <sup>3</sup>	280	280	280	280	280	280	280	
Wassergehalt	kg/m <sup>3</sup>	170	173	173	180	173	173	173	
(w/z) <sub>eq</sub>	-	0,55	0,55	0,55	0,57	0,55	0,55	0,55	
Zusatzmittel	M.-% v.z	1,0	2,2	2,4	2,2	2,0	2,8	2,4	
Nachdosierung	M.-% v.z	1,0	-	-	-	-	-	-	
Gesteinskörnung	kg/m <sup>3</sup>	1.556	1.548	1.547	1.530	1.549	1.547	1.547	
Luft	Vol.-%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
Temperatur	°C	20	20	20	20	20	30	8	
Festbetonergebnisse									
Druckfestigkeit	2d	N/mm <sup>2</sup>	3,4 <sup>1)</sup>	n.b.	1,6 <sup>1)</sup>	2,0 <sup>1)</sup>	n.b.	n.b.	n.b.
	7d	N/mm <sup>2</sup>	25,9	27,0	24,2	23,8	n.b.	n.b.	n.b.
	28d	N/mm <sup>2</sup>	43,2	44,8	42,4	41,5	n.b.	n.b.	n.b.
Spaltzugfestigkeit	28d	N/mm <sup>2</sup>	3,8	3,8	3,6	3,5	n.b.	n.b.	n.b.
E-Modul	28d	kN/mm <sup>2</sup>	n.b.	n.b.	27,0	27,5	n.b.	n.b.	n.b.
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2,26	2,22	2,21	2,21	n.b.	n.b.	n.b.	

1) Druckfestigkeit im Alter von 1d

n.b. = nicht bestimmt

Tabelle A11: Untersuchte Betonzusammensetzungen (Kombination Portlandzement und Kalksteinmehl) der Serie 2 für Außenbauteilbeton der Expositionsklassen XC4/XF1

Bezeichnung	Einheit	PK2-a-01	PK2-a-02	PK2-a-03	PK2-a-04	PK2-a-05	PK2-a-06	PK2-a-07	PK2-a-08	PK2-a-09	PK2-a-10	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Zementart		CEM I 32,5 R										
Zementgehalt	kg/m <sup>3</sup>	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	
Zusatzart		Kalksteinmehl										
Zusatzstoff	kg/m <sup>3</sup>	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	
Wassergehalt	kg/m <sup>3</sup>	177	177	177	183	177	177	183	170	177	177	
(w/z) <sub>eq</sub>	-	0,60	0,60	0,60	0,62	0,60	0,60	0,62	0,58	0,60	0,60	
Zusatzmittel	M.-% v.z	2,0	2,6	2,8	2,8	3,0	3,0	3,0	3,3	3,3	3,3	
Gesteinskörnung	kg/m <sup>3</sup>	1595	1595	1595	1579	1595	1595	1579	1613	1595	1595	
Luft	Vol.-%	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
Temperatur	°C	20	20	20	20	20	8	20	20	20	30	
Festbetonergebnisse												
Druckfestigkeit	2d	N/mm <sup>2</sup>	n.b.	n.b.	21,4	9,8 <sup>1)</sup>	n.b.	n.b.	n.b.	15,6	n.b.	18,0
	7d	N/mm <sup>2</sup>	n.b.	n.b.	29,3	27,2	28,9	n.b.	n.b.	33,0	n.b.	29,6
	28d	N/mm <sup>2</sup>	n.b.	n.b.	44,8	41,6	43,7	n.b.	n.b.	50,5	n.b.	44,7
Spaltzugfestigkeit	28d	N/mm <sup>2</sup>	n.b.	n.b.	3,2	2,9	3,1	n.b.	n.b.	3,4	n.b.	3,2
E-Modul	28d	kN/mm <sup>2</sup>	n.b.	n.b.	27,7	27,0	28,0	n.b.	n.b.	29,0	n.b.	26,4
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	n.b.	n.b.	2,33	2,32	2,31	n.b.	n.b.	2,35	n.b.	2,33	

1) Druckfestigkeit im Alter von 1d

n.b. = nicht bestimmt

Tabelle A12: Praxisbetone – Herstellungen in Transportbetonwerken

Bezeichnung	Einheit	SVB1-P-00 Vormischung	SVB1-P-01	SVB2-P-02 Vormischung	SVB2-P-03 Wand 1	SVB2-P-04 Wand 2	SVB2-P-05 Wand 3	
1	2	3	4	5	6	7	8	
Transportbetonwerk <sup>1)</sup>	-	R	R	E	E	E	E	
Zementart / -gehalt								
CEM III/A 32,5	kg/m <sup>3</sup>	240	240	270	270	270	-	
CEM I 32,5	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	295	
Zusatzart / -gehalt								
Flugasche	kg/m <sup>3</sup>	310	310	280	280	280	-	
Kalksteinmehl	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	255	
Wassergehalt	kg/m <sup>3</sup>	175	175	173	173	173	177	
(w/z) <sub>eq</sub>	-	0,64 <sup>2)</sup>	0,64 <sup>2)</sup>	0,55 <sup>2)</sup>	0,55 <sup>2)</sup>	0,55 <sup>2)</sup>	0,60	
Zusatzmittel	M.-% v.z	1,1	1,1	2,4	2,4	2,4	3,0	
Gesteinskörnung	kg/m <sup>3</sup>	1.548	1.548	1.547	1.547	1.547	1.595	
Luft	Vol.-%	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0	
Frischbetontemperatur	°C	17	19	16	21	26	15	
Festbetonergebnisse								
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2,29	2,31	2,22	2,21	2,23	2,31	
Druck- festigkeit	2d	N/mm <sup>2</sup>	6,5	7,7	7,3	n.b.	n.b.	n.b.
	7d	N/mm <sup>2</sup>	24,2	28,5	30,2	27,5	27,9	28,6
	28d	N/mm <sup>2</sup>	43,5	50,2	54,1	48,9	49,3	45,2
	91d	N/mm <sup>2</sup>	50,4	57,3	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Spaltzugfestigkeit	28d	N/mm <sup>2</sup>	3,4	3,8	4,2	4,2	4,3	3,1
E-Modul	28d	N/mm <sup>2</sup>	27.100	30.100	31.700	32.100	32.000	28.200
Carbonatisierung	91d	mm	5,8	5,9	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Schwindmaß	91d	mm/m	-0,526	-0,430	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

1) R = Transportbetonwerk 1

E = Transportbetonwerk 2

2) k = 0,4; angerechnete Flugasche = 0,33·z

n.b. = nicht bestimmt

Tabelle A13: Betone zur Überprüfung des Auslaufkegels

Bezeichnung	Einheit	AK-01	AK-02	AK-03	AK-04	AK-05	AK-06
1	2	3	4	5	6	7	8
Zementart / -gehalt							
CEM III/A 32,5	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	240
CEM I 32,5	kg/m <sup>3</sup>	295	295	295	295	240	-
Zusatzart / -gehalt							
Flugasche	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	255	310	310
Kalksteinmehl	kg/m <sup>3</sup>	255	255	255	-	-	-
Wassergehalt	kg/m <sup>3</sup>	177	177	177	170	173	170
Zusatzmittel	M.-% v.z	1,0	3,0	3,3	2,8	3,0	2,6
Gesteinskörnung	kg/m <sup>3</sup>	1.595	1.595	1.595	1.570	1.546	1.548
Luft	Vol.-%	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

### ANHANG B - Bilder

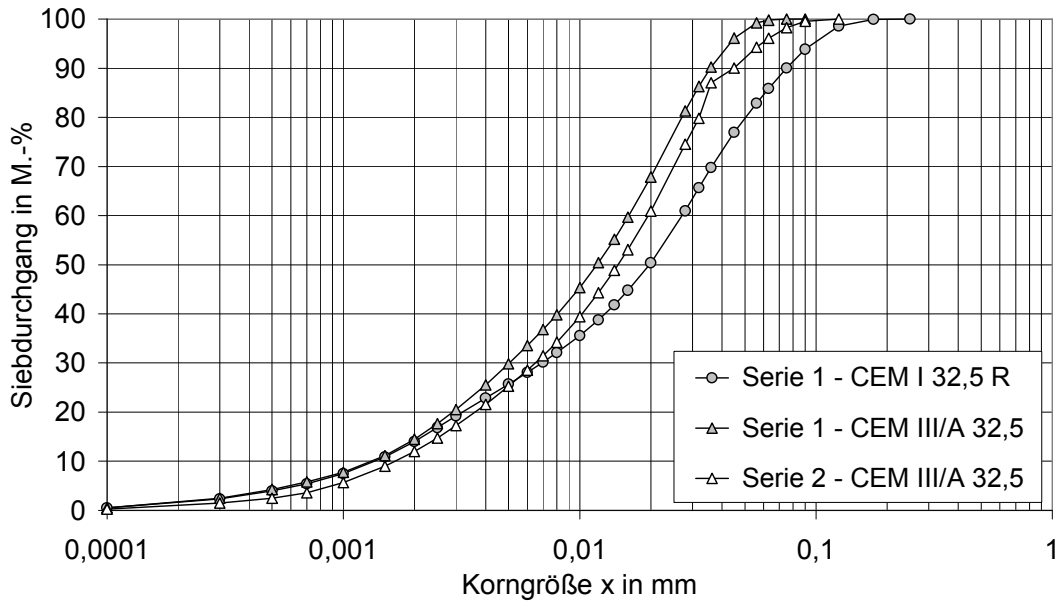


Bild B1: Korngrößenverteilung der Zemente der Serie 1 und 2  
(Serie 2 – CEM I 32,5 R wurde nicht bestimmt)

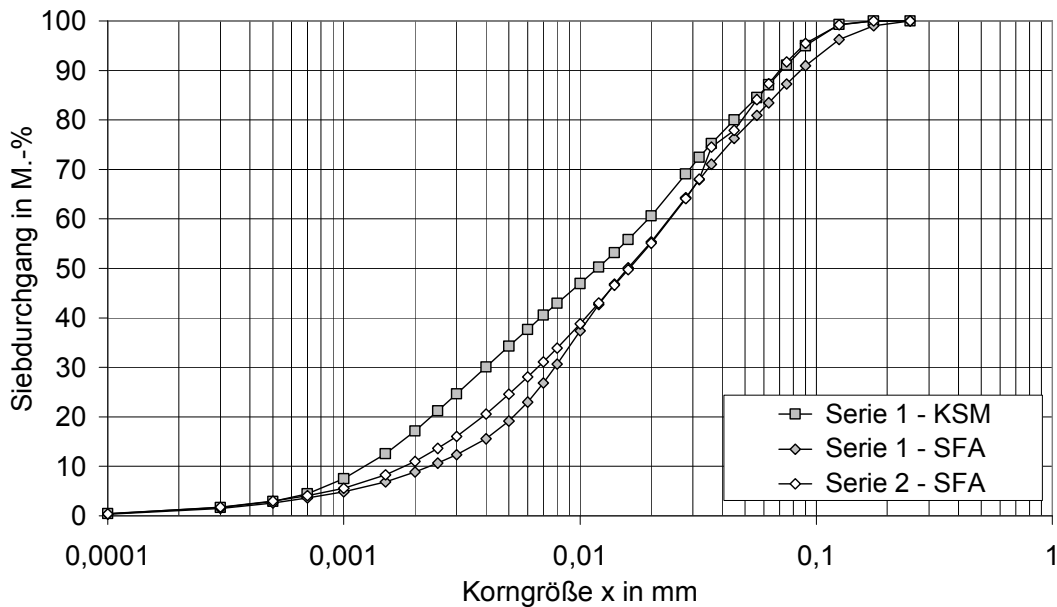


Bild B2: Korngrößenverteilung der Zusatzstoffe der Serie 1 und 2  
(Serie 2 – KSM wurde nicht bestimmt)

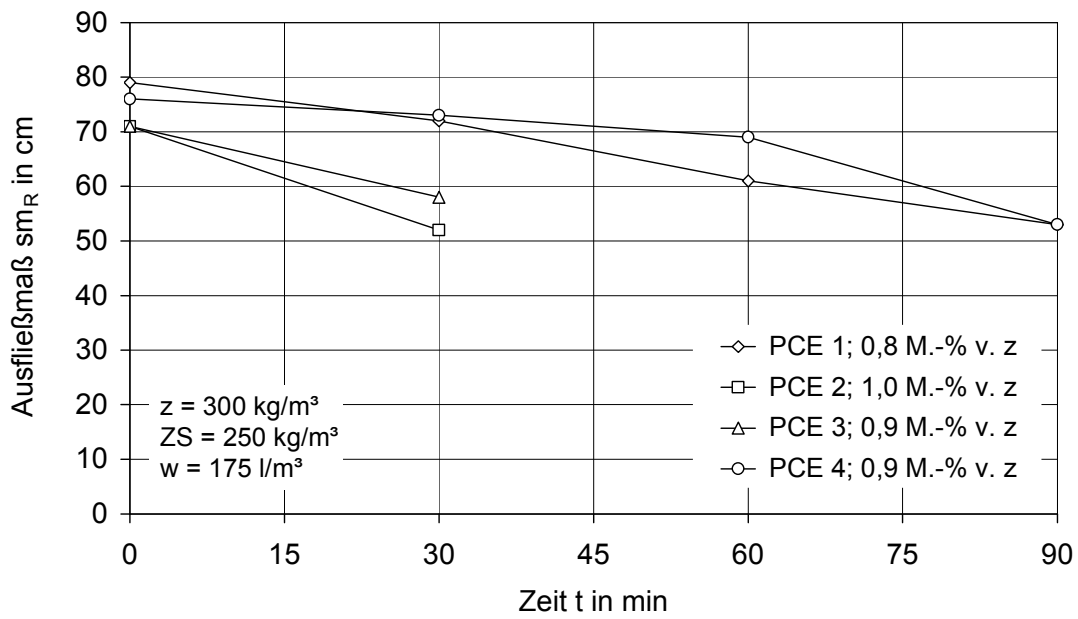


Bild B3 Untersuchte PCE-Fließmittel für die Untersuchung der Serie 1

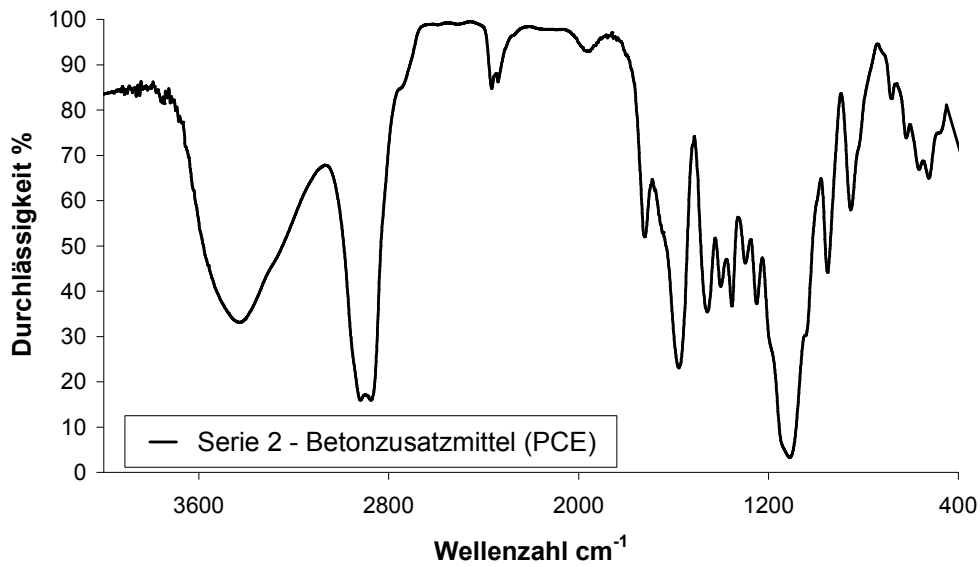


Bild B4: Infrarotspektrogramm des verwendeten Betonzusatzmittels für Serie 2 auf Wirkstoffbasis Polycarboxylatester



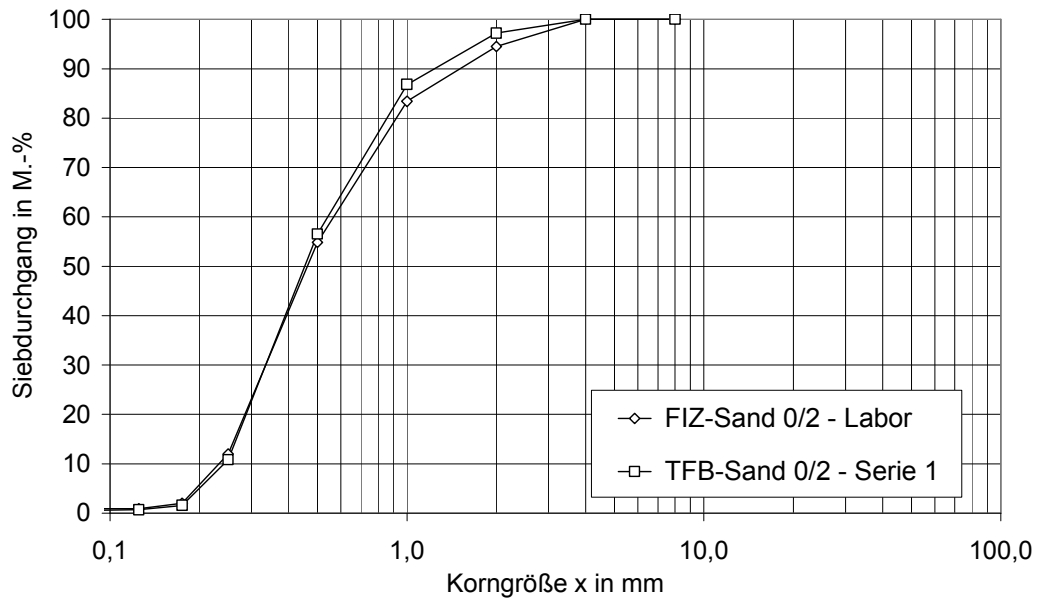


Bild B5: Sieblinie der verwendeten Sande 0/2 mm

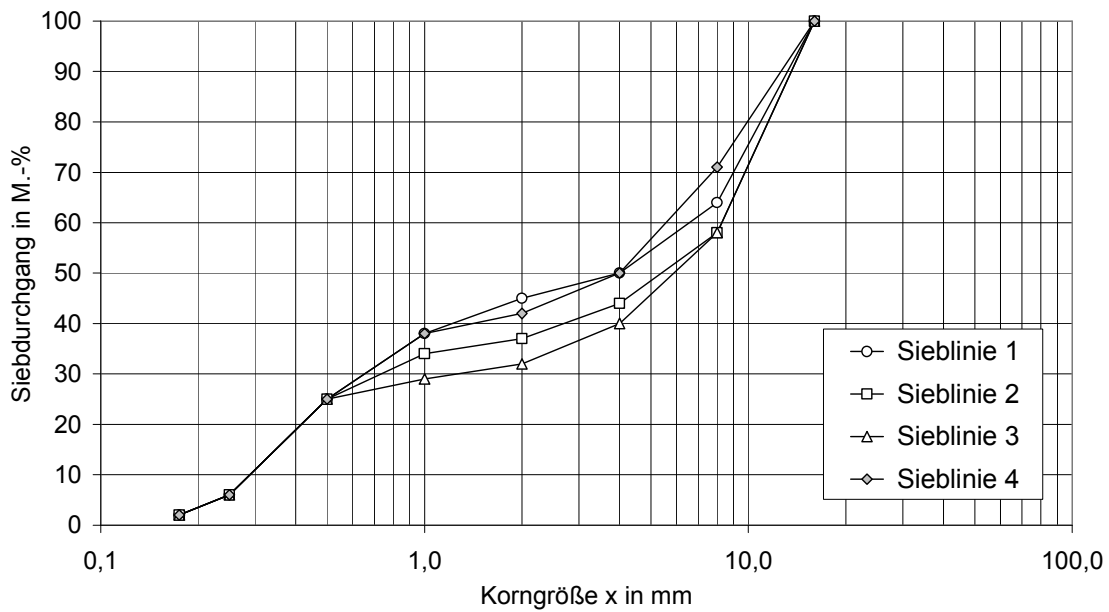


Bild B6: Untersuchte Sieblinien (in den weiteren Untersuchungen wurde Sieblinie 4 verwendet)

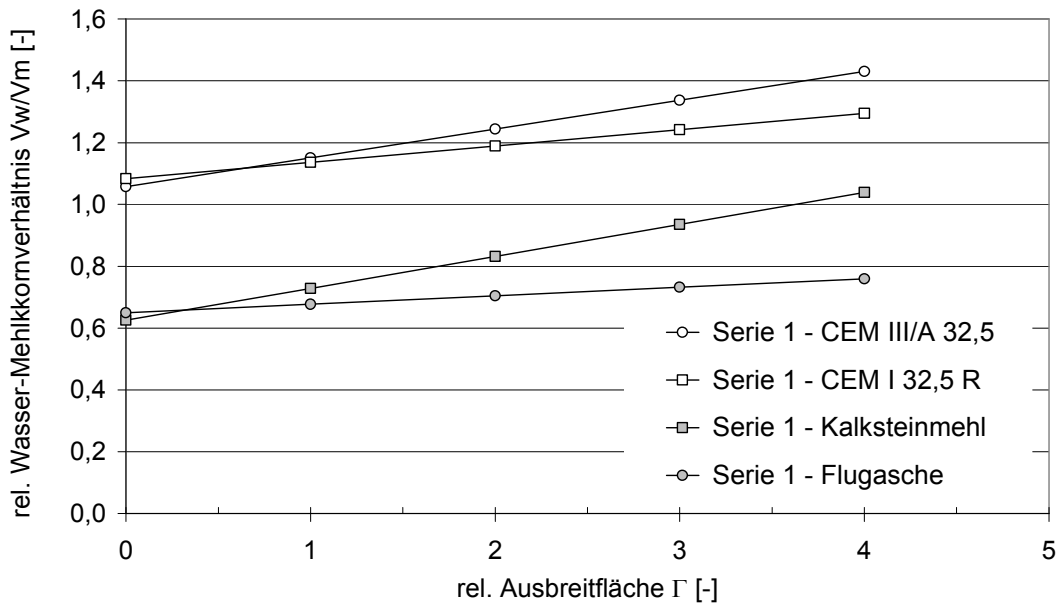


Bild B7:  $\beta_P$ -Wert Bestimmung an den Ausgangsstoffen der Serie 1

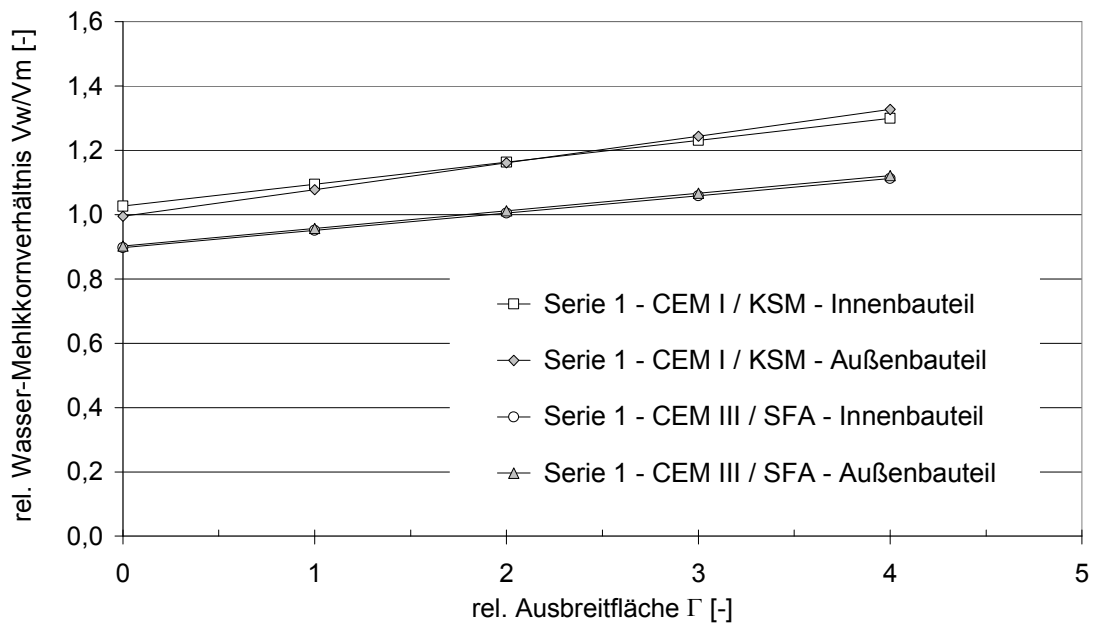


Bild B8:  $\beta_P$ -Wert Bestimmung an den Mehlkornmischungen der Serie 1

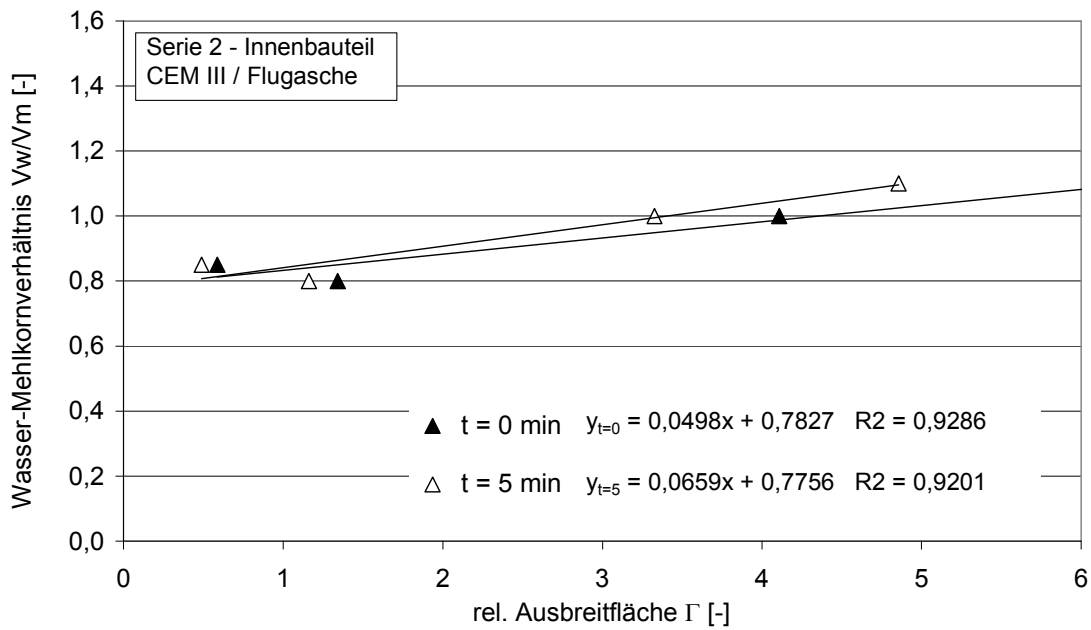


Bild B9:  $\beta_p$ -Wert Bestimmung am Mehlkorngemisch der Serie 2 CEM III / Flugasche für Innenbauteilbedingungen

