Projektinformationen zur Veröffentlichung im Rahmen des Internetauftritts der AiF (Projektträger im aFuE-Förderprogramm)

Titel des Forschungsvorhabens:

Eignung aufbereiteter Braunkohlenflugasche für die Verwendung als Zusatzstoff für Selbstverdichtenden Beton

Fachgebiet:

Bauwesen (BAU)

Förderkennzeichen:	Zuwendungsempfänger:
17 049 02	**Fachhochschule Potsdam, Fachbereich Bauingenieurwesen**

Projektleitung:

Prof. Dipl.-Phys. Klaus Landwehrs

Kontakt (Anschrift, Telefon, Fax, eMail):

Fachhochschule Potsdam
Fachbereich Bauingenieurwesen
Pappelallee 8-9
14469 Potsdam
Tel: 0331/580-1316 Fax: 0331/580-1399
mail: landw@fh-potsdam.de

Kurzfassung

Ausgangssituation bei Projektbeginn:

Selbstverdichtender Beton (SVB) zeichnet sich vor allem durch eine sehr hohe Fließfähigkeit aus. Dieses Materialverhalten ist nur auf der Basis eines erhöhten Mehlkorngehaltes möglich, welcher mit Wasser und neuen besonders wirksamen Fließmitteln der so genannten 3. Generation eine Suspension bildet, in der die gröberen Mischungsbestandteile schweben, ohne zu sedimentieren. Dieses Mehlkorn setzt sich aus einem Zementanteil und Zugaben unterschiedlicher Zusatzstoffe wie Flugaschen, Gesteinsmehlen oder auch Silicastaub zusammen. Die Eignung von Steinkohlenflugasche (SFA) als Zusatzstoff für selbstverdichtenden Beton ist bereits ausreichend nachgewiesen. Im Gegensatz dazu erfolgte noch keine nähere Untersuchung über die Verwendungsmöglichkeiten von Braunkohlenflugasche (BFA) als Füllstoff für SVB.

Ursprüngliche Ziele:

Das Ziel dieses Vorhabens war es, den Sekundärrohstoff Braunkohlenflugasche (BFA) als Zusatzstoff für selbstverdichtenden Beton zu verwerten und durch geeignete Aufbereitung seine Eigenschaften günstiger als die anderer Zusatzstoffe zu gestalten. Das Vorhaben sollte die Grundlagen schaffen, um eine wirtschaftliche Betonrezeptur für einen Selbstverdichtenden Beton entwickeln zu können. Der Versuchsplan des Projektes sah vor, daß ein Portlandzement mit verschiedenen Gehalten von je einer Braunkohleflugasche und einer für die Herstellung von Selbstverdichtenden Beton erprobten Steinkohleflugasche versetzt wird, wobei die SFA als Vergleichsmaßstab für die erzielbaren Eigenschaften dienen sollte.

Ergebnisse des Forschungsvorhabens:

Die untersuchten Frisch- und Festbetoneigenschaften der hergestellten Selbstverdichtenden Betone mit BFA und SFA als Zusatzstoff können überwiegend als zufrieden stellend und nahezu gleichwertig betrachtet werden. Die Verarbeitbarkeitszeit, welche in der Praxistauglichkeit dieser Betone eine große Bedeutung einnimmt, ist bei den „BFA-Betonen“ problematisch. Es konnte festgestellt werden, daß das Rücksteifverhalten der Frischbetone sehr stark von der Art des eingesetzten Mischertyps (Freifall- o. Zwangsmischer) und vom „Zustand“ während der Lagerung bis zur Weiterverarbeitung der Betone (Stillstand o. Bewegung) abhängig ist. Durch Auswahl eines geeigneten Mischregimes konnten letztendlich bei den „BFA-Betonen“ Verarbeitbarkeitszeiten jenseits von 90 Minuten erreicht werden.

Wirtschaftliche und wissenschaftlich/technische Verwertung der Vorhabensergebnisse:

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die hier entwickelten Betone mit aufbereiteter Braunkohlenflugasche für den Einsatz in der Betonfertigteilindustrie geeignet sind. Die Anwendung als Transportbeton auf der Baustelle ist allerdings nur bedingt möglich. Hierbei ist die Dauer vom Herstellen des SVB im Transportbetonwerk bis zum Einbauen auf der Baustelle ausschlaggebend. Zur Minimierung des Rücksteifens müssen einige „Regeln“ im Bezug auf die Wahl des Mischers und die Art des Transportes an den Einbauort beachtet werden. Im Rahmen weiterer Untersuchungen sollte versucht werden - z. B. durch den Einsatz von Stabilisierern - diesen Nachteil gegenüber den Betonen mit Steinkohlenflugasche zu kompensieren.

Kooperationspartner:

Rüdersdorfer Zement GmbH - BBQ Bautechnik Süd-Ost GmbH - VEAG Vereinigte Energiewerke AG - Readymix Handel und Transport GmbH

Patente/Schutzrechtanmeldungen aus dem Forschungsvorhaben:

Aus diesem Forschungsprojekt gingen keinerlei Patente bzw. Schutzrechtanmeldungen hervor.

Zur Veröffentlichung der Informationen bezüglich des o.a. Forschungsvorhaben, auf der Homepage der ***AiF - Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinungen “Otto von Guericke” e.V.*** (www.aif.de/afue) erklären wir hiermit unser Einverständnis.

Ort, Datum	Unterschrift
Potsdam, den	

Projekt:

Eignung von aufbereiteter Braunkohlenflugasche für die Verwendung als Zusatzstoff für Selbstverdichtenden Beton

gefördert durch:
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Projektträger:
Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF)

Förderkennzeichen:
17 049 02

S c h l u s s b e r i c h t

Laufzeit des Projektes:
01.09.2002 - 29.02.2004

Fachbereich Bauingenieurwesen

Labor für Baustoffe

ausführende Stelle:
Fachhochschule Potsdam
Fachbereich Bauingenieurwesen
Labor für Baustoffe

Projektleitung:
Prof. Dipl.-Phys. Klaus Landwehrs

Projektbearbeitung:
Dipl.-Ing. Sandro Weisheit
Pappelallee 8-9
14469 Potsdam
Telefon: 0331/580-1344
Telefax: 0331/1399
e-mail: s.weisheit@fh-potsdam.de

Dipl.-Ing. Ulf Müller
Pappelallee 8-9
14469 Potsdam
Telefon: 0331/580-1333
Telefax: 0331/1399
e-mail: umueller@fh-potsdam.de

Potsdam, August 2004

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchten wir uns bei folgenden Firmen und Instituten, welche uns unterstützt haben, namentlich bedanken:

- Readymix AG
- Rüdersdorfer Zement GmbH
- TU Berlin (granulometrische Untersuchungen der Flugaschen)
- F.A.Finger-Institut für Baustoffkunde (ESEM-Aufnahmen der Flugaschen)

Weiterhin möchten wir uns bei den studentischen Hilfskräften und Diplomanden für die tatkräftige Unterstützung bedanken.

Nicht zuletzt bedanken wir uns beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Projektträger AiF für die Förderung und Betreuung des Projektes.

INHALTSVERZEICHNIS

I. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS 4

II. SYMBOLVERZEICHNIS 5

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG 6

2. WISSENSCHAFTLICHER STAND 8

2.1. SELBSTVERDICHTENDER BETON 8
2.1.1. DEFINITION UND HISTORISCHE ENTWICKLUNG 8
2.1.2. RHEOLOGIE DES SVB 10
2.1.3. ENTWURFSMETHODEN FÜR SVB 12
2.1.3.1. ENTWURFSMETHODE NACH OKAMURA 12
2.1.3.2. ENTWURFSMETHODE NACH EMPFEHLUNG DER JSCE 15
2.1.3.3. VORSTELLUNG EINER NEUEN ENTWURFSMETHODE AUS DEUTSCHLAND 16

2.2. UNTERSCHIEDE ZWISCHEN SFA UND BFA 17
2.2.1. ALLGEMEINES 17
2.2.2. PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN 18
2.2.2.1. KORNGRÖSSENVERTEILUNG 18
2.2.2.2. SPEZIFISCHE OBERFLÄCHE 19
2.2.2.3. KORNROHDICHTE 19
2.2.2.4. KORNFORM 20
2.2.3. CHEMISCHE EIGENSCHAFTEN 22
2.2.4. DAS MAHLEN VON ASCHEN 24

3. BETONTECHNOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN 26

3.1. ALLGEMEINE ANMERKUNGEN 26

3.2. CHARAKTERISIERUNG DER AUSGANGSSTOFFE 26

3.3. ENTWICKLUNG DER REZEPTUR DES SVB 33
3.3.1. LEIMVERSUCHE 33
3.3.2. MÖRTELVERSUCHE 36
3.3.3. BETONVERSUCHE 38

3.4. VERSUCHSUMFANG UND EINLEITENDE BEMERKUNGEN 40

3.5. AUSWERTUNG DER BINDEMITTELUNTERSUCHUNGEN 41
3.5.1. WASSERANSPRUCH 41
3.5.2. ERSTARRUNGSVERHALTEN 42
3.5.3. RAUMBESTÄNDIGKEIT 43
3.5.4. HYDRATATIONSWÄRMEENTWICKLUNG 43
3.5.5. FESTIGKEITSENTWICKLUNG 45

3.6. AUSWERTUNG DER FRISCHBETONUNTERSUCHUNGEN 47
3.6.1. SETZFLIESS - VERSUCH 47
3.6.2. TRICHTERAUSLAUFZEIT - VERSUCH 48
3.6.3. J - RING - VERSUCH 49
3.6.4. L - KASTEN - VERSUCH 50
3.6.5. LUFTPORENBESTIMMUNG 51

3.6.6. RÜCKSTEIFVERHALTEN 52
3.6.7. FRÜHSCHWINDVERHALTEN 54

3.7. AUSWERTUNG DER FESTBETONUNTERSUCHUNGEN 58
3.7.1. DRUCKFESTIGKEIT / ROHDICHTE 58
3.7.2. E - MODUL 59
3.7.3. GESAMTSCHWINDVERHALTEN 60
3.7.4. BEURTEILUNG DER BETONOBERFLÄCHEN UND DER SEDIMENTATION 63

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 64

III. LITERATURVERZEICHNIS 66

IV. ABBILDUNGSVERZEICHNIS 73

V. TAFELVERZEICHNIS 75

VI. AN LAGE 76

I. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Zeichen	Bedeutung
Abb.	Abbildung
BET	Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche mittels Gasabsorption nach **B**runauer, **E**mmet und **T**eller
BFA	Braunkohlenflugasche
BV	Betonverflüssiger
CEM…	Zementbezeichnung
CSH	Calciumsilikathydrat
DafStb	Deutscher Ausschuß für Stahlbeton
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DIN EN	Europäische Norm mit dem Status einer Deutschen Norm
ESEM	**E**nvironmental **S**canning **E**lectron **M**icroscope (Atmosphärisches Rasterelektronen-mikroskop)
FM	Fließmittel
FSK I…VII	Feststoffkombination I…VII
i.d.R.	in der Regel
JSCE	Japan Society of Civil Engineers
LP	Luftporen
RFA	Röntgenfluoreszens-Analyse
RRSB	Exponentialverteilung nach **R**osin, **R**ammler, **S**perling und **B**ennet zur Bestimmung der Korngrößenverteilung
SCC	Self Compacting Concrete
SFA	Steinkohlenflugasche
SVB	Selbstverdichtender Beton
VEA	Viscosity Enhancing Agents – Stabilisierer / Viskosifizierer
VR 1…6	Versuchsreihe 1…6

II. SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Dimension	Bedeutung
τ_f	N/mm²	Fließgrenze
τ	N/mm²	Scherspannung
η	Nms	dynamische Viskosität
Γ_m	---	relatives Setzfließmaß (Mörtel)
s_f	cm	Setz-Fließmaß (Beton)
β_p	---	optimales Wasser-Mehlkorn-Volumenverhältnis, bei dem das gesamte Wasser durch das Mehlkorn gebunden wird
t_m	s	Trichterauslaufzeit (Mörtel)
t_b	s	Trichterauslaufzeit (Beton)
ρ_r	g/cm³	Rohdichte
ρ_s	g/cm³	Schüttdichte
d_{mod}	µm	Maximum der Häufigkeitsverteilung
d_{10}	µm	Korngröße bei 10 Vol.-% Durchgang
d_{50}	µm	Korngröße bei 50 Vol.-% Durchgang
d_{90}	µm	Korngröße bei 90 Vol.-% Durchgang
w/z	---	Massenverhältnis von Wasser zu Zement
Vw	ml	Volumen Wasser
Vp	ml	Volumen Pulver
WA	M.-%	Wasseranspruch
t_{500}-Zeit	s	Zeit, die der Betonkuchen beim J-Ring-Versuch benötigt, um einen Durchmesser von 500 mm zu erreichen
t_{200}	s	Zeit, bis der Beton beim L-Kasten-Versuch die 200 mm-Markierung erreicht hat
t_{400}	s	Zeit, bis der Beton beim L-Kasten-Versuch die 400 mm-Markierung erreicht hat
h_1	mm	Höhe am Anfang des horizontalen Schenkels beim L-Kasten-Versuch
h_2	mm	Höhe am End des horizontalen Schenkels beim L-Kasten-Versuch

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Weltweit wird kein anderes Material so häufig und vielseitig verbaut wie der Baustoff Beton. Seine Vorteile liegen in einem nahezu unbegrenzten Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten, in einem relativ geringen Unterhaltungsaufwand bei entsprechender sachgerechter Projektierung und Verarbeitung auf der Baustelle und in den vergleichsweise niedrigen Kosten der Ausgangsstoffe und der Herstellung. Durch die daraus resultierende hohe Wirtschaftlichkeit bildet der Baustoff Beton oft eine ökonomische Alternative zu anderen Materialien.

Die Weiterentwicklung hydraulischer Baustoffe hat in den vergangenen Jahrzehnten eine rasante Entwicklung genommen. Nach der Erprobung von Hochleistungsbetonen für besondere Anwendungsgebiete Anfang der 90er Jahre erfährt der Betonbau derzeit eine weitere, nahezu revolutionäre Modifikation. Durch ausgewählte Zusammensetzungen und besondere Zusätze, welche in den letzten Jahren wesentlich verbessert wurden, kann der Frischbeton so eingestellt werden, dass er über weite Strecken frei fließen kann und sich dabei praktisch selbst entlüftet. Dieser neue Beton gehört ebenfalls zur Gattung der Hochleistungsbetone und trägt den Namen „Selbstverdichtender Beton“ (in Deutschland SVB; im internationalen Sprachgebrauch: Self Compacting Concrete, SCC).

Die besondere Fließfähigkeit des selbstverdichtenden Betons bietet sowohl für die Gestaltung mit Sichtbeton als auch für den konstruktiven Ingenieurbau neue Rationalisierungsansätze. Dieses Materialverhalten ist nur auf der Basis eines erhöhten Mehlkorngehaltes möglich, der mit Wasser und neuen besonders wirksamen Fließmitteln der so genannten 3. Generation eine Suspension bildet, in der die gröberen Mischungsbestandteile schweben, ohne zu sedimentieren. Dieses Mehlkorn setzt sich aus einem Zementanteil und Zugaben unterschiedlicher Zusatzstoffe wie Flugaschen, Gesteinsmehlen oder auch Silicastaub zusammen. Die Eignung von Steinkohlenflugasche als Zusatzstoff für selbstverdichtenden Beton ist ausreichend nachgewiesen. Es wurden bereits sowohl international als auch in Deutschland (Science-Center Wolfsburg, BMW-Werk Leipzig) mehrere großtechnische Bauvorhaben, bei denen SVB mit SFA als Zusatzstoff zum Einsatz kam, erfolgreich umgesetzt. Im Gegensatz dazu erfolgte noch keine nähere Untersuchung über die Verwendungsmöglichkeiten von Braunkohlenflugasche (BFA) als Füllstoff für SVB.

Als eine der wichtigsten ostdeutschen Primärenergieträger stellt die Braunkohle mit ca. 27 % der Brutto-Stromerzeugung in Deutschland einen wesentlichen Energielieferanten dar. Durch eine jährliche Förderung von ca. 180 Mio. Tonnen Braunkohle in der Bundesrepublik Deutschland entsteht als Abfallprodukt ca. 14 Mio. Tonnen Braunkohlenflugasche (BFA). [B-7] Bisher liegt die überwiegende Nutzung der BFA in der Verfüllung ausgekohlter Tagebaue. Während für diese Anwendung hauptsächlich das Volumen der abgebundenen Braunkohlenflugasche verwertbar ist, müssen für den Einsatz im Baustoffbereich weitere physikalische, chemische und mineralogische Eigenschaf-

ten, wie z.B. die Korngrößenverteilung oder die Gehalte an CaO bzw. von Freikalk, herangezogen werden. Hieraus ergeben sich eine Reihe von sowohl ökonomischen als auch von ökologischen Vorteilen für die Baustoffindustrie, wie ein teilweiser Ersatz teurer Zemente oder die Verwertung eines ständig in großen Mengen verfügbaren Reststoffes als Zusatzstoff. *[S-7]*

Wie in *[G-1]* beschrieben, verschlechtern sich jedoch die Frischbetoneigenschaften hinsichtlich der Konsistenz beim Einsatz von BFA als Zusatzstoff, da der Wasseranspruch dieser Aschen wesentlich über dem der Zemente liegt. Für das Phänomen des erhöhten Wasseranspruches werden in der Literatur vor allem zwei physikalischen Eigenschaften der BFA verantwortlich gemacht. Zum einem ist hier die Kornform der Aschepartikel zu nennen, welche die Gestalt von zerbrochenen Hohlkugeln besitzen und somit eine erhöhte innere Oberfläche hervorrufen. *[M-13]* Zum anderem muss die Partikelgestalt der BFA angeführt werden, für die eine hohe Porosität und damit verbunden eine Teilchenkapillarität kennzeichnend ist und somit ebenfalls zu einem erhöhten Wasseranspruch beiträgt. *[I-1]*

Verschiedene Untersuchungen zeigten, dass die Möglichkeit besteht, die in den Kraftwerken anfallenden Braunkohlenflugaschen aufzubereiten. *[B-9, M-13, W-2]* Wie Vorversuche bei einem der Kooperationspartner zeigten, kann die spezifische Oberfläche der BFA-Partikel durch einen zusätzlichen Mahlprozess so verändert werden, dass sich die negativen Auswirkungen auf die Betonkonsistenz abmindern. Ein weiterer positiver Effekt des Mahlprozesses ist eine Homogenisierung der BFA, welche im Anfallzustand eine relativ große Schwankungsbreite der Ascheeigenschaften vorweist.

Das Ziel dieses Projektes bestand nun in der Beantwortung der Frage, ob sich der aufbereitete Sekundärrohstoff Braunkohlenflugasche als Zusatzstoff für die Herstellung eines selbstverdichtenden Betons eignet. Um dies zu erreichen, sollte eine Rezeptur für einen SVB mit Braunkohlenflugasche nach einer bekannten Entwicklungsmethode entworfen werden. Als BFA kam eine allgemein bauaufsichtlich zugelassene Asche aus dem Kraftwerk Jänschwalde mit der Bezeichnung „Jäwament E“ im aufbereiteten Zustand zum Einsatz..Um Unterschiede im Verhalten der Frisch- bzw. Festbetoneigenschaften gegenüber einem SVB mit Steinkohlenflugasche (SFA) aufzeigen zu können, war ein Referenzbeton herzustellen, welcher eine in der Industrie bewährte SFA als Zusatzstoff enthielt. Die Aussage der Eignung einer BFA kann sich aber nur auf den verwendeten Aschetyp beziehen, da die chemische und mineralogische Zusammensetzung, die Granulometrie und thermische Vorgeschichte der Flugasche vom jeweiligen Kohlevorkommen des Kraftwerkes abhängig ist.

2. WISSENSCHAFTLICHER STAND

2.1. SELBSTVERDICHTENDER BETON

2.1.1. DEFINITION UND HISTORISCHE ENTWICKLUNG

Die technischen Anforderungen und architektonischen Wünsche an den Stahl- bzw. Spannbeton nehmen in den letzten Jahrzehnten permanent zu. Wo es um größere Spannweiten von Deckenbereichen und Brücken, um anspruchsvolle Ingenieurbauwerke oder schlichtweg um filigranere Betonstrukturen geht, erreicht man heute bereits häufig die Grenzen der Betonverarbeitung oder überschreitet sie sogar mit nachteiligen Folgeerscheinungen in Form von Kiesnestern, verstärkten Lunkerbildungen, bis hin zum erforderlichen Rückbau der betroffenen Betonbauteile. Ein primärer Grund für diesen Umstand sind ungeeignete Betonrezepturen oder einfach ausgedrückt: menschliches Versagen. Die Ursachen können von zu steifer Konsistenz, Entmischung durch Überdosierung von Fließmitteln auf der Baustelle, über unzureichende Verdichtung bis hin zu mangelnder Schalungsausbildung reichen.

Um den oben genannten Umständen entgegenzuwirken, wurde vor rund 16 Jahren in Japan ein neues Betonkonzept entwickelt: „Der Selbstverdichtende Beton (SVB)“. Was aber ist SVB ? Eine Definition gibt die gleichnamige Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. In [D-2] heißt es:

> *„Selbstverdichtender Beton ist ein Normalbeton, der ohne Einwirkung zusätzlicher Verdichtungsenergie allein unter dem Einfluss der Schwerkraft fließt, entlüftet sowie die Bewehrungszwischenräume und die Schalung vollständig ausfüllt.“*

Eine Weiterentwicklung der bisher angewandten Fließmittel in Japan und die Umsetzung der neu geschaffenen Möglichkeiten durch die technologischen Zentren japanischer Baukonzerne führten ab Mitte der 80-iger Jahre zur Entwicklung des SVB. Somit konnte 1988 ein solcher Beton von Okamura und Ozawa der Öffentlichkeit vorgestellt werden. Ein Jahr später erfolgte an der Universität von Tokio für mehr als 100 Forscher und Ingenieure eine Demonstration aus der Praxis, woraufhin man zeitgleich in mehreren Laboratorien verschiedene Forschungsprogramme initiierte. Nach ersten praktischen Anwendungen mit selbstverdichtenden Beton stellte sich heraus, dass die Eigenschaften der Mischungen sensibel auf Änderungen in der Zusammenstellung reagieren, weshalb es auch nicht zu einer allgemeinen Einführung von SVB kam. 1997 entwickelte Okamura eine Methode, um die Zusammenstellung von „stabilen“ Betonen zu bestimmen.

Daraufhin startete man in den Niederlanden eine Untersuchung zur Herstellung von Fließbeton. Es sollte getestet werden, ob eine Reproduzierbarkeit der Okamura-Methode für einen solche Beton auf niederländische Grundstoffe und Mischgeräte besteht. Die Ergebnisse dieses Testes waren

durchweg positiv. Die Mischungen waren sehr fließfähig und besaßen ebenfalls einen sehr großen Widerstand gegen Entmischung. Inzwischen konnten auch erste Erfahrungen mit diesem Beton in der niederländischen Baupraxis gewonnen werden. Nachdem sich 1998 die Belton-Gruppe, ein Verband von 24 niederländischen Herstellern von Fertigteilelementen der potenziellen Möglichkeiten von SVB bewusst wurde, startete man das so genannte Belton-Projekt. Nach Abschluss dieses Projektes waren sechzehn der vierundzwanzig beteiligten Fertigteilwerke in der Lage, einen SVB mit den an den jeweiligen Standorten vorliegenden Ausgangsstoffen herzustellen. Diese Entwicklung forcierte den Einsatz von SVB in der Betonfertigteilindustrie erheblich [B-3] und veranlasste ebenfalls deutsche Fertigteilhersteller, SVB in ihrer Produktion mit anzuwenden. [L-2]

Die vielseitige Nutzung der Variationsmöglichkeiten im heutigen „5-Stoff-System“ Beton reichen vom Beton normaler Festigkeitsklasse als Rüttelbeton bzw. als selbstverdichtendem Beton, über den hochfesten Beton bis hin zum so genannten „Béton de Poudre Réactive“ (BPR, engl.: Reactive Powder Concrete, RPC). [G-4, B-8] Bei letzterem handelt es sich um einen SVB mit Druckfestigkeiten über 200 N/mm², welchen man in den letzten Jahren in Frankreich entwickelte.. Die Abbildungen 2.1 und 2.2 zeigen eine Übersicht über die Volumina der Bestandteile der oben genannten Betone und analog die dazugehörigen Festigkeiten.

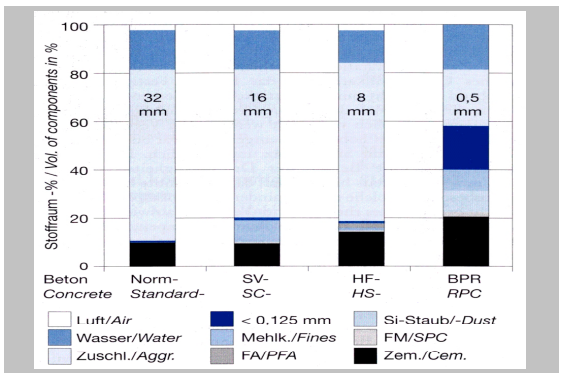


Abb. 2.1: *Stoffraumanteile für verschiedene Betone*

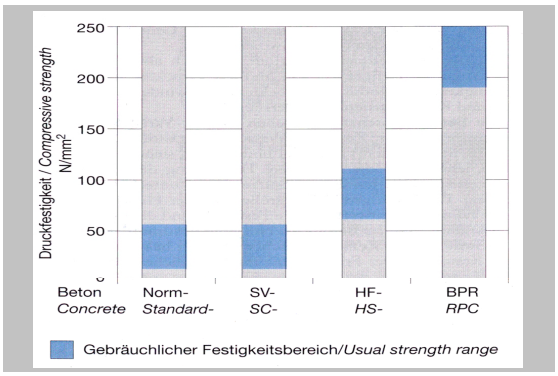


Abb. 2.2: *Festigkeitsbereiche der Betone aus Abb. 2.1*

Da es sich beim SVB noch um ein sehr junges Gebiet der Betontechnologie handelt, wurden bisher noch verhältnismäßig wenig Objekte mit diesem optimierten Baustoff hergestellt. Lediglich in Japan verarbeitete man seit 1991 größere Mengen selbstverdichtender Betone, vor allem im Wohnungs-, Industrie-, Brücken- und Fertigteilbau. Auf dem europäischen Baumarkt sind vor allem die skandinavischen Länder Vorreiter bei der Anwendung von selbstverdichtenden Beton. Eines der ersten Bauwerke mit SVB in Europa war die Fassade des neuen Theaters des Königlichen Schauspielhauses in Den Haag [D-1]. Als in Deutschland erfolgreich durchgeführte Großbauprojekte, bei denen selbstverdichtender Beton zum Einsatz kam, sind wie bereits erwähnt das Science-Center Wolfsburg und das neue BMW-Werk in Leipzig zu nennen. Bei letzterem wurden insgesamt ca. 4.500 m³ selbstverdichtender Beton zum Teil unter schwierigen äußeren Bedingungen (hohe Außentemperaturen) erfolgreich eingebaut.

2.1.2. RHEOLOGIE DES SVB

Die Wissenschaft des Verformungsverhaltens von Flüssigkeiten und Suspensionen, welche sich mit dem Wechselwirkungen zwischen Scherspannungen und ihren zeitlichen Veränderungen befasst, wird als Rheologie (*griech.* „Fließkunde“) bezeichnet. Zur Bestimmung rheologischer (das Fließen beschreibender) Kenngrößen von SVB verwendet man Rotations- und Fallkörperviskometer, welche sich in ihrer Wirkungsweise unterscheiden.

In der Literatur werden mit den Fließkurven von Bingham und Newton zwei lineare Modelle angegeben. Wie in Abbildung 2.3 ersichtlich, enthält das Modell von Newton keine Fließgrenze τ_f .
Frischbeton stellt hinsichtlich seiner Rheologie ein komplexes, scherempfindliches „Mehrphasensystem“ dar, dessen Fließverhalten vorrangig durch die Eigenschaften des Zementleims bzw. -mörtels beeinflusst wird.

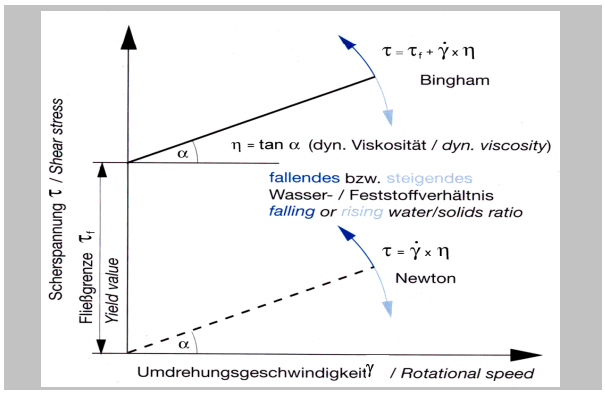


Abb. 2.3: *rheologische Modelle nach Bingham und Newton*

Im Gegensatz zu einer Newton`schen Flüssigkeit muss bei Frischbeton zum Fließen ein Scherwiderstand überwunden werden (siehe Abb. 2.3, oben). Dies wird bei Normalbeton mit Hilfe der von den Rüttlern in die Mischung eingebrachten Verdichtungsenergie erzielt. ***[K-4]***

Da die Fließfähigkeit (Flowability) von selbstverdichtendem Beton als seine Fähigkeit definiert wird, sich lediglich unter der Wirkung der Schwerkraft horizontal auszubreiten (Rüttelarbeit entfällt), ist es nötig, die Fließgrenze des Zementleimes zu reduzieren und so möglichst dem Newton`schen Modell zu entsprechen. Um die für ein Newton`sches Fließverhalten notwendigen Modifikationen im Mischungsentwurf für einen SVB vornehmen zu können, werden nachfolgend die Ursachen für das ideal-plastische Fließverhalten geklärt.

Entsprechend der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung der einzelnen Feststoffteilchen des Zementleimes besitzen die einzelnen Körner in wässriger Suspension unterschiedliche Oberflächenladungen. Aufgrund entgegengesetzter Ladungspotentiale an den Oberflächen der Suspensionsbestandteile kommt es zur gegenseitigen Anlagerung dieser Teilchen, der so genannten Agglomeration (siehe Abb. 2.4). Das Ergebnis ist eine durchgehende Flockenstruktur, welche das Absetzen der einzelnen Partikel in der Suspension verhindert. Durch Zufuhr von Rüttelenergie werden die Agglomerationen abgebaut – es kommt zum sogenannten „Strukturbruch“ und der damit verbundenen

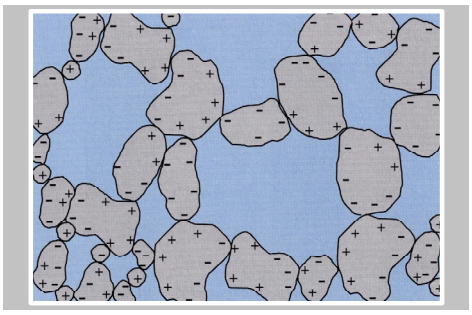


Abb. 2.4: *Agglomeration des Mehlkorns aufgrund untersch. Oberflächenladungen*

Überwindung des Scherwiderstandes; die Suspension wird fließfähiger. Eine gelungene Rüttelverdichtung zeigt sich durch den „Zusammenfluss“ aller Betonbestandteile und der Bildung eines dünnen Wasserfilms auf der Oberfläche. [G-4]

Aufgrund der Rheologie des Zementleimes sind zur Herstellung von SVB Fließmittel zu verwenden, welche es ermöglichen, die Fließgrenze nahezu unabhängig von der Viskosität zu steuern. Deren Wirkung besteht im wesentlichen darin, die Oberflächenladungen (Zeta-Potential) der feinen Feststoffpartikel in der Suspension auszugleichen und so die Partikel zu desagglomerieren. Mit zunehmender Fließmitteldosierung ist es möglich, den Scherwiderstand gänzlich aufzuheben. Allerdings birgt das für den SVB (bei Überdosierung) die Gefahr von Entmischungen, da sich seine Grobzuschläge absetzen können. Dementsprechend muss dafür Sorge getragen werden, dass der SVB eine sehr hohe i.d.R. wesentlich über der von Normalbeton liegende Viskosität aufweist (siehe Abb. 2.5). Um dem Zementleim die geforderte Stabilität bzw. Viskosität zu verleihen, kann zum einen der Wasserzementwert w/z nach oben beschränkt werden und zum anderen der Feststoffanteil des Zementleims durch Zugabe geeigneter mehlfeiner, nicht agglomerierender Zusatzstoffe erhöht werden (siehe Abb. 2.6). Zu diesen Stoffen gehören unter anderem Silicastaub, Metakaolin, Flugasche oder inerte Gesteinsmehle.

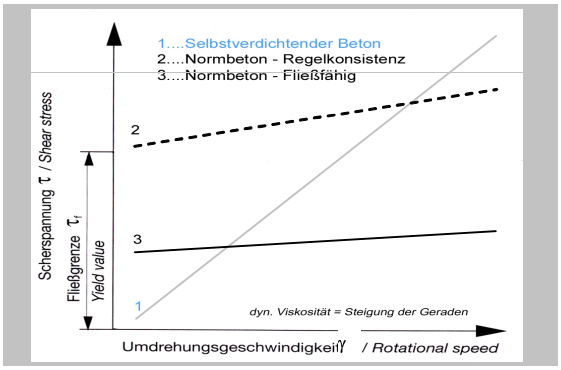


Abb. 2.5: *Vergleich von Fließkurven von Betonen unterschiedlicher Konsistenz*

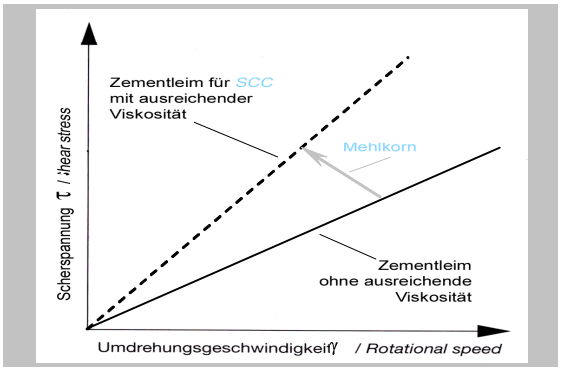


Abb. 2.6: *Einfluss des Mehlkorns auf die rheologischen Eigenschaften von Zementleim für SVB*

Als anzustrebender Zielwert der rheologischen Kenngrößen Fließgrenze τ_f und plastische Viskosität η_p bei rheologischen Untersuchungen am Mörtel für selbstverdichtenden Beton mit Hilfe eines Viskosimeters werden in der Literatur Zielfenster für τ_f von 20 bis 50 Pa und für η_p von 6 bis 12 Pa genannt. [F-4]

Die optimalen Eigenschaften eines SVB werden nur bei bestimmten Werten für die Viskosität und Fließfähigkeit erreicht. Die zielgenaue Einstellung der beiden Werte kann durch die Veränderung der Fließmitteldosierung und des Wassergehaltes in kleinen Intervallen vorgenommen werden. In erster Linie ist dabei das Setzfließmaß zur Ermittlung der Fließgrenze und zur Beurteilung des optimalen Fließmittelgehaltes von selbstverdichtenden Beton heranzuziehen. Die Trichterauslaufzeit hingegen dient als Messgröße zur Beschreibung der Viskosität eines SVB. [K-7]

2.1.3. ENTWURFSMETHODEN FÜR SVB

Bezug nehmend auf die bisher in Japan entwickelte Praxis wird derzeit von folgenden drei - in ihrer Zusammensetzung unterschiedlichen - Konzepten zur Herstellung von selbstverdichtendem Beton ausgegangen:

- Mehlkorn-Typ (Powder-Type):

  Bei diesem Typ wird der Beton mit einem hohen Anteil an Mehlkorn entworfen um damit eine stabile Suspension zu erzeugen, in der der Zuschlag schwimmt. Der erhöhte Wasseranspruch wird durch die Zugabe von Fließmitteln kompensiert. Der Entwurf von SVB diesen Typs folgt vorrangig dem Konzept nach Okamura, welches im Abschnitt 2.1.3.1 näher erläutert wird.

- Stabilisierer-Typ (Viscosity-Agent-Type):

  Bei diesem Typ wird überwiegend die Gefügestabilität und Fließfähigkeit des SVB durch den Einsatz von so genannten Stabilisierern oder Viskosifizierern (Viscosity Enhancing Agents - VEA) eingestellt. Obwohl diese Möglichkeit der Entwicklung von SVB in der Literatur oft erwähnt wird, sind keinerlei praktische Anwendungen bekannt.

- Kombinations-Typ (Combination-Type):

  Bei diesem Typ werden - wie der Name schon sagt - die beiden erstgenannten Möglichkeiten kombiniert. In Japan besteht hierfür bereits eine Empfehlung der JSCE (Japan Society of Civil Engineers; siehe Abschnitt 2.1.3.3). Hier ist der SVB wesentlich unempfindlicher gegenüber beeinflussenden Faktoren, wie von der Regelsieblinie abweichende Kornzusammensetzungen oder Schwankungen im Feuchtehaushalt.

Der Mischungsentwurf für SVB ist vordergründig darauf ausgerichtet, die gewünschte Fließfähigkeit zu erreichen. Da die Festbetoneigenschaften dabei natürlich nicht vernachlässigt werden dürfen, werden diese im ersten Ansatz z.B. durch Einhaltung eines Höchstwertes für den Wasserzementwet und eines künstlichen LP-Gehaltes berücksichtigt.

2.1.3.1. ENTWURFSMETHODE NACH OKAMURA

Nach dem klassischen japanischen Konzept, welches Mitte der 80-iger Jahre Okamura und Ozawa entwickelten, lässt sich empirisch ein selbstverdichtender Beton entwerfen. Das Konzept basiert auf der Theorie, dass man mit einem fließfähigen Mörtel ausreichender Viskosität lediglich durch Zugabe von Grobzuschlag und Abstimmung der Fließmitteldosierung einen SVB herstellen kann.

Die durchzuführenden Schritte zum SVB-Entwurf nach Okamura sind im untenstehenden Ablaufschema (Abb. 2.7) dargestellt. Nachfolgend werden die einzelnen Schritte genauer beschrieben.

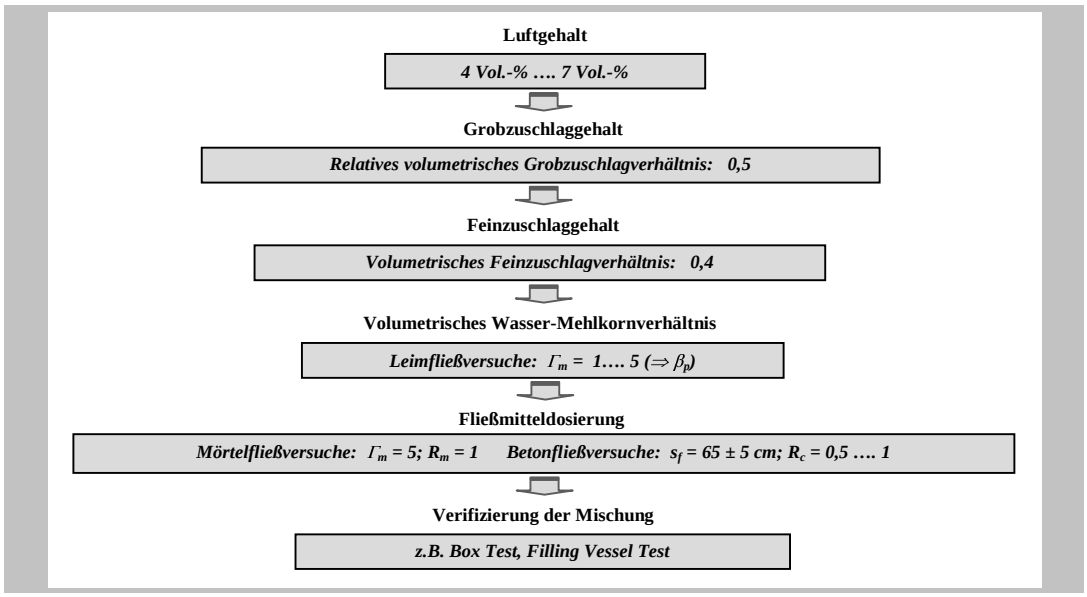


Abb. 2.7: *Vorgehensweise zur Herstellung eines SVB nach Okamura* [D-2]

Zu Begin des Entwurfs erfolgt die Festlegung der Zieleigenschaften, der Ausgangsstoffe sowie des angestrebten Luftgehaltes. Anschließend wird das Zuschlagvolumen über den Grob- und Feinzuschlaggehalt bestimmt. Hierbei wird i.d.R. das Grobkornvolumen mit 50 % des Betonvolumens angesetzt und das Sandvolumen auf 40 % des Mörtelvolumens festgelegt (siehe Abb. 2.8).

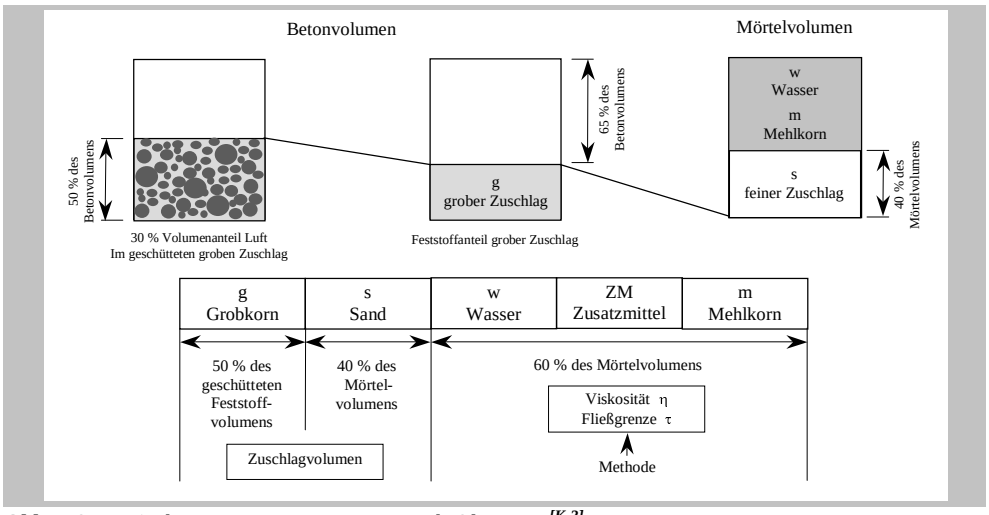


Abb. 2.8: *Mischungszusammensetzung nach Okamura* [K-3]

Nach Festlegung der Zuschlaganteile erfolgt anschließend durch aufeinander aufbauende Leim-, Mörtel- und Betonuntersuchungen der Entwurf des SVB.

- *Leimuntersuchungen*

Im ersten Arbeitsschritt wird am Leim das optimale Verhältnis zwischen Wasser und Mehlkornvolumen (V_w/V_m-Verhältnis) mit Hilfe des sogenannten Ausbreitfließversuches für Mörtel bestimmt. Das optimale Wasser-Mehlkorn-Volumenverhältnis liegt vor, wenn gerade das gesamte Wasser durch das Mehlkorn gebunden wird.

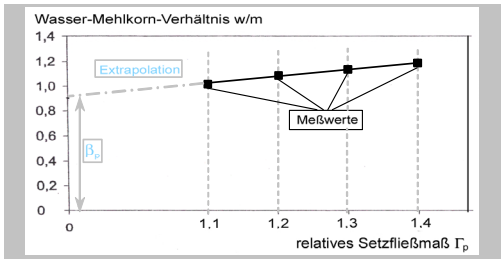


Abb. 2.9: *Bestimmung von β_p nach Okamura* [K-3]

Zur Ermittlung dieses Wasseranspruches werden mit einem Ausbreitkegel Prüfungen mit V_w/V_m-Verhältnissen von 1,1; 1,2; 1,3 und 1,4 durchgeführt. Aus jeweils einem gemessenen Setzfließmaß wird das relative Setzfließmaß Γ_p berechnet und in einem Diagramm (siehe Abb. 2.9) als Messwert aufgetragen. Der Wasseranspruch des Mehlkorns ergibt sich dann durch lineare Extrapolation dieser Messreihe als Schnittpunkt der Geraden mit der Ordinate für $\Gamma_p = 0$.

- *Mörteluntersuchungen*

Mit Hilfe von geeignetem Test- und Prüfzubehör (siehe Abb. 2.10) werden im nächsten Schritt zur weiteren Charakterisierung des selbstverdichtenden Betons bezüglich seiner Viskosität Serien von Fließ- und Durchströmungsuntersuchungen (Mortar-Flow-Test und Mortal-Funnel-Test) an „Sand-Zement-Mörtelgemischen“ durchgeführt. Hierbei sollte nach Okamura von einem V_w/V_m-Verhältnis von **0,8**·β_p bis **0,9**·β_p ausgegangen werden. Durch Variation der Fließmittelmenge und des Wasser-Mehlkorn-Verhältnisses wird der Mörtel so eingestellt, dass die Zielwerte für das relative Setzfließmaß $\Gamma_p = 5$ und die Durchlaufzeit t ca. 10 Sekunden erreicht werden.

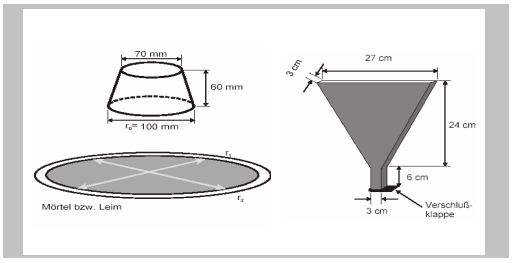


Abb. 2.10: *Ausbreitfließversuch (l.) und Trichterauslaufzeitversuch (r.) für Mörtel*

- *Betonuntersuchungen*

Da die Auswirkungen des Fließmittels auf den Mörtel gegenüber denen auf den Frischbeton variieren können, wird in einem letzten Schritt die exakte Fließmitteldosierung am Frischbeton bestimmt. Der Gehalt an Fließmittel wird so festgelegt, dass man ein Setz-Fließmaß s_f (Slump-Flow-Test) von ca. 65 ± 5 cm erreicht (siehe Abb. 2.11-l.). Anschließend wird die Fließfähigkeit mit einem speziell für diesen Zweck konzipierten Durchlauftrichter (V-Funnel-Test) überprüft (siehe Abb. 2.11-r.). Liegt die Durchlaufzeit t zwischen 5 und 20 Sekunden, kann von einer geeigneten Mischung und einem optimalen Fließmittel/Mehlkorn-Verhältnis ausgegangen werden.

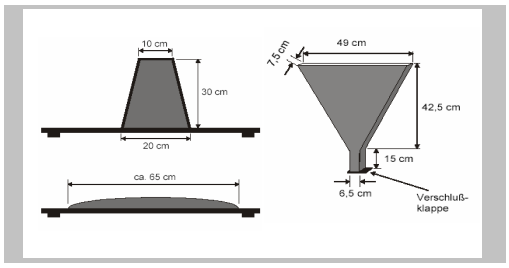


Abb. 2.11: *Setzfließversuch (l.) und Trichterauslaufzeitversuch (r.) für Beton*

2.1.3.2. ENTWURFSMETHODE NACH EMPFEHLUNG DER JSCE

Wie bereits erwähnt, wurde im „Ursprungsland“ des SVB von der Japan Society of Civil Engineers (JSCE) eine Empfehlung zur Ermittlung der Mischungszusammensetzung für selbstverdichtende Betone abgegeben - die so genannte zweite Methode (siehe Abb. 2.12). Bei diesem Entwurf muss im Vorfeld entschieden werden, ob der SVB dem Mehlkorn- oder Kombinationstyp entsprechend zusammengesetzt sein soll.

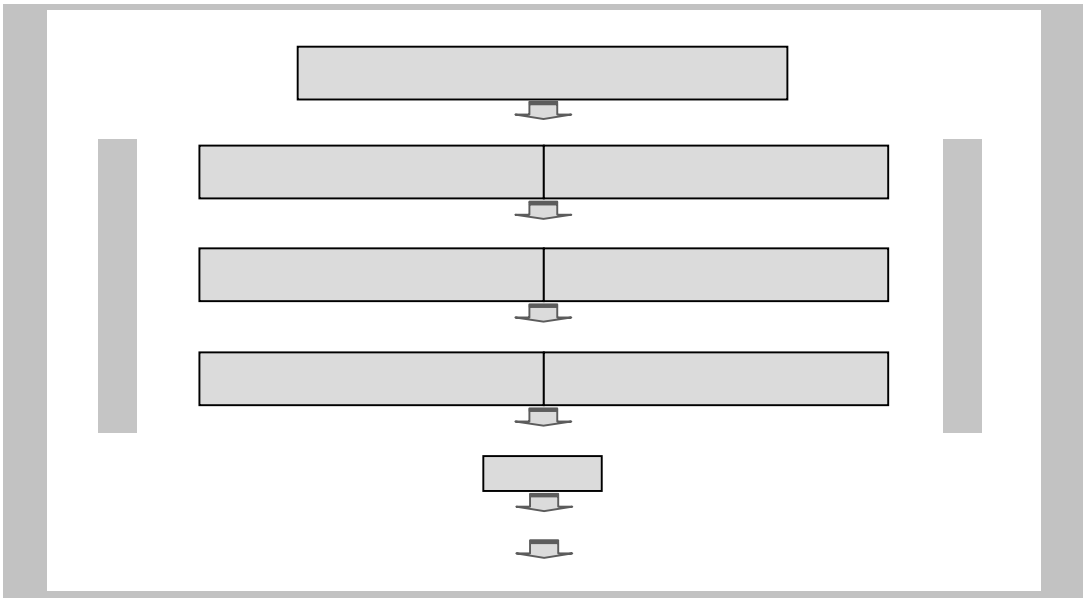


Abb. 2.12: *Vorgehensweise zur Herstellung eines SVB nach der JSCE-Methode* [D-1]

Anschließend wird der Gehalt an Grobzuschlag bestimmt, welcher zwischen 30 und 32 % des Betonvolumens liegen soll. Die nächsten drei Schritte unterscheiden sich je nach gewählten Entwurfs-Typ. Hat man sich für den Mehlkorn-Typ entschieden, liegen klare Wertebereiche für den Wassergehalt, das Wasser/Mehlkornverhältnis und dementsprechend für den Mehlkorngehalt vor. Beim Kombinationstyp hingegen müssen die genannten Bestandteile in Abhängigkeit des zu verwendenden Stabilisierers bestimmt werden.

Im nächsten Schritt, welcher wiederum für beide Typen gilt, wird der Luftgehalt festgelegt. Dieser wird in Japan mit 4,5 Vol.-% angesetzt. Abweichend von diesem japanischen Konzept werden in Deutschland selbstverdichtende Betone i.d.R. mit Luftgehalten von ca. 0,5…1,5 Vol.-% entsprechend den Luftgehalten üblicher Rüttelbetone hergestellt. Anschließend kann das Volumen an Feinzuschlag und Sand genau berechnet werden.

Im letzten Schritt wird mit Zugabe der Zusatzmittel, welche sorgfältig dosiert werden müssen, der Mischungsentwurf für den SVB fertig gestellt und abschließend durch geeignete Prüfgeräte (siehe Abschnitt 3.6) verifiziert. Die rheologischen Eigenschaften werden dabei unter Verwendung der Prüfverfahren, welche man bei der Okamura-Methode einsetzt, untersucht.

2.1.3.3. VORSTELLUNG EINER NEUEN ENTWURFSMETHODE AUS DEUTSCHLAND

An der Universität Rostock wurde ein neues Mischungskonzept entwickelt, welches zielsicher die Zusammensetzung für SVB liefern soll. [M-4] Dieses Konzept berücksichtigt insbesondere die Volumenkenngrößen und Wasseransprüche der festen Ausgangsstoffe, da die exakte Dimensionierung des Anmachwassergehaltes eine zentrale Größe hinsichtlich der Steuerung der Frisch- und Festbetoneigenschaften darstellt. Die Dosierung des Fließmittels und die Fließeigenschaften des Frischbetons werden maßgeblich von der Eigenfeuchte der Zuschläge und besonders von den Wasseransprüchen der festen Ausgangsstoffe beeinflusst. Die gewünschte Fließfähigkeit, bei gleichzeitig ausreichend hoher Stabilität, kann nur in einem sehr engen Bereich des Wassergehaltes gewährleistet werden.

Nach dem Ablaufschema von Marquardt / Vala / Diederichs (siehe Abb. 2.13) sind die Volumenkenngrößen der Zuschläge und insbesondere die Wasseransprüche aller festen Ausgangsstoffe experimentell zu ermitteln, um eine zielsichere Projektierung des SVB gewährleisten zu können.

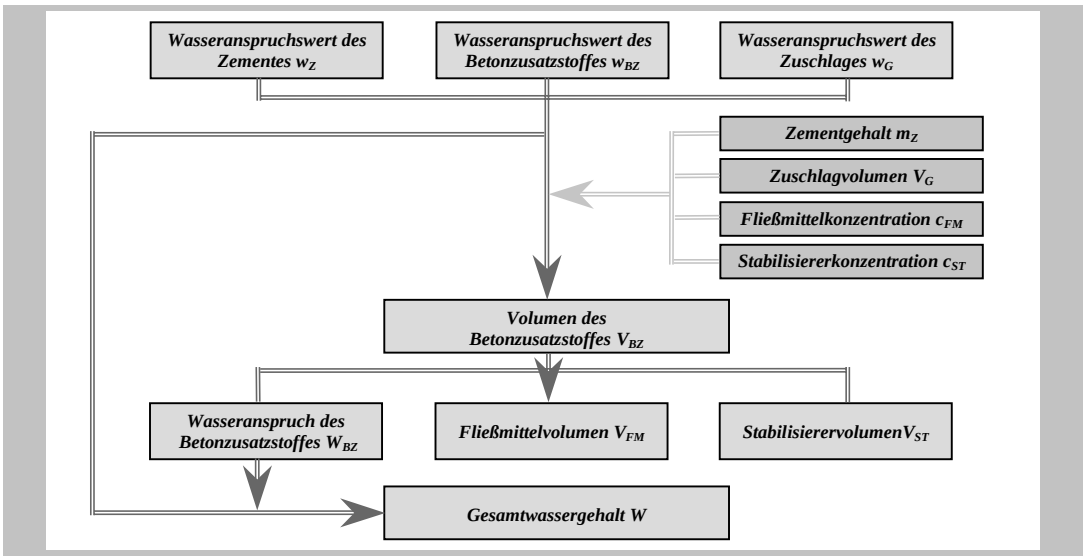


Abb. 2.13: *Vorgehensweise zur Herstellung eines SVB nach Marquardt / Vala / Diederichs* [M-4]

Die Bestimmung der Volumenkenngrößen der Zuschläge erfolgt volumetrisch in einem Luftgehaltsprüfer. Der Zuschlagstoffgemenge wird durch Zentrifugieren ermittelt. Die Bestimmung des Wasseranspruches der Feinststoffe erfolgt an einem Standard-Mörtel-Mischer mit entsprechender Zusatzausrüstung durch Messung der Leistungsaufnahme des Mischerantriebes während einer kontinuierlichen Wasserzugabe zum Mischgut. Als Wasseranspruch wird dabei die zum Maximum der Leistungsaufnahme gehörige Wassermenge definiert. Die Summe der Wasseransprüche der einzelnen Ausgangsstoffe ergibt den optimalen Anmachwasserbedarf für Selbstverdichtenden Beton.

Da die Ermittlung der Wasseransprüche einen aufwendigen Prozess darstellt, liegt die Vermutung nahe, dass sich diese Methode gegenüber den bereits bewährten Konzepten nicht durchsetzen wird.

2.2. UNTERSCHIEDE ZWISCHEN SFA UND BFA

2.2.1. ALLGEMEINES

Der Oberbegriff Flugasche wird nach DIN EN 450 „Flugasche für Beton“ folgendermaßen definiert:

„Flugasche ist feinkörniger Staub, der hauptsächlich aus kugelförmigen, glasigen Partikeln besteht, bei der Verbrennung feingemahlener Kohle anfällt, puzzolanische Eigenschaften hat und im wesentlichen aus SiO_2 und Al_2O_3 besteht. Der Gehalt an wirksamen SiO_2, wie er gemäß ENV 197-1 festgelegt und bestimmt wird, beträgt mindestens 25 % Massenanteil.

Flugasche wird durch elektrostatische oder mechanische Abscheidung staubartiger Partikel aus Abgasen von Feuerungsanlagen gewonnen, die mit gemahlenem Anthrazit oder gemahlener Steinkohle befeuert werden.

Anmerkung: Flugasche, die bei der Feuerung mit Braunkohle anfällt, ist auf nationaler Ebene zulässig, wenn der Gesamtgehalt an CaO weniger als 10 % Massenanteil beträgt und die Flugasche alle anderen Anforderungen dieser Norm erfüllt.“

Flugaschen weisen erhebliche Unterschiede in Abhängigkeit von der zur Verbrennung verwendeten Kohleart auf. So sind Steinkohlenflugaschen (SFA) in der Regel homogener in ihrer Zusammensetzung als Braunkohlenflugaschen (BFA). Allerdings konnten in den letzten Jahren die Schwankungsbreiten der chemischen Zusammensetzungen und physikalischen Parameter der BFA durch den Einsatz neuer Kraftwerkstechnik und optimierter Braunkohlenförderung deutlich gesenkt werden. [F-1]

Flugaschen aus Steinkohlenfeuerungen fallen überwiegend in glasigen Kügelchen im Bereich des Zementkörnungsbandes an (siehe Abb. 2.14), wodurch sie die Verarbeitbarkeit des Frischbetons verbessern und mehr oder weniger den Wasseranspruch bei gleichem Grad der Verarbeitbarkeit verringern. Braunkohlenflugaschen hingegen benötigen wegen ihrer unregelmäßigen Kornform (siehe Abb. 2.15) meist einen erhöhten Anmachwasserbedarf. [S-9]

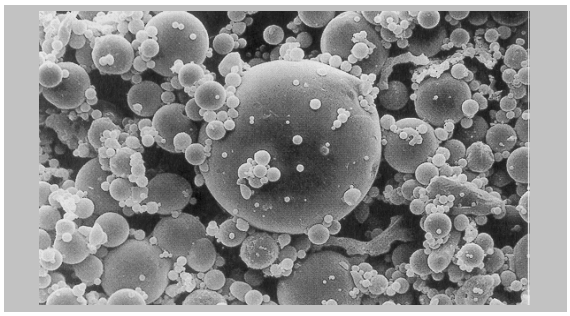


Abb. 2.14: *Steinkohlenflugasche im Rasterelektronenmikroskop in [L-3]*

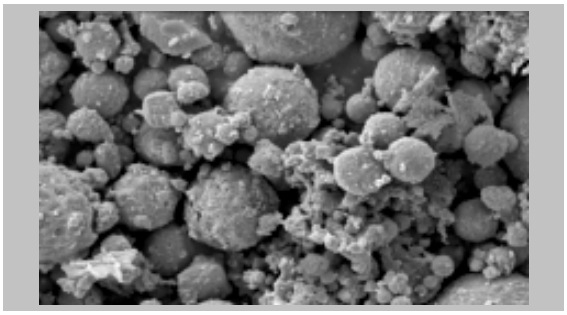


Abb. 2.15: *Braunkohlenflugasche im Rasterelektronenmikroskop in [M-1]*

2.2.2. PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

2.2.2.1. KORNGRÖSSENVERTEILUNG

Die Korngrößenverteilung ist neben der Kornform für die bindemitteltechnische Verwertung von Flugaschen die wichtigste Kenngröße. Sie ist für die erzielbare Dichtheit eines Bindebaustoffes entscheidend. [P-7] Die Korngrößenverteilung wird bei allen bekannten Verfahren mit Hilfe einer Rückstands- oder Durchgangskennlinie bestimmt (Rückstands- oder Durchgangsmenge als Funktion der Korngröße). Aus diesen Kennlinien sind nach [P-5] folgende Parameter ables- oder errechenbar:

- die durchschnittliche Korngröße
- die Häufigkeitsverteilung
- die Größe der äußeren Oberfläche (RRSB-Diagramm)

In Abbildung 2.14 sind die Bandbreiten der Korngrößenverteilungen einiger ausgewählter Stein-/ Braunkohlenflugaschen und Zemente zusammengestellt. Man kann feststellen, dass die Feinheit der SFA mit der Feinheit der Zemente vergleichbar ist. Dabei ist für die Steinkohlenflugaschen der Bereich der Korngrößenverteilungen jedoch deutlich breiter als der der untersuchten Zemente.

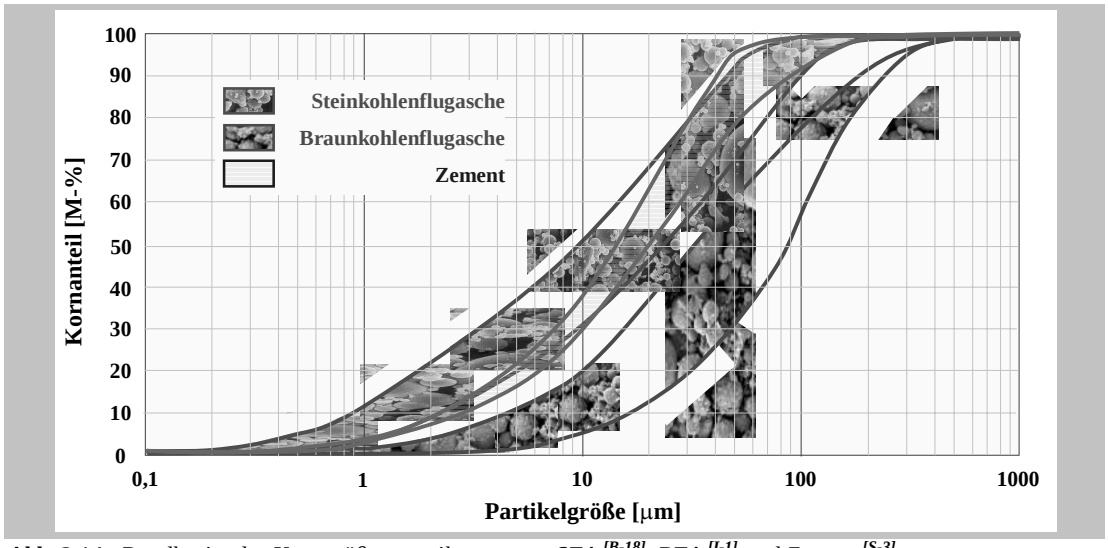


Abb. 2.14: *Bandbreite der Korngrößenverteilungen von SFA [B-18], BFA [I-1] und Zement [S-3]*

Die Kornverteilungsfraktionen der untersuchten Braunkohlenflugaschen [I-1] verschiedener Kraftwerksstandorte lassen erkennen, dass im Vergleich zur SFA gröbere Kornfraktionen existieren. Das Größtkorn der BFA liegt ebenfalls deutlich über dem der Steinkohlenflugasche. Da sich ein hoher Anteil der Kornfraktion < 10 µm am günstigsten sowohl auf die Verarbeitbarkeit von Frischbeton als auch auf die Dichtigkeit des Festbetons auswirkt, ist die Steinkohlenflugasche gegenüber der BFA an dieser Stelle klar im Vorteil.

2.2.2.2. SPEZIFISCHE OBERFLÄCHE

Ein weiterer Parameter zur Erfassung der Feinheit von pulverförmigen Stoffen ist die spezifische Oberfläche. Sie wird in der Bindemitteltechnik meist durch das Luftdurchlässigkeitsverfahren nach Blaine ermittelt, welches einfach und schnell durchzuführen ist. Bei diesem Verfahren kann jedoch nur die äußere Oberfläche der Teilchen erfasst werden und dementsprechend ist keine hinreichende Differenzierung zwischen den betontechnologisch günstigen feinkörnigen Flugaschen und den ungünstigeren gröberen Flugaschen möglich.

Genauer lässt sich die spezifische Oberfläche von Feststoffen durch Gasabsorption nach dem Verfahren von Brunauer, Emmet und Teller (BET) bestimmen. Durch dieses Messverfahren ist es möglich, sowohl die innere als auch die äußere spezifische Oberfläche eines Stoffes zu erfassen. Oberflächenkennwerte, welche aus der mit dem Laser-Granulometer gemessenen Partikelgrößenverteilung abgeleitet werden können, liefern ebenfalls ein ausreichendes Bild.

Im allgemeinen wird die spezifische Oberfläche eines Feststoffes als Maß für dessen Reaktivität angesehen. Dies ist nach [P-5] bei den Flugaschen jedoch umstritten, da bei diesen die Reaktivität mehr von den Inhaltsstoffen und deren Bindungsformen als von der spezifischen Oberfläche oder Feinkörnigkeit abhängt.

Nach [S-3] bewegt sich die spezifische Oberfläche von *Steinkohlenflugasche* in einem großen Wertebereich von knapp 2000 cm²/g bis über 7000 cm²/g. Für übliche SFA mit Prüfzeichen liegen die Werte allerdings zwischen 2500 cm²/g und 4500 cm²/g.

Für *Braunkohlenflugasche* sind gegenüber der SFA in der Fachliteratur nur sehr wenige Versuchswerte der spezifischen Oberfläche angegeben. So liegen die Werte in [I-1] je nach Standort des Kraftwerkes zwischen 1850 cm²/g und 3540 cm²/g. In [V-1] wird die Größenordnung dieser Messwerte für die spezifische Oberfläche mit einem Wert von 1750 cm²/ bestätigt.

2.2.2.3. KORNROHDICHTE

Auch die Kornrohdichte ist zur Charakterisierung von Bindebaustoffen geeignet, da die ermittelten Werte ursächlich mit deren Konstitution zusammenhängen und über diese indirekt Auskunft geben. Die Messung der Kornrohdichte erfolgt üblicherweise in Pyknometern (Helium- oder Flüssigkeitspynometer).

