

---

# Abschlussbericht

---

**Betreff:** Untersuchung und Bewertung des Systems Verifi zur Online-Produktionskontrolle von Transportbeton im Fahrmischer  
1. Phase

---



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Institut für Massivbau  
Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen  
Prof. Dr.-Ing Harald Garrecht

**Auftraggeber:** Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V.  
Nimmendorferstr. 124  
47475 Kamp-Lintfort

**Laufzeit:** 01. Juli 2010 bis 31. Dezember 2010

**Berichtsnummer:** 10 51 27 0029      **Berichtsdatum:** 25.01.2011  
**Textseiten:** 1 bis 62  
**Anhang:** 63 bis 83

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. (FH) Andreas Karden MBA  
**Durchwahl:** +49 (0) 6151 16-2544  
**E-Mail:** karden@massivbau.tu-darmstadt.de

**Ausfertigungen:** PDF: Auftraggeber  
1fach: Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen

---

## Inhaltsverzeichnis

---

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.   | Einleitung  | 3  |
| 2.   | Gliederung des Berichts                           | 3  |
| 3.   | Vorstellung des Systems Verifi                    | 4  |
| 4.   | Vorgehensweise                                    | 8  |
| 4.1. | Voruntersuchungen im Labor                        | 8  |
| 4.2. | Kalibrierung                                      | 10 |
| 4.3. | Versuchsprogramm                                  | 12 |
| 5.   | Ergebnisse  | 18 |
| 5.1. | Ausbreitmaß und Setzmaß                           | 19 |
| 5.2. | Rheologische Untersuchungen                       | 33 |
| 5.3. | Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Fließgrenze | 40 |
| 5.4. | Statistische Auswertung                           | 45 |
| 5.5. | Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul             | 56 |
| 6.   | Schlussfolgerung und Ausblick                     | 60 |
| 7.   | Literatur   | 62 |
|      | Anhang  |    |

---

## 1. Einleitung

---

Das Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt wurde von der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. beauftragt, in einer 1. Phase das System Verifi im Hinblick auf dessen praktischen Einsatz zu untersuchen und zu bewerten. Das System Verifi erfasst und dokumentiert die Konsistenz des transportierten Frischbetons im Fahrmischer. Die Ermittlung der Frischbetoneigenschaften in Bezug auf das Ausbreitmaß oder das Setzmaß kann zu beliebigen Zeitpunkten von der Beladung bis zur Entladung vorgenommen werden.

Für den Umfang der Untersuchungen hat das Unternehmen Grace Construction Products aus den USA, welches in Deutschland unter dem Namen Grace Bauprodukte GmbH auftritt, das System Verifi zusammen mit dem Unternehmen RS Solutions (USA) zur Verfügung gestellt. Die Installation und Kalibrierung des Systems Verifi erfolgte auf zwei Fahrmischern. Die Fahrzeuge und die zu untersuchenden Betone wurden von der Dyckerhoff AG bereit gestellt.

Bei der Durchführung der Untersuchungen wurde der Fokus auf die Frischbetonkonsistenzbestimmung gelegt. Die Prüfungen erfolgten an sechs Tagen mit zwei Fahrmischern über eine Zeitdauer von über 120 Minuten. Die Fahrmischer unterschieden sich hauptsächlich im Alter der Mischtrommel, des Fahrzeugtyps und des Aufbaus. Hierbei kam eine ungenutzte Mischtrommel und eine bereits über mehrere Monate eingesetzte Mischtrommel zum Einsatz, um einen möglichen Effekt der Abnutzung der Mischwerkzeuge auf die ermittelten Betonkennwerte untersuchen zu können. Im Weiteren wurde jeder Fahrmischer mit insgesamt drei Betone, die sich in ihrer Festigkeitsklasse unterschieden, beladen. Die Änderung der Konsistenz erfolgte während der Versuchsdurchführungen durch Wasser- bzw. Fließmittel-Zugabe, um verschiedene Konsistenzbereiche untersuchen zu können.

---

## 2. Gliederung des Berichts

---

Der vorliegende Abschlussbericht ist in sieben Kapitel gegliedert. Im Anschluss an die Einleitung und die Gliederung des Berichts wird das System Verifi vorgestellt (Kapitel 3), wobei auch auf die verschiedenen Bestandteile und die Möglichkeiten des Systems eingegangen wird. In Kapitel 4 wird die Vorgehensweise der Untersuchungen erläutert. Darin erfolgt zunächst die Vorstellung über das Vorgehen der Voruntersuchungen im Labor und eine Diskussion der Untersuchungsergebnisse. Anschließend werden die Kalibrierung, der Aufbau des Versuchsprogramms mit den unterschiedlichen Prüfungen und die untersuchten Betone beschrieben. Die Vorstellung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5 sowie im Anhang. Zunächst wird darin auf die einzelnen Frischbetonprüfungen Ausbreitmaß und Setzmaß sowie die rheologischen Untersuchungen eingegangen. Darauf folgt die Darstellung des Zusammenhangs zwischen Ausbreitmaß und dynamischer Fließgrenze sowie die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse. Weiterhin werden die Ergebnisse der Festbetonprüfungen Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul vorgestellt. Der Bericht schließt mit einer Schlussfolgerung und einem Ausblick (Kapitel 6) und Literaturangaben (Kapitel 7).

### 3. Vorstellung des Systems Verifi

Das System Verifi erfasst und dokumentiert die Konsistenz des transportierten Frischbetons in einem Fahrmischer. Die Konsistenz kann dabei entweder im Setzmaß mit einem Messbereich von 0 bis 255 mm oder im Ausbreitmaß von 320 bis 600 mm ermittelt und angezeigt werden, wobei die Anzeige der Messwerte in 5 mm Schritten erfolgt. Zur Ermittlung der Konsistenz benötigt das System eine Mindestlademenge von mehr als 3 m<sup>3</sup> Frischbeton. Diese Lademenge ist unabhängig von dem maximalen Ladevolumen der Mischtrommel (6 oder 8 m<sup>3</sup>). In [1] sind von Seiten des Herstellers durchgeführte Untersuchungen mit dem System Verifi und mit unterschiedlichen Betonen beschrieben.

In Abbildung 1 sind die verschiedenen Bestandteile bzw. der Aufbau des Systems dargestellt. Dabei handelt es sich um einen Prozessor, verschiedene Sensoren zur Erfassung und Aufnahme von Daten, die zur Ermittlung der Konsistenz erforderlich sind, und ein Magnetventil zur Wasserzugabe. Das System verfügt im Weiteren über ein Anzeige- und Bedienfeld im Fahrerhaus und über eine externe Anzeige, siehe Abbildung 1. Über die Anzeigendisplays können die ermittelten Kenngrößen (Ausbreitmaß oder Setzmaß) abgelesen werden. Bei den Untersuchungen in der 1. Phase des Projektes wurden die ermittelten Ausbreitmaße von einem Prüfer von der externen Anzeige abgelesen und dokumentiert.



Abbildung 1: Bestandteile des Systems Verifi auf einem Fahrmischer  
(Quelle: Koehler, E., Grace)

Für das externe Display gibt es verschiedene Abkürzungen, die auf dem Display mit bis zu vier Buchstaben oder Ziffern angegeben werden können. Die möglichen Anzeigen-Kürzel sind in Tabelle 1 erklärt. Die Angaben dieser Kürzel auf dem Display ermöglichen eine Steuerung der erforderlichen Arbeitsschritte für den Fahrer bzw. geben aktuelle Informationen zum Stand des Systems bzw. des Frischbetons in der Mischtrommel.

Tabelle 1: Anzeigenerklärung der externen Anzeige des Systems Verifi\*

| Anzeige          | Bedeutung   |
|------------------|---|
| <b>Horn</b>      | Signal für den Empfang eines Tickets  |
| <b>24</b>        | Mix Countdown; zeigt die erforderlichen Umdrehungen an  |
| <b>dn17</b>      | Umdrehungsgeschwindigkeit der Trommel ist zu schnell  |
| <b>up10</b>      | Umdrehungsgeschwindigkeit der Trommel ist zu langsam  |
| <b>Hold</b>      | Mix Countdown ist beendet → Mindestmischzeit ist noch nicht erreicht  |
| <b>Proc</b>      | Konsistenz wird berechnet (Proc: Kurzform für Processing)   |
| <b>415</b>       | Anzeigenwert für das Ausbreitmaß = 415 mm<br>maximal = 600 mm   |
| <b>. .4.1.5.</b> | Dieser Wert ist z. B. nach einer Zugabe von Wasser oder Zusatzmittel nicht mehr gültig, d. h. es muss eine Neuermittlung abgewartet werden, um einen neuen gültigen Wert zu erhalten. |
| <b>Add</b>       | Es erfolgt eine Wasserzugabe  |
| <b>Sub3</b>      | Lademenge ist kleiner als 3 m <sup>3</sup>  |

\* Quelle: vgl. Fahrer Kurzanleitung (Faltblatt), RS Solutions

Im Faltblatt werden die verwendeten Systembezeichnungen der externen Anzeige erläutert und die Möglichkeiten der Nutzung des Bedienfelds im Fahrerhaus wird in Kurzform beschrieben.

In Abbildung 2 wird eine Anzeigenfolge des Systems Verifi beispielhaft dargestellt. Nach der Beladung der Mischtrommel mit Frischbeton werden die initial erforderlichen Durchmischungen durchgeführt. Hierzu gibt das System Verifi eine Anzahl von 25 Umdrehungen vor. Anschließend schaltet das System auf "Proc". Dies bedeutet eine erste Konsistenzermittlung des Systems. Hierfür ist eine Umdrehungsgeschwindigkeit erforderlich, die sich in einem bestimmten langsam drehenden Bereich befindet. Bei einer Abweichung von dieser einzuhaltenden Geschwindigkeit meldet das System über das Display eine Anpassung der Geschwindigkeit durch den Fahrer. Die Anzeige der vier Punkte: "...." bedeutet eine Ermittlung eines neuen Wertes, da im Zwischenspeicher des Systems noch ein Wert abgespeichert ist, der nicht mehr aktuell ist. Sobald das System einen iterativ bestimmten Wert anzeigt, kann der Fahrer die Fahrt zur Baustelle beginnen. Ähnlich verhält sich dies beim Entladungsvorgang auf der Baustelle. Bis dieser durchgeführt werden kann, muss die Anzeige eines fixen Konsistenzwertes abgewartet werden.



Abbildung 2: Anzeigenfolge des Systems Verifi (beispielhaft),  
 Mix Countdown - Processing - Abwarten des Wertes - Anzeige des ermittelten Ausbreitmaßes

Eine weitere Möglichkeit zum Ablesen der Konsistenzwerte und auch von zusätzlichen Daten bietet das interne Display im Fahrerhaus, siehe Abbildung 3. Dabei handelt es sich um ein Anzeige- und Bedienfeld. Weitere Angaben sind dem Faltblatt: "Fahrer Kurzanleitung" von RS Solutions zu entnehmen.



Abbildung 3: Bedienfeld des Systems Verifi im Fahrerhaus für die Kontrolle und Einstellung durch den Fahrer, hier wird das Setzmaß (Slump) angezeigt (Quelle: RS Solutions)

---

Die Hauptaufgabe des Systems ist die Ermittlung der Konsistenz. Hierzu können das Ausbreitmaß oder Setzmaß am externen Display und auf dem internen Display und Bedienfeld im Fahrerhaus angezeigt werden. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit zu bestimmten Zeitpunkten weitere Daten zu ermitteln. Hierzu ist es die Aufgabe des Fahrers, diese Zeitpunkte über das Bedienfeld zu generieren und somit auch in Echtzeit zu dokumentieren. Auf dieser Grundlage kann bei einer späteren Auswertung der Daten die Konsistenz einem Zeitpunkt zugewiesen werden. Diese nachfolgend beschriebenen Zeitpunkte sind im System voreingestellt und werden in der dargestellten Reihenfolge in einer Auswertungstabelle mit den entsprechenden und ermittelten Daten dokumentiert:

- Beladungszeit
- Verlassen des Betonwerks
- Ankunft auf der Baustelle
- Start des Entladungszeitpunktes
- Verlassen der Baustelle
- Rückkehr im Betonwerk
- Beendigung des Auftrags

Zu den verschiedenen Zeitpunkten werden weitere Daten, über die Konsistenzwerte hinaus, ermittelt. Dazu zählen z. B.