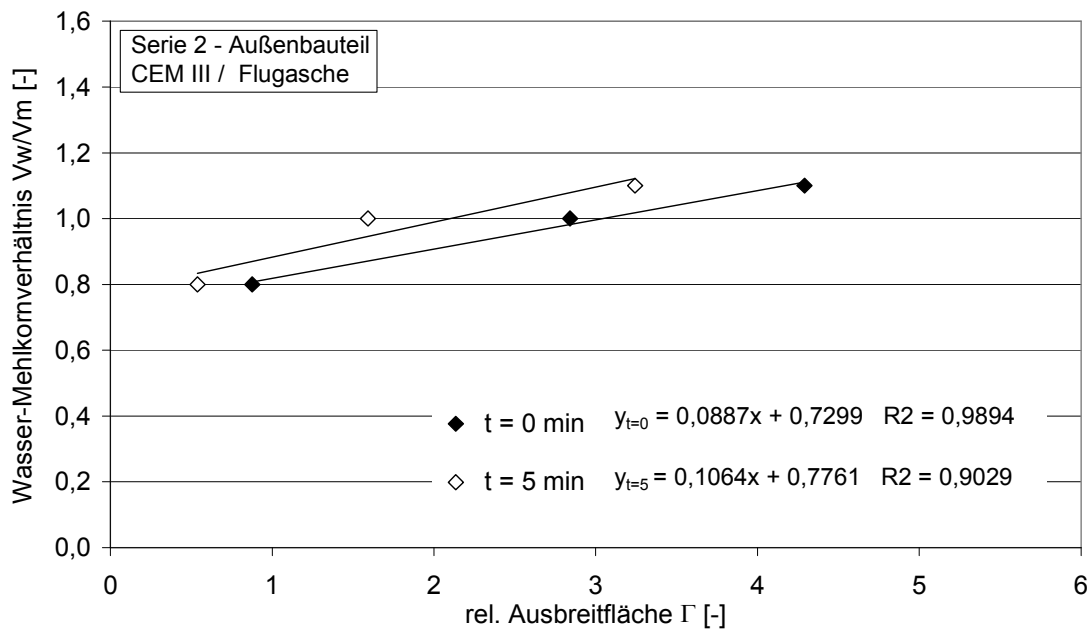


Bild B10:  $\beta_p$ -Wert Bestimmung am Mehlkorngemisch der Serie 2 CEM III / Flugasche für Innenbauteilbedingungen

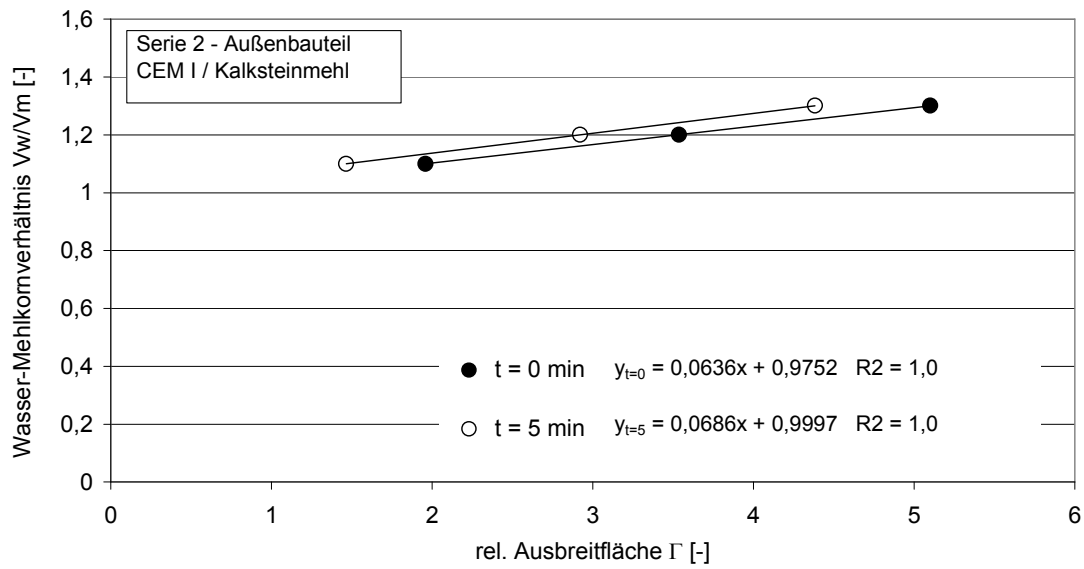


Bild B11:  $\beta_p$ -Wert Bestimmung am Mehlkorngemisch der Serie 2 CEM I / Kalksteinmehl für Außenbauteilbedingungen

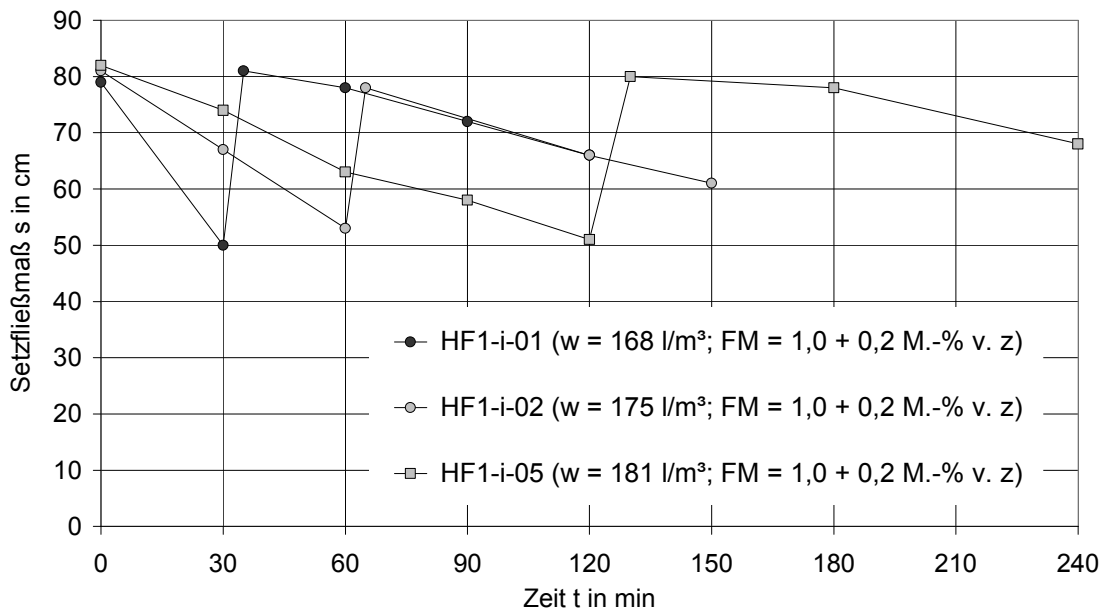


Bild B12: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone HF1-i-01, -02 und -05 mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten

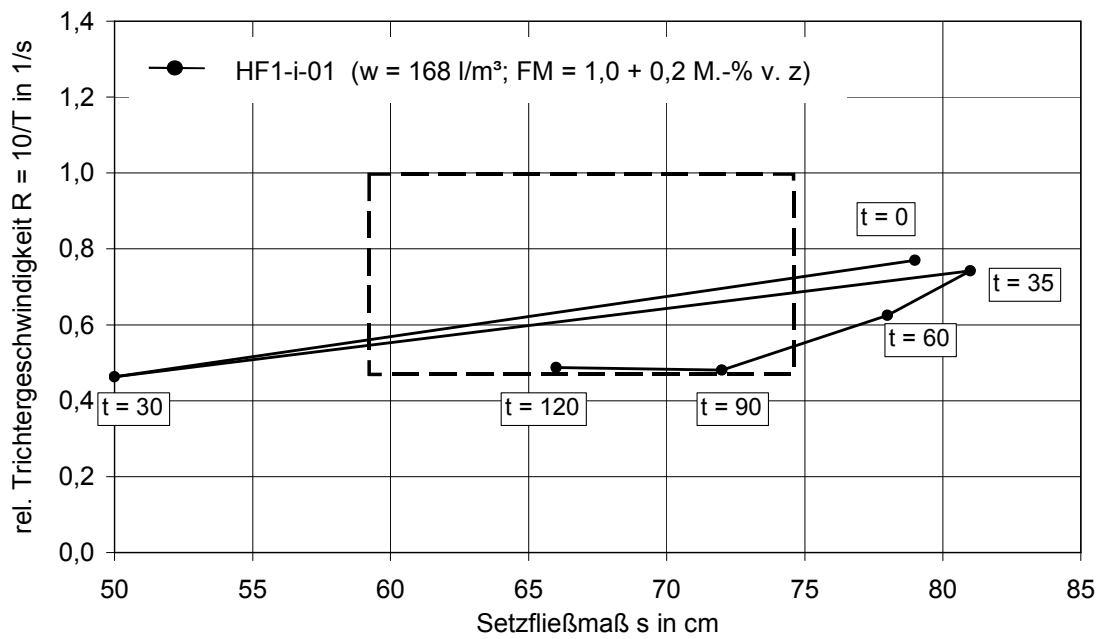


Bild B13: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-i-01 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 30 min

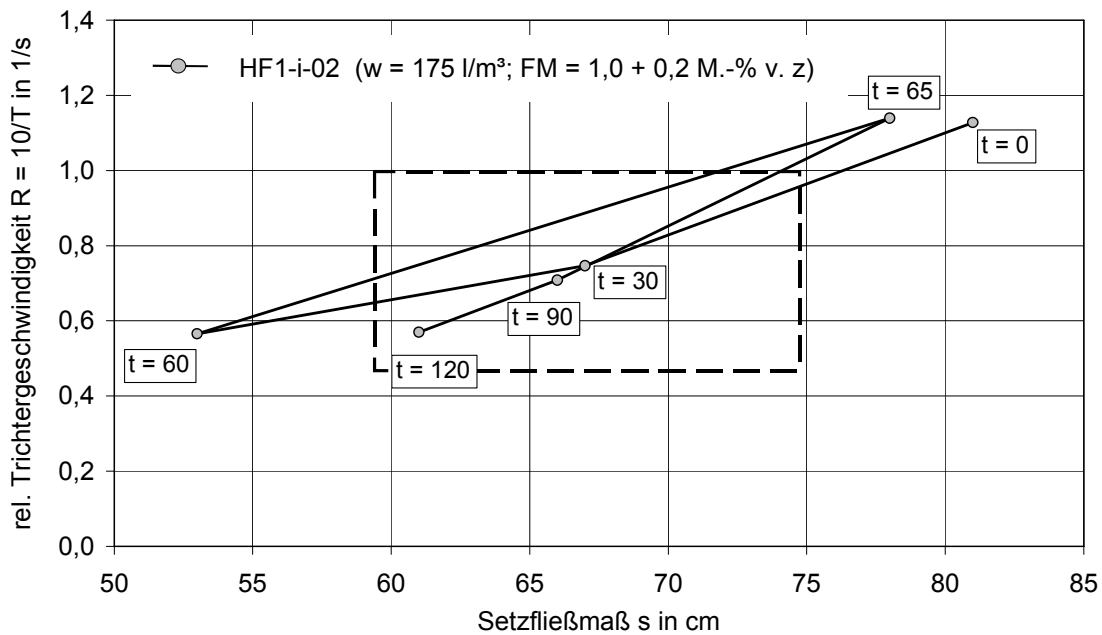


Bild B14: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-i-02 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 60 min

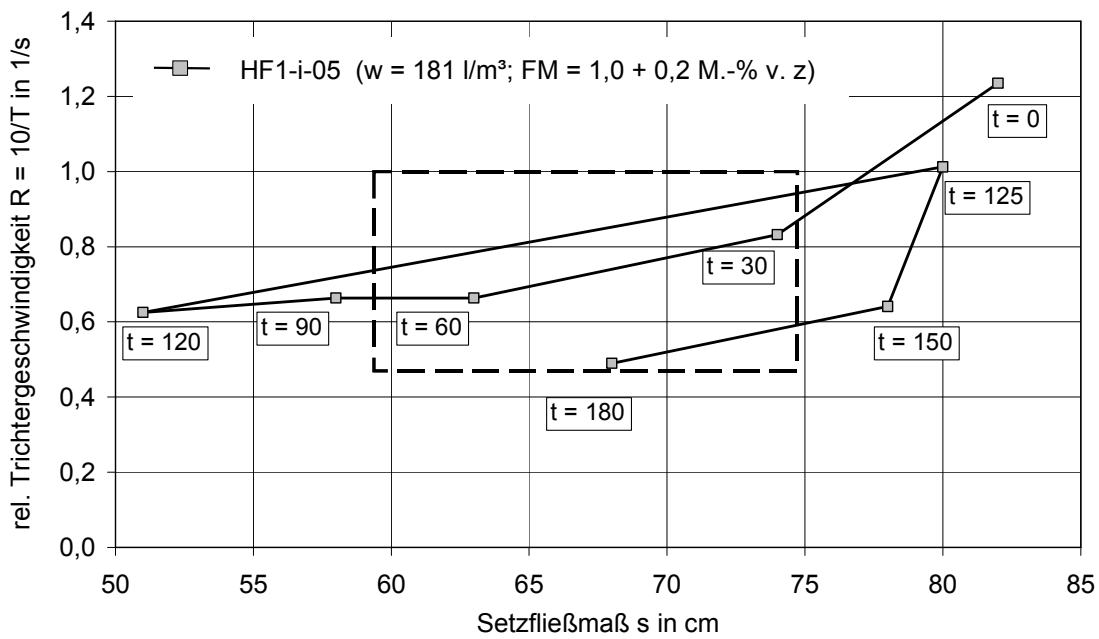


Bild B15: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-i-05 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 120 min

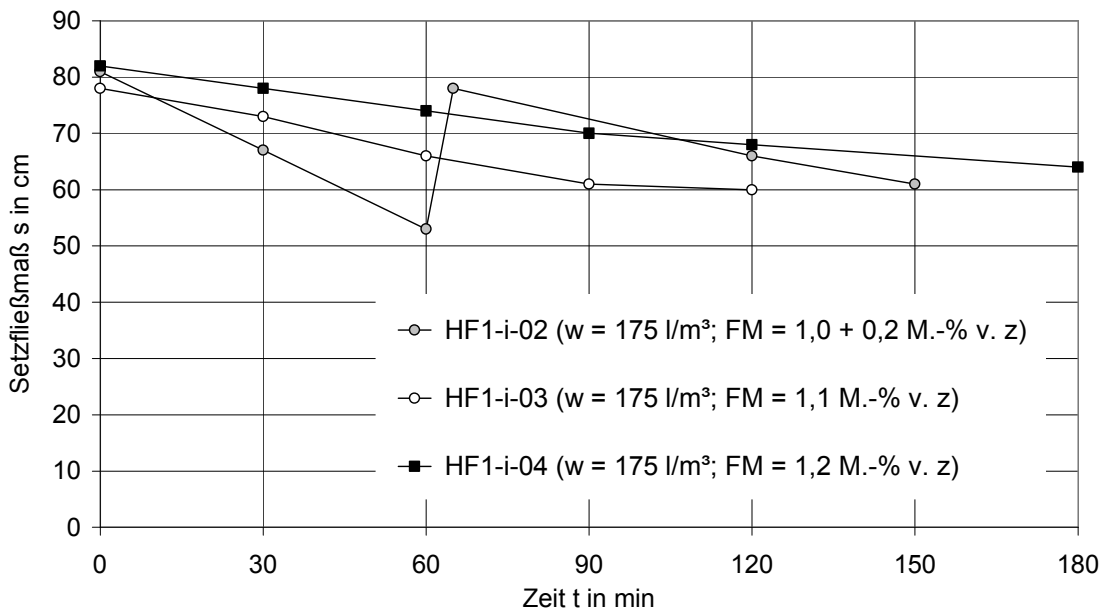


Bild B16: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone HF1-i-02, -03 und -04 mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten

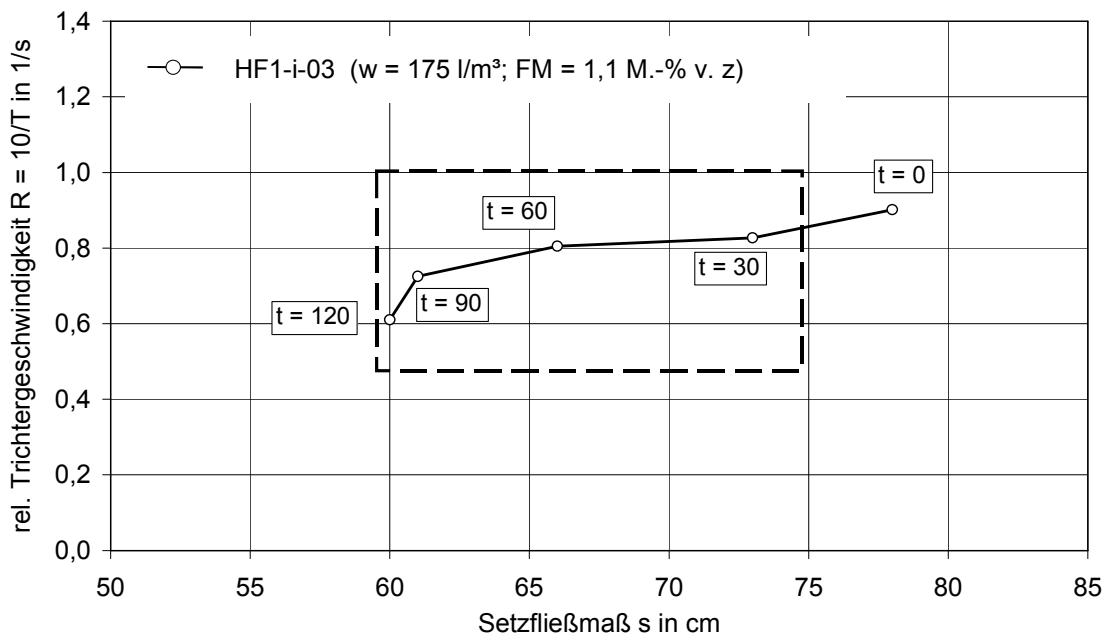


Bild B17: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-i-03

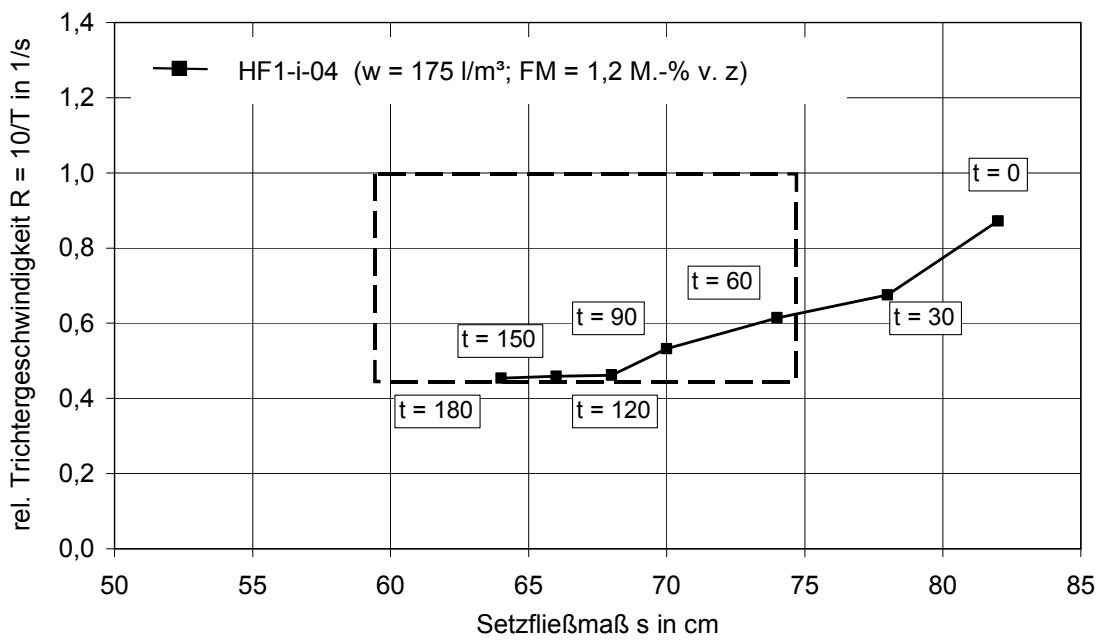


Bild B18: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-i-04

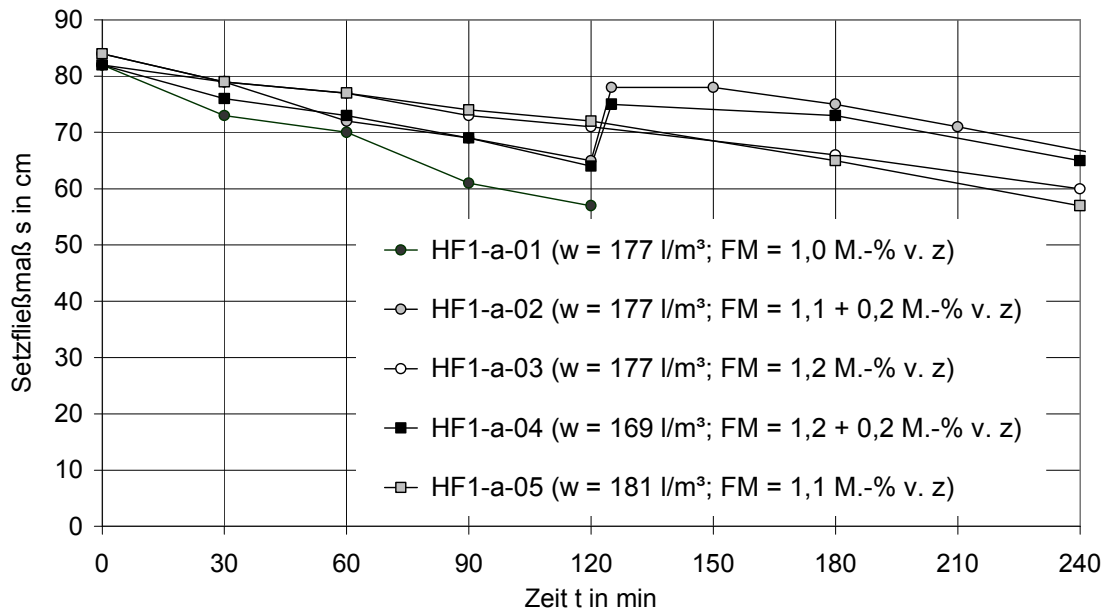


Bild B19: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone HF1-a mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten

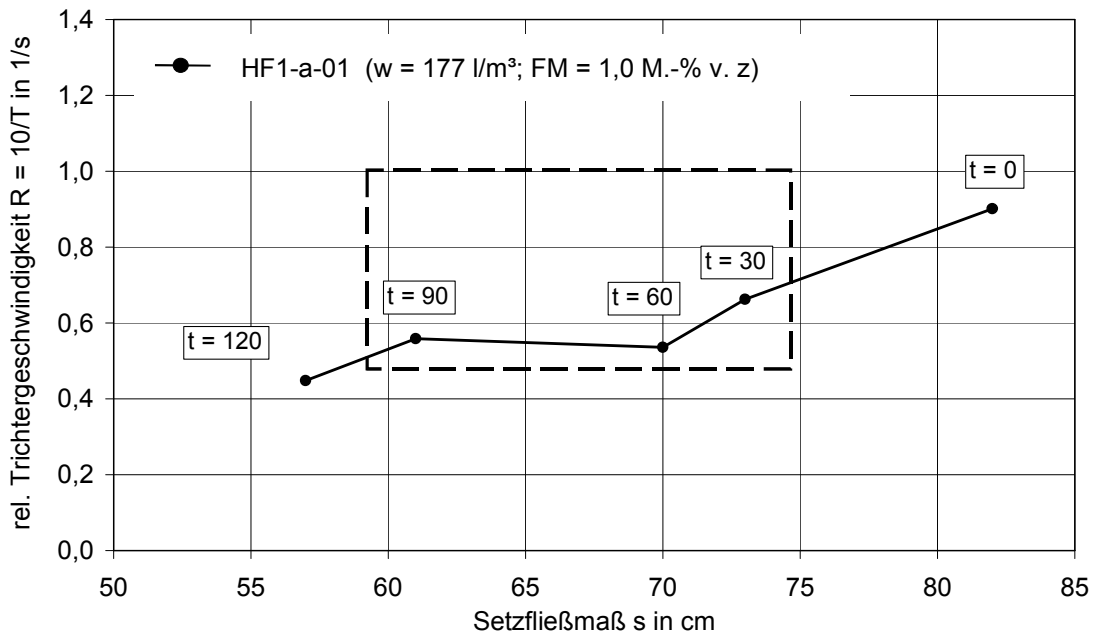


Bild B20: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-a-01



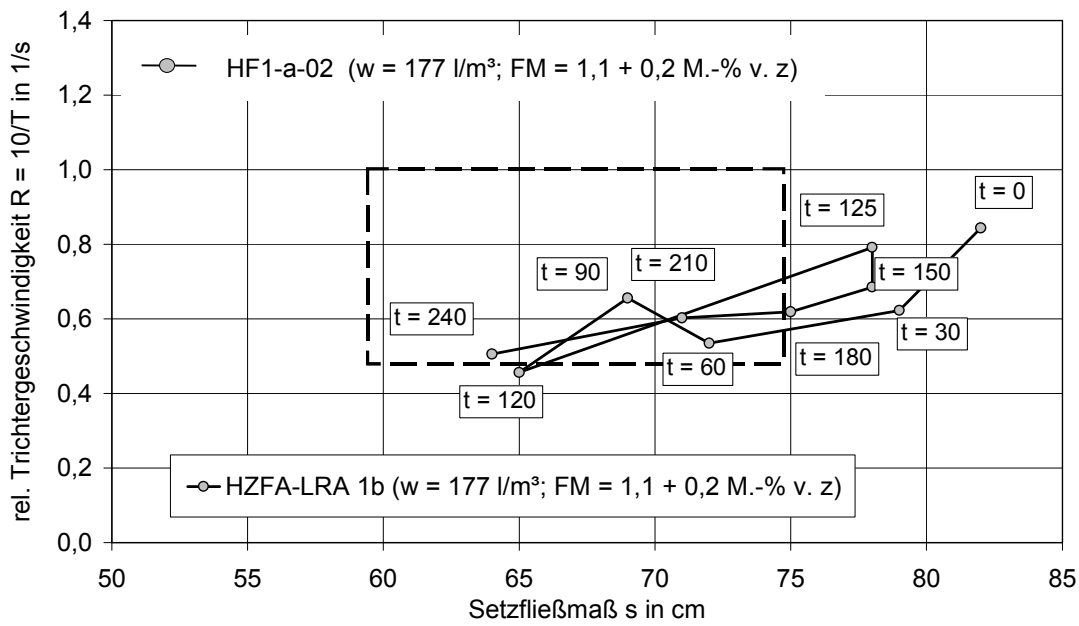


Bild B21: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-a-02 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 120 min