Die Dichte von verschiedenen Körnern der SFA und BFA kann in einem weiten Bereich variieren, da diese Aschen sowohl Hohlkugeln als auch Poren in zusammengeschmolzenen Partikeln enthalten. Unterschiede in der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung bestimmter Körner

oder Korngruppen können ebenfalls Schwankungen der Kornrohdichten hervorrufen. So schreibt Schießl in [S-3], dass für einzelne Partikel einer SFA Rohdichten im Bereich von 1,0 g/cm² bis 2,9 g/cm² auftreten können.

Im Allgemeinen kann aber davon ausgegangen werden, dass *Steinkohlenflugaschen* mit Prüfzeichen als Betonzusatzstoff eine Rohdichte zwischen ca. 2,1 g/cm² und 2,7 g/cm² aufweisen. Nach [33] bewegt sich dabei die Rohdichte der meisten SFA in einem Bereich von 2,25 g/cm² und 2,45 g/cm².

Die in [I-1, S-3, V-1] für verschiedene Kraftwerksstandorte ermittelten Rohdichten für *Braunkohlenflugaschen* weisen ein ähnlich breites Spektrum wie die SFA auf. Die Werte liegen hier zwischen 2,12 g/cm² und 2,95 g/cm².

2.2.2.4. KORNFORM

Aufgrund ihrer variierenden Entstehungsbedingungen können Flugaschepartikel mit sehr unterschiedlicher Zusammensetzung und Kornform entstehen. Das Reaktionsvermögen der Aschen hängt neben der Feinheit auch wesentlich vom mineralogischen Aufbau ab. Um reaktionsfähig zu sein, müssen die silikatischen und aluminatischen Verbindungen möglichst fein verteilt und in amorpher Form vorliegen.

Nach [S-3] können *Steinkohlenflugaschen* hinsichtlich ihrer Kornform in folgende drei Hauptgruppen unterteil werden:

- ***kugelige, alumosilikatische Glaspartikel***

  Mit rund 95 % haben diese Partikel den größten Anteil einer SFA, wobei hauptsächlich die feineren Kornfraktionen aus diesen bestehen. Aufgrund der kugeligen Kornform wird Flugaschen die Wirkung eines Kugellagers zwischen den meist splitterförmigen Zement- und Sandkörnern zugeschrieben. Durch die Verringerung der inneren Reibung wird in dieser Modellvorstellung das Gleiten der Zement- und Sandkörner erleichtert und somit ein besseres Formbarkeits- und Fließvermögen hervorgerufen.

- ***unregelmäßig geformte Partikel***

  Diese Partikel entstehen durch ein nur unvollständiges Aufschmelzen kristalliner Bestandteile oder durch das Zusammenschmelzen vieler Feinpartikel.

- ***unverbrannte Restkokspartikel***

  Diese Partikel sind in der Regel hochporös und liegen vor allem in den gröberen Kornfraktionen der Steinkohlenflugaschen vor.

In [S-6] werden *Braunkohlenflugaschen* im Wesentlichen in folgende sechs Kornarten eingeteilt und jeweils bestimmten Partikeln zugeordnet:

- ***kugelförmige Partikel***

  Die Hauptmenge der BFA wird von diesen Partikeln gebildet, welche aus Agglomeraten feinstteiliger Aschekomponenten über Sinterung bis zum vollständigen Aufschmelzen hervorgegangen sind. Ein Großteil dieser BFA-Kugeln ist kompakt. Die schnelle Abkühlung im Rauchgasstrom verhindert das Kristallisieren der Schmelztropfen, wodurch transparente Gläser in verschiedenen Verfärbungen vorliegen. Seltenere, aber charakteristische Erscheinungen sind leere oder mit kleineren Partikeln gefüllte Glashohlkugeln.

- ***Sinterkugeln***

  Diese heterogen aufgebauten Partikel entstehen, wenn an der Bildung der o. g. Agglomerate ein hoher Prozentsatz hochschmelzender Oxide, vor allem Kalk (CaO) und Periklas (MgO) beteiligt sind.

- ***Quarzpartikel***

  Diese Partikel bilden kantige, meist glattflächige isometrische Formen mit abwechselnder, häufig geringer Kantenrundung. Ihre Morphologie kann für einige Lagerstätten der Braunkohle charakteristisch sein.

- ***hochporöse Partikel***

  Diese unregelmäßig, teilweise bizarr ausgebildeten Partikel gehen durch ein Aufblähen aus Schluffeinlagerungen in der Braunkohle hervor. Sie reichern sich besonders in den gröberen Kornfraktionen neben Quarz an.

- ***Eisenoxide***

  Diese Partikel treten als Kugeln auf, welche oftmals ein Oberflächenrelief wohlausgebildeter Kristallformen erkennen lassen. Dünn- und glattwandige Eisenoxidkugeln bilden sich in manchen BFA häufiger aus.

- ***Staubpartikel***

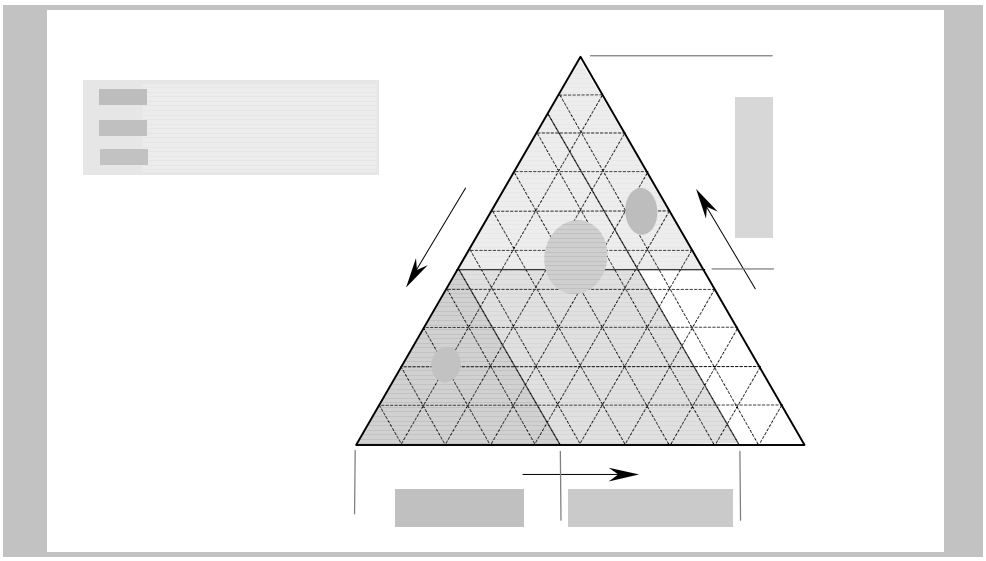
  Die sechste Fraktion bildet gleichzeitig mit Größen < 1 µm die feinste der BFA. Diese Teilchen liegen zum Teil in freier Form, überwiegend jedoch adhäsiv als Haftkorn auf Glaskugeln und Quarzkörnern gebunden vor. Sie sind stets isometrisch kugelförmig bis unregelmäßig gerundet und bestehen zum großen Teil aus Kalk oder aus einem daraus hervorgegangenen Anhydrit.

2.2.3. CHEMISCHE EIGENSCHAFTEN

- ***Hauptbestandteile:***

Die in der Kohle und im Begleitgestein vorhandenen Mineralarten sind für die chemische Zusammensetzung einer Flugasche bestimmend. Beim Abbrand der Kohlenstaubpartikel im Feuerraum eines Kessels werden die Kohlenbegleitminerale auf Temperaturen > 1100 °C aufgeheizt, wobei Stoffumwandlungsprozesse wie Entwässerung, Entsäuerung, Oxidation und Sinterung stattfinden. Der überwiegende Anteil der Mineralstoffe wird aufgeschmolzen und erstarrt bei Abkühlung glasig-amorph. Als kristalline Phasen in dieser Glasmatrix können vor allem Mullit, Quarz und Eisenoxide nachgewiesen werden. *[L-3]*

Aus dem beschriebenen Mineralphasenbestand ergibt sich eine chemische Zusammensetzung, welche durch die vier Hauptkomponenten SiO_2 (Kieselsäure), Al_2O_3 (Tonerde), Fe_2O_3 (Eisenoxid) und CaO (Freikalk) gekennzeichnet ist. Wie in der graphischen Darstellung des Ternären Systems CaO - SiO_2 – Al_2O_3+Fe_2O_3 (Abb. 2.15) ersichtlich ist, sind im Gegensatz zu den meisten BFA die Flugaschen aus der Verbrennung von Steinkohle kalk- und sulfatarm sowie kieselsäurereich. Des weiteren kann man erkennen, dass bei der BFA die chemische Zusammensetzung in größeren Bereichen streut als die SFA.



Als Hauptbestandteile der Aschen werden die Stoffe bezeichnet, deren Gehalte sich im Prozentbereich bewegen. Die Angabe der Gehalte erfolgt in höchster Oxidform des jeweiligen Elementes, da man davon ausgehen muss, dass im Entstehungsverlauf dieser Zustand erreicht wird. *[P-5]* Für die Bestimmung der Gehalte der Hauptbestandteile können die unterschiedlichsten Verfahren zum Einsatz kommen. Hierbei wird zwischen der Analytik der festen Originalsubstanz mit Hilfe der Röntt-

genfluoreszens-Analyse (RFA) und der in Lösung gebrachten Probe (nasschemische Verfahren) unterschieden. Neben den bereits genannten 4 Komponenten sind sowohl für die SFA als auch für die BFA folgende Oxide als weitere Hauptbestandteile zu nennen:

- MgO .....Magnesiumoxid
- K_2O .....Kaliumoxid
- Na_2O ..... Natriumoxid
- SO_3 .....Schwefeltrioxid

Weiterhin zählen bei den Steinkohlenflugaschen PbO (Bleioxid) und ZnO (Zinkoxid) bzw. bei den Braunkohlenflugaschen TiO_2 (Titandioxid) und MnO (Manganoxid) zu den Hauptbestandteilen. Dementsprechend weisen beide Aschen eine ähnliche chemische Zusammensetzung auf, welche aber anteilsmäßig schwankt. Die Summe aller genannten Inhaltsstoffe liegt m Normalfall zwischen 97 % und 99 %. Alle anderen Bestandteile fallen unter den Begriff Spurenelemente. In Tafel 2.1 sind prozentuale Verteilungen der Hauptbestandteile verschiedener SFA und BFA zusammengestellt.

Bestandteil	**Forderung**	**SFA**	**BFA**			
			Boxberg	**Jänschwalde**	**Thierbach**	**Neurath**
SiO_2	-	*36 … 56*	*23 … 36*	*56 … 60*	*30 … 40*	*42 … 47*
Al_2O_3	-	*22 … 35*	*5 … 9*	*9 … 11*	*13 … 14*	*3 … 8*
Fe_2O_3	-	*4 … 19*	*19 … 23*	*9 … 9*	*6 … 8*	*8 … 10*
CaO	**$8 \leq x \leq 18$**	*1 … 12*	*19 … 26*	*13 … 16*	*30 … 36*	*25 … 27*
MgO	**$\leq$ 5,0**	*0,8 … 4,8*	*5 … 7*	*2 … 3*	*2 … 3*	*7 … 8*
SO_3	**$\leq$ 3,0**	*0,1 … 2*	*9 … 11*	*2 … 6*	*8 … 11*	*2 … 6*

Hieraus ist zu erkennen, dass die Gehalte an SO_3 und CaO der Braunkohlenflugasche teilweise über denen der Höchstgehalte der gültigen Stoff- und Prüfnorm liegen. Die Abweichungen der Prozentzahlen und einige charakteristische Trends haben vor allem ihre Ursachen im lagerstättenbedingten anorganischen Gehalt der Kohlesubstanz. So werden nach [F-1] die Braunkohlenflugaschen entsprechend ihrer chemischen Zusammensetzung wie folgt nach dem Abbaugebiet der Braunkohle klassifiziert:

- ***Basische*** Trockenasche mit hohem Gehalt an CaO (etwa 30 M-%) aus dem westelbischen Raum
- ***Kieselsäurereiche*** Trockenasche mit hohem Gehalt an SiO_2 (> 50 M-%) und mittleren Gehalten an Al_2O_3 und Fe_2O_3 (etwa 10 M-%) aus der Niederlausitz
- ***Alumosilicatische*** Trockenasche mit hohem Anteilen an SiO_2 (etwa 50 M-%) und Al_2O_3 (etwa 30 M-%) aus der Oberlausitz

- ***Spurenelemente:***

In der Kohle sind wie in allen anderen Gesteinen Spurenelemente enthalten, welche sich nach dem Verbrennungsprozess in der Flugasche wieder finden. Dabei versteht man unter Spurenelemente Stoffe, deren Gehalte sich im Promille-Bereich bewegen. Die in der Literatur genannten Angaben beziehen sich meist auf die Elementform, da Informationen über den Bindungsstand kaum vorliegen. Überwiegend handelt es sich bei den Spurenelementen um Schwermetalle wie Blei, Nickel, Chrom, Kupfer und insbesondere Quecksilber. Besonders das Wissen um die Schwermetalle spielt beim Einsatz von Flugaschen im Bauwesen eine wichtige Rolle, da nur so eine toxische Gefährdung vermieden werden kann. In Tafel 2.2 sind die Bandbreiten einiger Spurenelemente verschiedener SFA und BFA den Angaben über Gehalte in Böden und der Lithosphäre gegenübergestellt.

Bestandteil		**SFA**	**BFA**	**Boden**		**Lithosphäre**
				Deutschland	**weltweit**	
	Quelle	**[31]**	**[17]**	**[31]**	**[31]**	**[31]**
Arsen	**As**	*0,6 … 461*	*2,7 … 190*	*1 … 20*	*1 … 50*	*5*
Barium	**Ba**	*612 … 2249*	*360 … 2300*	*-*	*100 … 3000*	*430*
Blei	**Pb**	*23 … 896*	*3 … 100*	*2 … 80*	*2 … 200*	*16*
Chrom	**Cr**	*29 … 360*	*33 … 54*	*5 … 100*	*1 … 40*	*40*
Kupfer	**Cu**	*33 … 613*	*2 … 20*	*2 … 40*	*2 … 100*	*70*
Nickel	**Ni**	*41 … 338*	*11 … 51*	*3 … 50*	*5 … 500*	*100*
Quecksilber	**Hg**	*0,1 … 1,55*	*0,02 … 0,64*	*0,02 … 0,2*	*-*	*-*
Zink	**Zn**	*47 … 1483*	*11 … 42*	*10 … 60*	*10 … 300*	*80*

Tafel 2.2: *Spurenelementgehalte [mg/kg] in Steinkohlenflugaschen und Braunkohlenflugaschen verschiedener Kraftwerke im Vergleich zu Gehalten im Boden und in der Lithosphäre*

Die Spurenelementgehalte von BFA sind entsprechend den Bildungsbedingungen wesentlich geringer als diejenigen von SFA - er liegt nach [S-6] teilweise um eine bis zwei Größenordnungen niedriger. Des weiteren sind nach [L-3] infolge des Verbrennungsprozesses bei verschiedenen Spurenelementen eine Anreicherung im Vergleich zu den Belastungen von natürlichen Böden festzustellen. Da Steinkohlenflugaschen als Baustoff zugelassen sind, ergibt sich also in dieser Hinsicht für den Einsatz der Braunkohlenflugaschen keine Beschränkung. [17]

2.2.4. DAS MAHLEN VON ASCHEN

Um folgende Ziele anzustreben, wird ein Mahlen von Aschen in Betracht gezogen:

- Vergleichmäßigung der granulometrischen Qualitätsschwankungen der Aschen
- Erreichen einer höheren Flugaschefeinheit und somit einer besseren Kornzusammensetzung

- Erhöhung der spezifischen Oberfläche der Flugaschen und infolge dessen eine Verbesserung der puzzolanischen Reaktivität
- Erzielung einer günstigen Kugelform im Feinststoffbereich, um die daraus resultierende positive rheologische Wirksamkeit zu verstärken
- Aufhellung der Aschen (insbesondere der Braunkohlenflugaschen)

Schießl stellte in [S-3] nach durchgeführten Versuchen fest, dass infolge des vollständigen Aufmahlens von *Steinkohlenflugasche* die Verarbeitbarkeit im Vergleich zu flugaschefreien Mörteln und zur Verwendung unbehandelter SFA trotz ihrer Feinheit nur begrenzt positiv beeinflusst wird. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass dem günstigen Einfluss der Feinheit ein höherer Anteil unförmiger SFA-Partikel und eine dementsprechend größere spezifische Oberfläche gegenübersteht und infolgedessen die Wirkung der Feinheit wieder reduziert wird. Wird lediglich der Kornanteil > 40 µm gemahlen und die SFA darüber hinaus nicht weiter aufbereitet, konnte hierdurch eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit beobachtet werden. Des weiteren wurde durch das Mahlen von SFA eine deutliche Erhöhung der Mörteldruckfestigkeiten im Vergleich zur unbehandelten SFA erreicht. Dieses Phänomen kann mit der Aktivierung des puzzolanischen Reaktionsvermögens grober SFA-Partikel infolge des Mahlvorgangs erklärt werden.

Die in [V-1] bei physikalischen, chemisch-mineralogischen und baustofftechnischen Bestimmungen gewonnenen Laborergebnissen an gemahlenen *Braunkohlenflugaschen* im Vergleich mit Aschen im Anlieferungszustand zeigen, dass die BFA in ihrer Qualität erheblich verbessert wird. Die Labor- und Technikumsversuche verdeutlichten, dass durch Mahlung die relevanten BFA-Bestandteile für die Erstarrungs- und Erhärtungsprozesse von Anfang an zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund dessen kann die Verarbeitbarkeit gewährleistet und die Dauerhaftigkeit des Baustoffes gesichert werden. Gleichzeitig ist als weiterer Effekt der Aufmahlung eine Vergleichmäßigung der verschiedenen BFA-Typen zu nennen, wodurch die von der Natur aus gegebenen Qualitätsschwankungen kompensiert werden können.

3. BETONTECHNOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

3.1. ALLGEMEINE ANMERKUNGEN

Im Gegensatz zu herkömmlichen Betonen erweist sich der zielsichere Mischungsentwurf für selbstverdichtenden Beton als schwierig. Bereits geringe Schwankungen der physikalischen und chemisch-mineralogischen Eigenschaften der Ausgangsstoffe haben einen enormen Einfluss auf die Frischbetoneigenschaften von SVB. Daher ist es nicht möglich, bereits vorliegende Mischungsentwürfe zu übernehmen. Es ist vielmehr eine empirische Mischungsentwicklung nach verschiedenen Konzepten vonnöten (siehe Kapitel 2.1.3).

Aufgrund dessen wurden im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens die Mischungsentwürfe für die selbstverdichtenden Betone sowohl mit Steinkohlenflugasche als auch mit Braunkohlenflugasche als Zusatzstoff parallel nach dem Verfahren von Okamura optimiert. Die im Baustofflabor durchgeführte Entwicklung der Mischungszusammensetzungen wird im Abschnitt 3.3 näher erläutert.

An den selbstverdichtenden Betonen der nun vorliegenden Rezepturen wurden die verschiedensten Untersuchungen durchgeführt, welche sich in folgende drei signifikante Schwerpunkte gliedern lassen:

- Bindemitteluntersuchungen (siehe Kapitel 3.5)
- Frischbetonuntersuchungen (siehe Kapitel 3.6)
- Festbetonuntersuchungen (siehe Kapitel 3.7)

3.2. CHARAKTERISIERUNG DER AUSGANGSSTOFFE

- ***ZEMENT:***

Ein wichtiger Faktor für die Eignung eines Zementes zur Herstellung von SCC ist seine Mahlfeinheit. Der Zement sollte möglichst fein aufgemahlen sein, um im Zusammenwirken mit den anderen im Frischbeton enthaltenen Feinststoffen und dem Zugabewasser eine - für den SCC wesentliche - tragfähige Suspension zu bilden. Eine hohe Mahlfeinheit bringt allerdings auch eine erhöhte Reaktivität und damit ein frühzeitiges Erstarren mit sich, was sich verständlicherweise negativ auf den Verarbeitungszeitraum des Frischbetons auswirkt.

Deshalb wurde immer ein Portlandhüttenzement mit der Bezeichnung nach DIN EN 197-1 - CEM II/B-S 32,5 R eingesetzt. Portlandhüttenzemente sind Gemische aus Portlandzementklinker und granulierter, basischer Hochofenschlacke (Hüttensand), welche im allgemeinen langsamer als reine

Portlandzemente erhärten, und somit dem verfrühten Erstarren fein aufgemahlener Zemente entgegenwirkt. Die Kennwerte der chemischen Zusammensetzung, die im Prüflabor des Herstellers (Rüdersdorfer Zement GmbH) ermittelt wurden, sind in Tafel 3.1 zusammengestellt. Nähere Angaben zu den physikalischen Eigenschaften des verwendeten Zementes - wie Wasseranspruch, Erstarrungsverhalten, Festigkeitsentwicklung, etc. - sind im Kapitel *3.5 Bindemitteleigenschaften* aufgeführt.

Prüfgröße	**Glv.**	**Unl.**	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**SO_3**	**K_2O**	**Na_2O**	**$Na_2O_{äqu}$**	**Cl**
Einheit	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**
Probe vom 12.11.2002	*1,7*	*0,3*	*21,0*	*5,8*	*2,2*	*55,9*	*3,9*	*2,6*	*1,02*	*0,27*	*0,94*	*0,06*

Tafel 3.1: *chemische Zusammensetzung des verwendeten Zementes CEM II B-S 32,5 R*

- ***GESTEINSKÖRNUNG:***

Da die Verwendung einer runden Kornform das Fließvermögen von Frischbeton erhöht, fiel die Wahl auf eine natürliche Gesteinskörnung. Alle eingesetzten Zuschläge standen in Form von gewaschenem Schüttgut zur Verfügung. Zur Reduzierung der Gefahr des Entmischens wurde das Größtkorn des verwendeten Zuschlages auf einen Durchmesser von 8 mm beschränkt. Folgende Gesteinskörnungen fanden zur Durchführung der Mörtel- und Betonuntersuchungen dieses Projektes Anwendung:

- ***Sand 0/2*** der Rohr GmbH Derben; Kieswerk Parey;
  Prüfzeugnis-Nr.: 77/KM0691a/02 *[P-8]*
- ***Kies 2/8*** der Elbkies GmbH; Kieswerk Mühlberg Werk II;
  Prüfzeugnis-Nr.: MF2/186/4/01/01 *[I-4]*

Da die Gesteinskörnungen nur als feuchtes Schüttgut zur Verfügung standen, wurden diese vor der Anwendung bei 105 °C getrocknet, um gleiche Bedingungen bei allen Betonmischungen zu gewährleisten. Die Berücksichtigung der Zuschlagfeuchte beim Mischungsentwurf konnte somit entfallen. Die in Tafel 3.2 genannten Schütt- und Kornrohdichten der jeweiligen Kornfraktionen wurden nach DIN 4226 bestimmt.

Dichte	**Einheit**	**Kornfraktion**	
		0/2	**2/8**
Rohdichte ρ	**[g/cm³]**	*2,63*	*2,611*
Schüttdichte ρ_S	**[g/cm³]**	*1,605*	*1,537*

Tafel 3.2: *Schütt- und Rohdichten der verwendeten Gesteinskörnungen*

Die Ermittlung der Korngrößenverteilungen und der Körnungskennwerte der eingesetzten Zuschläge erfolgte nach DIN EN 933-1. Die Prüfprotokolle für diese Siebungen sind der Anlage **/A1…A2/**

zu entnehmen. Die ermittelten Korngrößenverteilungen sind in Abbildung 3.1 graphisch dargestellt. Zum einem ist in diesem Diagramm die Körnungsverteilung des Sandes 0/2 mm (- - - -) und zum anderen des Kieses 2/8 mm (——) zu erkennen.

Gesteinskörnungen, die sich der Regelsieblinie B annähern, sind im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit besonders günstig. Diese Eigenschaft ist für selbstverdichtenden Beton von besonderer Bedeutung. So wurde ein Zuschlaggemisch gewählt, welches zu 55 M-% aus Sand 0/2 mm und zu 45 M-% aus Kies 2/8 mm besteht. Eine Summe der Korngrößenverteilung beider Gemische ist ebenfalls in Abbildung 3.1 abgebildet (——). Es ist deutlich zu erkennen, das sich dieses Gemisch im Bereich der Regelsieblinie B_8 befindet.

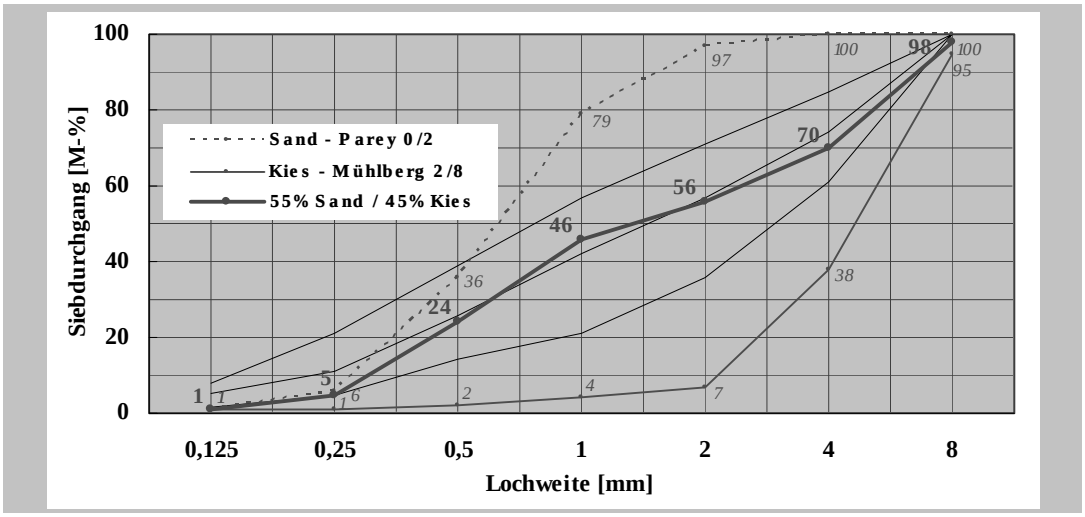


Abb. 3.1: *Sieblinie der eingesetzten Gesteinskörnungen und der gewählten Kombination*

- ***ZUSATZSTOFFE:***

Die zur Herstellung der selbstverdichtenden Betone eingesetzten Flugaschen haben nachstehende Bezeichnungen:

- ***Braunkohlenflugasche „Jäwament E (BFA)“***, Kraftwerk Jänschwalde, Block E, Zulassungs-Nr.: Z-3.39-1370 [D-5]
- ***Steinkohlenflugasche „pefa“*** der Blöcke D und E, Kraftwerk Reuter West, Prüfzeugnis-Nr.: 00/629/LA [I-3]

Wie bereits in Abschnitt 1 beschrieben, ist es vorteilhaft, die Braunkohlenflugasche durch einen Mahlprozess aufzubereiten, um deren Kornform (zerbrochene Hohlkugel) sozusagen aufzubrechen und dadurch die Mahlfeinheit der Asche zu erhöhen. Um die Wirkung der Aufmahlung auf die BFA näher beschreiben zu können, wurden eine Reihe von vergleichenden Untersuchungen an den Aschen durchgeführt.

Zur granulometrischen Charakterisierung der eingesetzten Aschen erfolgte die Messung der ***spezifischen Oberflächen*** sowohl nach der Durchströmungsmethode (Blaine-Test) als auch mittels Gasadsorbtion (BET-Methode). Die Ergebnisse beider Methoden zeigen die erwartete Tendenz, dass sich durch den Mahlprozess die spezifischen Oberflächen vergrößern (siehe Tafel 3.3).

Meß-Verfahren	**Einheit**	**SFA**	**BFA**	
			unaufbereitet	**aufbereitet**
BLAINE-Methode	**[cm²/g]**	*4.220*	*1.870*	*3.380*
BET-Methode	**[cm²/g]**	*6.710*	*5.970*	*8.670*

Tafel 3.3: *spezifische Oberflächen der eingesetzten Flugaschen nach BLAINE- und BET-Methode*

Allerdings sind deutliche Differenzen in den Messwerten der spezifischen Oberflächen zu erkennen, die sich durch die unterschiedlichen Wirkprinzipien der Meßmethoden erklären lassen. Bei der Durchströmungsmethode wird die Rauhigkeit der Teilchen nur bis zu einem bestimmten, quantitativ nicht definierbaren Grade berücksichtigt - es wird nur die so genannte *„äußere spezifische Oberfläche“* ermittelt. Das Messverfahren bei der Adsorptionsmethode hingegen beruht auf der Bestimmung der Menge eines Adsorbates, welches erforderlich ist, neben der äußeren Oberfläche ebenfalls die zugängliche *„innere spezifische Oberfläche“* eines Feststoffes bis in molekulare Dimensionen mit einer vollständigen Adsorbat-Monoschicht zu bedecken. Aufgrund dessen ergeben sich diese hohen BET-Oberflächen.

Betrachtet man die Differenzen zwischen den BLAINE- und den BET-Oberflächen, so kann man auf die Größe der inneren spezifischen Oberfläche schließen. Es lässt sich feststellen, das die unaufbereitete BFA im Vergleich zur SFA eine wesentlich größere innere spezifische Oberfläche aufweist. Vergleicht man die Messwerte der aufbereiteten und der nicht aufbereiteten BFA miteinander, lässt sich erkennen, dass die zusätzliche Mahlung zu einer erheblichen Vergrößerung der inneren Oberfläche führt.

Die Ermittlung der ***Kornverteilungskurven*** der Flugaschen erfolgte mittels eines Lasergranulometers der Firma Malvern Industries im Baustofflabor der TU Berlin. In Tafel 3.4 sind einige Kennwerte der durchgeführten Partikelgrößenanalysen zusammengestellt.

Kennwert	**Einheit**	**SFA**	**BFA**	
			unaufbereitet	**aufbereitet**
d_{mod} ... Maximium der Häufigkeitsverteilung	**[µm]**	*55,00*	*70,00*	*33,00*
d_{10} ... Korngröße bei 10 % Durchgang	**[µm]**	*2,25*	*5,59*	*2,16*
d_{50} ... Korngröße bei 50 % Durchgang	**[µm]**	*21,09*	*43,27*	*17,74*
d_{90} ... Korngröße bei 90 % Durchgang	**[µm]**	*92,45*	*142,65*	*59,44*

Tafel 3.4: *Kennwerte der Partikelgrößenanalysen der eingesetzten Flugaschen*

Die Partikelgrößenbestimmung nach dem Prinzip der Laserbeugung basiert auf der Theorie nach Mie oder auf der Fraunhofer Näherung. Alle Partikel einer Probe beugen das Licht eines mono-

chromen Laserstrahls. Ein Partikel mit einem großen Durchmesser beugt den Laserstrahl nur wenig, d.h. in einem kleinen Winkel. Die Lichtspektren der kleinen Partikel dagegen müssen in größeren Winkeln gegenüber dem Laserstrahl aufgenommen werden. In Abbildung 3.2 sind die Korngrößenverteilungskurven der eingesetzten Flugaschen graphisch dargestellt.

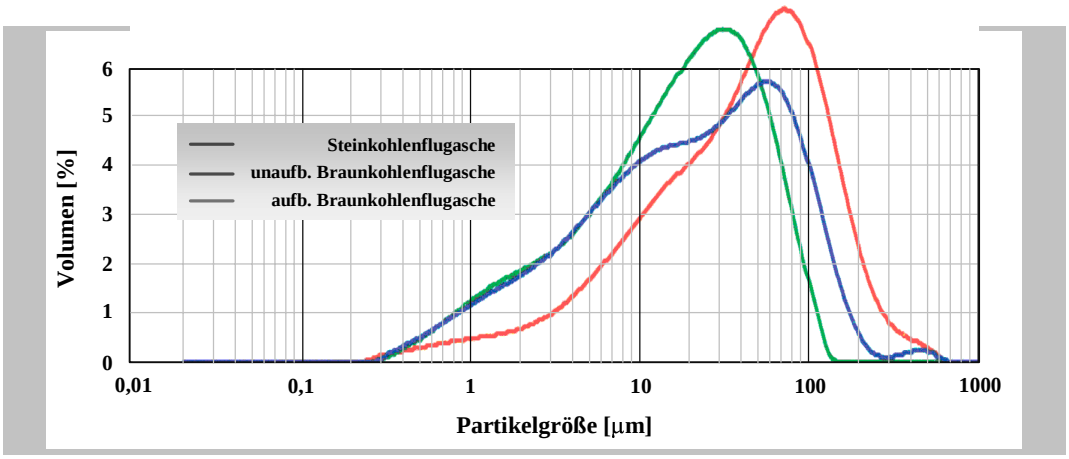


Abb. 3.2: *Korngrößenverteilungen der eingesetzten Flugaschen*

Wie bereits in Abschnitt 2.2 erwähnt, wirkt sich der Anteil der Kornfraktion < 10 µm am günstigsten auf die Verarbeitbarkeit von Frischbeton aus. Anhand der Verteilungskurven in Abbildung 3.2 ist deutlich zu erkennen, das die SFA gegenüber der unaufbereiteten BFA in diesem Bereich der Kornfraktion einen wesentlich höheren Kornanteil besitzt. Weiterhin kann man beobachten, dass die BFA im „groben“ Kornbereich zwischen 50 … 400 µm mehr Partikel als die SFA enthält. Betrachtet man die Verteilungskurve der aufbereiteten BFA, so ist eine deutliche Verschiebung der Kornverteilung in den feineren Bereich sichtbar. Im entscheidenden Kornbereich < 10 µm sind die Verteilungskurven beider Aschen (SFA und aufbereitete BFA) nahezu identisch.

Zur Beurteilung des Einflusses der Mahlung auf die ***Kornform*** der BFA wurden am F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde in Weimar ESEM-Aufnahmen der aufbereiteten und unaufbereiteten Braunkohlenflugasche angefertigt. Die ESEM-Technologie bietet vielfältige Vorteile gegenüber konventionellen elektromikroskopischen Verfahren. Die dominierenden Vorteile bestehen in der nicht mehr notwendigen Trocknung und Beschichtung der Proben mit einem leitfähigen Film. Es können also alle Materialien ohne Präparation im vorliegenden Zustand untersucht werden. Morphologische bzw. chemische Veränderungen infolge einer normalerweise notwendigen Probenvorbereitung können ausgeschlossen werden. Der Objektraum des ESEM kann weiterhin als Klimakammer mit definiert einstellbaren Umgebungsbedingungen betrieben werden.

In diesem Fall wurden die Proben der unaufbereiteten und aufbereiteten Braunkohlenflugasche in Form eines trockenen Pulvers untersucht. Die Abbildung 3.3 zeigt einige ausgewählte Aufnahmen dieser Untersuchung. Die beiden linken Bilder sind Aufnahmen der unaufbereiteten BFA und die beiden rechten der aufbereiteten Braunkohlenflugasche. Im oberen Bereich der Abbildung sind

Aufnahmen geringerer Auflösung dargestellt. Zur besseren Beurteilung der Kornstrukturen zeigen dagegen die beiden unteren Bilder Aufnahmen mit einer höheren Auflösung.

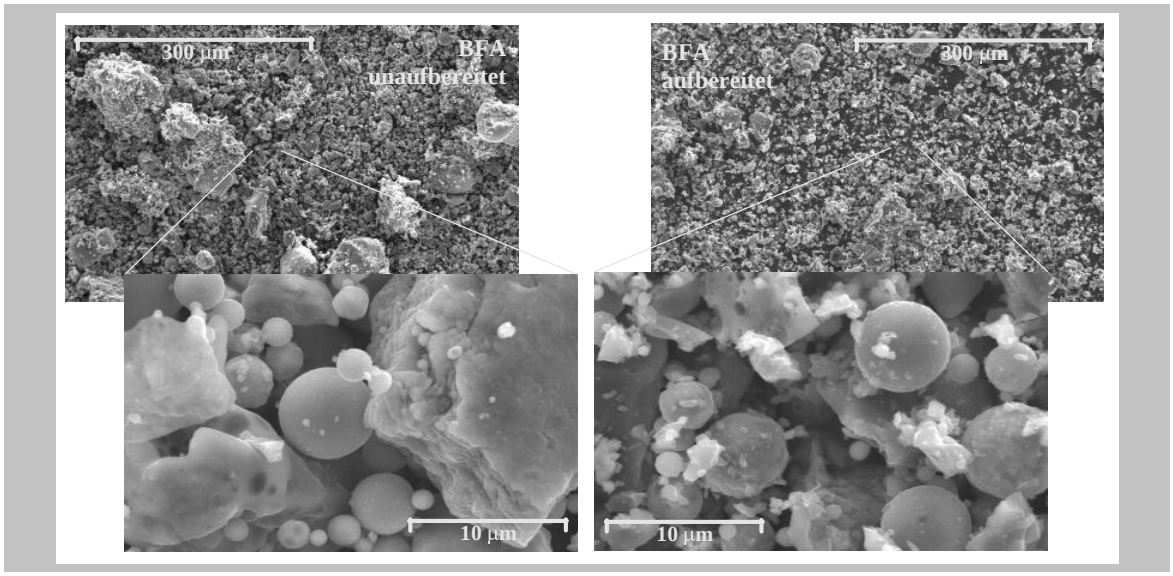


Abb. 3.3: *ESEM-Aufnahmen der unaufbereiteten und aufbereiteten Braunkohlenflugasche (BFA)*

Vergleicht man die Aufnahmen der unaufbereiteten und aufbereiteten BFA miteinander, so kann man feststellen, dass infolge der Aufmahlung besonders die groben Partikel aufgebrochen wurden. Betrachtet man die Bilder mit der höheren Auflösung genauer, so kann man erkennen, das die runden Partikel der BFA, welche für die Verarbeitbarkeit des Frischbetons immens wichtig sind, durch den Mahlprozess nicht zerstört wurden. Vielmehr erfolgte nur die Zerkleinerung der gröberen unregelmäßig geformten Partikel, was für die Verarbeitbarkeit des selbstverdichtenden Betons mit dieser aufbereiteten BFA als Zusatzstoff von Vorteil ist.

Die Bestimmung der ***chemischen Zusammensetzung*** der verwendeten Flugaschen erfolgte im Prüflabor der Rüdersdorfer Zement GmbH. Die Ergebnisse der chemischen Analyse der Aschen sind in Tafel 3.5 zusammengestellt.

Prüfgröße	**Einheit**	**Forderungen DIN EN 450**	**SFA**	**BFA**	
				unaufbereitet	**aufbereitet**
Glühverlust (Glv.)	**[M-%]**	≤ 5,0	*3,92*	*0,40*	*0,32*
Freikalkgehalt (CaO_{frei})	**[M-%]**	≤ 1,0	*0,08*	*0,30*	*0,19*
Sulfatgehalt (SO_3)	**[M-%]**	≤ 3,0	*0,9*	*1,5*	*1,4*
Natriumoxid-Äquivalent ($Na_2O_{äqu}$)	**[M-%]**	≤ 4,0	*1,82*	*1,14*	*0,95*
Chloridgehalt (Cl)	**[M-%]**	≤ 0,1	*0,01*	*0,03*	*0,01*

Tafel 3.5: *Chemische Analyse der eingesetzten Flugaschen*

Alle Prüfwerte der drei Flugaschen liegen unterhalb der Grenzwerte nach DIN EN 450 - „Flugasche für Beton“. Es sind allerdings signifikante Unterschiede der Gehalte an Freikalk und Natriumoxid bzw. des Glühverlustes zwischen SFA und BFA zu erkennen.

- ***ZUSATZMITTEL:***

Als Zusatzmittel kamen ausschließlich Fließmittel der so genannten 3. Generation zum Einsatz. Diese Fließmittel basieren auf den Rohstoff Polycarboxylatether (PCE), welche aus Polymeren mit einer Haupt- und mehreren Nebenketten bestehen. Die langen Seitenketten bewirken eine Dispersion durch sterische Effekte und verhindern so ein frühzeitiges Überwachsen. Durch die Verwendung von PCEs können Konsistenzen über 60 Minuten gehalten werden. [M-10] Um eine hinreichende Aussage über die Wirkung dieser Fließmittel zu erhalten, wurden folgende sechs Hochleistungsverflüssiger verschiedener Anbieter verwendet:

- ***Isola FM 10*** der Isola Bauchemie GmbH & Co. KG; Zulassungs-Nr.: Z.3.28-1387
- ***Woerment FM 676 / BV 676*** der Woermann Betonchemie GmbH & Co. KG; Zulassungs-Nr.: Z-3.28-1711 (FM) , Z-3.21-1710 (BV)
- ***Woerment FM 375 / BV 375*** der Woermann Betonchemie GmbH & Co. KG; Zulassungs-Nr.: Z-3.28-1487 (FM) , Z-3.21-1488 (BV)
- ***Woerment FM 787 / BV 787*** der Woermann Betonchemie GmbH & Co. KG; Zulassungs-Nr.: Z-3.28-1611 (FM) , Z-3.21-1610 (BV)
- ***Muraplast FK 63.30*** der Firma MC-Bauchemie; Zulassungs-Nr.: Z-3.28-1654 (FM) , Z-3.21-1653 (BV)
- ***Isola BV 10 Export*** der Isola Bauchemie GmbH & Co. KG

Einige technische Daten aus den bauaufsichtlichen Zulassungen der eingesetzten Hochleistungsfließmittel sind in Tafel 3.6 vergleichend zusammengefasst.

		Hochleistungsfließmittel	zulässige Menge FM	zulässige Menge BV	Dichte	Rohstoffbasis	Farbe und Form
		Einheit	[ml/kg Zemente]		[g/cm³]	[-]	[-]
Versuchsreihe	1	**Isola FM 10**	*2…20* [1]	*2…40* [2]	*1,18 ± 0,03*	*Polycarboxylatether*	*hellbraune Flüssigkeit*
	2	**Woerment FM/BV 676**	*4…20*	*2…20*	*1,05*	*Polycarboxylatether*	*hellbraune, trübe Flüssigkeit*
	3	**Woerment FM/BV 375**	*4…15*	*2…15*	*1,08*		
	4	**Woerment FM/BV 787**	*4…10*	*2…10*	*1,07*		*gelbliche Flüssigkeit*
	5	**Muraplast FK 63.30**	*max. 35*		*1,06*	*Multicarboxylatether*	*hellbraune Flüssigkeit*
	6	**Isola BV 10 Export**	*0,2…2,0 M.-%* [3]		*1,11 ± 0,02*	*Polycarboxylatether*	*hellbraune Flüssigkeit*

Tafel 3.6: *Technische Daten der eingesetzten Fließmittel* [1] bis Beton B55 [2] ab Beton B65 [3] vom Zementgehalt

- ***ZUGABEWASSER:***

Als Zugabewasser wurde das im Labor zur Verfügung stehende Trinkwasser aus dem Leitungsnetz der Stadt Potsdam verwendet. Negative Eigenschaften des Wassers, welche sich auf den Beton auswirken könnten, sind nicht bekannt.

3.3. ENTWICKLUNG DER REZEPTUR DES SVB

Wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt, ist ein zielsicherer Mischungsentwurf für selbstverdichtenden Beton nur unter hohem Aufwand empirisch im Labor zu ermitteln. Die in diesem Vorhaben untersuchten SVB`s wurden nach dem Entwurfsverfahren von Okamura (siehe Kapitel 2.1.3.1) konzeptioniert. Nach Festlegung der Zieleigenschaften, der Ausgangsstoffe, des angestrebten Luftgehaltes und der Zuschlaganteile erfolgte anschließend der Entwurf der SVB durch aufeinander aufbauende Leim-, Mörtel- und Betonuntersuchungen, welche in den nächsten Abschnitten näher beschrieben werden sollen.

3.3.1. LEIMVERSUCHE

Das Ziel der Leimversuche war es, dass optimale Volumenverhältnis β_p von Wasser zu Pulver von verschiedenen Feststoffkombinationen zu ermitteln. Das optimale V_w/V_p -Verhältnis ist laut Okamura genau dann erreicht, wenn gerade alles Wasser durch das Pulver gebunden wird.

Bei den Leimversuchen wurden die Volumenverhältnisse der Ausgangsstoffe Zement, Steinkohlenflugasche und unaufbereitete/aufbereitete Braunkohlenflugasche variiert. Hierbei wurde bei allen Kombinationen immer von einem Feststoffraum V_p von insgesamt 200 ml ausgegangen. Tafel 3.7 zeigt eine Übersicht über die Pulverzusammensetzung der untersuchten Feststoffkombinationen.

Ausgangsstoff / Feststoffkombination	I	II	III	IV	V	VI	VII
	Feststoffraum V_p in ml [Σ 200 ml]						
Zement CEM II B-S 32,5 R	*100*	*120*	*90*	*100*	*120*	*90*	*90*
Steinkohlenflugasche	*100*	*80*	*110*	-	-	-	-
aufbereitete Braunkohlenflugasche	-	-	-	*100*	*80*	*110*	-
unaufbereitete Braunkohlenflugasche	-	-	-	-	-	-	*110*

Tafel 3.7: *Feststoffkombinationen (Pulverzusammensetzungen) der durchgeführten Leimversuche*

An jeder einzelnen Feststoffkombination wurden mit einem Kegel die Ausbreitmaße von vier verschiedenen V_w/V_p -Verhältnissen (1,1…1,4) bestimmt, wodurch insgesamt 28 Mischungen erforderlich waren. Aufgrund unterschiedlicher Dichten der Ausgangsstoffe erfolgten alle Berechnungen und Überlegungen auf den Stoffraum bezogen. Anhand einer ausgewählten Feststoffkombination (FSK VI) soll die Ermittlung des optimalen Vw/Vp - Verhältnisses kurz erläutert werden. Die Ergebnisse der anderen Feststoffkombinationen sind der Anlage **/A3…A6/** zu entnehmen.

Tafel 3.8 zeigt die Zusammensetzung der vier Leimmischungen der Feststoffkombination VI mit Angabe der jeweiligen Wassergehalte, der aus den Ergebnissen der Ausbreitversuche gemittelten absoluten Ausbreitmaße r und der daraus berechneten relativen Ausbreitmaße Γ_p.

Feststoffkombination VI				Leim-mischung	Wasser V_W/V_P [-]	Wasser Volumen [ml]	Ausbreitmaß r_a [cm]	Ausbreitmaß r_b [cm]	Ausbreitmaß $r = [(r_a+r_b)/2]$ [cm]	Ausbreitmaß $\Gamma_P = (r/r_0)^2-1$ [-]
	Dichte	Volumen	Masse							
	[g/ml]	[ml]	[g]							
CEM II B-S 32,5 R	*3,100*	*90*	***279,00***	**VI.1**	*1,1*	***220***	*15,5*	*16,0*	*15,75*	**1,4806**
aufbereitete BFA	*2,700*	*110*	***297,00***	**VI.2**	*1,2*	***240***	*21,0*	*21,0*	*21,00*	**3,4100**
				VI.3	*1,3*	***260***	*24,8*	*24,8*	*24,80*	**5,1504**
				VI.4	*1,4*	***280***	*27,5*	*27,5*	*27,50*	**6,5625**

Tafel 3.8: *Beispiel zur Ermittlung des relativen Ausbreitmaßes Γ_p [FSK VI]*

Stellt man nun in einem Diagramm das Verhältnis Vw/Vp in Abhängigkeit von dem relativen Ausbreitmaß Γ_p dar (siehe Abbildung 3.4), so kann man mittels linearer Regression das optimale Wasser / Pulver Verhältnis β_p berechnen. Betrachtet man das Diagramm, so wird deutlich, dass ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Größen Γ_p und V_w/V_p besteht. Die Regressionsgleichung in der Abbildung des untersuchten Beispiels sagt aus, dass bei einem Volumenverhältnis zwischen Wasser und Pulver von 1,0068 (Schnittpunkt der Geraden mit der Ordinate) theoretisch keine Ausbreitung des Leimkuchens mehr stattfindet ($\Gamma_p = 0$).

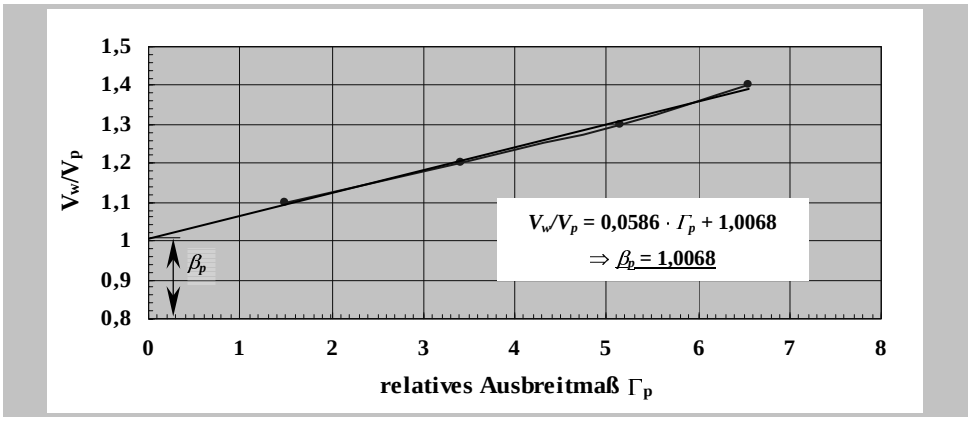


Abb. 3.4: *Beispiel zur Bestimmung des optimalen Wasser/Pulver Volumenverhältnisses [FSK VI]*

Arbeitsablauf:

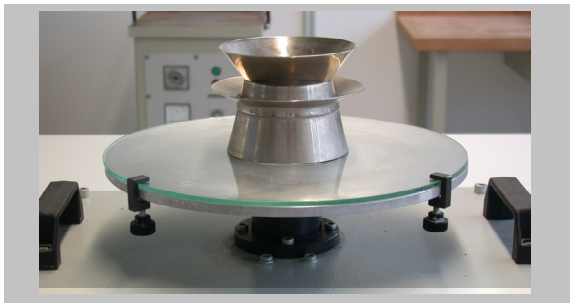


Abb. 3.5: *Hägermann-Tisch mit Setztrichter*

Die Verarbeitung der Ausgangsstoffe erfolgte in einem klimatisierten Raum mit einer Temperatur von ca. 20 °C. Ebenfalls wurden alle Mischungsbestandteile durch ausreichend lange Lagerung in den Laboratorien auf Umgebungstemperatur angeglichen. Die Herstellung der Leim-Mischungen erfolgt mit einem Normmischer nach DIN EN 196-1. Die benötigten Gerätschaften, wie Mischtrog und -schaufel sowie Kelle, Setztrichter und Glasplatte, sind vor Benutzung feucht aus- bzw. abgewischt wurden. Die Herstellung der Leim-Mischungen erfolgte entsprechend dem in Tafel 3.9 aufgeführten Mischregime. Die Bestimmung des Ausbreitmaßes erfolgte mittels eines Setztrichters

nach DIN 1164 auf einen Hägermann-Tisch ohne Schlag (siehe Abbildung 3.5). Das Ausbreitmaß *r* wurde nach der vollständigen Ausbreitung mit einem Glieder-Maßstab durch zwei Messungen - jeweils senkrecht zueinander - bestimmt.

Schritt	Zeit	Bemerkung
1	-	*Zement und Achse einbringen*
2	*30 s*	*trocken durchmischen*
3	-	*Wasser zugeben - während dem Mischen*
4	*60 s*	*Mischen*
5	*60 s*	*Pause - mit Kelle Bestandteile von den Gefäßwänden entfernen und von Hand untermischen*
6	*90 s*	*Mischen*

Tafel 3.9: *Mischregime der Leimversuche*

In Tafel 3.10 sind die ermittelten β_p-Werte aller Feststoffkombinationen zusammengefasst und dem geforderten *w/z*-Wert und Zement-Anteil der Mehlkornsuspension des Betons gegenübergestellt. Da nach Okamura der V_w/V_p -Wert in einem Bereich von (0,8…0,9) x β_p liegen soll, wurden für diese Größen die zu erwartenden *w/z* -Werte berechnet. Die Berechnung des Zementanteils der Mehlkornsuspension hingegen erfolgte bei einem angenommenen Wert von 0,85 x β_p.

Da die Festbetoneigenschaften im wesentlichen durch die Mehlkornsuspension bestimmt werden, richtete sich die Auswahl geeigneter Feststoffkombinationen nach deren Einteilung in eine Festigkeitsklasse. Um der zu erwartenden Rissbildung bei hochfesten Beton entgegenzuwirken, wurde im Vorfeld der Versuche festgelegt, dass der selbstverdichtende Beton möglichst der Festigkeitsklasse C 25/30 entsprechen soll. Daraus ergab sich für die geforderten Eigenschaften der Mehlkornsuspension ein *w/z* -Wert von 0,55…0,60 und ein Zementanteil von ca. 22 Vol.-% (entspricht ~ 270 kg/m³ Beton).

Eigenschaft / **Feststoffkombination**	**Eigenschaften der Feststoffkombinationen**							**geforderte Eigenschaften**
	I	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	
β_p	*0,9950*	*1,0043*	***0,9904***	*1,0118*	*1,0040*	***1,0068***	*0,8621*	-----
w/z-Wert (0,8·β_p … 0,9·β_p)	*0,51…0,58*	*0,43…0,49*	***0,57…0,64***	*0,52…0,59*	*0,43…0,49*	***0,58…0,65***	*0,49…0,56*	0,55…0,60
Zement-Anteil (0,85·β_p) [Vol.-%]	*27*	*32*	***24***	*27*	*32*	***24***	*26*	ca. 22

Tafel 3.10: *Vergleich der Eigenschaften und Auswahl der Feststoffkombinationen*

Während bei den Feststoffkombinationen II und V die *w/z* -Werte zu niedrig lagen, waren bei den FSK I und IV die Zement-Anteile mit 27 Vol.-% zu hoch. Bei den Feststoffkombinationen III und VI hingegen lagen die *w/z*- Werte im geforderten Bereich und die Zement-Anteile entsprachen mit 24 Vol.-% ebenfalls annähernd der Festlegung. Diese Feststoffkombinationen dienten den weiterführenden Mörteluntersuchungen. Um die Wirkung der Aufmahlung der BFA auf die Frischbetoneigenschaften näher beschreiben zu können, entschied man sich des weiteren, die FSK VII (unaufbereitete BFA) ebenfalls mit in die nachfolgenden Untersuchungen einzubeziehen.

3.3.2. MÖRTELVERSUCHE

Nachdem nun geeignete Feststoffkombinationen vorlagen und deren optimale Wasser-zu-Pulver-Verhältnisse β_p bekannt waren, wurde eine Reihe von Fließ- und Durchströmungstests an Sand/ Bindemittelgemischen durchgeführt. Das Verhältnis von Sand zu Mehlkornsuspension im Mörtel ist analog dem Verhältnis im Beton, was einem Sand-Anteil von ca. 45 Vol.-% im Mörtel entspricht. Bei diesen Untersuchungen kam Sand mit der gleichen Kornzusammensetzung wie im späteren Beton zur Anwendung. Der Mörtel musste nach Okamura folgenden Anforderungen entsprechen bzw. folgende Eigenschaften aufweisen:

- der V_w/V_p - Wert muss im Bereich zwischen (0,8…0,9) x β_p liegen
- entmischungsfreies Fließen bis zu einem Ausbreitmaß von r ≈ 24,5 cm (Γ_p = 5)
- die Durchlaufzeit t_m aus dem Trichter muss ca. 9…11 Sekunden betragen

Es erfolgte analog dem Einsatz der verschiedenen Hochleistungsfließmittel eine Aufteilung in 6 Versuchsreihen (VR1…VR6). Pro Versuchsreihe wurde ein Mörtel mit Steinkohlenflugasche und einer mit Braunkohlenflugasche als Zusatzstoff durch Variation des Wasser- und Fließmittelgehaltes auf die geforderten Frischmörteleigenschaften eingestellt.

Arbeitsablauf:

Da das Größtkorn der herzustellenden Mörtel mit 4 mm zu groß für einen Norm-Mörtelmischer (Größtkorn 2 mm) war, kam an dieser Stelle ein Beton - Zwangsmischer zum Einsatz. Aus diesem Grund war die hergestellte Mörtelmenge bei allen Versuchen mit ca. 5 Litern wesentlich höher als nötig. Die Mörtelversuche wurden mit denselben Gerätschaften wie bei den Leimversuchen durchgeführt. Zusätzlich kam ein Auslauftrichter mit den Maßen nach Abbildung 2.10 in Abschnitt 2.1.3.1 zur Anwendung. Die Verarbeitung der Ausgangsstoffe erfolgte ebenfalls unter den gleichen klimatischen Bedingungen. Die Herstellung der Mörtel erfolgte nach dem in Tafel 3.11 dargestelltem Mischregime.

Schritt	Zeit	Bemerkung
1	-	*Zuschlag einbringen*
2	*30 s*	*trocken durchmischen*
3	-	*während des Mischens 1/3 des Wassers zugeben*
4	*30 s*	*Mischen*
5	*30 s*	*Zement, Flugasche, 2/3 des Wassers und Fließmittel (im Wasser) zugeben*
6	*60 s*	*Mischen*
7	*60 s*	*Pause - mit Kelle Bestandteile von den Gefäßwänden entfernen und von Hand untermischen*
8	*4 min*	*Mischen*
9	*3 min*	*Pause*
10	*60 s*	*Mischen*

Zur Befeuchtung der getrockneten Zuschläge wurde zu Beginn 1/3 des Anmachwassers zugegeben. Da man nur sehr geringe Mengen an Hochleistungsfließmittel benötigt, wurden diese zwecks homogener Verteilung mit den restlichen 2/3 des Anmachwassers verdünnt der Mischung zugeführt. Dadurch konnte ein vollständiges Untermischen gewährleistet werden. Bereits bei den ersten Mörtelversuchen konnte man feststellen, das eine relativ lange Zeit nach dem Einbringen in die Mischung vergehen muss, bis die Fließmittel vollständig zur Wirkung kommen. Aufgrund dessen wurde am Ende des Mischregimes vor dem letzten Aufmischen eine zusätzliche Pause von 3 Minuten eingeplant. Nach Beendigung des Mischvorganges (d.h. ca. 12 Minuten nach Mischbeginn) erfolgte die Bestimmung des Ausbreitmaßes r_m des Mörtels ohne Schlag (siehe Abbildung 3.6). Anschließend wurde (ca. 15 Minuten nach Mischbeginn) die Durchlaufzeit t_m mit dem Auslauftrichter ermittelt. Hierbei wurde die Zeit von Auslaufbeginn des Mörtels bis zum Abreißen des Mörtelstromes gemessen (siehe Abbildung 3.7).

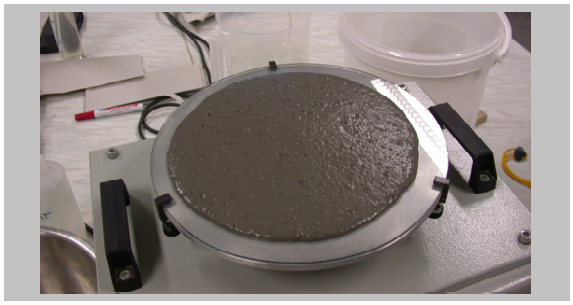


Abb. 3.6: *Bestimmung des Ausbreitmaßes am Mörtel*

Abb. 3.7: *Bestimmung der Durchlaufzeit am Mörtel*

In Tafel 3.12 sind die Ergebnisse der Mörteluntersuchungen aller Versuchsreihen zusammengestellt. Vergleicht man die dosierten Fließmittelmengen mit den zulässigen Zugabemengen nach Angaben der Hersteller, so kann man feststellen, dass kein Fließmittel zur Erzielung der geforderten Eigenschaften überdosiert werden mußte. Grundsätzlich haben die Mörtel mit Braunkohlenflugasche einen höheren Fließmittelbedarf als die Mörtel mit Steinkohlenflugasche.

Prüfung	**Forderung**	**Versuchsreihe**											
		1		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**	
Einheit		**SFA**	**BFA**	**SFA**	**BFA**	**SFA**	**BFA**	**SFA**	**BFA**	**SFA**	**BFA**	**SFA**	**BFA**
Fließmittelmenge [1] **[ml/kg]**	s. Tab. 3.6	*6,8*	*7,7*	*11,4*	*13,7*	*6,6*	*7,5*	*6,3*	*7,5*	*8,1*	*9,7*	*8,4*	*7,1*
Ausbreitmaß [cm]	24,5	*27,0*	*25,3*	*26,0*	*24,3*	*27,5*	*25,5*	*25,0*	*25,5*	*25,0*	*24,5*	*24,5*	*24,5*
Durchlaufzeit [s]	9…11	*12*	*10*	*11*	*9*	*12*	*10*	*9*	*7*	*10*	*9*	*8*	*7*

Tafel 3.12:*Ergebnisse der durchgeführten Mörteluntersuchungen*

[1] bezogen auf die zugegebene Zementmasse

Um die oben dargestellten Ergebnisse zu erreichen, war die Herstellung von mehreren Mörtelmischungen pro Versuchsreihe und eingesetztem Zusatzstoff - in denen der Wasser- und Fließmittelgehalt variiert wurden - vonnöten. Die einzelnen Arbeitsschritte zum Erreichen jeder endgültigen Mörtelzusammensetzung sind in der Anlage **/A7…A18/** zusammengestellt. Betrachtet man die Werte der Ausbreitmaße und Durchlaufzeiten aller Versuchsreihen, so kann man sagen, dass diese

relativ nahe an den geforderten Wertebereichen eingestellt werden konnten. Inwieweit die erreichten Ergebnisse für die Herstellung eines selbstverdichtenden Betons brauchbar waren, konnte erst nach Durchführung der Betonuntersuchungen beurteilt werden. Alle Mörtel zeigten eine gute Entlüftungswilligkeit während der 3-minütigen Pause am Ende des Mischregimes. Man muss allerdings auch an dieser Stelle bemerken, dass bei den Mörteln mit SFA grundsätzlich eine höhere Viskosität und Fließfähigkeit bei geringerer Fließmitteldosierung als bei den „BFA-Mörteln“ beobachtet werden konnte.

Wie bereits in Abschnitt 3.3.2 erwähnt, wurden ebenfalls einige Versuche mit der unaufbereiteten Braunkohlenflugasche (FSK VII) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen waren im Bezug auf die Verarbeitbarkeit der Mörtel völlig unzufriedenstellend. Es konnte nur ein sehr klebriger und steifer Mörtel mit einer Durchlaufzeit von 42 Sekunden hergestellt werden. Zeitgleich breitete sich aber auch der Mörtelkuchen auf über 30 cm aus und zeigte nach Stillstand sogar Entmischungserscheinungen. Es zeigte sich, dass die BFA ohne zusätzliche Aufmahlung vollkommen ungeeignet ist, woraufhin an dieser Stelle die Versuche mit der unaufbereiteten Braunkohlenflugasche abgebrochen und keine weiterführenden Untersuchungen am Beton fortgeführt wurden.

3.3.3. BETONVERSUCHE

In diesem Schritt - der Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse vom Mörtel auf den Beton - sieht das japanische Konzept die Zugabe des Zuschlages und Variation des Fließmittels vor, um aus dem Mörtel einen selbstverdichtenden Beton zu entwickeln. Der Beton sollte so eingestellt werden, dass folgende Eigenschaften erfüllt werden:

- Entmischungsfreies Fließen bis zu einem Setz-Fließmaß von ca. 80 cm
- die Durchlaufzeit t_b aus dem Trichter muss ca. 5…20 Sekunden betragen

Die Mischungszusammensetzung bestand aus ca. 60 Vol.-% Zuschlag der Körnung 0,125/8 mm entsprechend der Sieblinie nach Abbildung 3.1 und aus ca. 40 Vol.-% Mehlkornsuspension, deren Zusammensetzung aufgrund der vorangegangenen Untersuchungen bereits feststand. Mittels Variation des Fließmittels und Überprüfung der Gemische durch Setzfließ- und Trichterdurchlaufversuch wurden nun die endgültigen Rezepturen der SVB ermittelt.

Arbeitsablauf:

Die Herstellung der SVB mit den unterschiedlichen Aschen erfolgte analog dem Mischregime der Mörteluntersuchungen (Tafel 3.11) bei einer Raumtemperatur von ca. 20 °C. Da aufgrund der hohen Anzahl der herzustellenden Probekörper eine relativ große Menge an Frischbeton erforderlich ist, wurde bereits bei diesen Untersuchungen ein anderer Zwangsmischer mit einem größeren

Mischvolumen eingesetzt. Dieser Schritt war nötig, da bekannt war, dass beim späteren Wechsel auf einen anderen Mischer voneinander abweichende Ergebnisse hinsichtlich der Frischbetoneigenschaften zu erwarten sind. Die hergestellte Betonmenge betrug allerdings im Gegensatz zu den späteren Frischbetonuntersuchungen nur 30 Liter. Alle für die Untersuchungen am Beton benötigten Gerätschaften wurden analog den Mörteluntersuchungen vor Benutzung feucht aus- bzw. abgewischt.

Es war nun wiederum eine Reihe von Untersuchungen der Betone der einzelnen Versuchsreihen mit unterschiedlichen Fließmittelgehalten notwendig, um die geforderten Frischbetoneigenschaften zu erreichen. Etwa 15 Minuten nach Mischbeginn erfolgte jeweils die Bestimmung des Setz-Fließmaßes r_b mittels einer Hohlkegelform nach DIN EN 12350-2 ohne Schlag (siehe Abbildung 3.8). Anschließend wurde ca. 20 Minuten nach Mischbeginn die Durchlaufzeit t_b mit einem größeren Trichter gemessen (siehe Abbildung 3.9).