- automatische Wasserzugabe über das Magnetventil, siehe Abbildung 1
- manuelle Wasserzugabe und die Wasserentnahme über den Schlauch, wobei hier lediglich eine Wasserreduktion im Tank dokumentiert wird, obgleich das Wasser in die Mischtrommel zugegeben wird oder zu Säuberungsarbeiten genutzt wird
- Umdrehungen der Mischtrommel

Ein weiterer Bestandteil des Systems Verifi ist das Radio Gateway. Dieses kann in den Betonwerken installiert werden. Dann werden die auf dem Fahrermischer durch das System Verifi gesammelten Daten zunächst automatisch vom Fahrermischer über Funk an das Gateway übertragen, sobald sich das Fahrzeug im Empfangsbereich des Radio Gateways befindet. Automatisch erfolgt nun eine Online-Übermittlung der gesammelten Daten vom Radio Gateway zu RS Solutions in Amerika, wo die Daten ausgewertet werden. Folglich übernimmt RS Solution die Aufgabe einer zentralen Datenaufbereitungsstelle. Die ausgewerteten Daten werden dann in Form von Excel-Tabellen oder als PDF per E-Mail an die jeweiligen Transportbetonunternehmen zurückgesendet.



---

## 4. Vorgehensweise

---

Im vorliegenden Kapitel werden zunächst die Voruntersuchungen im Labor zur Ermittlung der erforderlichen Dosierungsmengen der Zusatzmittel zu einer stufenweisen Steigerung der Konsistenz beschrieben. Anschließend wird die Kalibrierung des Systems Verifi auf den Fahrmischem und das Versuchsprogramm beschrieben, wobei auch die in den Untersuchungen einbezogenen Betone und Prüfungen eingehend erörtert werden.

### 4.1. Voruntersuchungen im Labor

Die Voruntersuchungen im Labor hatten das Ziel, die Auswirkungen der jeweiligen Fließmittelzugabe zu untersuchen. Die Mengen, die zu bestimmten Zeitpunkten über eine Dauer von bis ca. 120 Minuten den Betonen 2 und 3 für eine Konsistenzsteigerung zugegeben werden sollten, wurden im Vorfeld vorgegeben. Die Festlegung der genauen Fließmittelzugabemengen, wie sie für die stufenweise Zugabe zu den jeweiligen Zeitpunkten an den Untersuchungstagen vorgesehen wurden, wird im nachfolgenden Abschnitt 4.3.2 anhand der beiden Diagramme in Abbildung 8 und Abbildung 9<sup>1</sup> genauer erläutert.

Für die Voruntersuchungen wurde jeweils ein Mischvolumen von 0,040 m<sup>3</sup> der Betone 2 und 3 in einem Zwangsmischer hergestellt. Um den Mischvorgang im Fahrnischer zu simulieren, erfolgte dann eine Umfüllung der Frischbetone in einen Freifallmischer. In diesem wurden die Rezepturen über eine Zeitdauer von ca. 90 Minuten mit relativ langsamer Geschwindigkeit gemischt.

Lediglich für die Probenahme wurde der Mischvorgang gestoppt. Die entnommenen Betonmengen wurden nach der Ermittlung des jeweiligen Ausbreitmaßes anschließend wieder zurück in den Freifallmischer gegeben. Nach jedem Prüfzyklus wurde eine bestimmte Menge an Fließmittel den zu untersuchenden Betone 2 und 3 zugegeben. Die jeweiligen Zugabemengen sind in Anhang 1 tabellarisch aufgelistet. Bei den Versuchen wurde unter Beachtung einer minimalen erforderlichen Befeuchtung der Prüfgeräte der Beton nach jeder Prüfung in den Freifallmischer zurückgegeben.

Die Ergebnisse der Fließmittelzugabe und der Ausbreitmaße aus den in diesem Abschnitt beschriebenen Voruntersuchungen sind graphisch in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt. Mit Hilfe des Ausbreitmaßes konnte festgestellt werden, dass nach jeder Fließmittelzugabe die Konsistenz des Frischbetons anstieg. Aber nach wenigen Minuten konnte bereits eine Konsistenzänderung in Richtung des Ansteifens beobachtet werden.

---

<sup>1</sup> Aus Gründen einer chronologischen Erläuterung der Vorgehensweise wurde diese Darstellung gewählt, bei der die Diagramme, welche die Zugabe-Mengen angeben, auf nachfolgenden Seiten erläutert werden, siehe Seite 14.



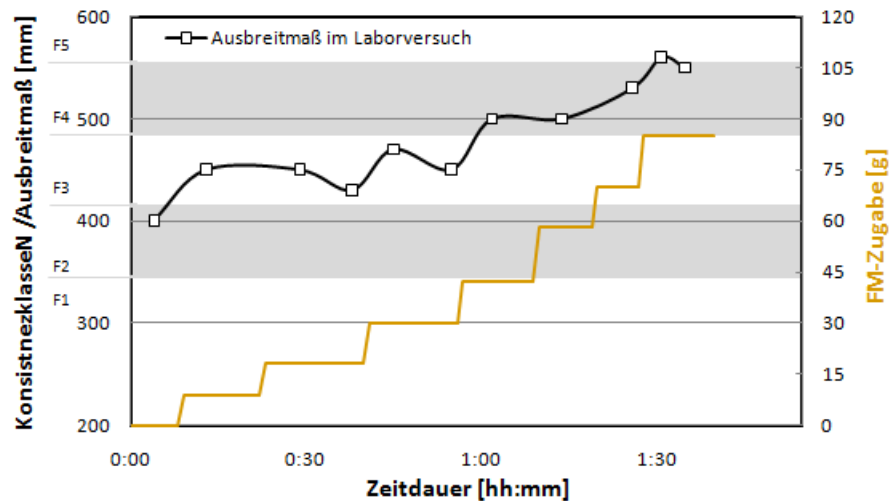


Abbildung 4: Voruntersuchungen im Labor: Beton 2

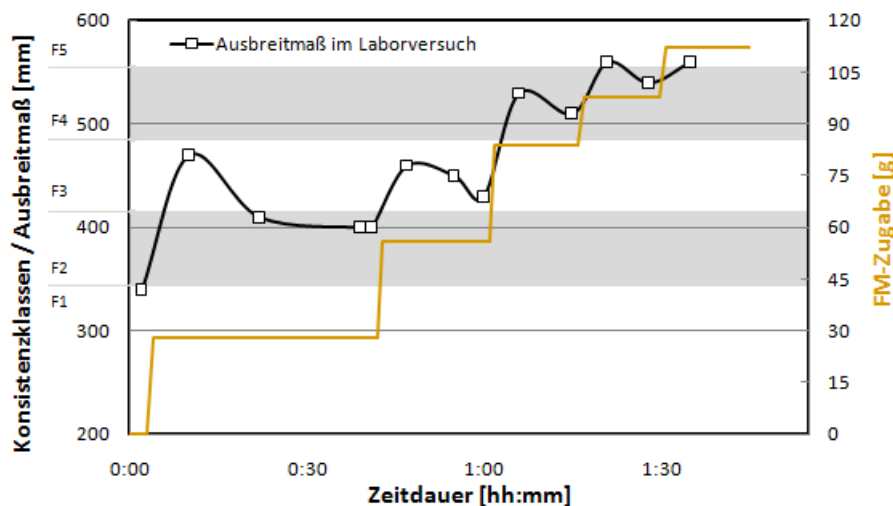


Abbildung 5: Voruntersuchungen im Labor: Beton 3

Im Rahmen der Vorversuche konnten nachfolgende Beobachtungen gemacht werden: Im Vergleich zu den für die jeweilige Konsistenzänderung festgelegten Zugabe-Mengen an Fließmittel, wie sie in den nachfolgenden Diagrammen in Abbildung 8 und Abbildung 9 (siehe Seite 14) aufgezeigt sind, waren im Rahmen der Voruntersuchungen insgesamt größere Mengen an Fließmittel erforderlich, um die Konsistenz über die geforderte Zeitdauer zu halten und im weiteren die Konsistenz zu steigern. Der Grund hierfür ist im Ansteifen des Frischbetons zu sehen, wie er auch in [2] eingehend beschrieben ist.

Ein weiterer Unterschied zwischen dem Frischbetonverhalten im Rahmen der Voruntersuchungen und des eigentlichen Versuchsprogramms mit den Fahrmischern kann auf die verschieden großen Frischbetonmengen zurückgeführt werden, wie sie für die Laborversuche und in den Fahrmischern zum Einsatz kamen. Nach [3] lässt sich im Allgemeinen gerade in Laborversuchen mit kleinen Betonmengen ein stärkeres Ansteifverhalten feststellen. Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor ist die Verwendung von trockener Gesteinskörnung im Labor, während im Betonwerk ein Feuchtegehalt in der Betonzusammensetzung prozentual mit einbezogen wurde.

Für die Großversuche, in denen insgesamt 6 m<sup>3</sup> Beton pro Fahrmischer und Versuchsserie zum Einsatz kamen, wurden die im Vorfeld unabhängig der Laborversuche ermittelte Zugabe an Fließmittel eingeplant (siehe nachfolgende Abbildung 8 und Abbildung 9 auf Seite 14).

## 4.2. Kalibrierung

Die Kalibrierung der Systeme erfolgte fünf bzw. zwei Tage vor Beginn der Untersuchungen, nachdem innerhalb einer Woche zuvor die Verifi-Systeme in den Fahrmischern installiert worden waren. Da jedes Fahrzeug spezifische Eigenschaften bzgl. der Antriebstechnik und Fahrzeughydraulik aufweist und auch die Mischtrommeln sich sehr stark unterscheiden können, ist eine auf den Fahrmischer spezifische Kalibrierung erforderlich. Weitere Unterschiede der Fahrmischer liegen in den verschiedenartigen Abmessungen der Anschlüsse, des Wassertanks inkl. aller relevanten Leitungen und Schläuche.

Für die Durchführung der Kalibrierung wurde der Fahrmischer mit einem Standardbeton beladen. Um eine längere Verarbeitbarkeit sicherstellen zu können, kam ein Erstarrungsverzögerer zum Einsatz. Nachfolgend sind die wesentlichen Angaben des für die Kalibrierung verwendeten Betons angegeben:

### Verwendeter Beton:

- Zement CEM III/A 42,5N
- Gesteinskörnung Größtkorn: 16 mm
- Zusatzmittel VZ und BV
- Lademenge 8 m<sup>3</sup>
- Festigkeitsklasse C25/30
- Konsistenzklasse F3

Nach Aussage des Herstellers kann ein mit Normalbeton kalibriertes System für alle Transportbetone angewendet werden. Besonderheiten stellen jedoch Betone dar, die große Unterschiede in der Zusammensetzung aufweisen. Eine typische Ausnahme sind Betone mit einem sehr geringen Wasseranteil.

Da der Messbereich des Systems für das Ausbreitmaß zwischen 320 und 600 mm liegt, sollte bei der Kalibrierung der Frischbeton im Fahrmischer über die Zeit und über eine möglichst große Bandbreite dieses Bereichs auf die entsprechende Konsistenz eingestellt werden. Daher wird der Fahrmischer mit einem Beton beladen, dessen Konsistenz im Bereich der Konsistenzklassen von F1 bzw. F2 liegen sollte. Nach jeder Konsistenzermittlung über das System Verifi wurde zum Abgleich der Werte eine Prüfung des Frischbetons nach DIN EN 12350-5:1009-08 vorgenommen. Dann wurde die Konsistenz unter Zugabe von Wasser gesteigert. In Abbildung 6 ist beispielhaft der Verlauf mit der Zugabe von Wasser nach jedem Prüfzyklus dargestellt. Zu jedem Zugabezeitpunkt wurden 80 bzw. 100 l Wasser zugegeben.