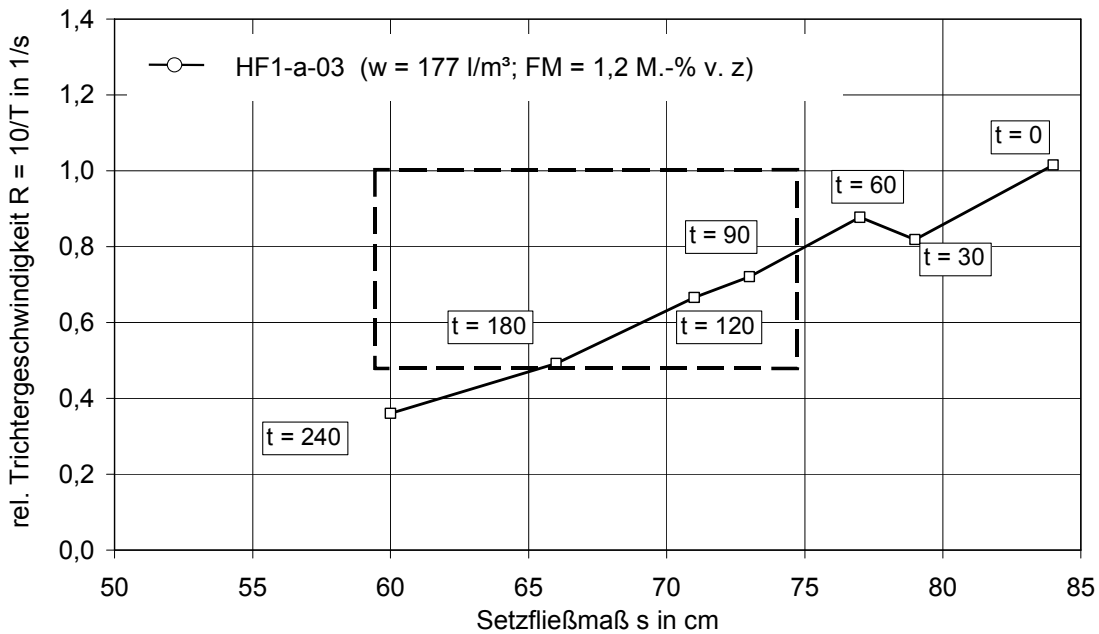


Bild B22: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-a-03

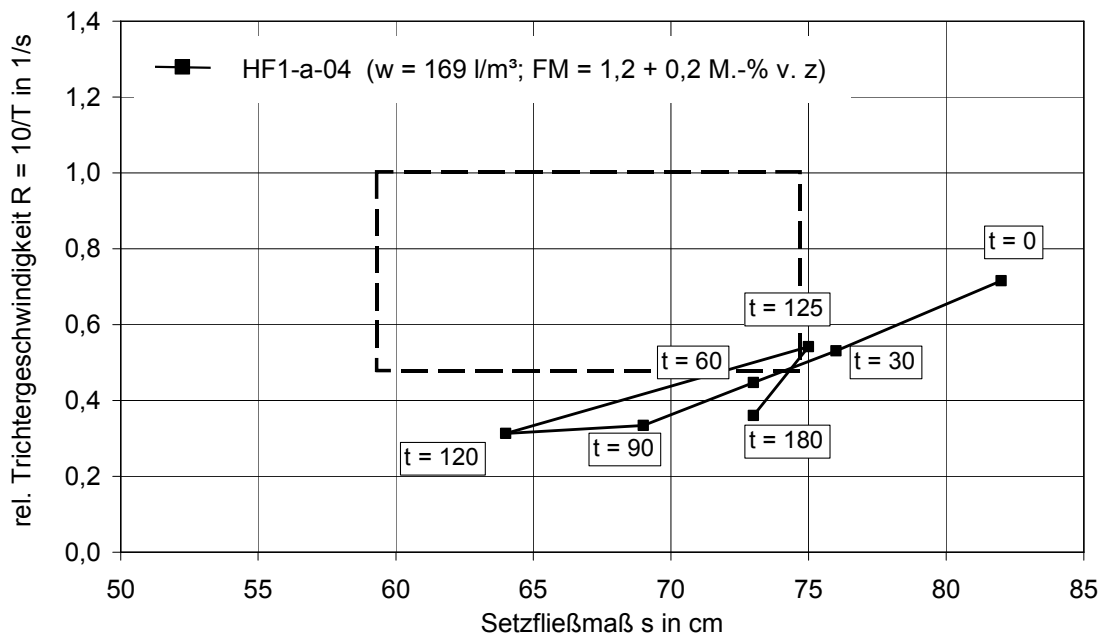


Bild B23: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-a-04 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 120 min

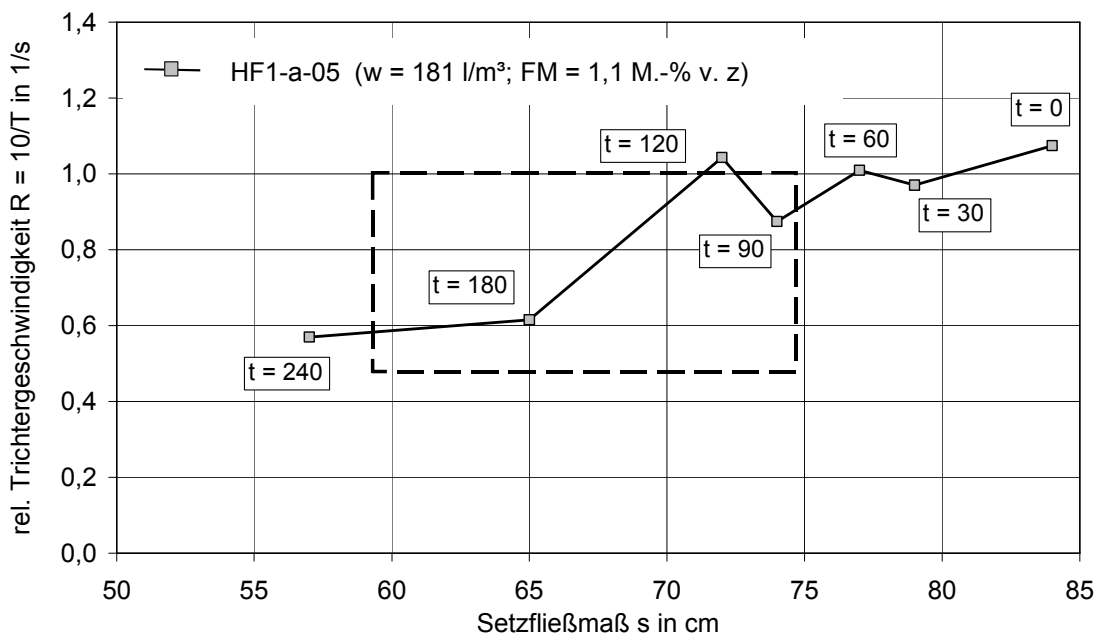


Bild B24: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für HF1-a-05

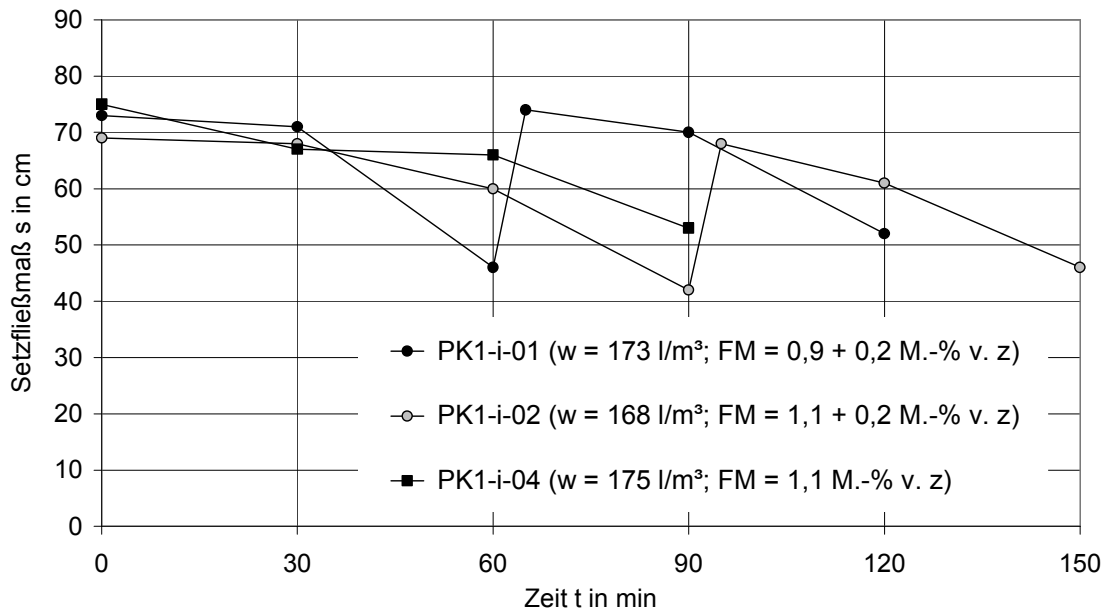


Bild B25: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone PK1-i mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten

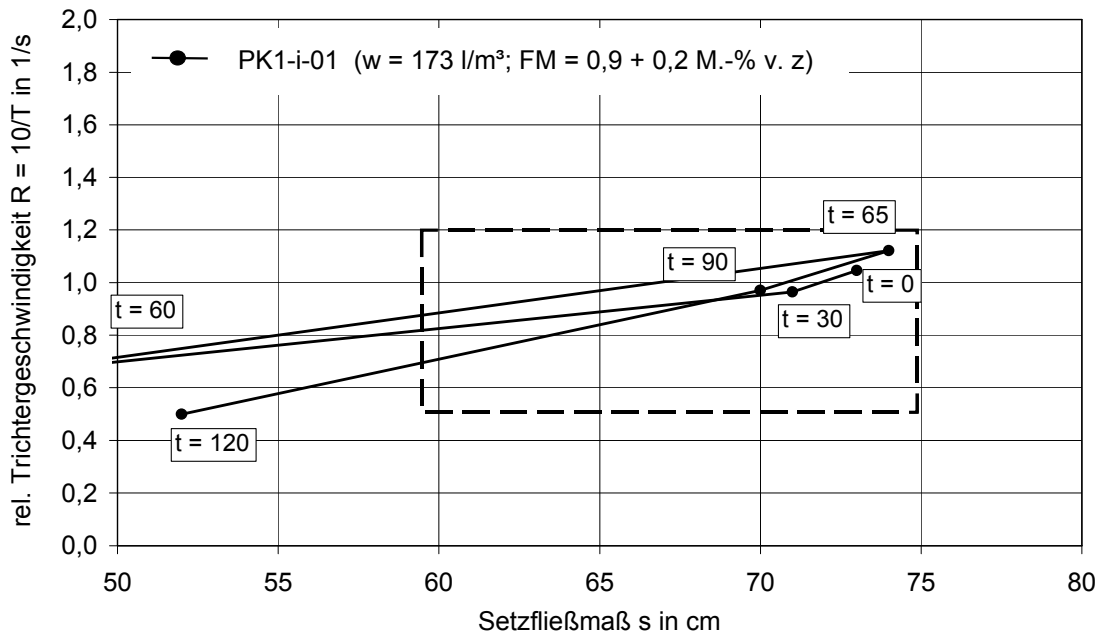


Bild B26: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-01 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 60 min

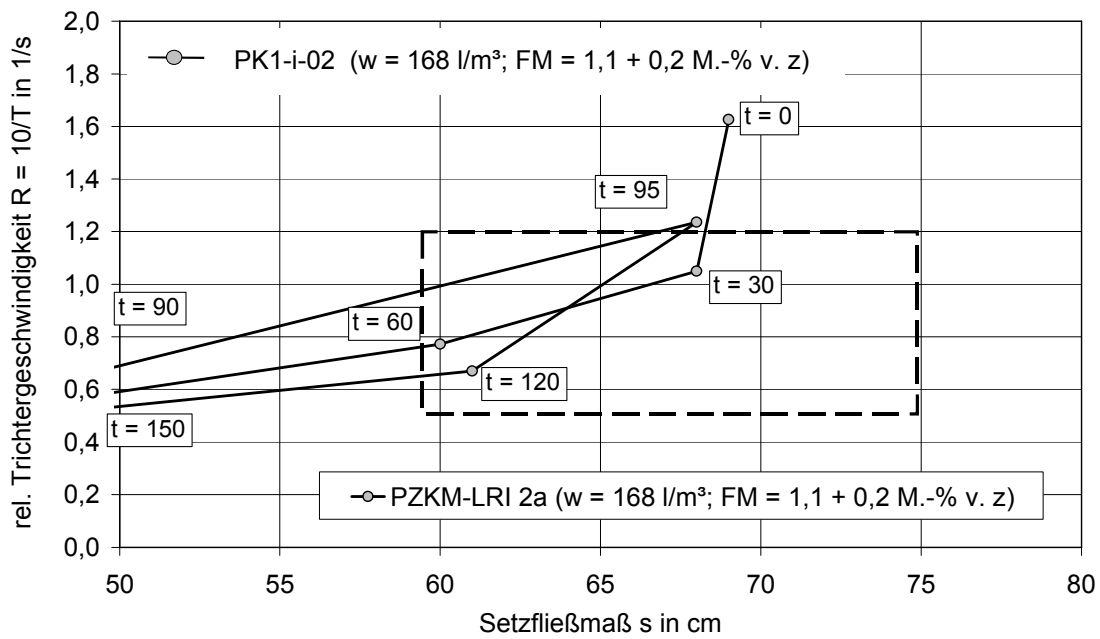


Bild B27: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-02 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 90 min

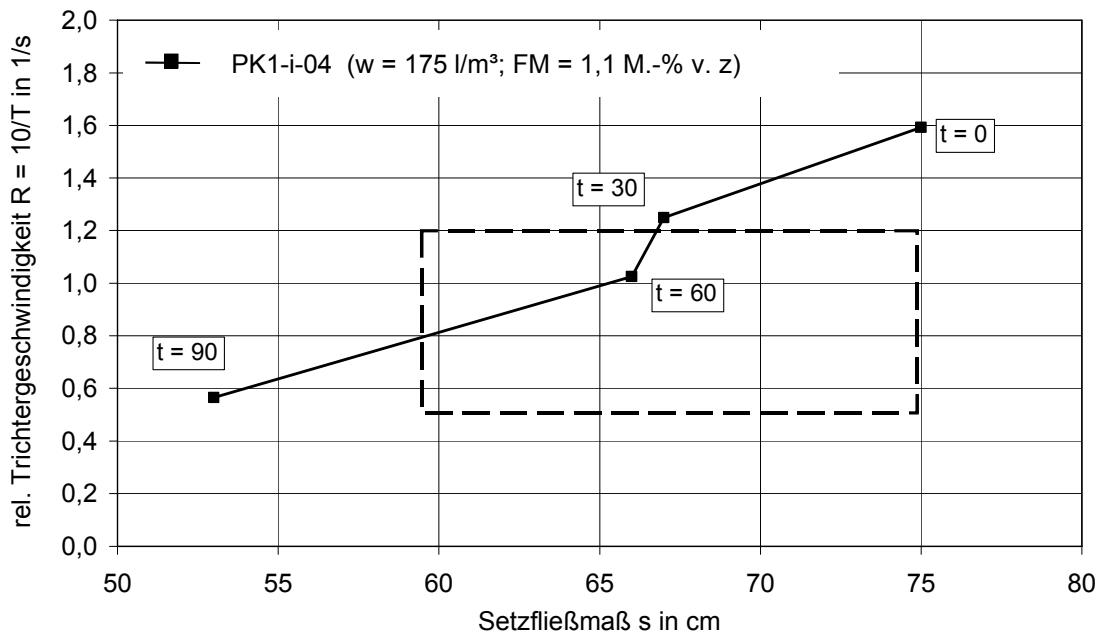


Bild B28: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-04

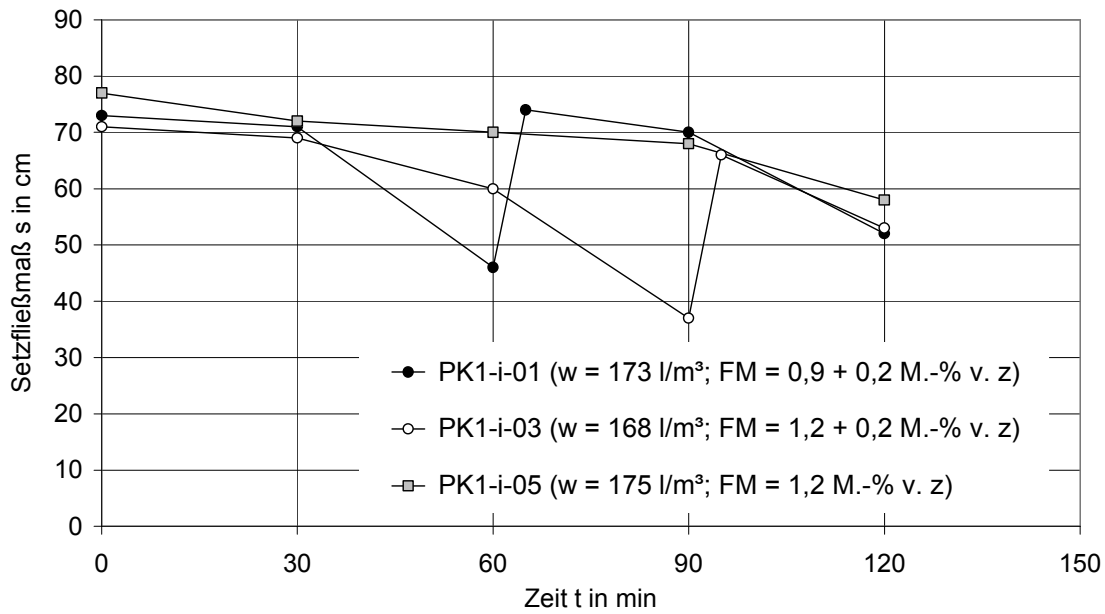


Bild B29: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone PK1-i mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten

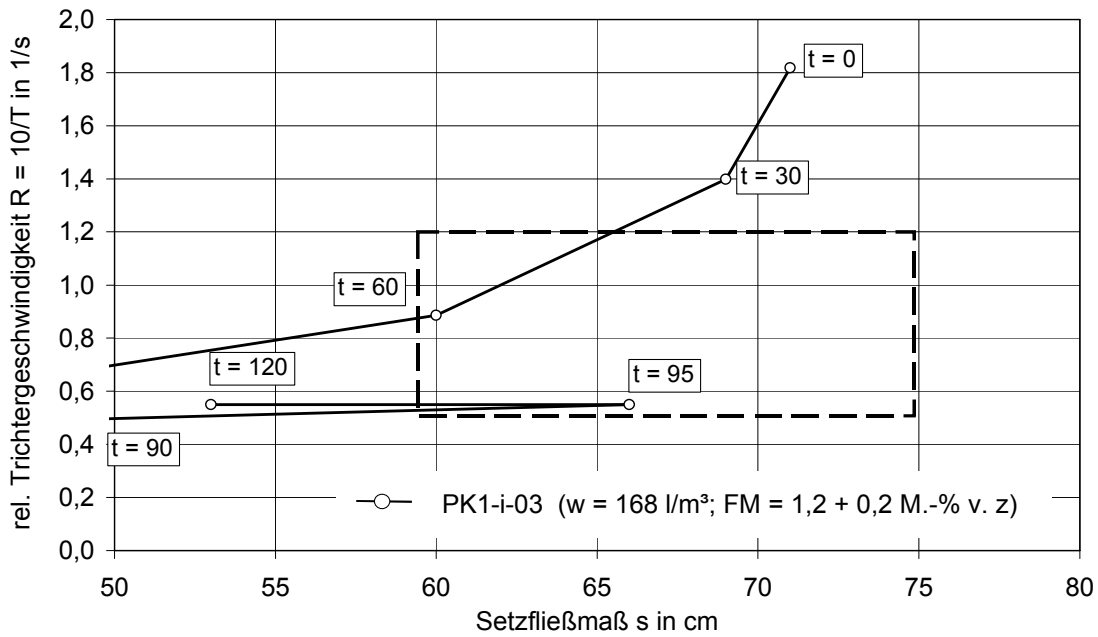


Bild B30: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-03 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 90 min

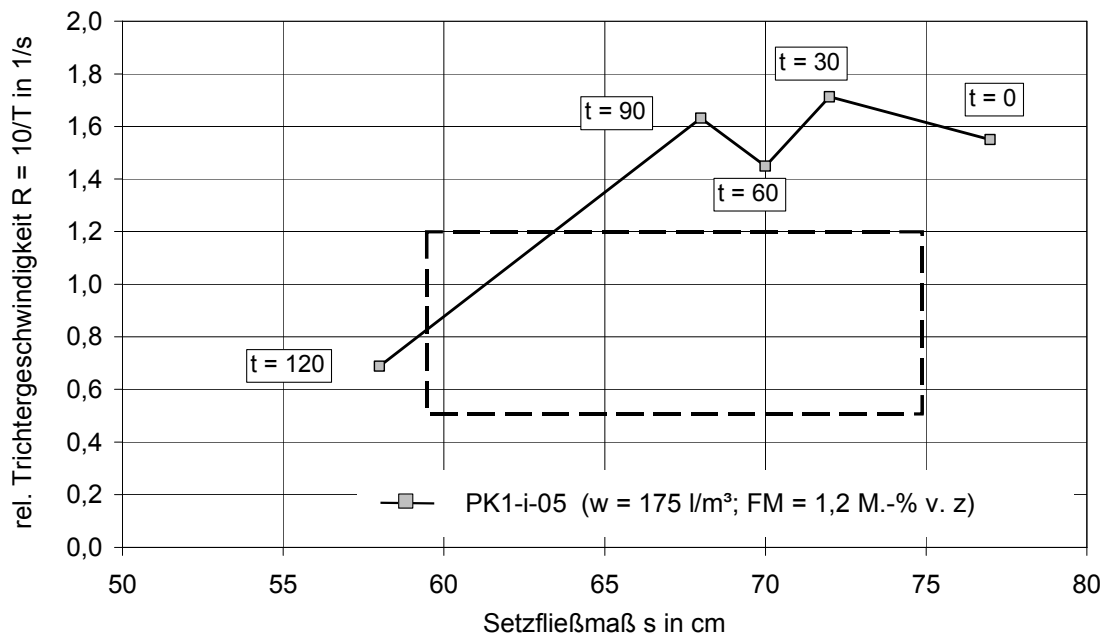


Bild B31: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-05

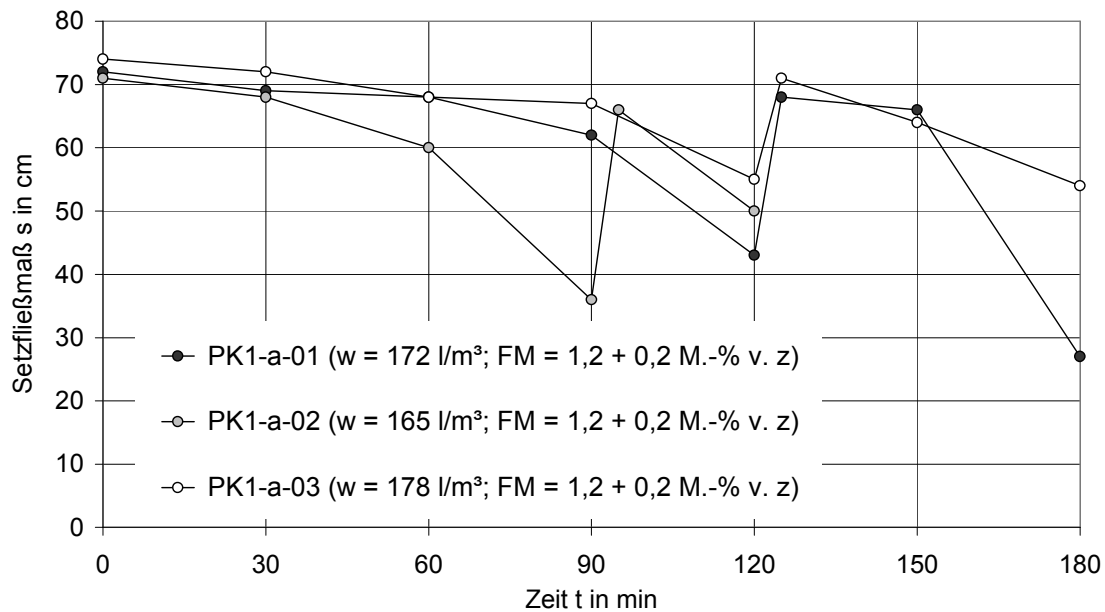


Bild B32: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone PK1-a mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten

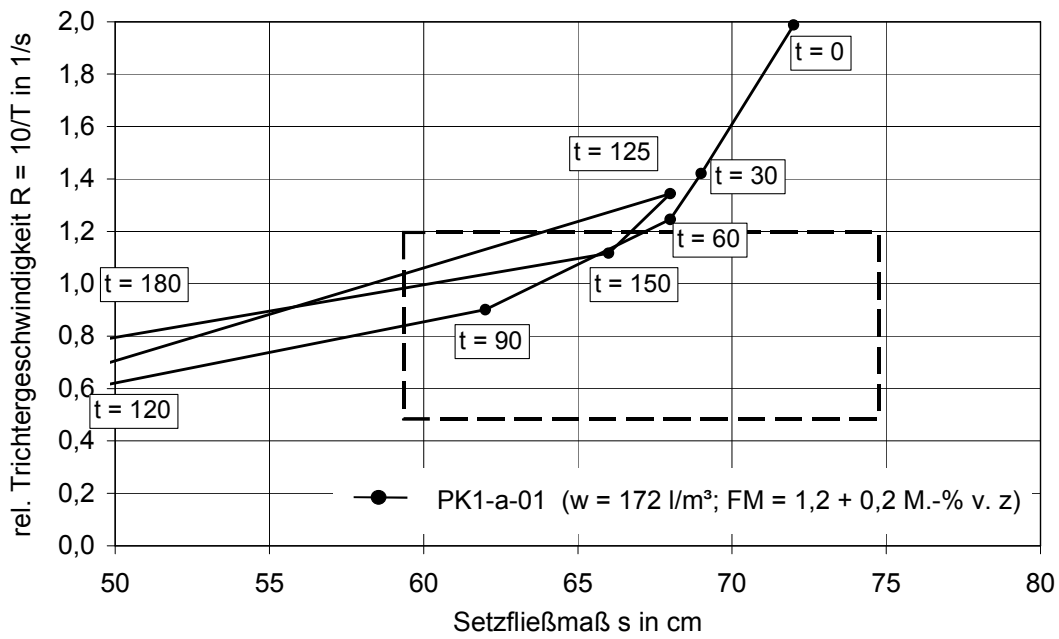


Bild B33: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-a-01 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 120 min

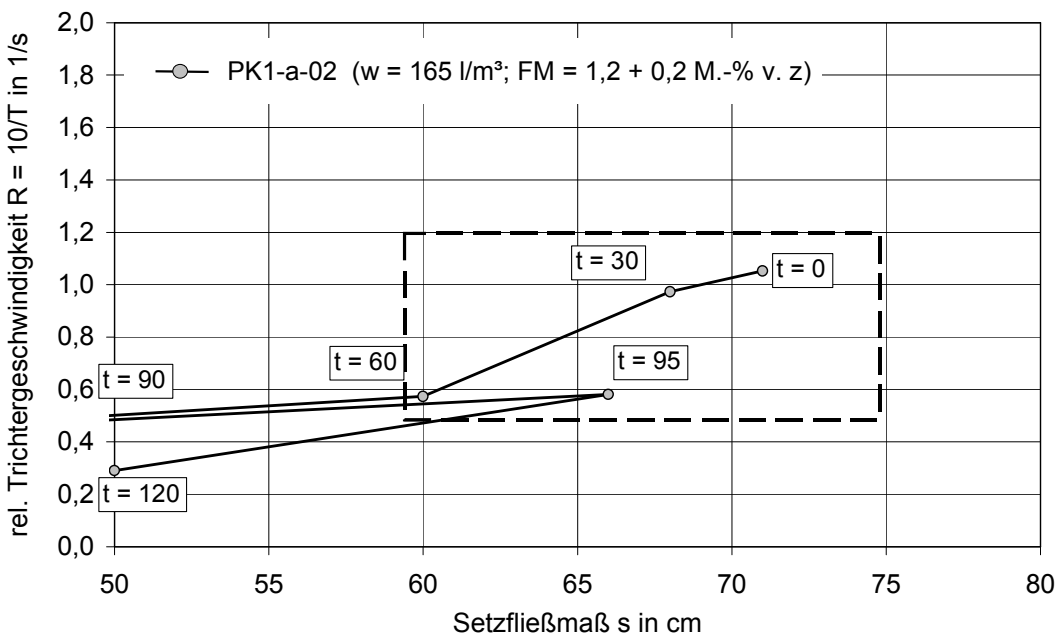


Bild B34: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-a-02 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 90 min