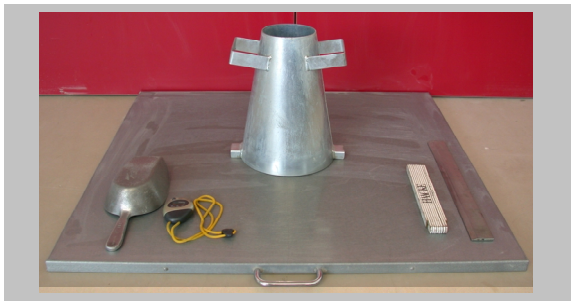


Abb. 3.8: *Hohlkegelstumpf zur Bestimmung des Setz-Fließmaßes nach DIN EN 12350-2*

Abb. 3.9: *Trichter zur Bestimmung der Auslaufzeit des selbstverdichtenden Betons nach Okamura*

Der „Entstehungsweg“ vom Mörtel zum fertigen SVB ist mit allen gemessenen Zwischenergebnissen ausführlich für sämtliche Betone in der Anlage **/A7…A18/** zusammengestellt. Die endgültigen Mischungszusammensetzungen der selbstverdichtenden Betone aller Versuchsreihen sind in untenstehender Tafel 3.13 aufgelistet.

Prüfung		Einheit	Versuchsreihe 1 SFA	1 BFA	2 SFA	2 BFA	3 SFA	3 BFA	4 SFA	4 BFA	5 SFA	5 BFA	6 SFA	6 BFA
Zement		[kg/m³]	295											
SFA		[kg/m³]	271	---	271	---	271	---	271	---	271	---	271	---
BFA		[kg/m³]	---	311	---	311	---	311	---	311	---	311	---	311
Fließmittel[1)]	Isola FM 10	[ml/kg]	8,61	11,49	---		---		---		---		---	
	Woerment 676	[ml/kg]	---		15,31	18,51	---		---		---		---	
	Woerment 375	[ml/kg]	---		---		10,25	11,72	---		---		---	
	Woerment 787	[ml/kg]	---		---		---		6,53	11,61	---		---	
	Muraplast FK 63.30	[ml/kg]	---		---		---		---		8,62	15,09	---	
	Isola BV 10 Export	[ml/kg]	---		---		---		---		---		9,03	12,31
Wasser (incl. FM)		[kg/m³]	189	190	189	190	189	190	189	190	189	190	189	190
Zuschlag 0/2 mm		[kg/m³]	847											
Zuschlag 2/8 mm		[kg/m³]	687											

Tafel 3.13: *Mischungszusammensetzungen der SVB aller Versuchsreihen*

[1)] bezogen auf die zugegebene Zementmasse

Die Zement-, Zusatzstoff- und Zuschlaganteile wurden bei allen Mischungen konstant gehalten. Ebenso der Wasseranteil (bezogen auf die Art des Zusatzstoffes), wobei der Wassergehalt des jeweils eingesetzten Fließmittels bei der verwendeten Wassermenge Berücksichtigung fand. Vergleicht man die Fließmittelmengen mit denen der hergestellten Mörtel, so kann man feststellen, dass sich diese bei allen Betonmischungen erhöhten. Dies war zu erwarten, da aufgrund unterschiedlicher Mischeffekte (Verwendung eines anderen Mischers) die Auswirkungen des Fließmittels auf den Mörtel gegenüber denen auf den Frischbeton variieren können.

3.4. VERSUCHSUMFANG UND EINLEITENDE BEMERKUNGEN

Da bei der Verwendung von Stein- und Braunkohlenflugasche, welche puzzolanische bzw. latent hydraulische Eigenschaften besitzen, mit einer erheblichen Nacherhärtung zu rechnen ist, wurde eine Erfassung der Festigkeitsentwicklung der Mörtel- und Betonproben bis zu einem Alter von 91 Tagen eingeplant. Aus diesem Grund steigt die Anzahl der herzustellenden Prüfkörper von üblicherweise 9 auf 15 Stück pro Versuchsreihe und eingesetzter Flugasche. Die Anzahl der hergestellten Betonprobewürfel mit den Abmessungen 150 x 150 x 150 mm³ für die Druckfestigkeitsprüfung und der angefertigten Mörtelprismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm³ für die Mörteldruck- und Mörtelbiegezugfestigkeit beläuft sich somit in der Summe auf jeweils 180 Stück. Des weiteren wurden zur Bestimmung der E-Moduli in einem Alter von 28 Tagen 36 Betonzylindern mit den Abmessungen Ø 150 / H 300 mm² hergestellt. Zusätzlich wurden zur Bestimmung der Gesamtschwindmaße der Mörtel noch 108 der bereits erwähnten Prismen angefertigt.

Zur Durchführung aller Frischbetonuntersuchungen und der Herstellung der Probekörper waren pro Versuchsreihe und gewähltem Zusatzstoff 2 Mischungen mit einem Volumen von 80 Litern nötig. Die Betone wurden in einem 200 Liter Zwangsmischer hergestellt. Des weiteren wurden zur Ermittlung des Rücksteifverhaltens der Betone pro Mischungsentwurf zwei 50-Liter-Mischungen mit 2 unterschiedlichen Mischern hergestellt (näheres siehe Abschnitt 3.6.6). Während der gesamten Untersuchungen waren die Laboratorien auf eine Temperatur von ca. 20 °C gehalten. Durch eine ausreichend lange Lagerung der Ausgangsstoffe in den Laboratorien konnte gewährleistet werden, dass diese ebenfalls eine Temperatur von ca. 20 °C besaßen. Die Reihenfolge der Zugabe der Mischungsbestandteile und die jeweiligen Mischzeiten wurden analog den Betonuntersuchungen beim Mischungsentwurf übernommen.

Die Lagerung aller Probekörper zur Ermittlung der Druckfestigkeiten und der E-Moduln bis zum jeweiligen Prüfungstermin erfolgte nach dem Entfernen aus der Form analog DIN EN 12390-2 unter Wasser bei einer Temperatur von (20 ± 2) °C. Die gleiche Lagerung erfuhren die Mörtelprismen.

3.5. AUSWERTUNG DER BINDEMITTELUNTERSUCHUNGEN

Zur Untersuchung der Bindemitteleigenschaften wurden die in Abschnitt 3.3.1 entwickelten Feststoffkombinationen (FSK I…VII) herangezogen. Zur besseren Vergleichbarkeit erfolgte ebenfalls die Ermittlung der allgemein üblichen Kennwerte am reinen Zementleim.

3.5.1. WASSERANSPRUCH

Zur Überprüfung des Erstarrungsverhaltens und der Raumbeständigkeit der Bindemittel ist es erforderlich, für jede Feststoffkombination den Wassergehalt zu bestimmen, welcher nötig ist, um eine so genannte Normsteife zu erlangen. Die Ermittlung dieses Wasseranspruches erfolgte nach DIN EN 196-3. Hierzu wurde das in Abbildung 3.10 dargestellte halbautomatische Vicat-Gerät der Firma Form+Test verwendet. Zur Ermittlung des Wasseranspruches lässt man einen Tauchstab in Bindemittelleime mit verschiedenen Wassergehalten eindringen. Der benötigte Wassergehalt zur Erlangung der Normsteife des jeweiligen Bindemittels ist dann erreicht, wenn ein Abstand von (6 ± 1) mm zwischen Tauchstab und Glasplatte (Boden des Leimkuchens) erreicht wird. Die Angabe des Wasseranspruchs erfolgt auf 0,5 M-% gerundet. Die ermittelten Wasseransprüche der einzelnen Feststoffkombinationen und des reinen Zementleimes sind in Tafel 3.14 erkennbar.

Abb. 3.10: ***halb****automat. Vicat-Gerät*

Eigenschaft		Einheit	Feststoffkombinationen I	II	III	IV	V	VI	VII	reiner Zementleim
Bestandteil	Zement	[ml]	*100*	*120*	*90*	*100*	*120*	*90*	*90*	*200*
	SFA	[ml]	*100*	*80*	*110*	---	---	---	---	---
	BFA aufb.	[ml]	---	---	---	*100*	*80*	*110*	---	---
	BFA unaufb.	[ml]	---	---	---	---	---	---	*110*	---
Wasseranspruch		**[M.-%]**	***31,0***	***30,5***	***31,5***	***28,5***	***28,5***	***29,0***	***27,0***	***27,5***

Tafel 3.14: *Wasseransprüche der untersuchten Bindemittelgemische*

Betrachtet man die gemessenen Werte, so ist ersichtlich, dass durch Zugabe von Flugasche die Wasseranspruchswerte gegenüber denen eines reinen Zementgemisches steigen. Es ist weiterhin zu vermerken, dass sich bei steigendem Flugaschegehalt die benötigte Wassermenge zum Erreichen der Normsteife erhöht. Bei der eingesetzten Steinkohlenflugasche ist dieser Effekt allerdings geringer ausgeprägt als bei der aufbereiteten Braunkohlenflugasche. Der Wasseranspruch für das Gemisch mit der unaufbereiteten BFA liegt mit 27,0 M.-% im Größenbereich des reinen Zementgemisches. Die Aufmahlung der BFA bewirkte dementsprechend eine Erhöhung des Wasseranspruches um ca. 2,0 M.-%.

3.5.2. ERSTARRUNGSVERHALTEN

Die Bestimmung des Erstarrungsverhaltens nach DIN EN 196-3 umfaßt die Messung des Erstarrungsbeginns und des Erstarrungsendes. Die Untersuchung erfolgt mit dem bereits vorgestellten Vicat-Gerät. Allerdings muss hier der Tauchstab durch eine Stahlnadel (siehe Abbildung 3.11-links) ersetzt werden. Da bei der Bestimmung des Erstarrungsendes nur sehr geringe Eindringtiefen gemessen werden, muss die Stahlnadel noch zusätzlich mit einem ringförmigen Ansatz (siehe 3.11-rechts) versehen werden. Der Erstarrungsbeginn gilt als erreicht, wenn der Abstand zwischen Stahlnadel und Glasplatte (4 ± 1) mm beträgt. Die Zeitspanne, die vom Einfüllen des Zementes in den Mischer (Nullzeit) bis zu dem Zeitpunkt vergeht, in dem die Nadel nur noch 0,5 mm in den erhärteten Bindemittelleim eindringt, gilt als Erstarrungsende des Bindemittels. Der Zeitpunkt für das Erstarrungsende ist erreicht, wenn der ringförmige Ansatz der Nadel keinen Eindruck mehr auf der Prüfkörperoberfläche hinterlässt. Die Zeit des Erstarrungsbeginns ist auf 5 Minuten gerundet anzugeben, das Erstarrungsende hingegen ist auf 15 Minuten zu runden. Die ermittelten Zeiten für das Erstarrungsverhalten der untersuchten Bindemittel sind in untenstehender Tafel 3.15 zusammengestellt.

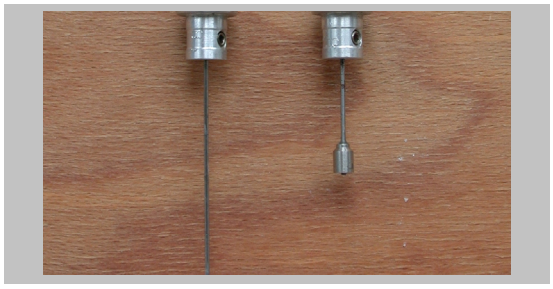


Abb. 3.11: *Nadel mit und ohne Ansatz zur Bestimmung der Erstarrungszeiten*

Eigenschaft		Einheit	Feststoffkombinationen I	II	III	IV	V	VI	VII	reiner Zementleim
Bestandteil	Zement	[ml]	*100*	*120*	*90*	*100*	*120*	*90*	*90*	*200*
	SFA	[ml]	*100*	*80*	*110*	---	---	---	---	---
	BFA aufb.	[ml]	---	---	---	*100*	*80*	*110*	---	---
	BFA unaufb.	[ml]	---	---	---	---	---	---	*110*	---
Erstarrungsbeginn		**[h:min]**	***5:35***	***5:45***	***4:45***	***3:15***	***3:30***	***3:45***	***3:25***	***2:30***
Erstarrungsende		**[h:min]**	***11:45***	***11:30***	***10:15***	***9:45***	***9:00***	***9:00***	***9:15***	***7:15***

Tafel 3.15: *Erstarrungsbeginn und –ende der untersuchten Bindemittelgemische*

Alle gemessenen Zeiten für den Erstarrungsbeginn liegen oberhalb der in DIN EN 197-1 festgelegten Zeit von 75 Minuten. Die für den Zement bestimmten Erstarrungszeiten liegen mit 2h:30min für den Erstarrungsbeginn und mit 7h:15min für das Erstarrungsende im Normalbereich. Erwartungsgemäß haben sich durch den Einsatz von Flugasche diese Zeiten wesentlich verlängert. Man muss an dieser Stelle aber erwähnen, dass die Steinkohlenflugasche gegenüber der aufbereiteten Braunkohlenflugasche eine um 2 Stunden höhere Verschiebung der Erstarrungszeiten bewirkt. Diese Erkenntnis kann für die Beurteilung des Rücksteifverhaltens der hergestellten Frischbetone von Bedeutung sein. Vergleicht man die Zeiten für die Gemische mit der unaufbereiteten und der aufbereiteten BFA miteinander, so lässt sich feststellen, dass der Mahlprozess nur eine geringe Verschiebung des Erstarrungsbeginns zu Gunsten einer Verzögerung von ca. 20 Minuten bewirkt hat.

3.5.3. RAUMBESTÄNDIGKEIT

Die Prüfung der Raumbeständigkeit erfolgte ebenfalls nach DIN EN 196-3. Das Ziel des Raumbeständigkeitsveruches ist es, die mögliche Gefahr einer späteren Ausdehnung des erhärteten Bindemittels abzuschätzen, die auf der Hydratation von freiem Calciumoxid oder von freiem Magnesiumoxid beruht. Zur Messung der Raumbeständigkeit werden so genannte Le-Chatelier-Ringe (siehe Abbildung 3.12) verwendet. Diese Ringe werden mit den Bindemittelleimen gefüllt und für 24 Stunden in einem Feuchtekasten gelagert. Anschließend bringt man die Ringe für 3 Stunden im Wasserbad zum Kochen. Misst man vor und nach dem Kochen die Abstände der Nadeln an den Ringen, so kann man aus deren Differenz einen Wert für die Raumbeständigkeit berechnen. In Tafel 3.16 sind die gemessenen Werte für alle Bindemittelgemische zusammengetragen.

Abb. 3.12: *Le-Chatelier-Ringe zur Bestimmung der Raumbeständigkeit von Bindemitteln*

Eigenschaft		Einheit	Feststoffkombinationen							reiner Zementleim
			I	II	III	IV	V	VI	VII	
Bestandteil	Zement	[ml]	*100*	*120*	*90*	*100*	*120*	*90*	*90*	*200*
	SFA	[ml]	*100*	*80*	*110*	---	---	---	---	---
	BFA aufb.	[ml]	---	---	---	*100*	*80*	*110*	---	---
	BFA unaufb.	[ml]	---	---	---	---	---	---	*110*	---
Raumbeständigkeit		**[mm]**	***1,5***	***1,2***	***1,8***	***1,2***	***1,7***	***1,2***	***1,0***	***0,8***

Die Differenzen der gemessenen Werte aller Bindemittelgemische vor und nach dem Kochen lagen weit unter dem in DIN EN 197-1 festgelegten maximalen Wert von 10 mm. Demzufolge sind keinerlei Treiberscheinungen infolge der Hydratation von freiem Calciumoxid oder von freiem Magnesiumoxid zu erwarten.

3.5.4. HYDRATATIONSWÄRMEENTWICKLUNG

Mittels Kalometrie (Messung der Hydratationswärmeentwicklung) kann die Reaktionswärme während der früher Phase der Zementerhärtung bestimmt werden. Die Untersuchungen erfolgten anhand des so genannten Langavant-Verfahrens nach DIN EN 196-9 mit Hilfe eines teiladiabatischen Kalorimeters der Firma Toni Technik (siehe Abbildung 3.13). Die Messung der Hydratationswärme beruht dabei auf folgendem Prinzip:

Eine Probe, welche aus dem Bindemittelgemisch und Wasser besteht, wird in ein Dewar-Gefäß (Prüfkalorimeter) eingebracht und die Temperaturentwicklung über der Zeit gemessen. Aus der

Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur, welche mit dem Referenzkalorimeter gemessen wird, erfolgt die Berechnung der Hydratationswärme der Probe als Summe der im Dewar akkumulierten Wärme und der während der Prüfung an die Umgebung abgegebenen Wärme. Dazu muss die exakte Menge des im Kalorimeter befindlichen Bindemittelgemisches und Wassers bekannt sein. Der Wärmefluß wird dabei nicht direkt gemessen, sondern kann aus dem zeitlichen Verlauf der Hydratationswärme berechnet werden. In Abbildung 3.14 sind die bestimmten Hydratationswärmeentwicklungen der eingesetzten Bindemittelgemische dem des reinen Zementes gegenübergestellt.

Abb. 3.13: *Kalorimeter zur Bestimmung der Hydratationswärmeentwicklung von Bindemitteln*

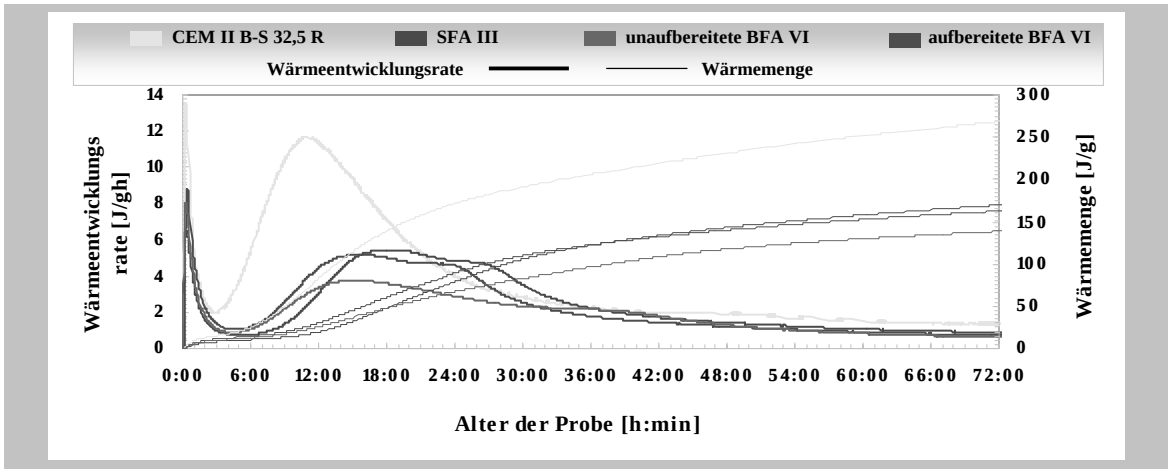


Abb. 3.14: *Wärmeentwicklungsraten und Wärmemengen der eingesetzten Bindemittelgemische und des reinen Zementes*

Die Hydratation von Bindemitteln kann in folgende 5 Stadien unterteilt werden:

Im ***ersten Hydratationsstadium*** reagiert in der Hauptsache das C_3A unter Mitwirkung des als Abbindereglers eingesetzten Sulfatträgers. Dieser Reaktion sind die in Abbildung 3.13 zu erkennenden ersten exothermen Peaks aller untersuchten Bindemittel, welche bereits nach wenigen Minuten ihr Maximum erreichen, zuzuschreiben. Bereits in diesem Stadium ist ein deutlicher Rückgang der abgegebenen Wärme infolge des teilweisen Austausches des Zementes durch die Flugaschen zu erkennen.

In der ***zweiten Phase der Hydratation*** nach etwa 2 Stunden setzt eine vom Klinkertyp und der Mahlfeinheit des Bindemittels abhängige Ruhephase ein, in der nur geringe Wärmemengen freigesetzt werden. In dieser Phase kommt es gleichzeitig zur Bildung erster Ca-Silicathydratphasen, deren Wasserbindung äußerlich als Erstarrungsbeginn zu beobachten ist. Diese zweite Phase ist beim untersuchten Zement sehr kurz ausgeprägt. Der Einsatz der Flugaschen verlängert diese Phase erheblich (auf das 3-fache) - eine Verzögerung der Reaktion tritt ein. Dieses Phänomen ist beim Einsatz der Steinkohlenflugasche am intensivsten ausgeprägt.

Das ***dritte Hydratationsstadium*** ist als Beschleunigungsphase zu bezeichnen und setzt beim reinen Zement nach ca. 4 Stunden und bei den Gemischen nach ca. 8…10 Stunden ein. Während dieser Phase ist ein ausgeprägtes Maximum in der Wärmefreisetzungsrate zu erkennen, deren Ursprung in der Bildung von CSH-Phasen und Portlandit aus den Calciumsilikaten des Klinkers liegt. An dieser Stelle der Hydratation ist ebenfalls ein wesentlicher Rückgang der freigesetzten Wärme um ca. 60 % durch den Einsatz der Flugaschen zu erkennen. Das Gemisch mit der unaufbereiteten BFA entwickelt die geringste Wärme. Die Aufmahlung der Braunkohlenflugasche bewirkt in dieser Phase einen Anstieg der abgegebenen Wärme auf das Niveau der Steinkohlenflugasche, was aufgrund der höheren Mahlfeinheit zu erwarten war.

Das ***vierte Hydratationsstadium***, welches als Übergangs- bzw. Verzögerungsphase bezeichnet wird, ist i.a. durch einen starken Rückgang der Wärmeentwicklung gekennzeichnet. Es kann allerdings auch infolge der Hydratation von latent-hydraulischen Zusatzstoffen ein weiterer exothermer Peak auftreten. Diese Eigenschaft konnte ebenfalls bei den Bindemittelgemischen beobachtet werden. Bei der unaufbereiteten BFA ist der dritte Peak allerdings im Gegensatz zu den anderen Flugaschen kaum ausgebildet.

Das ***fünfte und letzte Hydratationsstadium***, welches auch als diffusionskontrollierte Phase bezeichnet wird, zeigt nur noch äußerst geringe Wärmefreisetzungen, die sich asymptotisch dem Nullpunkt nähern.

3.5.5. FESTIGKEITSENTWICKLUNG

Zur Beurteilung der Festigkeitsentwicklung der konzeptionierten Mörtel wurde an den erhärteten Mörtelprismen die Biegezug- und Druckfestigkeit bis zu einem Alter von 91 Tagen ermittelt. Des weiteren konnten mit Hilfe der gemessenen Werte erste Rückschlüsse auf die zu erwartenden Festigkeiten der Betone gezogen werden. Zur Prüfung der Festigkeiten nach DIN EN 196-1 kam die in Abbildung 3.15 dargestellte Prüfmaschine der Firma Testing zu Einsatz. Die bei der Prüfung der Biegezugfestigkeit entstandenen Prismenhälften wurden für die Ermittlung der Druckfestigkeiten herangezogen. Die zu prüfenden Mörtelprismen wurden vor dem jeweiligen Termin aus dem Wasserbad genommen und trocken abgewischt. Durch Wägung der einzelnen Proben konnten die entsprechenden, in der Anlage **/A19…A24/** zusammengestellten, Rohdichten ρ_R berechnet werden. Die gemessenen Biegezugfestigkeiten der hergestellten Mörtel aller Versuchsreihen sind in nachfolgender Abbildung 3.16 vergleichend dargestellt.

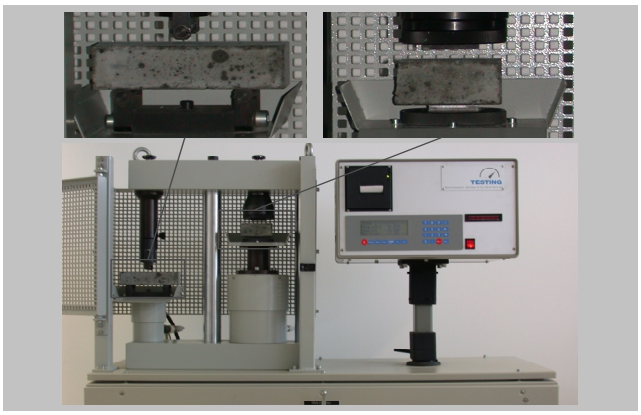


Abb. 3.15: *Prüfmaschine zur Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeiten von Mörtelprismen*

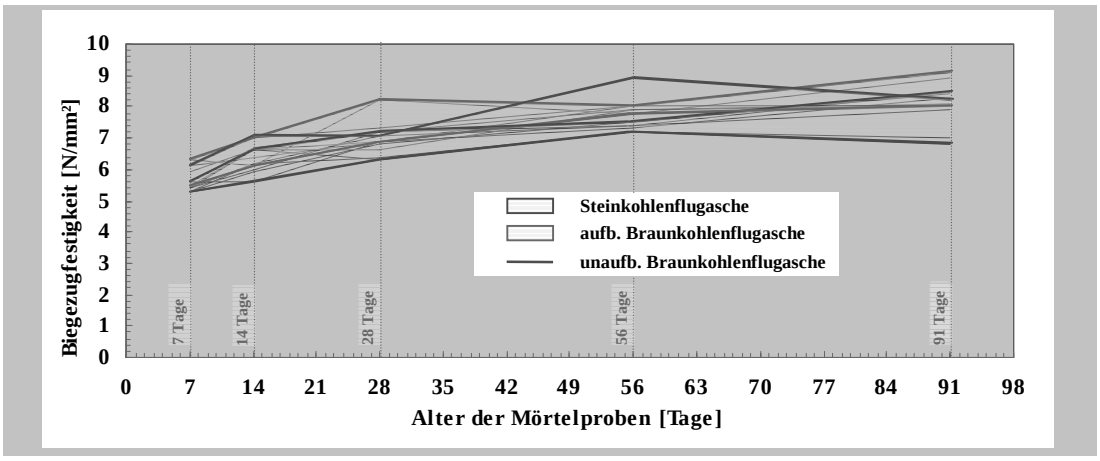


Abb. 3.16: *Wertebereiche der ermittelten Biegezugfestigkeiten der hergestellten Mörtel aller Versuchsreihen*

Die Zunahme der Biegezugfestigkeiten aller Mörtel mit BFA bzw. SFA als Zusatzstoff erfolgte nahezu parallel. Die „BFA-Mörtel“ besitzen allerdings geringfügig (um ca. 0,5 N/mm²) höhere Biegezugfestigkeiten als die „SFA-Mörtel“. Im Mittel erreichten alle hergestellten Mörtel bereits nach 7 Tagen ca. 70 % ihrer 91-Tage-Festigkeit. Es ist kein signifikanter Unterschied in der Entwicklung der Biegezugfestigkeiten zwischen den Mörteln mit aufbereiteter und unaufbereiteter BFA zu erkennen. Auffallend ist allerdings, dass der Streubereich aller gemessenen Festigkeiten nach 56 Tagen im Gegensatz zu allen anderen Prüfterminen wesentlich enger ausgefallen ist.

In Abbildung 3.17 sind die ermittelten Druckfestigkeiten der Mörtelprismen graphisch dargestellt. Die Entwicklung der Druckfestigkeiten verliefen analog den Biegezugfestigkeiten bei den Mörteln mit SFA und BFA als Zusatzstoff nahezu parallel. Hier sind die Festigkeiten der „BFA-Mörtel“ ebenfalls geringfügig (um ca. 5 N/mm²) höher als bei den „SFA-Mörteln“. Bereits nach 7 Tagen konnten bei allen Mörteln ca. 60 % der 28-Tage-Druckfestigkeiten erreicht werden. Aufgrund der bereits erwähnten puzzolanischen Reaktivität der eingesetzten Zusatzstoffe kam es ab einem Alter von 28 Tagen zu einer erheblichen Nacherhärtung.

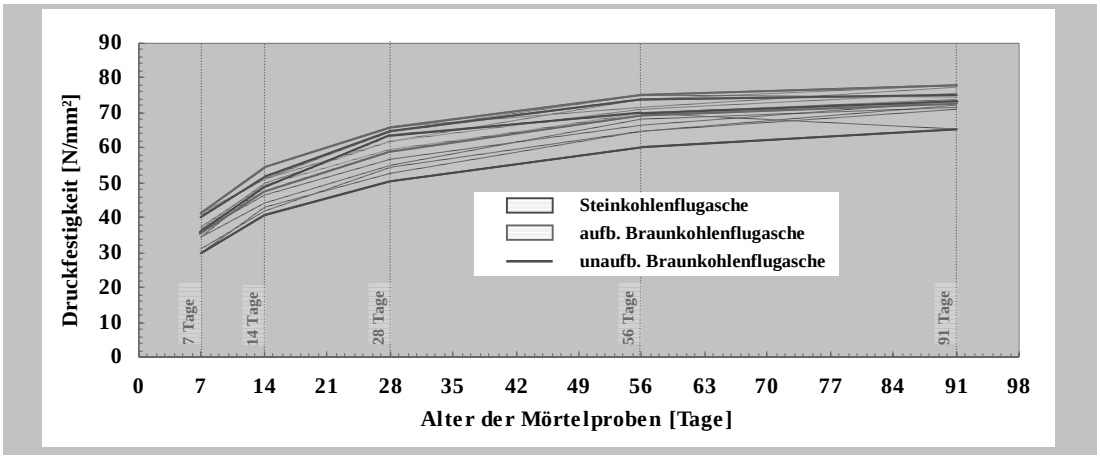


Abb. 3.17: *Wertebereiche der ermittelten Druckfestigkeiten der hergestellten Mörtel aller Versuchsreihen*

3.6. AUSWERTUNG DER FRISCHBETONUNTERSUCHUNGEN

Nachdem die endgültigen Betonzusammensetzungen feststanden, erfolgte eine Untersuchung der Betone durch verschiedene Frischbetonprüfungen hinsichtlich ihrer Fließfähigkeit, Viskosität, der Neigung zum Blockieren und der Selbstentlüftungs- bzw. Nivellierfähigkeit. Hierzu wurden bei allen Betonen die in untenstehender Tafel 3.17 zusammengestellten Betonprüfverfahren durchgeführt. In den nächsten Abschnitten sollen die einzelnen Verfahren näher erläutert und die dabei erzielten Ergebnisse vergleichend betrachtet werden.

Prüfverfahren	Bemerkung
Setzfliess-Versuch	*Überprüfung der Fließfähigkeit nach DAfStb*
Trichterauslaufzeit-Versuch	*Überprüfung der Viskosität nach Okamura*
J-Ring-Versuch	*Überprüfung der Fließfähigkeit und der Neigung zum Blockieren nach DAfStb*
L-Kasten-Versuch	*Überprüfung der Selbstnivellierfähigkeit und der Neigung zum Blockieren*
Luftporenbestimmung	*Bestimmung des Luftgehaltes mit und ohne Verdichtung nach DIN EN 12350-7*
Frischbetonrohdichte	*Bestimmung nach DIN EN 12350-6*
Rücksteifverhalten	*Überprüfung der Fließfähigkeit und der Viskosität über einen längeren Zeitraum*
Frühschwindverhalten	*Überprüfung des Schwindverhaltens des Betons kurz nach der Herstellung*

3.6.1. SETZFLIESS - VERSUCH

Die Ermittlung des Setzfließmaßes erfolgte mit Hilfe der bereits bei der Entwicklung der Betonrezeptur eingesetzten Kegelstumpfform nach DIN EN 12350-2 (siehe Abbildung 3.18). Nachdem der Kegel senkrecht nach oben abgezogen wurde, floss der Beton allein unter der Schwerkraft auseinander. In Tafel 3.18 sind die ermittelten Setzfließmaße aller untersuchten Betone zusammengestellt. Da aufgrund der hohen Anzahl der anzufertigenden Probekörper zwei Mischungen pro Betonrezeptur angesetzt werden mussten, wurde zur Kontrolle der gleichmäßigen Verarbeitbarkeit der Frischbetone die Prüfung des Setzfließmaßes und der Trichterauslaufzeit an beiden hergestellten Mischungen durchgeführt.

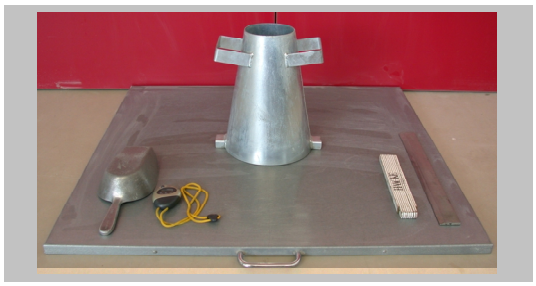


Abb. 3.18: *Hohlkegelstumpf zur Bestimmung des Setzfließmaßes nach DIN EN 12350-2*

Prüfverfahren		Einheit	SFA.FSK III						BFA.FSK IV					
			VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6	VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6
Setzfließmaß	Mischung 1	[cm]	*85,0*	*83,5*	*81,3*	*78,5*	*80,3*	*82,5*	*85,5*	*82,5*	*84,0*	*82,8*	*81,5*	*57,3*
	Mischung 2	[cm]	*84,0*	*84,0*	*85,0*	*79,8*	*81,3*	*83,3*	*85,3*	*79,0*	*84,3*	*81,8*	*83,5*	*62,0*

Tafel 3.18: *ermittelte Setzfließmaße aller hergestellten Betone*

Nach Okamura ist ein selbstverdichtender Beton bei einem Setzfließmaß von (65 ± 5) cm einzustufen. Nach Absprache mit den Kooperationspartnern wurde festgelegt, dass aufgrund sehr hoher Ansprüche an die Verarbeitbarkeit des Betons für dieses Maß (80 ± 5) cm angestrebt werden sollte. Dieser Wertebereich konnte ohne Entmischungserscheinungen bei allen Betonen – mit Ausnahme des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 6 – erreicht werden. Ein sicheres Indiz für die Stabilität der Betone liegt vor, wenn die Grobzuschläge beim Fließvorgang vom Bindemittelleim bis zum äußeren Rand des Betonkuchens transportiert werden. Dieser Effekt konnte ausnahmslos bei allen Betonen beobachtet werden. Lediglich bei den Betonen, wo die Setzfließmaße im oberen Grenzbereich (ca. 85 cm) lagen, konnte die Bildung eines sehr dünnen Randes (< 1mm) aus Zementleim um den Betonkuchen (siehe Abbildung 3.19) festgestellt werden, was auf eine beginnende Neigung zum Entmischen hinweist.

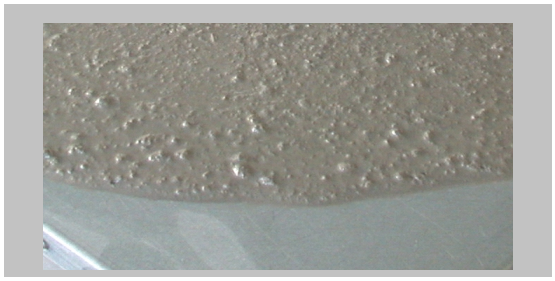


Abb. 3.19: *Zementleimfilm um den Betonkuchen des „SFA-Betons“ der VR 3 [Setzfließm. 85 cm]*

Wie bereits erwähnt, konnte mit dem Hochleistungsfließmittel der Versuchsreihe 6 kein „BFA-Beton“ mit ausreichendem Setzfließmaß hergestellt werden. Vielmehr musste die Prüfung der Frischbetoneigenschaften an dieser Stelle abgebrochen werden, da dieser Beton bereits nach wenigen Minuten enorm „angesteift“ war. Es konnte nur das Setzfließmaß, die Trichterauslaufzeit und die Kennwerte des L-Kasten-Versuchs bestimmt werden. Bei diesem Beton machten sich die unterschiedlichen Wirkungsgrade der eingesetzten Fließmittel am deutlichsten bemerkbar.

3.6.2. TRICHTERAUSLAUFZEIT - VERSUCH

Die Ermittlung der Trichterauslaufzeit erfolgte ebenfalls an den bereits bei der Entwicklung der Betonrezepturen eingesetzten Betontrichter nach Okamura (siehe Abbildung 3.20). Nachdem der Trichter bis zum oberen Rand komplett gefüllt war, öffnete man die untere Klappe und der SVB konnte in einem Strang aus dem Trichter heraus fließen. Dabei wurde die Zeit gemessen, die vom Öffnen der Klappe bis zum vollständigen Auslaufen des Betons vergangen war (Strang riss ab). Als zu Beginn der Untersuchungen die Betone noch auf ein Setzfließmaß von ca. 65 cm eingestellt wurden, gestaltete sich die Messung der Trichterauslaufzeit schwierig, da der Beton nicht in einem Strang aus dem Trichter ausfloss, und somit einklar erkannbares Abreißen des Strangs nicht eindeutig zu ermitteln war. Dieses Problem relativierte sich, als höhere Setzfließmaße eingestellt wurden. Die ermittelten Zeiten der Trichterauslauf-Versuche sind in untenstehender Tafel 3.19 dargestellt.

Abb. 3.20: *Trichter zur Bestimmung der Auslaufzeit des selbstverd .Beton nach Okamura*

Prüfverfahren		Einheit	SFA.FSK III						BFA.FSK IV					
			VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6	VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6
Trichter-auslaufzeit	Mischung 1	[s]	*14*	*10*	*11*	*5*	*6*	*6*	*9*	*10*	*8*	*6*	*9*	*9*
	Mischung 2	[s]	*13*	*9*	*10*	*5*	*6*	*6*	*9*	*9*	*8*	*5*	*9*	---

Wenn ein optimales Fließmittel/Mehlkorn-Verhältnis der Betone vorliegt, dann müssen deren Trichterauslaufzeiten nach Okamura in einem Bereich von 5…20 Sekunden liegen. Dieses vorgegebene Zeitfenster konnte bei allen Betonen eingehalten werden. Vergleicht man allerdings die gemessenen Zeiten aller Versuchsreihen kritisch miteinander, so kann man wiederum die unterschiedlichen Wirkungen der einzelnen Fließmittel auf die Betone erkennen. Bei den Versuchsreihen 1 und 3 erreichten die „SFA-Betone“ höhere Werte als die entsprechenden „BFA-Betone“ - was mit einer höheren Viskosität der ersteren gleichzusetzen ist. Bei den Versuchsreihen 5 und 6 hingegen zeigten die „BFA-Betone“ die höheren Viskositätswerte. Bei den Versuchsreihen 2 und 4 waren die Auslaufzeiten unabhängig vom Aschetyp nahezu identisch. Es existiert offensichtlich - ähnlich wie bei der Kombination von Zementen und Fließmitteln bekannt - eine unterschiedliche, empirisch zu ermittelnde Verträglichkeit der einzelnen Fließmittel mit den verwendeten Aschetypen

3.6.3. J - RING - VERSUCH

Mit dem J-Ring-Versuch soll die Blockierneigung eines selbstverdichtenden Betons erfasst werden. Zur Durchführung dieses Versuches ist neben den Gerätschaften zur Bestimmung des Setzfließmaßes noch zusätzlich ein „Bewehrungsring“ nötig (siehe Abbildung 3.21), durch den der Beton hindurch fließen muss. Da dieses Verfahren auf einer rein optischen Prüfung beruht, hängt seine Auswertung stark von der Erfahrung des Prüfers ab. Zusätzlich kann bei diesem Versuch noch die so genannte t_{500}-Zeit gemessen werden. Dieser Wert ist definiert als der zeitliche Abstand vom Anheben des Kegelstumpfes bis zum Erreichen eines Betonkuchens mit einem Durchmesser von 500 mm. Da hiermit Zahlenwerte ermittelt werden, die man vergleichen kann, eignet sich diese Prüfung, um Aussagen über die relativen Viskositäten der hergestellten Betone treffen zu können. In Tafel 3.20 sind die ermittelten Setzfließmaße der J-Ring-Versuche und die dazugehörigen t_{500}-Zeiten zusammengetragen. Wenn ein Beton zum Blockieren neigt, dann kann er den Ring nur unvollständig oder gar nicht überwinden. Beton, der nicht zum Blockieren neigt, passiert das Hindernis ohne erkennbare Beeinträchtigung.

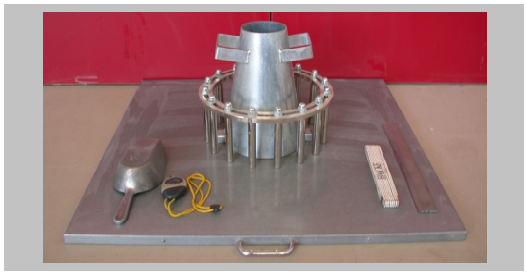


Abb. 3.21: *Hohlkegelstumpf Bewehrungsring zur Durchführung des J-Ring-Versuchs*

Prüfverfahren	Einheit	SFA.FSK III						BFA.FSK IV					
		VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6	VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6
Setzfließmaß [gemittelt]	[cm]	*85,0*	*83,5*	*81,3*	*78,5*	*80,3*	*82,5*	*85,5*	*82,5*	*84,0*	*82,8*	*81,5*	*57,3*
Setzfließmaß [J-Ring]	[cm]	*81,8*	*80,3*	*80,0*	*76,0*	*75,8*	*77,3*	*84,5*	*68,3*	*81,5*	*81,0*	*78,8*	---
Differenz	[cm]	*3,2*	*3,2*	*1,3*	*2,5*	*4,5*	*5,2*	*1,0*	*14,2*	*2,5*	*1,8*	*2,7*	---
t_{500}-Zeit	[s]	*7,0*	*5,6*	*6,9*	*3,3*	*4,2*	*3,1*	*5,5*	*8,2*	*6,0*	*3,2*	*5,6*	---

Tafel 3.20: *ermittelte Setzfließmaße der J-Ring-Versuche aller Betone und dazugehörige t_{500}-Zeiten*

Bei keinen der untersuchten Betone konnte eine solche Beeinträchtigung beobachtet werden. Lediglich bei einem Beton mit BFA als Zusatzstoff (VR 2) konnte sich im Gegensatz zu den anderen Betonen ein kleiner „Betonhügel“ innerhalb des J-Rings bilden (siehe Abbildungen 3.22 und 3.23). Es lagerten sich aber bei keinem der Betone grobe Zuschläge vor dem Bewehrungshindernis ab.

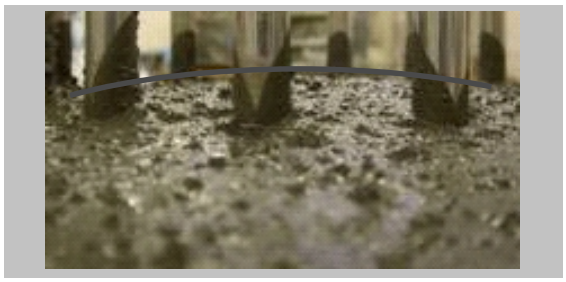


Abb. 3.22: *geringfügige „Hügelbildung“ innerhalb des J-Rings beim BFA-Beton der VR 2*

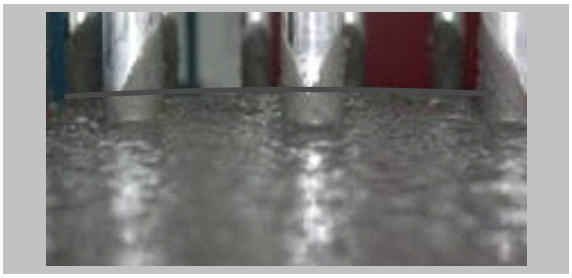


Abb. 3.23: *keine „Hügelbildung“ innerhalb des J-Rings bei den restlichen Betonen*

Nach [G-7] soll die Differenz zwischen den Setzfließmaßen des Fließ- und des J-Ring-Versuches nicht größer als 5 cm sein. Diese Anforderung wurde - mit Ausnahme des bereits oben erwähnten „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 2 – von allen Betonen eingehalten. Bei dem auffälligen Beton (VR 2) konnte der J-Ring-Versuch, im Gegensatz zu den anderen Betonen, erst ca. 20 Minuten nach dem Setzfließ-Versuch durchgeführt werden. Da die BFA-Betone sehr schnell zurücksteifen (näheres siehe Abschnitt 3.6.6), wirkte sich diese Verzögerung negativ auf das ermittelte Ergebnis dieses Betons aus.

3.6.4. L - KASTEN - VERSUCH

Beim L-Kasten-Versuch wird die Selbstnivellierungsfähigkeit des Betons und seine Neigung zum Blockieren geprüft. Hierzu wird eine winkelförmige Schalung (siehe Abbildung 3.24) bei geschlossenem Schieber auf der Einfüllseite (vertikaler Schenkel) mit Beton gefüllt. Anschließend wird der Schieber geöffnet, so dass der Beton nun lediglich unter der Wirkung der Schwerkraft durch ein Bewehrungshindernis in den unteren, horizontalen Schenkel der Schalung fließen kann.

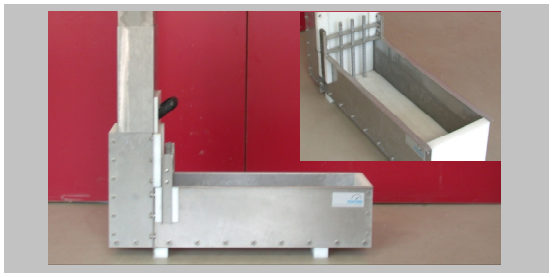


Abb. 3.24: *winkelförmige Schalung zur Durchführung des L-Kasten-Versuches von SVB*

Bei der Prüfung werden die Betonhöhen jeweils am Anfang (h_1) und am Ende (h_2) des waagerechten Schenkels ermittelt und die Zeitspannen bestimmt, die der Beton nach dem Öffnen des Schiebers benötigt, um die 20 bzw. 40 cm Markierung zu erreichen. Die einzelnen Ergebnisse dieses Versuches sind in Tafel 3.21 aufgelistet.

Prüfverfahren		Einheit	SFA.FSK III						BFA.FSK IV					
			VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6	VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6
L-Kasten-Versuch	t_{200}-Zeit	[s]	3,7	3,3	2,2	1,2	1,3	1,0	5,5	3,0	1,7	1,2	2,9	1,9
	t_{400}-Zeit	[s]	6,2	5,9	5,8	2,9	3,5	2,8	3,6	6,6	4,4	2,6	5,5	5,5
	h_1 (Anfang)	[cm]	8,4	8,5	8,5	8,5	8,4	8,3	8,5	8,5	8,5	8,5	8,6	7,0
	h_2 (Ende)	[cm]	8,4	8,4	8,5	8,4	8,4	8,4	8,5	8,5	8,6	8,5	8,6	8,4
	h_2/h_1	[-]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8

Tafel 3.21: *ermittelte Kennwerte des L-Kasten-Versuches aller Betone*

Da alle Betone bei der Überprüfung der Höhenverhältnisse h_2/h_1 den angestrebten Wert von > 0,8 erreichten, kann von einer sehr guten Selbstnivellierfähigkeit der hergestellten Betone ausgegangen werden. Einzig der bereits erwähnte „BFA-Beton“ der Versuchsreihe 6 liegt mit einem Verhältnis von 0,8 an der Gebrauchsgrenze. Da zum Zeitpunkt der Prüfung dieser Beton jedoch hinsichtlich der Eigenschaften eines SVB bereits als ungeeignet eingeschätzt wurde, sollte über eine Erhöhung des Grenzwertes für das Höhenverhältnis nachgedacht werden. Die Zeitmessungen bestätigten ebenfalls die vorher ermittelten Ergebnisse zur Fließfähigkeit der Betone. Bei der Überprüfung der Blockierneigung konnten ebenso die ermittelten Ergebnisse des J-Ring-Versuches bestätigt werden (siehe Abbildung 3.25).

Abb. 3.25: *keine sichtbare Ansammlungen von Zuschlägen vor den Bewehrungsstäben*

3.6.5. LUFTPORENBESTIMMUNG

Eine Bestimmung des Luftgehaltes ist auch bei selbstverdichtendem Beton mittels LP-Topf (siehe Abbildung 3.26) nach DIN EN 12350-7 möglich. Dabei können jedoch Art und Geschwindigkeit beim Befüllen der Prüfapparatur das Messergebnis beeinflussen. Dieses Verhalten ist umso ausgeprägter, je höher die Viskosität und je schlechter die Fließfähigkeit ist. Weiterhin ist unbedingt darauf zu achten, dass der Beton nach dem Einfüllen in den LP-Topf genügend Zeit zur Selbstentlüftung erhält. In Tafel 3.22 sind die Luftgehalte aller untersuchten Betone zusammengetragen. Die Bestimmung der Messwerte erfolgte einmal - entsprechend der typischen Verarbeitung eines SVB - ohne

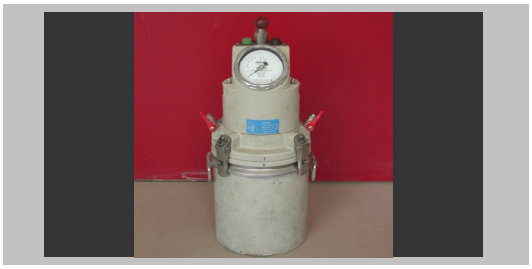


Abb. 3.26: *LP-Topf zur Ermittlung des Luftgehaltes von Frischbeton nach DIN EN 12350-7*

Verdichtung und zur Beurteilung des Ausmaßes der Selbstentlüftung ein weiteres mal mit Verdichtung durch Vibration (Dauer 30 Sekunden).

Prüfverfahren		Einheit	SFA.FSK III						BFA.FSK IV					
			VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6	VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6
Luftporengehalt [LP-Topf]	ohne Verdichtung	[Vol.-%]	*2,4*	*3,1*	*5,4*	*6,9*	*3,0*	*2,9*	*2,5*	*2,6*	*4,4*	*7,2*	*3,0*	---
	mit Verdichtung	[Vol.-%]	*2,1*	*2,0*	*3,8*	*4,3*	*2,4*	*2,4*	*2,0*	*2,6*	*2,8*	*4,6*	*2,1*	---

Tafel 3.22: *ermittelte Luftgehalte aller Frischbetone ohne und mit Verdichtung*

Wie in oben dargestellter Tafel ersichtlich, konnte bei keinem der Betone der angestrebte maximale Luftgehalt von 2,0 Vol.-% eingehalten werden. Allerdings muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass die Befüllung des SVB in das Prüfgerät nicht wie empfohlen über eine um 30 ° geneigte Rinne erfolgte. Bei dieser Art der Befüllung ist eine bessere Entlüftung schon während des Fließens des Frischbetons in der Rinne möglich. Aufgrund dessen sind wesentlich geringere Luftgehalte zu erwarten. Hinsichtlich der versuchsweise durchgeführten Vibrationsverdichtung ist festzustellen, dass eine Verdichtung für eine Dauer von 30 Sekunden nur geringfügig niedrigere Luftgehalte bewirkt. Hier wirkt sich offenbar die gegenüber einem Normalbeton größere Zähigkeit des SVB nachteilig aus.

Sämtliche bislang dargestellten Frischbetonkennwerte sind zur besseren Vergleichbarkeit nochmals in der Anlage **/A26/** zusammengetragen.

3.6.6. RÜCKSTEIFVERHALTEN

Selbstverdichtender Beton sollte für den Einsatz als Transportbeton seine optimale Verarbeitbarkeit eine ausreichend lange Zeit aufweisen können. Die Verarbeitbarkeitszeit darf nach DAfStB-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ für Transportbeton ab Anlieferung auf der Baustelle 45 Minuten sowie bei der Fertigteilherstellung 20 Minuten nicht unterschreiten. *[D-2]* Der unbekannte Faktor bei dieser Zeitangabe ist die Dauer des Betontransportes vom Betonwerk auf die Baustelle. Da diese Zeit nach praktischen Erfahrungen meist zwischen 60 und 90 Minuten liegt, strebte Transportbetonindustrie eine Verarbeitbarkeitszeit von mindestens 90 Minuten an.

Zur Einschätzung der Verarbeitbarkeitszeit der hier entwickelten Betone wurde deren Rücksteifverhalten untersucht. Hierzu wurden die Betone in mehreren Intervallen erneut mit einem Zwangsmischer durchgemischt und mittels Trichterauslaufzeit-Versuch und Setzfließ-Versuch beurteilt. Anschließend ruhte der Beton jeweils für eine Dauer von 9 Minuten. Die Mischung wurde dann erneut eine Minute lang durchgemischt, anschließend die bereits genannten Prüfungen durchzuführen. Somit stellte sich ein Prüfungsintervall von 10 Minuten ein. Als Untergrenze des Setzfließmaßes, bis zu dem eine ausreichende Verarbeitbarkeit vorliegt, wurde das von Okamura angegebene Mittelmaß von 65 cm gewählt.

Bereits nach einigen Versuchsreihen mit den beschriebenen Mischregime stellte sich heraus, dass im Gegensatz zu den „SFA-Betonen“ die Betone mit BFA als Zusatzstoff bereits nach sehr kurzer Zeit (i.d.R. ca. 15 Minuten) unter dem vorgegebenen Setzfließmaß lagen. Dieser Befund deckt sich nicht mit den Praxiserfahrungen der Transportbetonindustrie. Es ist zu vermuten, dass der Grund in der diskontinuierlichen Durchmischung mit langen Ruhepausen zu suchen ist, die sich von den Bedingungen in einem Fahrmischer deutlich unterscheidet. Aufgrund dessen wurde ein Mischregime entwickelt, um die kontinuierliche Bewegung des Betons in einem Transportbetonfahrzeug beim Transport auf die Baustelle zu simulieren. Hierzu wurde ein Freifallmischer mit einem vorgeschalteten elektronischen Regelgerät verwendet. Mit diesem Gerät konnte die Drehgeschwindigkeit des Freifallmischers derjenigen eines Transportbetonfahrzeuges angepasst werden. Zusätzlich wurde noch das Rücksteifverhalten der „BFA-Betone“ bei diskontinuierlicher Bewegung im Freifallmischer untersucht. Zur besseren Veranschaulichung sind die drei unterschiedlichen Mischprozeduren in Tafel 3.23 zusammengefasst.

Schritt		Zeit	Mischprozedur					
			I (Zwangsmischer)		II (Freifallmischer)		III (Freifallmischer)	
			Drehzahl	Bemerkung	Drehzahl	Bemerkung	Drehzahl	Bemerkung
-		-	*Mischende*					
1. Intervall	1	9 min	*1. Prüfung des Setz-Fließmaßes und der Trichterauslaufzeit*					
	2		-	*Stillstand des Mischgutes*	*6 min^{-1}*	*kontinuierliche Bewegung des Mischgutes*	-	*Stillstand des Mischgutes*
	3	60 s	*65 min^{-1}*	*maximale Mischgeschwindigkeit*	*16 min^{-1}*	*erhöhte Mischgeschwindigkeit*	*65 min^{-1}*	*maximale Mischgeschwindigkeit*
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n-tes Intervall	1	9 min	*n-te Prüfung des Setz-Fließmaßes und der Trichterauslaufzeit*					
	2		-	*Stillstand des Mischgutes*	*6 min^{-1}*	*kontinuierliche Bewegung des Mischgutes*	-	*Stillstand des Mischgutes*
	3	60 s	*65 min^{-1}*	*maximale Mischgeschwindigkeit*	*16 min^{-1}*	*erhöhte Mischgeschwindigkeit*	*65 min^{-1}*	*maximale Mischgeschwindigkeit*

Tafel 3.23: *unterschiedliche Mischprozeduren zur Bestimmung des Rücksteifverhaltens der Betone*

In Abbildung 3.27 sind die Rücksteifverhalten des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 1 bei allen drei Mischvarianten vergleichend dargestellt.

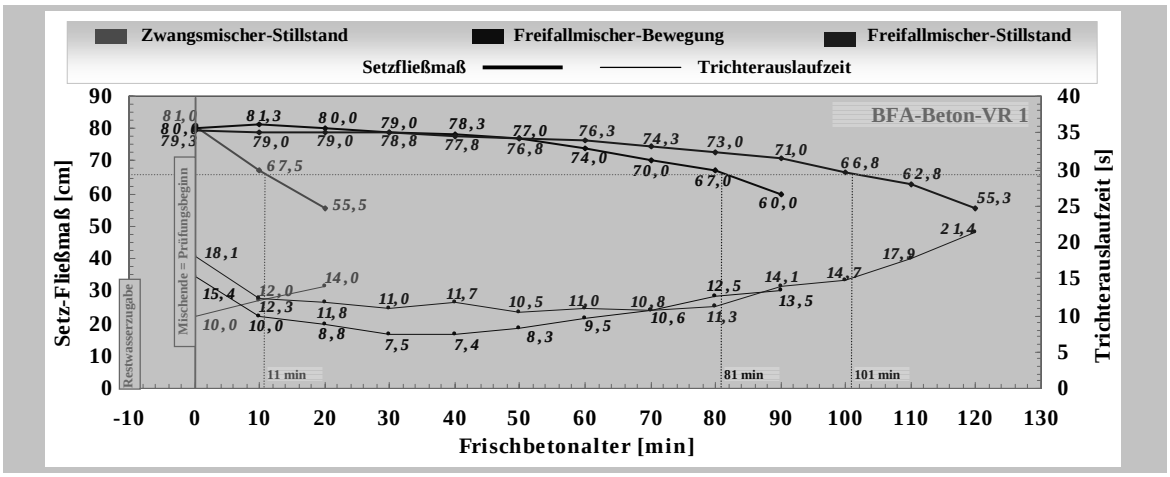


Abb. 3.27: *Rücksteifverhalten des „BFA-Betons der Versuchsreihe 1 bei unterschiedlichen Mischbedingungen*

Wie in oben dargestellter Abbildung ersichtlich, ist der Beton, welcher diskontinuierlich im Zwangsmischer bewegt wurde (rote Kurve), bereits nach ca. 10 Minuten unter die Grenze des Setzfließmaßes zurückgesteift. Betrachtet man die Kurve des Betons, welcher im Freifallmischer kontinuierlich bewegt wurde, so kann man eine deutliche Steigerung der Verarbeitbarkeitszeit auf eine Dauer von ca. 80 Minuten erkennen. Dies kann nochmals - durch eine Prüfung im Freifallmischer bei diskontinuierlicher Bewegung - auf eine Zeit von ca. 100 Minuten gesteigert werden. Diese Abhängigkeit des Rücksteifverhaltens des Frischbetons vom Mischregime und der Art des verwendeten Mischers konnte ebenfalls für alle anderen Betone bestätigt werden (siehe Anlage **/A26…A27/**). Ein Grund für diese Beobachtung könnte sein, dass im Zwangsmischer eine sehr große Oberfläche des Betons der Atmosphäre ausgesetzt ist. Beim Freifallmischer hingegen liegt der Beton in einer kompakten Masse vor. Diese Vermutung wird durch die nochmals höheren Verarbeitbarkeitszeiten beim Versuch im Freifallmischer mit Stillstand während der Pausen gestärkt. Hier ist der Beton während der Pausen weniger der Umgebungsluft ausgesetzt als beim „bewegten“ Beton.

Betrachtet man die Trichterauslaufzeiten der Betone aus dem Freifallmischer, so ist auffällig, dass diese zu Beginn und am Ende der Prüfungen relativ hoch sind. Hier muss man anmerken, dass diese Betone offenbar infolge einer intensiveren Mischwirkung des verwendeten Freifallmischers während der ersten Minuten entmischt waren. Diese negative Eigenschaft trat allerdings bereits nach ca. 15…20 Minuten nicht mehr auf. Am Ende der Prüfung hingegen steifte der Beton wiederum so sehr an, dass er nicht mehr an einem kompakten Strang durch den Auslauftrichter fließen konnte.

3.6.7. FRÜHSCHWINDVERHALTEN

Eine weitere, für den Einsatz in der Praxis sehr relevante Eigenschaft von Beton ist dessen Frühschwindverhalten. Nach Rinder *[R-4]* tritt bei voll konservierter Lagerung der Proben nur autogenes Schwinden auf, während bei austrocknender Lagerung Trocknungsschwinden und autogenes Schwinden additiv ablaufen. Daher ist bei der Bestimmung des Trocknungsschwindens der Anteil des autogenen Schwindens stets im Messergebnis enthalten. Auch der Einfluss aus Karbonatisierungsschwinden lässt sich bei austrocknender Lagerung nicht getrennt vom reinen Trocknungsschwinden erfassen. Jedoch ist bei den sehr dichten SVB nur mit einer geringen oder zumindest zeitlich stark verzögerten Karbonatisierung zu rechnen.

Die Schwindmessungen erfolgten in so genannten Schwindrinnen (siehe Abbildung 3.28), wobei die folgenden drei unterschiedlichen Lagerungsarten zur Anwendung kamen:

- nach oben offene Lagerung ➔ Trockenlagerung
- rundum in Folie eingewickelt ➔ Feuchtlagerung
- oben mit nassen Tüchern abgedeckt und in Folie eingewickelt ➔ Nasslagerung

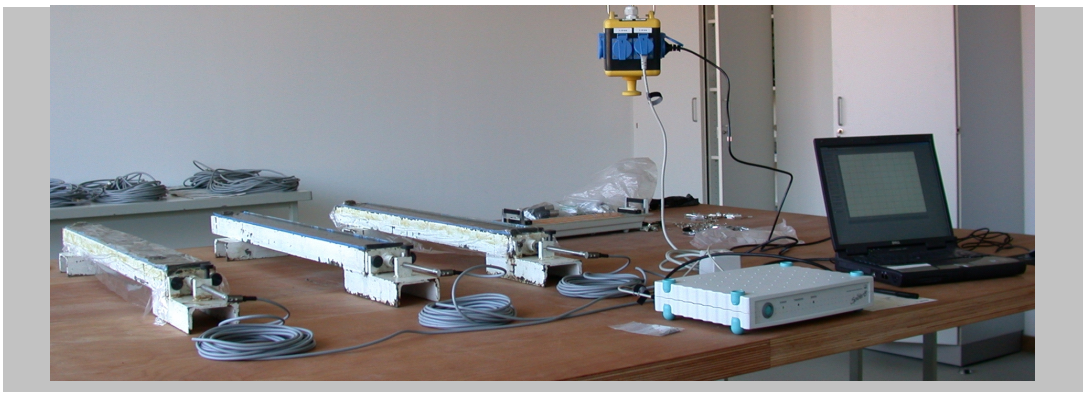


Abb. 3.28: *Versuchsanordnung zur Bestimmung des Frühschwindverhaltens von Frischbeton*

Die untersuchten Probekörper hatten eine Länge von 1000 mm. Zur Reduzierung der auftretenden Reibung wurde die Kontaktfläche zwischen Probe und Schalform mit einer 2-lagigen Kunststofffolie ausgelegt. Die Aufnahme der Bewegung des Betons erfolgte über einen Messbolzen, welcher im Vorfeld eingeölt wurde. Die auftretenden Verformungen wurden mittels eines einseitig an der Probe angebrachten induktiven Wegaufnehmers erfasst, welcher an einen Digitalmessverstärker gekoppelt war. Dieser gab die gemessenen Kennwerte an einen PC weiter, wo die Speicherung und Auswertung erfolgte. Die Kraftübertragung zwischen den Stirnseiten der Schalung und der Probe wurde mittels Verankerungsbolzen realisiert.

In Abbildung 3.29 sind die ermittelten Frühschwindkurven des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 1 bei den 3 unterschiedlichen Lagerungsbedingungen exemplarisch dargestellt.

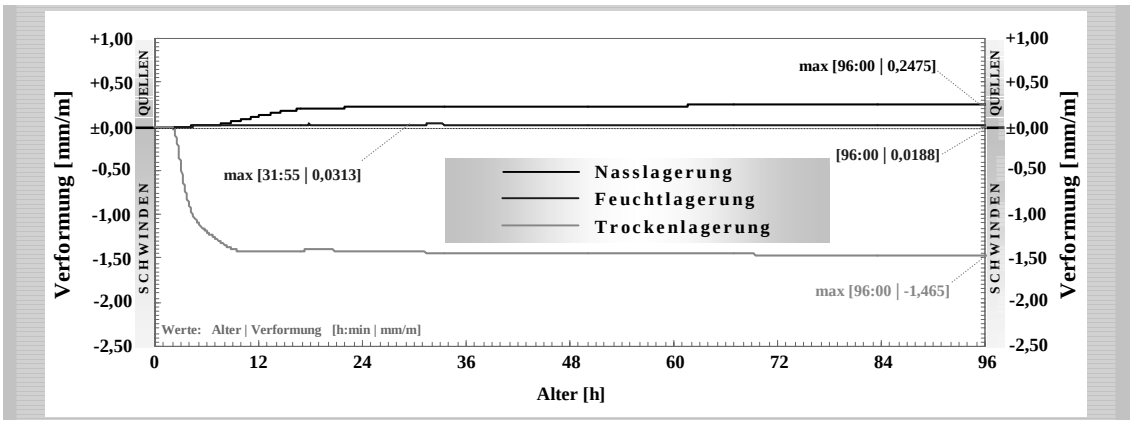


Abb. 3.29: *Frühschwindverhalten des **„SFA-Betons“** der Versuchsreihe 1 bei verschiedenen Lagerungsbedingungen*

Wie in oben dargestellter Abbildung ersichtlich, traten die größten Schwindverformungen bei dem Beton auf, welcher einer *Trockenlagerung* ausgesetzt war. Hier erfolgte ein Anstieg der Verformung in den ersten 11 Stunden auf ca. -1,43 mm/m. Anschließend war nur noch eine geringe Zunahme der Verformung messbar, welche nach 96 Stunden ca. -1,46 mm/m betrug. Bei der *Feuchtlagerung* hingegen trat eine sehr geringe, kaum messbare Quellverformung auf. Diese Verformung lag in einem Bereich von ca. +0,02 mm/m. Die *Nasslagerung* der Betonprobe bewirkte während

der ersten 18 Stunden mit ca. +0,21 mm/m eine wesentlich höhere Quellverformung als die Feuchtlagerung. Während der nächsten 78 Stunden der Messungen dehnte der Beton sich nur noch geringfügig aus. Auffällig war, dass bei allen untersuchten Betonen die Schwindverformungen infolge der Trockenlagerung einige Stunden früher einsetzten als die Quellverformungen der nass gelagerten Betone.

In Abbildung 3.30 sind die Verformungen des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 1 dargestellt. Dieser Beton zeigt ähnliche Verformungen wie bei dem vorher untersuchten Beton mit Steinkohlenflugasche als Zusatzstoff derselben Versuchsreihe. Die Verformungen infolge Feucht- und Nasslagerung sind mit denen des „SFA-Betons“ vergleichbar. Bei der Trockenlagerung trat dagegen mit ca. -1,76 mm/m nach 96 Stunden eine gegenüber den „SFA-Beton“ um rund 17 % erhöhte Schwindverformung auf.