Ein Prüfzyklus besteht aus dem Ablesen eines iterierten und eindeutigen Wertes am externen Display des Systems Verifi und einer Prüfung der entsprechenden Frischbetonprüfung. In diesem Fall wurden das Ausbreitmaß und das Setzmaß ermittelt. Bei diesem Vorgehen erlauben die Untersuchungsergebnisse der Frischbetonprüfungen eine Aussage zum Ausbreitmaß und infolge der Beobachtung der Veränderungen über die Zeit auch zum Konsistenzverhalten des Frischbetons. Die Verläufe des Konsistenzverhaltens können mit den bestehenden Kalibrierungskurven verglichen werden. Bei diesem Vergleich wird das System mit jener Kalibrierungskurve eingestellt, die am ehesten den tatsächlich ermittelten Werten nach DIN EN 12350-5:1009-08 entsprechen.

Eine Erhebung von Daten, bei einem exemplarisch ausgewählten Transportbetonwerk, zu vorwiegend zur Anwendung kommende Fahrzeugtypen und Fahrmischer-Aufbauten ergab eine hauptsächliche Nutzung von Mercedes- und MAN-Fahrgestellen mit überwiegend vier Achsen sowie von Stetter- und Liebherr-Aufbauten.

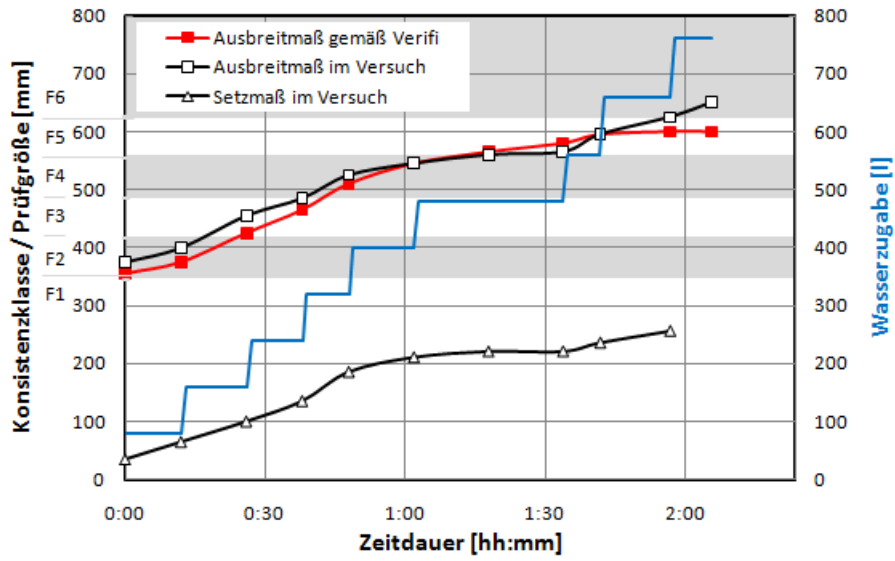


Abbildung 6: Verlauf der Konsistenzänderung (Ausbreitmaß und Setzmaß) durch Wasserzugabe für die Kalibrierung des Fahrmischers, hier: Mischtrommel mit „altem“ Mischwerkzeug

### 4.3. Versuchsprogramm

Dem Versuchsprogramm wurden, nach Rücksprache mit den Projektbeteiligten in der Besprechung vom 27.04.2010, die in Tabelle 2 aufgezeigten Eigenschaften der Betonrezepturen zugrunde gelegt. So wurden drei Betone gewählt, die sich in ihren Festigkeiten unterscheiden sollten. Jeder der beiden Fahrmischer wurde einmal mit diesen unterschiedlichen Betonen beladen. Dabei wurde während der Versuchsdurchführungen die Konsistenz mit einer Zugabe von Wasser bzw. Fließmittel geändert, um verschiedene Konsistenzbereiche gezielt zu erreichen.

Tabelle 2: Anforderungen an die Betone

| Beton | Festigkeitsklasse | Konsistenz |                     |                | Zusatzmittel          |
|-------|-------------------|------------|---------------------|----------------|-----------------------|
|       |                   | Beladung   |                     | Zielkonsistenz |                       |
| 1     | C20/25            | F2         | Übergang mit Wasser | F3             | BV*                   |
| 2     | C25/30            | F3         | in Stufen bis       | F5             | PCE**, ab Beginn      |
| 3     | C35/45            | F3         | in Stufen bis       | F5             | PCE**, spätere Zugabe |

\* Betonverflüssiger

\*\* Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylatether

#### 4.3.1. Untersuchte Betone

Auf der Grundlage der Anforderungen der Betone (siehe Tabelle 2) ergaben sich weitere Festlegungen in Bezug auf die zur Anwendung gekommenen Betone:

- Zement CEM III/A 42,5N
- Zusatzmittel Flugasche
- Gesteinskörnung Größtkorn: 16 mm
- Zusatzmittel gemäß Tabelle 2 und zusätzlich Erstarrungsverzögerer zu Erreichung einer Verarbeitbarkeitszeit über mehrere Stunden
- Volumen 6 m<sup>3</sup> pro Transportfahrt

Für die unterschiedlichen Rezepturen wurden Wasserzement- bzw. Wasserbindemittelwerte nach Tabelle 3 gewählt. Bei Beton 1 ist zu berücksichtigen, dass im Vergleich zu der rechnerisch ermittelten Wassermenge des Mischungsentwurfs ein um 15 l/m<sup>3</sup> geringeres Wasservolumen dem Beton beim Mischen im Werk zugegeben wurde. Diese vorgehaltene Wassermenge sollte zu einem späteren Zeitpunkt zur Anpassung der geforderten Konsistenz zugegeben werden. Alle Angaben zur Wasserzugabe stellen somit die tatsächlich bis zum Abschluss der Konsistenzprüfung zugegebenen Wassermengen dar.

Tabelle 3: Wasserzement- und Wasserbindemittelwerte nach Sollzusammensetzung

| Beton | Wasserzementwert | Wasserbindemittelwert |
|-------|------------------|-----------------------|
|       | w/z              | w/b                   |
| 1     | 0,70             | 0,65                  |
| 2     | 0,65             | 0,59                  |
| 3     | 0,52             | 0,49                  |

### 4.3.2. Versuchsdurchführung

Bei der Durchführung der Untersuchungen wurden die in dem nachfolgenden Abschnitt 4.3.3 genannten Prüfungen für Frischbeton an sechs Tagen mit zwei Fahrmischern über eine jeweilige Zeitdauer von über 120 Minuten vorgenommen. In Tabelle 4 sind die Versuchstage mit den entsprechenden Fahrmischern und Betonen (siehe Tabelle 2) angegeben. Die Bezeichnungen der Fahrnischer beziehen sich auf unterschiedliche Mischtrommeln, wobei Fahrnischer A einer „alten“ Mischtrommel mit bereits unbestimmt abgenutztem Mischwerkzeug entspricht. Bei Fahrnischer B handelt es sich um ein Fahrzeug, das mit einer neuen Trommel und demnach mit einem Mischwerkzeug ohne Verschleiß ausgerüstet ist.

Tabelle 4: Überblick über die Versuchsdurchführung

| Versuchsdatum* | Fahrnischer** | Beton | Untersuchungstag |
|----------------|---------------|-------|------------------|
| 25.08.2010     | A             | 1     | 1                |
| 26.08.2010     | A             | 2     | 2                |
| 27.08.2010     | A             | 3     | 3                |
| 30.08.2010     | B             | 1     | 4                |
| 31.08.2010     | B             | 2     | 5                |
| 01.09.2010     | B             | 3     | 6                |

\* an den jeweiligen Tagen wurden die Untersuchungen ab ca. 9.00 Uhr durchgeführt

\*\* A: Fahrnischer mit „altem“ Mischwerkzeug, Aufbauhersteller: I

B: Fahrnischer mit „neuem“ Mischwerkzeug, Aufbauhersteller: II

Auf Grundlage der Vorgaben über die Betone (siehe Tabelle 2) wurden die Abläufe für die sechs Untersuchungstage geplant. Zur Erzielung der Einstellung verschiedener Konsistenzbereiche ergaben sich die stufenweisen Änderungen der Konsistenz über eine jeweilige Zeitdauer von ca. 120 Minuten, siehe Abbildung 7 bis Abbildung 9.

Ausgangspunkt und somit Vergleichsbasis für die zeitgleich erstellten Untersuchungsprotokolle war jeweils der Zeitpunkt Null. Dieser stellt den Zeitpunkt der ersten Probenahme dar, nachdem die Anzeige des Systems den ersten Wert ausgibt. Zuvor wurde der Fahrnischer mit Frischbeton beladen und die erforderlichen Durchmischungen wurden im Betonwerk der Dyckerhoff AG in Griesheim in der Mischtrommel durchgeführt. Nach dieser Probenahme fuhr der Fahrnischer ins Forschungs- und Prüflabor Massivbau der TU Darmstadt. Dort wurden dann sogleich die ersten Frischbetonprüfungen des Ausbreitmaßes und des Setzmaßes durchgeführt. Die Fahrzeit wurde zunächst auf eine Fahrtdauer von ca. 25 Minuten geschätzt. Tatsächlich konnte aber auf Grund der Fahrt durch die Innenstadt Darmstadts mit teilweise hohem Verkehrsaufkommen diese nicht genau vorhergesehen werden. Aus diesem Grund ließen sich auch die einzelnen Zeitpunkte der Frischbetonprüfungen im Labor nicht genau planen, sondern wurden lediglich mit ungefährender Zeitvorhersage anberaumt.

Die geplanten Änderungen der Konsistenz des Frischbetons erfolgte bei Beton 1 mit einer Wasserzugabe von  $15 \text{ l/m}^3$ , siehe Abbildung 6. Der Anteil dieser Wassermenge ist in dem Mischungsentwurf für diese Beton 1 enthalten, wurde jedoch bei der Herstellung des Betons im Werk planmäßig zurückgehalten, sodass diese Menge zu dem späteren geplanten Zeitpunkt zugegeben werden konnte. Bei den Betonen 2 und 3 erfolgte die Konsistenzsteigerung in mehreren Stufen durch Zugabe von Fließmittel, siehe Abbildung 8 und Abbildung 9. Die Zugabemengen von Wasser bzw. Fließmittel sind an der rechten Ordinate angegeben. Bei allen Rezepturen wurde eine Entladung von  $1 \text{ m}^3$  nach 70 Minuten durchgeführt, um gezielt den Füllgrad in der Mischtrommel zu reduzieren.