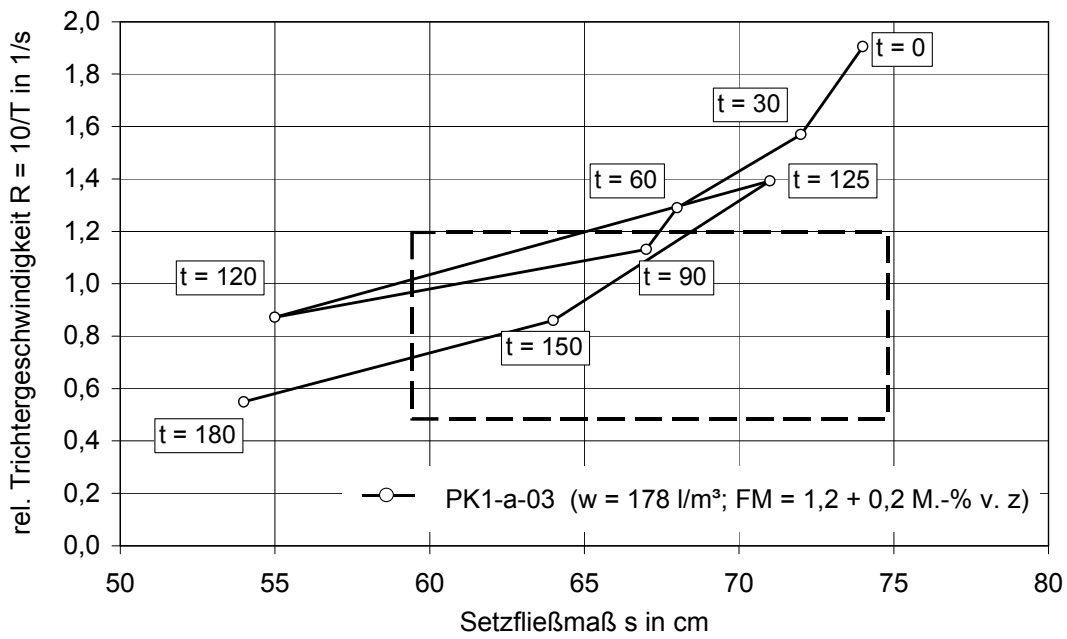


Bild B35: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-a-03 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 120 min

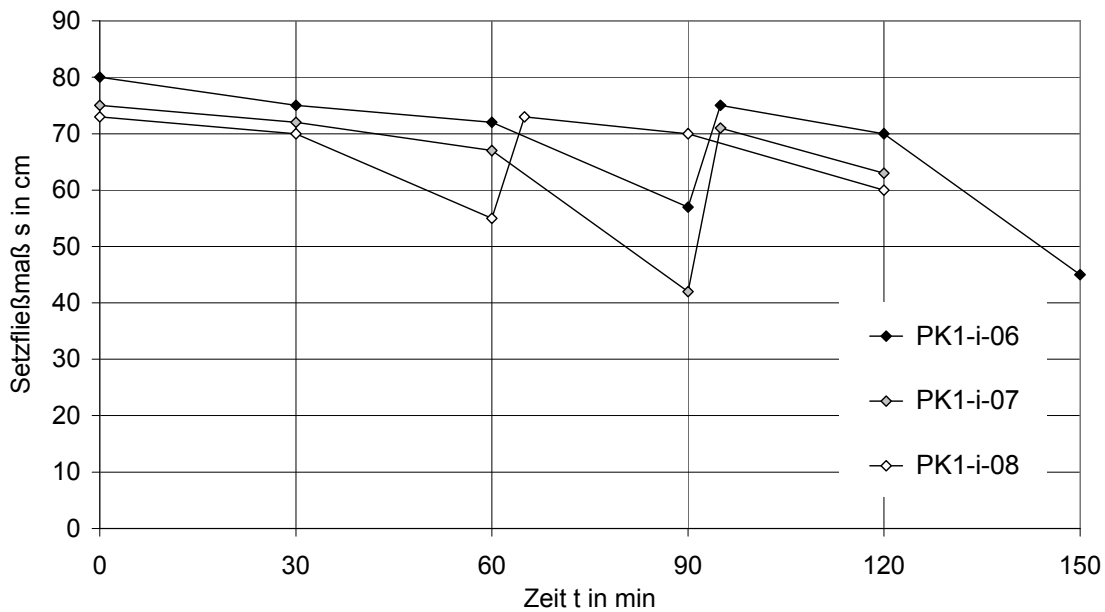


Bild B36: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone PK1-i-06, -07 und 08 mit erhöhtem Leimvolumen von rd. 380 l/m<sup>3</sup>



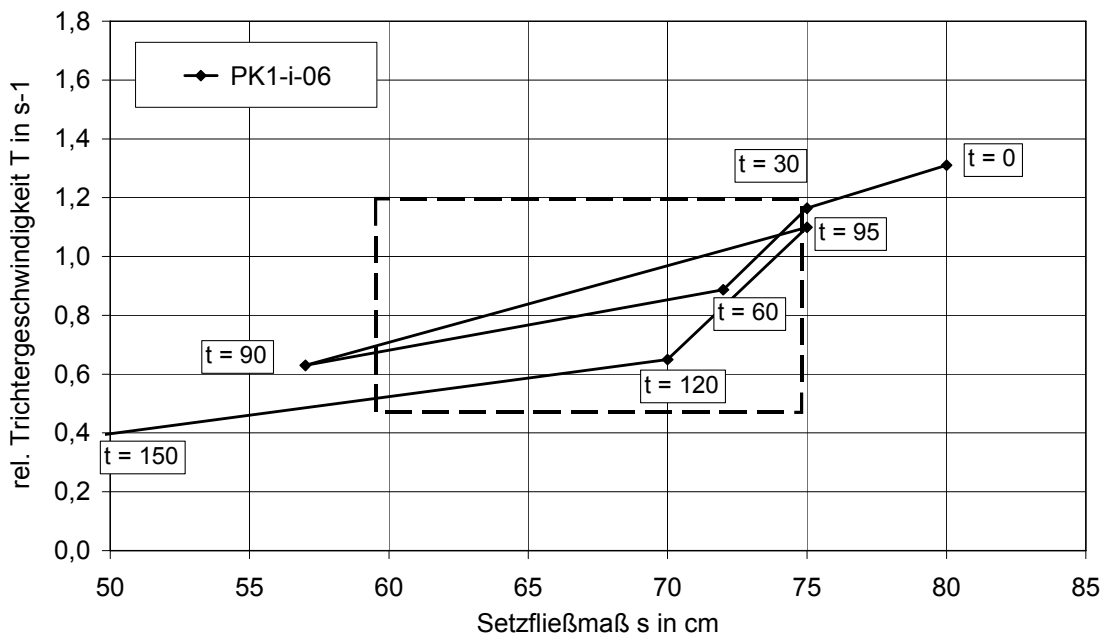


Bild B37: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-06 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 90 min

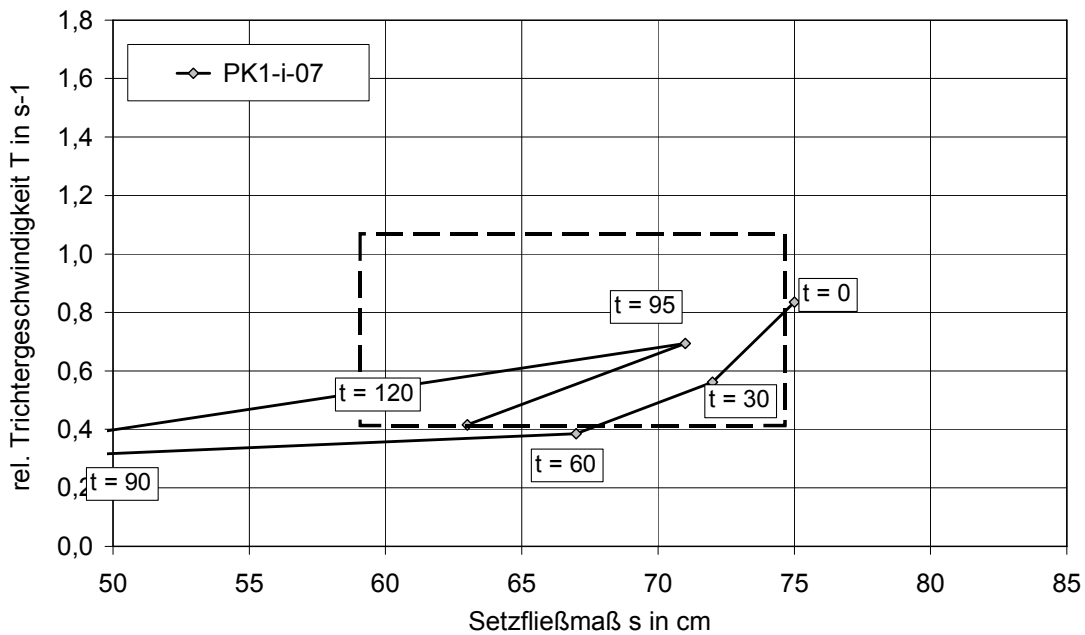


Bild B38: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-07 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 90 min

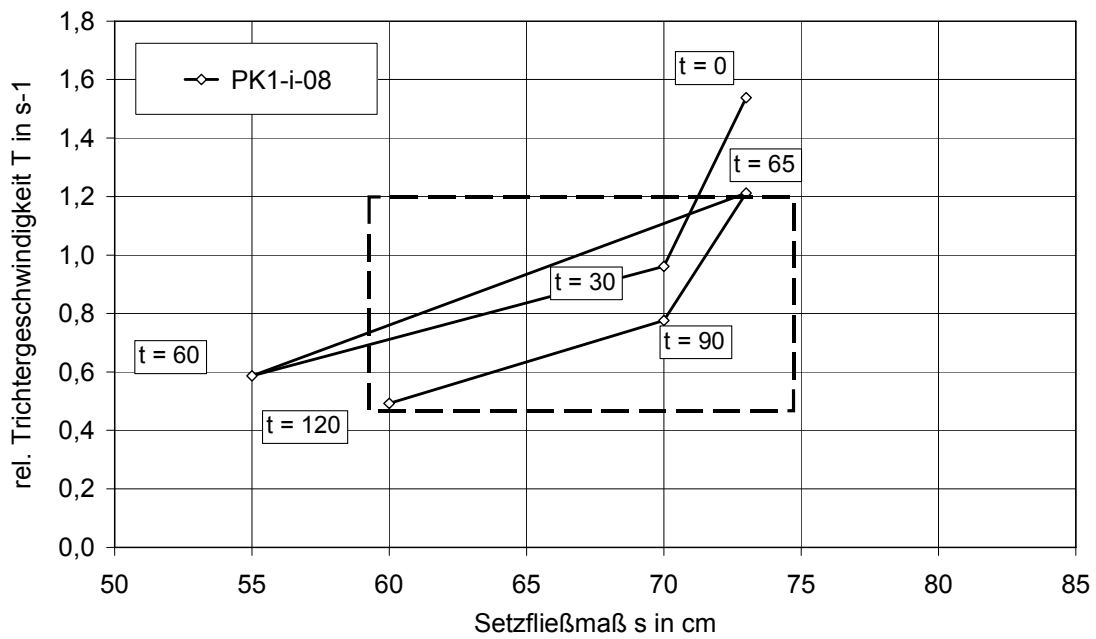


Bild B39: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-i-08 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 60 min

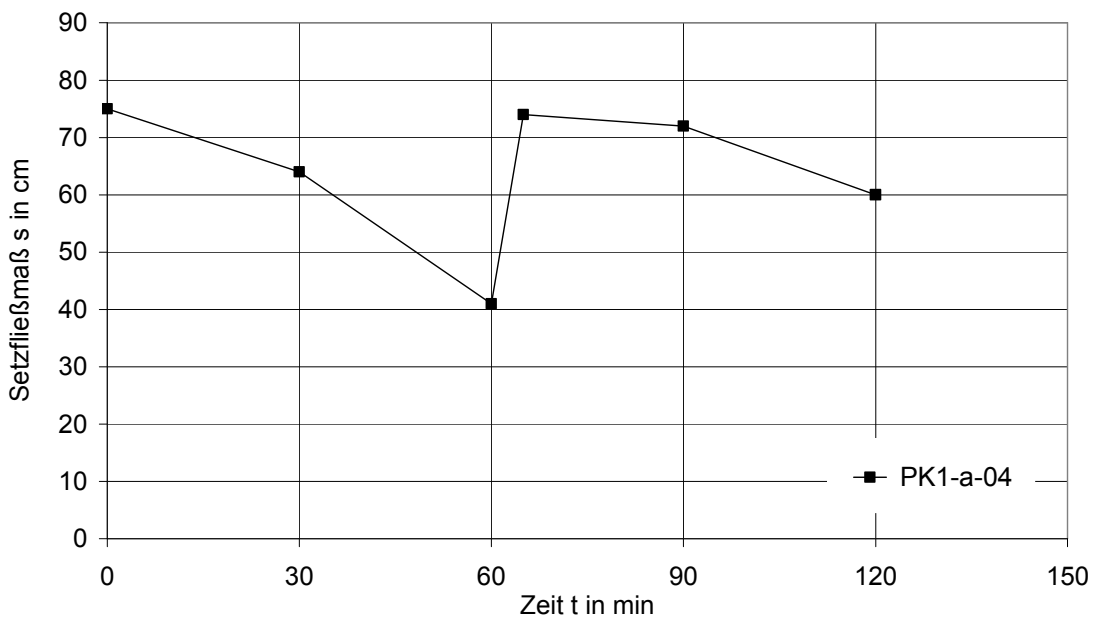


Bild B40: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für den Beton PK1-a-04 mit erhöhtem Leimvolumen von rd. 380 l/m³

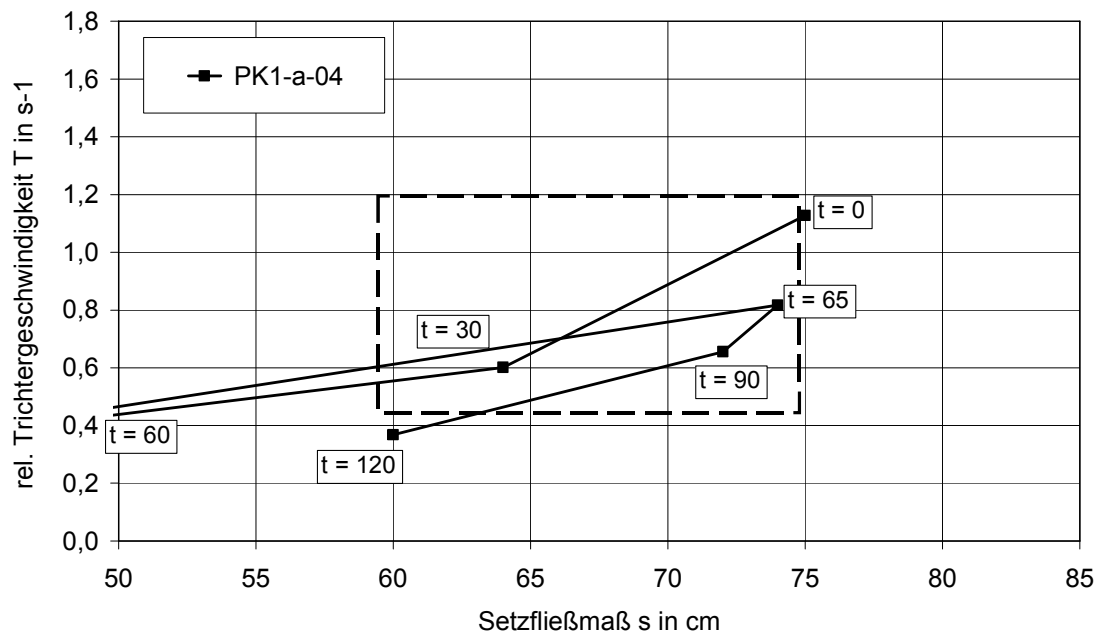


Bild B41: Darstellung der rel. Trichtergeschwindigkeit über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für PK1-a-04 mit Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 60 min

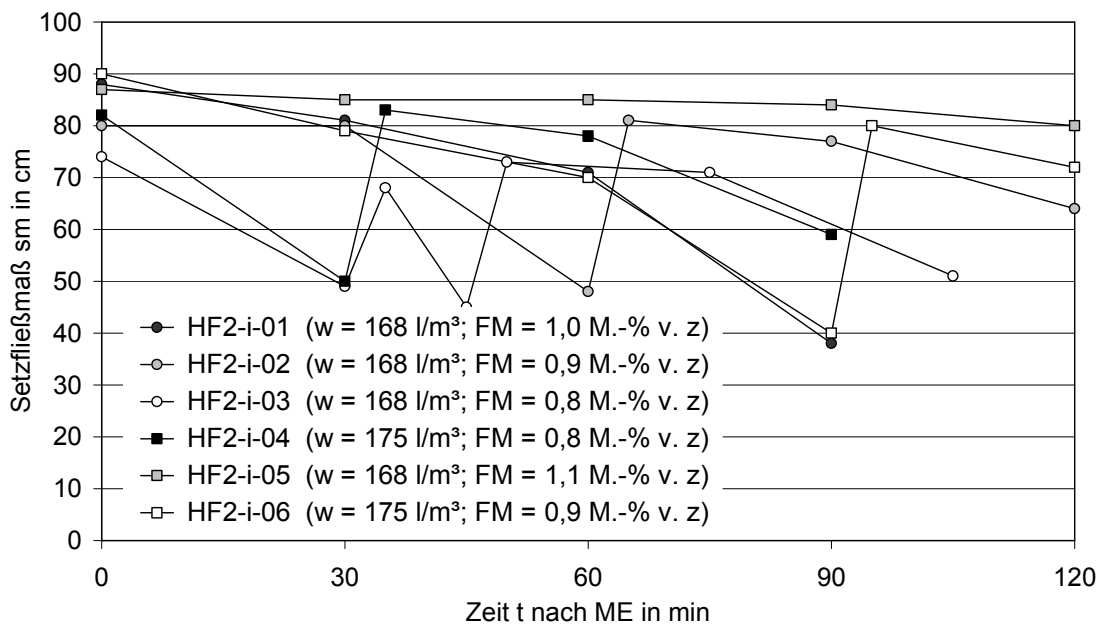


Bild B42: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone HF2-i mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten

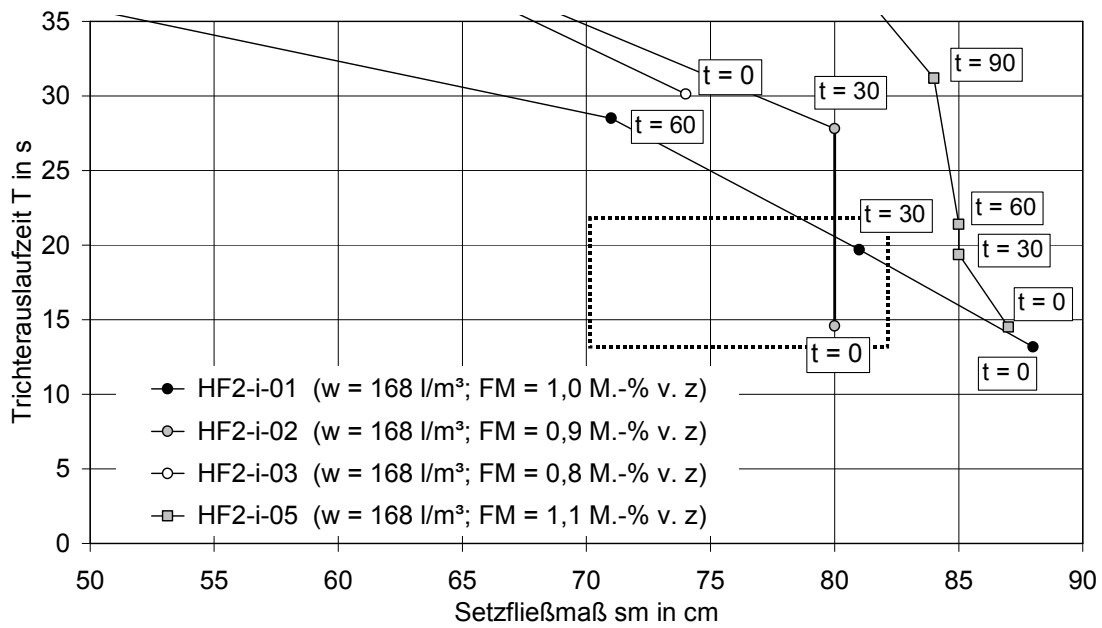


Bild B43: Verlauf der Verarbeitbarkeit der Betone HF2-i-01, -02, -03 und -05

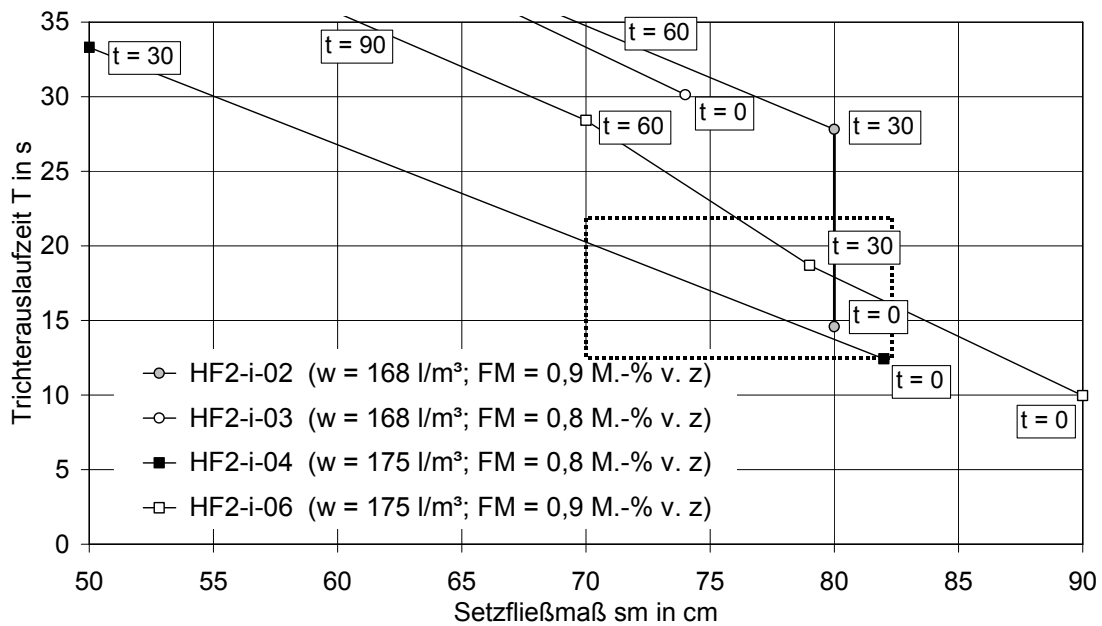


Bild B44: Verlauf der Verarbeitbarkeit der Betone HF2-i-02 und -03, sowie -04 und -06

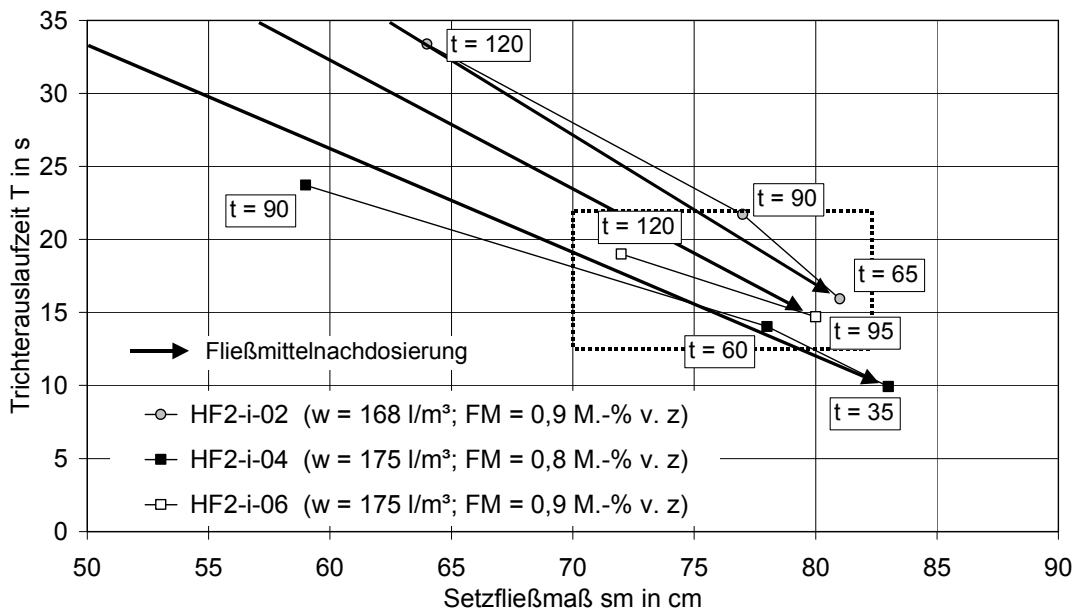


Bild B45: Einfluss der Fließmitteldosierung auf die Verarbeitbarkeit der Betone HF2-i-02, -04 und -06

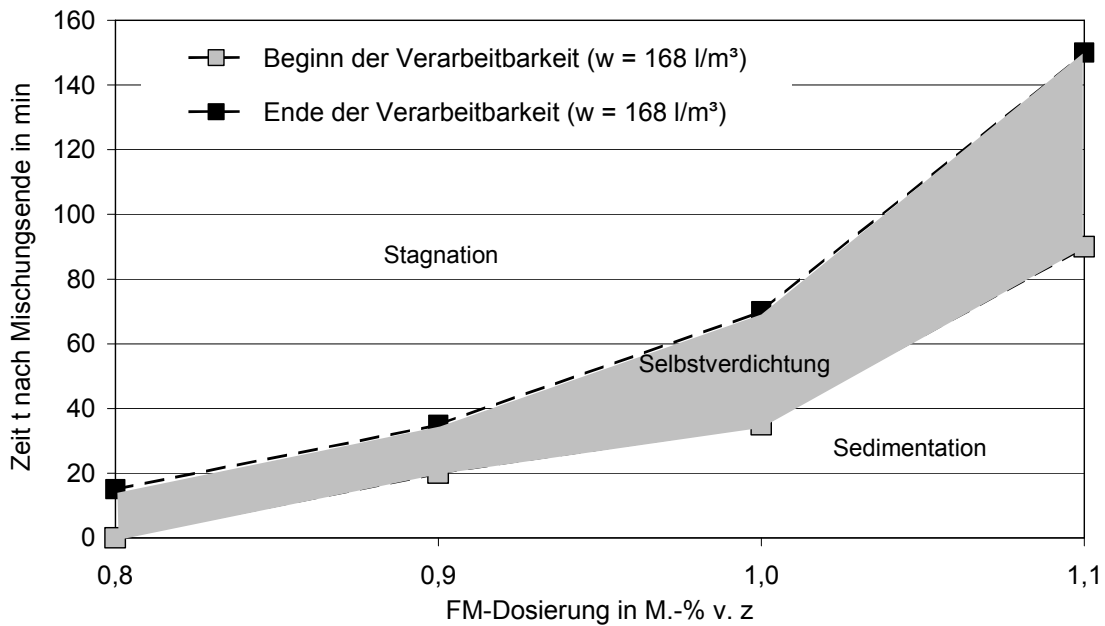


Bild B46: Einfluss der Fließmitteldosierung auf den Beginn der Verarbeitbarkeit und die Verarbeitbarkeitszeit für Betone der Serie HF2-i mit einem Wassergehalt von 168 l/m³