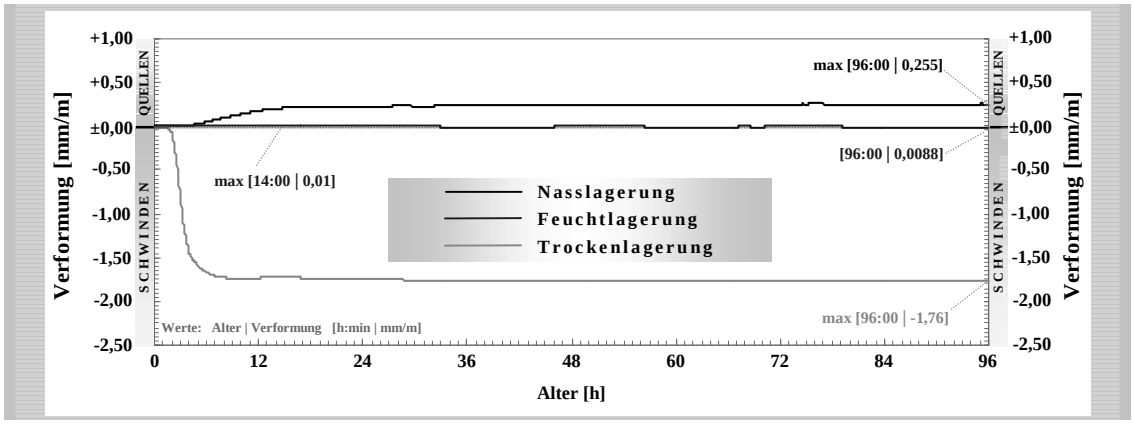


Abb. 3.30: *Frühschwindverhalten des **„BFA-Betons“** der Versuchsreihe 1 bei verschiedenen Lagerungsbedingungen*

Diese oben beschriebenen Beobachtungen konnten in ähnlicher Form bei allen Betonen der verschiedenen Versuchsreihen gemacht werden. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse dieser Prüfung der restlichen Betonrezepturen ist in Anlage **/A28…A31/** zu finden.

Das gemessene Trocknungsschwinden (austrocknende Lagerung) war bei allen hergestellten selbstverdichtenden Betonen im Vergleich zu Normalbeton bzw. zu den in der Literatur genannten Ergebnissen zum Frühschwindverhalten von mehreren SVB nach Gram *[D-1]* wesentlich höher. Ein relevanter Grund für diese Erhöhten Schwindverformungen sind in den sich differierenden Prüfvorrichtungen zu suchen. Eine weitere wesentliche Rolle bei der Messung spielt der Beginn der Aufzeichnung der Verformungen. Aus den ermittelten Ergebnissen wird außerdem ersichtlich, dass bei einer Nachbehandlung durch Abdecken mit Folie (Feuchtlagerung) nur geringe Schwind- bzw. Quellverformungen auftreten. Zur Beantwortung der Frage, welche Verformungen auftreten, wenn man die Feuchtlagerung des Betons nach gewisser Zeit beendet, wurden bei den „BFA-Betonen“ der Versuchsreihe 3 die aufgebrachten Folien nach 96 Stunden Prüfzeit entfernt und die Messung über weitere 96 Stunden fortgeführt. Die dabei ermittelten Verformungen sind in Abbildung 3.31 dargestellt.

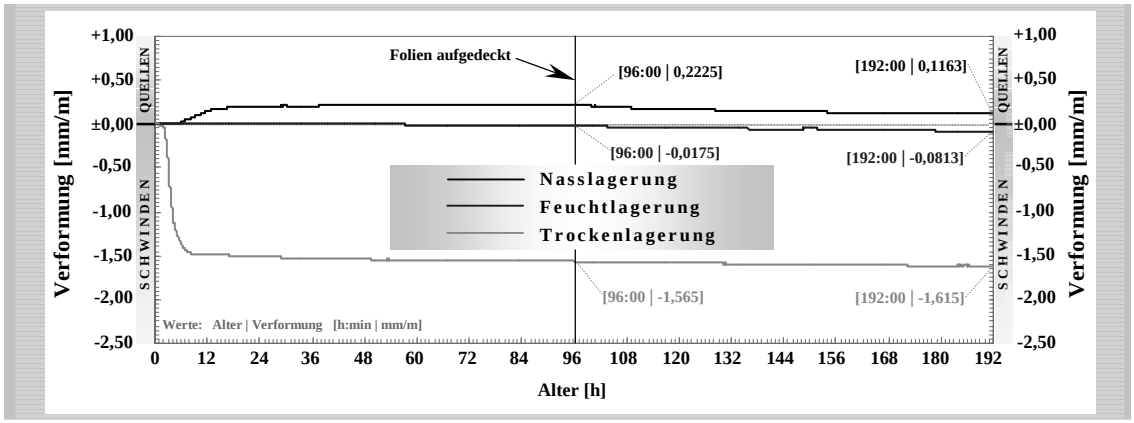


Abb. 3.31: *Frühschwindverhalten des* ***„BFA-Betons“*** *der Versuchsreihe 3 bei aufgedeckten Folien (nach 96 h)*

Im oben abgebildeten Diagramm ist gut zu erkennen, dass die Kurven der beiden feucht und nass gelagerten Betonproben nach dem Aufdecken der Folien näherungsweise parallel dem Schwindverhalten des bereits weitgehend ausgetrockneten Betons verlaufen. Dementsprechend fällt die Schwindverformung infolge einer späteren Austrocknung (nach 96 h) sehr gering aus. Der Zeitraum von 4 Tagen für eine der Praxis entsprechende Nachbehandlung (Abdeckung der Betonoberfläche mit Planen) stellt allerdings nicht den worst case dar, da der Baufortschritt oft nur sehr kurze Übergangszeiten zulässt. Demzufolge sollte durch einen zusätzlichen Test nachgeprüft werden, wie sich der Beton nach einem früheren Aufdecken der Folie (z.B. 24h) entsprechend einer zu kurzen Nachbehandlungsdauer verhält. Derartige Versuche waren innerhalb des zeitlichen Rahmens des Forschungsprojektes nicht möglich.

3.7. AUSWERTUNG DER FESTBETONUNTERSUCHUNGEN

3.7.1. DRUCKFESTIGKEIT / ROHDICHTE

Die Ermittlung der Betondruckfestigkeit erfolgte nach DIN EN 12390-3 an Würfeln mit 15 cm Kantenlänge. Dabei lagerten die Probewürfel nach dem Ausschalen vom 2. bis zum 91. Tag unter Wasser. Angestrebt war ein Beton der Druckfestigkeitsklasse C25/30. Die Bestimmung der maximal aufnehmbaren Lasten auf die Probekörper erfolgte mittels einer Druckprüfmaschine der Firma Toni Technik (siehe Abbildung 3.32) nach DIN EN 12390-4. Die Wertebereiche der Druckfestigkeitsentwicklung der untersuchten Betone aller Versuchsreihen sowohl mit SFA als auch mit BFA als Zusatzstoff sind in Abbildung 3.33 vergleichend dargestellt.

Abb. 3.32: *Druckprüfmaschine nach DIN EN 12390-4*

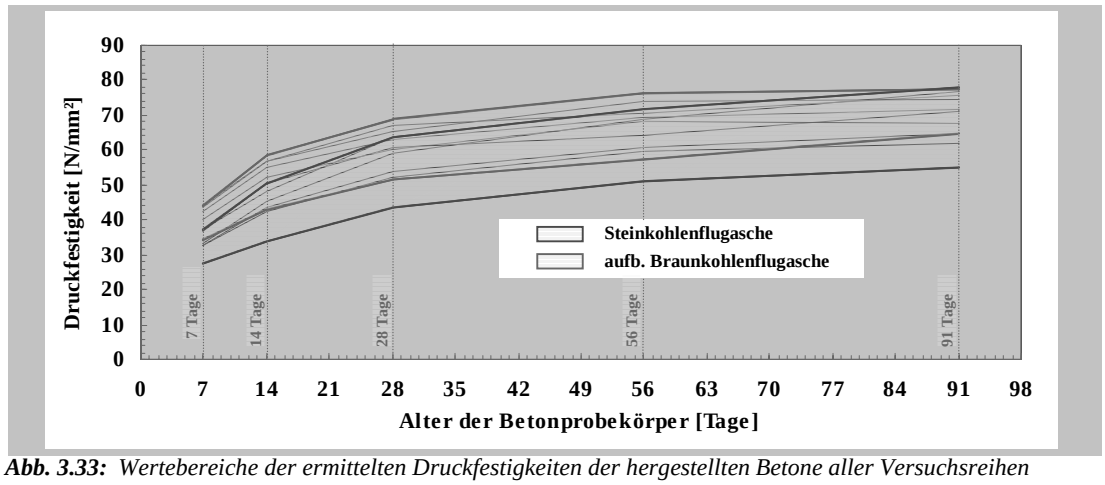


Abb. 3.33: *Wertebereiche der ermittelten Druckfestigkeiten der hergestellten Betone aller Versuchsreihen*

Vergleicht man die oben dargestellten Wertebereich der ermittelten Druckfestigkeiten der Betone mit denen der Mörtelprismen (siehe Kapitel 3.5.5), so kann man feststellen, dass die Betone eine größere Streuung aufweisen. Der Grund für diese große Streuung ist bei den Betonen der Versuchsreihe 4 zu suchen. Hier liegen die ermittelten Druckfestigkeiten sowohl bei den „BFA-Betonen“ als auch bei den „SFA-Betonen“ deutlich unter denen der restlichen Versuchsreihen. Es ist ebenfalls deutlich zu erkennen, dass die Festigkeitsentwicklungen der Betone mit SFA und BFA als Zusatzstoff nicht parallel verlaufen. Vielmehr besitzen die „BFA-Betone“ eine höhere Frühfestigkeit (7 und 14 Tage). Im Laufe des späteren Prüfungszeitraumes nähern sich diese allerdings denen der „SFA-Betone“ an und nach 91 Tagen kann man von nahezu identischen Festigkeitsbereichen aller Betone ausgehen. Die Eingruppierung in eine Druckfestigkeitsklasse erfolgte über die in DIN EN

206-1 angegebenen Konformitätskriterien für die Druckfestigkeit. Gefordert war ein Beton der Festigkeitsklasse C25/30. Zur besseren Übersicht sind die ermittelten 28-Tage-Druckfestigkeiten aller Betone und die dazugehörigen Festigkeitsklassen in Tafel 3.23 zusammengefasst.

Prüfverfahren		Einheit	SFA.FSK III						BFA.FSK IV					
			VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6	VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6
Würfel	28-Tage-Druckfestigkeit	[N/mm²]	*58,8*	*63,7*	*60,7*	*43,3*	*52,5*	*53,6*	*68,6*	*65,3*	*63,3*	*51,8*	*66,8*	*60,2*
	Festigkeitsklasse	[N/mm²]	**C40/50**	**C45/55**	**C45/55**	**C30/37**	**C35/45**	**C35/45**	**C50/60**	**C50/60**	**C45/55**	**C35/45**	**C50/60**	**C45/55**
Zylinder	28-Tage-Druckfestigkeit	[N/mm²]	*48,4*	*51,8*	*42,0*	*33,7*	*41,8*	*40,8*	*53,1*	*49,6*	*46,3*	*43,0*	*46,9*	*46,6*
	Festigkeitsklasse	[N/mm²]	**C40/50**	**C45/55**	**C35/45**	**C25/30**	**C35/45**	**C35/45**	**C45/55**	**C45/55**	**C40/50**	**C35/45**	**C40/50**	**C40/50**

Tafel 3.24: *28-Tage-Druckfestigkeiten der Würfel/Zylinder aller Betone und dazugehörige Festigkeitsklassen*

Da die Bestimmung der E-Moduli der Betone anhand von Betonzylindern erfolgte (siehe nachfolgendes Kapitel), wurde anschließend die Druckfestigkeit dieser Zylinder in einem Alter von 28 Tagen ermittelt. Die Festigkeitswerte der Zylinder sind allerdings wegen der Vorbelastung durch die E-Modul-Messung mit Vorbehalt zu betrachten. Es ist auffällig, dass die Zylinderfestigkeiten wesentlich geringer sind als die Würfelfestigkeiten ($f_{ck,cyl} \approx 0{,}7 \ldots 0{,}83 \times f_{ck,cube}$) und somit für die Zuordnung zu den Festigkeitsklassen relevant waren. Die erreichten Festigkeitsklassen lagen deutlich über dem Zielwert, was durch den hohen Feinststoffanteils (dichte Packung) der Betone begründet werden kann. Eine Senkung der Festigkeiten wäre durch eine Minimierung des Zementgehaltes von 295 kg/m³ auf den Mindestzementgehalt von 240 kg/m³ zu erreichen. Die Einzelwerte der Prüfungen und die durch Wägung bestimmten Festbetonrohdichten sind der Anlage **/A32…A37/** zu entnehmen.

3.7.2. E - MODUL

Der E-Modul ist das Maß für die elastische Verformung eines Werkstoffes. Er gibt das Verhältnis der Spannung zur zugehörigen elastischen Dehnung an, die nach der Belastung wieder in ihre Ausgangslage zurückgeht. Er wird zur Verformungsberechnung, zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungslinie und als Basis der relativen Verformungen durch das Kriechen herangezogen. Die Bestimmung der E-Moduln erfolgte nach DIN 1048-5 durch direkte Messung an Betonzylindern mittels der bereits erwähnten Druckprüfmaschine. Die Messung der auftretenden Verformungen während der Belastung erfolgte mittels zweier Feindehnungsaufnehmer, welche zur Dokumentation mit einem PC-gestützen Meßsystem verbunden waren (siehe

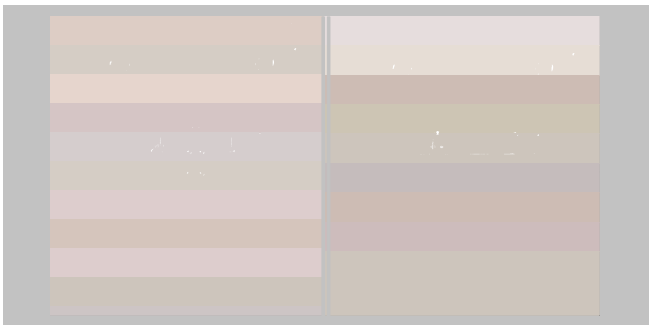


Abb. 3.34: *Vorder- und Seitenansicht des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der E-Moduln an Betonzylindern*

Abbildung 3.34). Der E-Modul ist hierbei als Sekantenmodul bei der 3. Belastung nach vorangegangener 2-maliger Be- und Entlastung zwischen den Spannungen σ_{min}~0,5 N/mm² und σ_{max}~1/3·f_{ck} definiert. Einen idealen Stauchungsverlauf zeigte der „BFA-Beton“ der Versuchsreihe 3 (siehe Abbildung 3.35). Es ist sehr gut zu erkennen, dass sich beide Stauchungsverläufe nahezu deckungsgleich abbilden.

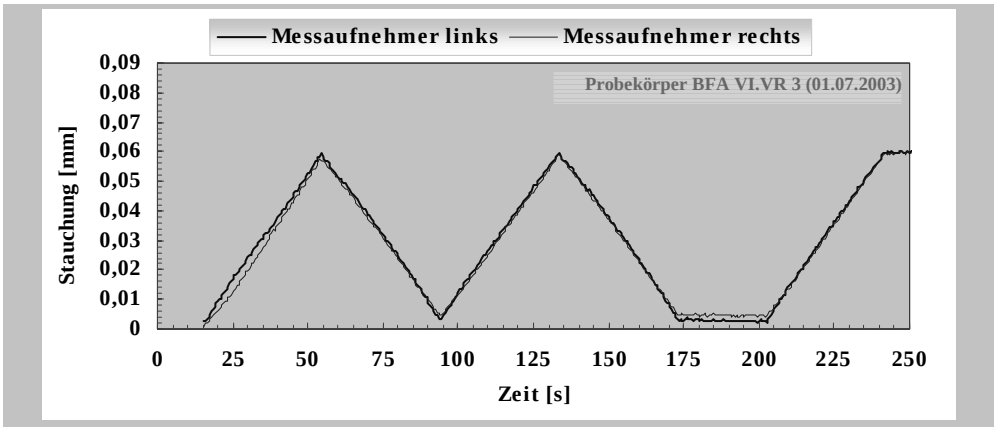


Abb. 3.35: *Bestimmung des E-Moduls nach DIN 1048-5 für den „BFA-Beton“ der Versuchsreihe 3*

In Tafel 3.24 sind die gemessenen einzelnen und die daraus gemittelten Werte für die E-Moduln der Betone aller Versuchsreihen zusammengetragen.

Prüfverfahren		Einheit	SFA.FSK III						BFA.FSK IV					
			VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6	VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6
E-Modul	**gemittelt**	[N/mm²]	*32800*	*35200*	*33100*	*29000*	*29500*	*33200*	*33800*	*37700*	*35000*	*33200*	*38800*	*33500*

Tafel 3.25: *ermittelte E-Moduli der hergestellten Betone aller Versuchsreihen*

Vergleicht man die ermittelten Werte kritisch miteinander, so muss man feststellen, dass relativ hohe Schwankungen auftreten. Diese lassen sich zum einem auf Inhomogenitäten im Betongefüge zurückführen, welche sich auf die gemessenen Stauchungen auswirken. Zum anderem muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass zwar je Beton 3 Probekörper geprüft wurden, aber aufgrund eines Fehlers in der Messtechnik einige Einzelwerte bei der Berechnung der mittleren E-Moduli nicht einbezogen werden konnten (siehe Anlage **/A38…A41/**). Man kann allerdings bei allen Versuchsreihen einen höheren E-Modul der „BFA-Betone“ gegenüber den Betonen mit SFA als Zusatzstoff erkennen.

3.7.3. GESAMTSCHWINDVERHALTEN

Alle entwickelten Mörtel der 6 Versuchsreihen wurden neben den Festigkeitsuntersuchungen auch hinsichtlich ihres Schwindverhaltens untersucht. Zusätzlich wurde diese Prüfung auch an den Mörtel mit unaufbereiteter BFA als Zusatzstoff durchgeführt. Die Schwindmessungen erfolgten nach DIN 52450 an Prismenformen mit den Maßen (40x40x160) mm. Dazu wurden die Mörtel erneut

angemischt und in die hierfür vorgesehenen Formen gebracht. Jeweils mittig an den Stirnseiten dieser Formen wurden Messzapfen (Ø 6 mm; l = 12 mm) mit eingemörtelt (siehe Abbildung 3.36). Nach dem Ausschalen der Probekörper in einem Alter von 24 Stunden erfolgte eine Ausgangsmessung der jeweiligen Prismenlänge. Das dabei verwendete Messgerät (siehe Abbildung 3.37) bestand aus einer Grundplatte mit drei Füßen, auf der zwei Lagerblöcke mit je zwei kugelgelagerten Rollen befestigt waren. Während der eine Lagerblock eine Feststellvorrichtung enthielt, in der eine Messuhr in der Messachse festgehalten werden konnte, besaß der andere Lagerblock eine eingeschraubte ebene Messfläche als Festanschlag. Zur genauen Einstellung des Messgerätes wurde vor jeder Messung ein Vergleichskörper eingelegt, welcher an den Enden ebenfalls mit Messzapfen ausgebildet war. Die Messung der jeweiligen Längenänderungen der Probekörper erfolgte alle 7 Tage über einen Untersuchungszeitraum von 91 Tagen, wobei wiederum analog der Bestimmung des Frühschwindverhaltens folgende 3 Lagerungsarten zur Anwendung kamen:

Abb. 3.36: *einbetonierte Messzapfen in aufgebrochenen Proben - trocken (l), feucht (m) und nass (r)*

- Trockenlagerung (offen im Labor)
- Feuchtlagerung (bei ca. 95 % relativer Luftfeuchte)
- Nasslagerung (im Wasserbad bei 20 ± 2 °C

Durch Ermittlung der Längenänderungen gegenüber den Ausgangswerten (erste Messung nach 24 Stunden) konnten die Verformungen der einzelnen Mörtelprismen bestimmt werden. Dabei wurden nach DIN 52450 pro Lagerungsart und Mörtel die Durchschnittswerte von jeweils drei geprüften Prismen ermittelt.

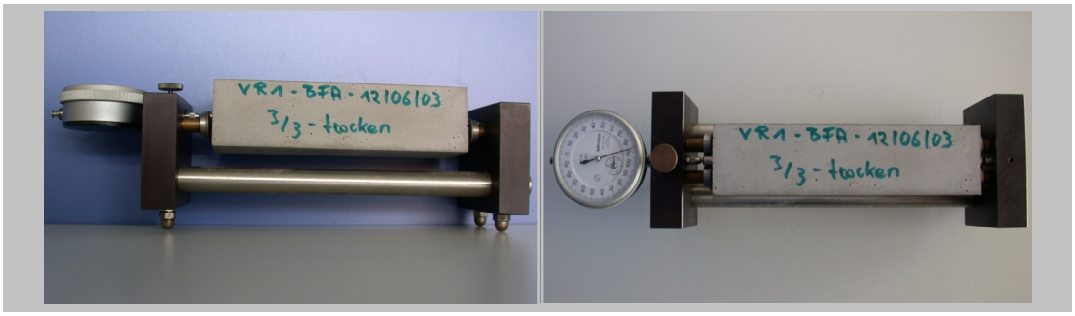


Abb. 3.37: *Messapparatur zur Bestimmung der Längenänderungen von Mörtelprismen*

In Abbildung 3.38 ist exemplarisch das Gesamtschwindverhalten der BFA- und SFA-Mörtel der Versuchsreihe 4 - für alle drei bereits genannten Lagerungsarten - vergleichend dargestellt. Zusätzlich wurde das Schwindverhalten des Mörtels mit der unaufbereiteten BFA als Zusatzstoff in das Diagramm aufgenommen. Da bei der Mischungsrezeptur dieses Mörtels ebenfalls das Fließmittel

der VR 4 zum Einsatz kam, beeinflussen nur die verschiedenen Aschen das Verhalten der Mörtel. Die Messwerte und graphischen Darstellungen aller untersuchten Mörtel sind in der Anlage **/A44…A55/** zusammengefasst.

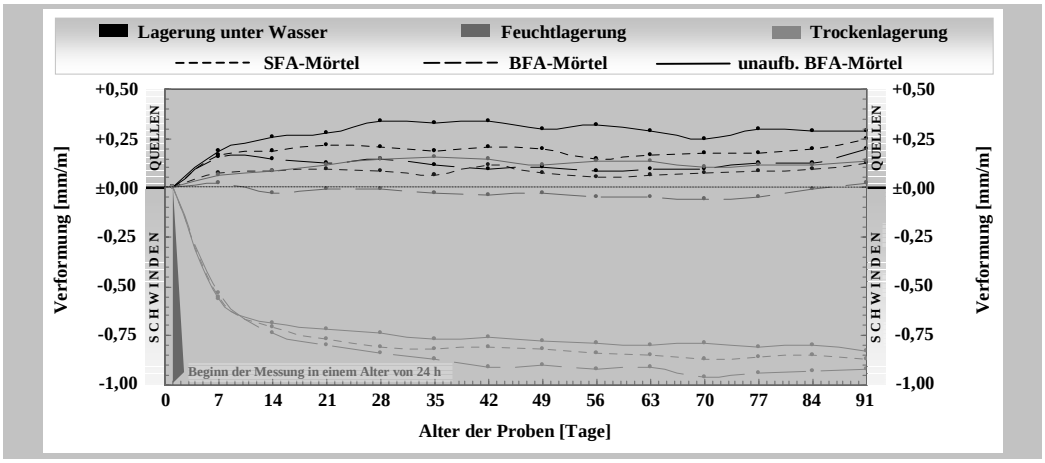


Abb. 3.38: *Gesamtschwinden der BFA- und SFA-Mörtel der VR 4 und des Mörtels mit unaufb. BFA*

Alle untersuchten Mörtel zeigten tendenziell ähnliche Ergebnisse. Analog dem Frühschwindverhalten der Betone rief eine Austrocknung der Mörtel ein erhebliches Schwinden hervor. Da die Messungen erst nach 24 Stunden begannen, lagen die Schwindwerte allerdings um ca. 50% niedriger als die der Betone. Weiterhin zeigten diejenigen Mörtel, welche unter Wasser lagerten, ebenfalls ein Quellen in der Größenordnung der Verformungen der jungen Betone. In der Regel waren bei allen Mörteln die Quellverformungen bereits nach 7 Tagen abgeschlossen und nahmen im weiteren Verlauf der Untersuchungen nicht mehr wesentlich zu. Auch bei der Feuchtlagerung konnten sich zwischen den einzelnen Mörteln keine maßgeblichen Unterschiede herauskristallisieren. Nur die „BFA-Mörtel“ der Versuchsreihen 4…6 zeigten zeitweise bei einer Feuchtlagerung geringfügige Schwindverformungen. Die gemessenen Quellverformungen der restlichen „BFA-Mörtel“ waren im Vergleich zur Lagerung unter Wasser deutlich geringer.

Betrachtet man den Einfluss der verschiedenen Zusatzstoffe auf das Verformungsverhalten der Mörtel, so lässt sich feststellen, dass die „BFA-Mörtel“ bei der Trockenlagerung höhere Schwindmasse als die „SFA-Mörtel“ aufweisen. Der Mörtel mit der unaufbereiteten BFA hingegen neigt am geringsten zum Schwinden. Betrachtet man die Kurven für die Trockenlagerungen genauer, so ist ein identisches Schwinden der drei unterschiedlichen Mörtel bis zu einem Alter von ca. 7 Tagen auffällig. Erst danach sind die Differenzen im Schwindverhalten feststellbar.

Bei der Feuchtlagerung und der Lagerung unter Wasser sind die Verformungsverhalten der unterschiedlichen Mörtel genau entgegengesetzt dem Schwindverhalten bei der Trockenlagerung. Hier bewirkt die unaufbereitete BFA die größten Quellmaße und die aufbereitete BFA die geringsten.

3.7.4. BEURTEILUNG DER BETONOBERFLÄCHEN UND DER SEDIMENTATION

Ein sehr wichtiger Aspekt für einen späteren Einsatz der entwickelten Betone ist ihre Oberflächenqualität. Um den üblicherweise geforderten Sichtbetoneigenschaften zu entsprechen, sollten diese möglichst glatt und frei von Fehlstellen sein. Zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit der hergestellten Betone wurden die Schalflächen der angefertigten Zylinder per Augenschein bewertet und miteinander verglichen.

Ebenso muss der Entmischungsneigung der selbstverdichtenden Betone besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Neben der optischen Begutachtung am Frischbeton wurde nachträglich auch am Festbeton eine eventuelle Entmischung überprüft. Hierzu wurden die hergestellten Zylinder in Längsrichtung aufgeschnitten. In Abbildung 3.39 sind die Schal- und Schnittflächen der Probekörper aus Versuchsreihe 4 vergleichend dargestellt. Die Abbildungen der Zylinder der anderen Versuchsreihen sind der Anlage **/A56…A58/** zu entnehmen.

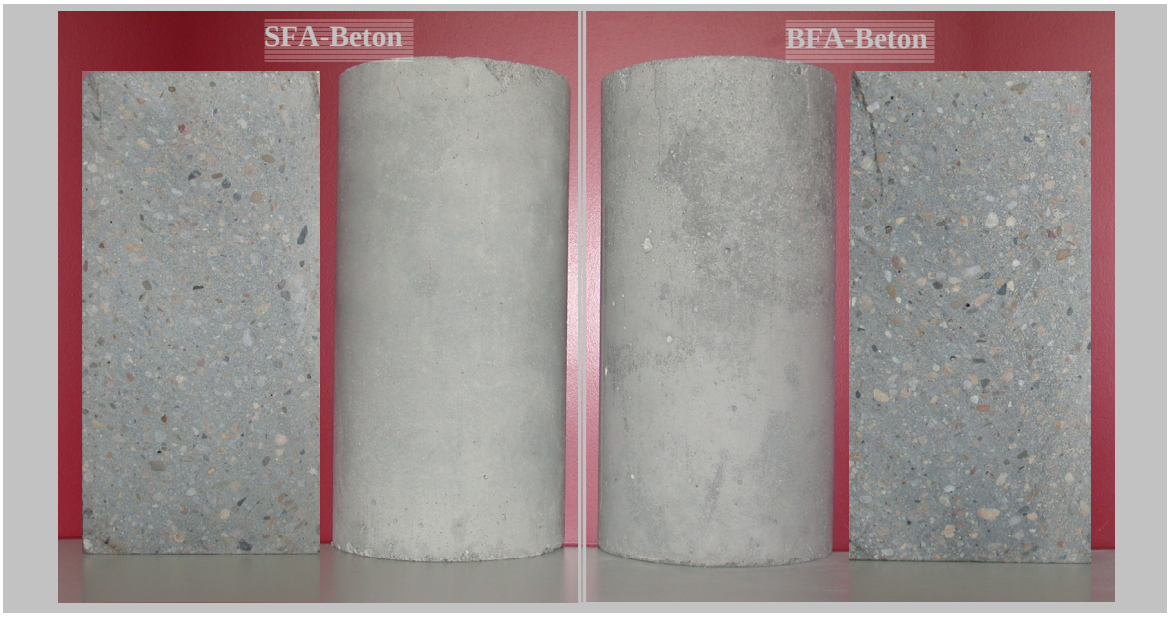


Abb. 3.39: *Schal- und Schnittflächen der Betone der Versuchsreihe 4 mit SFA (links) und BFA (rechts)*

Sowohl die Betone mit Steinkohlenflugasche als auch die Betone mit Braunkohlenflugasche besaßen nach dem Ausschalen eine feine, glatte Oberfläche mit nur vereinzelten Luftporen. Beide SVB hatten nach dem Trockenen eine graue Farbgebung, wobei die Probekörper mit BFA jedoch um eine geringe Abstufung dunkler waren als die der „SFA-Betone“. Unabhängig von der Rohdichte zeigte sich für alle Betone eine homogene Verteilung der Zuschläge sowohl in Längsrichtung als auch in Querrichtung. Eine Sedimentation der groben Gesteinskörnungen kann dementsprechend ausgeschlossen werden.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dem vorliegenden Forschungsprojekt wurde untersucht, ob sich eine aufbereitete Braunkohlenflugasche als Zusatzstoff für die Herstellung eines selbstverdichtenden Betons eignet. Als BFA kam eine bauaufsichtlich zugelassene Asche aus dem Kraftwerk Jänschwalde im aufbereiteten Zustand zum Einsatz. Als Referenzbeton diente ein SVB, welcher eine in der Industrie bewährte Steinkohlenflugasche als Zusatzstoff enthielt. Die Entwicklung der Betonrezepturen erfolgte nach einem bekannten Entwurfskonzept aus Japan, welches sich in aufeinander aufbauende Bindemittel-, Mörtel- und Betonversuche gliedert. Um eine hinreichende Aussage über die Wirkung der so genannten Fließmittel der 3. Generation (PCE`s) zu erhalten, wurden 6 Hochleistungsverflüssiger verschiedener Anbieter eingesetzt. Dementsprechend erfolgte eine Einteilung in 6 Versuchsreihen (VR1…VR6), wobei pro Versuchsreihe ein SVB mit BFA und einer mit SFA als Zusatzstoff untersucht wurde. An diesen 12 unterschiedlichen Mischungsrezepturen wurden die verschiedensten Bindemittel,- Frischbeton- und Festbetonuntersuchungen durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die granulometrischen Untersuchungen der eingesetzten Flugaschen ergaben, dass durch eine zusätzliche Mahlung die spezifische Oberfläche (innere und äußere) erheblich vergrößert werden konnte. Es konnte festgestellt werden, dass sich die Kornverteilung der BFA durch die Aufbereitung sichtbar in den feinen Kornbereich < 10 µm verschiebt und der Verteilung der SFA annähert. Die mikroskopischen Untersuchungen mittels ESEM zeigten, dass während des Mahlprozesses nur die groben Partikel aufgebrochen wurden und die runden Partikel der BFA, welche für die Verarbeitung des Frischbetons immens wichtig sind, nicht zerstört wurden.

- Der Entwurf der Rezepturen der SVB beruhte auf dem Vorgehen nach Okamura. Die von Okamura geforderten Kennwerte der Mörtel- und Frischbetonuntersuchungen konnten bei allen Selbstverdichtenden Betonen im vollen Umfang eingehalten werden. Die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen der Betone mit aufbereiteter BFA und SFA als Zusatzstoff sind als nahezu gleichwertig zu beurteilen.

- Die Untersuchungen der Luftporengehalte zeigten, dass die ermittelten Werte der Betone wesentlich über den in Deutschland angestrebten Luftgehalten für SVB lagen. Die ermittelten Werte sollten jedoch nur als Richtwerte interpretiert werden, da die unter Baustellenbedingungen mögliche Entlüftungszeit und der längere Fließweg des Betons einen wesentlichen Einfluss auf den realen Luftgehalt haben.

- Bei den Untersuchungen des Rücksteifverhaltens wurde deutlich, dass die „BFA-Betone“, im Gegensatz zu den Betonen mit SFA, bezüglich der Verarbeitbarkeitszeit problematisch sind. Es konnte festgestellt werden, dass das Rücksteifverhalten der Frischbetone sehr stark von der Art des eingesetzten Mischertyps (Freifall- o. Zwangsmischer) und vom „Zustand“ während

der Lagerung bis zur Weiterverarbeitung der Betone (Stillstand o. Bewegung) abhängig ist. Durch Auswahl eines geeigneten Mischregimes konnten letztendlich bei den „BFA-Betonen“ Verarbeitbarkeitszeiten jenseits von 90 Minuten erreicht werden.

- Die bei den hergestellten SVB angestrebte Zielfestigkeit von C25/30 wurde von allen Betonen weit überschritten. Dabei konnte beobachtet werden, dass die „BFA-Betone“ höhere Frühfestigkeiten als die „SFA-Betone“ erreichten. Im weiteren Festigkeitsverlauf nähern sich allerdings die Werte der beiden Beton-Typen bis zu einem Alter von 91 Tagen wieder an. Die hohen Druckfestigkeiten (C35/45…C45/55) können allerdings nicht immer als positiv betrachtet werden, denn die Ergebnisse lassen grundsätzlich auf eine Erhöhung der Schwindneigung und eine daraus resultierende Mikrorissbildung schließen; bei den durchgeführten Schwindmessungen wurden tatsächlich hohe Werte ermittelt.

- Bei den Untersuchungen des Frühschwindverhaltens konnten sich zwischen den SVB mit SFA und BFA keine wesentlichen Unterschiede herauskristallisieren. Das autogene Schwinden war bei allen Betonen vernachlässigbar gering. Das gemessene Trocknungsschwinden zeigte, dass das Schwindverhalten ohne ausreichende Nachbehandlung erheblich ist. Dabei neigten die „BFA-Betone“ zu einem ausgeprägterem Schwinden als die „SFA-Betone“. Die Beendigung der Nachbehandlung (Aufdecken der Folien) bewirkte keine erhebliche Zunahme der Schwindverformungen der SVB.

- Die Betonoberflächen der entwickelten SVB können als gut charakterisiert werden. Die Oberflächen waren glatt und nahezu frei von Fehlstellen. Folglich ist auch ein Einsatz für Sichtbetonflächen, sowohl für die Betone mit SFA als auch für die Betone mit BFA als Zusatzstoff, durchaus denkbar.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die hier entwickelten Betone mit aufbereiteter Braunkohlenflugasche für den Einsatz in der Praxis geeignet sind. Allerdings müssen zur Minimierung des Rücksteifens einige „Regeln“ im Bezug auf die Wahl des Mischers und die Art des Transportes an den Einbauort beachtet werden. Im Rahmen weiterer Untersuchungen sollte versucht werden - z. B. durch den Einsatz von Stabilisierern - diesen Nachteil gegenüber den Betonen mit Steinkohlenflugasche zu kompensieren.

PROJEKTLEITER:

.....
(Prof. Dipl.-Phys. Klaus Landwehrs)

SACHBEARBEITER:

.....
(Dipl.-Ing. Sandro Weisheit)

.....
(Dipl.-Ing. Ulf Müller)

III. LITERATURVERZEICHNIS

A

[A-1] Aitcin, P.-C.: „Beton von Morgen“. ***Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), 11/01***

[A-2] Alfes, C.: „Beton-Entwicklungen und Tendenzen“. ***Beton 01/00***

[A-3] Alonso, M.T.; „Hochfester Beton Teil I + II“; ***Beton, 11/2002***

B

[B-1] Bartsch, M.; Sickert, S.: „Zur Bildung und Bedeutung des Ettringits bei der BFA-Hydratation“. ***14. Internationale Baustofftagung Weimar 2000, Band 2, S. 2-0631 bis 2-0640.***

[B-2] Beitzel, H.: „Einfluss der Mischverfahren auf die Herstellung von Selbstverdichtendem Beton.“; Kongressunterlagen der 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Kolloquium 1 „Selbstverdichtender Beton in der Praxis“. ***Februar 2001, BFT 1/2001***

[B-3] Bennenk, H.W.: „Selbstverdichtender Beton-Entwicklungen und Chancen am Beispiel der Niederlande“. ***Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), 01/00***

[B-4] Bennenk, W.: „Selbstverständlich - selbstverdichtender Beton in der täglichen Praxis“. ***Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), 06/02***

[B-5] Berger-Böcker, T.; Blobner, A.: „Selbstverdichtender Transportbeton: Anwendung mit Zustimmung im Einzelfall“. ***Beton 09/01***

[B-6] Böing, R; Hiller, G.: „Wirtschaftlichkeit und Markterwartung - selbstverdichtender Beton (SVB)“; Kongressunterlagen der 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Kolloquium 1 „Selbstverdichtender Beton in der Praxis“. ***Februar 2001, BFT 1/2001***

[B-7] Bonekamp, B.: „Rede auf dem Braunkohlentag“ ***am 8. Mai 2003 in Potsdam***

[B-8] Bonneau, O.; Poulin, C.; Dugat, J.; Richard, P.; Aitcin, P.-C.: “Reactive Powder Concretes – From Theory to Practice.”, ***Concrete International, s: 47…49, April 1996***

[B-9] Börner, U.; Schubert, G.: „Möglichkeiten der Aufbereitung von Braunkohlenflugasche und die entstehenden Produktqualitäten“. In: Handbuch der Verwendung von Braun-kohlenfilteraschen in Deutschland, ***Herausgeber: RWE AG Essen, Zentralbereich F&E, 1995, S. 203 bis 231.***

[B-10] Brameshuber, W.; Krüger, T.; Uebachs, S.: „Selbstverdichtender Beton im Transportbetonwerk“. ***Beton 10/01***

[B-11] Brameshuber, W.; Uebachs, S.: „Sedimentationsstabilität von selbstverdichtenden Betonen“. ***Beton 01/03***

[B-12] Brameshuber, W.; Uebachs, S.: „Praxiserfahrungen beim Einsatz eines Selbstverdichtenden Betons im Fertigteilwerk-Untersuchungen zum Mischungsentwurf“; Kongressunterlagen der 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Kolloquium 1 „Selbstverdichtender Beton in der Praxis“. ***Februar 2001, BFT 1/2001***

[B-13] Brameshuber W., Uerbachs, S.: „Selbstverdichtender Beton-Anwendungen in Deutschland“ ; ***Beton- und Stahlbetonbau, 06/02***

[B-14] Brantz, H.: „Hochleistungsbeton, Erfahrungen und Ausblick“ ; Kongressunterlagen der 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Kolloquium 1 „Selbstverdichtender Beton in der Praxis“. ***Februar 2001, BFT 1/2001***

[B-15] Breitenbücher, R.: „Selbstverdichtender Beton“. ***Beton 09/01***

[B-16] Breitenbücher, R.: „Erste Erfahrungen mit Selbstverdichtenden Beton in der Praxis“ ; Kongressunterlagen der 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Kolloquium 1 „Selbstverdichtender Beton in der Praxis“. ***Februar 2001, BFT 1/2001***

[B-17] Buchenau, G.; Hillemeier, B.: „Gesteinsmehle für Selbstverdichtenden Berton“. ***Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), 11/01***

[B-18] BVK: „Betontechnologische Empfehlungen“, Herausgegeben vom Bundesverband Kraftwerksnebenprodukte e.V., ***Neuausgabe 2002***

D

[D-1] DafStB; „Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB)“ (Heft 516); ***Beuth-Verlag, Berlin 2001)***

[D-2] DafStb: „Richtlinie Selbstverdichtender Beton“, ***Ausgabe Juni 2001 (6. Entwurf***

[D-3] Dehn, F.; Schubert, L.; Hertel, C.; Lietzmann, M.: „Verstärkung und Ummantelung von Stahlstützen mit SCC“. ***Beton 04/02***

[D-4] Dehn, F.; Weise, F.: „Praktische Anwendungen von Selbstverdichtenden Beton (SVB)“; Kongressunterlagen der 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Kolloquium 1 „Selbstverdichtender Beton in der Praxis“. ***Februar 2001, BFT 1/2001***

[D-5] DIBT: „Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung nach DIN 1045 für Jäwament E, Zulassungsnummer: Z-3.39-1370.“, ***Berlin 1998***

[D-6] Dietz, J.; Ma, J.: „Herstellung von Selbstverdichtenden Beton mit Braunkohlenflugaschen“ ; Kongressunterlagen der 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Kolloquium 1 „Selbstverdichtender Beton in der Praxis“. ***Februar 2001, BFT 1/2001***

E

[E-1] Edvardsen, C.: „Selbstverdichtender Beton-Anwendung in Dänemark“ ; Kongressunterlagen der 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Kolloquium 1 „Selbstverdichtender Beton in der Praxis“. ***Februar 2001, BFT 1/2001***

F

[F-1] Feuerborn, H.-J.; Ludwig, U.; Urbonas, L.: „Verwertung von ost- und mitteldeutschen Braunkohlenflugaschen (BFA) in Bindemitteln“. ***14. Internationale Baustofftagung Weimar 2000, Band 2, S. 2-0631 bis 2-0640.***

[F-2] Friebert, M.; Häselbarth, G.: „Rheologische Eigenschaften von Selbstverdichtenden Beton“. ***14. Internationale Baustofftagung Weimar 1997, Band 2, S. 2-1023 bis 2-1031.***

[F-3] Friedle, R.: „Anwendungsbeispiele selbstverdichtender Beton und Schalungsdruck“ ; Kongressunterlagen der 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Kolloquium 1 „Selbstverdichtender Beton in der Praxis“. ***Februar 2001, BFT 1/2001***

[F-4] Fujiwara, H.; Nagataki, S.; Otsuki, N.; Endo, E.: "Study on reducing unit powder particle size distribution.", ***Conc. Lib. of Japan Soc. of Civil Engeneering, 28 December 1996, S. 117---128***

G

[G-1] Gebauer, G.; Henning, O.: „Zum Einfluß eines Betonverflüssigers auf die Eigen-schaften von Mörtel mit Braunkohlenfilteraschezusatz". ***Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, 32. Jahrgang, 1986, Reihe B: Heft 4/5, S. 190 bis 192.***

[G-2] Graubner, C.-A.; Lieberum, K.-H.; Müller-Falke, G.; Rieger, T.; Kleen, E.: „Neuer selbstverdichtender Beton für Fertigteile". ***Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), 03/01***

[G-3] Grossmayer, R.; Groh, M.; Perg, A.K.; Pürrer, E.: „Der Millennium Tower in Wien". ***Beton 05/99***

[G-4] Grube, H.; Rickert, J.: „Selbstverdichtender Beton-ein weiterer Entwicklungsschritt des 5-Stoff-Systems Beton." ***Beton 01/99***

[G-5] Grübl, P.; Lemmer, Chr.: „Überprüfung der Leistungsfähigkeit von selbstverdichtenden Beton (SVB)". ***TU Darmstadt, Schlußbericht 09/2000*** http://www.massivbau.tu-darmstadt.de/User/lemmer/Web/scc/Zusammenfassung215.htm

[G-6] Grübl, P.: „Selbstverdichtender Beton in der Praxis" ; Kongressunterlagen der 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Kolloquium 1 „Selbstverdichtender Beton in der Praxis". ***Februar 2001, BFT 1/2001***

[G-7] Grübl, P.; Weigler, H.; Kupfer, H.: „Beton - Arten, Herstellung und Eigenschaften.", ***Hrsg. H. Kupfer, Ernst & Sohn Verlag, 2001***

[G-8] Grünewald, S.; Walraven, J.C.: „Statement zu faserverstärktem SCC" ; Kongressunterlagen der 46. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Podium 1. ***Februar 2002, BFT 2/2002***

H

[H-1] Hannuschke, A.: „Projektierung und Erhärtungskinetik von Betonen mit Braunkohlenfilteraschezusätzen". ***Dissertation, Hochschule für Bauwesen Cottbus, 1990***.

[H-2] Hegger, J.; Görtz, S.; Will, N.; Drössler, C.; Tigges, C.: „Tragfähigkeit von Bauteilen aus selbstverdichtenden Beton" ; ***Beton- und Stahlbetonbau, 11/01***

[H-3] Holschemacher, K.; Klug, Y.: „Selbstverdichtender Beton Teil 1 und 2". ***HTWK Leipzig 08/2002*** http://www.bauingenieur24.de/frontend/script/news_print.php4?id=930

[H-4] Hornung, D.: „Integrierte Mischbindemittel für leicht- und selbstverdichtende Beton im Fertigteilbereich" ; Kongressunterlagen der 46. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Podium 1. ***Februar 2002, BFT 2/2002***

[H-5] Hübert, C.; Wieker, W.; Heidemann, D.: „Zur Chemie hochaschehaltiger Binde-mittel". ***14. Internationale Baustofftagung Weimar 1997, Band 1, S. 1-0337 bis 1-0346.***

I

[I-1] Ilgner, R.: „Ursachen der Auswirkungen des erhöhten Wasseranspruchs der Puzzolanzemente mit Braunkohlenfilteraschen als Zumahlstoff.", ***Dissertation, Weimar 1973***

[I-2] Ilgner, R.: „BFA als Zumahlstoff für Zement; Verwertung von BFA in der Zement-industrie der ehemaligen DDR“. In: Handbuch der Verwendung von Braunkohlen-filteraschen in Deutschland, ***Herausgeber: RWE AG Essen, Zentralbereich F&E, 1995, S. 295 bis 322.***

[I-3] Institut für Baustoffprüfungen Dr.-Ing. Struth GmbH: „Überwachungsbericht Steinkohlenflugasche „pefa“, Nr.: Bew/02/I/FÜ.“, ***Beckum 2002***

[I-4] Institut für Baustoffe und Umwelt: „Prüfzeugnis nach DIN 4226-3; Nr.: MF/157/05/02/1“, ***Weimar, 17.05.2002***

J

[J-1] Jacobs, F.: „Dauerhaftigkeit von self-compacting-concrete (SCC)“ ; Kongressunterlagen der 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Kolloquium 1 „Selbstverdichtender Beton in der Praxis“. ***Februar 2001, BFT 1/2001***

K

[K-1] Kampen, R.: „Planen und Bauen nach neuen Vorschriften“. ***Beton 03/02***

[K-2] Knöfel, D.; Miskiewicz, K.; Blachnik, B.: „Beitrag zur Carbonatisierung von Bindemittelsystemen mit rheinischer Braunkohlenfilterasche (BFA)“. ***13. Internationale Baustofftagung Weimar 1997, Band 1, S. 1-0611 bis 1-0625.***

[K-3] König; Holschemacher; Dehn: „Selbstverdichtender Beton – Innovationen im Bauwesen – Beiträge aus Praxis und Wissenschaft“. ***Bauwerk Verlag GmbH, Berlin 2001***

[K-4] König, G.; Viet Tue, N.; Zink, M.: „Hochleistungsbeton-Bemessung, Herstellung und Anwendung“. ***Verlag Ernst & Sohn.***

[K-5] König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F.; Weiße, D.: „Verbundverhalten von Betonstahl in selbstverdichtenden Beton“ ; ***Beton- und Stahlbetonbau, 03/01***

[K-6] König, G.; Holschemacher,K.; Maurer, R., Dehn, F.: „Selbstverdichtender Beton für den Brückenbau“ ; ***Beton- und Stahlbetonbau, 06/02***

[K-7] Kordts, S.: „Selbstverdichtender Beton“ In: Beitrage zum 41. Forschungskolloquium des DafStb am 11. Und 12. Juli 2002 im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf. http://www.vdz-online/veraust/41_dafstb.htm

[K-8] Krug, M.; Neuroth, M.; Miskiewicz, K.; Gies, H.: „Entwicklung von hydraulisch erhärtenden Immobilisierungssystemen auf Basis von Braunkohlenflugasche“. ***13. Internationale Baustofftagung Weimar 1997, Band 1, S. 1-0077 bis 1-0088.***

[K-9] Krüger, M.: „Prüfmethoden zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit von selbstverdichtenden Betonen“ In: Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen – Festschrift zum 60. Geburtstag von H.-W. Reinhardt. ED. C. Grosse. ***Hamburg: Libri, 1999, S. 177-191***

L

[L-1] Lieberum, K.-H.; Graubner, C.-A.: „Selbstverdichtender Beton für Fertigteile“ ; Kongressunterlagen der 46. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Podium 1. ***Februar 2002, BFT 2/2002***

[L-2] Ludwig, H.-M..; Weise, F.; Hemrich, W.; Ehrlich, N.: „Selbstverdichtender Beton-Grundlagen und Praxis“, Teile I-III; ***Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), 05-07/01***

[L-3] Lutze; vom Berg: „Handbuch Flugasche im Beton.“, ***Verlag Bau + Technik, 1. Auflage 2004***

M

[M-1] Mallmann, R.: „Entwicklung hydraulischer Bindemittel mit rheinischen Braunkohlenfilteraschen“. ***Dissertation, 2002, Universität Siegen,*** http://db.baustoffchemie.de/suche_Braunkohlenflugasche.html

[M-2] Mallmann, R; Miskiewicz, K.; Knöfel, D.: „Einfluß der Zusammensetzung von Braunkohlenfilterasche auf die Eigenschaften aschereicher Bindemittel“. ***14. Internationale Baustofftagung Weimar 2000, Band 2, S. 2-0631 bis 2-0640.***

[M-3] Marquardt, I.: „Ein Mischungskonzept für selbstverdichtenden Beton auf der Basis der Volumenkenngrößen und der Ausgangsstoffe“. ***Beton 04/02***

[M-4] Marquardt, I.: „Ermittlung der Zusammensetzung selbstverdichtender Betone auf der Grundlage der Wasseransprüche der Ausgangsstoffe“. ***BFT 11/2002, S. 22-30***

[M-5] Marquardt, I.; Vala, J.; Diederichs, U.: „Aspekte zur Optimierung von Selbstverdichtenden Beton“ ; Kongressunterlagen der 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Kolloquium 1 „Selbstverdichtender Beton in der Praxis“. ***Februar 2001, BFT 1/2001***

[M-6] Mederer, J.; Zörkendörfer, E.; Wipperman, T.; Elsholz, O.: „Anorganische Inhalts-stoffe und Freisetzungskinetik von Braunkohlenfilteraschen“. In: Handbuch der Ver-wendung von Braunkohlenfilteraschen in Deutschland, ***Herausgeber: RWE AG Essen, Zentralbereich F&E, 1995, S. 161 bis 185.***

[M-7] Meyer,J.; Krell, J.: „Varianten statt starrer Mischanweisungen.“ ***Beton 01/99***

[M-8] Miskiewicz, K.; Rauser, P.; Kwasny, J.: „Versuche zur Verwendung von Braunkohlenflugasche als anorganischer Betonzusatzstoff“. ***12. Internationale Baustofftagung Weimar 1994, Band 2, S. 388 bis 398.***

[M-9] Miskiewicz, K.; Peters, K.: „Aschereiche Baustoffe aus rheinischen Braunkohlen-filteraschen“. ***13. Internationale Baustofftagung Weimar 1997, Band 1, S. 1-0447 bis 1-0458.***

[M-10] Monz, M.: „Betonzusatzmittel für die nächsten Jahrzehnte - Vom Ochsenblut zur Hightech-Chemie“. ***BW, 01/2000.***

[M-11] Müller, S.; Mechtcherin, V.; Haist, M.: „Selbstverdichtender Leichtbeton“ ; Kongressunterlagen der 46. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Podium 1. ***Februar 2002, BFT 2/2002***

[M-12] Müller, H.S.; Haist, M.; Mechtcherine, V.: „Selbstverdichtender Hochleistungs-Leichtbeton“ ; ***Beton- und Stahlbetonbau, 06/02***

[M-13] Munse, M.: „Aufbereitung von Braunkohlenflugaschen“. ***Betontechnik 1990/6 (Dezember), S. 187 bis 191.***

[M-14] Munse, M.; Tischer, W.; Munse, R.: „Fertigmörtel aus Braunkohlenflugasche (BFA) T.I". ***Baustoffindustrie 1985 / 4 (Juli), S. 102 bis 105.***

N

[N-1] Nube, K.; Zabel, P.: „Erfahrungen beim Einsatz von BFA in den neuen Ländern“. In: Handbuch der Verwendung von Braunkohlenfilteraschen in Deutschland, ***Herausgeber: RWE AG Essen, Zentralbereich F&E, 1995, S. 345 bis 364.***

P

[P-1] Paschmann, H.: „Zielsichere Herstellung von Selbstverdichtendem Beton höherer Druckfestigkeit“ ; Kongressunterlagen der 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Kolloquium 1 „Selbstverdichtender Beton in der Praxis“. ***Februar 2001, BFT 1/2001***

[P-2] Paschmann, H.: „Selbstverdichtender Betonpraktische Hinweise“. ***Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), 11/99***

[P-3] Paschman. H.; Gan, W.: „Zielsichere Herstellung Selbstverdichtender Betone erhöhter Druckfestigkeit"“ ***Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), 11/00***

[P-4] Pichler, R.: „Bauwerkserfahrungen mit SCC“; ***Beton- und Stahlbetonbau, 07/00***

[P-5] Piekos, S.; Lemke, D.: „Physikalische Eigenschaften und chemische Zusammensetzung von Braunkohlenflugaschen“. In: Handbuch der Verwendung von Braunkohlenfilteraschen in Deutschland, ***Herausgeber: RWE AG Essen, Zentralbereich F&E, 1995, S. 71 bis 85.***

[P-6] Piekos, S.; Lemke, D.: „Puzzolanische und hydraulische Eigenschaften von Braunkohlenflugasche“. In: Handbuch der Verwendung von Braunkohlenfilteraschen in Deutschland, ***Herausgeber: RWE AG Essen, Zentralbereich F&E, 1995, S. 119 bis 144.***

[P-7] Pohl, K.: „Zur Konstitution und Hydratation deutscher Braunkohlefilteraschen.“, ***Dissertation 1994***

[P-8] Prüfgesellschaft für Strassen- und Tiefbau mbH: “Prüfzeugnis nach DIN 4226; Nr.: 77/KM0691a/02“, ***Bernburg, 18.08.2002***

[P-9] Puntke, W.: „Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken“. ***Beton 05/02***

R

[R-1] Reinhardt, H.W.: „SVB-Richtlinie des DafStb“. ***Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), 12/01***

[R-2] Reinhardt, H.W.: „Richtlinie des DafStb“ ; Kongressunterlagen der 46. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Podium 1. ***Februar 2002, BFT 2/2002***

[R-3] Reinhold, M.; Stark, U.; Müller, A.: „Sandreiche Betone aus Braunkohlennassaschen“. ***14. Internationale Baustofftagung Weimar 2000, Band 2, S. 2-587 bis 2-0597.***

[R-4] Rinder, T.: „Versuche zum Schwinden von hochfestem Beton.“, ***Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart***

[R-5] Rings, K.-H.: „Einfluss von Ausgangsstoff- und Produktionsschwankungen auf die Konsistenz“ ; Kongressunterlagen der 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage: Kolloquium 1 „Selbstverdichtender Beton in der Praxis“. ***Februar 2001, BFT 1/2001***

[R-6] Rings, K.-H.; Kolczyk, H.; Löschnig, P.: „SCC: Grenzen der Betonzusammensetzung“. ***Beton 04/02***

[R-7] Rings, K.H.; Kolczyk, H.: „Selbstverdichtender Beton- ein neuer Hochleistungsbeton und Grenzen der Betonzusammensetzung“; ***Zusammenstellung von Unterlagen über SCC von Heidelberger Addiment***

[R-8] Rise, G.; Skarendahl, A.: „Selbstverdichtender Beton zur Steigerung der Produktivität“. ***Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), 11/99***

S

[S-1] Schießl, P., TU München; „1. Münchener Baustoffseminar-Selbstverdichtender Beton“; ***Lehrstuhl f. Baustoffkunde u. Werkstoffprüfung, 09.10.2002***

[S-2] Schießl, P.: „Betone – Anwendung von BFA in Beton“. In: Handbuch der Ver-wendung von Braunkohlenfilteraschen in Deutschland, ***Herausgeber: RWE AG Essen, Zentralbereich F&E, 1995, S. 333 bis 344.***

[S-3] Schießl, P.; Müller, C.: „Einfluss der Granulometrie von Steinkohleflugaschen auf die Eigenschaften von Beton.“, ***Aachen: Institut für Bauforschung, 1995 - Forschungsbericht Nr. F301***

[S-4] Schießl. A.: „Verbundverhalten von selbstverdichtendem Beton“. ***TU München*** http://www.mb.bv.tum.de/index-d/mitarb./Schiessl.html

[S-5] Schlegel, E.: „Verhalten von Braunkohlenflugasche bei höheren Temperaturen“. In: Handbuch der Verwendung von Braunkohlenfilteraschen in Deutschland, ***Heraus-geber: RWE AG Essen, Zentralbereich F&E, 1995, S. 189 bis 202.***

[S-6] Schreiter, P.; Bambauer, H.U.; Werner, M.; Pöhl, K.: „Chemisch-mineralogische Zusammensetzung von Braunkohlenflugasche“. In: Handbuch der Verwendung von Braunkohlenfilteraschen in Deutschland, ***Herausgeber: RWE AG Essen, Zentralbereich F&E, 1995, S. 87 bis 117.***

[S-7] Schreiter, P.; Bambauer, H.U.; Werner, M.: „Erfahrungen mit BFA-Bindebaustoffen“. In: Handbuch der Verwendung von Braunkohlenfilteraschen in Deutschland, ***Heraus-geber: RWE AG Essen, Zentralbereich F&E, 1995, S. 285 bis 294.***

[S-8] Schroer, A.; DA: „Selbstverdichtender Beton – Änderung der Oberflächengüte von Mikrotunneltübbingen durch Betonzusammensetzung und textile Schalungsauflagen“; ***September 2001***

[S-9] Schulze; Tischer; Ettel: „Der Baustoff Beton - Band 2 - Nichtzementgebundene Mörtel und Betone.“, ***VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 2. Auflage 1987***

[S-10] Stark, J.; Kirmse, J.; Friebert, M.; Wesser, D.: „Selbstverdichtender Beton hoher Dauerhaftigkeit für Bauteile des Tiefbaus und des Umweltschutzes“. ***Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), 05/02***

[S-11] Stark, J.; Volke; K.; Müller, W.: „BFA als Rohstoff für Zementherstellung“. In: Handbuch der Verwendung von Braunkohlenfilteraschen in Deutschland, ***Heraus-geber: RWE AG Essen, Zentralbereich F&E, 1995, S. 285 bis 294.***

[S-12] Sonneberg, R.: „Schalungen für selbstverdichtenden Beton“. ***Beton 12/02***

V

[V-1] van Gansewinkel, O.; Miskiewicz, K.; Heil, G.: „Eigenschaften von gemahlenen Braunkohlenfilteraschen“. ***5. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen-MSR99; S. 1649 bis 1654; Esslingen, Nov./Dez. 1999.***

W

[W-1] Wassmann, K.: „Aktuelle betontechnologische Probleme“. ***Beton 01/00***

[W-2] Werner, T.; Munse, M.; Lange, U.: „Granulierung von Braunkohlenflugaschen (BFA) und Einsatzmöglichkeiten der Granulate“. ***Baustoffindustrie 1968 / 2 (März), S. 35 bis 37.***

IV. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1: Stoffraumanteile für verschiedene Betone 9

Abb. 2.2: Festigkeitsbereiche der Betone aus Abb. 2.1 9

Abb. 2.3: rheologische Modelle nach Bingham und Newton 10

Abb. 2.4: Agglomeration des Mehlkorns im Beton aufgrund unterschiedlicher Oberflächenladungen 10

Abb. 2.5: Vergleich von Fließkurven von Betonen unterschiedlicher Konsistenz 11

Abb. 2.6: Einfluss des Mehlkorns auf die rheologischen Eigenschaften von Zementleim für SVB 11

Abb. 2.7: Vorgehensweise zur Herstellung eines SVB nach Okamura [D-2] 13

Abb. 2.8: Mischungszusammensetzung nach Okamura [K-3] 13

Abb. 2.9: Bestimmung von β_p nach Okamura [K-3] 14

Abb. 2.10: Ausbreitfließversuch (l.) und Trichterauslaufzeitversuch (r.) für Mörtel 14

Abb. 2.11: Setzfließversuch (l.) und Trichterauslaufzeitversuch (r.) für Beton 14

Abb. 2.12: Vorgehensweise zur Herstellung eines SVB nach der JSCE-Methode [D-2] 15

Abb. 2.13: Vorgehensweise zur Herstellung eines SVB nach Marquardt / Vala / Diederichs [M-4] 16

Abb. 2.14: Steinkohlenflugasche im Rasterelektronenmikroskop in [F-4] 17

Abb. 2.15: Braunkohlenflugasche im Rasterelektronenmikroskop in [M-1] 17

Abb. 2.14: Bandbreite der Korngrößenverteilungen von SFA [B-18], BFA [I-1] und Zement [S-3] 18

Abb. 2.15: Vergleichende Darstellung der chemischen Zusammensetzung von BFA, SFA und PZ im Dreistoffsystem SiO_2 - CaO - Al_2O_3+Fe_2O_3 [M-8] 22

Abb. 3.1: Sieblinie der eingesetzten Gesteinskörnungen und der gewählten Kombination dieser 28

Abb. 3.2: Korngrößenverteilungen der eingesetzten Flugaschen 30

Abb. 3.3: ESEM-Aufnahmen der unaufbereiteten und aufbereiteten Braunkohlenflugasche (BFA) 31

Abb. 3.4: Beispiel zur Bestimmung des optimalen Wasser/Pulver Volumenverhältnisses [FSK VI] 34

Abb. 3.5: Hägermann-Tisch mit Setztrichter 34

Abb. 3.6: Bestimmung des Ausbreitmaßes am Mörtel 37

Abb. 3.7: Bestimmung der Durchlaufzeit am Mörtel 37

Abb. 3.8: Hohlkegelstumpf zur Bestimmung des Setz-Fließmaßes nach DIN EN 12350-2 39

Abb. 3.9: Trichter zur Bestimmung der Auslaufzeit des selbstverdichtenden Betons nach Okamura 39

Abb. 3.10: automatisches Vicat-Gerät 41

Abb. 3.11: Nadel mit und ohne Ansatz zur Bestimmung der Erstarrungszeiten 42

Abb. 3.12: Le-Chatelier-Ringe zur Bestimmung der Raumbeständigkeit von Bindemitteln 43

Abb. 3.13: Kalorimeter zur Bestimmung der Hydratationswärmeentwicklung von Bindemitteln 44

Abb. 3.14: Wärmeentwicklungsraten und Wärmemengen der eingesetzten Bindemittelgemische und des reinen Zementes 44

Abb. 3.15: Prüfmaschine zur Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeiten von Mörtelprismen 45

Abb. 3.16: Wertebereiche der ermittelten Biegezugfestigkeiten der hergestellten Mörtel aller Versuchsreihen 46

Abb. 3.17: Wertebereiche der ermittelten Druckfestigkeiten der hergestellten Mörtel aller Versuchsreihen . 46

Abb. 3.18: Hohlkegelstumpf zur Bestimmung des Setzfließmaßes nach DIN EN 12350-2 47

Abb. 3.19: Zementleimfilm um den Betonkuchen des „SFA-Betons“ der VR 3 [Setzfließmaß 85 cm]..... 48

Abb. 3.20: Trichter zur Bestimmung der Auslaufzeit des selbstverd .Beton nach Okamura 48

Abb. 3.21: Hohlkegelstumpf Bewehrungsring zur Durchführung des J-Ring-Versuchs 49

Abb. 3.22: geringfügige „Hügelbildung“ innerhalb des J-Rings beim BFA-Beton der VR 2..... 50

Abb. 3.23: keine „Hügelbildung“ innerhalb des J-Rings bei den restlichen Beton..... 50

Abb. 3.24: winkelförmige Schalung zur Durchführung des L-Kasten-Versuches von SVB 50

Abb. 3.25: keine sichtbare Ansammlungen von Zuschlägen vor den Bewehrungsstäben 51

Abb. 3.26: LP-Topf zur Ermittlung des Luftgehaltes von Frischbeton nach DIN EN 12350-7..... 51

Abb. 3.27: Rücksteifverhalten des „BFA-Betons der Versuchsreihe 1 bei unterschiedlichen Misch-bedingungen 53

Abb. 3.28: Versuchsanordnung zur Bestimmung des Frühschwindverhaltens von Frischbeton..... 55

Abb. 3.29: Frühschwindverhalten des **„SFA-Betons“** der Versuchsreihe 1 bei verschiedenen Lagerungsbedingungen 55

Abb. 3.30: Frühschwindverhalten des **„BFA-Betons“** der Versuchsreihe 1 bei verschiedenen Lagerungsbedingungen 56

Abb. 3.31: Frühschwindverhalten des **„BFA-Betons“** der Versuchsreihe 3 bei aufgedeckten Folien (nach 96 h)..... 57

Abb. 3.32: Druckprüfmaschine nach DIN EN 12390-4 58

Abb. 3.33: Wertebereiche der ermittelten Druckfestigkeiten der hergestellten Betone aller Versuchsreihen. 58

Abb. 3.34: Vorder- und Seitenansicht des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der E-Moduln an ..... Betonzylindern 59

Abb. 3.35: Bestimmung des E-Moduls nach DIN 1048-5 für den „BFA-Beton“ der Versuchsreihe 3 60

Abb. 3.36: einbetonierte Messzapfen in aufgebrochenen Proben - trocken (l), feucht (m) und nass (r)..... 61