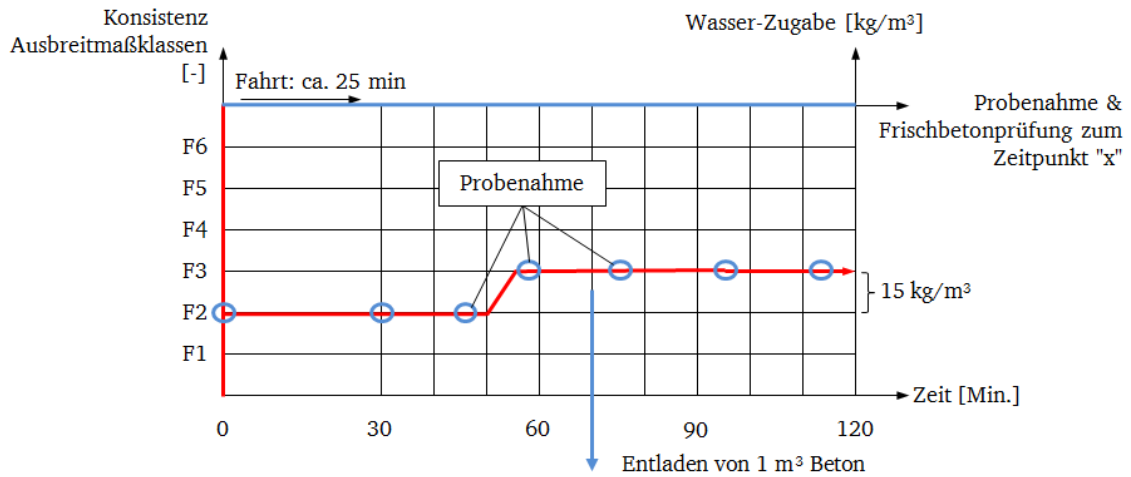


Abbildung 7: Geplante Änderung der Konsistenz für die Beton 1: C20/25, von F2 Übergang mit Wasser bis F3, BV

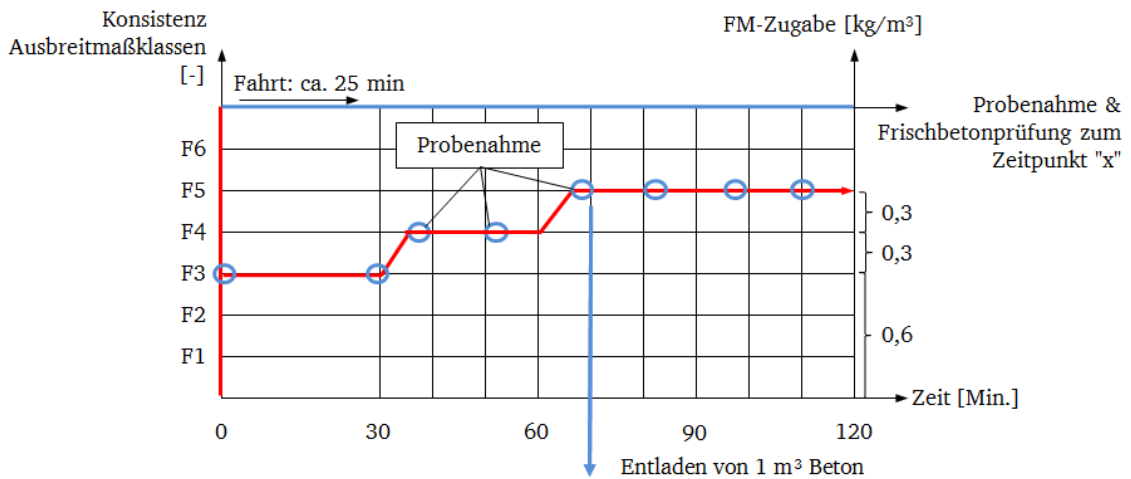


Abbildung 8: Geplante Änderung der Konsistenz für die Beton 2: C25/30, von F3 mit PCE in Stufen bis F5, Konsistenzsteigerung mit PCE ab Ankunft im Labor (30 Minuten)

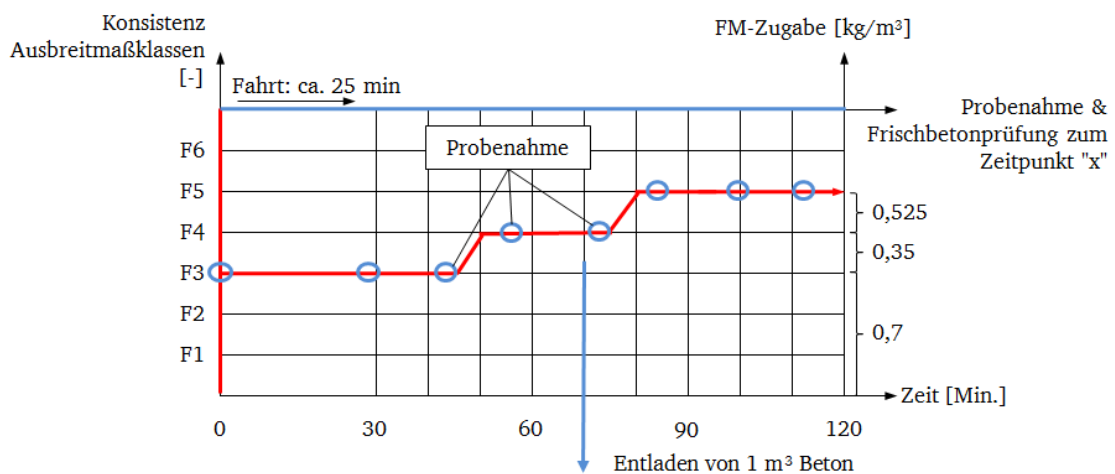


Abbildung 9: Geplante Änderung der Konsistenz für die Beton 3: C35/45, von F3 mit PCE in Stufen bis F5, spätere Konsistenzsteigerung mit PCE (ab 45 Minuten)

Zusammenfassend lässt sich der Ablauf der sechs Versuchstage in die nachfolgenden Arbeitsschritte unterteilen, welche beispielhaft im Diagramm von Abbildung 10 in seiner zeitlichen Abfolge beschrieben werden. Neben der Protokollierung der Prüfungen für Frischbeton und der Dokumentation der Ergebnisse der Festbetonprüfungen, wurde über die gesamte Zeitdauer die Anzeige des externen Anzeigendisplays der Fahrmischer erfasst und dokumentiert.

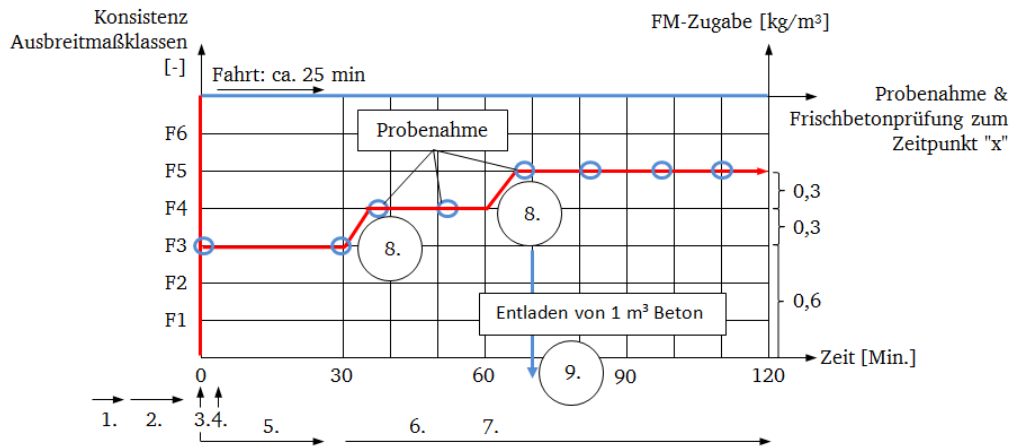


Abbildung 10: Diagramm der geplanten Änderung der Konsistenz für die Beton 2 zur Beschreibung der jeweiligen und zeitlich eingeteilten Arbeitsschritte

1. Beladen des Fahrmischer im Betonwerk der Dyckerhoff AG in Griesheim mit jeweils  $6 \text{ m}^3$  Frischbeton, vor dem Zeitpunkt "0".
2. Die erforderliche Durchmischung des Frischbetons im Fahrmischer, nach Beendigung des Beladevorgang, wurde auf dem Werksgelände durchgeführt. Hierbei zählt das System 25 Umdrehungen abwärts (Anzahl einstellbar). Anschließend mischt der Fahrmischer solange weiter bis eine voreingestellte Mindestmischzeit erreicht wird, sofern erforderlich.
3. Erste Probenahme erfolgte, sobald das System den ersten Wert anzeigt  $\rightarrow$  Nullpunkt.
4. Die Ermittlung des ersten Ausbreit- und Setzmaßes erfolgte im Betonwerk durch Mitarbeiter der TU Darmstadt mit anschließender Fahrt ins Laborgebäude.
5. Der Fahrmischer fährt direkt im Anschluss an die erste Probenahme ins Forschungs- und Prüflabor Massivbau der TU Darmstadt. Die Fahrzeit betrug ca. 25 Minuten.
6. Durchführung weiterer Frischbetonprüfungen und Herstellung der Probekörper entlang der geplanten Zeitschiene, ab der ersten Probenahme im Labor bis zur Erreichung der Zielkonsistenz. Dabei war es das Ziel, in möglichst kurzen Zeitabständen viele aufeinanderfolgende Prüfungen durchzuführen, um eine Vielzahl an Prüfwerten über die Zeitschiene zu erhalten. Dies war von der Vor- und Nachbereitungszeit sowie von der zehnmütigen Mischzeit nach Fließmittelzugabe abhängig. Die Prüfungen des Ausbreitmaßes, Setzmaßes und Setzfließmaßes wurden hier von zwei Prüfern mit jeweils eigener Geräteausstattung durchgeführt.
7. Ab dem dritten Versuchstag wurde von Prüfer 1 zusätzlich das Ausbreitmaß an dem Ausbreittisch des Prüfers 2 ermittelt, um zusätzliche Werte aus einer dritten Versuchsreihe innerhalb der Untersuchungsserie zu erhalten.
8. Einstellen der Konsistenz der jeweiligen Betone mit Wasser- bzw. Fließmittel
9. Nach einer Zeitdauer von 70 Minuten wurden jeweils 2 bzw.  $1 \text{ m}^3$  Frischbeton entladen. Ziel war hierbei die Untersuchung des Systems im Hinblick auf eine Ladung von einer nicht vollgefüllten Mischtrommel. Zusätzlich wurden bei jedem Probenahmezeitpunkt Frischbetonmengen entnommen, die für die jeweiligen Prüfungen ausreichend waren, ca.  $0,10 \text{ m}^3$ .



### 4.3.3. Prüfungen

Da das System Verifi in den USA entwickelt wurde, liegt dem System als Prüfgröße das Setzmaß zugrunde. Aus diesem Grund wurde neben dem Ausbreitmaß auch das Setzmaß zur Bewertung der Frischbetoneigenschaften mit in das Versuchsprogramm aufgenommen. Somit war ein direkter Vergleich zwischen den beiden Konsistenzprüfverfahren möglich.

Im Rahmen der 1. Projektphase wurde das Ausbreitmaß als maßgebende Prüfgröße festgelegt. Ziel war es hierbei, einen direkten Vergleich herzustellen, zwischen den manuell ermittelten Werten des Ausbreitmaßes nach DIN EN 12350-5:2009-08 und dem Ausbreitmaß, welches vom System Verifi am externen Display angezeigt wird.

Für die höheren Konsistenzbereiche wurde das Setzfließmaß mit eingeplant. In Tabelle 5 sind in Ergänzung zu den wesentlichen Frischbetonprüfungen auch die geltenden Regelwerke angeführt.

Tabelle 5: wesentliche Regelwerke zu den Frischbetonprüfverfahren

| Frischbetonprüfverfahren |                  | Regelwerke             |                    |
|--------------------------|------------------|------------------------|--------------------|
| Deutschland              | USA              | Deutschland            | USA                |
| Setzmaß                  | Slump Test       | DIN EN 12350-2:2009-08 | ASTM C143-10       |
| Ausbreitmaß              | Flow- Table Test | DIN EN 12350-5:2009-08 | kein ASTM Standard |
| Setzfließmaß             | Slump-Flow Test  | DIN EN 12350-8:2010-12 | ASTM C1611-09b     |

In Tabelle 6 sind Unterschiede in der deutschen und amerikanischen Normung in Bezug auf die Prüfungen für Frischbeton angegeben. Hierbei sind besonders beim Setzmaß unterschiedliche Zeitdauern angegeben. Nach deutscher Normung darf der Vorgang des Hochziehens des Setztrichters innerhalb einer Zeitspanne von zwei bis fünf Sekunden erfolgen, während nach dem ASTM C143-10 der Trichter innerhalb von drei bis sieben Sekunden hochgezogen werden darf. Diese Zeitdauern können einen starken Einfluss auf die Prüfgröße des Setzmaßes haben. Ferner sind auch die Stellen auf dem abgesetzten Probekörper zur Messung des Setzmaßes unterschiedlich.