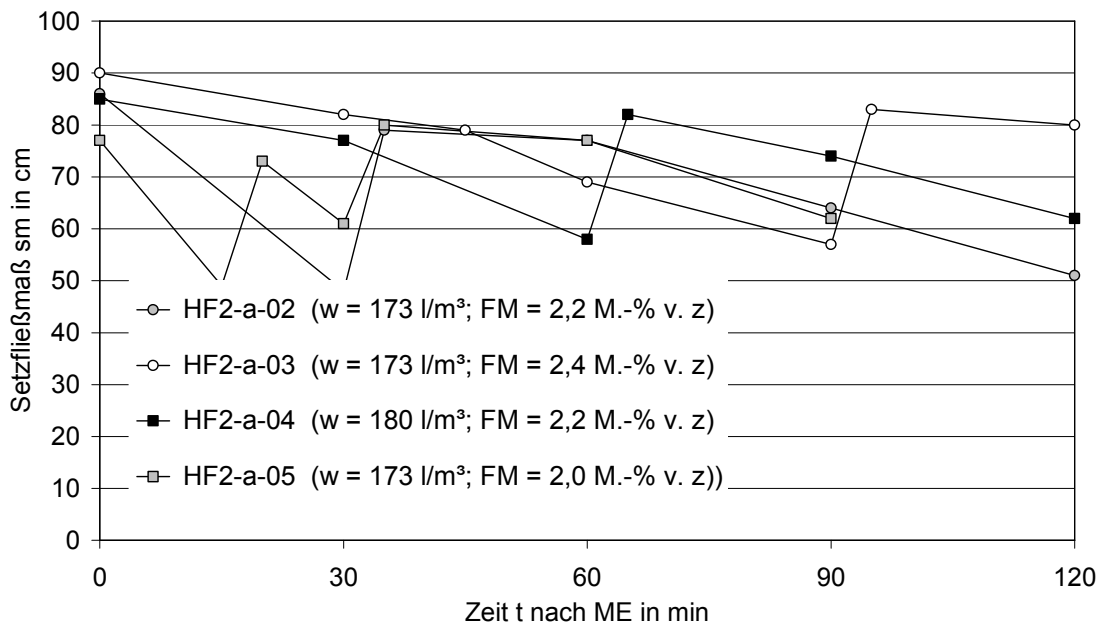


Bild B47: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone HF2-a mit unterschiedlichen Wasser- und Fließmittelgehalten

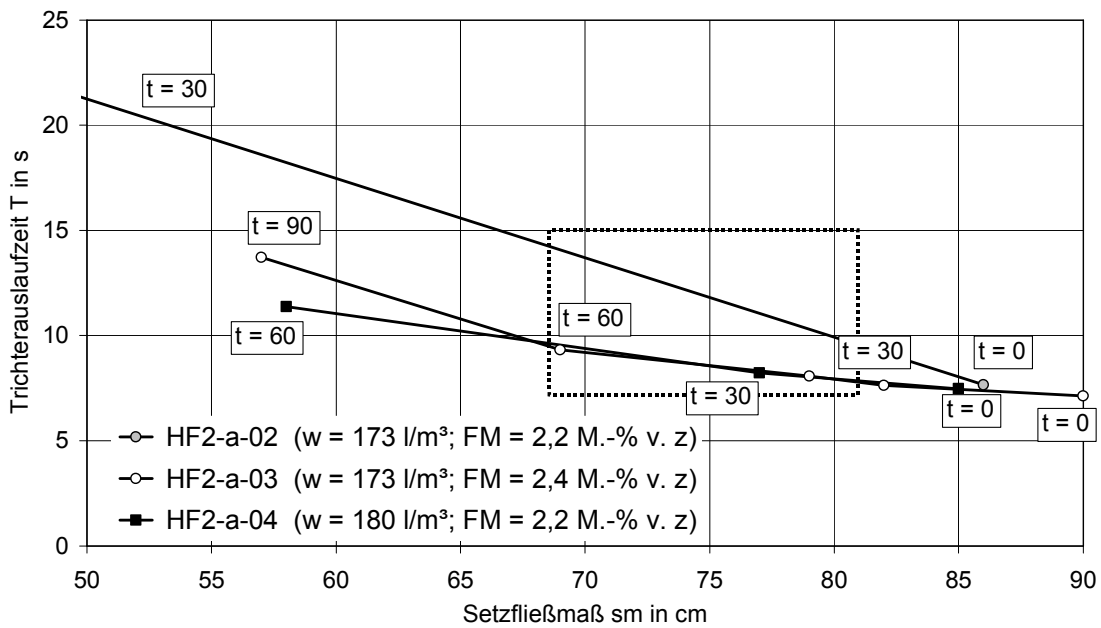


Bild B48: Verlauf der Verarbeitbarkeit der Betone HF2-a-02, -03 und -04

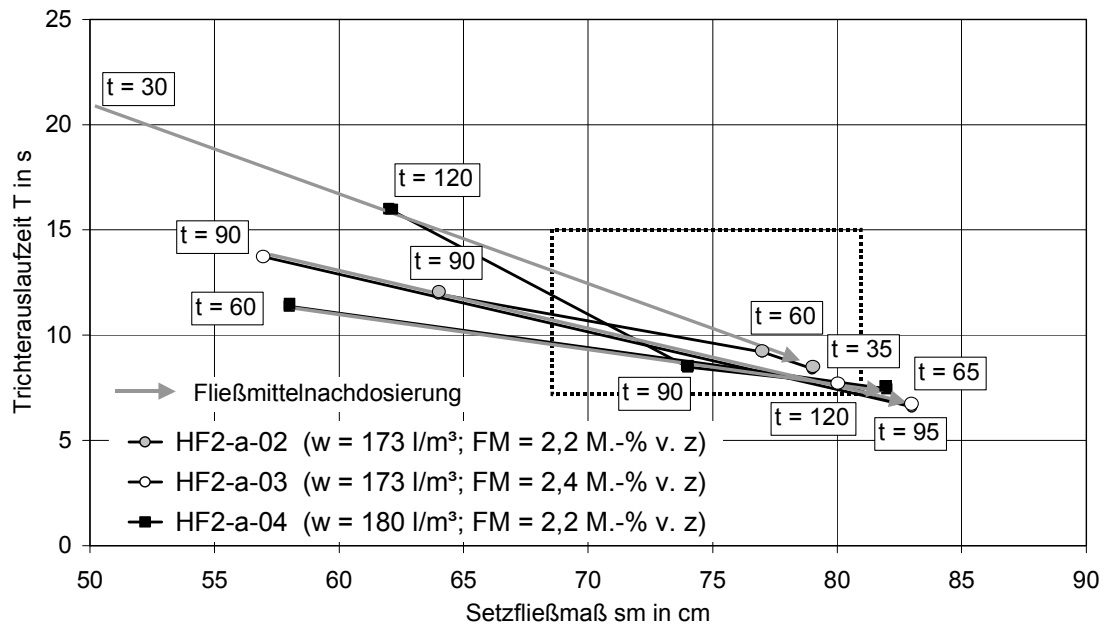


Bild B49: Einfluss der Fließmitteldosierung auf die Verarbeitbarkeit der Betone HF2-a-02, -03 und -04

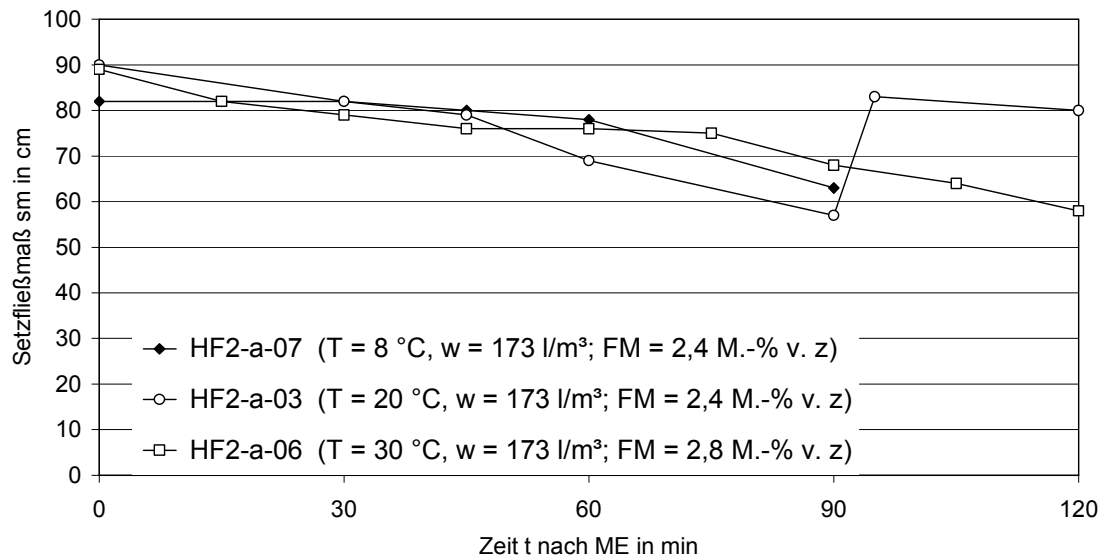


Bild B50: Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeit der Betone HF2-a-03, -06 und -07

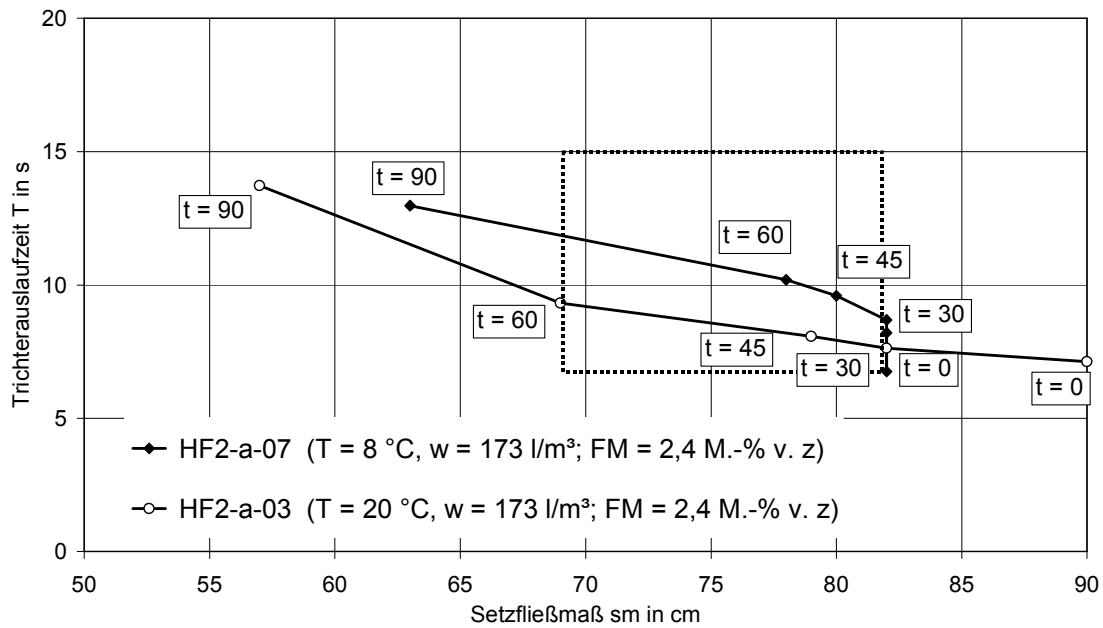


Bild B51: Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für Betone HF2-a-07 und -03 bei 8 °C und 20 °C

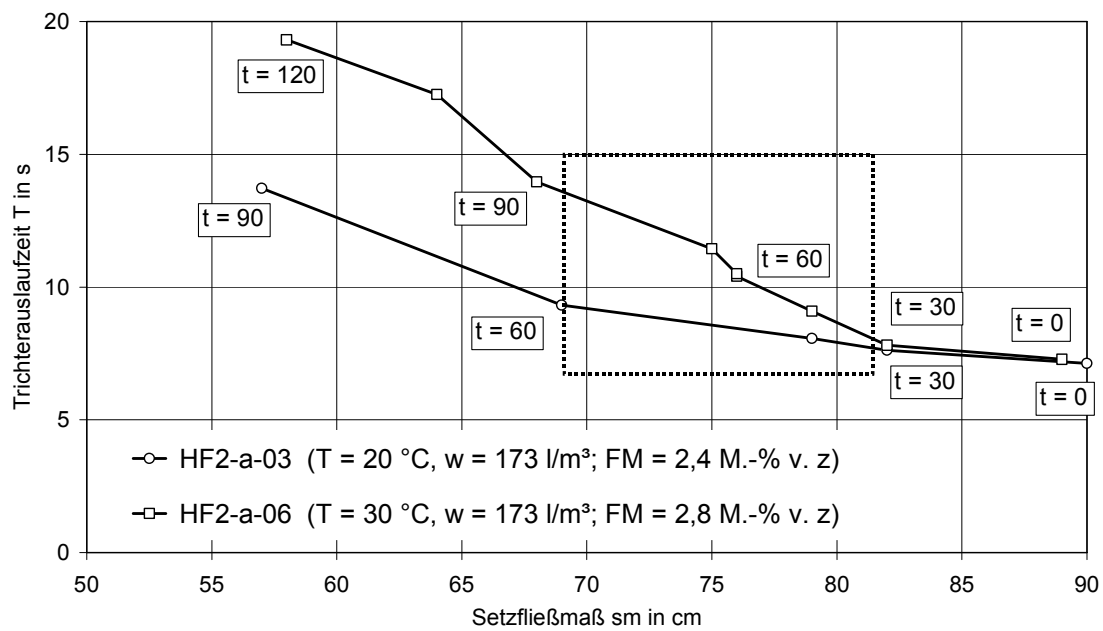


Bild B52: Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für Betone HF2-a-03 und -06 bei 20 °C und 30 °C



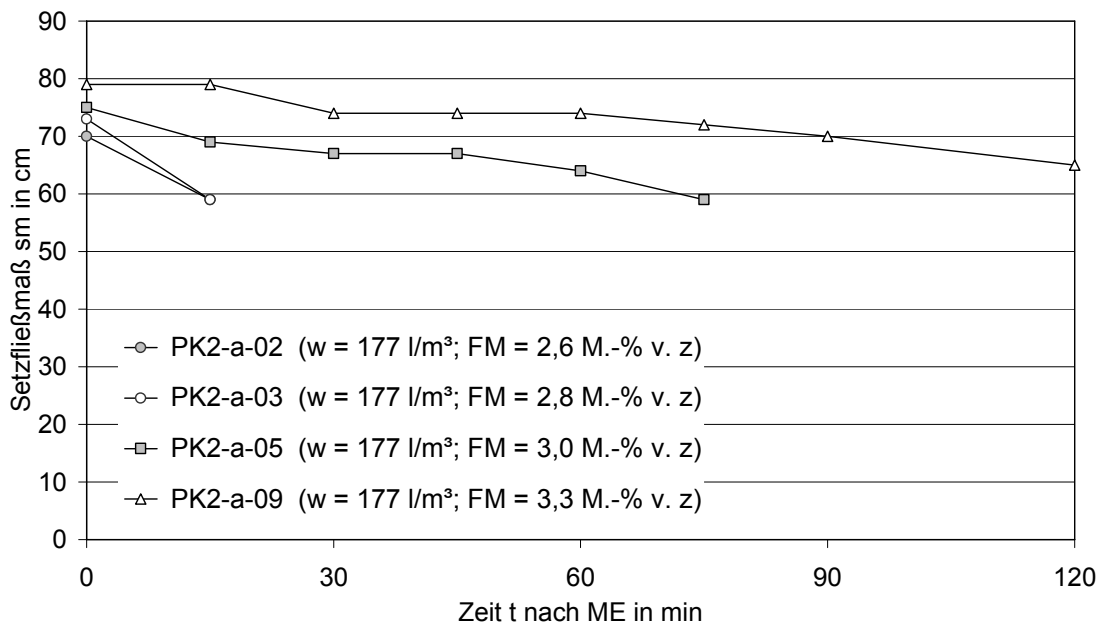


Bild B53: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone PK2-a mit unterschiedlichen Fließmittelgehalten

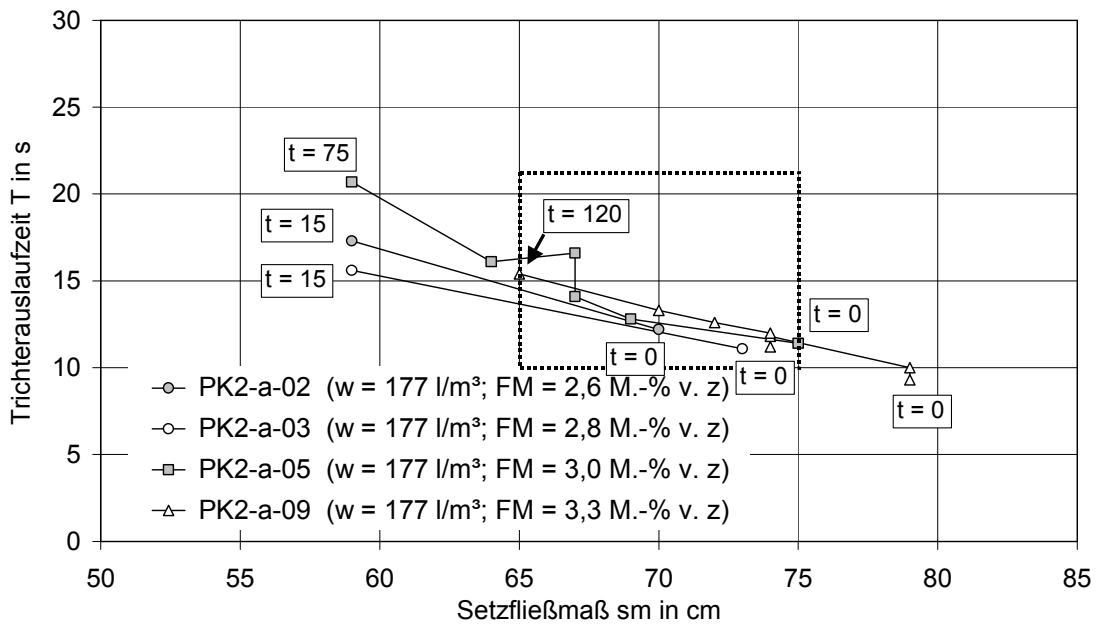


Bild B54: Einfluss der Fließmitteldosierung auf die Verarbeitbarkeit der Betone PK2-a-02, -03, -05 und -09

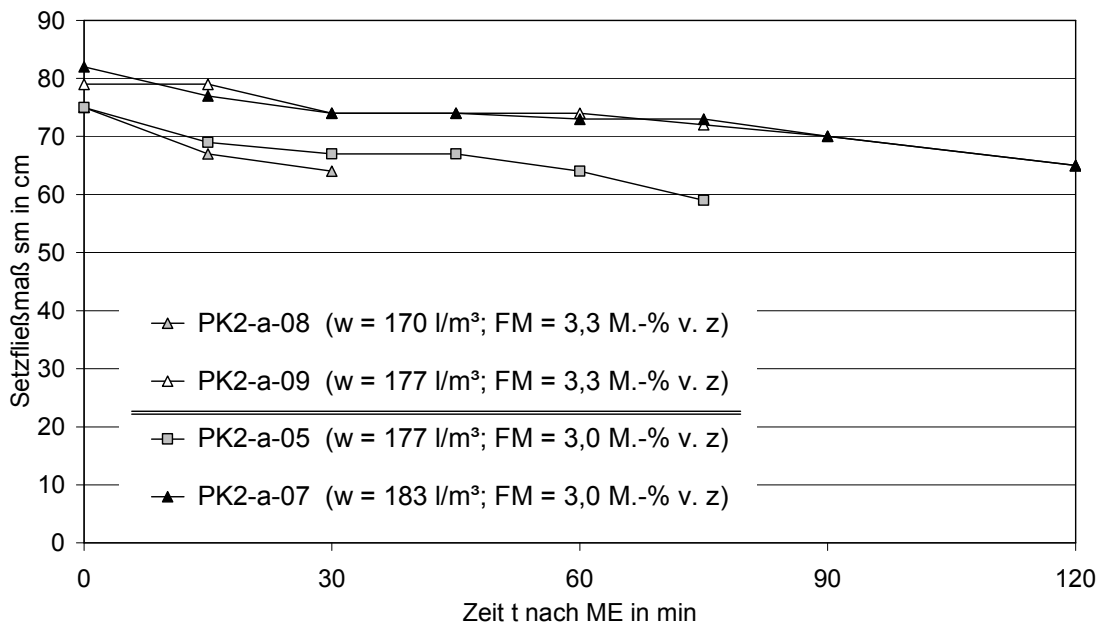


Bild B55: Zeitlicher Verlauf der Setzfließmaße für die Betone PK2-a mit unterschiedlichen Wassergehalten

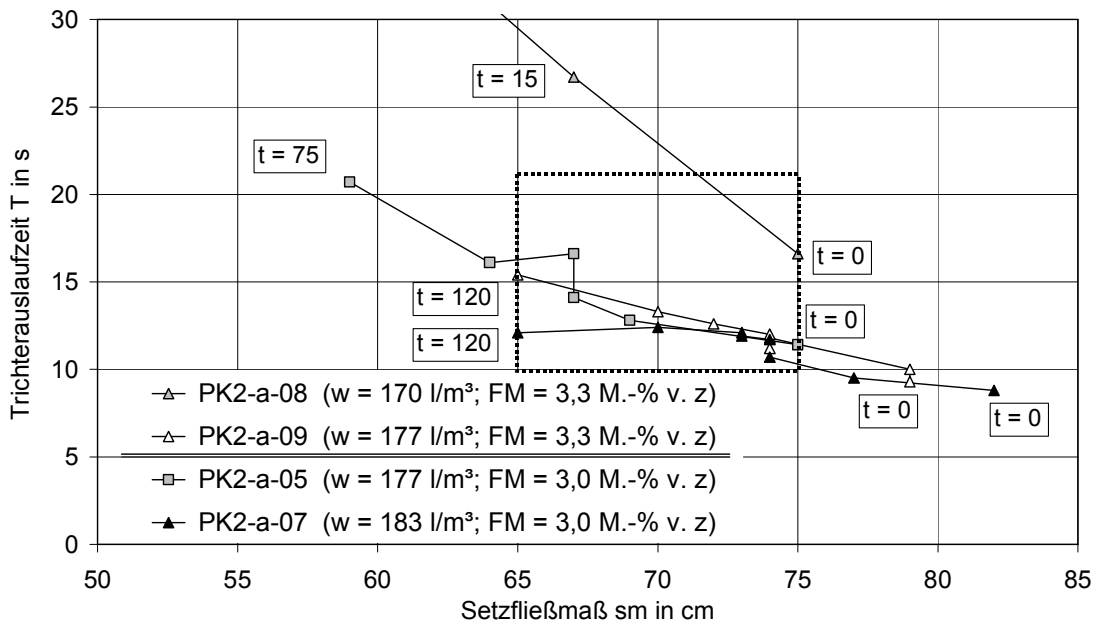


Bild B56: Einfluss des Wassergehalts auf die Verarbeitbarkeit der Betone PK2-a-08 und -09 sowie -05 und -07

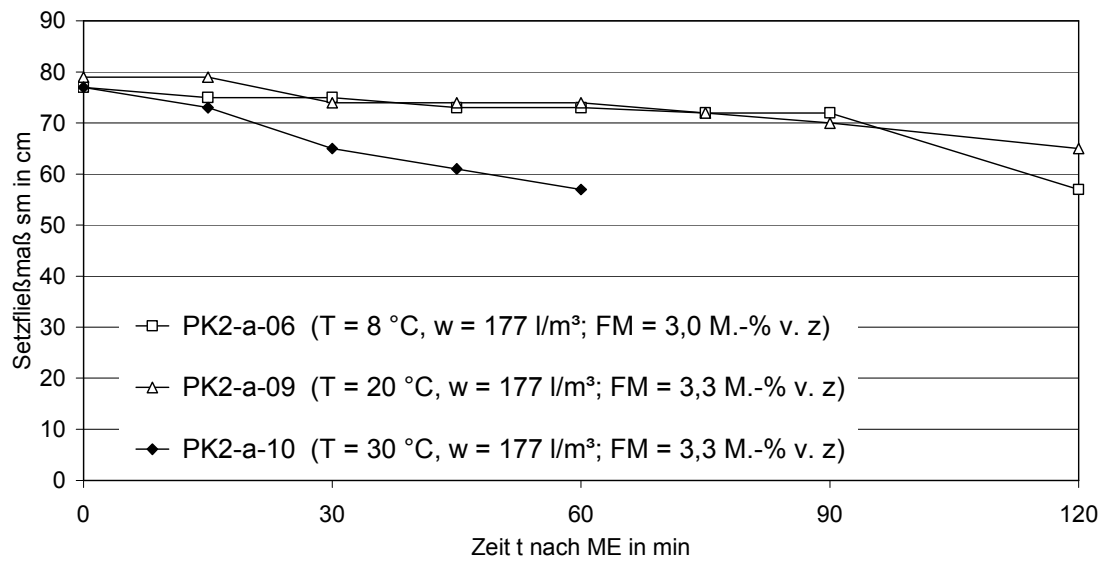


Bild B57: Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeit der Betone PK2-a-06 bei 8 °C, -09 bei 20 °C und -10 bei 30 °C

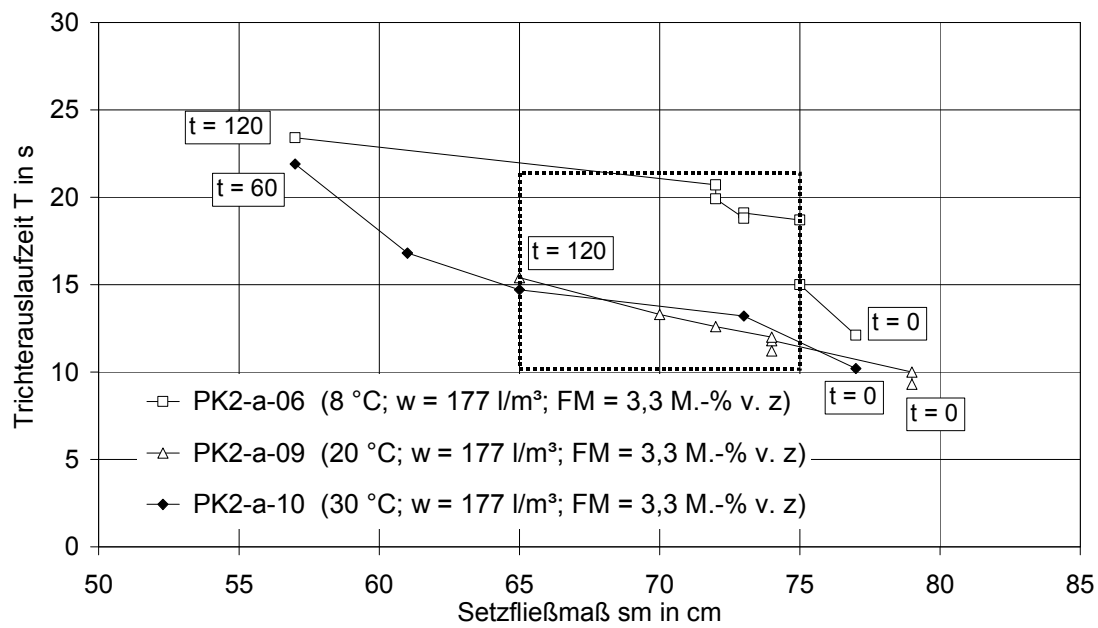


Bild B58: Verarbeitbarkeitsigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für Betone PK2-a-06 bei 8 °C, -09 bei 20 °C und -10 bei 30 °C

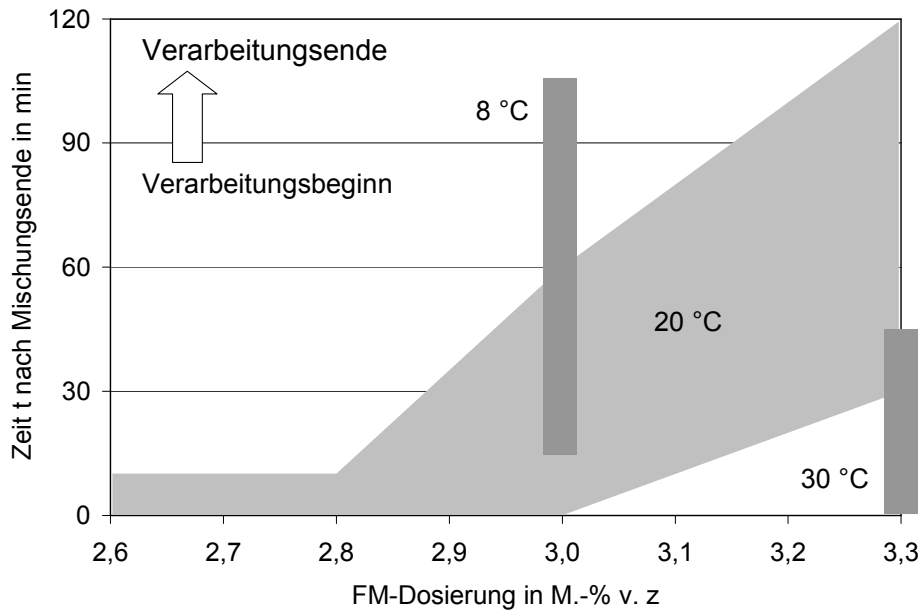


Bild B59: Einfluss der Fließmitteldosierung auf den Beginn der Verarbeitbarkeit und die Verarbeitbarkeitszeit für Betone der Serie PK2-a mit einem Wassergehalt von 177 l/m<sup>3</sup>

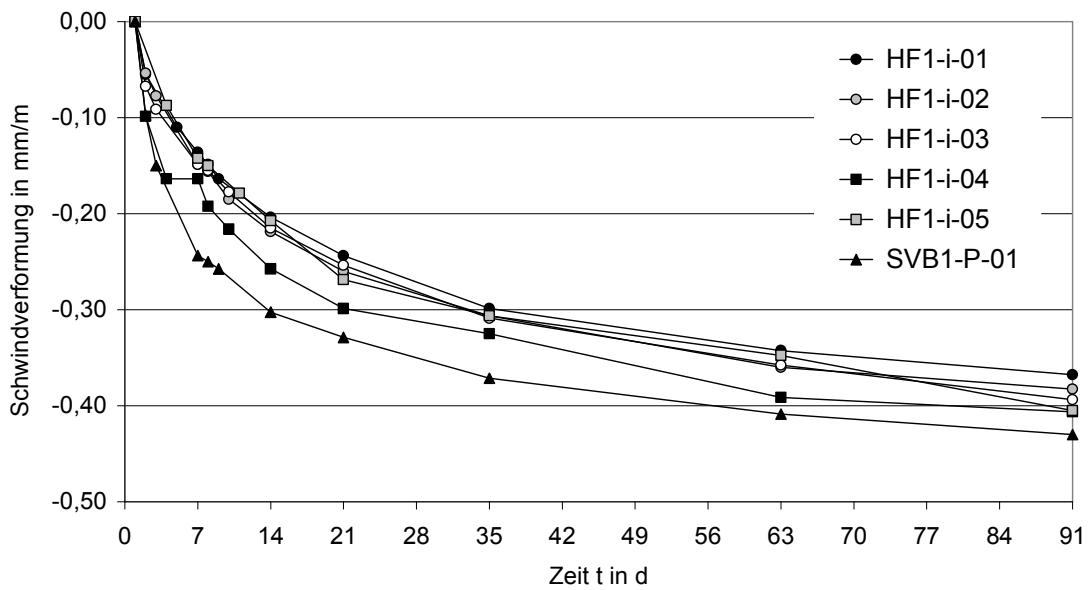


Bild B60: Schwindverformung der Betone der Serie 1 in der Mehlkornkombination Hochofenzement / Flugasche für Innenbauteilbedingungen (geprüft an Zylindern 150/300 mm, 1d Schalung, dann 20°C/65 % r.F.)