Abb. 3.37: Messapparatur zur Bestimmung der Längenänderungen von Mörtelprismen..... 61

Abb. 3.38: Gesamtschwinden der BFA- und SFA-Mörtel der VR 4 und des Mörtels mit unaufb. BFA..... 62

Abb. 3.39: Schal- und Schnittflächen der Betone der Versuchsreihe 4 mit SFA (links) und BFA (rechts) ... 63

V. TAFELVERZEICHNIS

Tafel 2.1: Chemische Zusammensetzung von SFA (Werte aus Überwachung seit 1997) [L-3] und BFA (Werte aus Vollanalysen von Mischaschen aus den Jahren 1992 und 1993) [S-6] 23

Tafel 2.2: Spurenelementgehalte [mg/kg] in Steinkohlenflugaschen und Braunkohlenflugaschen verschiedener Kraftwerke im Vergleich zu Gehalten im Boden und in der Lithosphäre 24

Tafel 3.1: chemische Zusammensetzung des verwendeten Zementes CEM II B-S 32,5 R 27

Tafel 3.2: Schütt- und Rohdichten der verwendeten Gesteinskörnungen 27

Tafel 3.3: spezifische Oberflächen der eingesetzten Flugaschen nach BLAINE- und BET-Methode 29

Tafel 3.4: Kennwerte der Partikelgrößenanalysen der eingesetzten Flugaschen 29

Tafel 3.5: Chemische Analyse der eingesetzten Flugaschen 31

Tafel 3.6: Technische Daten der eingesetzten Fließmittel 32

Tafel 3.7: Feststoffkombinationen (Pulverzusammensetzungen) der durchgeführten Leimversuche 33

Tafel 3.8: Beispiel zur Ermittlung des relativen Ausbreitmaßes Γ_p [FSK VI] 34

Tafel 3.9: Mischregime der Leimversuche 35

Tafel 3.10: Vergleich der Eigenschaften und Auswahl der Feststoffkombinationen 35

Tafel 3.11: Mischregime der Mörtelversuche 36

Tafel 3.12: Ergebnisse der durchgeführten Mörteluntersuchungen 37

Tafel 3.13: Mischungszusammensetzungen der SVB aller Versuchsreihen 39

Tafel 3.14: Wasseransprüche der untersuchten Bindemittelgemische 41

Tafel 3.15: Erstarrungsbeginn und –ende der untersuchten Bindemittelgemische 42

Tafel 3.16: Werte der Messungen zur Raumbeständigkeit der untersuchten Bindemittelgemische 43

Tafel 3.17: Übersicht der angewendeten Frischbetonprüfverfahren 47

Tafel 3.18: ermittelte Setzfließmaße aller hergestellten Betone 47

Tafel 3.19: ermittelte Trichterauslaufzeiten aller hergestellten Betone 49

Tafel 3.20: ermittelte Setzfließmaße der J-Ring-Versuche aller Betone und dazugehörige t_{500}-Zeiten 50

Tafel 3.21: ermittelte Kennwerte des L-Kasten-Versuches aller Betone 51

Tafel 3.22: ermittelte Luftgehalte aller Frischbetone ohne und mit Verdichtung 52

Tafel 3.23: unterschiedliche Mischprozeduren zur Bestimmung des Rücksteifverhaltens der Betone 53

Tafel 3.24: 28-Tage-Druckfestigkeiten der Würfel/Zylinder aller Betone und dazugehörige Festigkeitsklassen 59

Tafel 3.25: ermittelte E-Moduln der hergestellten Betone aller Versuchsreihen 60

VI. ANLAGE

TAFELVERZEICHNIS

Tafel A.1: Kennwerte des Siebversuches der Gesteinskörnung Parey 0/2 mm A1
Tafel A.2: Kornrohdichte der Gesteinskörnung Parey 0/2 mm A1
Tafel A.3: Schüttdichte der Gesteinskörnung Parey 0/2 mm A1
Tafel A.4: Kennwerte des Siebversuches der Gesteinskörnung Mühlberg 2/8 mm A2
Tafel A.5: Kornrohdichte der Gesteinskörnung Mühlberg 2/8 mm A2
Tafel A.6: Schüttdichte der Gesteinskörnung Mühlberg 2/8 mm A2

Tafel A.7: Bestimmung des optimalen Wasserrückhaltevermögens β_p der Feststoffkombination I A3
Tafel A.8: Bestimmung des optimalen Wasserrückhaltevermögens β_p der Feststoffkombination II A3
Tafel A.9: Bestimmung des optimalen Wasserrückhaltevermögens β_p der Feststoffkombination III A4
Tafel A.10: Bestimmung des optimalen Wasserrückhaltevermögens β_p der Feststoffkombination IV A4
Tafel A.11: Bestimmung des optimalen Wasserrückhaltevermögens β_p der Feststoffkombination V A5
Tafel A.12: Bestimmung des optimalen Wasserrückhaltevermögens β_p der Feststoffkombination VI A5
Tafel A.13: Bestimmung des optimalen Wasserrückhaltevermögens β_p der Feststoffkombination VII A6

Tafel A.14: Mischregime der Leimversuche A6
Tafel A.15: Mischregime der Mörtel- und Betonversuche A6

Tafel A.16: empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 1 ..... A7
Tafel A.17: empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 1 ..... A8
Tafel A.18: empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 2 ..... A9
Tafel A.19: empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 2 ..... A10
Tafel A.20: empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 3 ..... A11
Tafel A.21: empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 3 ..... A12
Tafel A.22: empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 4 ..... A13
Tafel A.23: empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 4 ..... A14
Tafel A.24: empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 5 ..... A15
Tafel A.25: empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 5 ..... A16
Tafel A.26: empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 6 ..... A17
Tafel A.27: empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 6 ..... A18

Tafel A.28: Druck- / Biegezugfestigkeiten und Rohdichten der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 1 ..... A19
Tafel A.29: Druck- / Biegezugfestigkeiten und Rohdichten der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 2 ..... A20
Tafel A.30: Druck- / Biegezugfestigkeiten und Rohdichten der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 3 ..... A21
Tafel A.31: Druck- / Biegezugfestigkeiten und Rohdichten der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 4 ..... A22
Tafel A.32: Druck- / Biegezugfestigkeiten und Rohdichten der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 5 ..... A23
Tafel A.33: Druck- / Biegezugfestigkeiten und Rohdichten der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 6 ..... A24

Tafel A.34: Einzel- und Mittelwerte der erreichten Frischbetonrohdichten aller hergestellten Betone (VR 1…VR 6) . A25

Tafel A.35: Zusammenstellung der ermittelten Frischbetonkennwerte aller hergestellten Betone (VR 1…VR 6) A26

Tafel A.36: Druckfestigkeiten und Rohdichten der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 1 ..... A32
Tafel A.37: Druckfestigkeiten und Rohdichten der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 2 ..... A23
Tafel A.38: Druckfestigkeiten und Rohdichten der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 3 ..... A34
Tafel A.39: Druckfestigkeiten und Rohdichten der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 4 ..... A35
Tafel A.40: Druckfestigkeiten und Rohdichten der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 5 ..... A36
Tafel A.41: Druckfestigkeiten und Rohdichten der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 6 ..... A37

Tafel A.42: Einzel- und Mittelwerte der ermittelten E-Moduli aller hergestellten Betone (VR1…VR6) A38

Tafel A.43: Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „SFA-Mörtel“ der VR 1 ..... A44
Tafel A.44: Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „BFA-Mörtel“ der VR 1 ..... A45
Tafel A.45: Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „SFA-Mörtel“ der VR 2 ..... A46
Tafel A.46: Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „BFA-Mörtel“ der VR 2 ..... A47
Tafel A.47: Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „SFA-Mörtel“ der VR 3 ..... A48
Tafel A.48: Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „BFA-Mörtel“ der VR 3 ..... A49
Tafel A.49: Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „SFA-Mörtel“ der VR 4 ..... A50
Tafel A.50: Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „BFA-Mörtel“ der VR 4 ..... A51
Tafel A.51: Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „SFA-Mörtel“ der VR 5 ..... A52
Tafel A.52: Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „BFA-Mörtel“ der VR 5 ..... A53
Tafel A.53: Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „SFA-Mörtel“ der VR 6 ..... A54
Tafel A.54: Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „BFA-Mörtel“ der VR 6 ..... A55

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. A.1: Festigkeitsentwicklung (Druck + Biegezug) der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 1 ..... A19
Abb. A.2: Festigkeitsentwicklung (Druck + Biegezug) der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 2 ..... A20
Abb. A.3: Festigkeitsentwicklung (Druck + Biegezug) der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 3 ..... A21
Abb. A.4: Festigkeitsentwicklung (Druck + Biegezug) der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 4 ..... A22
Abb. A.5: Festigkeitsentwicklung (Druck + Biegezug) der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 5 ..... A23
Abb. A.6: Festigkeitsentwicklung (Druck + Biegezug) der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 6 ..... A24

Abb. A.7: Rücksteifverhalten des „BFA-Betons der Versuchsreihe 1 bei unterschiedlichen Mischbedingungen A26
Abb. A.8: Rücksteifverhalten des „BFA-Betons der Versuchsreihe 2 bei unterschiedlichen Mischbedingungen A26
Abb. A.9: Rücksteifverhalten des „BFA-Betons der Versuchsreihe 3 bei unterschiedlichen Mischbedingungen A26
Abb. A.10: Rücksteifverhalten des „BFA-Betons der Versuchsreihe 4 bei unterschiedlichen Mischbedingungen A27
Abb. A.11: Rücksteifverhalten des „BFA-Betons der Versuchsreihe 5 bei unterschiedlichen Mischbedingungen A27
Abb. A.12: Rücksteifverhalten des „BFA-Betons der Versuchsreihe 6 bei unterschiedlichen Mischbedingungen A27

Abb. A.13: Frühschwindverhalten des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 1 bei versch. Lagerungsbedingungen A28
Abb. A.14: Frühschwindverhalten des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 1 bei versch. Lagerungsbedingungen A28

Abb. A.15: Frühschwindverhalten des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 2 bei versch. Lagerungsbedingungen..... A28
Abb. A.16: Frühschwindverhalten des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 2 bei versch. Lagerungsbedingungen A29
Abb. A.17: Frühschwindverhalten des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 3 bei versch. Lagerungsbedingungen..... A29
Abb. A.18: Frühschwindverhalten des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 3 bei versch. Lagerungsbedingungen A29
Abb. A.19: Frühschwindverhalten des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 4 bei versch. Lagerungsbedingungen..... A30
Abb. A.20: Frühschwindverhalten des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 4 bei versch. Lagerungsbedingungen A30
Abb. A.21: Frühschwindverhalten des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 5 bei versch. Lagerungsbedingungen..... A30
Abb. A.22: Frühschwindverhalten des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 5 bei versch. Lagerungsbedingungen A31
Abb. A.23: Frühschwindverhalten des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 6 bei versch. Lagerungsbedingungen..... A31
Abb. A.24: Frühschwindverhalten des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 6 bei versch. Lagerungsbedingungen A31

Abb. A.25: Festigkeitsentwicklungen der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 1 ..... A32
Abb. A.26: Festigkeitsentwicklungen der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 2 ..... A33
Abb. A.27: Festigkeitsentwicklungen der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 3 ..... A34
Abb. A.28: Festigkeitsentwicklungen der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 4 ..... A35
Abb. A.29: Festigkeitsentwicklungen der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 5 ..... A36
Abb. A.30: Festigkeitsentwicklungen der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 6 ..... A37

Abb. A.31: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 2/3, SFA-Beton, VR 1 ..... A39
Abb. A.32: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 2/3, BFA-Beton, VR 1 ..... A39
Abb. A.33: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 3/3, BFA-Beton, VR 1 ..... A39
Abb. A.34: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 3/3, SFA-Beton, VR 2 ..... A39
Abb. A.35: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 1/3, BFA-Beton, VR 2 ..... A40
Abb. A.36: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 1/3, SFA-Beton, VR 3 ..... A40
Abb. A.37: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 2/3, SFA-Beton, VR 3 ..... A40
Abb. A.38: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 3/3, SFA-Beton, VR 3 ..... A40
Abb. A.39: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 2/3, BFA-Beton, VR 3 ..... A41
Abb. A.40: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 3/3, BFA-Beton, VR 3 ..... A41
Abb. A.41: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 1/3, SFA-Beton, VR 4 ..... A41
Abb. A.42: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 3/3, SFA-Beton, VR 4 ..... A41
Abb. A.43: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 1/3, BFA-Beton, VR 4 ..... A42
Abb. A.44: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 2/3, BFA-Beton, VR 4 ..... A42
Abb. A.45: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 1/3, SFA-Beton, VR 5 ..... A42
Abb. A.46: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 2/3, SFA-Beton, VR 5 ..... A42
Abb. A.47: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 2/3, BFA-Beton, VR 5 ..... A43
Abb. A.48: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 3/3, BFA-Beton, VR 5 ..... A43
Abb. A.49: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 1/3, SFA-Beton, VR 6 ..... A43
Abb. A.50: Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 1/3, BFA-Beton, VR 6 ..... A43

Abb. A.51: Verformungsverhalten des „SFA-Mörtels“ der VR 1 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen A44
Abb. A.52: Verformungsverhalten des „BFA-Mörtels“ der VR 1 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen A45
Abb. A.53: Verformungsverhalten des „SFA-Mörtels“ der VR 2 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen A46

Abb. A.54: Verformungsverhalten des „BFA-Mörtels“ der VR 2 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen A47
Abb. A.55: Verformungsverhalten des „SFA-Mörtels“ der VR 3 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen A48
Abb. A.56: Verformungsverhalten des „BFA-Mörtels“ der VR 3 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen A49
Abb. A.57: Verformungsverhalten des „SFA-Mörtels“ der VR 4 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen A50
Abb. A.58: Verformungsverhalten des „BFA-Mörtels“ der VR 4 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen A51
Abb. A.59: Verformungsverhalten des „SFA-Mörtels“ der VR 5 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen A52
Abb. A.60: Verformungsverhalten des „BFA-Mörtels“ der VR 5 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen A53
Abb. A.61: Verformungsverhalten des „SFA-Mörtels“ der VR6 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen A54
Abb. A.62: Verformungsverhalten des „BFA-Mörtels“ der VR6 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen A55

Abb. A.63: Schal- und Schnittflächen der Betone der Versuchsreihe 1 mit SFA (links) und BFA (rechts) A56
Abb. A.64: Schal- und Schnittflächen der Betone der Versuchsreihe 2 mit SFA (links) und BFA (rechts) A56
Abb. A.65: Schal- und Schnittflächen der Betone der Versuchsreihe 3 mit SFA (links) und BFA (rechts) A57
Abb. A.66: Schal- und Schnittflächen der Betone der Versuchsreihe 4 mit SFA (links) und BFA (rechts) A57
Abb. A.67: Schal- und Schnittflächen der Betone der Versuchsreihe 5 mit SFA (links) und BFA (rechts) A58
Abb. A.68: Schal- und Schnittflächen der Betone der Versuchsreihe 6 mit SFA (links) und BFA (rechts) A58

Protokoll Siebanalyse												
Probematerial: Sand Parey					**Korngruppe: 0/2**				**gef. Mindestmenge: 500 g**			
	tatsächliche Einwaage [g]	**Trennkorngröße (Sieblochweite) [mm]**										
		Boden	**0,125**	**0,25**	**0,5**	**1**	**2**	**4**	**8**	**16**	**31,5**	**63**
SIEBUNG 1												
Rückstand [g]	1999	14	117	605	854	342	67	0	0	0	0	0
Rückstand [%]		100	99	93	63	20	3	0	0	0	0	0
SIEBUNG 2												
Rückstand [g]	1998	13	106	542	873	392	72	0	0	0	0	0
Rückstand [%]		100	99	94	67	23	4	0	0	0	0	0
SIEBUNG 3												
Rückstand [g]	2000	14	123	616	834	349	64	0	0	0	0	0
Rückstand [%]		100	99	93	62	21	3	0	0	0	0	0
GEMITTELT												
Rückstand [%]		100	99	94	64	21	3	0	0	0	0	0
Durchgang [%]		**0**	**1**	**6**	**36**	**79**	**97**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**
Kennwerte der Sieblinie:		***k = 1,83***						***D = 218***				

Tafel A.1: *Kennwerte des Siebversuches der Gesteinskörnung Parey 0/2 mm*

Kornrohdichte (Meßzylinderverfahren)		**Einheit**	**Probennummer**		
			I	**II**	**III**
Masse Zuschlag trocken		**[g]**	*1000*	*1000*	*1000*
Volumen (H_20 + Zuschlag + VS)		**[cm³]**	*1380*	*1380*	*1380*
Volumen (H_20 + VS)		**[cm³]**	*1000*	*1000*	*1000*
Volumen Zuschlag, VG		**[cm³]**	*380*	*380*	*380*
Rohdichte	**Einzelwert**	**[g/cm³]**	*2,631*	*2,631*	*2,631*
	gemittelt	**[g/cm³]**	***2,631***		

Tafel A.2: *Kornrohdichte der Gesteinskörnung Parey 0/2 mm*

Schüttdichte		**Einheit**	**Probennummer**		
			I	**II**	**III**
Masse Zuschlag trocken		**[kg]**	*1,618*	*1,604*	*1,593*
Volumen Messgerät		**[dm³]**	*1*	*1*	*1*
Schüttdichte	**Einzelwert**	**[kg/dm³]**	*1,618*	*1,604*	*1,593*
	gemittelt	**[kg/dm³]**	***1,605***		

Tafel A.3: *Schüttdichte der Gesteinskörnung Parey 0/2 mm*

Protokoll Siebanalyse												
Probematerial: Kies Mühlberg					**Korngruppe: 2/8**				**gef. Mindestmenge: 2000g**			
	tatsächliche Einwaage [g]	**Trennkorngröße (Sieblochweite) [mm]**										
		Boden	**0,125**	**0,25**	**0,5**	**1**	**2**	**4**	**8**	**16**	**31,5**	**63**
SIEBUNG 1												
Rückstand [g]	2000	1	1	12	31	22	540	1237	101	0	0	0
Rückstand [%]		97	97	97	97	95	94	67	5	0	0	0
SIEBUNG 2												
Rückstand [g]	2000	3	4	26	47	92	629	1108	91	0	0	0
Rückstand [%]		100	100	100	98	96	91	60	5	0	0	0
SIEBUNG 3												
Rückstand [g]	1999	1	1	13	34	91	660	1101	98	0	0	0
Rückstand [%]		100	100	100	99	98	93	60	5	0	0	0
GEMITTELT												
Rückstand [%]		99	99	99	98	96	93	62	5	0	0	0
Durchgang [%]		**1**	**1**	**1**	**2**	**4**	**7**	**38**	**95**	**100,0**	**100,0**	**100,0**
Kennwerte der Sieblinie:		***k = 5,53***						***D = 149***				

Tafel A.4: *Kennwerte des Siebversuches der Gesteinskörnung Mühlberg 2/8 mm*

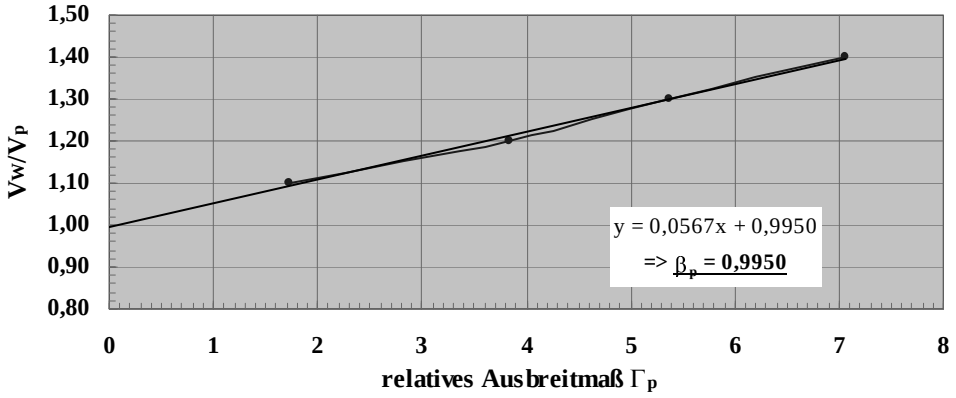
Kornrohdichte (Meßzylinderverfahren)		**Einheit**	**Probennummer**		
			I	**II**	**III**
Masse Zuschlag trocken		**[g]**	*2000*	*1000*	*1000*
Volumen (H_20 + Zuschlag + VS)		**[cm³]**	*1765*	*1384*	*1382*
Volumen (H_20 + VS)		**[cm³]**	*1000*	*1000*	*1000*
Volumen Zuschlag, VG		**[cm³]**	*765*	*384*	*382*
Rohdichte	**Einzelwert**	**[g/cm³]**	*2,614*	*2,605*	*2,618*
	gemittelt	**[g/cm³]**	***2,612***		

Tafel A.5: *Kornrohdichte der Gesteinskörnung Mühlberg 2/8 mm*

Schüttdichte		**Einheit**	**Probennummer**		
			I	**II**	**III**
Masse Zuschlag trocken		**[kg]**	*1,567*	*1,516*	*1,528*
Volumen Messgerät		**[dm³]**	*1*	*1*	*1*
Schüttdichte	**Einzelwert**	**[kg/dm³]**	*1,567*	*1,516*	*1,528*
	gemittelt	**[kg/dm³]**	***1,537***		

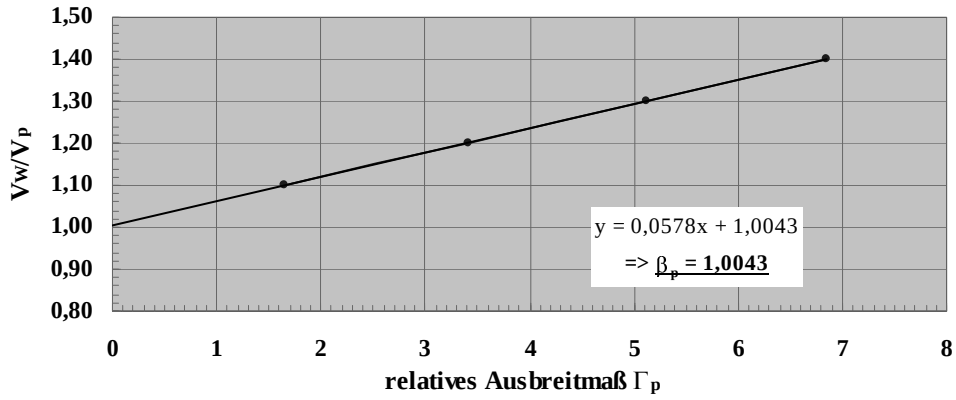
Tafel A.6: *Schüttdichte der Gesteinskörnung Mühlberg 2/8 mm*

Feststoffkombination I				Leim-mischung	Wasser V_W/V_P [-]	Wasser Volumen [ml]	Ausbreitmaß r_a [cm]	Ausbreitmaß r_b [cm]	Ausbreitmaß $r = [(r_a+r_b)/2]$ [cm]	Ausbreitmaß $\Gamma_P = (r/r_0)^2-1$ [-]
	Dichte	Volumen	Masse	VI.1	1,1	220	16,5	16,5	16,50	1,7225
	[g/ml]	[ml]	[g]	VI.2	1,2	240	22,0	22,0	22,00	3,8400
CEM II B-S 32,5 R	3,100	100	310,00	VI.3	1,3	260	25,0	25,5	25,25	5,3756
SFA "pefa"	2,335	100	233,50	VI.4	1,4	280	28,5	28,3	28,40	7,0656



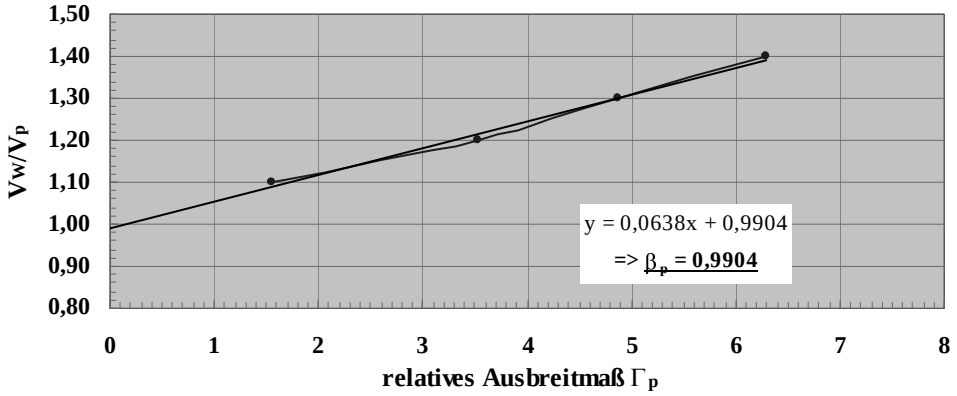
Tafel A.7: *Bestimmung des optimalen Wasserrückhaltevermögens β_p der Feststoffkombination I*

Feststoffkombination II				Leim-mischung	Wasser V_W/V_P [-]	Wasser Volumen [ml]	Ausbreitmaß r_a [cm]	Ausbreitmaß r_b [cm]	Ausbreitmaß $r = [(r_a+r_b)/2]$ [cm]	Ausbreitmaß $\Gamma_P = (r/r_0)^2-1$ [-]
	Dichte	Volumen	Masse	VI.1	1,1	220	16,0	16,5	16,25	1,6406
	[g/ml]	[ml]	[g]	VI.2	1,2	240	21,0	21,0	21,00	3,4100
CEM II B-S 32,5 R	3,100	120	372,00	VI.3	1,3	260	24,5	25,0	24,75	5,1256
SFA "pefa"	2,335	80	186,80	VI.4	1,4	280	27,5	28,5	28,00	6,8400

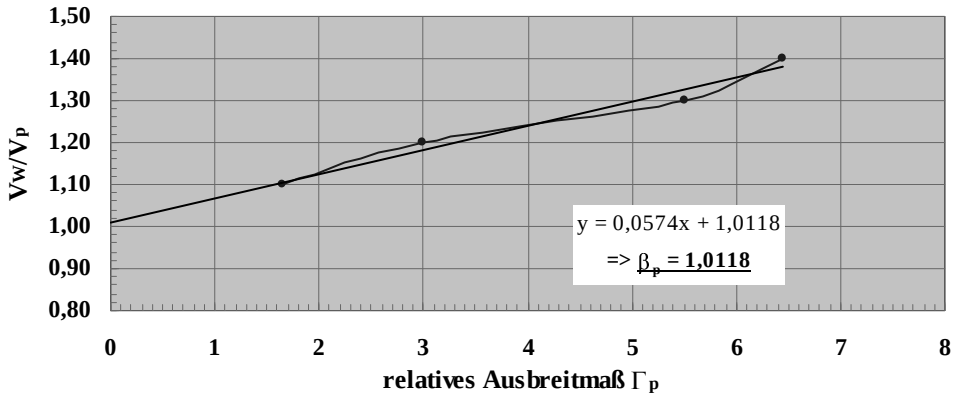


Tafel A.8: *Bestimmung des optimalen Wasserrückhaltevermögens β_p der Feststoffkombination II*

Feststoffkombination III	Dichte	Volumen	Masse	Leimmischung	Wasser V_W/V_P [-]	Wasser Volumen [ml]	Ausbreitmaß r_a [cm]	r_b [cm]	$r = [(r_a+r_b)/2]$ [cm]	$\Gamma_P = (r/r_0)^2-1$ [-]
	[g/ml]	[ml]	[g]	VI.1	1,1	220	16,0	16,0	16,00	1,5600
				VI.2	1,2	240	20,8	21,8	21,30	3,5369
CEM II B-S 32,5 R	3,100	90	279,00	VI.3	1,3	260	24,0	24,5	24,25	4,8806
SFA "pefa"	2,335	110	256,85	VI.4	1,4	280	27,0	27,0	27,00	6,2900

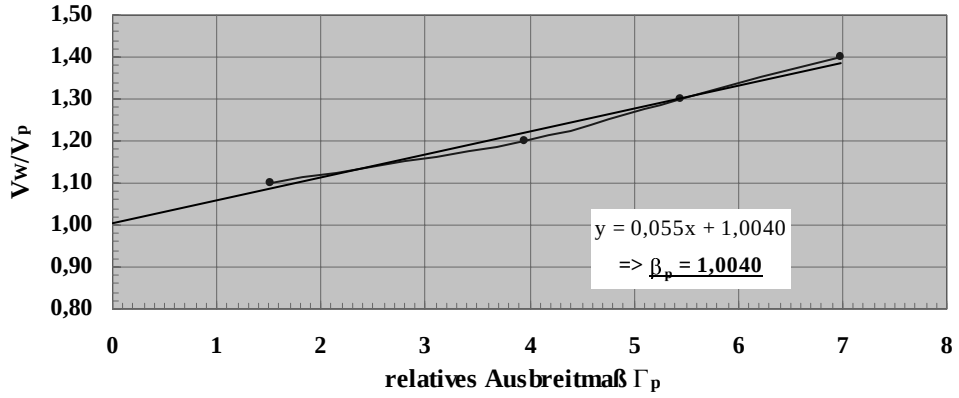


Feststoffkombination IV	Dichte	Volumen	Masse	Leimmischung	Wasser V_W/V_P [-]	Wasser Volumen [ml]	Ausbreitmaß r_a [cm]	r_b [cm]	$r = [(r_a+r_b)/2]$ [cm]	$\Gamma_P = (r/r_0)^2-1$ [-]
	[g/ml]	[ml]	[g]	VI.1	1,1	220	16,0	16,5	16,25	1,6406
				VI.2	1,2	240	20,0	20,0	20,00	3,0000
CEM II B-S 32,5 R	3,100	100	310,00	VI.3	1,3	260	25,5	25,5	25,50	5,5025
aufbereitete BFA	2,700	100	270,00	VI.4	1,4	280	27,3	27,3	27,30	6,4529

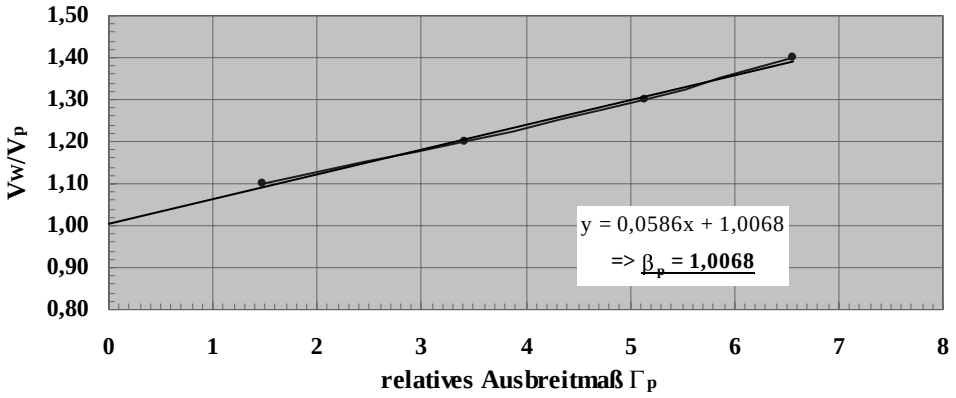


Tafel A.10: *Bestimmung des optimalen Wasserrückhaltevermögens β_p der Feststoffkombination IV*

Feststoffkombination V	Dichte	Volumen	Masse	Leimmischung	Wasser V_W/V_P [-]	Wasser Volumen [ml]	Ausbreitmaß r_a [cm]	Ausbreitmaß r_b [cm]	Ausbreitmaß $r = [(r_a+r_b)/2]$ [cm]	Ausbreitmaß $\Gamma_P = (r/r_0)^2-1$ [-]
	[g/ml]	[ml]	[g]	VI.1	*1,1*	***220***	*15,7*	*16,0*	*15,85*	**1,5122**
				VI.2	*1,2*	***240***	*22,0*	*22,5*	*22,25*	**3,9506**
CEM II B-S 32,5 R	*3,100*	*120*	***372,00***	VI.3	*1,3*	***260***	*25,3*	*25,5*	*25,40*	**5,4516**
aufbereitete BFA	*2,700*	*80*	***216,00***	VI.4	*1,4*	***280***	*28,0*	*28,5*	*28,25*	**6,9806**

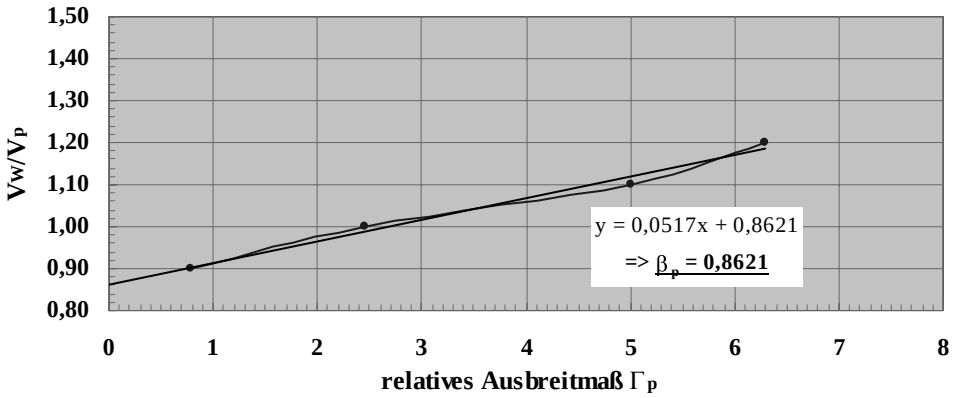


Feststoffkombination VI	Dichte	Volumen	Masse	Leimmischung	Wasser V_W/V_P [-]	Wasser Volumen [ml]	Ausbreitmaß r_a [cm]	Ausbreitmaß r_b [cm]	Ausbreitmaß $r = [(r_a+r_b)/2]$ [cm]	Ausbreitmaß $\Gamma_P = (r/r_0)^2-1$ [-]
	[g/ml]	[ml]	[g]	VI.1	*1,1*	***220***	*15,5*	*16,0*	*15,75*	**1,4806**
				VI.2	*1,2*	***240***	*21,0*	*21,0*	*21,00*	**3,4100**
CEM II B-S 32,5 R	*3,100*	*90*	***279,00***	VI.3	*1,3*	***260***	*24,8*	*24,8*	*24,80*	**5,1504**
aufbereitete BFA	*2,700*	*110*	***297,00***	VI.4	*1,4*	***280***	*27,5*	*27,5*	*27,50*	**6,5625**



Tafel A.12: *Bestimmung des optimalen Wasserrückhaltevermögens β_p der Feststoffkombination VI*

Feststoffkombination VII				Leim-mischung	Wasser V_W/V_P [-]	Wasser Volumen [ml]	Ausbreitmaß r_a [cm]	Ausbreitmaß r_b [cm]	Ausbreitmaß $r = [(r_a+r_b)/2]$ [cm]	Ausbreitmaß $\Gamma_P = (r/r_0)^2-1$ [-]
	Dichte	Volu-men	Masse	VI.1	0,9	180	13,0	13,7	13,35	0,7822
	[g/ml]	[ml]	[g]	VI.2	1	200	19,7	17,5	18,60	2,4596
CEM II B-S 32,5 R	3,100	90	279,00	VI.3	1,1	220	25,5	23,5	24,50	5,0025
unaufber. BFA	2,700	110	297,00	VI.4	1,2	240	27,2	26,8	27,00	6,2900



Tafel A.13: *Bestimmung des optimalen Wasserrückhaltevermögens β_p der Feststoffkombination VII*

Schritt	Zeit	Bemerkung
1	-	*Zement und Achse einbringen*
2	*30 s*	*trocken durchmischen*
3	-	*Wasser zugeben - während dem Mischen*
4	*60 s*	*Mischen*
5	*60 s*	*Pause - mit Kelle Bestandteile von den Gefäßwänden entfernen und von Hand untermischen*
6	*90 s*	*Mischen*

Tafel A.14: *Mischregime der Leimversuche*

Schritt	Zeit	Bemerkung
1	-	*Zuschlag einbringen*
2	*30 s*	*trocken durchmischen*
3	-	*während des Mischens 1/3 des Wassers zugeben*
4	*30 s*	*Mischen*
5	*30 s*	*Zement, Flugasche, 2/3 des Wassers und Fließmittel (im Wasser) zugeben*
6	*60 s*	*Mischen*
7	*60 s*	*Pause - mit Kelle Bestandteile von den Gefäßwänden entfernen und von Hand untermischen*
8	*4 min*	*Mischen*
9	*3 min*	*Pause*
10	*60 s*	*Mischen*

Tafel A.15: *Mischregime der Mörtel- und Betonversuche*

MÖRTELUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	0,8 x β_p Vol. [cm³]	0,8 x β_p Masse [g]	0,85 x β_p Vol. [cm³]	0,85 x β_p Masse [g]	0,9 x β_p Vol. [cm³]	0,9 x β_p Masse [g]
Zemen t	3,10	675	2092,5	675	2092,5	675	2092,5
SFA	2,335	825	1926,4	825	1926,4	825	1926,4
FM "Isola 10"	1,18	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	1190	1190,0	1263	1263,0	1337	1337,0
Gesamtzuschlag 0/4	2,62	2200	5764,0	2260	5921,2	2320	6078,4
	Σ	**4890**		**5023**		**5157**	

VR 1 SFA.FSK III
β_p **= 0,9904**

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
1	Fließmittel	26,0 1)	25,0 1)
	==> Wasser		
2	Fließmittel	22,0	11,0
	==> Wasser		
3	Fließmittel	16,0 2)	28,0 2)
	==> Wasser		
4	Fließmittel	22,75 3)	15,0 3)
	==> Wasser		
5	Fließmittel	27,5 4)	15,0 4)
	==> Wasser		
6	Fließmittel	**27,0 5)**	**12,0 5)**
	==> Wasser		

Mischungsnummer			0,8 x β_p Vol.	0,8 x β_p Masse	0,85 x β_p Vol.	0,85 x β_p Masse	0,9 x β_p Vol.	0,9 x β_p Masse
1	Fließmittel		-------		-------		13,33	15,73
	==> Wasser						1323,67	
2	Fließmittel		-------		-------		12,00	14,16
	==> Wasser						1325,00	
3	Fließmittel		-------		-------		13,00	15,34
	==> Wasser						1324,00	
4	Fließmittel		-------		-------		13,50	15,93
	==> Wasser						1323,50	
5	Fließmittel		-------		-------		14,41	17,00
	==> Wasser						1322,59	
6	Fließmittel		-------		-------		**14,20**	**16,75**
	==> Wasser						**1322,80**	

BETONUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	Stoffraum [dm³/m³]	Masse [kg/m³]	Masse [kg/30 l]	Masse [kg/40 l]	Masse [kg/50 l]
Zement	3,10	95	295	8,84	11,78	14,73
SFA	2,335	116	271	8,13	10,83	13,54
FM "Isola 10"	1,18	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	189	189	5,67	7,56	9,45
Zuschlag 0/2 mm	2,631	322	847	25,42	33,89	42,36
Zuschlag 2/8 mm	2,612	263	687	20,61	27,48	34,35
Porenraum	-	15	-	-	-	-
	Σ	**1000**	**2288**	**68,7**	**91,5**	**114,4**

Bemerkungen:

1) *weitere 2 min Mischen: 29,5 cm; 11 s*
2) *nach 5 min Wartezeit: 25,5 cm; 18 s*
3) *nach Zugabe von 0,82 g FM*
4) *Mischung neigt zum Bluten!!!*
5) *Änderung des Mischregimes !!!*
6) *nach Zugabe von 62,4 g FM; Bluten !!!*
7) *Neigung zum Bluten geringer*
8) *fließt nicht am Strang*

Mischungsnummer			Masse [kg/30 l]	Masse [kg/40 l]	Masse [kg/50 l]	Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
7	Fließmittel	2,00	2,360	0,0708	-------	-------	87 / 88 ==> 87,5 6)	11 6)
	==> Wasser	187	187,00	5,610				
8	Fließmittel	2,82	3,328	0,100	-------	-------	85 / 84,5 ==> 84,8 7)	15 7)
	==> Wasser	186,18	186,18	5,585				
9	Fließmittel	2,40	2,832	0,085	-------	-------	75 / 76 ==> 75,5	19 8)
	==> Wasser	186,60	186,60	5,598				
10	Fließmittel	**2,54**	**2,997**	**0,090**	-------	-------	**81 / 83 ==> 82,0**	**19**
	==> Wasser	**186,46**	**186,46**	**5,594**				

Tafel A.16: *empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 1*

MÖRTELUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	0,8 x β_p Vol. [cm³]	0,8 x β_p Masse [g]	0,85 x β_p Vol. [cm³]	0,85 x β_p Masse [g]	0,9 x β_p Vol. [cm³]	0,9 x β_p Masse [g]	VR 1 BFA.FSK VI β_p = 1,0068	
Zement	3,10	*675*	*2092,5*	*675*	*2092,5*	*675*	*2092,5*		
BFA	2,70	*825*	*2227,5*	*825*	*2227,5*	*825*	*2227,5*		
FM "Isola 10"	1,18	*variabel*	*variabel*	*variabel*	*variabel*	*variabel*	*variabel*		
Wasser (inkl.FM)	1,00	*1207*	*1207,0*	*1283*	*1283,0*	*1360*	*1360,0*	**Ausbreitmaß**	**Durchlaufzeit**
Gesamtzuschlag 0/4	2,62	*2213*	*5798,1*	*2277*	*5965,7*	*2340*	*6130,8*		
	Σ	***4920***		***5060***		***5200***		**[cm]**	**[s]**

Mischungsnummer

Mischungsnummer		0,8 x β_p	0,85 x β_p	0,9 x β_p	Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
1	Fließmittel	-------	-------	*14,19* / *16,75*	*16,5*	*14,0*
	==> Wasser			*1345,81*		
2	Fließmittel	-------	-------	*14,41* / *17,00*	*17,8*	*12,0*
	==> Wasser			*1345,59*		
3	Fließmittel	-------	*14,41* / *17,00*	-------	*27,25* [1)]	*18,0* [1)]
	==> Wasser		*1223,59*			
4	Fließmittel	-------	-------	*14,75* / *17,40*	*19,25* [2)]	*13,0* [2)]
	==> Wasser			*1345,25*		
5	Fließmittel	-------	-------	*15,25* / *18,00*	*22,25*	*11,0*
	==> Wasser			*1344,75*		
6	Fließmittel	-------	-------	***16,10*** / ***19,00***	***25,25***	***10,0***
	==> Wasser			***1343,90***		

BETONUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	Stoffraum [dm³/m³]	Masse [kg/m³]	Masse [kg/30 l]	Masse [kg/40 l]	Masse [kg/50 l]
Zement	3,10	*95*	*295*	*8,84*	*11,78*	*14,73*
BFA	2,70	*115*	*311*	*9,32*	*12,42*	*15,53*
FM "Isola 10"	1,18	*variabel*	*variabel*	*variabel*	*variabel*	*variabel*
Wasser (inkl.FM)	1,00	*190*	*190*	*5,70*	*7,60*	*9,50*
Zuschlag 0/2 mm	2,631	*322*	*847*	*25,42*	*33,89*	*42,36*
Zuschlag 2/8 mm	2,612	*263*	*687*	*20,61*	*27,48*	*34,35*
Porenraum	-	*15*	-	-	-	-
	Σ	***1000***	***2329***	***69,9***	***93,2***	***116,5***

Bemerkungen:
[1)] *nach Zugabe von 6,15 g FM*
[2)] *nach 3 min Wartezeit: 18,8 cm; 12 s*
[3)] *nach Zugabe von 19,4 g FM: 82,8 cm*
[4)] *Mischung neigt stark zum Bluten und Entmischen !!!*

Mischungsnummer

Mischungsnummer		Masse [kg/30 l]	Masse [kg/40 l]	Masse [kg/50 l]	Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
7	Fließmittel	*0,1100*	-------	-------	*69,5 / 70 ==> 69,8* [3)]	*13*
	==> Wasser	*5,607*				
8	Fließmittel	-------	-------	*0,212*	*85 / 83 ==> 84* [4)]	*10* [4)]
	==> Wasser			*9,321*		
9	Fließmittel	***0,120***	-------	-------	***80 / 82 ==> 81,0***	***10***
	==> Wasser	***5,598***				
10	Fließmittel	-------	-------	*0,205*	*==> Entmischt !!!*	*==> Entmischt !!!*
	==> Wasser			*9,326*		

Tafel A.17: *empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 1*

MÖRTELUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	0,8 x β_p Vol. [cm³]	0,8 x β_p Masse [g]	0,85 x β_p Vol. [cm³]	0,85 x β_p Masse [g]	0,9 x β_p Vol. [cm³]	0,9 x β_p Masse [g]
Zement	3,10	675	2092,5	675	2092,5	675	2092,5
SFA	2,335	825	1926,4	825	1926,4	825	1926,4
FM "Woerment 676"	1,05	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	1190	1190,0	1263	1263,0	1337	1337,0
Gesamtzuschlag 0/4	2,62	2200	5764,0	2260	5921,2	2320	6078,4
	Σ	**4890**		**5023**		**5157**	

VR 2 SFA.FSK III
β_p = 0,9904

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
1	Fließmittel	14,20 / 14,91	19,5 [1)] / 21,0 [1)]
	==> Wasser	1248,80	
2	Fließmittel	23,81 / 25,00	15,0 [2)] / 29,0 [2)]
	==> Wasser	1239,20	
3	Fließmittel	28,57 / 30,00	30,0 / 13,0
	==> Wasser	1234,43	
4	Fließmittel	26,19 / 27,50	25,3 / 15,0
	==> Wasser	1236,81	
5	Fließmittel	26,19 / 27,50	31,0 / 9,0
	==> Wasser	1310,81	
6	Fließmittel	**23,81 / 25,00**	**26,0 / 11,0**
	==> Wasser	**1313,19**	

BETONUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	Stoffraum [dm³/m³]	Masse [kg/m³]	Masse [kg/30 l]	Masse [kg/40 l]	Masse [kg/50 l]
Zement	3,10	95	295	8,84	11,78	14,73
SFA	2,335	116	271	8,13	10,83	13,54
FM "Woerment 676"	1,05	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	189	189	5,67	7,56	9,45
Zuschlag 0/2 mm	2,631	322	847	25,42	33,89	42,36
Zuschlag 2/8 mm	2,612	263	687	20,61	27,48	34,35
Porenraum	-	15	-	-	-	-
	Σ	**1000**	**2288**	**68,7**	**91,5**	**114,4**

Bemerkungen:
[1)] *nach Zugabe von 8,89 g FM*
[2)] *nach Zugabe von 10,17 g FM: 35,3 cm; 9 s, Entmischt !!!*
[3)] *neigt zum Entmischen !!!*

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
7	Fließmittel	84,5 / 84 ==> 84,3 [3)]	9 [3)]
	==> Wasser		
8	Fließmittel	**81,5/83,5 ==> 82,5**	**9**
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		

Tafel A.18: *empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 2*

MÖRTELUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	0,8 x β_p Vol. [cm³]	0,8 x β_p Masse [g]	0,85 x β_p Vol. [cm³]	0,85 x β_p Masse [g]	0,9 x β_p Vol. [cm³]	0,9 x β_p Masse [g]
Zement	3,10	675	2092,5	675	2092,5	675	2092,5
BFA	2,70	825	2227,5	825	2227,5	825	2227,5
FM "Woerment 676"	1,05	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	1207	1207,0	1283	1283,0	1360	1360,0
Gesamtzuschlag 0/4	2,62	2213	5798,1	2277	5965,7	2340	6130,8
	Σ	**4920**		**5060**		**5200**	

VR 2 BFA.FSK VI
β_p = 1,0068

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
1	Fließmittel	25,71 / 27,00	15,5 [1] / 14,0
	==> Wasser	1334,29	
2	Fließmittel	27,62 / 29,00	21,3 / 10,0
	==> Wasser	1332,38	
3	Fließmittel	28,57 / 30,00	24,5 / 9,0
	==> Wasser	1331,43	
4	Fließmittel	**28,57 / 30,00**	**24,3 / 9,0**
	==> Wasser	**1331,43**	

BETONUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	Stoffraum [dm³/m³]	Masse [kg/m³]	Masse [kg/30 l]	Masse [kg/40 l]	Masse [kg/50 l]
Zement	3,10	95	295	8,84	11,78	14,73
BFA	2,70	115	311	9,32	12,42	15,53
FM "Woerment 676"	1,05	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	190	190	5,70	7,60	9,50
Zuschlag 0/2 mm	2,631	322	847	25,42	33,89	42,36
Zuschlag 2/8 mm	2,612	263	687	20,61	27,48	34,35
Porenraum	-	15	-	-	-	-
	Σ	**1000**	**2329**	**69,9**	**93,2**	**116,5**

Bemerkungen:

[1] *nach Zugabe von 1,82 g FM: 22,5 cm (ca. 15 min nach Restwasserzugabe gemessen)*
[2] *ENTMISCHT !!!*
[3] *neigt stark zum Entmischen !!!*
[4] *neigt minimal zum Bluten*

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
5	Fließmittel	5,50 / 5,775 / 0,1733	------- / ------- / 84,5/84,8 ==> 84,8 [2] / 10 [2]
	==> Wasser	184,5 / 184,50 / 5,535	
6	Fließmittel	5,10 / 5,355 / 0,1607	------- / ------- / 82,5/82,5 ==> 82,5 [3] / 9 [3]
	==> Wasser	184,90 / 184,90 / 5,547	
7	Fließmittel	4,80 / 5,040 / 0,1512	------- / ------- / 62 / 63 ==> 62,5 / 10
	==> Wasser	185,20 / 185,20 / 5,556	
8	Fließmittel	5,00 / 5,250 / 0,1575	------- / ------- / 65 / 65,5 ==> 65,3 / 11
	==> Wasser	185,00 / 185,00 / 5,550	
9	Fließmittel	5,10 / 5,355 / 0,1607	------- / ------- / 73 / 73 ==> 73,0 / 10
	==> Wasser	184,90 / 184,90 / 5,547	
8	Fließmittel	**5,20 / 5,460 / 0,1638**	------- / ------- / **81 / 81 ==> 81,0 [4] / 9 [4]**
	==> Wasser	**184,80 / 184,80 / 5,544**	

Tafel A.19: *empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 2*

MÖRTELUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	0,8 x β_p Vol. [cm³]	0,8 x β_p Masse [g]	0,85 x β_p Vol. [cm³]	0,85 x β_p Masse [g]	0,9 x β_p Vol. [cm³]	0,9 x β_p Masse [g]
Zemment	3,10	675	2092,5	675	2092,5	675	2092,5
SFA	2,335	825	1926,4	825	1926,4	825	1926,4
FM "Woerment 375"	1,08	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	1190	1190,0	1263	1263,0	1337	1337,0
Gesamtzuschlag 0/4	2,62	2200	5764,0	2260	5921,2	2320	6078,4
	Σ	**4890**		**5023**		**5157**	

VR 3 SFA.FSK III
β_p **= 0,9904**

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
1	Fließmittel	21,30 / 23,00	35,0 / 7,0
	==> Wasser	1315,70	
2	Fließmittel	19,91 / 21,50	34,0 / 8,0
	==> Wasser	1317,09	
3	Fließmittel	16,67 / 18,00	32,5 / 9,0
	==> Wasser	1320,33	
4	Fließmittel	15,28 / 16,50	31,7 / 10,0
	==> Wasser	1321,72	
5	Fließmittel	**13,89 / 15,00**	**27,5 / 12,0**
	==> Wasser	**1323,11**	
6	Fließmittel	14,81 / 16,00	22,8 [1] / 22,0 [1]
	==> Wasser	1248,19	
7	Fließmittel	16,20 / 17,50	28,3 / 18,0
	==> Wasser	1246,80	

BETONUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	Stoffraum [dm³/m³]	Masse [kg/m³]	Masse [kg/30 l]	Masse [kg/40 l]	Masse [kg/50 l]
Zemment	3,10	95	295	8,84	11,78	14,73
SFA	2,335	116	271	8,13	10,83	13,54
FM "Woerment 375"	1,08	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	189	189	5,67	7,56	9,45
Zuschlag 0/2 mm	2,631	322	847	25,42	33,89	42,36
Zuschlag 2/8 mm	2,612	263	687	20,61	27,48	34,35
Porenraum	-	15	-	-	-	-
	Σ	**1000**	**2288**	**68,7**	**91,5**	**114,4**

Bemerkungen:
[1] *nach Zugabe von 2,54 g FM: 33,5 cm; Entmischt !!!*
[2] *nach Zugabe von 12,23 g FM*

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
8	Fließmittel	82,5/82,5 ==> 82,5 [2]	9 [2]
	==> Wasser		
9	Fließmittel	**82,5/82,5 ==> 82,5**	**9**
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		

Tafel A.20: *empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 3*

MÖRTELUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	0,8 x β_p Vol. [cm³]	0,8 x β_p Masse [g]	0,85 x β_p Vol. [cm³]	0,85 x β_p Masse [g]	0,9 x β_p Vol. [cm³]	0,9 x β_p Masse [g]
Zement	3,10	675	2092,5	675	2092,5	675	2092,5
BFA	2,70	825	2227,5	825	2227,5	825	2227,5
FM "Woerment 375"	1,08	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	1207	1207,0	1283	1283,0	1360	1360,0
Gesamtzuschlag 0/4	2,62	2213	5798,1	2277	5965,7	2340	6130,8
	Σ	**4920**		**5060**		**5200**	

VR 3 BFA.FSK VI
β_p = 1,0068

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
1	Fließmittel	16,20 / 17,50	26,3 / 10,0
	==> Wasser	1343,80	
2	Fließmittel	15,28 / 16,50	23,8 / 11,0
	==> Wasser	1344,72	
3	Fließmittel	**15,74 / 17,00**	**25,5 / 10,0**
	==> Wasser	**1344,26**	
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		

BETONUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	Stoffraum [dm³/m³]	Masse [kg/m³]	Masse [kg/30 l]	Masse [kg/40 l]	Masse [kg/50 l]
Zement	3,10	95	295	8,84	11,78	14,73
BFA	2,70	115	311	9,32	12,42	15,53
FM "Worment 375"	1,08	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	190	190	5,70	7,60	9,50
Zuschlag 0/2 mm	2,631	322	847	25,42	33,89	42,36
Zuschlag 2/8 mm	2,612	263	687	20,61	27,48	34,35
Porenraum	-	15	-	-	-	-
	Σ	**1000**	**2329**	**69,9**	**93,2**	**116,5**

Bemerkungen:

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
4	Fließmittel	78 / 77,5 ==> 77,3	8
	==> Wasser		
5	Fließmittel	**83,5 / 82 ==> 82,8**	**9**
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		

Tafel A.21: *empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 3*

MÖRTELUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	0,8 x β_p Vol. [cm³]	0,8 x β_p Masse [g]	0,85 x β_p Vol. [cm³]	0,85 x β_p Masse [g]	0,9 x β_p Vol. [cm³]	0,9 x β_p Masse [g]
Zemen	3,10	675	2092,5	675	2092,5	675	2092,5
SFA	2,335	825	1926,4	825	1926,4	825	1926,4
FM "Woerment 787"	1,07	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	1190	1190,0	1263	1263,0	1337	1337,0
Gesamtzuschlag 0/4	2,62	2200	5764,0	2260	5921,2	2320	6078,4
	Σ	**4890**		**5023**		**5157**	

VR 4 SFA.FSK III
β_p = 0,9904

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
1	Fließmittel	14,02 / 15,00	28,5 / 7,0
	==> Wasser	1322,98	
2	Fließmittel	13,55 / 14,50	26,3 / 7,5
	==> Wasser	1323,45	
3	Fließmittel	13,08 / 14,00	25,0 / 8,5
	==> Wasser	1323,92	
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		

BETONUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	Stoffraum [dm³/m³]	Masse [kg/m³]	Masse [kg/30 l]	Masse [kg/40 l]	Masse [kg/50 l]
Zemen	3,10	95	295	8,84	11,78	14,73
SFA	2,335	116	271	8,13	10,83	13,54
FM "Woerment 787"	1,07	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	189	189	5,67	7,56	9,45
Zuschlag 0/2 mm	2,631	322	847	25,42	33,89	42,36
Zuschlag 2/8 mm	2,612	263	687	20,61	27,48	34,35
Porenraum	-	15	-	-	-	-
	Σ	**1000**	**2288**	**68,7**	**91,5**	**114,4**

Bemerkungen:
1) *ENTMISCHT !!!*
2) *neigt zum Entmischen !!!*

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
4	Fließmittel	81,5/81,5 ==> 87,5 1)	4 1)
	==> Wasser		
5	Fließmittel	81,5 / 82 ==> 81,8 1)	4 1)
	==> Wasser		
6	Fließmittel	80,5 / 82 ==> 81,3 1)	4 1)
	==> Wasser		
7	Fließmittel	80 / 81 ==> 80,5 2)	4 2)
	==> Wasser		
8	Fließmittel	**79,5 / 80 ==> 79,8**	**5**
	==> Wasser		

Tafel A.22: *empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 4*

MÖRTELUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	0,8 x β_p Vol. [cm³]	0,8 x β_p Masse [g]	0,85 x β_p Vol. [cm³]	0,85 x β_p Masse [g]	0,9 x β_p Vol. [cm³]	0,9 x β_p Masse [g]
Zemment	3,10	675	2092,5	675	2092,5	675	2092,5
BFA	2,70	825	2227,5	825	2227,5	825	2227,5
FM "Woerment 787 10	1,07	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	1207	1207,0	1283	1283,0	1360	1360,0
Gesamtzuschlag 0/4	2,62	2213	5798,1	2277	5965,7	2340	6130,8
	Σ	**4920**		**5060**		**5200**	

VR 4 BFA.FSK VI
β_p = 1,0068

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
1	Fließmittel	18,87 / 20,00	20,5 [1)] / 11,5 [1)]
	==> Wasser	1341,13	
2	Fließmittel	21,23 / 22,50	27,8 / 8,0
	==> Wasser	1338,77	
3	Fließmittel	19,81 / 21,00	23,0 / 9,0
	==> Wasser	1340,19	
4	Fließmittel	**20,28 / 21,50**	**24,5 / 9,0**
	==> Wasser	**1339,72**	
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		

BETONUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	Stoffraum [dm³/m³]	Masse [kg/m³]	Masse [kg/30 l]	Masse [kg/40 l]	Masse [kg/50 l]
Zement	3,10	95	295	8,84	11,78	14,73
BFA	2,70	115	311	9,32	12,42	15,53
FM "Woerment 787"	1,07	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	190	190	5,70	7,60	9,50
Zuschlag 0/2 mm	2,631	322	847	25,42	33,89	42,36
Zuschlag 2/8 mm	2,612	263	687	20,61	27,48	34,35
Porenraum	-	15	-	-	-	-
	Σ	**1000**	**2329**	**69,9**	**93,2**	**116,5**

Bemerkungen:
[1)] *nach Zugabe von 1,79 g FM*

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
5	Fließmittel	***80 / 80 ==> 80,0***	***5***
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		

Tafel A.23: *empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 4*

MÖRTELUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	0,8 x β_p Vol. [cm³]	0,8 x β_p Masse [g]	0,85 x β_p Vol. [cm³]	0,85 x β_p Masse [g]	0,9 x β_p Vol. [cm³]	0,9 x β_p Masse [g]
Zement	3,10	*675*	*2092,5*	*675*	*2092,5*	*675*	*2092,5*
SFA	2,335	*825*	*1926,4*	*825*	*1926,4*	*825*	*1926,4*
FM "Muraplast FK63.30"	1,06	*variabel*	*variabel*	*variabel*	*variabel*	*variabel*	*variabel*
Wasser (inkl.FM)	1,00	*1190*	*1190,0*	*1263*	*1263,0*	*1337*	*1337,0*
Gesamtzuschlag 0/4	2,62	*2200*	*5764,0*	*2260*	*5921,2*	*2320*	*6078,4*
	Σ	***4890***		***5023***		***5157***	

VR 5 SFA.FSK III
β_p = 0,9904

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
1	Fließmittel	*22,5 1)*	*11,0 1)*
	==> Wasser		
2	Fließmittel	*24,3*	*10,5*
	==> Wasser		
3	Fließmittel	***25,0***	***10,0***
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		

Mischungsnummer		0,8 x β_p Vol.	0,8 x β_p Masse	0,85 x β_p Vol.	0,85 x β_p Masse	0,9 x β_p Vol.	0,9 x β_p Masse
1	Fließmittel	-------		-------		*14,15*	*15,00*
	==> Wasser					*1322,85*	
2	Fließmittel	-------		-------		*16,75*	*17,75*
	==> Wasser					*1320,25*	
3	Fließmittel	-------		-------		***16,98***	***18,00***
	==> Wasser					***1320,02***	
-	Fließmittel						
	==> Wasser						
-	Fließmittel						
	==> Wasser						
-	Fließmittel						
	==> Wasser						

BETONUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	Stoffraum [dm³/m³]	Masse [kg/m³]	Masse [kg/30 l]	Masse [kg/40 l]	Masse [kg/50 l]
Zement	3,10	*95*	*295*	*8,84*	*11,78*	*14,73*
SFA	2,335	*116*	*271*	*8,13*	*10,83*	*13,54*
FM "Muraplast FK63.30"	1,06	*variabel*	*variabel*	*variabel*	*variabel*	*variabel*
Wasser (inkl.FM)	1,00	*189*	*189*	*5,67*	*7,56*	*9,45*
Zuschlag 0/2 mm	2,631	*322*	*847*	*25,42*	*33,89*	*42,36*
Zuschlag 2/8 mm	2,612	*263*	*687*	*20,61*	*27,48*	*34,35*
Porenraum	-	*15*	-	-	-	-
	Σ	***1000***	***2288***	***68,7***	***91,5***	***114,4***

Bemerkungen:
1) nach Zugabe von 2,54 g FM

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
4	Fließmittel	*69,5 / 70 ==> 69,8*	*5,5*
	==> Wasser		
5	Fließmittel	***81,5 / 81 ==> 81,3***	***5***
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		

Mischungsnummer		0,8 x β_p Vol.	0,8 x β_p Masse	0,85 x β_p Vol.	0,85 x β_p Masse	0,9 x β_p Vol.	0,9 x β_p Masse
4	Fließmittel	*2,20*	*2,332*	*0,0700*	-------	-------	
	==> Wasser	*186,8*	*186,80*	*5,604*			
5	Fließmittel	***2,40***	***2,544***	***0,0763***	-------	-------	
	==> Wasser	***186,60***	***186,60***	***5,598***			
-	Fließmittel						
	==> Wasser						
-	Fließmittel						
	==> Wasser						

Tafel A.24: *empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 5*

MÖRTELUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	0,8 x β_p Vol. [cm³]	0,8 x β_p Masse [g]	0,85 x β_p Vol. [cm³]	0,85 x β_p Masse [g]	0,9 x β_p Vol. [cm³]	0,9 x β_p Masse [g]	VR 5 BFA.FSK VI β_p = 1,0068	
Zement	3,10	675	2092,5	675	2092,5	675	2092,5		
BFA	2,70	825	2227,5	825	2227,5	825	2227,5		
FM "Muraplast FK63.30"	1,06	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel		
Wasser (inkl.FM)	1,00	1207	1207,0	1283	1283,0	1360	1360,0	Ausbreitmaß	Durchlaufzeit
Gesamtzuschlag 0/4	2,62	2213	5798,1	2277	5965,7	2340	6130,8		
	Σ	**4920**		**5060**		**5200**		[cm]	[s]
Mischungsnummer 1 Fließmittel		-------		-------		18,87	20,00	20,5 [1)]	11,5 [1)]
==> Wasser						1341,13			
2 Fließmittel		-------		-------		21,23	22,50	27,8	8,0
==> Wasser						1338,77			
3 Fließmittel		-------		-------		19,81	21,00	23,0	9,0
==> Wasser						1340,19			
4 Fließmittel		-------		-------		**20,28**	**21,50**	**24,5**	**9,0**
==> Wasser						**1339,72**			
- Fließmittel									
==> Wasser									
- Fließmittel									
==> Wasser									

BETONUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	Stoffraum [dm³/m³]	Masse [kg/m³]	Masse [kg/30 l]	Masse [kg/40 l]	Masse [kg/50 l]	Bemerkungen: [1)] nach Zugabe von 1,79 g FM	
Zement	3,10	95	295	8,84	11,78	14,73		
BFA	2,70	115	311	9,32	12,42	15,53		
FM "Muraplast FK63.30"	1,06	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel		
Wasser (inkl.FM)	1,00	190	190	5,70	7,60	9,50		
Zuschlag 0/2 mm	2,631	322	847	25,42	33,89	42,36		
Zuschlag 2/8 mm	2,612	263	687	20,61	27,48	34,35	Ausbreitmaß	Durchlaufzeit
Porenraum	-	15	-	-	-	-		
	Σ	**1000**	**2329**	**69,9**	**93,2**	**116,5**	[cm]	[s]
Mischungsnummer 5 Fließmittel		4,10	4,346	0,1304	-------	-------	77,5 / 78 ==> 77,8	9
==> Wasser		185,9	185,90	5,577				
6 Fließmittel		**4,20**	**4,452**	**0,1336**	-------	-------	**80,5 / 81 ==> 80,8**	**6**
==> Wasser		**185,80**	**185,80**	**5,574**				
- Fließmittel								
==> Wasser								
- Fließmittel								
==> Wasser								

Tafel A.25: *empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 5*

MÖRTELUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	0,8 x β_p Vol. [cm³]	0,8 x β_p Masse [g]	0,85 x β_p Vol. [cm³]	0,85 x β_p Masse [g]	0,9 x β_p Vol. [cm³]	0,9 x β_p Masse [g]
Zemen t	3,10	675	2092,5	675	2092,5	675	2092,5
SFA	2,335	825	1926,4	825	1926,4	825	1926,4
FM "Isola BV 10 Export"	1,11	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	1190	1190,0	1263	1263,0	1337	1337,0
Gesamtzuschlag 0/4	2,62	2200	5764,0	2260	5921,2	2320	6078,4
	Σ	**4890**		**5023**		**5157**	