Tabelle 6: Unterschiede in deutscher und amerikanischer Normung - Frischbetonprüfungen

| Prüfung         | Regelwerke                   | Zeitdauer für das Hochziehen des Setztrichters |   | Stelle der Messung  |
|-----------------|------------------------------|--|---|---|
| Ausbreitmaß     | DIN EN 12350-5:2009-08       | 1 - 3 s  | Hochziehvorgang beginnt 30 s nach Abstreichen des Betons  |   |
| Flow-Table test | kein ASTM Standard verfügbar |  |   |   |
| Setzmaß         | DIN EN 12350-2:2009:08       | 2 - 5 s  | Vorgang von Einfüllen bis Hochziehen: 150 s   | am höchsten Punkt des abgesetzten Probekörpers                |
| Slump Test      | ASTM C 143-10                | $5 \pm 2$ s                                    | Vorgang von Einfüllen bis Hochziehen: 150 s   | am Mittelpunkt der oberen Fläche des abgesetzten Probekörpers |
| Setzfließmaß    | DIN EN 12350-8:2010-12       | 1 - 3 s  | Hochziehen innerhalb von 30 s (Betonfluss nicht beeinträchtigen)  |   |
| Slump-Flow Test | ASTM C 1611-09b              | $3 \pm 1$ s                                    | Vorgang von dem Einfüllvorgang bis zum Hochziehen: 150 s (Setztrichter bis zu einer Höhe von $225 \pm 75$ mm anheben) |   |

Im Rahmen der Untersuchungen wurde das Ausbreitmaß zeitgleich von zwei Prüfern und somit auch mit zwei Ausbreittischen ermittelt. Bei diesen Tischen handelt es sich um unterschiedliche

Ausführungen, die jedoch den Vorgaben der DIN EN 12350-5:2009-08 entsprechen. Danach werden Anforderungen vorwiegend an den oberen beweglichen Teil des Ausbreittisches gestellt. Dieser soll ein Gewicht von  $16 \pm 0,5$  kg aufweisen, siehe Abbildung 11. Der Unterschied besteht in der Aufstellung und dem Gewicht des unteren feststehenden Teils. Hierbei weist der nach Fertigungsdatum neuere Ausbreittisch eine Lagerung entlang des Rahmenunterseite und einen leichteren Unterbau auf. Im Vergleich dazu hat der ältere Tisch eine Drei-Punkt-lagerung und ist insgesamt schwerer. Dies führt zu einem direkteren Lasteintrag und resultiert in einem leicht größeren Ausbreitmaß, ca. 20 mm. Die damit ermittelten Konsistenzwerte liegen auch auf Grund der unterschiedlichen Prüftische (Abbildung 12) immer noch im Bereich der zulässigen Vergleichbarkeitswerte nach DIN EN 12350-5:2009-08.

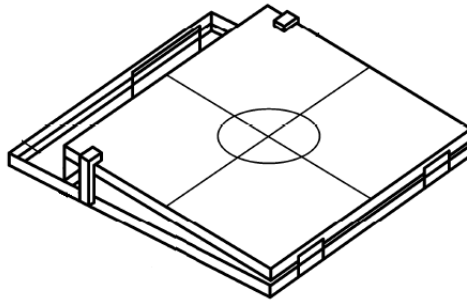


Abbildung 11: Ausbreittisch nach DIN EN 12350-5:2009-08

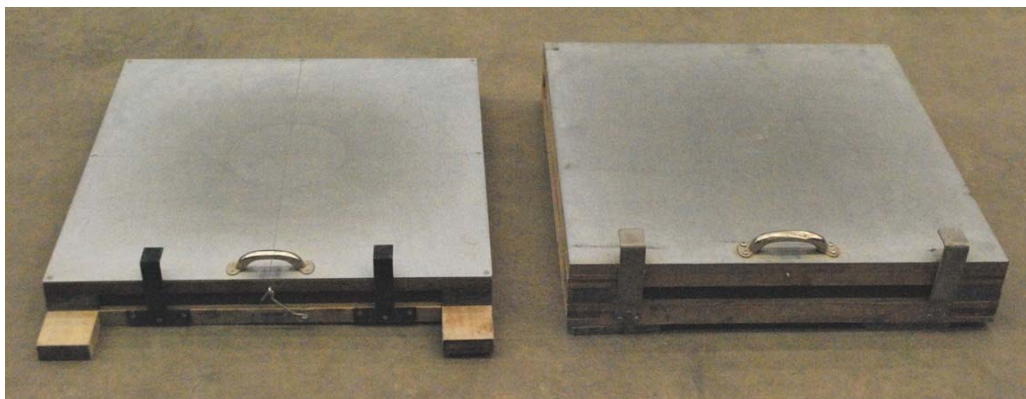


Abbildung 12: Ausbreittische – links: Neu, leichter Unterbau; rechts: der ältere Tisch mit schiererem Unterbau und Drei-Punkt-lagerung (Füßstützen nicht ausgedreht)

Zur Charakterisierung der untersuchten Betone wurden ferner die nachfolgenden Versuche geplant:

- Untersuchung des rheologischen Verhaltens mit einem Beton-Rheometer
- Druckfestigkeitsprüfungen nach 28 Tagen an Würfeln 150 x 150 x 150 mm
- E-Modul-Prüfungen nach 28 Tagen an Zylindern 150 x 300 mm

Desweiteren erfolgte eine Dokumentation von den am Display angezeigten und vom System Verifi ermittelten Ausbreitmaßen, um einen direkten Vergleich der Prüfwerte in Abhängigkeit der Zeit herstellen zu können. Auch die einzelnen Wasser- bzw. Fließmittelzugaben zu Konsistenzsteigerung, Probenahmen und Entladungen des Frischbetons 70 Minuten nach dem definierten Nullpunkt wurden dokumentiert.

---

## 5. Ergebnisse

---

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der sechs Untersuchungstage vorgestellt. Das Hauptaugenmerk der Versuche liegt auf der Untersuchung des ermittelten Ausbreitmaßes durch das System Verifi im Vergleich zu den Kenngrößen der manuellen Ausbreitmaß-Prüfung nach DIN EN 12350-5:2009-08. Vor diesem Hintergrund erfolgen zunächst die vergleichenden Gegenüberstellungen der ermittelten Werte der Ausbreitmaße. Dabei wird auch auf die Ergebnisse des Setzmaßes eingegangen. Im Anschluss wird die Auswertung der rheologischen Untersuchungsergebnisse vorgestellt, worauf die Darstellung eines Zusammenhangs zwischen Ausbreitmaß und der dynamischen Fließgrenze folgt. Im Weiteren folgt eine statistische Auswertung, vorwiegend anhand den Präzisionsdaten gemäß DIN EN 12350-5:2009-08. Das Kapitel schließt mit den Ergebnissen der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in diesem Kapitel nur die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungstage, vorwiegend in Form von Diagrammen vorgestellt. Eine Untergliederung der einzelnen Abschnitte erfolgt entsprechend der drei Betone. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse sowie der Setzfließmaßwerte finden sich in den zugehörigen Anhängen.

In Abbildung 13 wird zur Erläuterung der Ergebnisdarstellung des Ausbreitmaßes ein Diagramm den Abschnitten der Ergebnisse vorweggenommen. Die Diagramme sind mit jeweils zwei Abszissen und zwei Ordinaten aufgebaut.

|                  |   |
|------------------|---|
| Untere Abszisse: | Zeitachse der einzelnen Versuchsserien  |
| Obere Abszisse:  | einzelne Probenahme-Zeitpunkte mit fortlaufender Nummerierung<br>(Da nach jeder Probenahme ein Prüfzyklus folgte, entsprechen die zeitlich darauffolgenden Prüfwerte der vorangestellten Probe-Nummer.) |
| Linke Ordinate:  | 1. Unterteilung des Diagramms in Konsistenzklassen (grauer Bereich)<br>2. Skalierung des Ausbreitmaßes in mm (durgezogene Linien)   |
| Rechte Ordinate: | Zugabe-Mengen von Fließmittel bzw. Wasser   |

Anhand der stufenweisen Darstellung sind die zugegebenen Mengen bestimmten Zeitpunkten zugeordnet. Demnach sind die ermittelten Werte des Ausbreitmaßes der linken Ordinate und die Zugabe-Mengen der rechten zugeteilt, wobei beide von der Zeitachse abhängig sind. Die Ausbreitmaß-Ergebnisse des Systems Verifi werden anhand der roten Markierungen dargestellt, während alle schwarzen Darstellungen nach DIN EN 12350-5:2009-08 ermittelt werden. Die Prüfungen der Konsistenzprüfungen wurden insgesamt von zwei Prüfern (1 und 2) und zwei Ausbreittischen (a und b) durchgeführt. Prüfer 1 führte dabei die Prüfungen teilweise mit beiden Tischen (a und b) durch, während Prüfer 2 lediglich mit Ausbreittisch b prüfte.

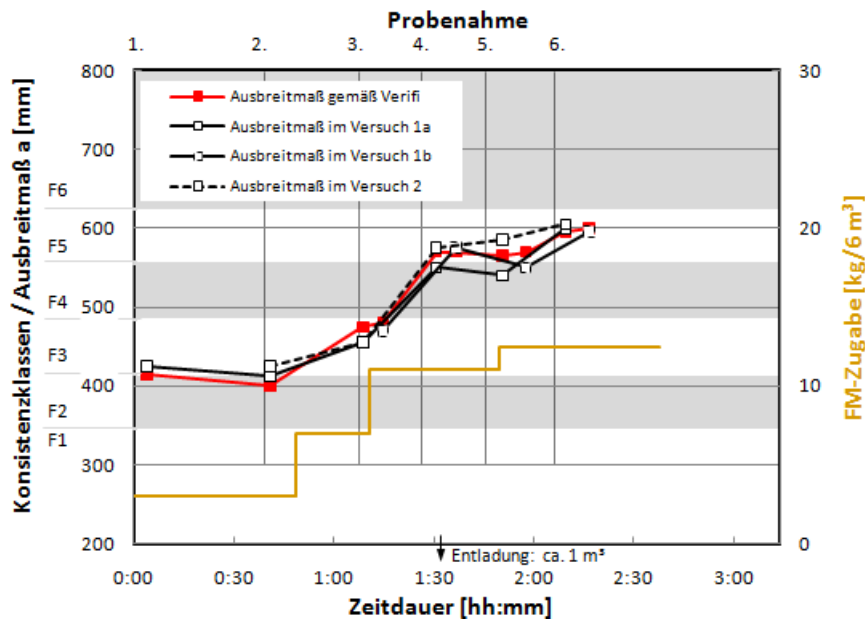


Abbildung 13: Diagramm zur Erläuterung der Darstellung anhand der Ausbreitmaß-Ergebnisse

Die Ergebnisse werden nach Tabelle 4 und gemäß der nachfolgenden Reihenfolge bezeichnet:

|               |           |                    |                      |
|---------------|-----------|--------------------|----------------------|
| Fahrmischer - | Beton -   | Untersuchungstag - | Aufzählung der Probe |
| [A/B] -       | [1/2/3] - | [1/2/3/4/5/6] -    | [1...]               |

Um eine Vergleichbarkeit aller Versuchsergebnisse herstellen zu können, wurde der Nullpunkt als der Zeitpunkt definiert, zu dem die erste Probenahme, kurz nach der Beladung des Fahrzeugs erfolgte.

## 5.1. Ausbreitmaß und Setzmaß

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Konsistenzermittlung des Frischbetons beschrieben. Dabei erfolgt eine Untergliederung der Abschnitte zunächst in die drei Betone und darunter in den Typ des Fahrzeugs, bzw. der Mischtrommel. Die zum Einsatz gekommenen Fahrzeuge unterscheiden sich hauptsächlich im Alter des Werkzeugs der Mischtrommel und nach dem Hersteller der LKWs, vgl. Tabelle 4. Die Prüfungen des Ausbreitmaßes wurden in den Versuchsserien manuell gemäß DIN EN 12350-5:2009-08 und für das Setzmaß gemäß DIN EN 12350-2:2009-08 durchgeführt. Das System Verifi ermittelt die Konsistenz des Frischbetons im Fahrmischer innerhalb eines Messbereichs von 320 bis 600 mm, in Abhängigkeit des für die Mischtrommel aufgebrauchten Drehmoments und des dafür erforderlichen hydraulischen Drucks. Da das System Verifi die ermittelten Kenngrößen zur Konsistenz im Rahmen dieses Projekts als Ausbreitmaß (alternativ: Setzmaß) angegeben hat, ist hier ein direkter Vergleich zu den nach DIN EN 12350-5:2009-08 ermittelten Ergebnissen möglich.