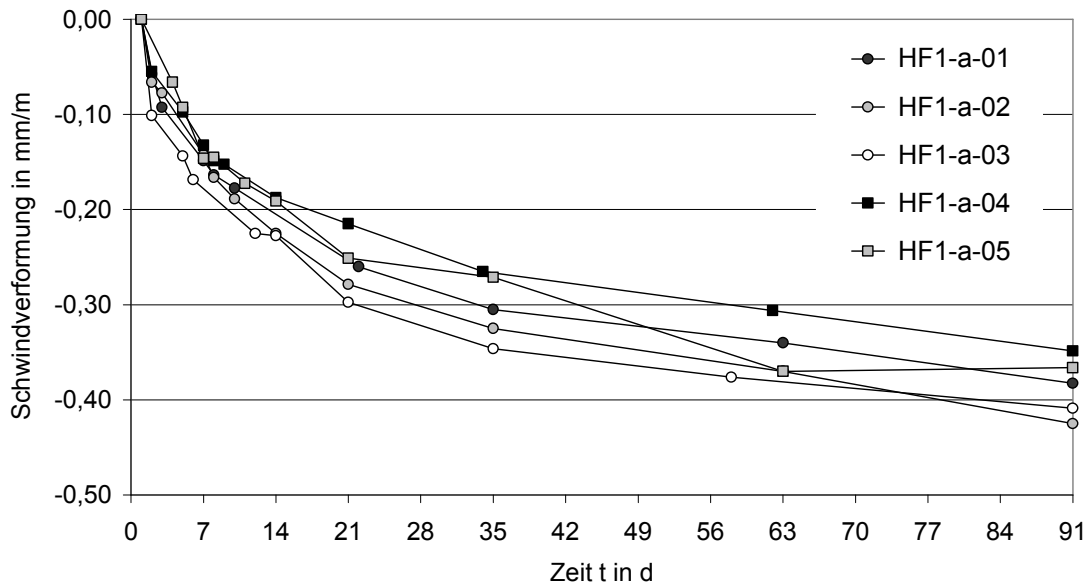


Bild B61: Schwindverformung der Betone der Serie 1 in der Mehlkornkombination Hochofenzement / Flugasche für Außenbauteilbedingungen (geprüft an Zylindern 150/300 mm, 1d Schalung, dann 20°C/65 % r.F.)

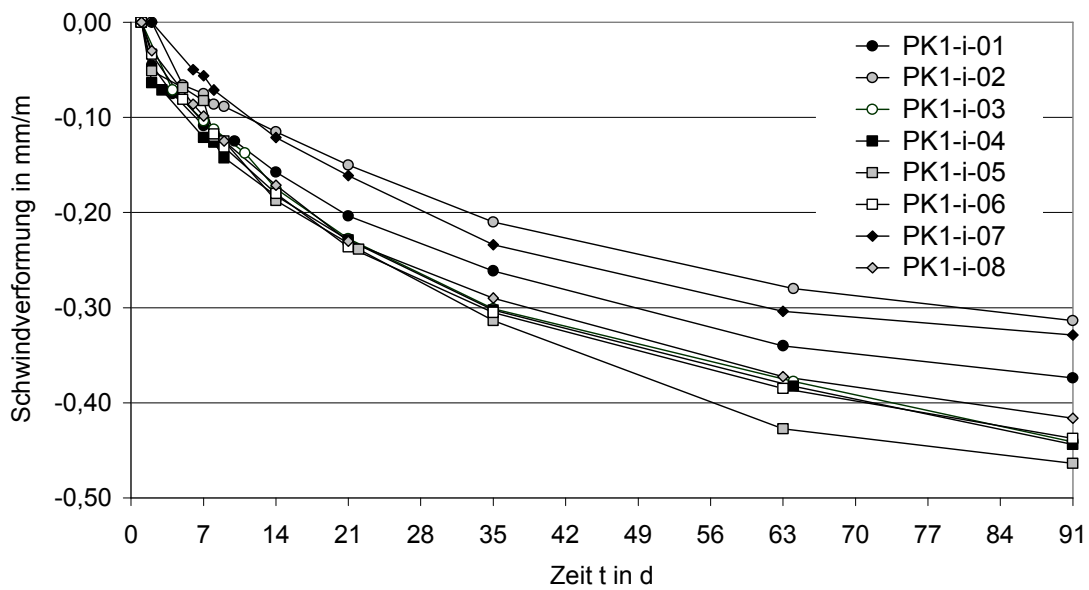


Bild B62: Schwindverformung der Betone der Serie 1 in der Mehlkornkombination Portlandzement / Kalksteinmehl für Innenbauteilbedingungen (geprüft an Zylindern 150/300 mm, 1d Schalung, dann 20°C/65 % r.F.)

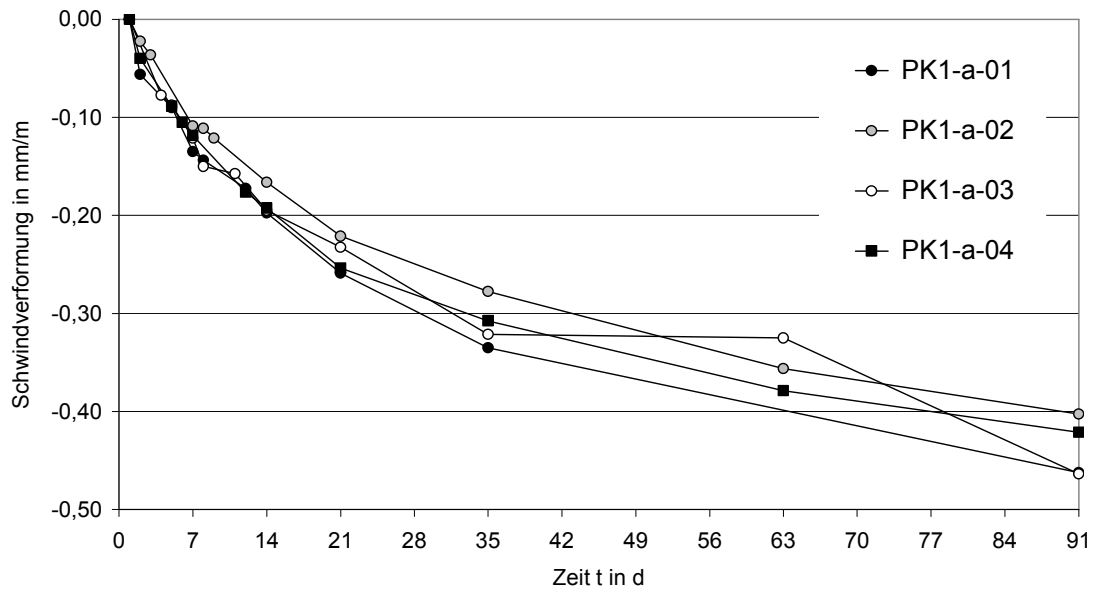


Bild B63: Schwindverformung der Betone der Serie 1 in der Mehlkornkombination Portlandzement / Kalksteinmehl für Außenbauteilbedingungen (geprüft an Zylindern 150/300 mm, 1d Schalung, dann 20°C/65 % r.F.)

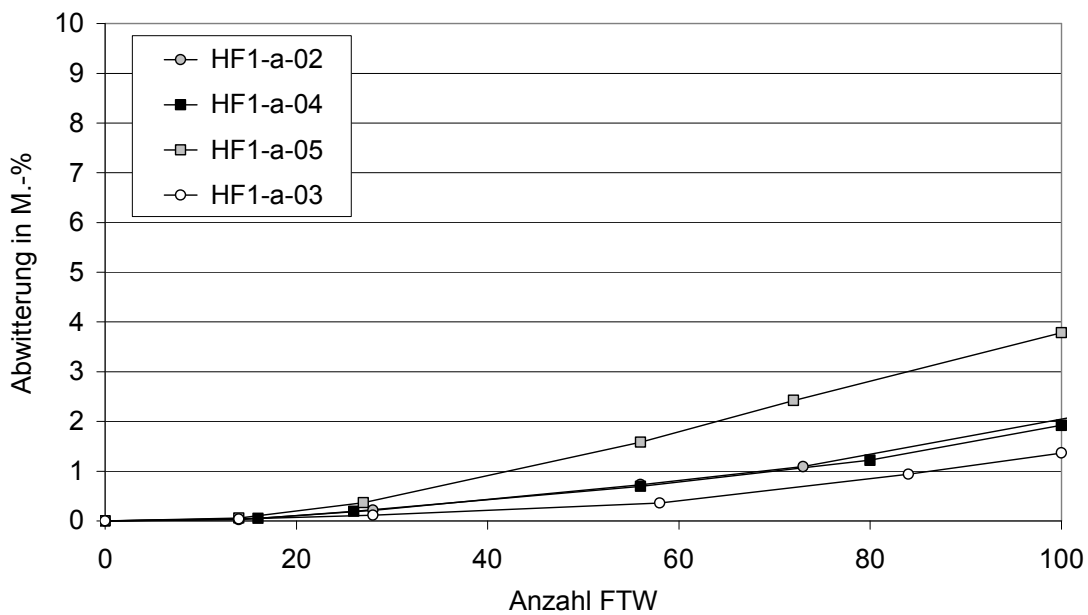


Bild B64: Abwitterung der Betone der Serie 1 in der Mehlkornkombination Hochofenzement / Flugasche für Außenbauteilbedingungen bei Frostbeanspruchung (100 Frosttauwechsel (FTW), 2 FTW pro Tag, Wasserfrost, Würfelverfahren)

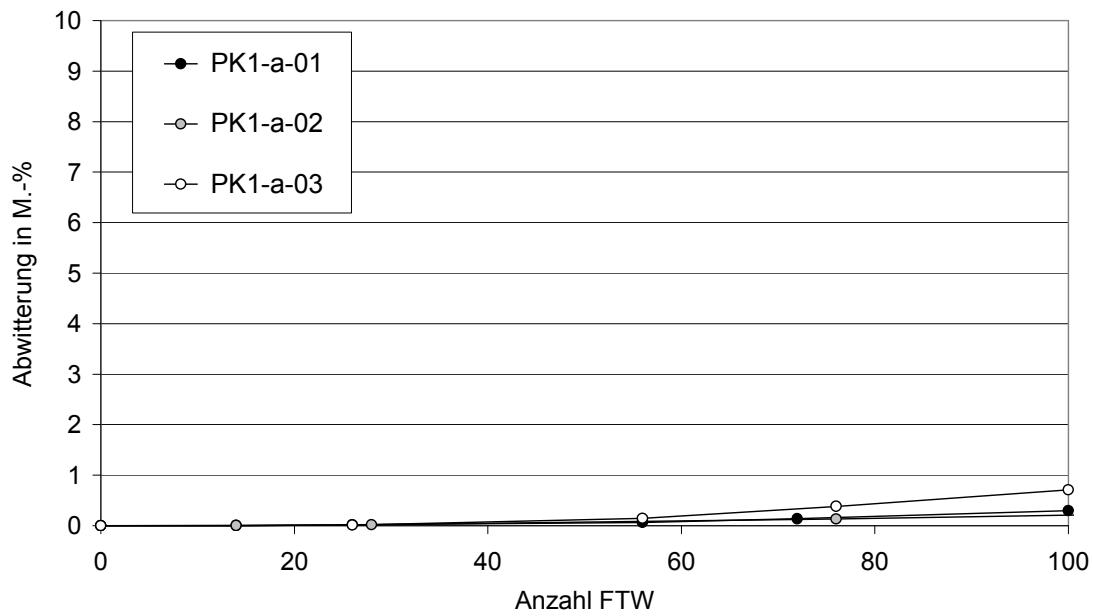


Bild B65: Abwitterung der Betone der Serie 1 in der Mehlkornkombination Portlandzement / Kalksteinmehl für Außenbauteilbedingungen bei Frostbeanspruchung (100 Frosttauwechsel (FTW), 2 FTW pro Tag, Wasserfrost, Würfelverfahren)

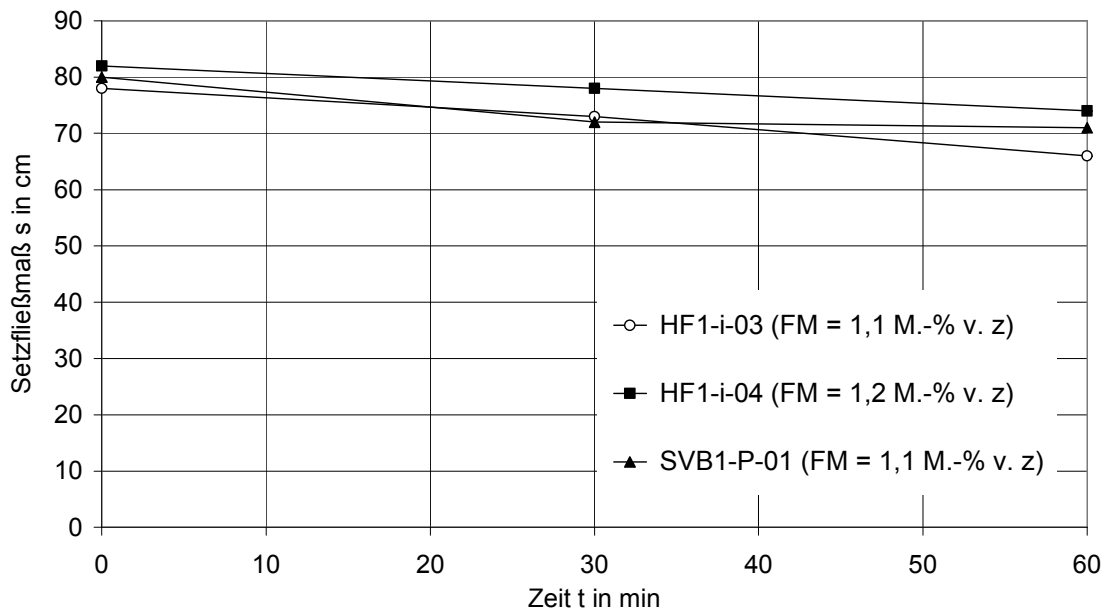


Bild B66: Zeitlicher Verlauf des Setzfließmaßes des SVB1-P-01 und Vergleich mit den entsprechenden Laborbetonen

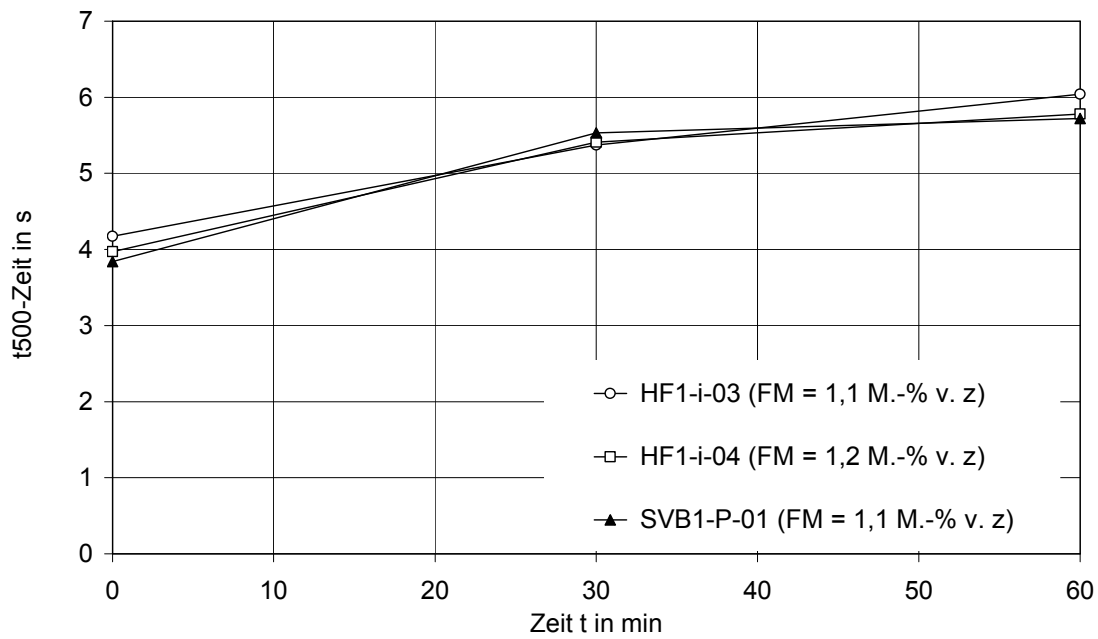


Bild B67: Zeitlicher Verlauf der t500-Zeit des SVB1-P-01 und Vergleich mit den entsprechenden Laborbetonen

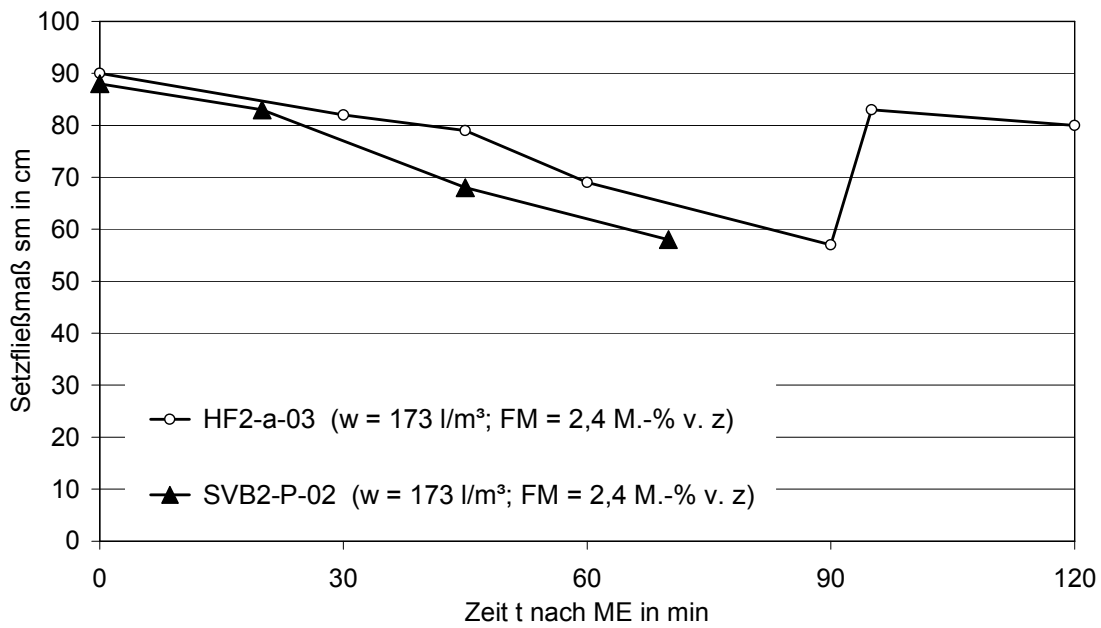


Bild B68: Praxisversuch 2 - Zeitlicher Verlauf des Setzfließmaßes des SVB2-P-02 und Vergleich mit dem entsprechenden Laborbeton der Serie HF2-a



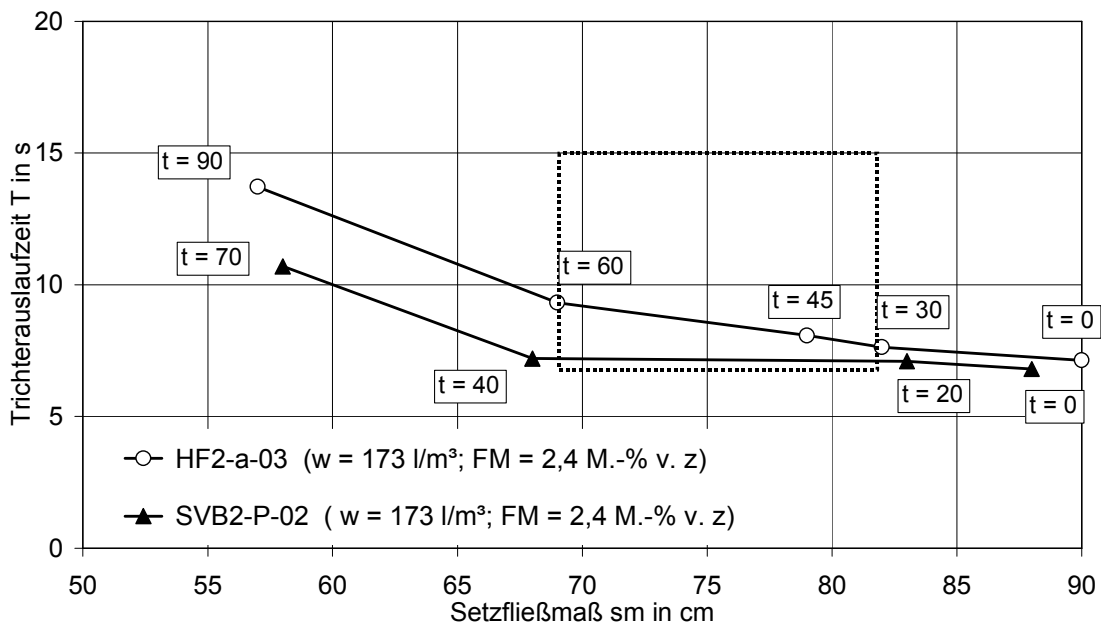


Bild B69: Praxisversuch 2 - Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für Beton SVB2-P-02 und den entsprechenden Laborbeton der Serie HF2-a

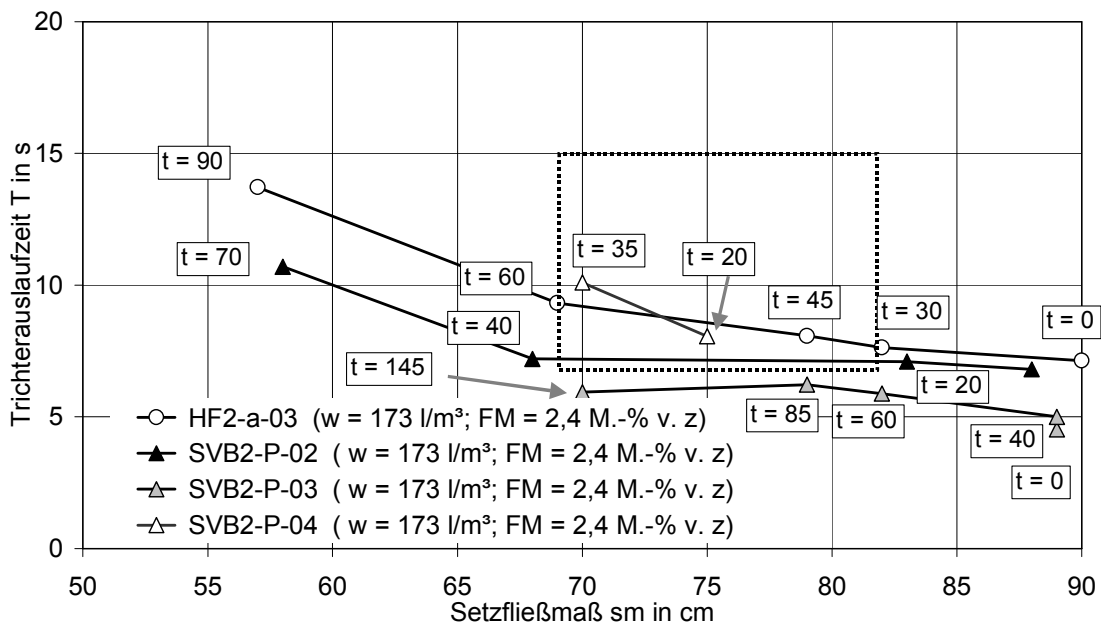


Bild B70: Praxisversuch 2 bis 4 - Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für Beton SVB2-P und den entsprechenden Laborbeton der Serie HF2-a