VR 6 SFA.FSK III
β_p = 0,9904

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
1	Fließmittel	15,32 / 17,00	26,5 / 8,0
	==> Wasser	1321,68	
2	Fließmittel	13,96 / 15,50	21,3 / 9,0
	==> Wasser	1323,04	
3	Fließmittel	**14,77 / 16,40**	**24,3 / 8,0**
	==> Wasser	**1322,23**	
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		

BETONUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	Stoffraum [dm³/m³]	Masse [kg/m³]	Masse [kg/30 l]	Masse [kg/40 l]	Masse [kg/50 l]
Zement	3,10	95	295	8,84	11,78	14,73
SFA	2,335	116	271	8,13	10,83	13,54
FM "Isola BV 10 Export"	1,11	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	189	189	5,67	7,56	9,45
Zuschlag 0/2 mm	2,631	322	847	25,42	33,89	42,36
Zuschlag 2/8 mm	2,612	263	687	20,61	27,48	34,35
Porenraum	-	15	-	-	-	-
	Σ	**1000**	**2288**	**68,7**	**91,5**	**114,4**

Bemerkungen:
1) *neigt zum Entmischen !!!*

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
4	Fließmittel	56 / 56 ==> 56,0	5
	==> Wasser		
5	Fließmittel	66 / 67 ==> 66,5	5
	==> Wasser		
6	Fließmittel	82,5 / 83 ==> 82,8 1)	6 1)
	==> Wasser		
7	Fließmittel	**82 / 83 ==> 82,5**	**6**
	==> Wasser		

Tafel A.26: *empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „SFA-Betons“ der Versuchsreihe 6*

MÖRTELUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	0,8 x β_p Vol. [cm³]	0,8 x β_p Masse [g]	0,85 x β_p Vol. [cm³]	0,85 x β_p Masse [g]	0,9 x β_p Vol. [cm³]	0,9 x β_p Masse [g]
Zemment	3,10	675	2092,5	675	2092,5	675	2092,5
BFA	2,70	825	2227,5	825	2227,5	825	2227,5
FM "Isola BV 10 Export"	1,11	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	1207	1207,0	1283	1283,0	1360	1360,0
Gesamtzuschlag 0/4	2,62	2213	5798,1	2277	5965,7	2340	6130,8
	Σ	**4920**		**5060**		**5200**	

VR 6 BFA.FSK VI
β_p = 1,0068

Mischungsnummer		Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
1	Fließmittel	17,3	9,0
	==> Wasser		
2	Fließmittel	**24,8**	**7,0**
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		
-	Fließmittel		
	==> Wasser		

Mischungsnummer		0,8 x β_p		0,85 x β_p		0,9 x β_p	
1	Fließmittel	-------		-------		16,67	18,50
	==> Wasser					1343,33	
2	Fließmittel	-------		-------		**17,57**	**19,50**
	==> Wasser					**1342,43**	
-	Fließmittel						
	==> Wasser						
-	Fließmittel						
	==> Wasser						

BETONUNTERSUCHUNGEN

Bestandteil	Dichte [g/cm³]	Stoffraum [dm³/m³]	Masse [kg/m³]	Masse [kg/30 l]	Masse [kg/40 l]	Masse [kg/50 l]
Zemment	3,10	95	295	8,84	11,78	14,73
BFA	2,70	115	311	9,32	12,42	15,53
FM "Isola BV 10 Export"	1,11	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wasser (inkl.FM)	1,00	190	190	5,70	7,60	9,50
Zuschlag 0/2 mm	2,631	322	847	25,42	33,89	42,36
Zuschlag 2/8 mm	2,612	263	687	20,61	27,48	34,35
Porenraum	-	15	-	-	-	-
	Σ	**1000**	**2329**	**69,9**	**93,2**	**116,5**

Bemerkungen:
1) *ENTMISCHT !!!*
2) *neigt stark zum Entmischen !!!*

Mischungsnummer							Ausbreitmaß [cm]	Durchlaufzeit [s]
3	Fließmittel	3,50	3,885	0,1166	-------	-------	83,5 / 84 ==> 83,8 1)	9 1)
	==> Wasser	186,5	186,50	5,595				
4	Fließmittel	3,30	3,663	0,1099	-------	-------	82,5 / 84 ==> 83,3 1)	8 1)
	==> Wasser	186,70	186,70	5,601				
5	Fließmittel	3,00	3,330	0,0999	-------	-------	60,5 / 61,5 ==> 61,0	7
	==> Wasser	187,00	187,00	5,610				
6	Fließmittel	3,20	3,552	0,1066	-------	-------	74 / 75 ==> 74,5	8
	==> Wasser	186,80	186,80	5,604				
7	Fließmittel	**3,27**	**3,630**	**0,1089**	-------	-------	**77,5/77,5 ==> 77,5**	**8**
	==> Wasser	**186,73**	**186,73**	**5,602**				
8	Fließmittel	3,35	3,719	0,1116	-------	-------	83 / 84 ==> 83,5 1)	8 1)
	==> Wasser	186,65	186,65	5,600				
9	Fließmittel	3,29	3,652	0,1096	-------	-------	83 / 84 ==> 83,5 2)	9 2)
	==> Wasser	186,71	186,71	5,601				
10	Fließmittel	3,28	3,641	0,1092	-------	-------	82,5/83,5 ==> 83,0 2)	8 2)
	==> Wasser	186,72	186,72	5,602				

Tafel A.27: *empirische Entwicklung der Mischungsrezeptur des „BFA-Betons“ der Versuchsreihe 6*

Probenalter / Probennummer			VR 1 SFA.FSK III				VR 1 BFA.FSK VI			
			Druck		Biegezug	Rohdichte	Druck		Biegezug	Rohdichte
			A	B			A	B		
			[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[g/cm³]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[g/cm³]
7 Tage	Einzelwerte	1/3	36,6	36,5	5,5	2,20	40,2	39,2	6,9	2,25
		2/3	35,9	37,5	5,2	2,21	41,3	40,7	6,1	2,24
		3/3	35,7	36,4	5,6	2,19	40,4	41,4	6,0	2,26
	gemittelt		36,4		5,4	2,20	40,5		6,3	2,25
	Standardabweichung		0,63		0,21	---	0,81		0,49	---
14 Tage	Einzelwerte	1/3	46,6	47,0	7,5	2,19	50,9	51,7	7,0	2,27
		2/3	48,2	48,0	5,9	2,26	51,6	50,7	6,1	2,22
		3/3	44,8	45,4	6,3	2,18	52,4	49,8	5,3	2,26
	gemittelt		46,7		6,6	2,21	51,2		6,1	2,25
	Standardabweichung		1,37		0,83	---	0,91		0,85	---
28 Tage	Einzelwerte	1/3	57,2	55,8	6,3	2,19	61,9	59,2	8,0	2,28
		2/3	57,7	56,2	6,1	2,17	61,5	63,3	8,4	2,30
		3/3	56,6	57,0	6,6	2,19	64,6	62,2	8,1	2,31
	gemittelt		56,8		6,3	2,18	62,1		8,2	2,30
	Standardabweichung		0,69		0,25	---	1,82		0,21	---
56 Tage	Einzelwerte	1/3	67,7	67,2	7,5	2,22	68,9	68,0	8,3	2,25
		2/3	63,1	65,8	7,1	2,23	69,3	74,6	8,4	2,30
		3/3	68,2	67,2	6,9	2,22	69,8	74,4	6,8	2,26
	gemittelt		66,5		7,2	2,22	70,8		7,8	2,27
	Standardabweichung		1,86		0,31	---	2,90		0,90	---
91 Tage	Einzelwerte	1/3	74,6	75,4	7,2	2,23	78,9	73,5	8,2	2,26
		2/3	71,5	72,4	6,4	2,19	74,5	77,6	7,9	2,27
		3/3	73,4	73,8	7,4	2,20	74,1	76,3	8,1	2,24
	gemittelt		73,5		7,0	2,21	75,8		8,1	2,26
	Standardabweichung		1,42		0,53	---	2,14		0,15	---

Tafel A.28: *Druck- / Biegezugfestigkeiten und Rohdichten der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 1*

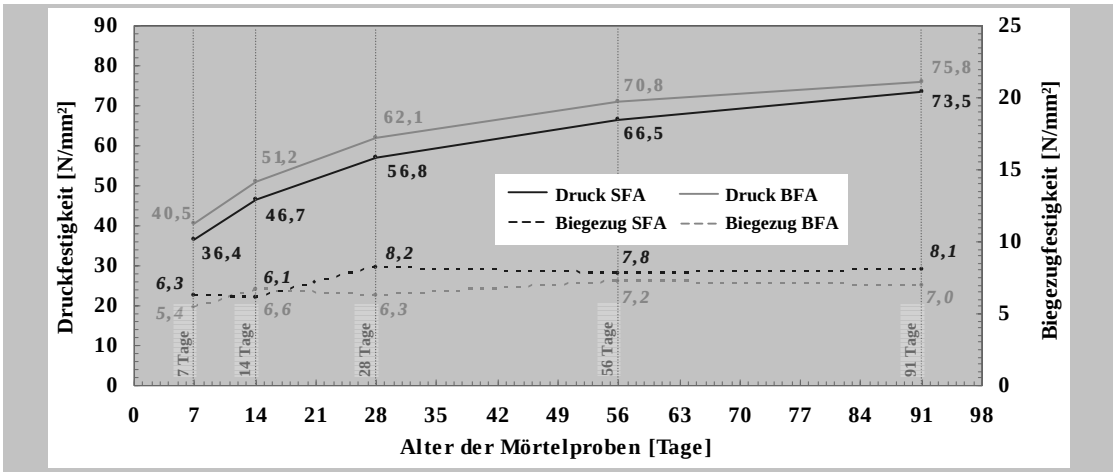


Abb. A.1: *Festigkeitsentwicklung (Druck + Biegezug) der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 1*

Probenalter / Probennummer			VR 2 SFA.FSK III				VR 2 BFA.FSK VI			
			Druck		Biegezug	Rohdichte	Druck		Biegezug	Rohdichte
			A	B			A	B		
			[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[g/cm³]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[g/cm³]
7 Tage	Einzelwerte	1/3	33,2	33,2	5,5	2,20	40,5	40,8	5,6	2,27
		2/3	35,3	34,2	5,7	2,21	41,2	41,4	5,8	2,27
		3/3	35,2	35,7	5,5	2,20	41,2	41,4	5,3	2,28
	gemittelt		34,5		5,6	2,20	41,1		5,6	2,27
	Standardabweichung		1,10		0,12	---	0,36		0,25	---
14 Tage	Einzelwerte	1/3	44,4	43,4	6,8	2,20	51,0	51,9	6,7	2,28
		2/3	44,7	43,8	6,2	2,21	51,0	51,3	6,5	2,29
		3/3	43,6	45,0	3,8	2,20	51,8	50,4	6,9	2,29
	gemittelt		44,2		5,6	2,20	51,2		6,7	2,29
	Standardabweichung		0,64		1,59	---	0,56		0,20	---
28 Tage	Einzelwerte	1/3	56,0	56,8	7,2	2,19	63,8	64,4	6,9	2,28
		2/3	56,0	53,9	6,6	2,19	64,1	65,4	7,4	2,29
		3/3	53,2	54,0	6,9	2,20	65,8	64,9	7,4	2,29
	gemittelt		55,0		6,9	2,19	64,7		7,2	2,29
	Standardabweichung		1,46		0,30	---	0,77		0,29	---
56 Tage	Einzelwerte	1/3	68,5	71,5	7,1	2,21	73,1	73,1	8,4	2,30
		2/3	65,4	68,3	7,5	2,21	76,1	76,4	7,2	2,31
		3/3	67,9	67,8	7,4	2,18	74,5	76,0	8,0	2,29
	gemittelt		68,2		7,3	2,20	74,9		7,9	2,30
	Standardabweichung		1,95		0,21	---	1,52		0,61	---
91 Tage	Einzelwerte	1/3	74,6	73,3	8,3	2,22	75,1	71,1	8,5	2,30
		2/3	70,6	68,1	8,7	2,21	75,9	75,7	9,0	2,31
		3/3	72,3	---	7,8	2,21	73,9	75,7	6,9	2,29
	gemittelt		71,8		8,3	2,21	74,6		8,1	2,30
	Standardabweichung		2,52		0,45	---	1,85		1,10	---

Tafel A.29: *Druck- / Biegezugfestigkeiten und Rohdichten der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 2*

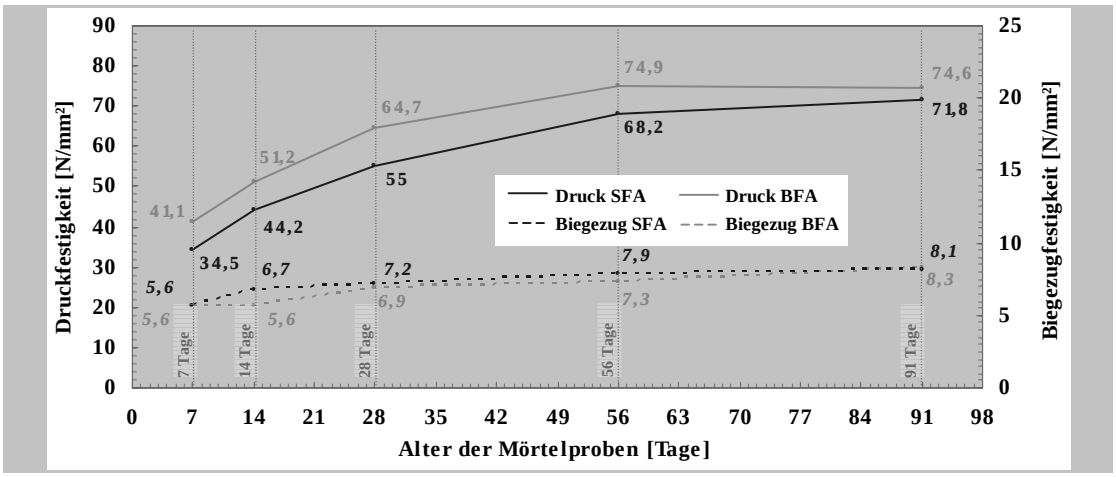


Abb. A.2: *Festigkeitsentwicklung (Druck + Biegezug) der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 2*

Probenalter / Probennummer			VR 3 SFA.FSK III				VR 3 BFA.FSK VI			
			Druck		Biegezug	Rohdichte	Druck		Biegezug	Rohdichte
			A	B			A	B		
			[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[g/cm³]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[g/cm³]
7 Tage	Einzelwerte	1/3	35,2	34,2	5,4	2,16	41,0	41,4	6,1	2,28
		2/3	33,6	34,3	5,2	2,16	42,3	41,2	6,2	2,30
		3/3	34,4	---	5,2	2,16	39,9	41,0	6,3	2,29
	gemittelt		34,3		5,3	2,16	41,1		6,2	2,29
	Standardabweichung		0,57		0,12	---	0,77		0,10	---
14 Tage	Einzelwerte	1/3	47,4	48,7	6,0	2,18	54,9	53,8	7,3	2,28
		2/3	49,8	47,8	5,6	2,19	54,3	54,9	7,0	2,29
		3/3	49,7	50,8	6,3	2,20	53,8	53,3	6,8	2,28
	gemittelt		49,0		6,0	2,19	54,2		7,0	2,28
	Standardabweichung		1,30		0,35	---	0,65		0,25	---
28 Tage	Einzelwerte	1/3	62,5	66,1	7,7	2,21	63,4	69,1	7,3	2,25
		2/3	61,8	62,5	6,1	2,20	65,2	66,1	7,5	2,24
		3/3	62,8	65,6	6,7	2,21	66,9	65,0	7,1	2,24
	gemittelt		63,6		6,8	2,21	66,0		7,3	2,24
	Standardabweichung		1,82		0,81	---	1,94		0,20	---
56 Tage	Einzelwerte	1/3	68,1	72,2	7,6	2,21	71,8	71,7	8,2	2,26
		2/3	67,6	70,4	7,1	2,21	71,0	71,9	8,1	2,27
		3/3	72,6	69,8	7,3	2,20	71,6	70,9	7,8	2,25
	gemittelt		70,1		7,3	71,60	71,5		8,0	2,26
	Standardabweichung		2,05		0,25	---	0,43		0,21	---
91 Tage	Einzelwerte	1/3	64,4	64,9	7,6	2,19	73,8	78,9	9,3	2,31
		2/3	---	61,3	8,5	2,19	79,4	75,9	9,0	2,31
		3/3	---	70,1	9,2	2,21	76,8	78,3	9,1	2,32
	gemittelt		65,2		8,4	2,20	77,2		9,1	2,31
	Standardabweichung		3,65		0,80	---	2,11		0,15	---

Tafel A.30: *Druck- / Biegezugfestigkeiten und Rohdichten der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 3*

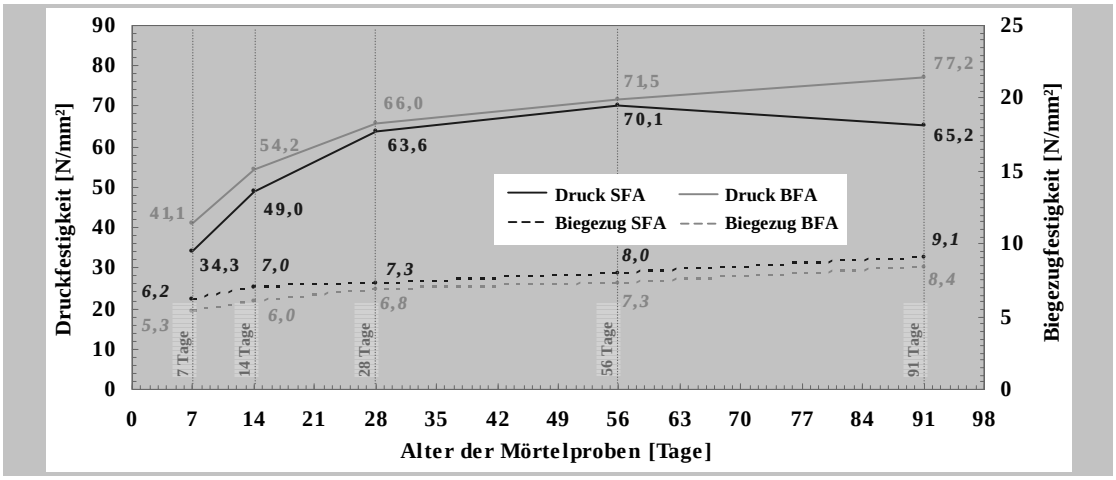


Abb. A.3: *Festigkeitsentwicklung (Druck + Biegezug) der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 3*

Probenalter / Probennummer			VR 4 SFA.FSK III				VR 4 BFA.FSK VI			
			Druck		Biegezug	Rohdichte	Druck		Biegezug	Rohdichte
			A	B			A	B		
			[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[g/cm³]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[g/cm³]
7 Tage	Einzelwerte	1/3	29,5	29,5	5,3	2,15	37,3	37,1	6,2	2,27
		2/3	29,9	29,2	5,0	2,16	36,5	36,8	6,1	2,27
		3/3	30,0	30,9	5,5	2,17	37,1	37,2	6,1	2,27
	gemittelt		29,8		5,3	2,16	37,0		6,1	2,27
	Standardabweichung		0,60		0,25	---	0,30		0,06	---
14 Tage	Einzelwerte	1/3	40,4	40,4	6,3	2,18	48,5	49,2	6,8	2,29
		2/3	40,3	38,8	6,3	2,19	49,3	49,0	6,2	2,28
		3/3	42,0	40,8	6,1	2,19	49,8	49,4	6,1	2,29
	gemittelt		40,5		6,2	2,19	49,2		6,4	2,29
	Standardabweichung		1,03		0,12	---	0,43		0,38	---
28 Tage	Einzelwerte	1/3	50,4	50,0	7,2	2,17	58,5	60,7	7,2	2,28
		2/3	51,6	48,7	6,7	2,18	58,6	60,2	6,3	2,27
		3/3	51,0	50,0	7,5	2,18	60,1	58,5	7,1	2,27
	gemittelt		50,3		7,1	2,18	59,4		6,9	2,27
	Standardabweichung		0,99		0,40	---	1,01		0,49	---
56 Tage	Einzelwerte	1/3	60,4	60,6	7,6	2,17	69,8	68,9	8,0	2,28
		2/3	60,2	60,5	7,2	2,15	67,6	68,9	8,1	2,29
		3/3	59,1	61,8	7,4	2,16	70,6	70,5	7,8	2,29
	gemittelt		60,4		7,4	2,16	69,4		8,0	2,29
	Standardabweichung		0,86		0,20	---	1,14		0,15	---
91 Tage	Einzelwerte	1/3	63,9	66,0	8,3	2,20	73,3	71,9	8,1	2,27
		2/3	64,4	66,6	7,7	2,20	73,3	70,6	8,1	2,28
		3/3	64,8	66,6	7,8	2,20	74,1	73,9	7,6	2,26
	gemittelt		65,4		7,9	2,20	72,9		7,9	2,27
	Standardabweichung		1,17		0,32	---	1,34		0,29	---

Tafel A.31: *Druck- / Biegezugfestigkeiten und Rohdichten der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 4*

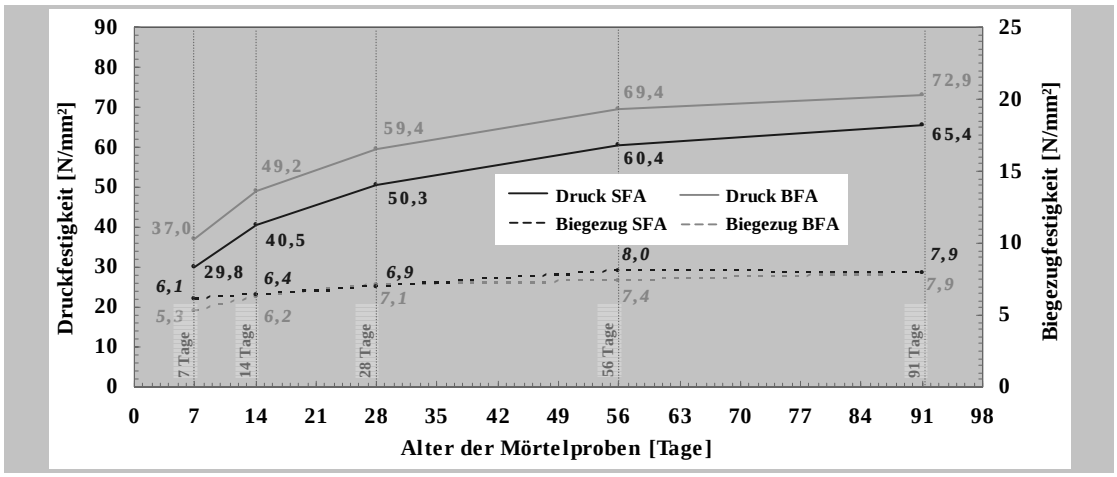


Abb. A.4: *Festigkeitsentwicklung (Druck + Biegezug) der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 4*

Probenalter / Probennummer			VR 5 SFA.FSK III				VR 5 BFA.FSK VI			
			Druck		Biegezug	Rohdichte	Druck		Biegezug	Rohdichte
			A	B			A	B		
			[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[g/cm³]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[g/cm³]
7 Tage	Einzelwerte	1/3	30,5	31,5	5,3	2,19	35,6	35,9	5,8	2,26
		2/3	30,7	31,2	5,3	2,18	34,7	35,3	6,3	2,26
		3/3	30,2	30,8	5,4	2,18	36,0	36,3	5,6	2,27
	gemittelt		30,8		5,3	2,18	35,6		5,9	2,26
	Standardabweichung		0,47		0,06	---	0,57		0,36	---
14 Tage	Einzelwerte	1/3	41,0	41,8	6,4	2,18	48,5	47,7	6,5	2,25
		2/3	42,4	42,1	6,4	2,19	47,3	47,3	6,7	2,25
		3/3	42,3	41,8	5,9	2,18	46,3	46,7	6,7	2,25
	gemittelt		41,9		6,2	2,18	47,3		6,6	2,25
	Standardabweichung		0,51		0,29	---	0,77		0,12	---
28 Tage	Einzelwerte	1/3	53,9	55,6	6,3	2,21	60,0	60,0	6,2	2,27
		2/3	53,7	54,1	6,6	2,21	58,5	58,5	6,4	2,27
		3/3	54,3	54,0	6,4	2,21	57,8	60,9	7,1	2,28
	gemittelt		54,3		6,4	2,21	59,3		6,6	2,27
	Standardabweichung		0,68		0,15	---	1,19		0,47	---
56 Tage	Einzelwerte	1/3	64,2	62,8	7,3	2,21	70,0	69,8	8,0	2,28
		2/3	65,6	65,4	7,4	2,21	70,0	67,8	8,0	2,27
		3/3	67,1	64,6	7,0	2,20	71,0	71,1	7,6	2,27
	gemittelt		65,0		7,2	2,21	70,0		7,9	2,27
	Standardabweichung		1,45		0,21	---	1,19		0,23	---
91 Tage	Einzelwerte	1/3	71,8	72,8	6,7	2,21	75,4	73,5	7,7	2,27
		2/3	73,1	71,4	7,0	2,19	74,3	74,3	8,2	2,26
		3/3	71,9	74,1	6,7	2,22	72,5	73,3	8,2	2,25
	gemittelt		72,5		6,8	2,21	73,9		8,0	2,26
	Standardabweichung		1,01		0,17	---	1,00		0,29	---

Tafel A.32: *Druck- / Biegezugfestigkeiten und Rohdichten der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 5*

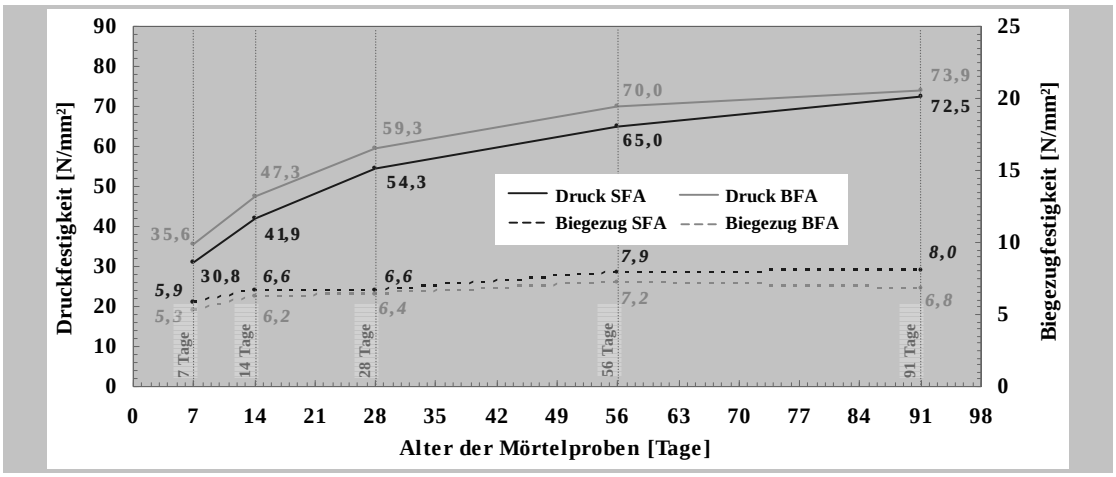


Abb. A.5: *Festigkeitsentwicklung (Druck + Biegezug) der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 5*

Probenalter / Probennummer			VR 6 SFA.FSK III				VR 6 BFA.FSK VI			
			Druck		Biegezug	Rohdichte	Druck		Biegezug	Rohdichte
			A	B			A	B		
			[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[g/cm³]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[g/cm³]
7 Tage	Einzelwerte	1/3	29,3	29,6	5,4	2,17	36,0	36,1	5,7	2,27
		2/3	30,2	30,0	5,4	2,18	32,9	38,7	5,2	2,30
		3/3	29,8	30,3	5,3	2,18	37,5	38,1	5,6	2,29
	gemittelt		29,9		5,4	2,18	36,6		5,5	2,29
	Standardabweichung		0,38		0,06	---	2,09		0,26	---
14 Tage	Einzelwerte	1/3	42,8	42,5	5,7	2,20	50,8	50,7	6,8	2,28
		2/3	42,7	42,1	5,9	2,18	51,5	51,4	6,4	2,29
		3/3	42,7	44,2	6,3	2,19	48,1	46,2	6,6	2,30
	gemittelt		42,8		6,0	2,19	49,8		6,6	2,29
	Standardabweichung		0,71		0,31	---	2,15		0,20	---
28 Tage	Einzelwerte	1/3	---	---	8,1	2,21	63,4	59,9	6,8	2,27
		2/3	53,1	53,3	6,9	2,20	62,8	60,6	6,5	2,27
		3/3	52,7	52,7	6,6	2,19	62,1	63,8	7,3	2,28
	gemittelt		53,0		7,2	2,20	62,1		6,9	2,27
	Standardabweichung		0,30		0,79	---	1,56		0,40	---
56 Tage	Einzelwerte	1/3	62,9	68,6	7,1	2,21	75,4	75,7	7,9	2,33
		2/3	62,6	64,3	7,2	2,21	74,3	71,8	7,7	2,29
		3/3	64,8	65,6	7,6	2,20	74,3	74,0	7,8	2,31
	gemittelt		64,8		7,3	2,21	74,3		7,8	2,31
	Standardabweichung		2,18		0,26	---	1,38		0,10	---
91 Tage	Einzelwerte	1/3	68,4	71,2	8,7	2,21	76,8	77,2	9,1	2,30
		2/3	70,2	70,8	8,5	2,21	79,4	78,6	8,9	2,30
		3/3	73,1	71,8	8,3	2,22	78,3	76,9	8,7	2,29
	gemittelt		70,9		8,5	2,21	77,9		8,9	2,30
	Standardabweichung		1,58		0,20	---	1,06		0,20	---

Tafel A.33: *Druck- / Biegezugfestigkeiten und Rohdichten der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 6*

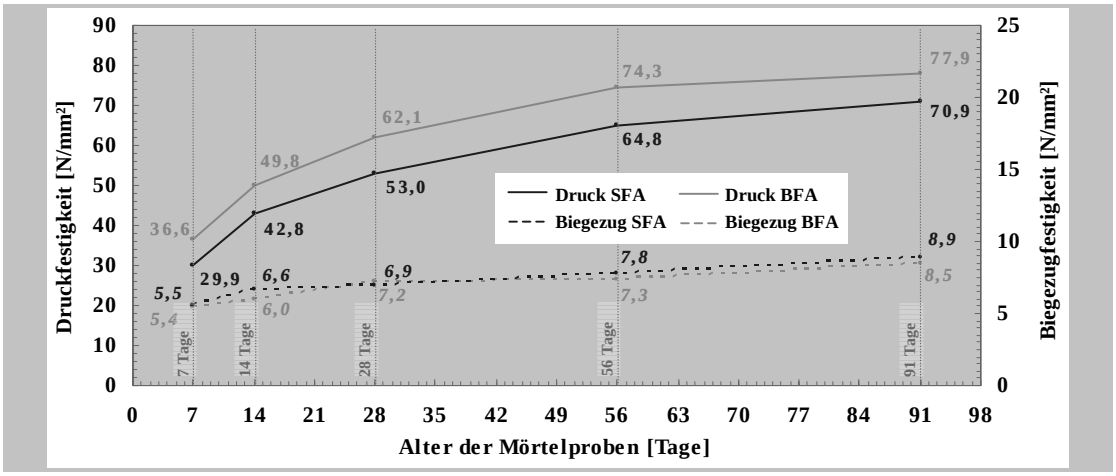


Abb. A.6: *Festigkeitsentwicklung (Druck + Biegezug) der Mörtel (SFA + BFA) der Versuchsreihe 6*

Prüfverfahren			Einheit	SFA.FSK III						BFA.FSK IV					
				VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6	VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6
Frischbeton-rohdichte	Formnummer	1	[kg/dm³]	2,28	2,30	2,27	2,14	2,26	2,26	2,35	2,34	2,31	2,19	2,34	2,30
		2	[kg/dm³]	2,28	2,29	2,28	2,18	2,25	2,28	2,34	2,31	2,31	2,24	2,34	2,29
		3	[kg/dm³]	2,29	2,31	2,28	2,16	2,26	2,29	2,35	2,35	2,31	2,21	2,33	2,30
		4	[kg/dm³]	2,28	2,30	2,26	2,15	2,26	2,26	2,33	2,33	2,31	2,24	2,34	2,31
		5	[kg/dm³]	2,28	2,30	2,26	2,18	2,23	2,26	2,34	2,33	2,33	2,21	2,32	2,30
		6	[kg/dm³]	2,29	2,30	2,25	2,14	2,26	2,27	2,35	2,31	2,31	2,20	2,32	2,28
		7	[kg/dm³]	2,29	2,29	2,27	2,16	2,25	2,27	2,35	2,32	2,31	2,26	2,34	2,31
		8	[kg/dm³]	2,29	2,29	2,27	2,15	2,24	2,25	2,34	2,32	2,33	2,20	2,34	2,28
		9	[kg/dm³]	2,30	2,31	2,27	2,17	2,26	2,27	2,34	2,34	2,34	2,27	2,33	2,29
		10	[kg/dm³]	2,31	2,30	2,26	2,16	2,26	2,26	2,35	2,34	2,31	2,22	2,33	2,30
		11	[kg/dm³]	2,29	2,29	2,26	2,18	2,23	2,24	2,35	2,32	2,33	2,20	2,31	2,28
		12	[kg/dm³]	2,29	2,27	2,26	2,16	2,25	2,25	2,36	2,31	2,30	2,18	2,33	2,29
		13	[kg/dm³]	2,31	2,28	2,25	2,14	2,24	2,23	2,37	2,29	2,32	2,19	2,32	2,28
		14	[kg/dm³]	2,30	2,27	2,25	2,18	2,26	2,27	2,32	2,31	2,29	2,21	2,32	2,29
		15	[kg/dm³]	2,30	2,28	2,24	2,14	2,24	2,24	2,36	2,29	2,32	2,26	2,32	2,28
	gemittelt		[kg/dm³]	**2,29**	**2,29**	**2,26**	**2,16**	**2,25**	**2,26**	**2,35**	**2,32**	**2,32**	**2,22**	**2,33**	**2,29**

Tafel A.34: *Einzel- und Mittelwerte der erreichten Frischbetonrohdichten aller hergestellten Betone (VR 1…VR 6)*

Prüfverfahren		Einheit	SFA.FSK III						BFA.FSK IV					
			VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6	VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6
Setzfließmaß [SFM]	Mischung 1	[cm]	85,0	83,5	81,3	78,5	80,3	82,5	85,5	82,5	84,0	82,8	81,5	57,3
	Mischung 2	[cm]	84,0	84,0	85,0	79,8	81,3	83,3	85,3	79,0	84,3	81,8	83,5	62,0
Trichter-auslaufzeit	Mischung 1	[s]	14	10	11	5	6	6	9	10	8	6	9	9
	Mischung 2	[s]	13	9	10	5	6	6	9	9	8	5	9	---
J-Ring-Versuch	SFM mit J-Ring	[cm]	81,8	80,3	80,0	76,0	75,8	77,3	84,5	68,3	81,5	81,0	78,8	---
	Differenz zu SFM	[cm]	3,2	3,2	1,3	2,5	4,5	5,2	1,0	14,2	2,5	1,8	2,7	---
t_{500}-Zeit		[s]	7,0	5,6	6,9	3,3	4,2	3,1	5,5	8,2	6,0	3,2	5,6	---
L-Kasten-Versuch	t_{200}-Zeit	[s]	3,7	3,3	2,2	1,2	1,3	1,0	5,5	3,0	1,7	1,2	2,9	1,9
	t_{400}-Zeit	[s]	6,2	5,9	5,8	2,9	3,5	2,8	3,6	6,6	4,4	2,6	5,5	5,5
	h_1 (Anfang)	[cm]	8,4	8,5	8,5	8,5	8,4	8,3	8,5	8,5	8,5	8,5	8,6	7,0
	h_2 (Ende)	[cm]	8,4	8,4	8,5	8,4	8,4	8,4	8,5	8,5	8,6	8,5	8,6	8,4
	h_2/h_1	[-]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8
Luftporen-gehalt [LP-Topf]	ohne Verdichtung	[Vol.-%]	2,4	3,1	5,4	6,9	3,0	2,9	2,5	2,6	4,4	7,2	3,0	---
	mit Verdichtung	[Vol.-%]	2,1	2,0	3,8	4,3	2,4	2,4	2,0	2,6	2,8	4,6	2,1	---
Frischbetonrohdichte		[kg/dm³]	2,29	2,29	2,26	2,16	2,25	2,26	2,35	2,32	2,32	2,22	2,33	2,29

Tafel A.35: *Zusammenstellung der ermittelten Frischbetonkennwerte aller hergestellten Betone (VR 1…VR 6)*

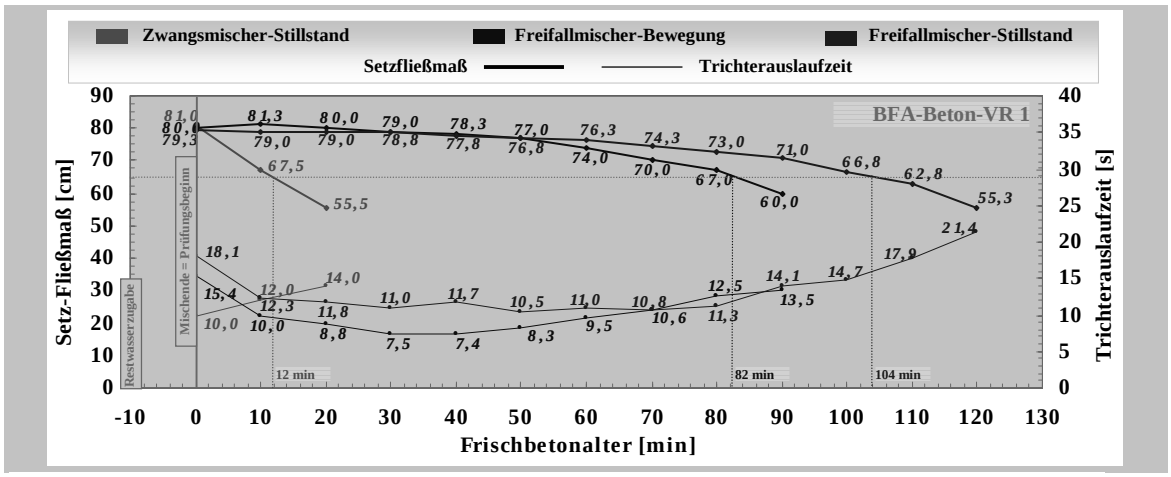


Abb. A.7: Rücksteifverhalten des „BFA-Betons der Versuchsreihe 1 bei unterschiedlichen Mischbedingungen

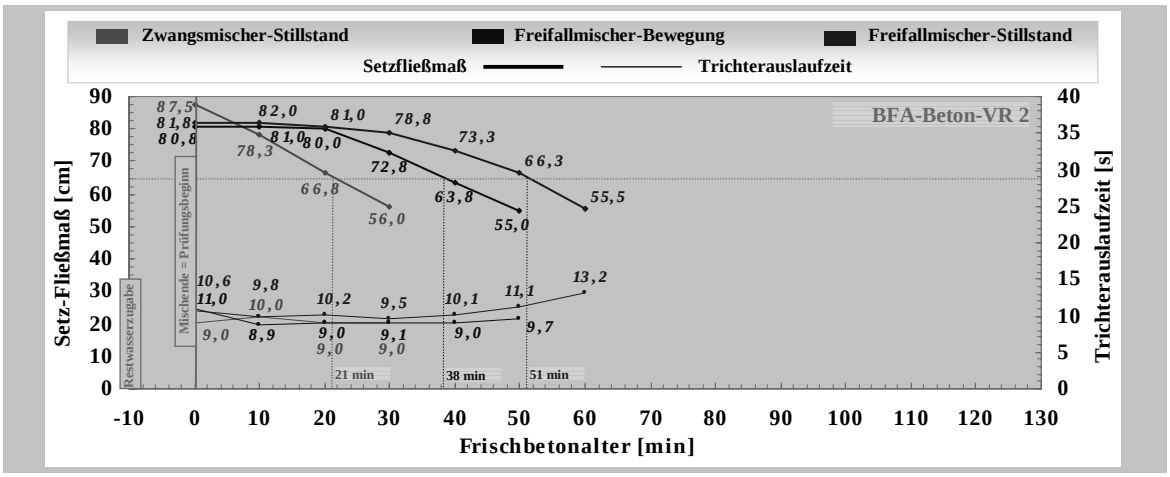


Abb. A.8: Rücksteifverhalten des „BFA-Betons der Versuchsreihe 2 bei unterschiedlichen Mischbedingungen

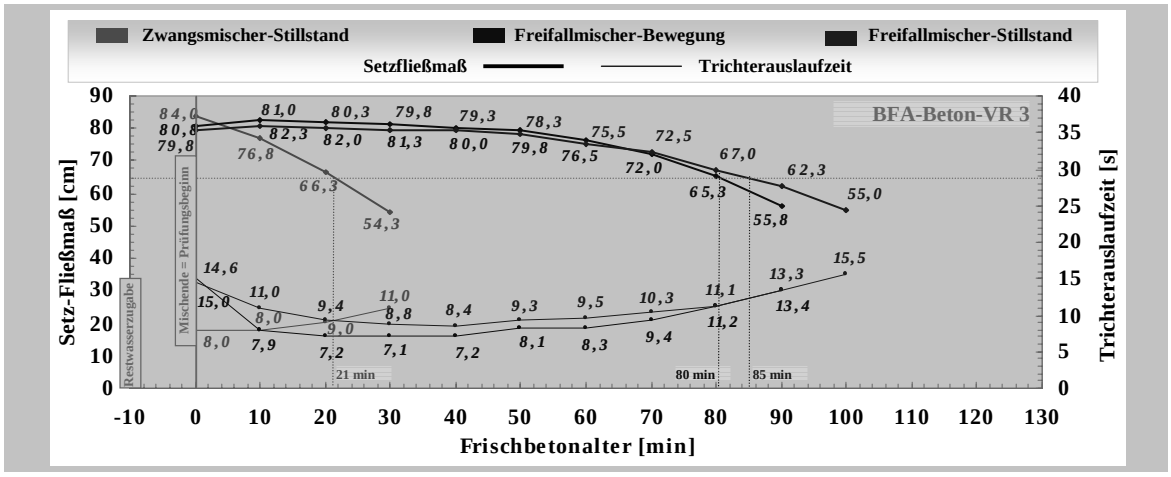


Abb. A.9: Rücksteifverhalten des „BFA-Betons der Versuchsreihe 3 bei unterschiedlichen Mischbedingungen

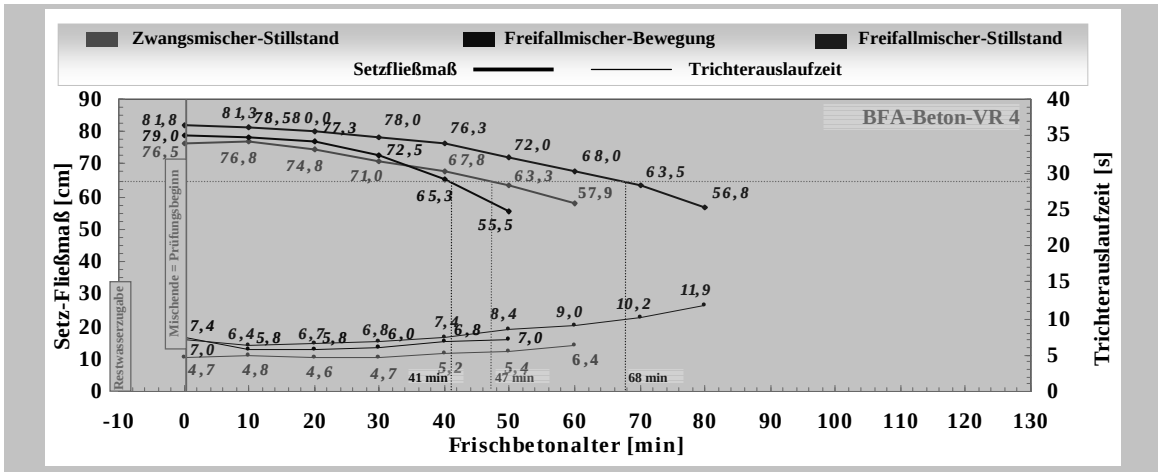


Abb. A.10: *Rücksteifverhalten des „BFA-Betons der Versuchsreihe 4 bei unterschiedlichen Mischbedingungen*

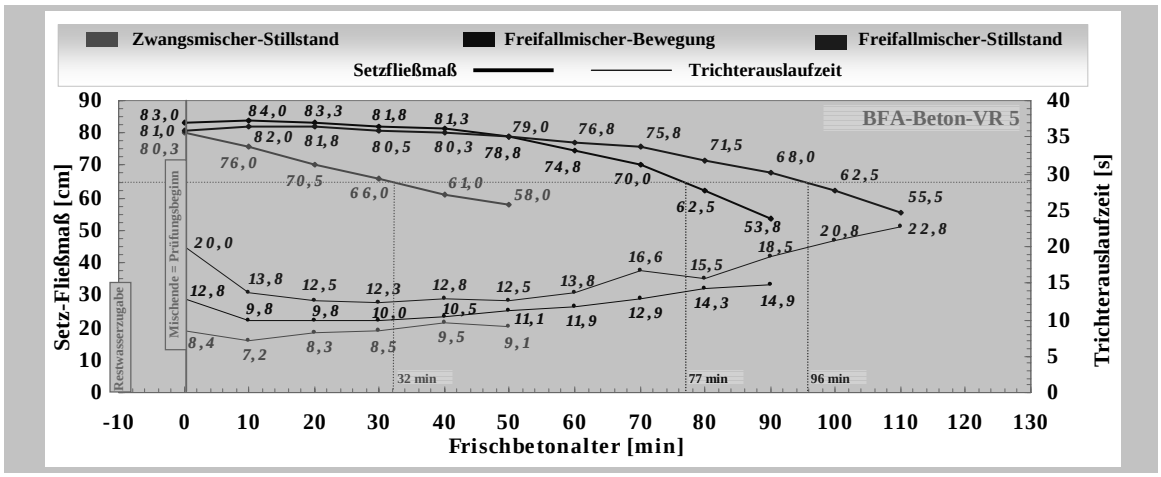


Abb. A.11: *Rücksteifverhalten des „BFA-Betons der Versuchsreihe 5 bei unterschiedlichen Mischbedingungen*

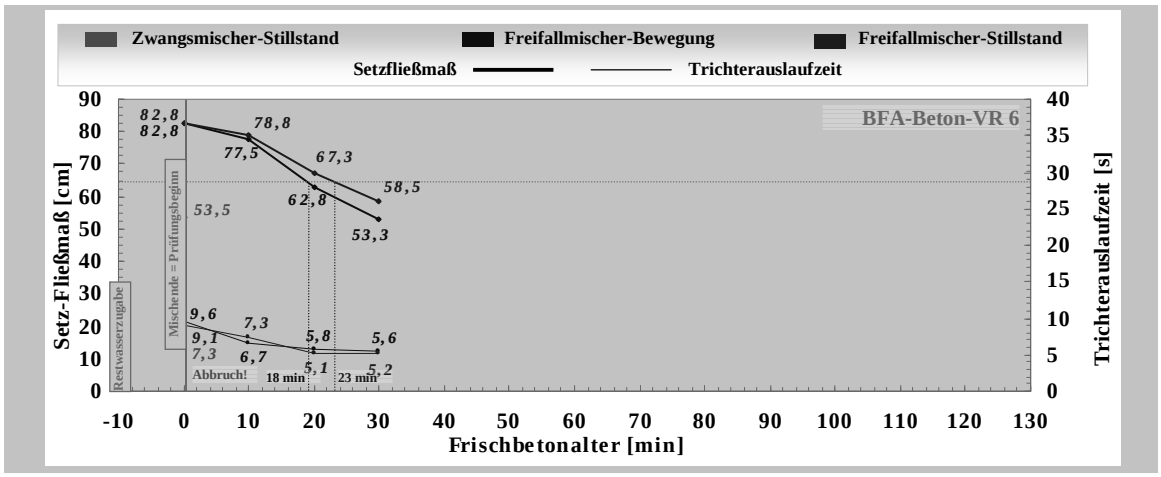


Abb. A.12: *Rücksteifverhalten des „BFA-Betons der Versuchsreihe 6 bei unterschiedlichen Mischbedingungen*

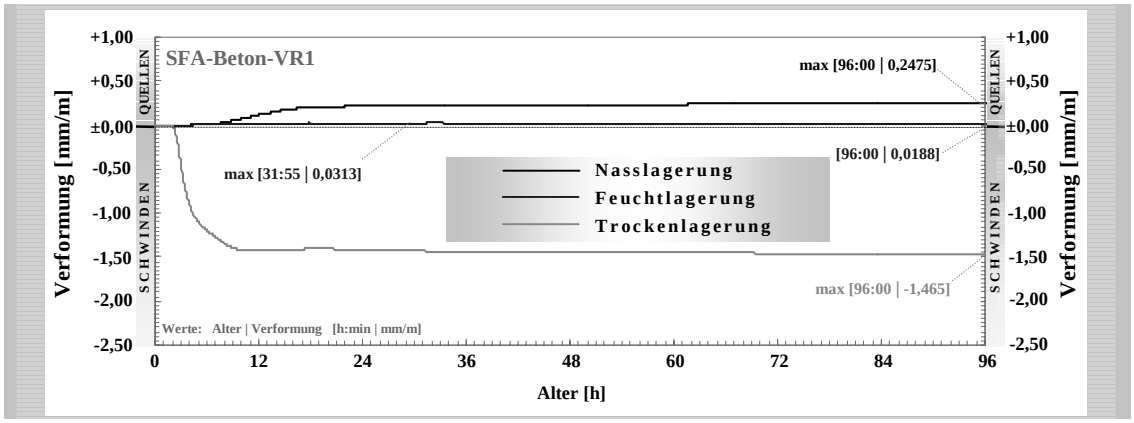


Abb. A.13: *Frühschwindverhalten des **„SFA-Betons“** der Versuchsreihe 1 bei versch. Lagerungsbedingungen*

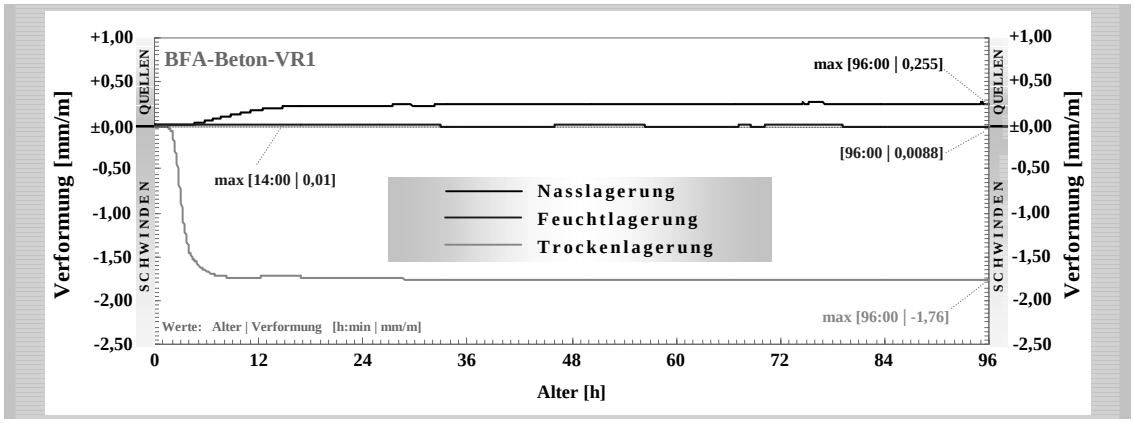


Abb. A.14: *Frühschwindverhalten des **„BFA-Betons“** der Versuchsreihe 1 bei versch. Lagerungsbedingungen*

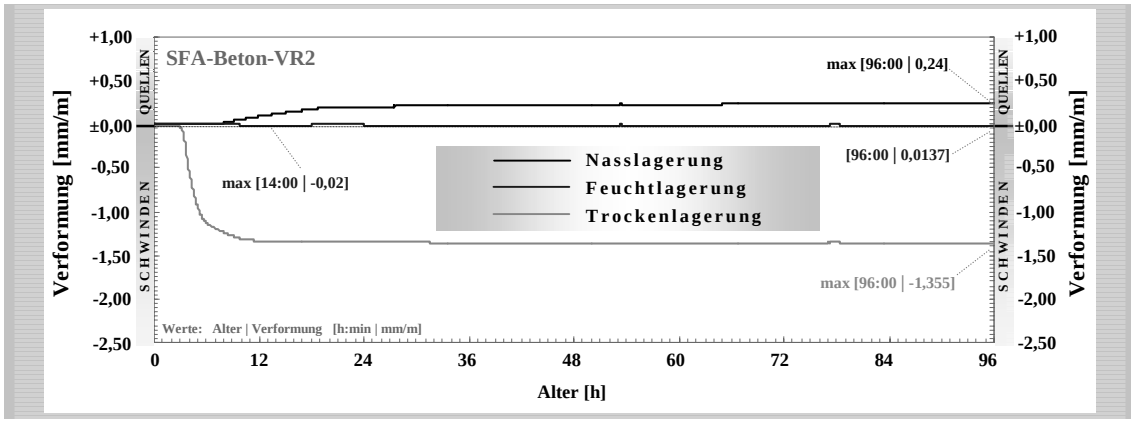


Abb. A.15: *Frühschwindverhalten des **„SFA-Betons“** der Versuchsreihe 2 bei versch. Lagerungsbedingungen*

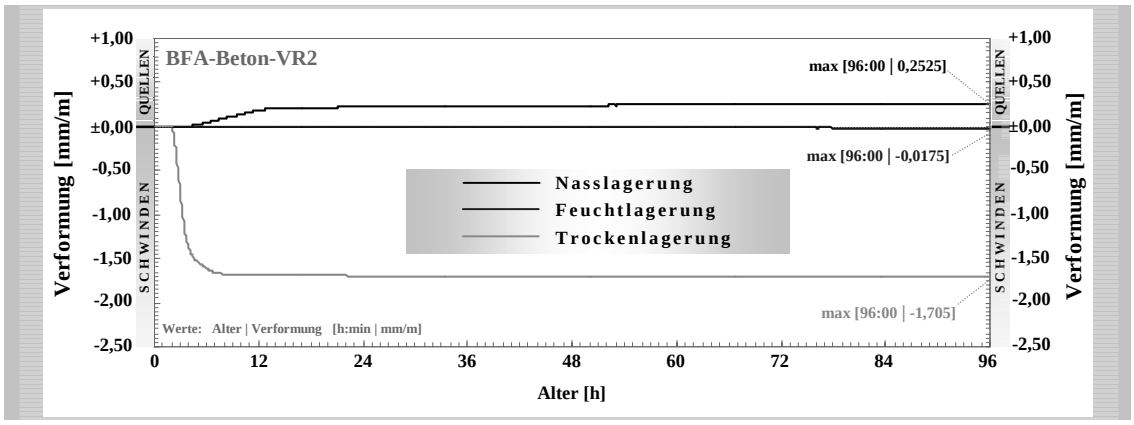


Abb. A.16: *Frühschwindverhalten des **„BFA-Betons“** der Versuchsreihe 2 bei versch. Lagerungsbedingungen*

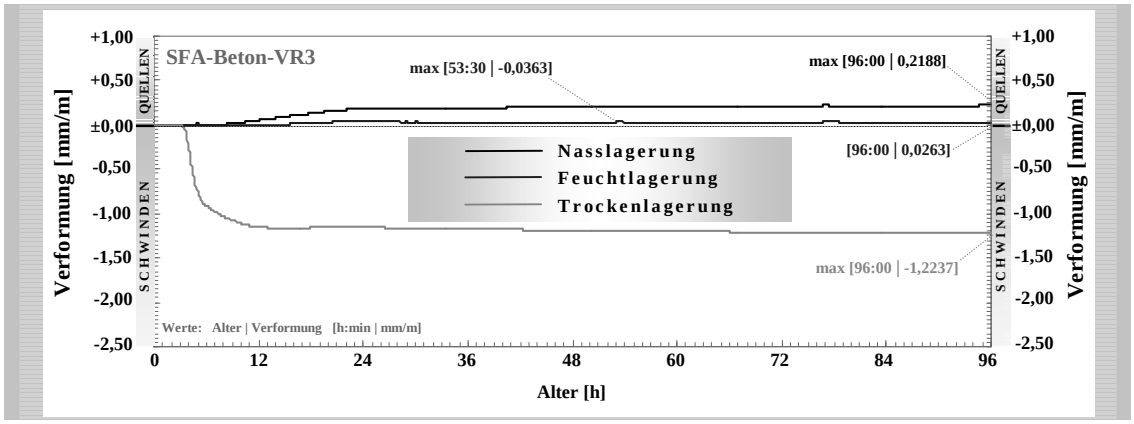


Abb. A.17: *Frühschwindverhalten des **„SFA-Betons“** der Versuchsreihe 3 bei versch. Lagerungsbedingungen*

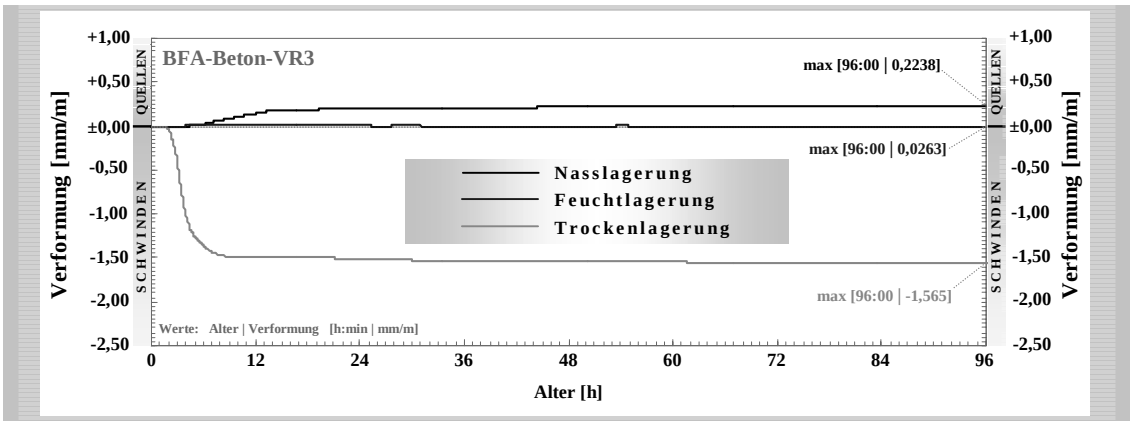


Abb. A.18: *Frühschwindverhalten des **„BFA-Betons“** der Versuchsreihe 3 bei versch. Lagerungsbedingungen*

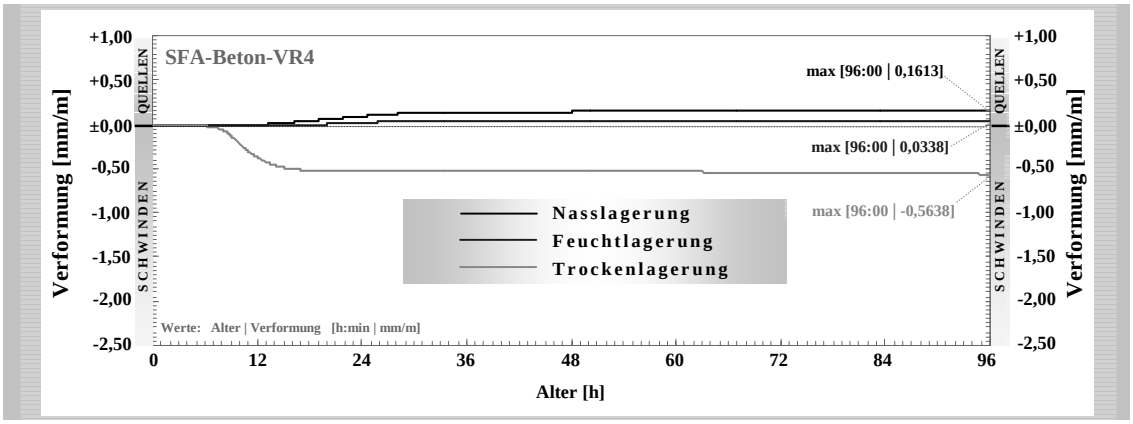


Abb. A.19: *Frühschwindverhalten des **„SFA-Betons“** der Versuchsreihe 4 bei versch. Lagerungsbedingungen*

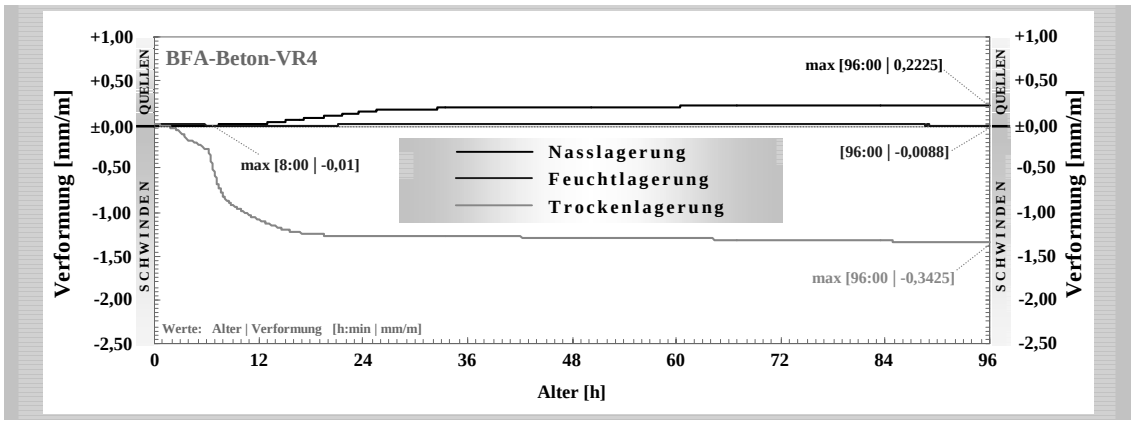


Abb. A.20: *Frühschwindverhalten des **„BFA-Betons“** der Versuchsreihe 4 bei versch. Lagerungsbedingungen*

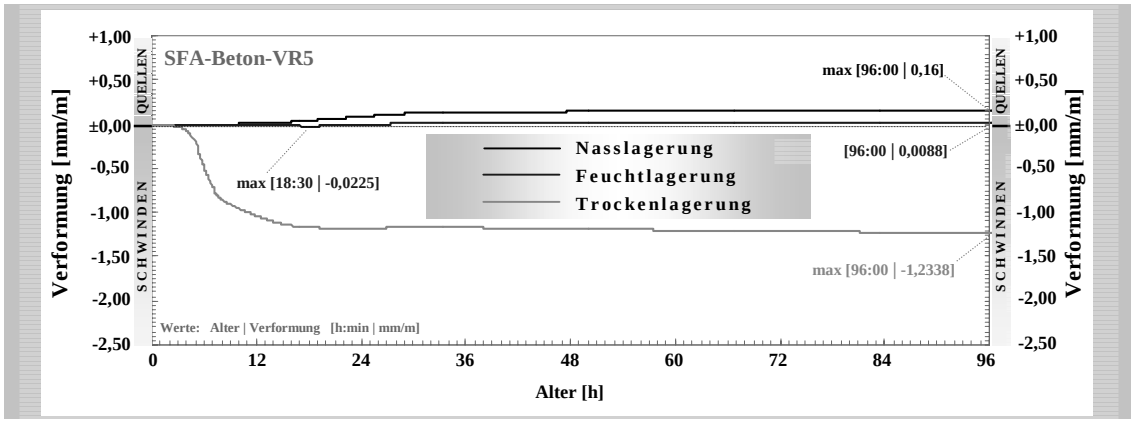


Abb. A.21: *Frühschwindverhalten des **„SFA-Betons“** der Versuchsreihe 5 bei versch. Lagerungsbedingungen*

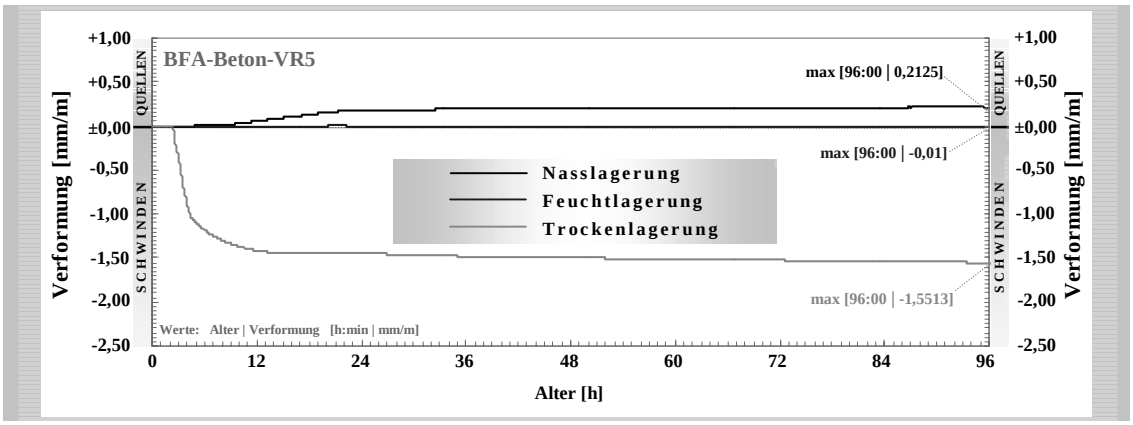


Abb. A.22: *Frühschwindverhalten des **„BFA-Betons“** der Versuchsreihe 5 bei versch. Lagerungsbedingungen*