Bei der Durchführung der Prüfungen ergaben sich Änderungen zu den geplanten Verläufen nach Abbildung 7 bis Abbildung 9. Dies ist auf die Zeitdauer der Fahrten des Fahrmischers durch die Stadt Darmstadt mit teilweise hohem Verkehrsaufkommen zurückzuführen. Aus diesem Grund wurde das Vorgehen der ersten drei Untersuchungstage als maßgebend angenommen und die weiteren Versuche wurden hinsichtlich der Zeitpunkte und der Menge der Zugabe an Fließmittel an diese Abläufe angepasst.

Während in dem vorliegenden Abschnitt die Ergebnisse graphisch dargestellt sind, werden die kompletten Daten tabellarisch im Anhang aufgelistet. Zu den Angaben der statistischen Auswertung und Präzision wird auf den Abschnitt "5.4 Statistische Auswertung" verwiesen.

### 5.1.1. Beton 1: Ausbreitmaß und Setzmaß

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zu Ausbreitmaß und Setzmaß der Beton 1 vorgestellt. Die gewonnenen Ergebnisse sind im Einzelnen in tabellarischer Form in Anhang 2 zusammengestellt.

#### A-1-1

Abbildung 14 veranschaulicht die Änderung der gemessenen Ausbreitmaße der Versuchsserie A-1-1 in Abhängigkeit der Zeit und der Probenahme-Zeitpunkte sowie der Wasserzugabe. Wie anhand der roten Markierung in Abbildung 14 deutlich wird, nehmen die ermittelten Werte in der Zeit von 0:00 bis 1:00 Stunde kontinuierlich ab. Nach dem Zeitpunkt 1:09 [hh:mm] steigt die Konsistenz bedingt durch die Wasserzugabe von knapp 15 l/m<sup>3</sup>, dies entspricht in diesem Fall einer Zugabe von 80 l auf die Frischbetonmenge von 6 m<sup>3</sup> abzüglich der unbestimmten entnommenen Betonmengen für die einzelnen Probenahmen, an. Zwischen der 4. und 5. Probenahme blieb die Konsistenz konstant, bis sie nach der 6. Probenahme wieder abgefallen ist.

Die manuell ermittelten Werte nach der 2. und 3. Probenahme (eingekreiste Werte) stellen Prüfgrößen dar, bei deren Ermittlung die Ausbreittische nicht optimal aufgestellt waren. Nach Erkennung dieses Sachverhaltes wurden die Ausbreittische für die 4. Probenahme und für alle darauffolgenden Werte horizontal ausgerichtet.

Bei einem Vergleich der Prüfwerte nach DIN EN 12350-5:2009-08 und den Werten des Systems Verifi ist ein Verlauf mit unwesentlichen Abweichungen zu erkennen.

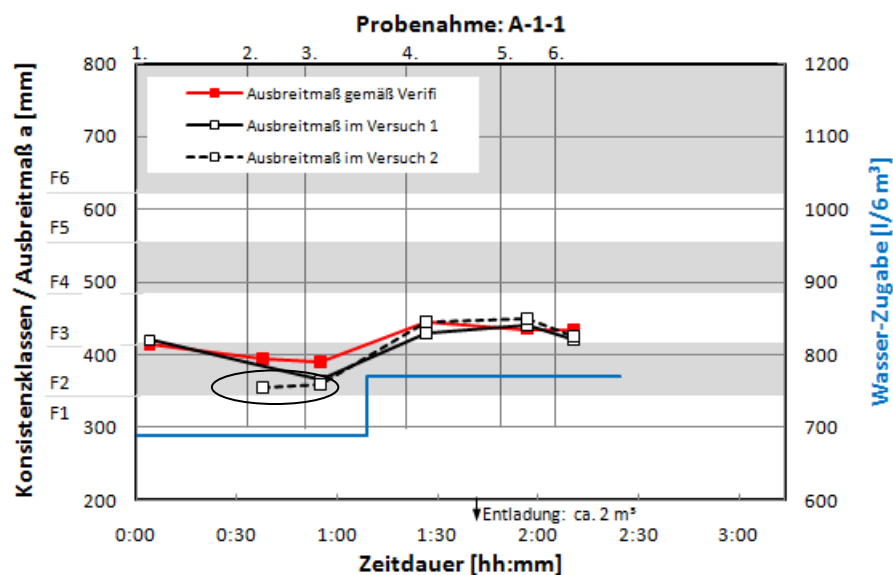


Abbildung 14: Ausbreitmaß – Beton: A-1-1

In Abbildung 15 sind die Änderungen der Setzmaßeergebnisse der Versuchsserie A-1-1 in Abhängigkeit der Zeit und der Wasserzugabe dargestellt. Zusätzlich werden in dem Diagramm die unterschiedlichen Wasserzement- sowie Wasserbindemittelwerte angegeben. Für die Werte des Setzmaßes im Versuch 2 sind nur drei Werte in das dargestellte Diagramm mit eingeflossen, da der Setztrichter bei der Ermittlung zu schnell hochgezogen wurde, was in einem Setzmaß mit signifikant großen Abweichungen resultierte. Aus diesem Grund sind nur die Einzelwerte, ohne verbindende Linie, dargestellt.

Aus Gründen der besseren Anschaulichkeit wurden die Ausbreitmaß- und Setzmaßeergebnisse in zwei Diagrammen untereinander dargestellt. Bei einem Vergleich der beiden Ergebnisse aus Ausbreitmaß und Setzmaß ist eine gleiche Tendenz zu erkennen.

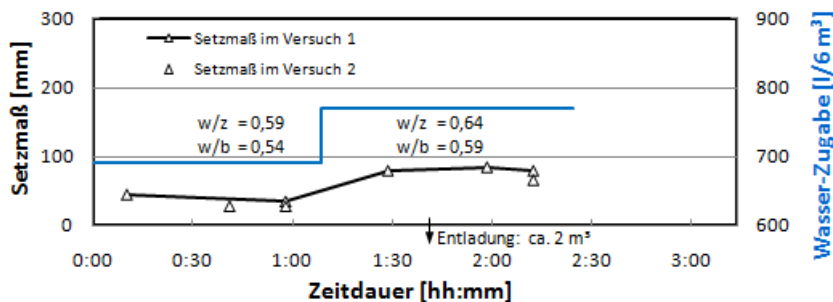


Abbildung 15: Setzmaß – Beton: A-1-1

#### **B-1-4**

In Abbildung 16 ist die Änderung der Ausbreitmaßeergebnisse der Versuchsserie B-1-4 in Abhängigkeit der Zeit und der Probenahme-Zeitpunkte sowie der Wasserzugabe dargestellt. Nach einem geringen Abfall der nach DIN EN 12350-5:2009-08 ermittelten Werte vom Versuchsbeginn bis zum Zeitpunkt 0:45 [hh:mm] stiegen die Werte anschließend wieder leicht an. Nach der Wasserzugabe von 80 l auf die 6 m³ Frischbeton zum Zeitpunkt 1:09 [hh:mm] kann ein weiterer Anstieg der Konsistenzwerte verzeichnet werden, bis diese nach der 5. und 6. Probenahme wieder abfallen.

Der dargestellte Abfall der roten Kurve (eingekreiste Werte) in der Zeit von 0:45 bis 1:21 [hh:mm] ist entsprechend der Aussagen von RS Solutions auf die Kalibrierung des Systems zurückzuführen. Desweiteren lagen für den hier zur Anwendung gekommenen Fahrzeug- bzw. Aufbauartyp noch keine Kalibrierungsdaten vor. Daraufhin wurden die durch das System Verifi zu ermittelnden Ausbreitmaß-Werte von 320 bis 445 mm von RS Solutions nachkalibriert.

Im Vergleich der Prüfwerte nach DIN EN 12350-5:2009-08 und der Werte des Systems Verifi kann mit Ausnahme des Abfalls der roten Werte in der Zeit von 0:45 bis 1:21 [hh:mm] eine gute Übereinstimmung mit den Prüfwerten nach DIN EN 12350-5:2009-08 verzeichnet werden.

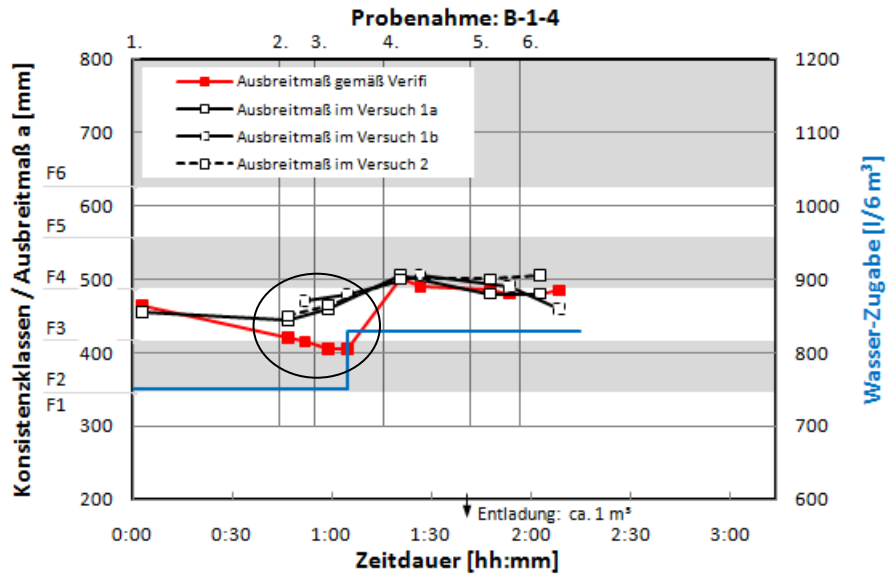


Abbildung 16: Ausbreitmaß – Beton: B-1-4

Die Änderungen der Setzmaßergebnisse der Versuchsserie B-1-4 sind in Abbildung 17 in Abhängigkeit der Zeit und der Wasserzugabe dargestellt. Zusätzlich sind in dem Diagramm die unterschiedlichen Wasserzement- sowie Wasserbindemittelwerte angegeben.

Aus Gründen der besseren Anschaulichkeit wurden die Ausbreitmaß- und Setzmaßergebnisse in zwei Diagrammen untereinander dargestellt. Bei einem Vergleich der beiden Ergebnisse aus Ausbreitmaß und Setzmaß ist insbesondere bei den ermittelten Laborwerten eine ähnliche Tendenz zu erkennen.

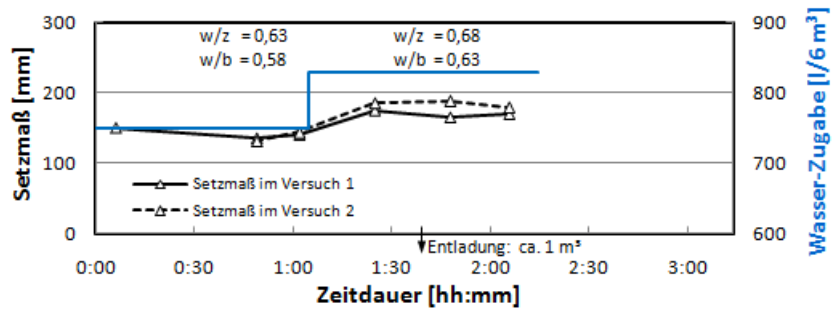


Abbildung 17: Setzmaß – Beton: B-1-4



### 5.1.2. Vergleich der Versuchsserien A-1-1 und B-1-4: Ausbreitmaß

In Abbildung 18 sind die Ergebnisse der Ausbreitmaßbestimmungen der Versuchsserien A-1-1 und B-1-4 nebeneinandergestellt. Bei A-1-1 ergaben sich nach der 2. und 3. Probenahme geringere Werte für die manuell ermittelten Ausbreitmaße. Die Abweichung der Ausbreitmaße bei B-1-4, ermittelt durch das System Verifi nach der 2. und 3. Probenahme sind auf die Kalibrierung des Systems zurückzuführen.