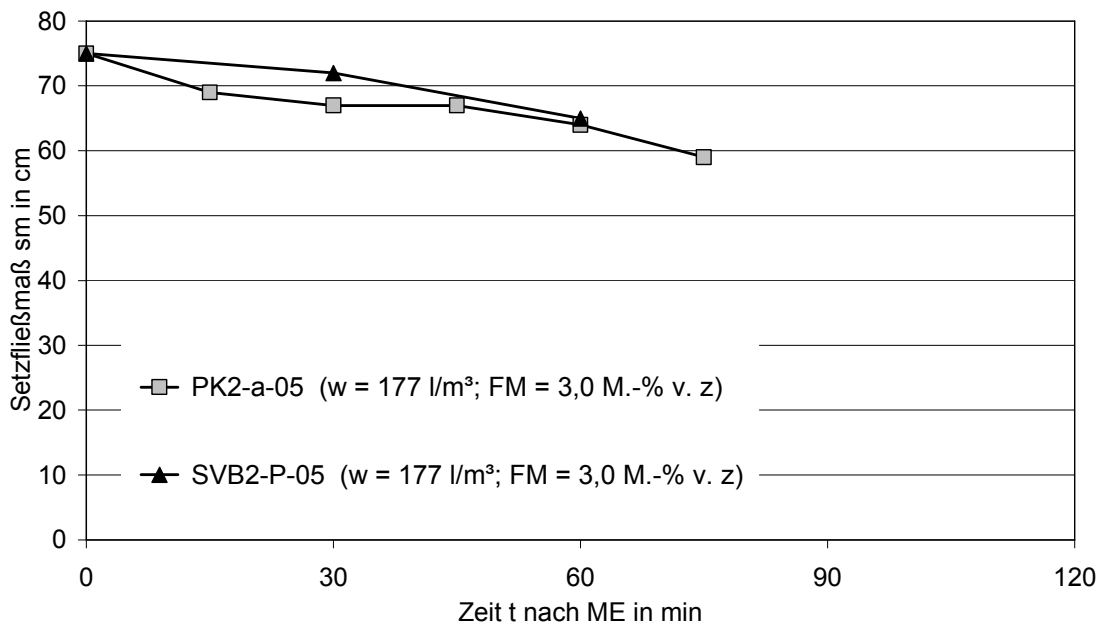


Bild B71: Praxisversuch 5 - Zeitlicher Verlauf des Setzfließmaßes des SVB2-P-05 und Vergleich mit dem entsprechenden Laborbeton der Serie PK2-a-05

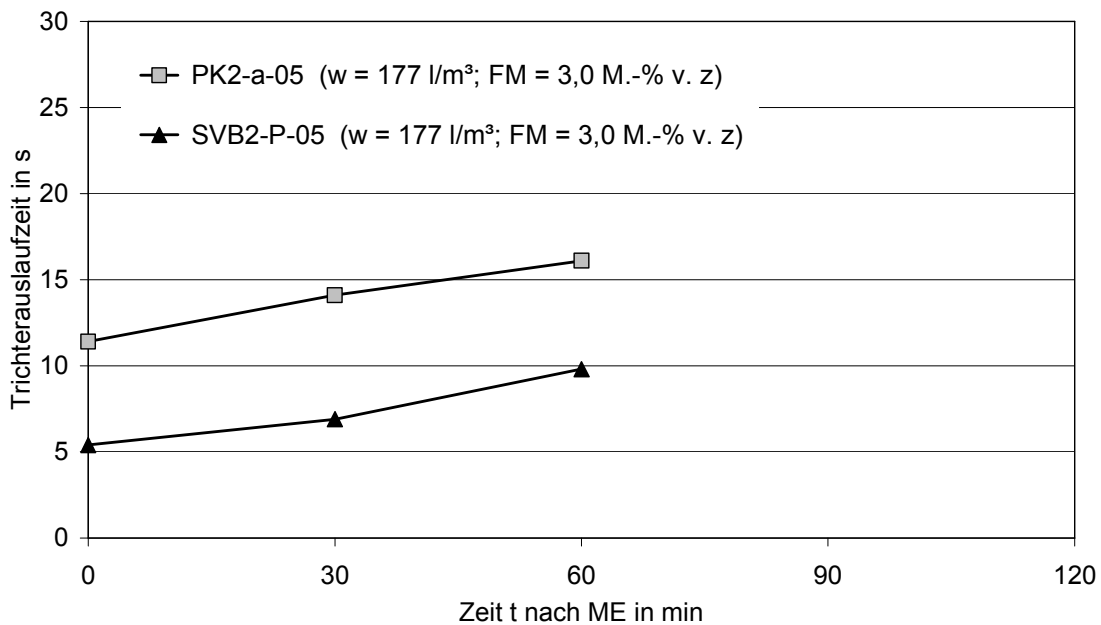


Bild B72: Praxisversuch 5 - Zeitlicher Verlauf der Trichterauslaufzeit des SVB2-P-05 und Vergleich mit dem entsprechenden Laborbeton der Serie PK2-a-05

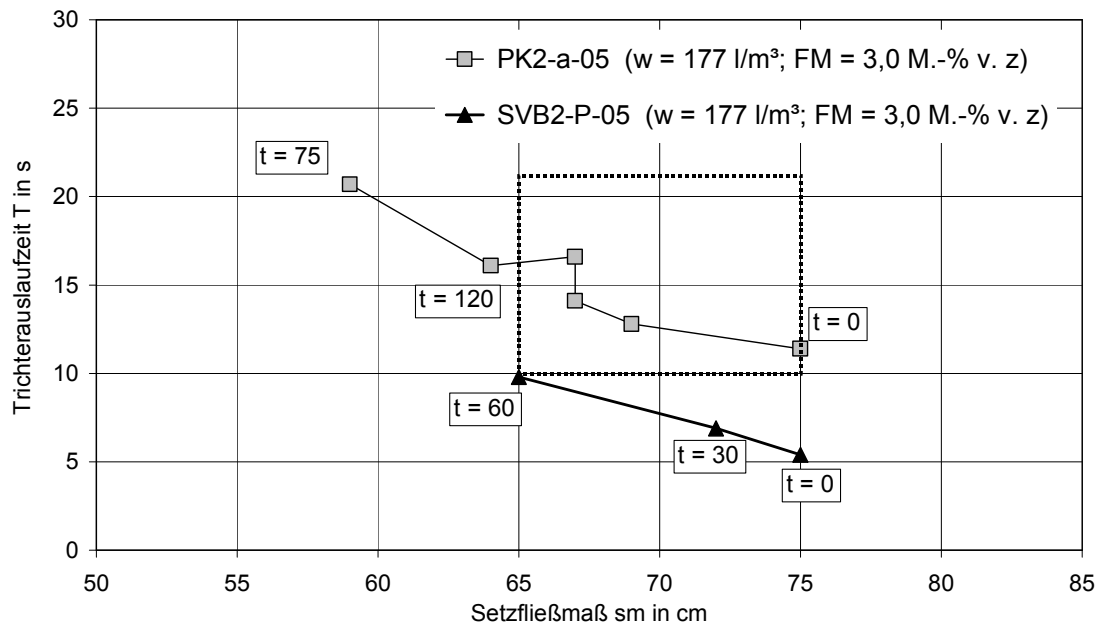


Bild B73: Praxisversuch 5 - Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für Beton SVB2-P-05 und dem entsprechenden Laborbeton PK2-a-05

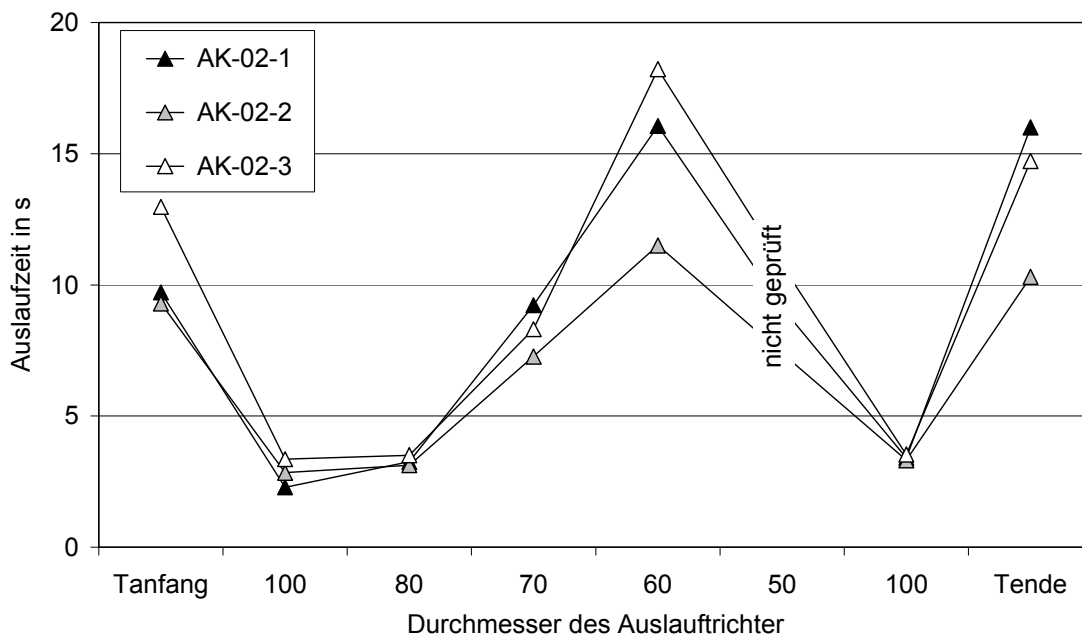


Bild B74: Veränderung der Auslaufzeit in Abhängigkeit vom Durchmesser des Auslauftrichters und zeitliche Entwicklung für AK-02

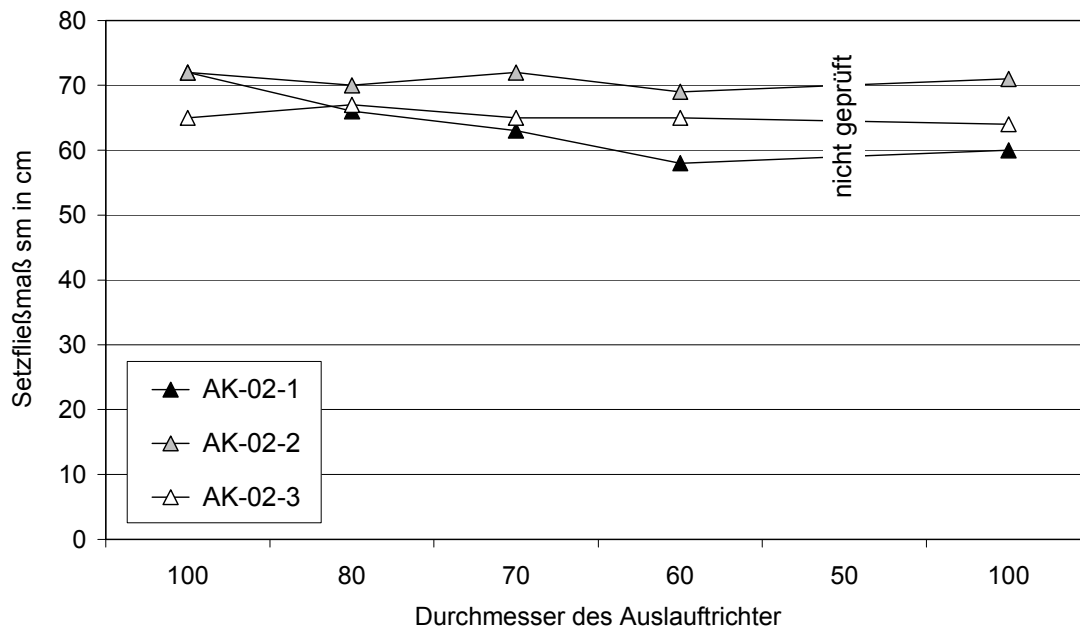


Bild B75: Veränderung des Setzfließmaßes in Abhängigkeit vom Durchmesser des Auslaufkegels und zeitliche Entwicklung für AK-02

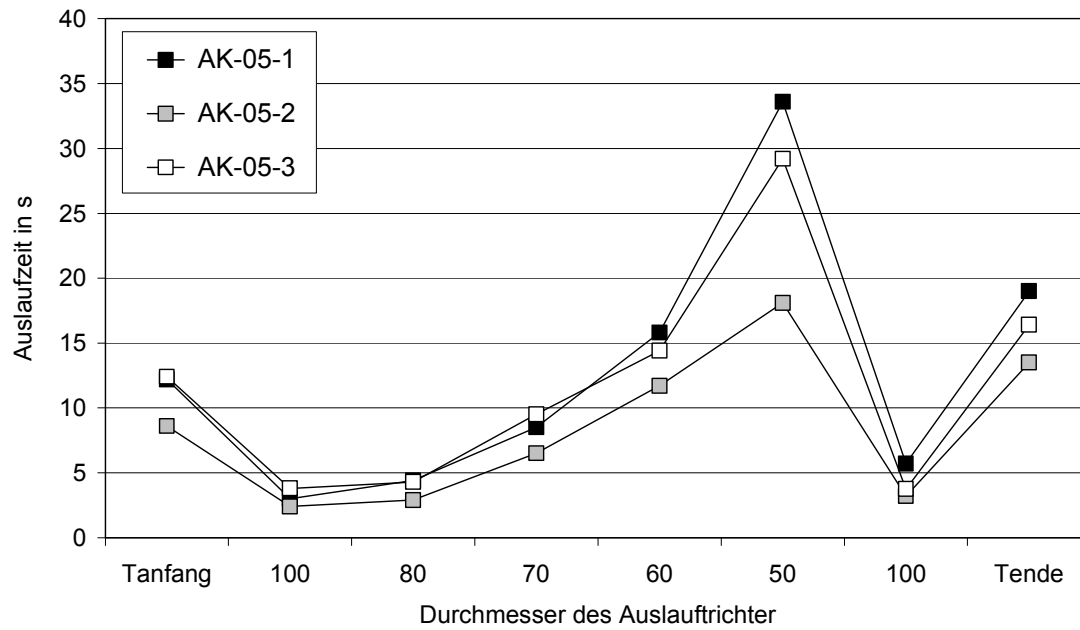


Bild B76: Veränderung der Auslaufzeit in Abhängigkeit vom Durchmesser des Auslaufkegels und zeitliche Entwicklung für AK-05

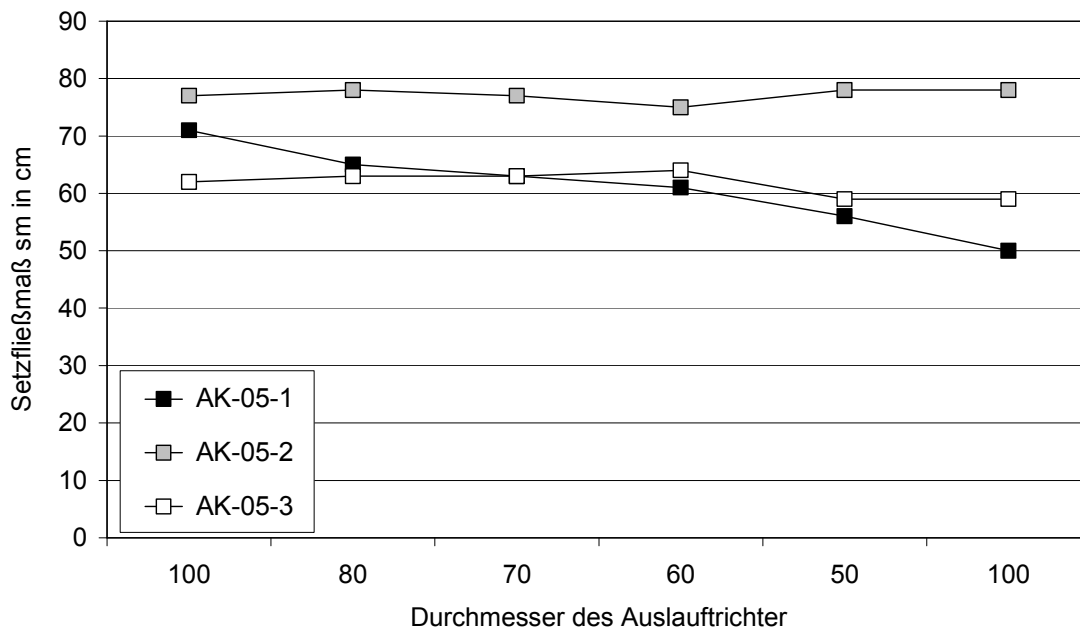


Bild B77: Veränderung des Setzfließmaßes in Abhängigkeit vom Durchmesser des Auslaufkegels und zeitliche Entwicklung für AK-05

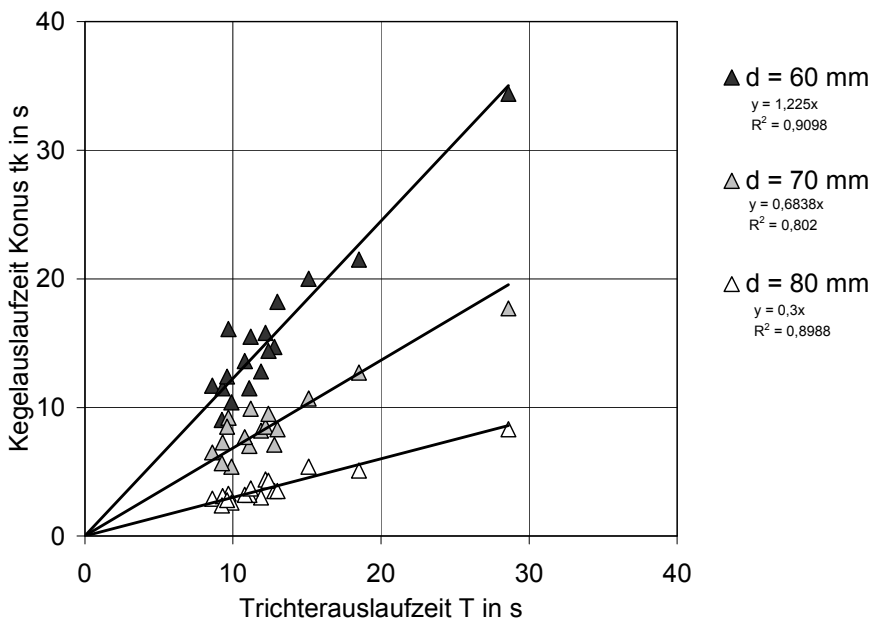


Bild B78: Zusammenhang zwischen Trichterauslaufzeit und Kegelauslaufzeit in Abhängigkeit vom Auslaufquerschnitt für alle untersuchten SVB

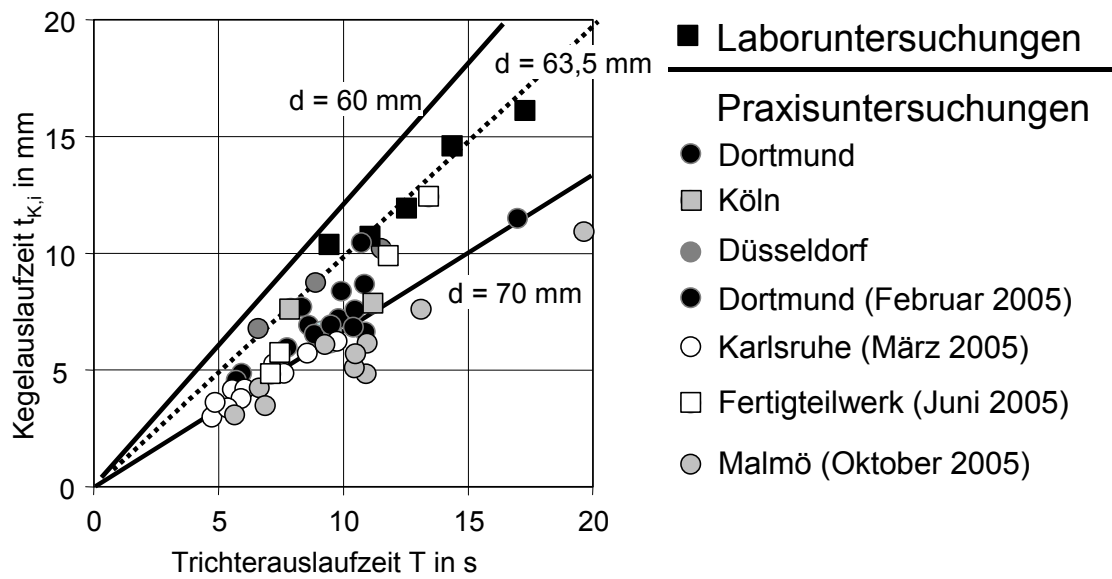


Bild B79: Zusammenhang zwischen Trichterauslaufzeit und Kegelauslaufzeit – Ergebnisse aus Praxisuntersuchungen

## ANHANG D - Prüfverfahren

### D.1 Setzfließmaß

Das Setzfließmaß  $s_m$  ist eine Kombination aus Slump- und Ausbreitmaß. Zur Ermittlung des Setzfließmaßes, siehe Bild D1, wird die Hohlkegelstumpfform (Setztrichter) aus der Slumpprüfung nach DIN EN 12350-2 umgedreht auf eine Setzfließplatte mit einer Kantenlänge von mindestens 800 x 800 mm aufgesetzt und mit SVB befüllt. Nach Ziehen des Setztrichters wird analog zum Ausbreitmaß der mittlere Durchmesser des sich nach Beendigung des Fließvorgangs ausgebreiteten Betons gemessen. Während der Prüfung darf keine Verdichtungsenergie eingetragen werden, so dass der SVB nur unter dem Einfluss der Schwerkraft fließt.

Das Setzfließmaß wird im Wesentlichen durch die Fließgrenze des Betons beeinflusst und ist in erster Linie geeignet, die Fließgrenze des SVB und den Fließmittelgehalt zu beurteilen.

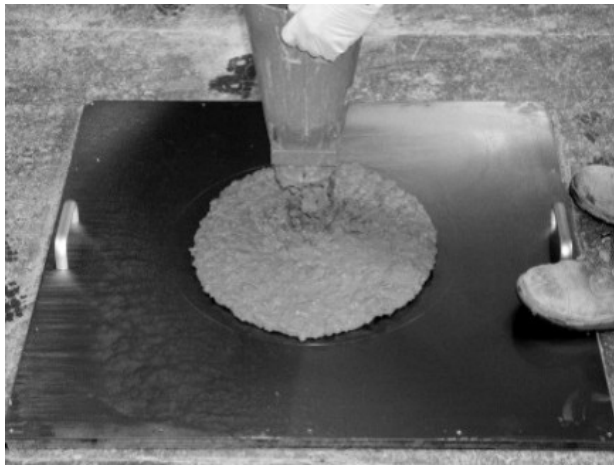


Bild D1: Setzfließmaßprüfung

### D.2 Trichterauslaufzeit

Die Trichterauslaufzeit  $T$  für SVB dient als Messgröße zur Beschreibung der Viskosität. Sie ist aus dem japanischen SVB-Entwurfskonzept entnommen. Zur Durchführung wird ein Trichter, wie in Bild D2 dargestellt, benötigt. Der SVB wird bei geschlossener Auslaufklappe bis zum Rand in den Trichter gefüllt. Danach wird der Verschluss geöffnet und die Zeit in Sekunden gemessen, die der SVB benötigt, um aus dem Trichter auszulaufen.

Die Viskosität des SVB ist neben dem Wasser-Feststoff-Verhältnis auch von der Gesamtsieblinie abhängig. Somit fließen wasser- und leimreichere SVB schneller aus dem Trichter aus und weisen eine niedrigere Viskosität auf als wasser- und leimärmere.

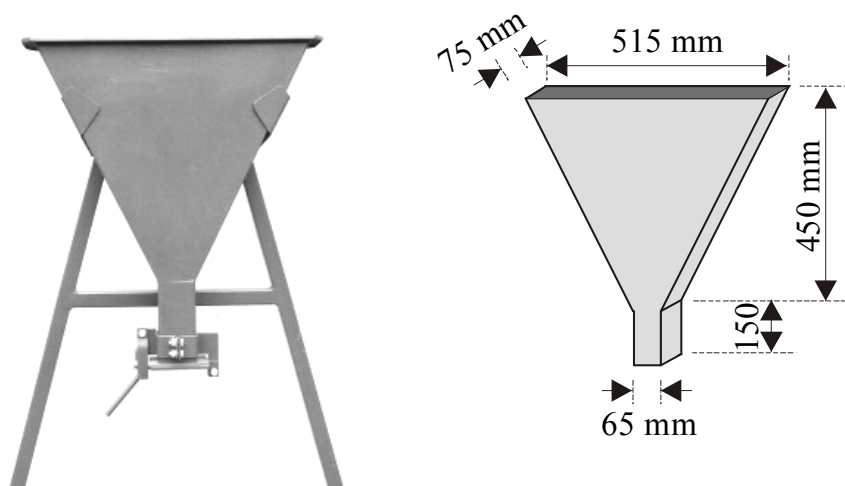


Bild D2: Auslauftrichter für SVB

### D.3 Fließzeit

Die Ermittlung der Fließzeit  $t_{500}$  stellt eine weitere Möglichkeit dar, die Viskosität eines SVB zu beurteilen. Sie wird während der Setzfließmaßprüfung, siehe Abschnitt D.1, gemessen. Die Fließzeit ist die Zeit, die der SVB benötigt, um nach dem Ziehen des Setztrichters auf einen Durchmesser von 500 mm zu fließen. Der Durchmesser von 500 mm ist auf der Setzfließplatte entsprechend zu markieren. Je größer die Fließzeit ist, desto höher ist die Viskosität des SVB.

### D.4 Optische Charakterisierung von Probekörpern

Die augenscheinliche Begutachtung der Stabilität von SVB an einer Festbetonprobe ist eine einfache und sichere Art, da man den entgültigen Zustand selbst prüft. Ein Zylinderform ( $h = 300 \text{ mm}$ ,  $\varnothing = 150 \text{ mm}$ ) wird mit SVB befüllt. Der Probekörper wird dann nach dem Erhärten längs gesägt oder gespalten. Anhand des Schnitt- oder Bruchbildes kann bestimmt werden, ob der SVB stabil war oder ob die grobe Gesteinskörnung abgesunken ist. Darüber hinaus kann die Entlüftung des Betons über die Mantelfläche begutachtet werden. Bild D3 zeigt beispielhaft drei verschiedene Probekörper. Das Gefüge und die Mantelfläche des mittleren Probekörpers zeigt, dass der Beton zum Einbauzeitpunkt selbstverdichtende Verarbeitungseigenschaften besaß. Die Betone, mit denen die beiden anderen Probekörper hergestellt wurden, wiesen zum Einbauzeitpunkt unzureichende Verarbeitungseigenschaften infolge von Stagnation, siehe linker Probekörper, und Sedimentation, siehe rechter Probekörper, auf.