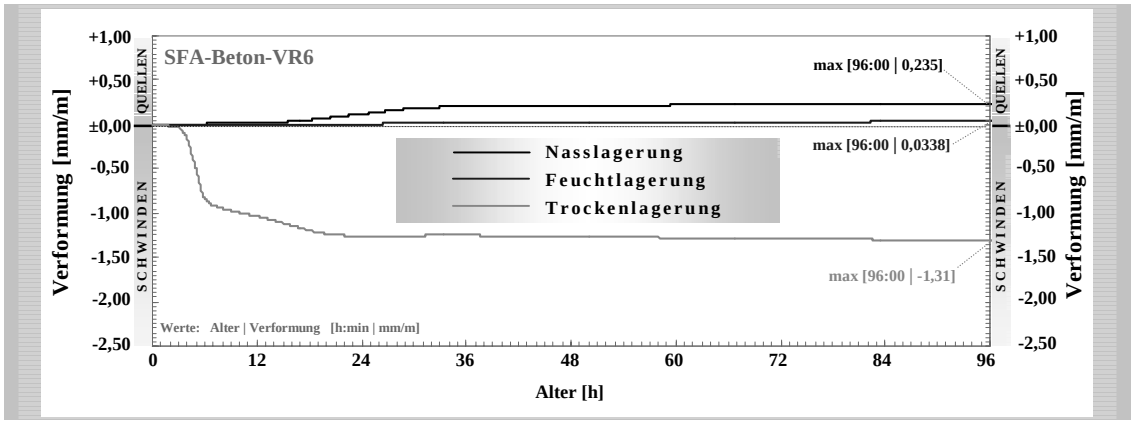


Abb. A.23: *Frühschwindverhalten des **„SFA-Betons“** der Versuchsreihe 6 bei versch. Lagerungsbedingungen*

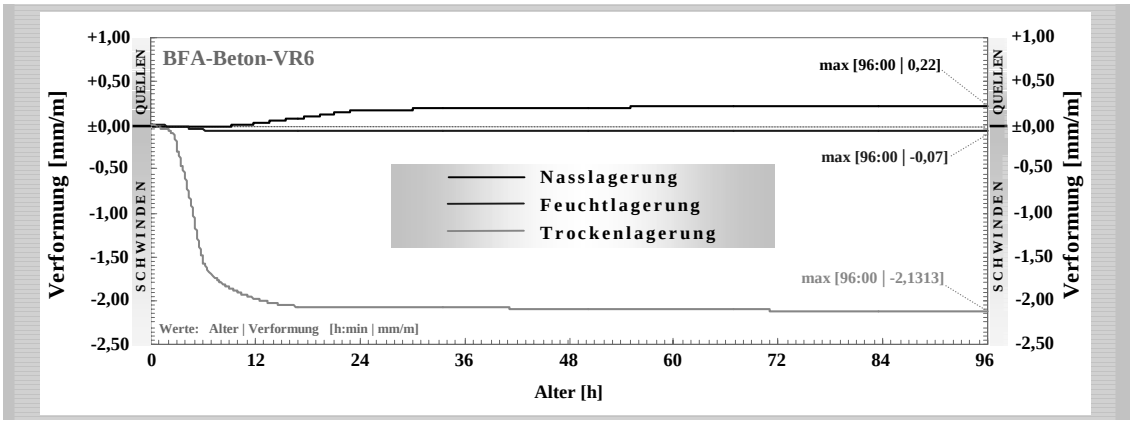


Abb. A.24: *Frühschwindverhalten des **„BFA-Betons“** der Versuchsreihe 6 bei versch. Lagerungsbedingungen*

Probenalter / Probennummer			VR 1 SFA.FSK III				VR 1 BFA.FSK VI			
			Druckfestigkeit		Rohdichte		Druckfestigkeit		Rohdichte	
			max. Last	Festigkeit	Masse	Dichte	max. Last	Festigkeit	Masse	Dichte
			[N]	[N/mm²]	[g]	[g/cm³]	[N]	[N/mm²]	[g]	[g/cm³]
7 Tage	Einzelwerte	1/3	750	33,3	7616	2,26	1043	46,4	7969	2,36
		2/3	732	32,5	7612	2,26	998	44,4	7912	2,34
		3/3	750	33,3	7635	2,26	945	42,0	7905	2,34
	gemittelt		---	**33,1**	---	**2,26**	---	**44,2**	---	**2,35**
	Standardabweichung		---	***0,46***	---	---	---	***2,18***	---	---
14 Tage	Einzelwerte	1/3	1024	45,5	7732	2,29	1318	58,6	7941	2,35
		2/3	1024	45,5	7686	2,28	1313	58,4	7914	2,34
		3/3	1015	45,1	7729	2,29	1315	58,4	7930	2,35
	gemittelt		---	**45,4**	---	**2,29**	---	**58,5**	---	**2,35**
	Standardabweichung		---	***0,23***	---	---	---	***0,11***	---	---
28 Tage	Einzelwerte	1/3	1331	59,2	7559	2,24	1566	69,6	7937	2,35
		2/3	1333	59,2	7592	2,25	1559	69,3	7944	2,35
		3/3	1307	58,1	7623	2,26	1506	66,9	7861	2,33
	gemittelt		---	**58,8**	---	**2,25**	---	**68,6**	---	**2,34**
	Standardabweichung		---	***0,64***	---	---	---	***1,46***	---	---
56 Tage	Einzelwerte	1/3	1620	72,0	7832	2,32	1738	77,2	7992	2,37
		2/3	1554	69,1	7744	2,29	1672	74,3	7856	2,33
		3/3	1459	64,8	7725	2,29	1751	77,8	7961	2,36
	gemittelt		---	**68,6**	---	**2,30**	---	**76,5**	---	**2,35**
	Standardabweichung		---	***3,60***	---	---	---	***1,88***	---	---
91 Tage	Einzelwerte	1/3	1747	77,6	7758	2,30	1601	71,2	7926	2,35
		2/3	1743	77,5	7786	2,31	1825	81,1	7917	2,35
		3/3	1690	75,1	7762	2,30	1810	80,4	7951	2,36
	gemittelt		---	**76,7**	---	**2,30**	---	**77,6**	---	**2,35**
	Standardabweichung		---	***1,41***	---	---	---	***5,57***	---	---

Tafel A.36: *Druckfestigkeiten und Rohdichten der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 1*

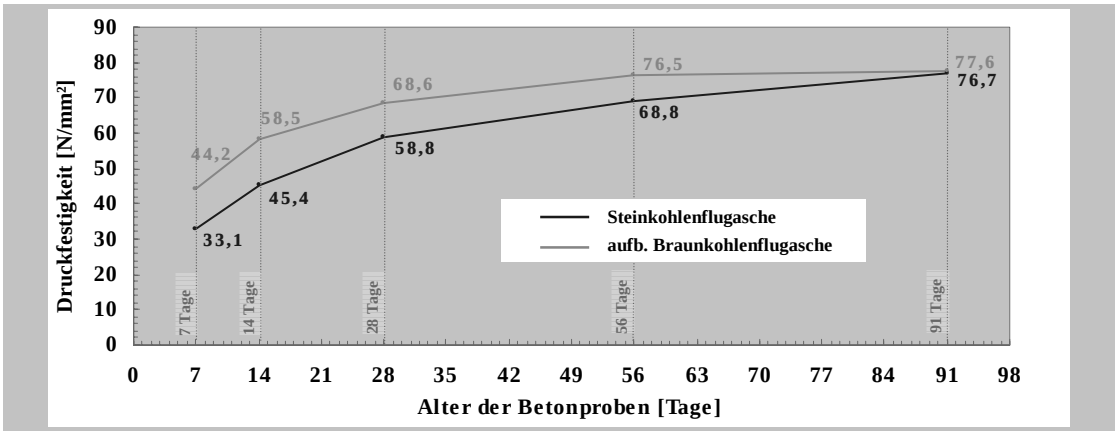


Abb. A.25: *Festigkeitsentwicklungen der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 1*

Probenalter / Probennummer			VR 2 SFA.FSK III				VR 2 BFA.FSK VI			
			Druckfestigkeit		Rohdichte		Druckfestigkeit		Rohdichte	
			max. Last	Festigkeit	Masse	Dichte	max. Last	Festigkeit	Masse	Dichte
			[N]	[N/mm²]	[g]	[g/cm³]	[N]	[N/mm²]	[g]	[g/cm³]
7 Tage	Einzelwerte	1/3	853	37,9	7738	2,29	999	44,4	7803	2,31
		2/3	834	37,1	7678	2,27	977	43,4	7797	2,31
		3/3	828	36,8	7718	2,29	1009	44,8	7895	2,34
	gemittelt		---	**37,3**	---	**2,28**	---	**44,2**	---	**2,32**
	Standardabweichung		---	***0,58***	---	---	---	***0,73***	---	---
14 Tage	Einzelwerte	1/3	1060	47,1	7681	2,28	1303	57,9	7950	2,36
		2/3	1165	51,8	7743	2,29	1298	57,7	7859	2,33
		3/3	1038	46,1	7701	2,28	1230	54,7	7822	2,32
	gemittelt		---	**48,3**	---	**2,28**	---	**56,8**	---	**2,33**
	Standardabweichung		---	***3,02***	---	---	---	***1,81***	---	---
28 Tage	Einzelwerte	1/3	1417	63,0	7769	2,30	1527	67,9	7897	2,34
		2/3	1442	64,1	7756	2,30	1338	59,5	7737	2,29
		3/3	1444	64,2	7777	2,30	1543	68,6	7849	2,33
	gemittelt		---	**63,7**	---	**2,30**	---	**65,3**	---	**2,32**
	Standardabweichung		---	***0,67***	---	---	---	***5,07***	---	---
56 Tage	Einzelwerte	1/3	1664	74,0	7793	2,31	1660	73,8	7880	2,33
		2/3	1584	70,4	7765	2,30	1707	75,9	7922	2,35
		3/3	1599	71,1	7796	2,31	1633	72,6	7816	2,32
	gemittelt		---	**71,8**	---	**2,31**	---	**74,1**	---	**2,33**
	Standardabweichung		---	***1,89***	---	---	---	***1,66***	---	---
91 Tage	Einzelwerte	1/3	1762	78,3	7829	2,32	1732	77,0	7911	2,34
		2/3	1726	76,7	7801	2,31	1632	72,5	7871	2,33
		3/3	1778	79,0	7812	2,31	1686	74,9	7752	2,30
	gemittelt		---	**78,0**	---	**2,32**	---	**74,8**	---	**2,32**
	Standardabweichung		---	***1,18***	---	---	---	***2,22***	---	---

Tafel A.37: *Druckfestigkeiten und Rohdichten der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 2*

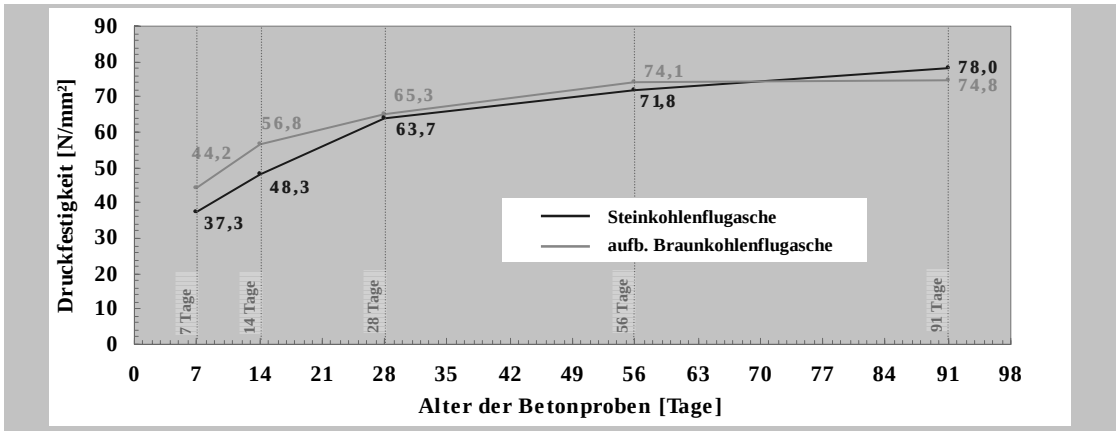


Abb. A.26: *Festigkeitsentwicklungen der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 2*

Probenalter / Probennummer			VR 3 SFA.FSK III				VR 3 BFA.FSK VI			
			Druckfestigkeit		Rohdichte		Druckfestigkeit		Rohdichte	
			max. Last	Festigkeit	Masse	Dichte	max. Last	Festigkeit	Masse	Dichte
			[N]	[N/mm²]	[g]	[g/cm³]	[N]	[N/mm²]	[g]	[g/cm³]
7 Tage	Einzelwerte	1/3	843	37,5	7676	2,27	951	42,3	7744	2,29
		2/3	808	35,9	7640	2,26	935	41,6	7783	2,31
		3/3	821	36,5	7617	2,26	975	43,3	7902	2,34
	gemittelt		---	**36,6**	---	**2,26**	---	**42,4**	---	**2,31**
	Standardabweichung		---	***0,79***	---	---	---	***0,89***	---	---
14 Tage	Einzelwerte	1/3	1140	50,7	7691	2,28	1246	55,4	7840	2,32
		2/3	1143	50,8	7687	2,28	1240	55,1	7884	2,34
		3/3	1119	49,7	7675	2,27	1242	55,2	7859	2,33
	gemittelt		---	**50,4**	---	**2,28**	---	**55,2**	---	**2,33**
	Standardabweichung		---	***0,58***	---	---	---	***0,14***	---	---
28 Tage	Einzelwerte	1/3	1339	59,5	7615	2,26	1427	63,4	7882	2,34
		2/3	1370	60,9	7697	2,28	1400	62,2	7809	2,31
		3/3	1389	61,7	7700	2,28	1447	64,3	7825	2,32
	gemittelt		---	**60,7**	---	**2,27**	---	**63,3**	---	**2,32**
	Standardabweichung		---	***1,12***	---	---	---	***1,05***	---	---
56 Tage	Einzelwerte	1/3	1450	64,4	7580	2,25	1539	68,4	7849	2,33
		2/3	1346	59,8	7599	2,25	1593	70,8	7841	2,32
		3/3	1550	68,9	7669	2,27	1554	69,1	7821	2,32
	gemittelt		---	**64,4**	---	**2,26**	---	**69,4**	---	**2,32**
	Standardabweichung		---	***4,53***	---	---	---	***1,24***	---	---
91 Tage	Einzelwerte	1/3	1599	71,1	7659	2,27	1516	67,4	7849	2,33
		2/3	1602	71,2	7671	2,27	1658	73,7	7885	2,34
		3/3	1609	71,5	7643	2,26	1648	73,2	7833	2,32
	gemittelt		---	**71,3**	---	**2,27**	---	**71,4**	---	**2,33**
	Standardabweichung		---	***0,23***	---	---	---	***3,52***	---	---

Tafel A.38: *Druckfestigkeiten und Rohdichten der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 3*

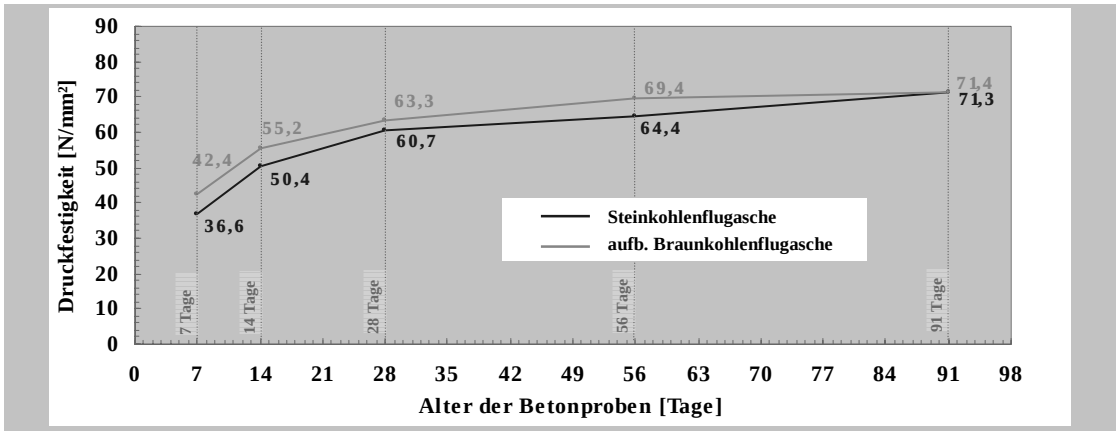


Abb. A.27: *Festigkeitsentwicklungen der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 3*

Probenalter / Probennummer			VR 4 SFA.FSK III				VR 4 BFA.FSK VI			
			Druckfestigkeit		Rohdichte		Druckfestigkeit		Rohdichte	
			max. Last	Festigkeit	Masse	Dichte	max. Last	Festigkeit	Masse	Dichte
			[N]	[N/mm²]	[g]	[g/cm³]	[N]	[N/mm²]	[g]	[g/cm³]
7 Tage	Einzelwerte	1/3	603	26,8	7300	2,16	824	36,6	7682	2,28
		2/3	639	28,4	7366	2,18	763	33,9	7425	2,20
		3/3	609	27,1	7354	2,18	744	33,1	7428	2,20
	gemittelt		---	**27,4**	---	**2,17**	---	**34,5**	---	**2,23**
	Standardabweichung		---	***0,86***	---	---	---	***1,86***	---	---
14 Tage	Einzelwerte	1/3	786	34,9	7233	2,14	975	43,3	7470	2,21
		2/3	760	33,8	7283	2,16	981	43,6	7485	2,22
		3/3	734	32,6	7252	2,15	945	42,0	7440	2,20
	gemittelt		---	**33,8**	---	**2,15**	---	**43,0**	---	**2,21**
	Standardabweichung		---	***1,16***	---	---	---	***0,86***	---	---
28 Tage	Einzelwerte	1/3	961	42,7	7265	2,15	1125	50,0	7440	2,20
		2/3	982	43,6	7325	2,17	1160	51,6	7498	2,22
		3/3	983	43,7	7311	2,17	1210	53,8	7537	2,23
	gemittelt		---	**43,3**	---	**2,16**	---	**51,8**	---	**2,22**
	Standardabweichung		---	***0,55***	---	---	---	***1,90***	---	---
56 Tage	Einzelwerte	1/3	1153	51,2	7275	2,16	1143	50,8	7377	2,19
		2/3	1132	50,3	7251	2,15	1437	63,9	7592	2,25
		3/3	1161	51,6	7380	2,19	1276	56,7	7455	2,21
	gemittelt		---	**51,1**	---	**2,16**	---	**57,1**	---	**2,21**
	Standardabweichung		---	***0,67***	---	---	---	***6,54***	---	---
91 Tage	Einzelwerte	1/3	1164	51,7	7304	2,16	1487	66,1	7591	2,25
		2/3	1279	56,8	7379	2,19	1483	65,9	7445	2,21
		3/3	1284	57,1	7370	2,18	1407	62,5	7656	2,27
	gemittelt		---	**55,2**	---	**2,18**	---	**64,8**	---	**2,24**
	Standardabweichung		---	***3,02***	---	---	---	***2,00***	---	---

Tafel A.39: *Druckfestigkeiten und Rohdichten der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 4*

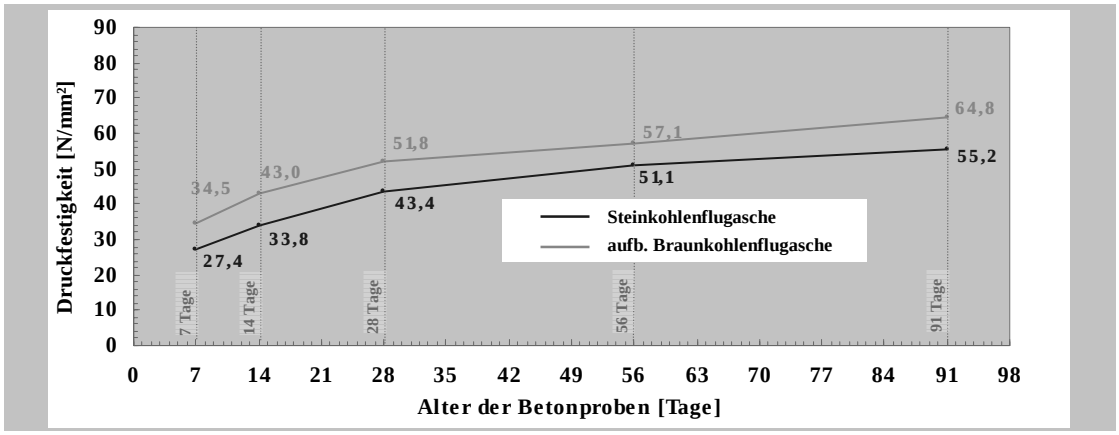


Abb. A.28: *Festigkeitsentwicklungen der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 4*

Probenalter / Probennummer			VR 5 SFA.FSK III				VR 5 BFA.FSK VI			
			Druckfestigkeit		Rohdichte		Druckfestigkeit		Rohdichte	
			max. Last	Festigkeit	Masse	Dichte	max. Last	Festigkeit	Masse	Dichte
			[N]	[N/mm²]	[g]	[g/cm³]	[N]	[N/mm²]	[g]	[g/cm³]
7 Tage	Einzelwerte	1/3	725	32,2	7631	2,26	978	43,5	7899	2,34
		2/3	748	33,2	7637	2,26	965	42,9	7849	2,33
		3/3	713	31,7	7550	2,24	982	43,6	7919	2,35
	gemittelt		---	**32,4**	---	**2,25**	---	**43,3**	---	**2,34**
	Standardabweichung		---	***0,79***	---	---	---	***0,40***	---	---
14 Tage	Einzelwerte	1/3	963	42,8	7620	2,26	1245	55,3	7886	2,34
		2/3	957	42,5	7607	2,25	1336	59,4	7902	2,34
		3/3	961	42,7	7616	2,26	1243	55,2	7848	2,33
	gemittelt		---	**42,7**	---	**2,26**	---	**56,7**	---	**2,33**
	Standardabweichung		---	***0,14***	---	---	---	***2,36***	---	---
28 Tage	Einzelwerte	1/3	1129	50,2	7585	2,25	1514	67,3	7847	2,33
		2/3	1186	52,7	7652	2,27	1519	67,5	7907	2,34
		3/3	1206	53,6	7663	2,27	1475	65,6	7904	2,34
	gemittelt		---	**52,2**	---	**2,26**	---	**66,8**	---	**2,34**
	Standardabweichung		---	***1,78***	---	---	---	***1,07***	---	---
56 Tage	Einzelwerte	1/3	1308	58,1	7571	2,24	1503	66,8	7849	2,33
		2/3	1386	61,6	7636	2,26	1619	72,0	7885	2,34
		3/3	1335	59,3	7589	2,25	1648	73,2	7880	2,33
	gemittelt		---	**59,7**	---	**2,25**	---	**70,7**	---	**2,33**
	Standardabweichung		---	***1,76***	---	---	---	***3,41***	---	---
91 Tage	Einzelwerte	1/3	1257	55,9	7544	2,24	1648	73,2	7863	2,33
		2/3	1463	65,0	7653	2,27	1735	77,1	7903	2,34
		3/3	1444	64,2	7667	2,27	1716	76,3	7821	2,32
	gemittelt		---	**61,7**	---	**2,26**	---	**75,5**	---	**2,33**
	Standardabweichung		---	***5,06***	---	---	---	***2,03***	---	---

Tafel A.40: *Druckfestigkeiten und Rohdichten der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 5*

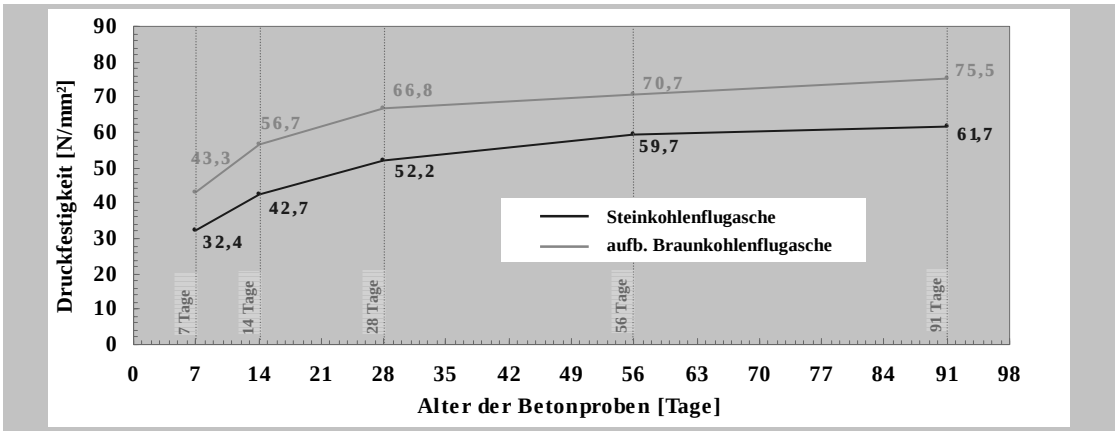


Abb. A.29: *Festigkeitsentwicklungen der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 5*

Probenalter / Probennummer			VR 6 SFA.FSK III				VR 6 BFA.FSK VI			
			Druckfestigkeit		Rohdichte		Druckfestigkeit		Rohdichte	
			max. Last	Festigkeit	Masse	Dichte	max. Last	Festigkeit	Masse	Dichte
			[N]	[N/mm²]	[g]	[g/cm³]	[N]	[N/mm²]	[g]	[g/cm³]
7 Tage	Einzelwerte	1/3	741	32,9	7662	2,27	906	40,3	7745	2,29
		2/3	732	32,5	7604	2,25	892	39,6	7717	2,29
		3/3	711	31,6	7556	2,24	911	40,5	7730	2,29
	gemittelt		---	**32,4**	---	**2,25**	---	**40,1**	---	**2,29**
	Standardabweichung		---	***0,68***	---	---	---	***0,44***	---	---
14 Tage	Einzelwerte	1/3	992	44,1	7653	2,27	1178	52,4	7786	2,31
		2/3	987	43,9	7641	2,26	1181	52,5	7782	2,31
		3/3	950	42,2	7575	2,24	1146	50,9	7757	2,30
	gemittelt		---	**43,4**	---	**2,26**	---	**51,9**	---	**2,30**
	Standardabweichung		---	***1,02***	---	---	---	***0,86***	---	---
28 Tage	Einzelwerte	1/3	1203	53,5	7644	2,26	1353	60,1	7791	2,31
		2/3	1231	54,7	7699	2,28	1382	61,4	7835	2,32
		3/3	1182	52,5	7663	2,27	1330	59,1	7744	2,29
	gemittelt		---	**53,6**	---	**2,27**	---	**60,2**	---	**2,31**
	Standardabweichung		---	***1,09***	---	---	---	***1,16***	---	---
56 Tage	Einzelwerte	1/3	1443	64,1	7672	2,27	1564	69,5	7821	2,32
		2/3	1425	63,3	7635	2,26	1497	66,5	7770	2,30
		3/3	1228	54,6	7594	2,25	1535	68,2	7742	2,29
	gemittelt		---	**60,7**	---	**2,26**	---	**68,1**	---	**2,30**
	Standardabweichung		---	***5,30***	---	---	---	***1,49***	---	---
91 Tage	Einzelwerte	1/3	1517	67,4	7739	2,29	1478	65,7	7727	2,29
		2/3	1494	66,4	7660	2,27	1638	72,8	7787	2,31
		3/3	1351	60,0	7559	2,24	1444	64,2	7733	2,29
	gemittelt		---	**64,6**	---	**2,27**	---	**67,6**	---	**2,30**
	Standardabweichung		---	***4,00***	---	---	---	***4,60***	---	---

Tafel A.41: *Druckfestigkeiten und Rohdichten der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 6*

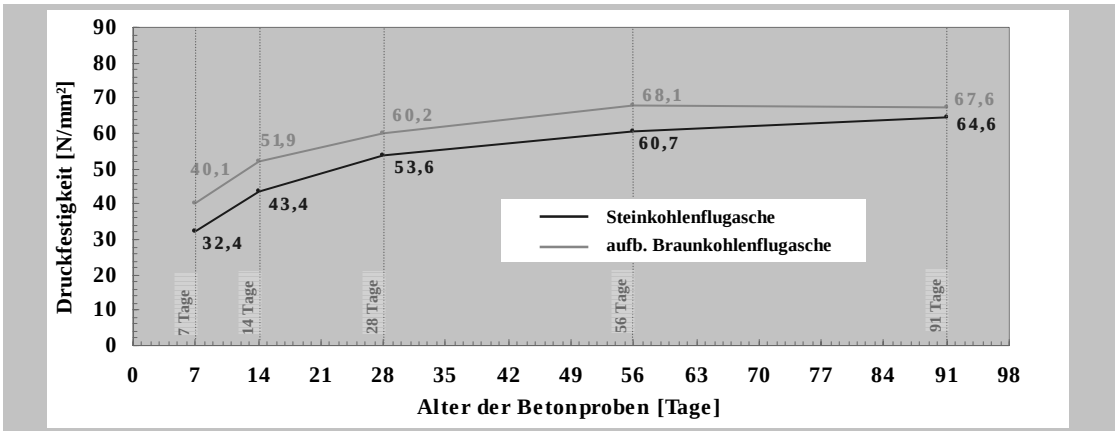


Abb. A.30: *Festigkeitsentwicklungen der Betone (SFA + BFA) der Versuchsreihe 6*

Versuchsreihe			Einheit	SFA.FSK III			BFA.FSK VI		
				E_{links}	E_{rechts}	$E_{gemittelt}$	E_{links}	E_{rechts}	$E_{gemittelt}$
VR 1	Probekörper	1/3	[N/mm²]	40300 *	27400 *	33900 *	39700 *	29400 *	34600 *
		2/3	[N/mm²]	32400	33100	32800	34400	32600	33500
		3/3	[N/mm²]	38600 *	28700 *	33700 *	31700	32500	32100
	gemittelt		[N/mm²]	---	---	**32800**	---	---	**33800**
VR 2	Probekörper	1/3	[N/mm²]	32300 *	38000 *	35200 *	37200	38200	37700
		2/3	[N/mm²]	40200 *	32800 *	36500 *	32500 *	43000 *	37750 *
		3/3	[N/mm²]	39100	31300	35200	28700 *	46800 *	37750 *
	gemittelt		[N/mm²]	---	---	**35200**	---	---	**37700**
VR 3	Probekörper	1/3	[N/mm²]	33200	33600	33400	36900 *	35600 *	36300 *
		2/3	[N/mm²]	32300	33300	32800	36200	35000	35600
		3/3	[N/mm²]	32200	33700	33000	33900	34900	34400
	gemittelt		[N/mm²]	---	---	**33100**	---	---	**35000**
VR 4	Probekörper	1/3	[N/mm²]	29900	28000	29000	36500	31700	34100
		2/3	[N/mm²]	48300 *	21600 *	35000 *	27200	37200	32200
		3/3	[N/mm²]	27900	29800	28900	25600 *	48400 *	37000 *
	gemittelt		[N/mm²]	---	---	**29000**	---	---	**33200**
VR 5	Probekörper	1/3	[N/mm²]	31000	27700	29400	49000 *	28000 *	38500 *
		2/3	[N/mm²]	32500	26500	29500	35500	41500	38500
		3/3	[N/mm²]	30300 *	59400 *	44900 *	42500	35500	39000
	gemittelt		[N/mm²]	---	---	**29500**	---	---	**38800**
VR 6	Probekörper	1/3	[N/mm²]	34200	32200	33200	31400	35500	33500
		2/3	[N/mm²]	41300 *	27600 *	34500 *	38500 *	30800 *	34700 *
		3/3	[N/mm²]	43000 *	25200 *	34100 *	27500 *	55600 *	41600
	gemittelt		[N/mm²]	---	---	**33200**	---	---	**33500**

Tafel A.42: *Einzel- und Mittelwerte der ermittelten E-Moduli aller hergestellten Betone (VR1…VR6)*

* Aufgrund eines Fehlers in der Messtechnik fanden diese Werte bei der Berechnung der gemittelten E-Moduli keine Berücksichtigung

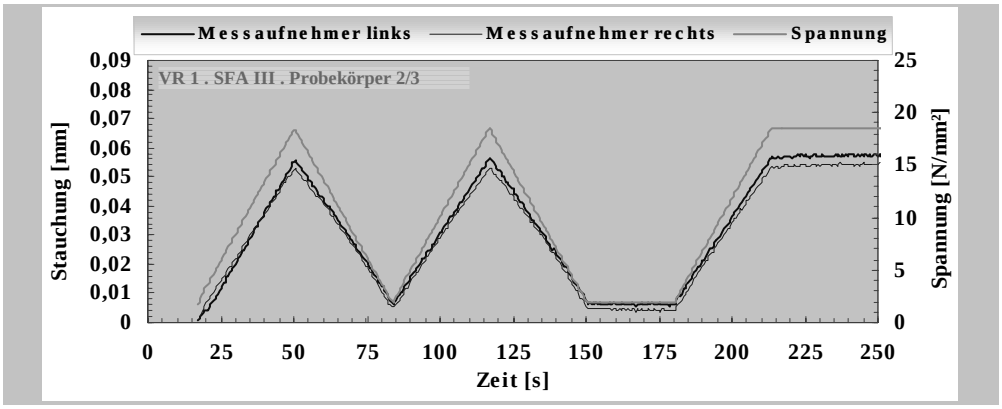


Abb. A.31: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 2/3, SFA-Beton, VR 1*

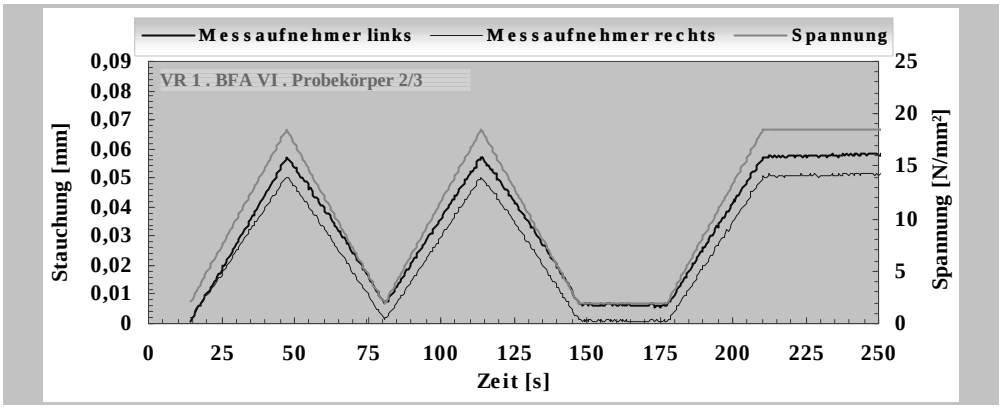


Abb. A.32: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 2/3, BFA-Beton, VR 1*

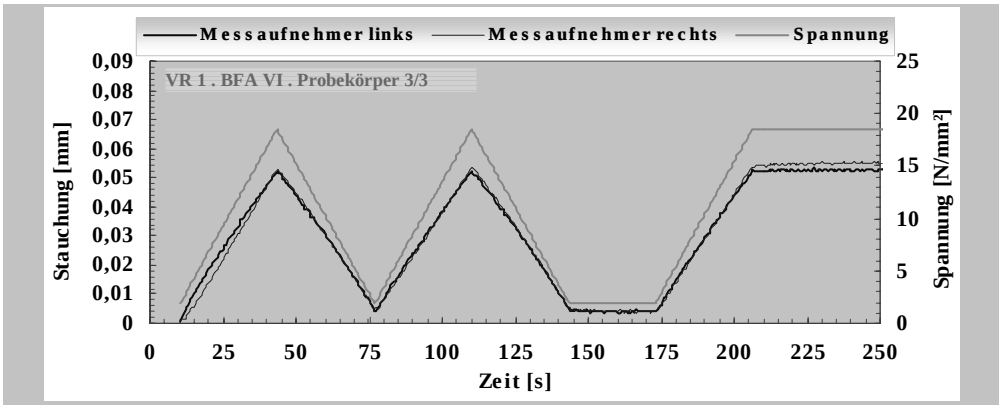


Abb. A.33: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 3/3, BFA-Beton, VR 1*

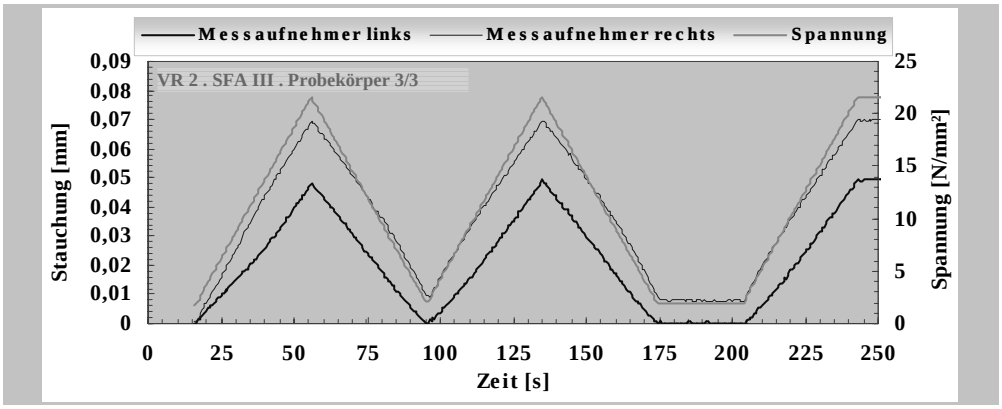


Abb. A.34: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 3/3, SFA-Beton, VR 2*

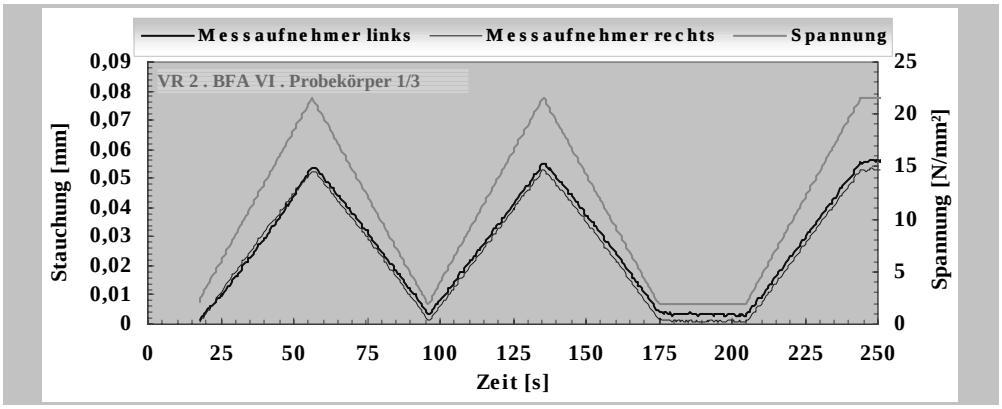


Abb. A.35: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 1/3, BFA-Beton, VR 2*

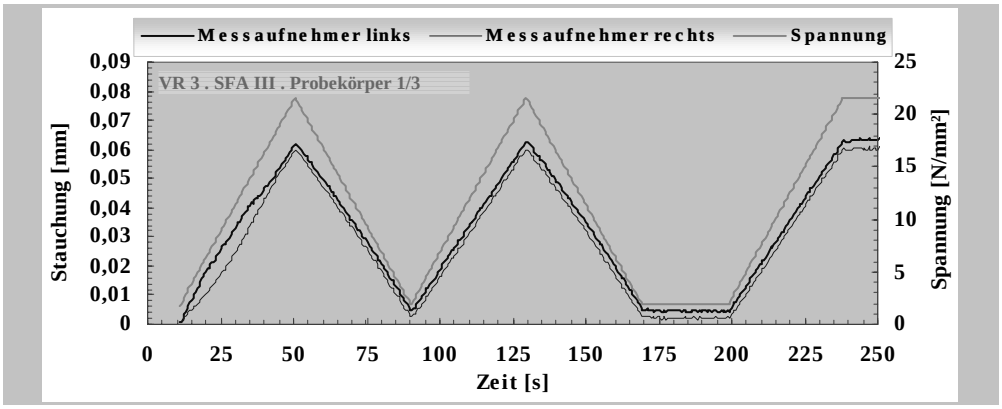


Abb. A.36: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 1/3, SFA-Beton, VR 3*

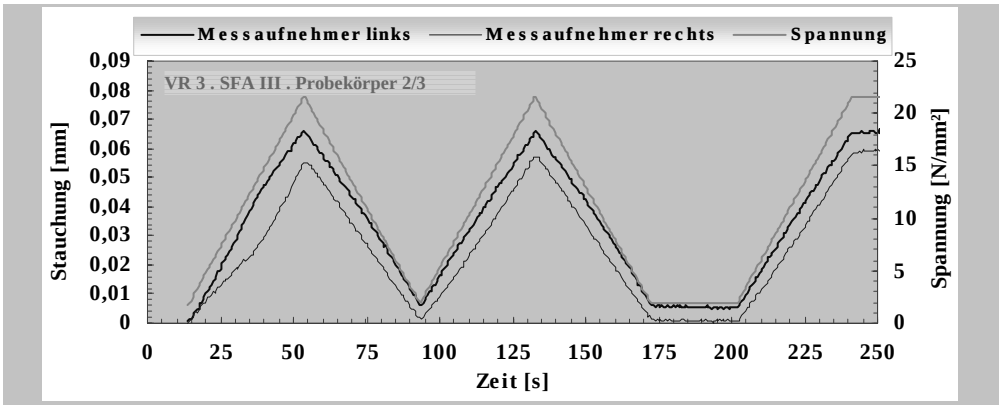


Abb. A.37: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 2/3, SFA-Beton, VR 3*

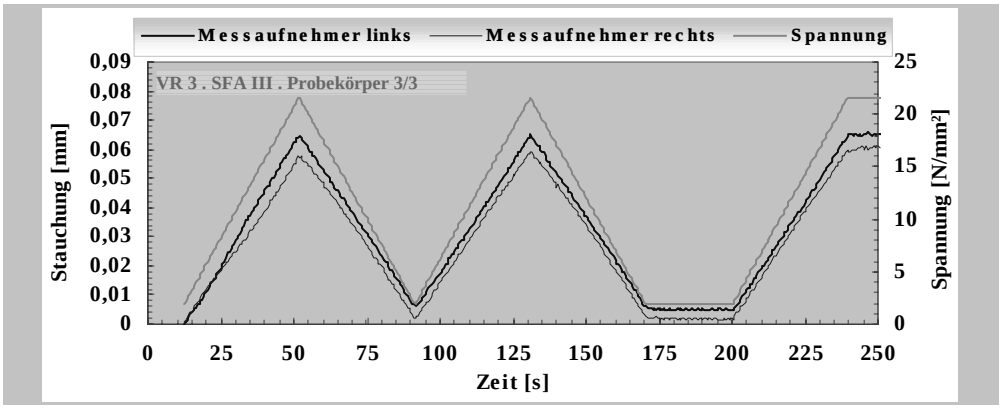


Abb. A.38: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 3/3, SFA-Beton, VR 3*

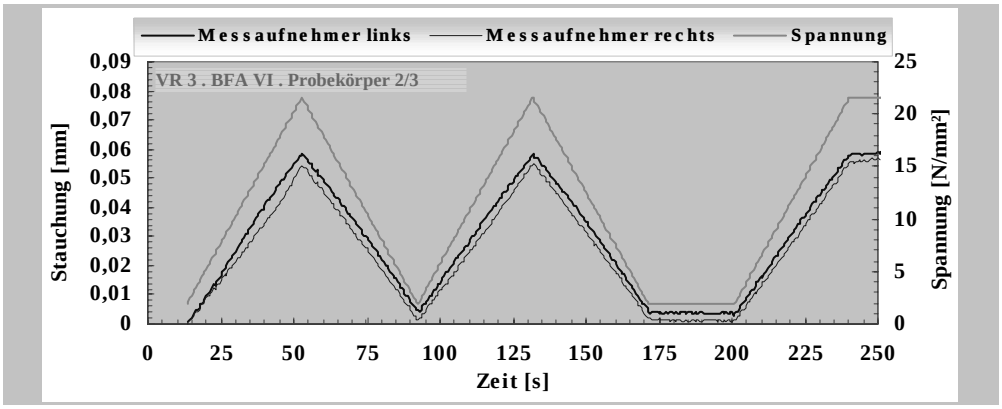


Abb. A.39: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 2/3, BFA-Beton, VR 3*

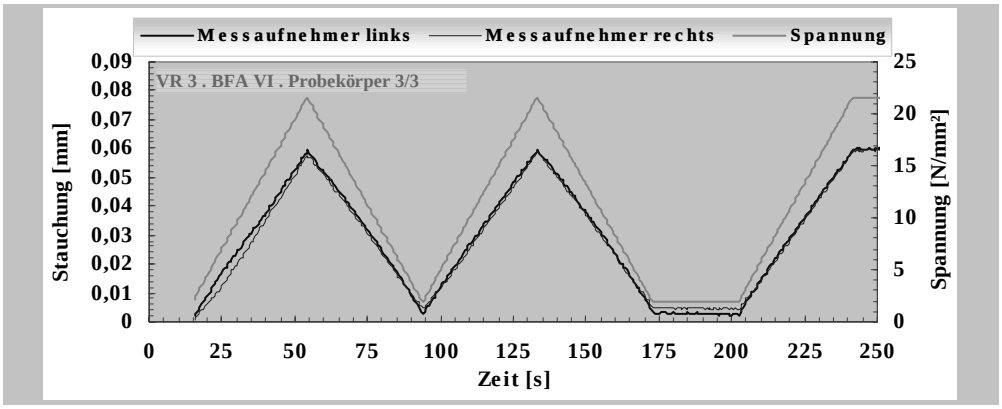


Abb. A.40: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 3/3, BFA-Beton, VR 3*

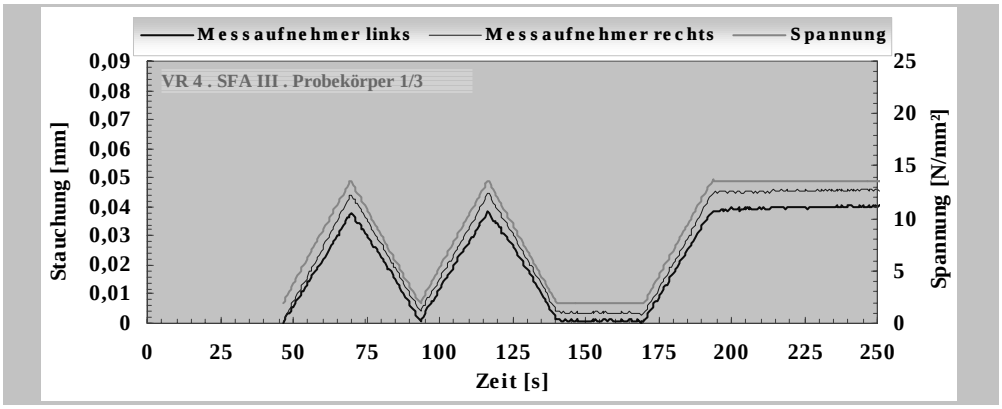


Abb. A.41: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 1/3, SFA-Beton, VR 4*

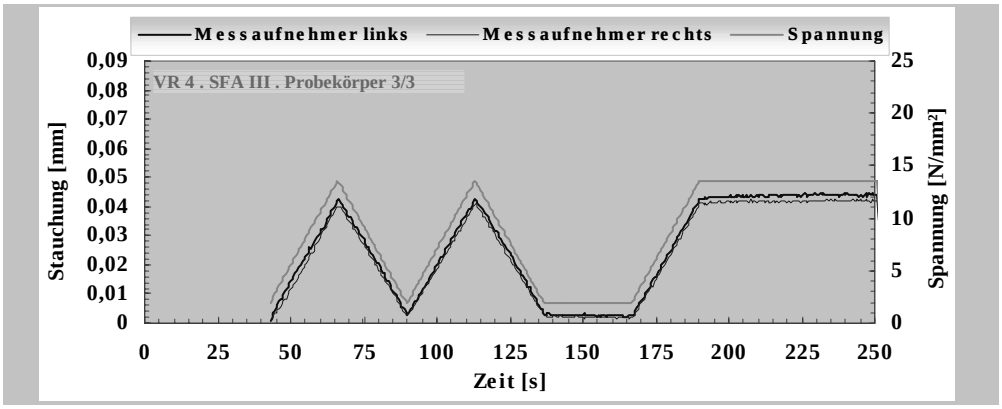


Abb. A.42: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 3/3, SFA-Beton, VR 4*

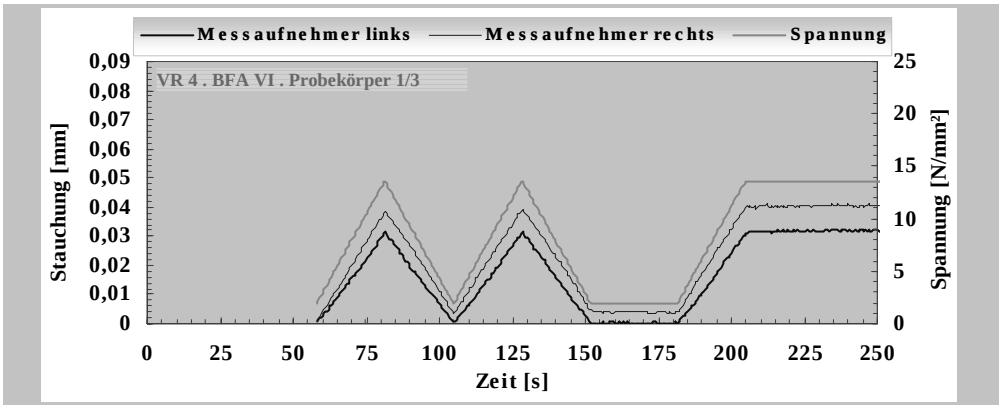


Abb. A.43: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 1/3, BFA-Beton, VR 4*

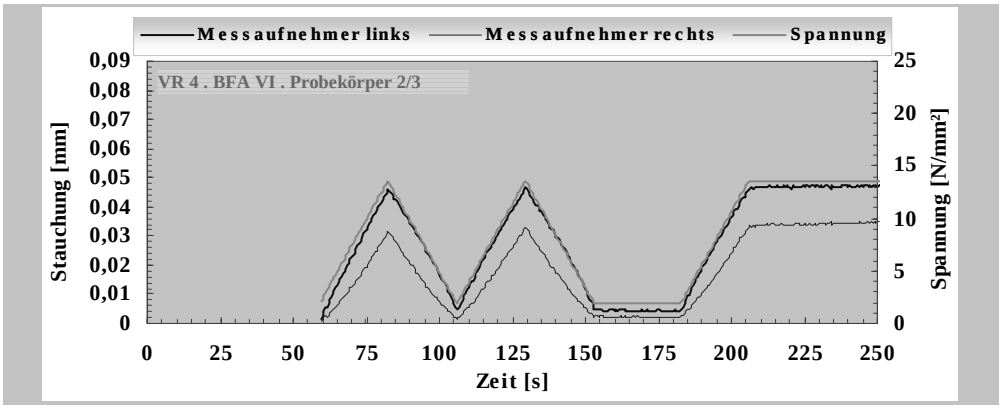


Abb. A.44: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 2/3, BFA-Beton, VR 4*

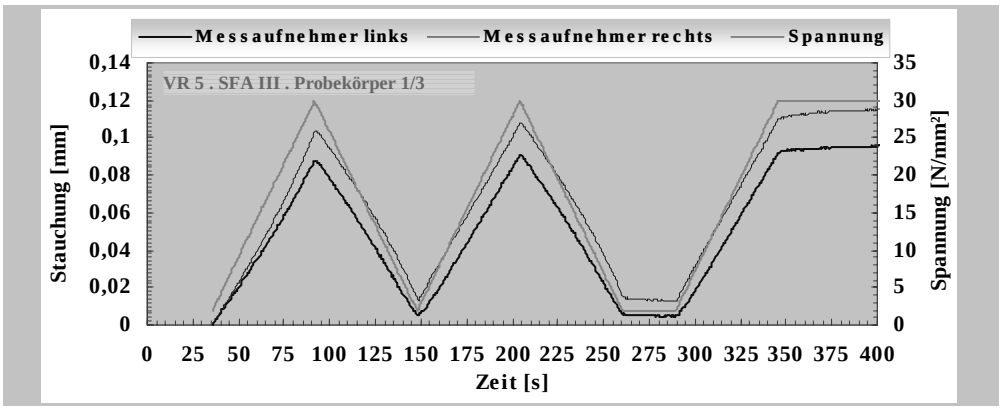


Abb. A.45: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 1/3, SFA-Beton, VR 5*

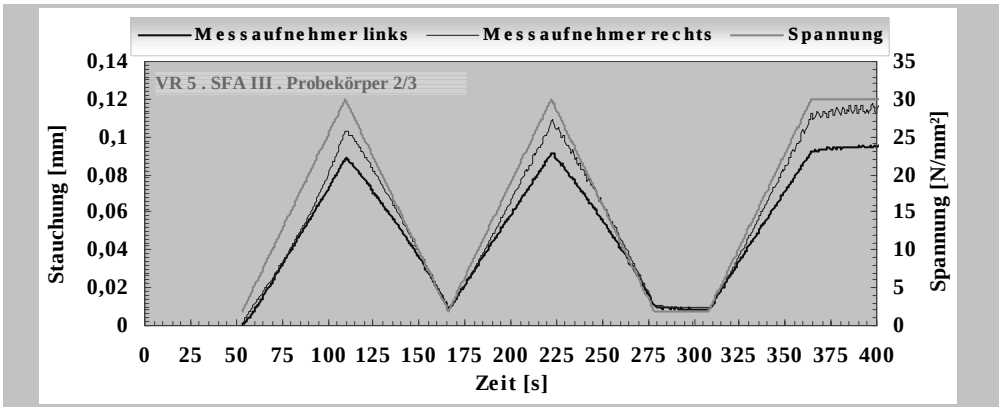


Abb. A.46: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 2/3, SFA-Beton, VR 5*

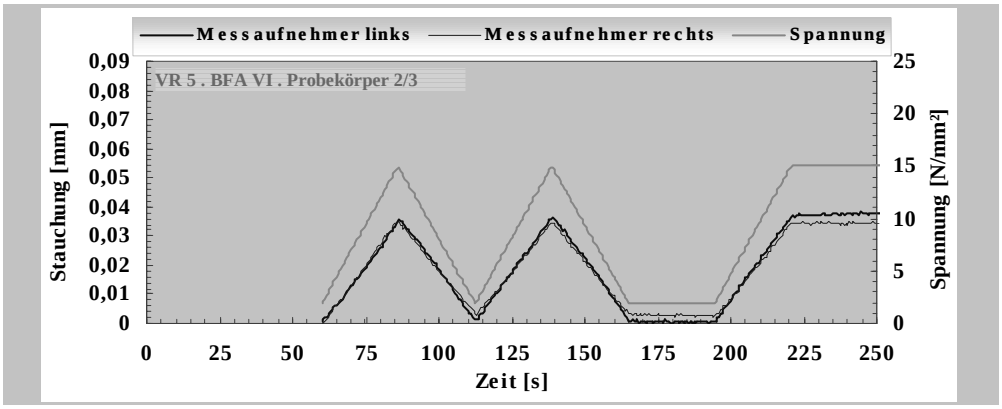


Abb. A.47: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 2/3, BFA-Beton, VR 5*

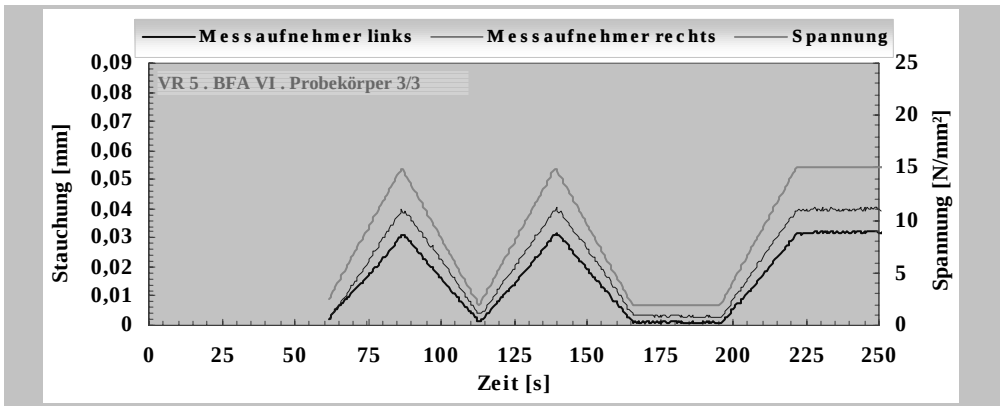


Abb. A.48: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 3/3, BFA-Beton, VR 5*

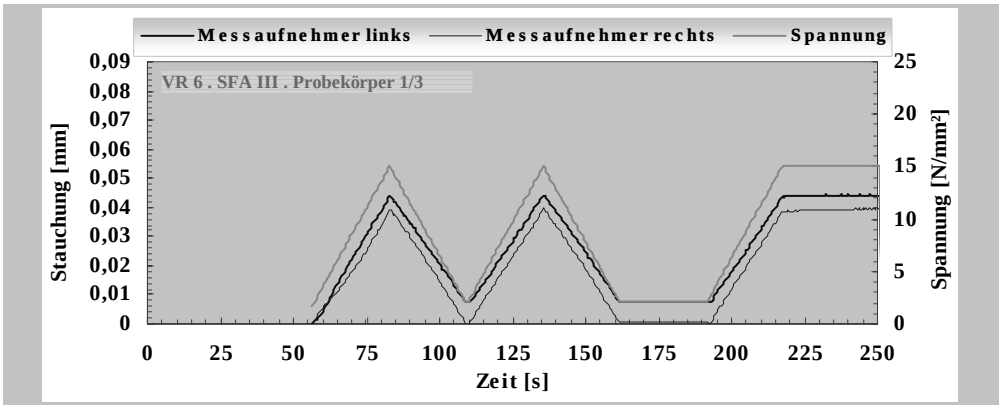


Abb. A.49: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 1/3, SFA-Beton, VR 6*

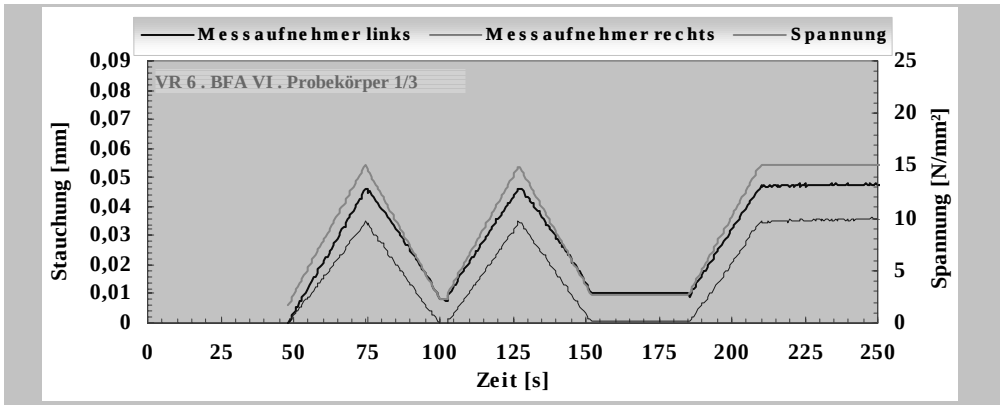


Abb. A.50: *Bestimmung des E-Moduls – Probekörper 1/3, BFA-Beton, VR 6*

VR1.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
TROCKEN	1/3	1,322	1,247	1,239	1,225	1,219	1,212	1,205	1,209	1,207	1,200	1,208	1,204	1,197	1,203	-0,469	-0,519	-0,606	-0,644	-0,688	-0,731	-0,706	-0,719	-0,763	-0,713	-0,738	-0,781	-0,744
	2/3	1,611	1,532	1,520	1,515	1,520	1,514	1,510	1,513	1,511	1,498	1,501	1,500	1,492	1,494	-0,494	-0,569	-0,600	-0,569	-0,606	-0,631	-0,613	-0,625	-0,706	-0,688	-0,694	-0,744	-0,731
	3/3	2,257	2,181	2,166	2,173	2,163	2,155	2,147	2,149	2,150	2,140	2,146	2,139	2,133	2,140	-0,475	-0,569	-0,525	-0,588	-0,638	-0,688	-0,675	-0,669	-0,731	-0,694	-0,738	-0,775	-0,731
															Mittelwert	**-0,479**	**-0,552**	**-0,577**	**-0,600**	**-0,644**	**-0,683**	**-0,665**	**-0,671**	**-0,733**	**-0,698**	**-0,723**	**-0,767**	**-0,735**

VR1.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
FEUCHT	1/3	1,451	1,441	1,452	1,451	1,451	1,451	1,447	1,451	1,451	1,445	1,453	1,450	1,448	1,455	-0,063	0,006	0,000	0,000	0,000	-0,025	0,000	0,000	-0,038	0,013	-0,006	-0,019	0,025
	2/3	1,046	1,058	1,065	1,061	1,076	1,067	1,056	1,056	1,057	1,053	1,061	1,059	1,057	1,064	0,075	0,119	0,094	0,188	0,131	0,063	0,063	0,069	0,044	0,094	0,081	0,069	0,113
	3/3	1,612	1,626	1,638	1,628	1,635	1,634	1,632	1,634	1,636	1,630	1,637	1,636	1,632	1,643	0,087	0,162	0,100	0,144	0,137	0,125	0,137	0,150	0,112	0,156	0,150	0,125	0,194
															Mittelwert	**0,033**	**0,096**	**0,065**	**0,110**	**0,090**	**0,054**	**0,067**	**0,073**	**0,040**	**0,087**	**0,075**	**0,058**	**0,110**

VR1.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
UNTER WASSER	1/3	1,561	1,587	1,598	1,595	1,597	1,591	1,587	1,590	1,592	1,585	1,595	1,592	1,589	1,600	0,163	0,231	0,213	0,225	0,188	0,163	0,181	0,194	0,150	0,213	0,194	0,175	0,244
	2/3	1,846	1,879	1,880	1,876	1,890	1,875	1,871	1,874	1,873	1,866	1,878	1,875	1,871	1,881	0,206	0,212	0,187	0,275	0,181	0,156	0,175	0,169	0,125	0,200	0,181	0,156	0,219
	3/3	1,900	1,945	1,955	1,950	1,940	1,937	1,933	1,930	1,929	1,930	1,936	1,933	1,930	1,932	0,281	0,344	0,313	0,250	0,231	0,206	0,188	0,181	0,188	0,225	0,206	0,188	0,200
															Mittelwert	**0,217**	**0,263**	**0,238**	**0,250**	**0,200**	**0,175**	**0,181**	**0,181**	**0,154**	**0,213**	**0,194**	**0,173**	**0,221**

Tafel A.43: *Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „SFA-Mörtel“ der VR 1*

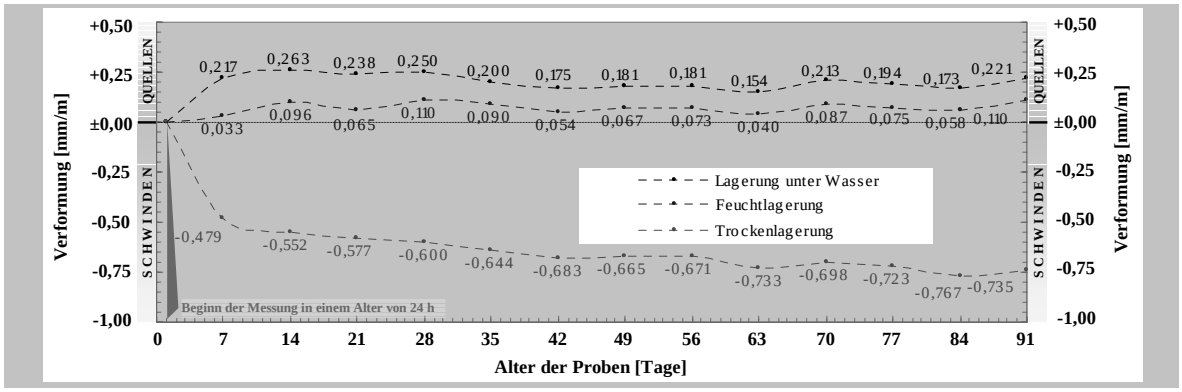


Abb. A.51: *Verformungsverhalten des „SFA-Mörtels“ der VR 1 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen*

VR1.BFA VI

TROCKEN	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)												Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
	1/3	1,005	0,935	0,907	0,901	0,894	0,885	0,878	0,877	0,879	0,869	0,870	0,862	0,868	0,869	-0,437	-0,612	-0,650	-0,694	-0,750	-0,794	-0,800	-0,787	-0,850	-0,844	-0,894	-0,856	-0,850
	2/3	1,701	1,629	1,606	1,599	1,585	1,585	1,582	1,581	1,582	1,573	1,576	1,568	1,572	1,574	-0,450	-0,594	-0,638	-0,725	-0,725	-0,744	-0,750	-0,744	-0,800	-0,781	-0,831	-0,806	-0,794
	3/3	1,608	1,530	1,508	1,501	1,496	1,488	1,486	1,485	1,487	1,477	1,480	1,472	1,477	1,479	-0,488	-0,625	-0,669	-0,700	-0,750	-0,763	-0,769	-0,756	-0,819	-0,800	-0,850	-0,819	-0,806
															Mittelwert	**-0,458**	**-0,610**	**-0,652**	**-0,706**	**-0,742**	**-0,767**	**-0,773**	**-0,763**	**-0,823**	**-0,808**	**-0,858**	**-0,827**	**-0,817**