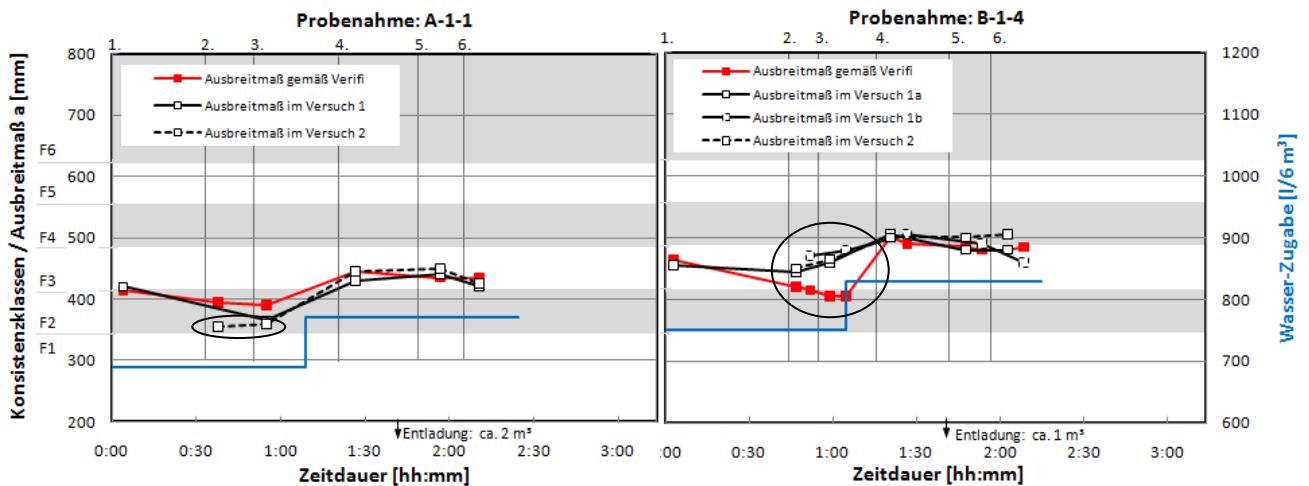


Abbildung 18: Vergleich der Versuchsserien A-1-1 und B-1-4: Ausbreitmaß

---

### 5.1.3. Beton 2: Ausbreitmaß und Setzmaß

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zu Ausbreitmaß und Setzmaß der Beton 2 vorgestellt. Die gewonnenen Ergebnisse sind im Einzelnen in tabellarischer Form in Anhang 3 zusammengefasst.

#### A-2-2

Abbildung 19 veranschaulicht die zeitliche Änderung der Ergebnisse der Ausbreitmaßbestimmungen der Versuchsserie A-2-2 in Abhängigkeit der Zeitpunkte der Probenahmen und der Zugabe der Fließmittel. So wurde das Fließmittel erstmals zum Zeitpunkt 0:43 [hh:mm] zugegeben. Wie die in Schwarz dargestellten Versuchsabläufe in Abbildung 19 veranschaulichen, nehmen die gemessenen Werte nach einem zunächst gleichbleibendem Betonverhalten nach der 2. Probenahme stark zu, bis die Werte der roten und schwarzen Markierung ab dem Zeitpunkt 2:07 [hh:mm] mit unwesentlichen Abweichungen wieder einen tendenziell ähnlichen Verlauf annehmen.

Die Konsistenzänderung erfolgte durch die Zugabe von Fließmittel, wobei zum ersten Zugabezeitpunkt nach 43 Minuten die Zugabe von Hand direkt in den oberen Bereich der Förderschnecke erfolgte. Entsprechend haftete der größte Anteil des Fließmittels an der Wandung der Förderschnecke und nur ein gewisser Teil der Fließmittelzugabe konnte in das Innere der Mischtrommel dem Frischbeton zugeführt werden. Mit den darauffolgenden Probenahmen vermischte sich der zu entnehmende Frischbeton mit dem in der Förderschnecke verbliebenen Fließmittel. Folgedessen führten die Prüfwerte nach DIN EN 12350-5:2009-08 nach der 3. und 4. Probenahme zu erhöhten Werten. Entsprechend wurden alle darauffolgenden Fließmittel-Zugaben mit einer 2 m langen Rinne mit glatter Innenoberfläche durchgeführt, um die Fließmittel möglichst tief im Innern der Mischtrommel dem Frischbeton zuzuführen. Für die Ausbreitmaßwerte nach der 8. Probenahme ist darauf hinzuweisen, dass das System Verifi mit der aktuellen Version Werte bis 600 mm ermitteln kann.

Insgesamt wurde über den gesamten Verlauf der Versuchsdurchführung eine Fließmittelmenge von 0,65 % vom Zementanteil zugegeben. Der Vergleich der auswertbaren Prüfwerte nach DIN EN 12350-5:2009-08 mit den Werten des Systems Verifi zeigt ein Verlauf mit unwesentlichen Abweichungen.

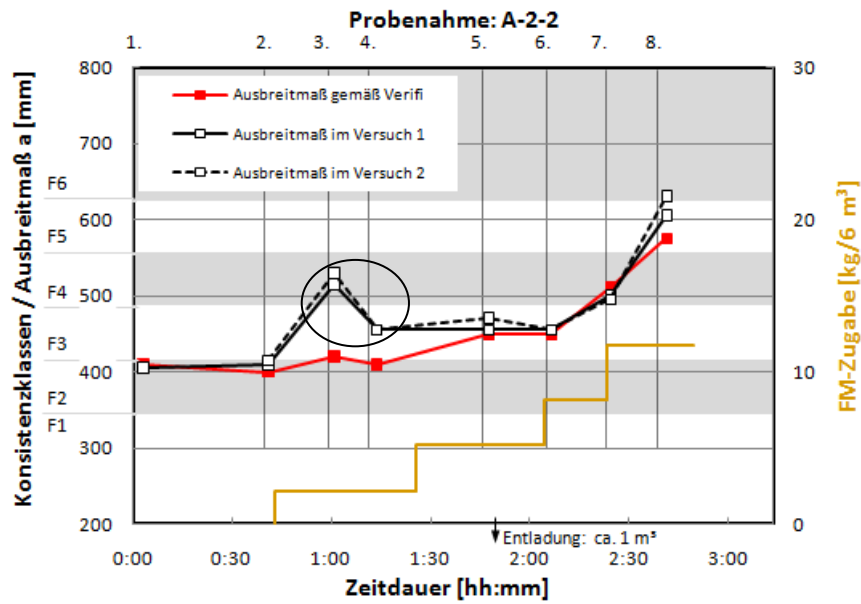


Abbildung 19: Ausbreitmaß – Beton: A-2-2

Der Verlauf der Änderungen der Ergebnisse der Setzmaßbestimmung von Versuchsserie A-2-2 zeigt Abbildung 20. Zur besseren Anschaulichkeit wurden auch hier die Ergebnisse der Ausbreitmaßbestimmungen und der Setzmaßbestimmungen in zwei Diagrammen dargestellt. Der Vergleich der experimentellen Ergebnisse der Ausbreitmaß- und Setzmaßversuche zeigt ähnliche Verläufe auf.

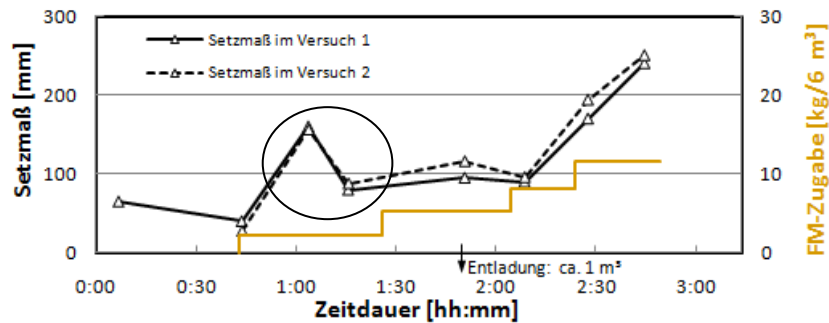


Abbildung 20: Setzmaß – Beton: A-2-2

---

## **B-2-5**

Abbildung 21 veranschaulicht die Änderung der Ergebnisse der Ausbreitmaßbestimmung von Versuchsserie B-2-5 in Abhängigkeit der Zeitpunkte der Probenahme und der Fließmittel-Zugabe. Wie aus den Messergebnissen in Abbildung 21 ersichtlich, nehmen die ermittelten Werte von Versuchsbeginn an, dem Zeitpunkt Null, kontinuierlich ab. Nach 56 Minuten erfolgte die erste Fließmittel-Zugabe. Nach jeder Fließmittel-Zugabe lässt sich ein Ansteigen der Konsistenzmaße erkennen. Zwischen den Zeitpunkten 1:39 und 2:05 [hh:mm] ist ein leichter Abfall der Kurven zu verzeichnen. Hier lag zwischen der 2. und 3. Fließmittel-Zugabe eine Pause von 41 Minuten. Insgesamt wurde Fließmittel in Höhe von 0,79 % vom Zementanteil zugegeben.

Ein Vergleich der Prüfwerte nach DIN EN 12350-5:2009-08 und der Werte des Systems Verifi zeigt signifikante Abweichungen auf. Als Grund hierfür kann die bereits bei Versuchsserie B-1-4 beschriebene Abweichung genannt werden, die nach Aussagen von RS Solutions auf das System, bzw. auf die Kalibrierung des Systems zurückzuführen ist. Desweiteren lagen für den hier zur Anwendung gekommenen Fahrzeug- bzw. Aufbautyp noch keine Kalibrierungsdaten vor.

Nach der 8. Probenahme liegt der Wert des vom Verifi ausgegebenen Ausbreitmaßes (roten Kurve) bei 600 mm. Hier ist anzumerken, dass die aktuelle Version des Systems Verifi so ausgelegt ist, dass nur Werte bis zu 600 mm zuverlässig ermittelt werden können. Folglich werden höhere Werte des Ausbreitmaßes mit der aktuellen Version des Systems Verifi nicht gemessen bzw. angezeigt. Der mit dem Ausbreittisch gemessene Wert liegt für die letzte Probenahme dieser Prüfsérie bei 700 mm.

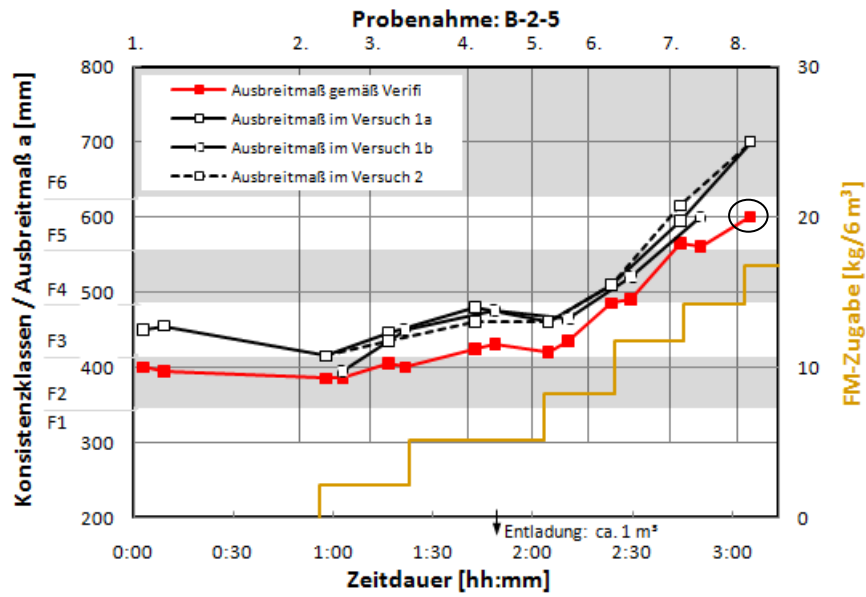


Abbildung 21: Ausbreitmaß – Beton: B-2-5

Die Ergebnisse der Setzmaßbestimmungen der Versuchsserie B-2-5 sind in Abbildung 22 dargestellt. Auch hier zeigt der Vergleich der Ergebnisse der Ausbreitmaß- und der Setzmaßbestimmung, dass die experimentell ermittelten Werte einen ähnlichen Verlauf aufweisen.