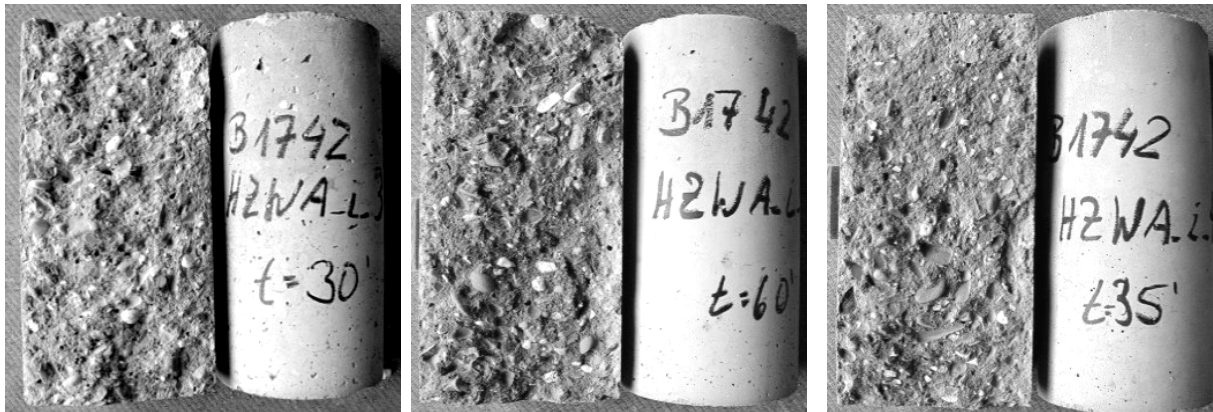


Bild D3: Mantel- und Bruchflächen zylinderförmiger Probekörper zur Begutachtung der Verarbeitbarkeitseigenschaften von SVB (linker Zylinder Stagnation, mittlerer Zylinder Selbstverdichtung, rechter Zylinder Sedimentation)

#### D.5 Blockierring-Prüfung

Die Blockierring-Prüfung dient der Ermittlung der Blockierneigung eines SVB. Sie erfolgt analog zur Setzfließmaßprüfung, siehe Abschnitt D.1. Zusätzlich wird jedoch der Blockierring ( $\varnothing_{\text{Ring}} = 300 \text{ mm}$ , 16 Stäbe mit  $\varnothing 18 \text{ mm}$ ,  $h = 125 \text{ mm}$ ) benötigt, siehe Bild D4. Alle Blockierversuche, wie auch der Box-Test, siehe Abschnitt D.6, simulieren Einbauzustände, bei denen der Beton Fließhindernisse überwinden muss. Der Grad der Blockierneigung wird in der Regel durch das Messen eines Niveauunterschiedes bestimmt.

Der Vorteil des Blockierringversuchs liegt in der Verbindung der Setzfließmaßprüfung und der Einbausimulation. Der Blockierring wird durch Markierungen auf der Setzfließplatte zentriert. Dann wird der Setztrichter in der Mitte der Platte aufgesetzt, mit SVB befüllt und hochgezogen. Danach breitet sich der SVB auf der Setzfließplatte aus und muss dabei die Stäbe des Blockierringes umfließen. Ein SVB blockiert nicht, wenn die Differenz der Setzfließmaße aus Setzfließmaßprüfung  $s_m$  und aus Blockierringprüfung  $s_b$  kleiner 50 mm ist.

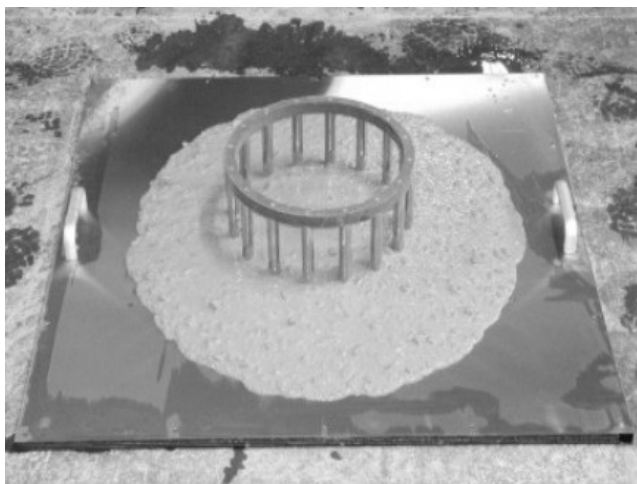


Bild D4: Blockierring zur Bestimmung der Blockierneigung

## D.6 Box-Test

Der Box-Test ist ein Verfahren, bei dem der SVB auf seine Einbaubarkeit und Blockierneigung überprüft wird, siehe Bild D5. Dabei wird eine abgeschlossene, vertikale Kammer mit dem zu prüfenden Beton befüllt, wodurch sich eine hydrostatische Druckhöhe ergibt. Nach Öffnen eines Schiebers muss sich der Beton durch Fließhindernisse hindurch vertikal bis auf eine Füllhöhe von mindestens 320 mm ausspiegeln.

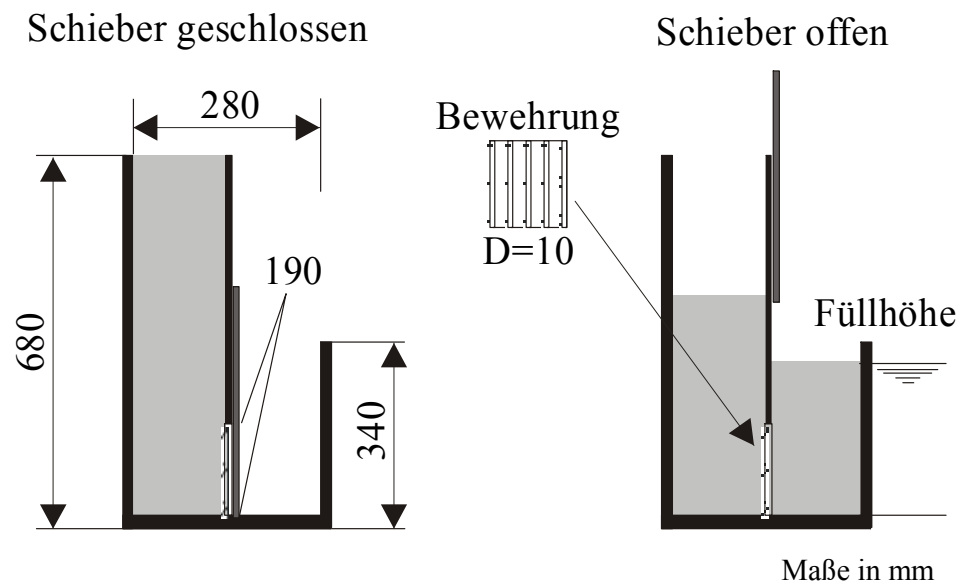
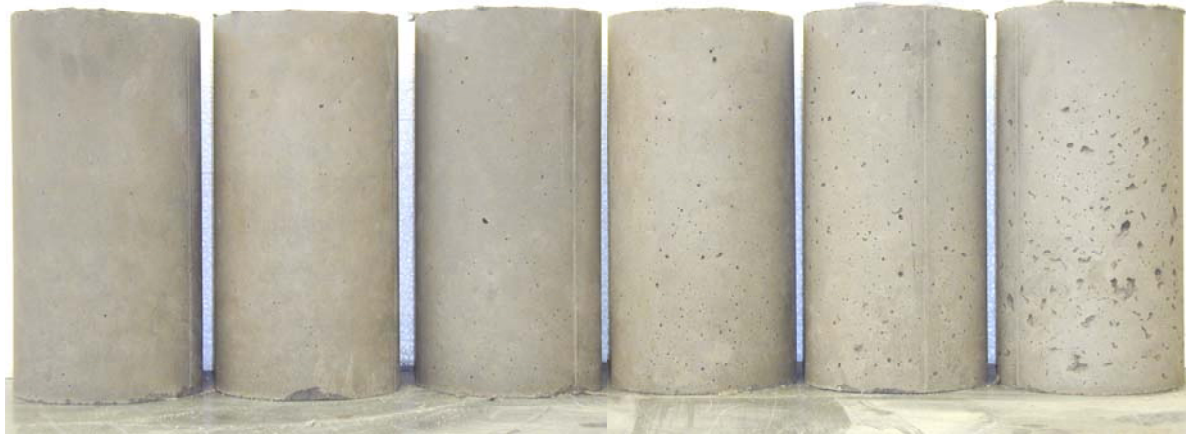


Bild D5: Box Test zur Bestimmung der Blockierneigung

## ANHANG C - Fotos



t = 15	t = 30	t = 45	t = 60	t = 75	t = 120
sm = 830	sm = 790	sm = 760	sm = 760	sm = 750	sm = 600
T = 7,8	T = 9,1	T = 10,4	T = 10,5	T = 11,4	T = 19,3

Bild C1: Optische Charakterisierung - Verarbeitbarkeit bei 30 °C - Beton HF2-a-06  
(T = 30 °C, w = 173 l/m<sup>3</sup>, FM = 2,8 M.-% v. z)



Bild C2: Optische Charakterisierung - Verarbeitbarkeit bei 20 °C - Beton PK2-a-07  
(T = 20 °C, w = 183 l/m<sup>3</sup>, FM = 3,0 M.-% v. z)



Bild C3: Transportbetonanlage 1 - Praxistest 1

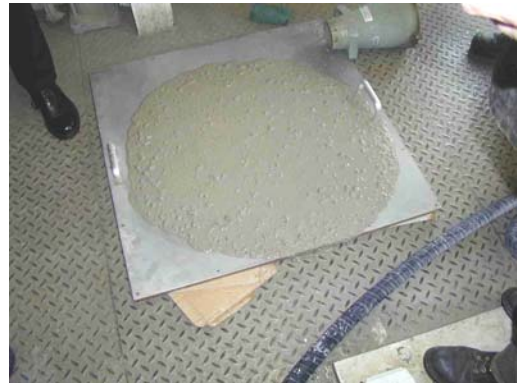


Bild C4: Setzfließmaßbestimmung – Praxistest 1



Bild C5: Praxistest 2 – Transportbetonanlage 2

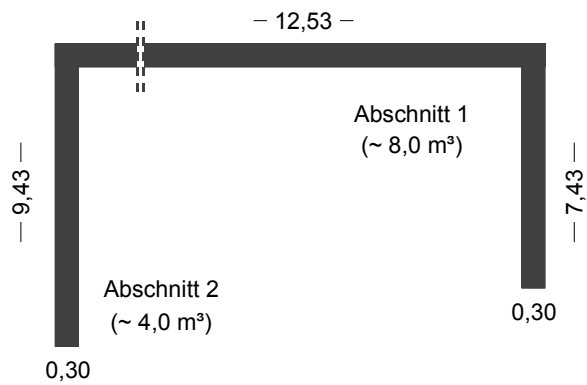


Bild C6: Probewand 1 (Abschnitt 1) und Probewand 2 (Abschnitt 2)



Bild C7: Probewand 1 – Abschnitt 1 - Schalung



Bild C8: Probewand 1 – Abschnitt 1 - Schalung



Bild C9: Probewand 1 – Abschnitt 1 - Schalung



Bild C10: Probewand 1 – Abschnitt 1 - Schalung



Bild C11: Probewand 1 – Abschnitt 1 - Gesamtübersicht



Bild C12: Betonage Abschnitt 1  
(t = 40 min, sm = 89 cm, T = 5 s)



Bild C13: Betonage Abschnitt 1  
(t = 85 min, sm = 79 cm, T = 6 s)



Bild C14: Betonage Abschnitt 1  
Einbaubeginn 105 Minuten nach  
Herstellung



Bild C15: Betonage Abschnitt 1 - Herstel-  
lung



Bild C16: Betonage Abschnitt 1 - Herstellung



Bild C17: Betonage Abschnitt 1 – Einfluss der Schaloberfläche



Bild C18: Betonage Abschnitt 1 – Einfluss der Schaloberfläche



Bild C19: Betonage Abschnitt 1 – Einfluss der Schaloberfläche



Bild C20: Betonage Abschnitt 1 – Einfluss der Schaloberfläche



Bild C21: Betonage Abschnitt 1 – Sedimentationseffekt



Bild C22: Betonage Abschnitt 1 – Einfluss der Schaloberfläche



Bild C23: Betonage Abschnitt 1 – Einfluss der Schaloberfläche



Bild C24: Probewand 2 – Abschnitt 2 - Schalung



Bild C25: Betonage Wand 2  
( $t = 20$  min,  $sm = 75$  cm,  $T = 8$  s)



Bild C26: Betonage Wand 2 - Herstellung



Bild C27: Betonage Wand 2 - Herstellung





Bild C28: Betonage Wand 2 - Herstellung



Bild C29: Betonage Wand 2 - Herstellung



Bild C30: Betonage Wand 2 - Herstellung



Bild C31: Betonage Wand 2 - Einfluss der Schaloberfläche



Bild C32: Betonage Wand 2 - Einfluss der Schaloberfläche



Bild C33: Betonage Wand 2 - Einfluss der Schaloberfläche



Bild C34: Betonage Wand 2 - Einfluss der Schaloberfläche



Bild C35: Betonage Wand 2 - Einfluss der Schaloberfläche



Bild C36: Betonage Wand 2 – Einfluss der Schaloberfläche



Bild C37: Ansatz Wand 2 (Abschnitt 2) an Wand 1 (Abschnitt 1)



Bild C38: Probewand 1 (Abschnitt 1) und Probewand 2 (Abschnitt 2)

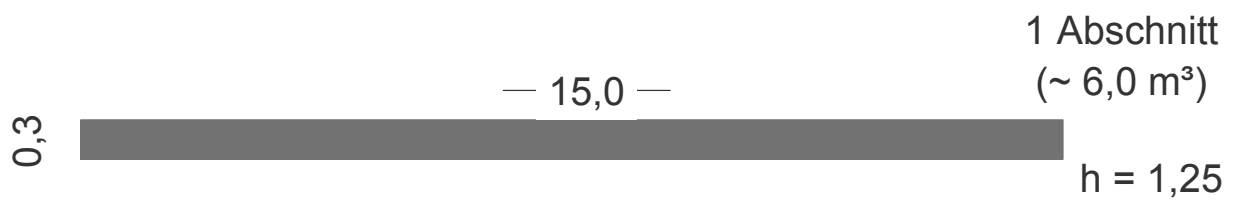


Bild C39: Probewand 3

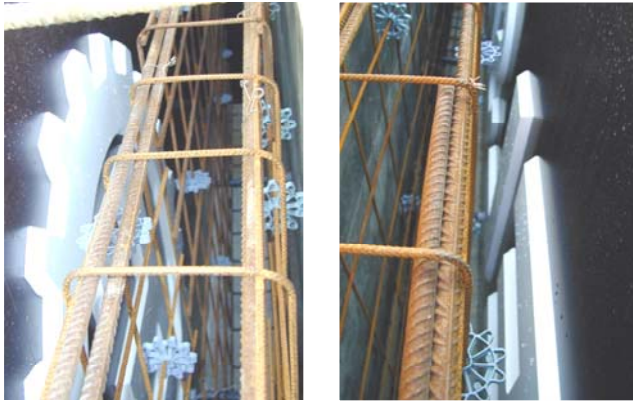


Bild C40: Probewand 3 - Schalung



Bild C41: Betonage Probewand 3  
( $t = 5 \text{ min}$ ,  $sm = 75 \text{ cm}$ ,  
 $T = 5,4 \text{ s}$ )



Bild C42: Betonage Probewand 3  
( $t = 60 \text{ min}$ ,  $sm = 65 \text{ cm}$ ,  
 $T = 9,8 \text{ s}$ )



Bild C43: Betonage Probewand 3 -  
Einbau  $t = 65 \text{ min}$



Bild C44: Betonage Probewand 3 - Her-  
stellung



Bild C45: Betonage Probewand 3 - Her-  
stellung



Bild C46: Betonage Probewand 3 - Herstellung



Bild C47: Betonage Probewand 3 - Herstellung



Bild C48: Probewand 3 - Ausschalen



Bild C49: Probewand 3 - Ausschalen



Bild C50: Probewand 3 - Ausschalen - Oberflächeneigenschaften



Bild C51: Probewand 3 - Ausschalen - Oberflächeneigenschaften



Bild C52: Probewand 3 – Ausschalen - Oberflächeneigenschaften - Gesamtübersicht

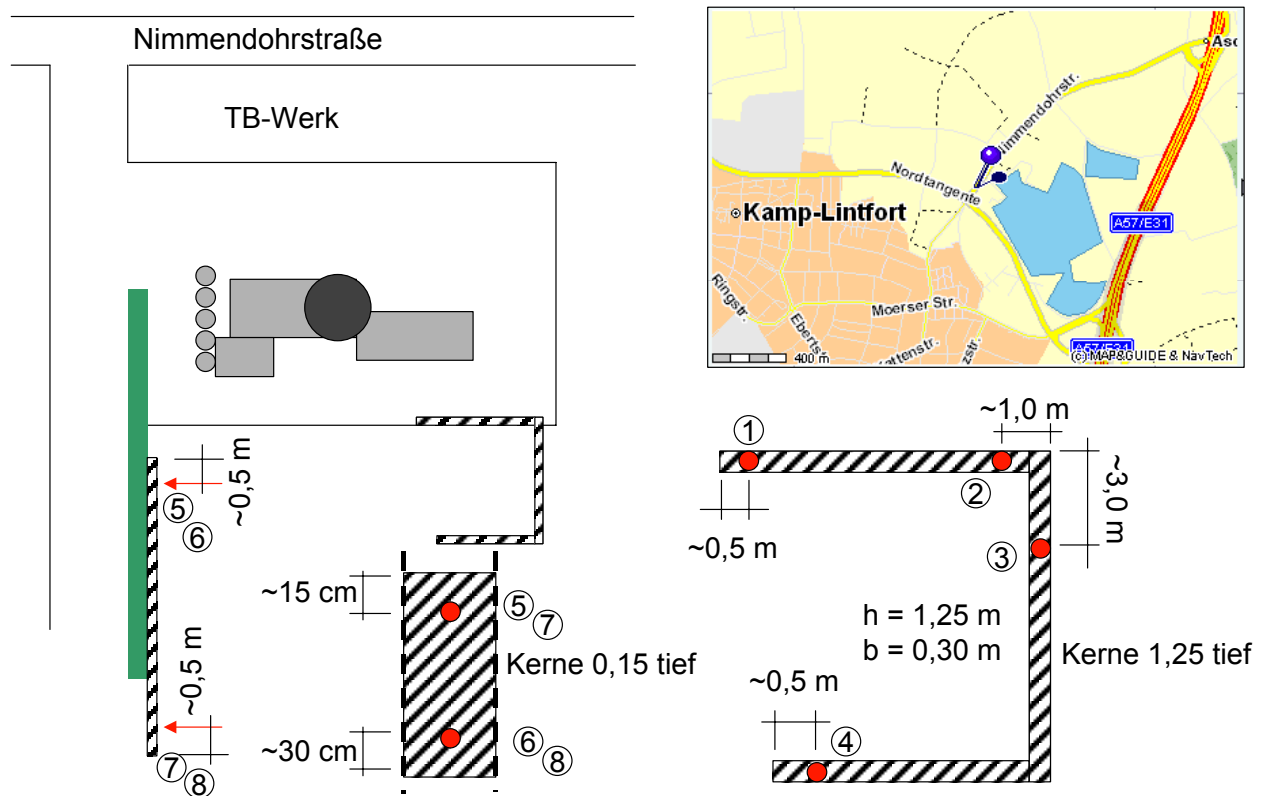


Bild C53: Bohrkernentnahmestellen an den Probewänden 1, 2 und 3 - Übersichtsplan

Aufsicht

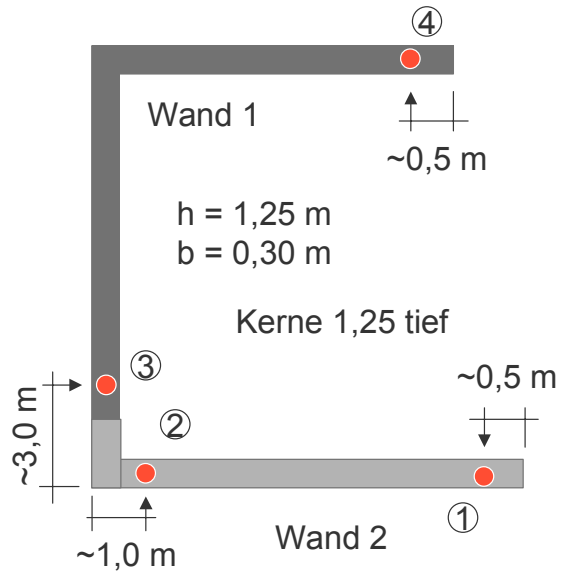


Bild C54: Bohrkernentnahme an Wand 1 und 2



Bild C55: Bohrkern Wand 2, Pos. 1 und Pos. 2

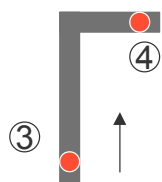
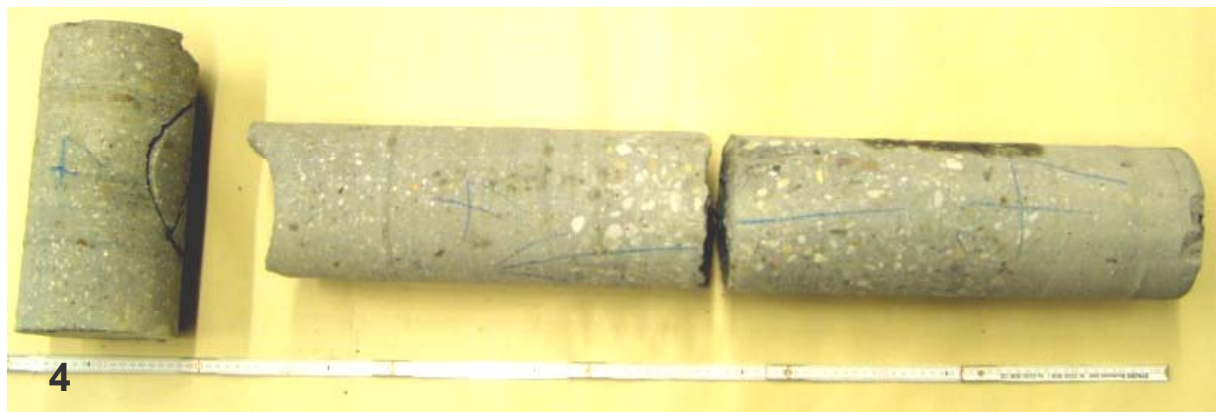


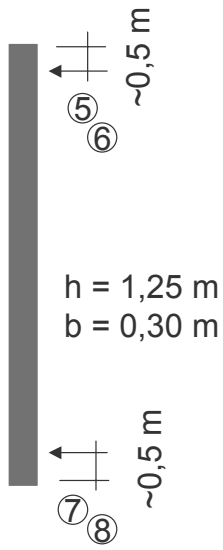
Bild C56: Bohrkern Wand 1, Pos. 3 und Pos. 4



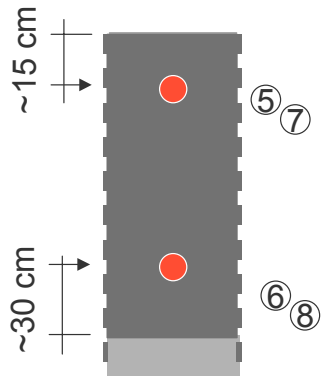
Bild C57: Bohrkern Wand 1, Pos. 4 - Detail



Aufsicht



Ansicht



Kerne 0,15 tief



Bild C58: Bohrkernentnahme an Wand 3



Bild C59: Bohrkern Wand 3, Pos. 5 / 6

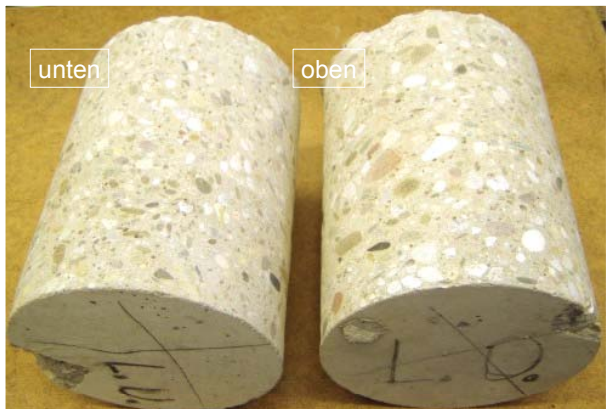


Bild C60: Bohrkern Wand 3, Pos. 7 / 8

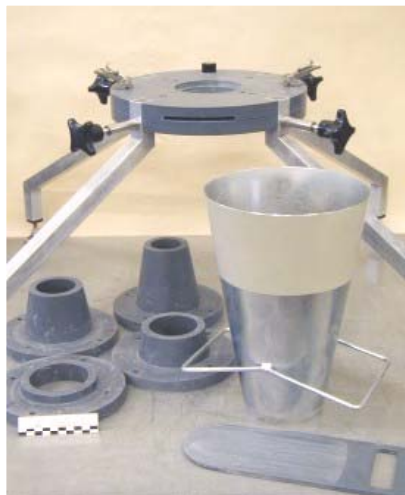


Bild C61: Prototyp Auslaufkegel

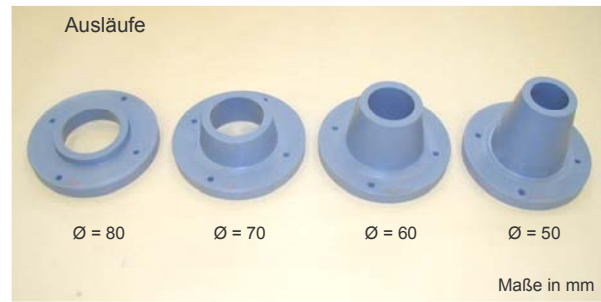


Bild C62: Auslaufkegel - Auslaufbereich

Bild C63: Auslaufkegel - Ausläufe



Bild C64: Auslaufkegel in der Anwendung



Bild C65: Auslaufkegel – Ausfließverhalten bei unterschiedlichen Ausläufen



Bild C66: Betonherstellung Malmö



Bild C67: Auslaufkegel - Praxiseinsatz in Malmö

Datum:

**Forschungsgemeinschaft Transportbeton FTB  
Messprotokoll für selbstverdichtenden und F6 Beton (Praxistest-Auslaufkegel)**

Mischzeitende TB-Werk	Fahrzeit Fahrmischer	Ankunft Fahrmischer auf der Baustelle	Messung Uhrzeit	Frischbeton-temperatur	Trichterauslaufzeit (nur SVB)	Kegelauslaufzeit (F6 und SVB)	Setzfließmaß (nur SVB)	Ausbreitmaß (nur F6)	t 500 (nur SVB)	Bemerkung
hh:mm	in Minuten	hh:mm	hh:mm	°C	Sekunden	Sekunden	mm	mm	Sekunden	

Angaben zur Betonzusammensetzung

- |                   |  |   |                                   |   |
|-------------------|--|---|-----------------------------------|---|
| Art des Betons    | <input type="checkbox"/> SVB Mehlkorntyp | <input type="checkbox"/> SVB Stabilisierertyp | <input type="checkbox"/> F6       |   |
| Zementart         | <input type="checkbox"/> CEM I           | <input type="checkbox"/> CEM II               | <input type="checkbox"/> CEM III  | Zementgehalt <input type="checkbox"/> kg/m <sup>3</sup>   |
| Zementfestigkeit  | <input type="checkbox"/> 32,5            | <input type="checkbox"/> 42,5                 |                                   |   |
| Mehlkornart       | <input type="checkbox"/> Kalksteinmehl   | <input type="checkbox"/> Flugasche            | <input type="checkbox"/> Sonstige | Mehlkorngehalt <input type="checkbox"/> kg/m <sup>3</sup> |
| Gesteinskörnung   | <input type="checkbox"/> Sand/Kies       | <input type="checkbox"/> gebrochenes Material |                                   | w/z-Wert <input type="checkbox"/>                         |
| Betonzusatzmittel | <input type="checkbox"/> Fließmittel     | <input type="checkbox"/> Stabilisierer        | <input type="checkbox"/> Sonstige |   |

Name und Anschrift der bauausführenden Firma:

Name und Anschrift des Betonlieferanten:

Messprotokolle bitte versenden an  
Forschungsgemeinschaft Transportbeton FTB, Dr. Aßbrock, Düsseldorfer Str. 50, 47051 Duisburg, Fax 0203/99239-98

Bild C68: Messprotokoll für selbstverdichtenden und F6 Beton (Praxistest-Auslaufkegel)