VR1.BFA VI

FEUCHT	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)												Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
	1/3	1,708	1,728	1,734	1,733	1,733	1,728	1,724	1,729	1,734	1,730	1,733	1,731	1,734	1,734	0,125	0,163	0,156	0,156	0,125	0,100	0,131	0,163	0,138	0,156	0,144	0,163	0,163
	2/3	1,856	1,872	1,887	1,881	1,882	1,879	1,875	1,871	1,876	1,873	1,875	1,876	1,879	1,882	0,100	0,194	0,156	0,162	0,144	0,119	0,094	0,125	0,106	0,119	0,125	0,144	0,162
	3/3	1,518	1,533	1,551	1,539	1,540	1,537	1,531	1,532	1,536	1,534	1,536	1,540	1,542	1,540	0,094	0,206	0,131	0,138	0,119	0,081	0,088	0,113	0,100	0,113	0,138	0,150	0,138
															Mittelwert	**0,106**	**0,188**	**0,148**	**0,152**	**0,129**	**0,100**	**0,104**	**0,133**	**0,115**	**0,129**	**0,135**	**0,152**	**0,154**

VR1.BFA VI

UNTER WASSER	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)												Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
	1/3	1,820	1,855	1,860	1,858	1,859	1,857	1,851	1,850	1,853	1,856	1,856	1,855	1,861	1,863	0,219	0,250	0,238	0,244	0,231	0,194	0,188	0,206	0,225	0,225	0,219	0,256	0,269
	2/3	1,178	1,213	1,218	1,220	1,220	1,222	1,208	1,206	1,211	1,207	1,207	1,207	1,213	1,214	0,219	0,250	0,263	0,263	0,275	0,188	0,175	0,206	0,181	0,181	0,181	0,219	0,225
	3/3	2,137	2,168	2,183	2,176	2,182	2,180	2,178	2,178	2,183	2,183	2,183	2,181	2,187	2,190	0,194	0,287	0,244	0,281	0,269	0,256	0,256	0,287	0,287	0,287	0,275	0,312	0,331
															Mittelwert	**0,210**	**0,263**	**0,248**	**0,263**	**0,258**	**0,213**	**0,206**	**0,233**	**0,231**	**0,231**	**0,225**	**0,263**	**0,275**

Tafel A.44: *Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „BFA-Mörtel“ der VR 1*

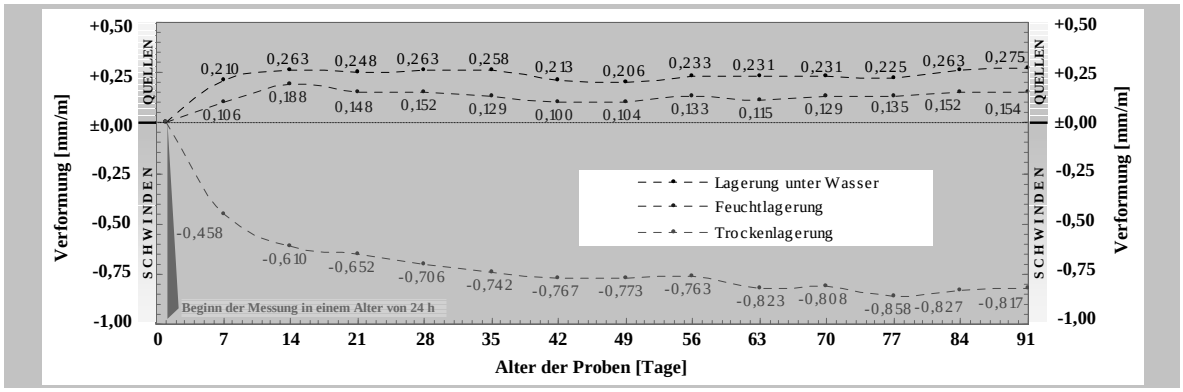


Abb. A.52: *Verformungsverhalten des „BFA-Mörtels“ der VR 1 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen*

VR2.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
TROCKEN	1/3	1,683	1,606	1,583	1,580	1,569	1,563	1,567	1,567	1,556	1,556	1,562	1,552	1,548	1,561	-0,481	-0,625	-0,644	-0,713	-0,750	-0,725	-0,725	-0,794	-0,794	-0,756	-0,819	-0,844	-0,763
	2/3	1,585	1,516	1,495	1,491	1,482	1,481	1,485	1,486	1,474	1,475	1,481	1,473	1,469	1,481	-0,431	-0,562	-0,587	-0,644	-0,650	-0,625	-0,619	-0,694	-0,687	-0,650	-0,700	-0,725	-0,650
	3/3	1,832	1,761	1,752	1,739	1,720	1,726	1,731	1,732	1,721	1,723	1,728	1,717	1,713	1,724	-0,444	-0,500	-0,581	-0,700	-0,663	-0,631	-0,625	-0,694	-0,681	-0,650	-0,719	-0,744	-0,675
															Mittelwert	-0,452	-0,563	-0,604	-0,685	-0,688	-0,660	-0,656	-0,727	-0,721	-0,685	-0,746	-0,771	-0,696

VR2.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
FEUCHT	1/3	2,092	2,108	2,119	2,106	2,104	2,102	2,103	2,104	2,105	2,110	2,110	2,106	2,105	2,108	0,100	0,169	0,087	0,075	0,062	0,069	0,075	0,081	0,112	0,112	0,087	0,081	0,100
	2/3	1,189	1,212	1,216	1,217	1,219	1,213	1,210	1,212	1,215	1,218	1,218	1,214	1,215	1,218	0,144	0,169	0,175	0,188	0,150	0,131	0,144	0,163	0,181	0,181	0,156	0,163	0,181
	3/3	1,669	1,696	1,693	1,700	1,682	1,682	1,678	1,681	1,681	1,686	1,686	1,683	1,683	1,687	0,169	0,150	0,194	0,081	0,081	0,056	0,075	0,075	0,106	0,106	0,088	0,088	0,113
															Mittelwert	0,138	0,163	0,152	0,115	0,098	0,085	0,098	0,106	0,133	0,133	0,110	0,110	0,131

VR2.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
UNTER WASSER	1/3	1,022	1,065	1,060	1,054	1,065	1,064	1,062	1,066	1,066	1,070	1,072	1,067	1,066	1,074	0,269	0,238	0,200	0,269	0,263	0,250	0,275	0,275	0,300	0,313	0,281	0,275	0,325
	2/3	1,714	1,749	1,765	1,759	1,748	1,751	1,748	1,745	1,748	1,755	1,757	1,751	1,751	1,758	0,219	0,319	0,281	0,213	0,231	0,213	0,194	0,213	0,256	0,269	0,231	0,231	0,275
	3/3	1,106	1,143	1,148	1,159	1,143	1,143	1,140	1,142	1,142	1,146	1,148	1,142	1,143	1,151	0,231	0,262	0,331	0,231	0,231	0,212	0,225	0,225	0,250	0,262	0,225	0,231	0,281
															Mittelwert	0,240	0,273	0,271	0,238	0,242	0,225	0,231	0,238	0,269	0,281	0,246	0,246	0,294

Tafel A.45: *Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „SFA-Mörtel“ der VR 2*

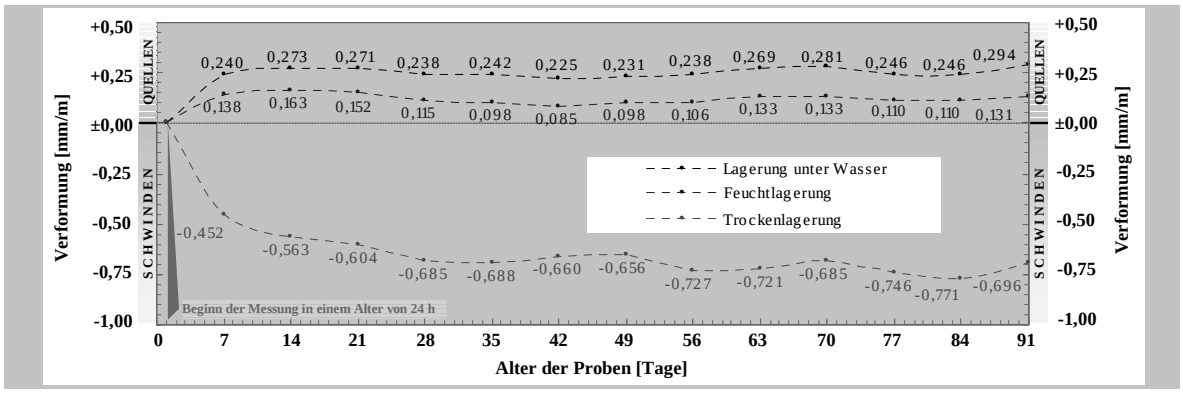


Abb. A.53: *Verformungsverhalten des „SFA-Mörtels“ der VR 2 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen*

VR2.BFA VI

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
TROCKEN	1/3	1,685	/	1,598	1,592	1,582	1,578	1,581	1,578	1,564	1,570	1,564	1,559	1,563	1,569	/	-0,544	-0,581	-0,644	-0,669	-0,650	-0,669	-0,756	-0,719	-0,756	-0,788	-0,763	-0,725
	2/3	1,210	/	1,118	1,112	1,104	1,101	1,101	1,099	1,084	1,089	1,084	1,079	1,084	1,089	/	-0,575	-0,612	-0,662	-0,681	-0,681	-0,694	-0,787	-0,756	-0,787	-0,819	-0,787	-0,756
	3/3	2,252	/	2,160	2,155	2,149	2,145	2,149	2,145	2,130	2,136	2,130	2,126	2,130	2,134	/	-0,575	-0,606	-0,644	-0,669	-0,644	-0,669	-0,762	-0,725	-0,762	-0,787	-0,762	-0,737
															Mittelwert	/	**-0,565**	**-0,600**	**-0,650**	**-0,673**	**-0,658**	**-0,677**	**-0,769**	**-0,733**	**-0,769**	**-0,798**	**-0,771**	**-0,740**

VR2.BFA VI

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
FEUCHT	1/3	1,632	/	1,659	1,654	1,652	1,646	1,650	1,649	1,647	1,652	1,648	1,649	1,653	1,654	/	0,169	0,138	0,125	0,088	0,113	0,106	0,094	0,125	0,100	0,106	0,131	0,138
	2/3	0,973	/	0,995	0,995	0,994	0,990	0,992	0,990	0,987	0,992	0,989	0,990	0,987	0,988	/	0,138	0,138	0,131	0,106	0,119	0,106	0,088	0,119	0,100	0,106	0,088	0,094
	3/3	1,423	/	1,444	1,446	1,449	1,444	1,447	1,446	1,443	1,447	1,444	1,446	1,451	1,451	/	0,131	0,144	0,163	0,131	0,150	0,144	0,125	0,150	0,131	0,144	0,175	0,175
															Mittelwert	/	**0,146**	**0,140**	**0,140**	**0,108**	**0,127**	**0,119**	**0,102**	**0,131**	**0,110**	**0,119**	**0,131**	**0,135**

VR2.BFA VI

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
UNTER WASSER	1/3	1,730	/	1,762	1,762	1,765	1,758	1,761	1,760	1,756	1,762	1,758	1,758	1,765	1,765	/	0,200	0,200	0,219	0,175	0,194	0,188	0,163	0,200	0,175	0,175	0,219	0,219
	2/3	1,855	/	1,881	1,878	1,877	1,874	1,874	1,875	1,870	1,876	1,869	1,869	1,875	1,877	/	0,163	0,144	0,138	0,119	0,119	0,125	0,094	0,131	0,088	0,088	0,125	0,138
	3/3	1,552	/	1,579	1,576	1,578	1,574	1,578	1,577	1,573	1,580	1,576	1,576	1,582	1,585	/	0,169	0,150	0,163	0,138	0,163	0,156	0,131	0,175	0,150	0,150	0,188	0,206
															Mittelwert	/	**0,177**	**0,165**	**0,173**	**0,144**	**0,158**	**0,156**	**0,129**	**0,169**	**0,138**	**0,138**	**0,177**	**0,188**

Tafel A.46: *Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „BFA-Mörtel“ der VR 2*

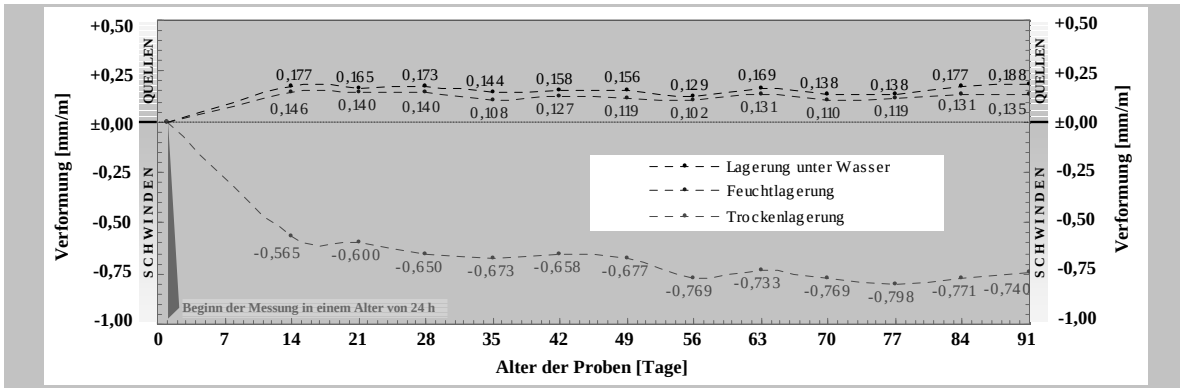


Abb. A.54: *Verformungsverhalten des „BFA-Mörtels“ der VR 2 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen*

VR3.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
TROCKEN	1/3	1,825	1,745	1,713	1,715	1,711	1,704	1,704	1,705	1,697	1,700	1,693	1,698	1,699	1,702	-0,500	-0,700	-0,687	-0,712	-0,756	-0,756	-0,750	-0,800	-0,781	-0,825	-0,794	-0,787	-0,769
	2/3	1,548	1,473	1,443	1,441	1,436	1,428	1,429	1,431	1,423	1,425	1,418	1,424	1,426	1,427	-0,469	-0,656	-0,669	-0,700	-0,750	-0,744	-0,731	-0,781	-0,769	-0,813	-0,775	-0,763	-0,756
	3/3	1,525	1,467	1,418	1,418	1,416	1,410	1,411	1,413	1,404	1,409	1,400	1,407	1,406	1,412	-0,362	-0,669	-0,669	-0,681	-0,719	-0,712	-0,700	-0,756	-0,725	-0,781	-0,737	-0,744	-0,706
															Mittelwert	-0,444	-0,675	-0,675	-0,698	-0,742	-0,738	-0,727	-0,779	-0,758	-0,806	-0,769	-0,765	-0,744

VR3.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
FEUCHT	1/3	1,450	1,462	1,467	1,468	1,465	1,460	1,457	1,460	1,465	1,464	1,464	1,468	1,464	1,467	0,075	0,106	0,113	0,094	0,063	0,044	0,063	0,094	0,088	0,088	0,113	0,088	0,106
	2/3	1,883	1,896	1,894	1,899	1,897	1,893	1,894	1,899	1,899	1,901	1,899	1,904	1,904	1,905	0,081	0,069	0,100	0,088	0,063	0,069	0,100	0,100	0,113	0,100	0,131	0,131	0,138
	3/3	1,171	1,179	1,179	1,180	1,177	1,172	1,173	1,179	1,180	1,182	1,180	1,185	1,183	1,183	0,050	0,050	0,056	0,038	0,006	0,013	0,050	0,056	0,069	0,056	0,088	0,075	0,075
															Mittelwert	0,069	0,075	0,090	0,073	0,044	0,042	0,071	0,083	0,090	0,081	0,110	0,098	0,106

VR3.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
UNTER WASSER	1/3	1,627	1,670	1,650	1,648	1,649	1,644	1,644	1,650	1,649	1,647	1,647	1,652	1,654	1,655	0,269	0,144	0,131	0,138	0,106	0,106	0,144	0,138	0,125	0,125	0,156	0,169	0,175
	2/3	0,244	0,268	0,271	0,272	0,270	0,265	0,265	0,271	0,271	0,270	0,272	0,277	0,278	0,279	0,150	0,169	0,175	0,163	0,131	0,131	0,169	0,169	0,163	0,175	0,206	0,213	0,219
	3/3	1,838	1,864	1,860	1,860	1,860	1,854	1,855	1,861	1,860	1,862	1,860	1,865	1,868	1,869	0,163	0,138	0,138	0,138	0,100	0,106	0,144	0,138	0,150	0,138	0,169	0,188	0,194
															Mittelwert	0,194	0,150	0,148	0,146	0,113	0,115	0,152	0,148	0,146	0,146	0,177	0,190	0,196

Tafel A.47: *Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „SFA-Mörtel“ der VR 3*

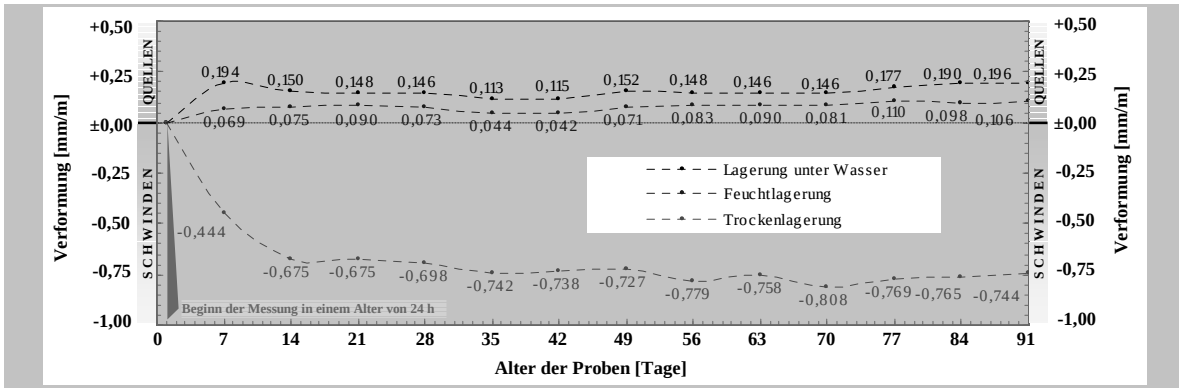


Abb. A.55: *Verformungsverhalten des „SFA-Mörtels“ der VR 3 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen*

VR3.BFA VI

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
TROCKEN	1/3	2,188	2,114	2,085	2,067	2,063	2,065	2,066	2,053	2,054	2,059	2,050	2,045	2,053	2,050	-0,463	-0,644	-0,756	-0,781	-0,769	-0,763	-0,844	-0,838	-0,806	-0,863	-0,894	-0,844	-0,863
	2/3	1,631	1,551	1,555	1,517	1,514	1,514	1,519	1,505	1,504	1,509	1,498	1,494	1,502	1,499	-0,500	-0,475	-0,713	-0,731	-0,731	-0,700	-0,788	-0,794	-0,763	-0,831	-0,856	-0,806	-0,825
	3/3	1,425	1,344	1,337	1,312	1,308	1,311	1,314	1,299	1,298	1,306	1,295	1,293	1,300	1,297	-0,506	-0,550	-0,706	-0,731	-0,713	-0,694	-0,788	-0,794	-0,744	-0,813	-0,825	-0,781	-0,800
															Mittelwert	-0,490	-0,556	-0,725	-0,748	-0,738	-0,719	-0,806	-0,808	-0,771	-0,835	-0,858	-0,810	-0,829

VR3.BFA VI

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
FEUCHT	1/3	1,392	1,400	1,403	1,396	1,397	1,394	1,397	1,397	1,402	1,404	1,398	1,398	1,400	1,397	0,050	0,069	0,025	0,031	0,013	0,031	0,031	0,063	0,075	0,038	0,038	0,050	0,031
	2/3	1,613	1,622	1,624	1,620	1,619	1,618	1,620	1,621	1,627	1,628	1,624	1,624	1,625	1,625	0,056	0,069	0,044	0,038	0,031	0,044	0,050	0,088	0,094	0,069	0,069	0,075	0,075
	3/3	1,738	1,737	1,736	1,750	1,751	1,748	1,751	1,751	1,756	1,759	1,755	1,756	1,755	1,753	-0,006	-0,013	0,075	0,081	0,063	0,081	0,081	0,113	0,131	0,106	0,113	0,106	0,094
															Mittelwert	0,033	0,042	0,048	0,050	0,035	0,052	0,054	0,088	0,100	0,071	0,073	0,077	0,067

VR3.BFA VI

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
UNTER WASSER	1/3	1,622	1,643	1,642	1,634	1,635	1,634	1,637	1,635	1,642	1,644	1,638	1,639	1,638	1,640	0,131	0,125	0,075	0,081	0,075	0,094	0,081	0,125	0,137	0,100	0,106	0,100	0,112
	2/3	1,540	1,568	1,552	1,564	1,563	1,567	1,569	1,565	1,573	1,575	1,568	1,568	1,568	1,572	0,175	0,075	0,150	0,144	0,169	0,181	0,156	0,206	0,219	0,175	0,175	0,175	0,200
	3/3	1,422	1,440	1,442	1,441	1,442	1,445	1,445	1,444	1,451	1,453	1,448	1,448	1,448	1,450	0,113	0,125	0,119	0,125	0,144	0,144	0,138	0,181	0,194	0,163	0,163	0,163	0,175
															Mittelwert	0,140	0,108	0,115	0,117	0,129	0,140	0,125	0,171	0,183	0,146	0,148	0,146	0,163

Tafel A.48: *Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „BFA-Mörtel“ der VR 3*

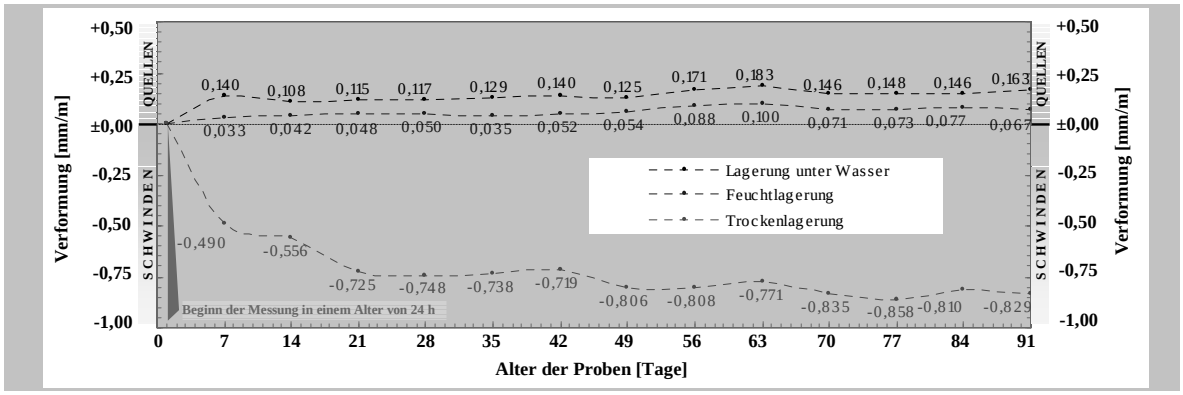


Abb. A.56: *Verformungsverhalten des „BFA-Mörtels“ der VR 3 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen*

VR4.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
TROCKEN	1/3	1,776	1,653	1,625	1,616	1,610	1,609	1,610	1,606	1,604	1,603	1,597	1,600	1,604	1,599	-0,769	-0,944	-1,000	-1,038	-1,044	-1,038	-1,063	-1,075	-1,081	-1,119	-1,100	-1,075	-1,106
	2/3	1,684	1,588	1,565	1,554	1,547	1,546	1,547	1,549	1,542	1,542	1,539	1,541	1,542	1,540	-0,600	-0,744	-0,812	-0,856	-0,862	-0,856	-0,844	-0,888	-0,888	-0,906	-0,894	-0,888	-0,900
	3/3	1,433	1,386	1,363	1,354	1,347	1,348	1,349	1,346	1,343	1,342	1,338	1,340	1,340	1,338	-0,294	-0,438	-0,494	-0,538	-0,531	-0,525	-0,544	-0,563	-0,569	-0,594	-0,581	-0,581	-0,594
															Mittelwert	-0,554	-0,708	-0,769	-0,810	-0,813	-0,806	-0,817	-0,842	-0,846	-0,873	-0,858	-0,848	-0,867

VR4.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
FEUCHT	1/3	1,985	2,008	2,005	2,010	2,010	2,008	2,014	2,010	2,006	2,009	2,010	2,013	2,015	2,019	0,144	0,125	0,156	0,156	0,144	0,181	0,156	0,131	0,150	0,156	0,175	0,188	0,213
	2/3	1,775	1,782	1,785	1,789	1,783	1,782	1,788	1,783	1,779	1,781	1,781	1,782	1,785	1,790	0,044	0,063	0,088	0,050	0,044	0,081	0,050	0,025	0,038	0,038	0,044	0,063	0,094
	3/3	1,515	1,520	1,524	1,523	1,522	1,518	1,529	1,519	1,517	1,518	1,519	1,519	1,522	1,524	0,031	0,056	0,050	0,044	0,019	0,088	0,025	0,013	0,019	0,025	0,025	0,044	0,056
															Mittelwert	0,073	0,081	0,098	0,083	0,069	0,117	0,077	0,056	0,069	0,073	0,081	0,098	0,121

VR4.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
UNTER WASSER	1/3	1,619	1,655	1,656	1,661	1,661	1,656	1,660	1,655	1,650	1,654	1,655	1,656	1,660	1,668	0,225	0,231	0,263	0,263	0,231	0,256	0,225	0,194	0,219	0,225	0,231	0,256	0,306
	2/3	1,437	1,465	1,471	1,476	1,474	1,472	1,475	1,478	1,465	1,469	1,470	1,470	1,475	1,483	0,175	0,213	0,244	0,231	0,219	0,238	0,256	0,175	0,200	0,206	0,206	0,238	0,288
	3/3	1,645	1,660	1,664	1,668	1,665	1,661	1,666	1,661	1,658	1,659	1,660	1,657	1,662	1,670	0,094	0,119	0,144	0,125	0,100	0,131	0,100	0,081	0,088	0,094	0,075	0,106	0,156
															Mittelwert	0,165	0,188	0,217	0,206	0,183	0,208	0,194	0,150	0,169	0,175	0,171	0,200	0,250

Tafel A.49: *Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „SFA-Mörtel“ der VR 4*

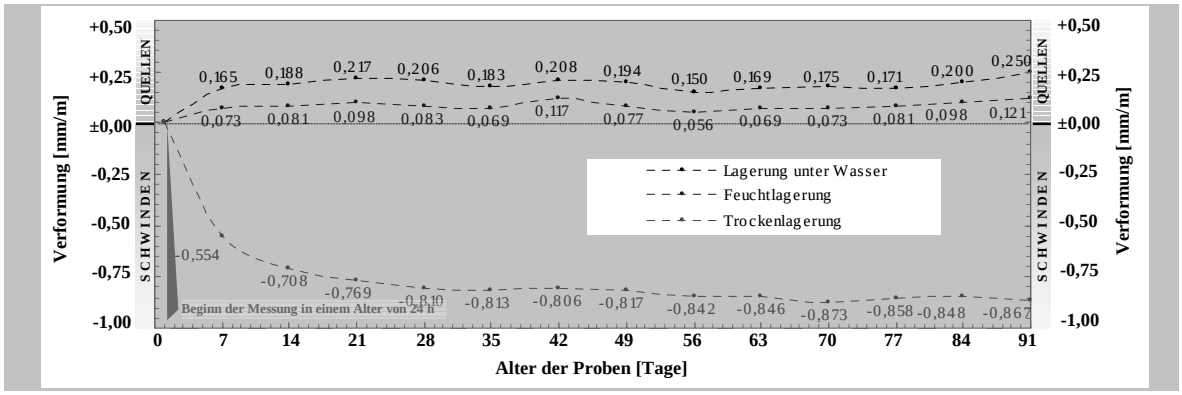


Abb. A.57: *Verformungsverhalten des „SFA-Mörtels“ der VR 4 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen*

VR4.BFA VI

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
TROCKEN	1/3	1,636	1,556	1,523	1,515	1,513	1,503	1,497	1,499	1,495	1,496	1,490	1,493	1,495	1,495	-0,500	-0,706	-0,756	-0,769	-0,831	-0,869	-0,856	-0,881	-0,875	-0,912	-0,894	-0,881	-0,881
	2/3	1,688	1,602	1,570	1,558	1,549	1,547	1,541	1,544	1,541	1,541	1,532	1,535	1,536	1,538	-0,537	-0,737	-0,812	-0,869	-0,881	-0,919	-0,900	-0,919	-0,919	-0,975	-0,956	-0,950	-0,937
	3/3	1,403	1,311	1,280	1,270	1,263	1,259	1,252	1,255	1,252	1,252	1,246	1,250	1,251	1,252	-0,575	-0,769	-0,831	-0,875	-0,900	-0,944	-0,925	-0,944	-0,944	-0,981	-0,956	-0,950	-0,944
															Mittelwert	**-0,538**	**-0,738**	**-0,800**	**-0,838**	**-0,871**	**-0,910**	**-0,894**	**-0,915**	**-0,913**	**-0,956**	**-0,935**	**-0,927**	**-0,921**

VR4.BFA VI

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
FEUCHT	1/3	1,695	1,702	1,697	1,701	1,701	1,697	1,697	1,698	1,693	1,696	1,693	1,697	1,703	1,709	0,044	0,013	0,038	0,038	0,013	0,013	0,019	-0,013	0,006	-0,013	0,013	0,050	0,088
	2/3	1,788	1,787	1,772	1,773	1,775	1,770	1,769	1,770	1,767	1,768	1,766	1,767	1,774	1,777	-0,006	-0,100	-0,094	-0,081	-0,113	-0,119	-0,113	-0,131	-0,125	-0,138	-0,131	-0,088	-0,069
	3/3	1,904	1,911	1,905	1,910	1,907	1,907	1,904	1,907	1,904	1,902	1,900	1,902	1,908	1,913	0,044	0,006	0,038	0,019	0,019	0,000	0,019	0,000	-0,013	-0,025	-0,013	0,025	0,056
															Mittelwert	**0,027**	**-0,027**	**-0,006**	**-0,008**	**-0,027**	**-0,035**	**-0,025**	**-0,048**	**-0,044**	**-0,058**	**-0,044**	**-0,004**	**0,025**

VR4.BFA VI

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
UNTER WASSER	1/3	1,374	1,388	1,389	1,386	1,390	1,384	1,381	1,382	1,378	1,380	1,381	1,383	1,387	1,395	0,087	0,094	0,075	0,100	0,062	0,044	0,050	0,025	0,037	0,044	0,056	0,081	0,131
	2/3	1,538	1,557	1,562	1,558	1,563	1,558	1,555	1,555	1,551	1,555	1,555	1,558	1,560	1,572	0,119	0,150	0,125	0,156	0,125	0,106	0,106	0,081	0,106	0,106	0,125	0,138	0,213
	3/3	2,206	2,248	2,235	2,232	2,235	2,230	2,229	2,229	2,229	2,227	2,229	2,235	2,233	2,244	0,263	0,181	0,163	0,181	0,150	0,144	0,144	0,144	0,131	0,144	0,181	0,169	0,238
															Mittelwert	**0,156**	**0,142**	**0,121**	**0,146**	**0,113**	**0,098**	**0,100**	**0,083**	**0,092**	**0,098**	**0,121**	**0,129**	**0,194**

Tafel A.50: *Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „BFA-Mörtel“ der VR 4*

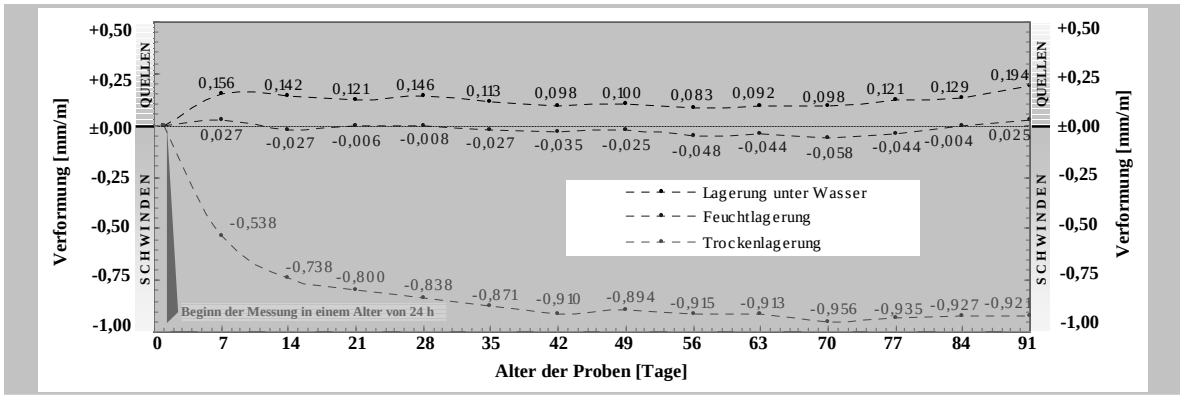


Abb. A.58: *Verformungsverhalten des „BFA-Mörtels“ der VR 4 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen*

VR5.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
TROCKEN	1/3	0,569	0,484	0,454	0,443	0,442	0,440	0,433	0,440	0,439	0,430	0,433	0,436	0,433	0,432	-0,531	-0,719	-0,788	-0,794	-0,806	-0,850	-0,806	-0,813	-0,869	-0,850	-0,831	-0,850	-0,856
	2/3	2,268	2,183	2,156	2,141	2,139	2,137	2,131	2,136	2,135	2,125	2,127	2,129	2,128	2,127	-0,531	-0,700	-0,794	-0,806	-0,819	-0,856	-0,825	-0,831	-0,894	-0,881	-0,869	-0,875	-0,881
	3/3	1,413	1,313	1,286	1,275	1,274	1,273	1,267	1,273	1,271	1,263	1,265	1,269	1,267	1,266	-0,625	-0,794	-0,863	-0,869	-0,875	-0,913	-0,875	-0,888	-0,938	-0,925	-0,900	-0,913	-0,919
															Mittelwert	**-0,563**	**-0,737**	**-0,815**	**-0,823**	**-0,833**	**-0,873**	**-0,835**	**-0,844**	**-0,900**	**-0,885**	**-0,867**	**-0,879**	**-0,885**

VR5.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
FEUCHT	1/3	1,684	1,685	1,688	1,689	1,691	1,690	1,688	1,690	1,690	1,683	1,689	1,692	1,695	1,695	0,006	0,025	0,031	0,044	0,038	0,025	0,038	0,038	-0,006	0,031	0,050	0,069	0,069
	2/3	1,603	1,624	1,626	1,622	1,630	1,623	1,622	1,623	1,623	1,616	1,623	1,626	1,630	1,629	0,131	0,144	0,119	0,169	0,125	0,119	0,125	0,125	0,081	0,125	0,144	0,169	0,163
	3/3	1,477	1,503	1,498	1,500	1,502	1,503	1,499	1,502	1,501	1,495	1,503	1,505	1,507	1,507	0,162	0,131	0,144	0,156	0,162	0,138	0,156	0,150	0,113	0,162	0,175	0,187	0,187
															Mittelwert	**0,100**	**0,100**	**0,098**	**0,123**	**0,108**	**0,094**	**0,106**	**0,104**	**0,063**	**0,106**	**0,123**	**0,142**	**0,140**

VR5.SFA III

	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
UNTER WASSER	1/3	1,781	1,805	1,804	1,809	1,810	1,803	1,801	1,806	1,804	1,798	1,808	1,810	1,811	1,817	0,150	0,144	0,175	0,181	0,138	0,125	0,156	0,144	0,106	0,169	0,181	0,188	0,225
	2/3	1,404	1,438	1,439	1,436	1,444	1,437	1,436	1,439	1,438	1,432	1,442	1,443	1,444	1,454	0,213	0,219	0,200	0,250	0,206	0,200	0,219	0,213	0,175	0,238	0,244	0,250	0,313
	3/3	1,707	1,747	1,748	1,748	1,755	1,747	1,744	1,748	1,748	1,741	1,750	1,752	1,754	1,764	0,250	0,256	0,256	0,300	0,250	0,231	0,256	0,256	0,213	0,269	0,281	0,294	0,356
															Mittelwert	**0,204**	**0,206**	**0,210**	**0,244**	**0,198**	**0,185**	**0,210**	**0,204**	**0,165**	**0,225**	**0,235**	**0,244**	**0,298**

Tafel A.51: *Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „SFA-Mörtel“ der VR 5*

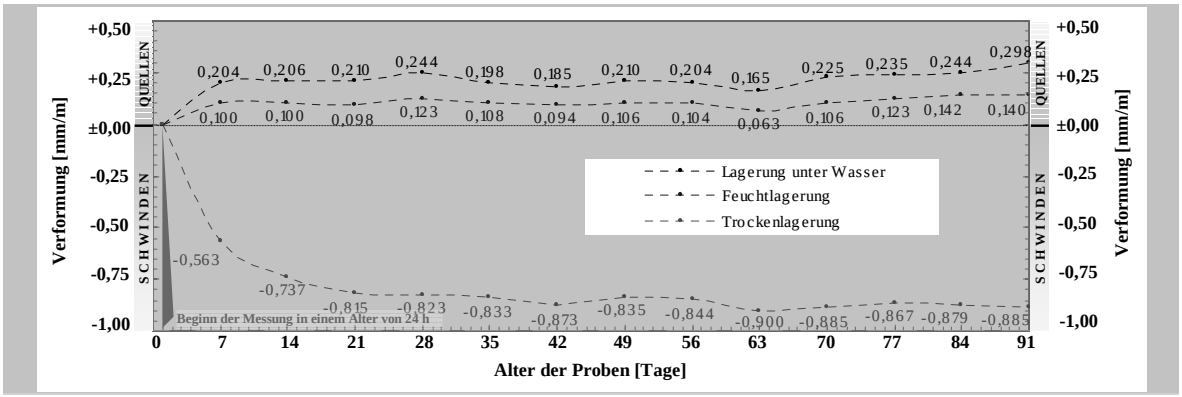


Abb. A.59: *Verformungsverhalten des „SFA-Mörtels“ der VR 5 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen*

VR5.BFA VI

TROCKEN	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
	1/3	1,537	1,462	1,418	1,405	1,403	1,399	1,397	1,394	1,392	1,388	1,390	1,391	1,388	1,391	-0,469	-0,744	-0,825	-0,837	-0,862	-0,875	-0,894	-0,906	-0,931	-0,919	-0,912	-0,931	-0,912
	2/3	1,655	1,566	1,534	1,523	1,521	1,521	1,518	1,516	1,515	1,512	1,511	1,514	1,509	1,513	-0,556	-0,756	-0,825	-0,838	-0,838	-0,856	-0,869	-0,875	-0,894	-0,900	-0,881	-0,913	-0,888
	3/3	1,880	1,791	1,761	1,750	1,747	1,748	1,748	1,740	1,739	1,735	1,734	1,735	1,733	1,735	-0,556	-0,744	-0,812	-0,831	-0,825	-0,825	-0,875	-0,881	-0,906	-0,912	-0,906	-0,919	-0,906
															Mittelwert	**-0,527**	**-0,748**	**-0,821**	**-0,835**	**-0,842**	**-0,852**	**-0,879**	**-0,888**	**-0,910**	**-0,910**	**-0,900**	**-0,921**	**-0,902**

VR5.BFA VI

FEUCHT	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
	1/3	0,732	0,744	0,744	0,742	0,741	0,746	0,741	0,737	0,739	0,739	0,738	0,741	0,742	0,739	0,075	0,075	0,063	0,056	0,088	0,056	0,031	0,044	0,044	0,038	0,056	0,063	0,044
	2/3	2,297	2,295	2,294	2,290	2,290	2,294	2,291	2,287	2,289	2,290	2,291	2,292	2,295	2,293	-0,013	-0,019	-0,044	-0,044	-0,019	-0,038	-0,063	-0,050	-0,044	-0,038	-0,031	-0,013	-0,025
	3/3	1,461	1,455	1,455	1,455	1,452	1,458	1,447	1,444	1,446	1,448	1,448	1,450	1,453	1,453	-0,038	-0,038	-0,038	-0,056	-0,019	-0,088	-0,106	-0,094	-0,081	-0,081	-0,069	-0,050	-0,050
															Mittelwert	**0,008**	**0,006**	**-0,006**	**-0,015**	**0,017**	**-0,023**	**-0,046**	**-0,033**	**-0,027**	**-0,027**	**-0,015**	**0,000**	**-0,010**

VR5.BFA VI

UNTER WASSER	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
	1/3	1,597	1,599	1,599	1,600	1,596	1,601	1,597	1,588	1,593	1,593	1,594	1,598	1,603	1,598	0,013	0,013	0,019	-0,006	0,025	0,000	-0,056	-0,025	-0,025	-0,019	0,006	0,038	0,006
	2/3	1,455	1,475	1,478	1,479	1,474	1,479	1,475	1,468	1,474	1,473	1,472	1,477	1,482	1,477	0,125	0,144	0,150	0,119	0,150	0,125	0,081	0,119	0,113	0,106	0,138	0,169	0,138
	3/3	1,532	1,578	1,564	1,565	1,561	1,566	1,562	1,554	1,560	1,560	1,560	1,565	1,571	1,566	0,288	0,200	0,206	0,181	0,213	0,188	0,138	0,175	0,175	0,175	0,206	0,244	0,213
															Mittelwert	**0,142**	**0,119**	**0,125**	**0,098**	**0,129**	**0,104**	**0,054**	**0,090**	**0,088**	**0,088**	**0,117**	**0,150**	**0,119**

Tafel A.52: *Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „BFA-Mörtel“ der VR 5*

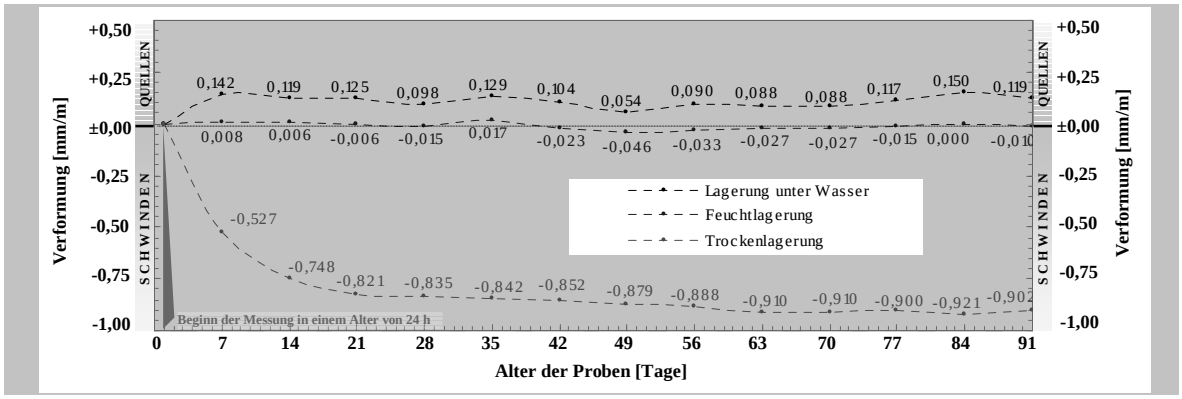


Abb. A.60: *Verformungsverhalten des „BFA-Mörtels“ der VR 5 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen*

VR6.SFA III

TROCKEN	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
	1/3	0,509	0,416	0,393	0,383	0,382	0,378	0,372	0,368	0,369	0,361	0,363	0,366	0,365	0,363	-0,581	-0,725	-0,788	-0,794	-0,819	-0,856	-0,881	-0,875	-0,925	-0,913	-0,894	-0,900	-0,913
	2/3	2,237	2,140	2,111	2,102	2,103	2,096	2,094	2,093	2,091	2,084	2,085	2,088	2,086	2,087	-0,606	-0,787	-0,844	-0,837	-0,881	-0,894	-0,900	-0,912	-0,956	-0,950	-0,931	-0,944	-0,937
	3/3	1,472	1,376	1,358	1,350	1,353	1,344	1,342	1,340	1,339	1,331	1,334	1,334	1,332	1,329	-0,600	-0,712	-0,762	-0,744	-0,800	-0,812	-0,825	-0,831	-0,881	-0,862	-0,862	-0,875	-0,894
															Mittelwert	**-0,596**	**-0,742**	**-0,798**	**-0,792**	**-0,833**	**-0,854**	**-0,869**	**-0,873**	**-0,921**	**-0,908**	**-0,896**	**-0,906**	**-0,915**

VR6.SFA III

FEUCHT	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
	1/3	1,628	1,645	1,651	1,651	1,649	1,648	1,646	1,642	1,643	1,642	1,645	1,649	1,650	1,643	0,106	0,144	0,144	0,131	0,125	0,113	0,088	0,094	0,088	0,106	0,131	0,138	0,094
	2/3	1,600	1,605	1,610	1,610	1,608	1,608	1,607	1,604	1,606	1,604	1,607	1,611	1,617	1,610	0,031	0,063	0,063	0,050	0,050	0,044	0,025	0,038	0,025	0,044	0,069	0,106	0,063
	3/3	1,547	1,546	1,553	1,548	1,548	1,546	1,550	1,545	1,547	1,544	1,547	1,554	1,558	1,551	-0,006	0,038	0,006	0,006	-0,006	0,019	-0,013	0,000	-0,019	0,000	0,044	0,069	0,025
															Mittelwert	**0,044**	**0,081**	**0,071**	**0,063**	**0,056**	**0,058**	**0,033**	**0,044**	**0,031**	**0,050**	**0,081**	**0,104**	**0,060**

VR6.SFA III

UNTER WASSER	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)													Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)												
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
	1/3	0,847	0,909	0,909	0,915	0,911	0,910	0,911	0,910	0,911	0,913	0,915	0,918	0,928	0,914	0,388	0,388	0,425	0,400	0,394	0,400	0,394	0,400	0,413	0,425	0,444	0,506	0,419
	2/3	1,500	1,566	1,558	1,563	1,554	1,553	1,551	1,545	1,548	1,549	1,551	1,553	1,565	1,550	0,413	0,363	0,394	0,338	0,331	0,319	0,281	0,300	0,306	0,319	0,331	0,406	0,313
	3/3	1,688	1,748	1,747	1,754	1,747	1,745	1,746	1,742	1,745	1,746	1,750	1,752	1,763	1,748	0,375	0,369	0,413	0,369	0,356	0,363	0,338	0,356	0,363	0,388	0,400	0,469	0,375
															Mittelwert	**0,392**	**0,373**	**0,410**	**0,369**	**0,360**	**0,360**	**0,338**	**0,352**	**0,360**	**0,377**	**0,392**	**0,460**	**0,369**

Tafel A.53: *Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „SFA-Mörtel“ der VR 6*

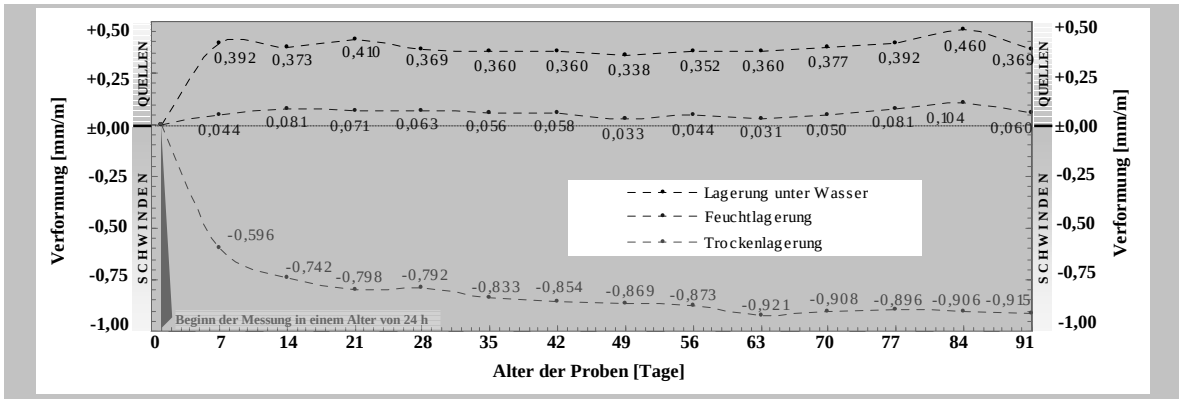


Abb. A.61: *Verformungsverhalten des „SFA-Mörtels“ der VR6 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen*

VR6.BFA VI

TROCKEN	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)												Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)											
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
	1/3	1,525	1,428	1,397	1,389	1,386	1,379	1,387	1,386	1,377	1,377	1,383	1,380	1,380	1,378	-0,606	-0,800	-0,850	-0,869	-0,912	-0,862	-0,869	-0,925	-0,925	-0,888	-0,906	-0,906	-0,919
	2/3	1,639	1,540	1,503	1,493	1,491	1,484	1,493	1,490	1,480	1,482	1,486	1,484	1,485	1,482	-0,619	-0,850	-0,912	-0,925	-0,969	-0,912	-0,931	-0,994	-0,981	-0,956	-0,969	-0,962	-0,981
	3/3	1,547	1,434	1,404	1,396	1,394	1,386	1,393	1,390	1,381	1,383	1,384	1,382	1,382	1,379	-0,706	-0,894	-0,944	-0,956	-1,006	-0,962	-0,981	-1,038	-1,025	-1,019	-1,031	-1,031	-1,050
															Mittelwert	-0,644	-0,848	-0,902	-0,917	-0,963	-0,912	-0,927	-0,985	-0,977	-0,954	-0,969	-0,967	-0,983

VR6.BFA VI

FEUCHT	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)												Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)											
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
	1/3	1,695	1,711	1,701	1,703	1,703	1,700	1,700	1,699	1,694	1,701	1,703	1,703	1,702	1,696	0,100	0,038	0,050	0,050	0,031	0,031	0,025	-0,006	0,038	0,050	0,050	0,044	0,006
	2/3	1,492	1,495	1,491	1,495	1,494	1,491	1,494	1,493	1,486	1,495	1,498	1,500	1,501	1,495	0,019	-0,006	0,019	0,013	-0,006	0,013	0,006	-0,038	0,019	0,038	0,050	0,056	0,019
	3/3	1,771	1,784	1,773	1,777	1,775	1,772	1,772	1,771	1,765	1,773	1,776	1,778	1,779	1,774	0,081	0,013	0,038	0,025	0,006	0,006	0,000	-0,038	0,013	0,031	0,044	0,050	0,019
															Mittelwert	0,067	0,015	0,035	0,029	0,010	0,017	0,010	0,010	0,023	0,040	0,048	0,050	0,015

VR6.BFA VI

UNTER WASSER	Pr.	Grund-maß	Meßwerte (bei einem Alter von ... Tagen)												Verformung [mm/m] (bei einem Alter von ... Tagen)											
			7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
	1/3	0,653	0,670	0,670	0,673	0,669	0,667	0,672	0,672	0,665	0,674	0,675	0,677	0,687	0,679	0,106	0,106	0,125	0,100	0,088	0,119	0,119	0,075	0,131	0,138	0,150	0,213	0,163
	2/3	2,426	2,446	2,446	2,450	2,447	2,445	2,450	2,449	2,442	2,452	2,453	2,449	2,460	2,451	0,125	0,125	0,150	0,131	0,119	0,150	0,144	0,100	0,162	0,169	0,144	0,212	0,156
	3/3	1,261	1,278	1,279	1,284	1,280	1,278	1,282	1,281	1,274	1,284	1,285	1,285	1,295	1,287	0,106	0,113	0,144	0,119	0,106	0,131	0,125	0,081	0,144	0,150	0,150	0,213	0,163
															Mittelwert	0,113	0,115	0,140	0,117	0,104	0,133	0,129	0,085	0,146	0,152	0,148	0,213	0,160

Tafel A.54: *Messwerte und daraus berechnete Verformungen – „BFA-Mörtel“ der VR 6*

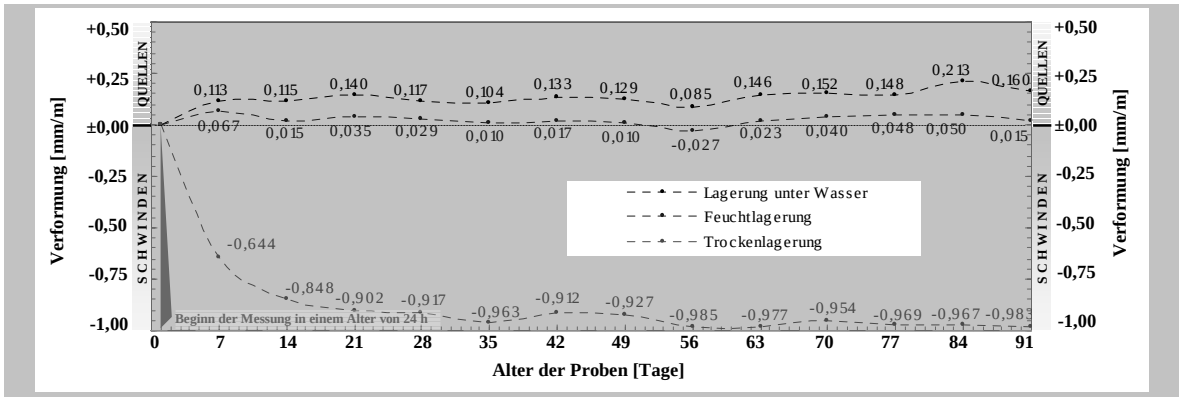


Abb. A.62: *Verformungsverhalten des „BFA-Mörtels“ der VR6 bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen*

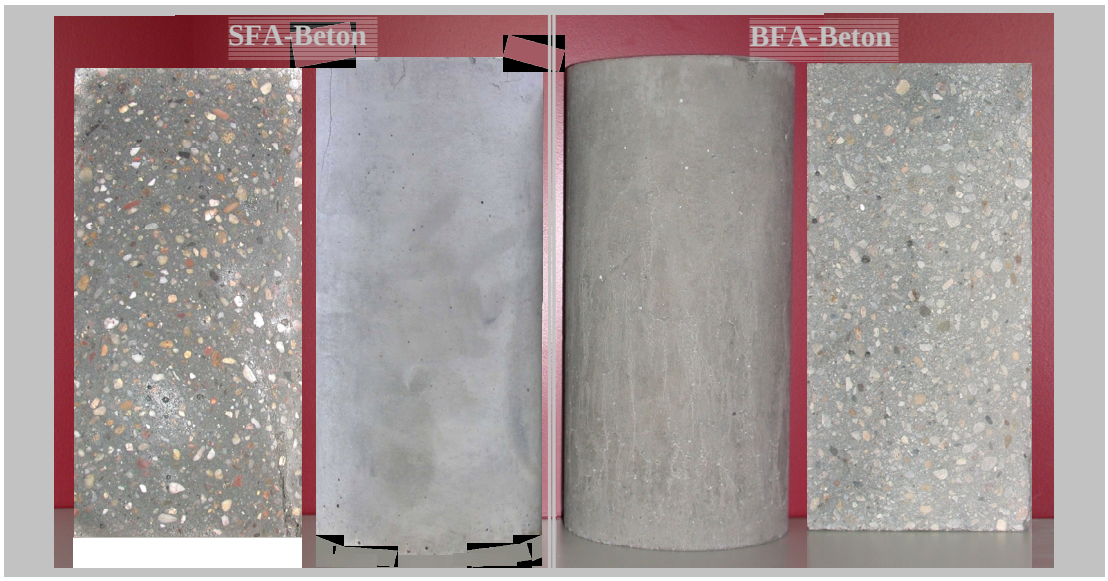


Abb. A.63: *Schal- und Schnittflächen der Betone der Versuchsreihe 1 mit SFA (links) und BFA (rechts)*

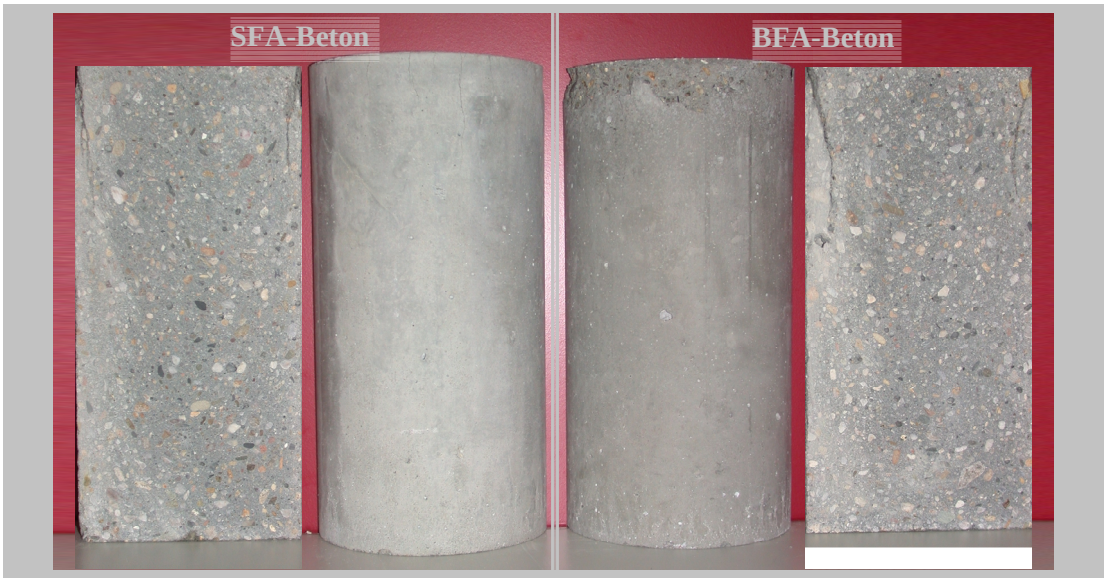


Abb. A.64: *Schal- und Schnittflächen der Betone der Versuchsreihe 2 mit SFA (links) und BFA (rechts)*

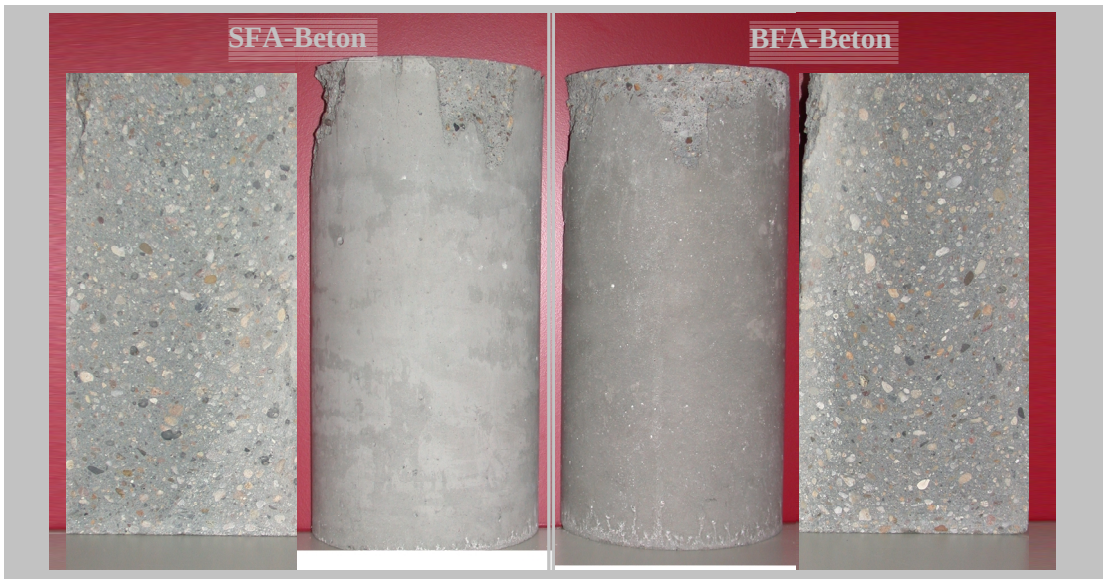


Abb. A.65: *Schal- und Schnittflächen der Betone der Versuchsreihe 3 mit SFA (links) und BFA (rechts)*

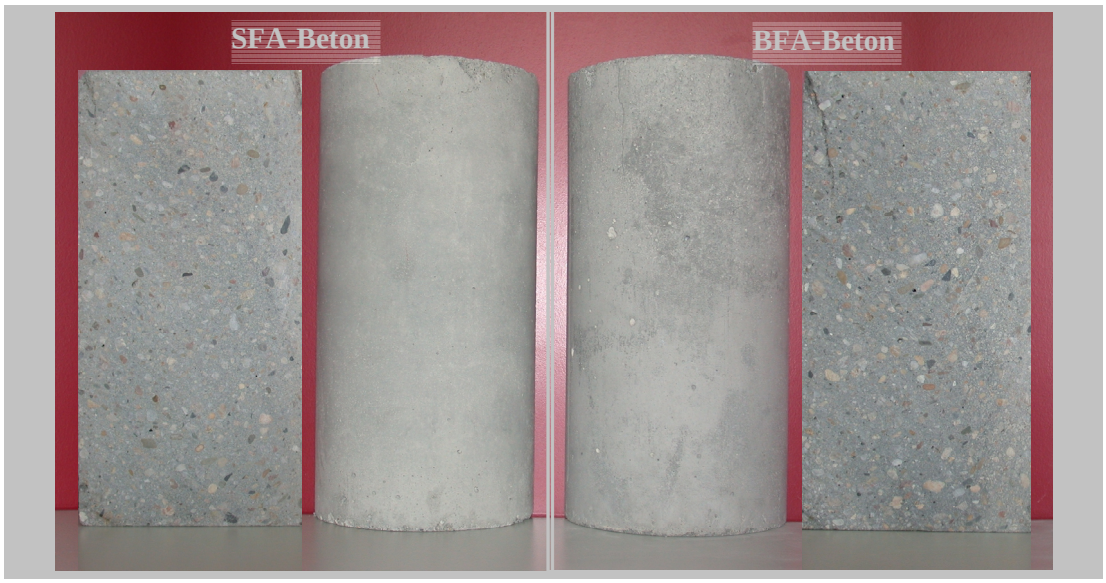


Abb. A.66: *Schal- und Schnittflächen der Betone der Versuchsreihe 4 mit SFA (links) und BFA (rechts)*

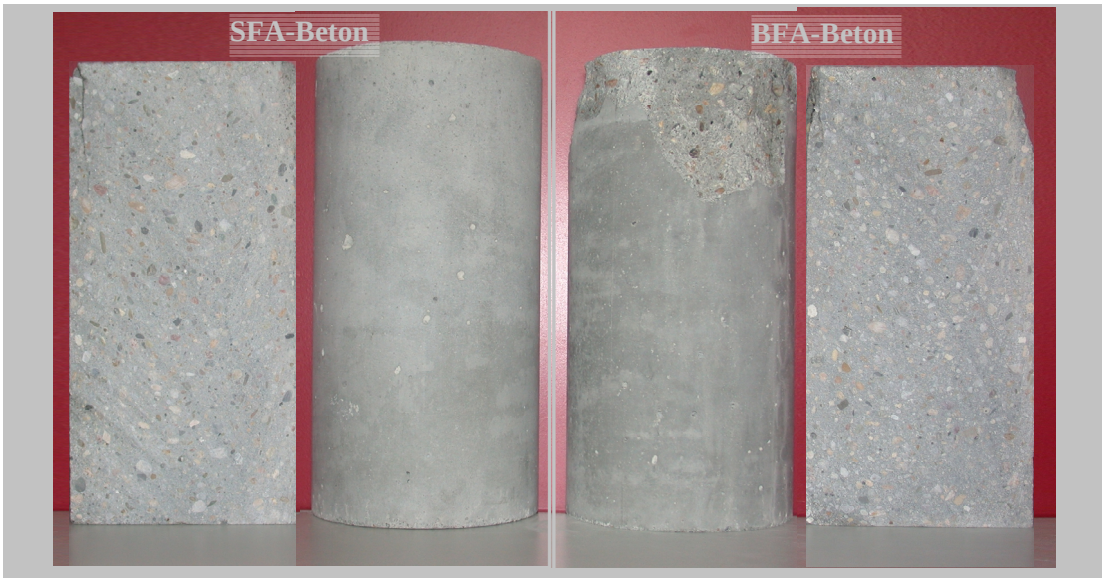


Abb. A.67: *Schal- und Schnittflächen der Betone der Versuchsreihe 5 mit SFA (links) und BFA (rechts)*

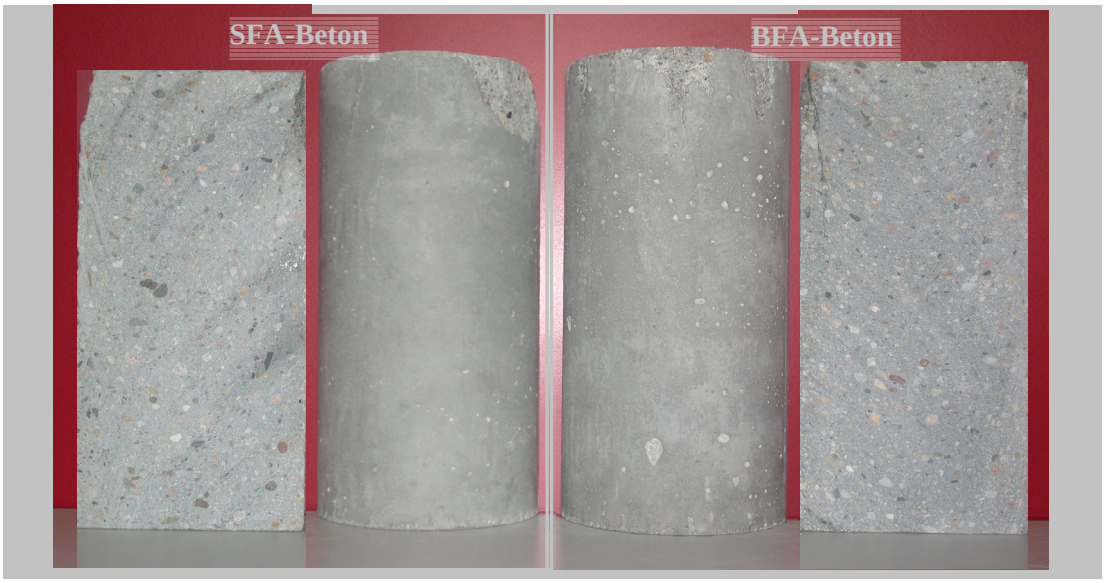


Abb. A.68: *Schal- und Schnittflächen der Betone der Versuchsreihe 6 mit SFA (links) und BFA (rechts)*