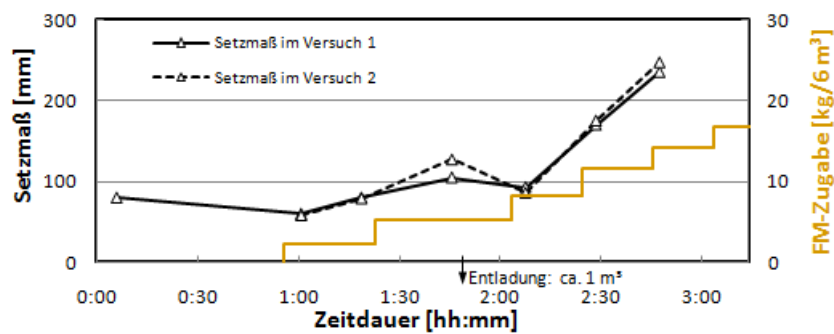


Abbildung 22: Setzmaß – Beton: B-2-5

### 5.1.4. Vergleich der Versuchsserien A-2-2 und B-2-5: Ausbreitmaß

In Abbildung 23 sind die Ergebnisse der Ausbreitmaßbestimmung der Versuchsserien A-2-2 und B-2-5 nebeneinandergestellt. Bei A-2-2 erfolgte die Fließmittel-Zugabe zunächst direkt in die Förderschnecke. Als Folge nahm nach der 3. und 4. Probenahme die Konsistenz stark zu, wie die Werte der Ausbreitmaßbestimmung belegen. Bei beiden Versuchsserien wurden acht Prüfzyklen vorgenommen. Bei der Versuchsserie B-2-5 erfolgten insgesamt zwei zusätzliche Fließmittel-Zugaben. Somit wurden dieser Mischung mehr Zusatzmittel zugegeben. Hieraus resultiert eine fließfähigere End-Konsistenz als bei Versuchsserie A-2-2.

Insgesamt verhalten sich die Konsistenzen beider Versuchsserien tendenziell ähnlich, sofern bei Versuchsserie A-2-2 der Anstieg der Konsistenz nach der 3. und 4. Probenahme unberücksichtigt bleibt. Bei Versuchsserie B-2-5 zeigt sich eine Abweichung zwischen den Verifi-Werten und den experimentell nach DIN EN 12350-5:2009-08 bestimmten Werten. Als Folge wäre hier eine Nachkalibrierung erforderlich.

Auf die Problematik des auf Ausbreitmaße von unter 600 mm begrenzten Einsatzbereiches wurde im Zusammenhang mit der 8. Probenahme bereits verwiesen (siehe Abschnitt 5.1.3).

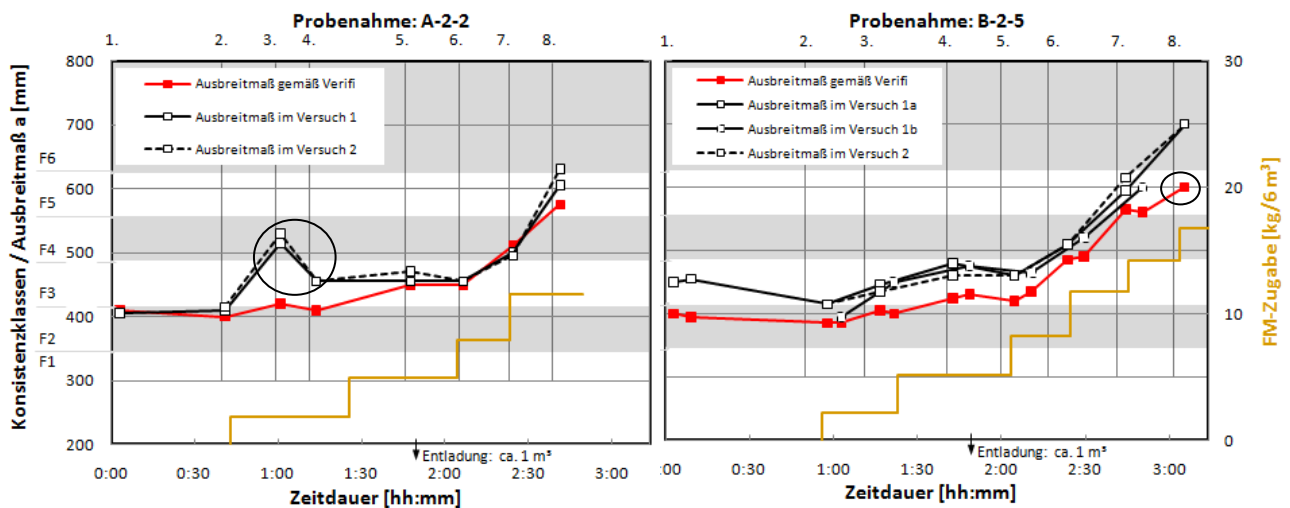


Abbildung 23: Vergleich der Versuchsserien A-2-2 und B-2-5: Ausbreitmaß

### 5.1.5. Beton 3: Ausbreitmaß und Setzmaß

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zu Ausbreitmaß und Setzmaß der Beton 3 vorgestellt. Die gewonnenen Ergebnisse sind im Einzelnen in tabellarischer Form in Anhang 4 zusammengestellt.

#### A-3-3

Abbildung 24 veranschaulicht die Änderung der Ergebnisse der Ausbreitmaßbestimmung der Versuchsserie A-3-3 in Abhängigkeit der Zeitpunkte der Probenahmen und der Fließmittelzugabe. Wie die Markierungen der roten und schwarzen Kurvenverläufe in Abbildung 24 zeigen, nehmen die ermittelten Werte vom Zeitpunkt 0:00 bis 0:41 [hh:mm] kontinuierlich ab. Nach 41 Minuten steigen die Werte nach jeder Fließmittel-Zugabe weiter an. Lediglich im Zeitraum zwischen 1:31 und 1:51 [hh:mm] ist ein leichter Abfall der Kurven zu erkennen. Hier lag zwischen der 3. und 4. Fließmittelzugabe eine Pause von 39 Minuten. Für die Ausbreitmaßwerte nach der 6. Probenahme ist darauf hinzuweisen, dass das System Verifi mit der aktuellen Version Werte bis 600 mm ermitteln kann. Insgesamt wurde bei dieser Versuchsserie eine Fließmittelmenge in Höhe von 0,6 % der Zementzugabe eingesetzt. Der Zeitpunkt der ersten Fließmittelzugabe erfolgte bereits bei der Beladung des Fahrmischers im Betonwerk.

Der Vergleich der Prüfwerte nach DIN EN 12350-5:2009-08 und der Ausgabewerte des Systems Verifi zeigt nur unwesentliche Veränderungen.

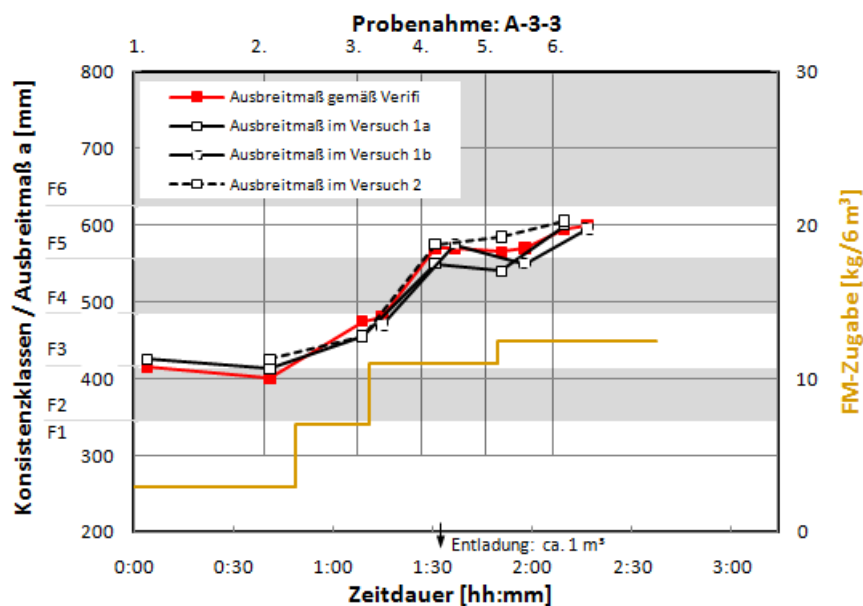


Abbildung 24: Ergebnisse A-3-3: Ausbreitmaß

Die Änderungen der Setzmaßergebnisse der Versuchsserie A-3-3 sind in Abbildung 25 in Abhängigkeit der Zeit und der Fließmittel-Zugabe dargestellt. Ein Vergleich der Messergebnisse der experimentellen Bestimmung des Ausbreitmaßes und des Setzmaßes zeigt ähnliche Verläufe.



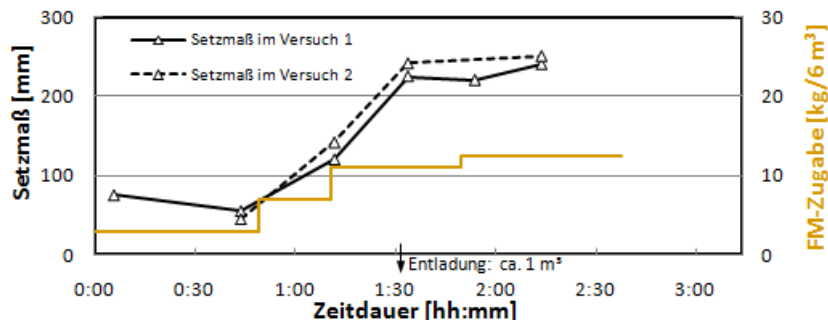


Abbildung 25: Ergebnisse A-3-3: Setzmaß

### B-3-6

Abbildung 26 veranschaulicht die Änderung der Ergebnisse der Ausbreitmaßbestimmung der Versuchsserie B-3-6 in Abhängigkeit der Zeitpunkte der Probenahme sowie der Fließmittel-Zugabe. Wie den Kurvenverläufen in Abbildung 26 zu entnehmen, fallen die ermittelten Werte von Messbeginn an, Zeitpunkt Null, kontinuierlich ab. Nach der zweiten Fließmittel-Zugabe, nach 48 Minuten, konnte wiederum nach jeder erneuten Fließmittel-Zugabe ein Ansteigen der Ausbreitmaße festgestellt werden. Zwar kann zwischen den Zeitpunkten 1:32 und 1:50 [hh:mm] ein leichter Abfall der Werte des Ausbreitmaßes verzeichnet werden, doch ist dieser darauf zurückzuführen, dass zwischen den Fließmittel-Zugabe-Zeitpunkten 1:11 und 1:50 [hh:mm] eine Pause von 39 Minuten lag. Insgesamt wurde eine Fließmittel-Zugabe von 0,69 % der Zementzugabe über die gesamte Versuchsdauer vorgenommen.

Ein Vergleich der Prüfwerte nach DIN EN 12350-5:2009-08 und der vom System Verifi ausgegebenen Ausbreitmaße lässt signifikante Abweichungen erkennen. Ursache hierfür ist wiederum der bereits im Kontext der Versuchsbeschreibung der Serie B-1-4 und B-2-5 beschriebenen Besonderheit, dass die Abweichungen auf das System, bzw. auf die Kalibrierung des Systems Verifi zurückzuführen sind. Desweiteren lagen für den hier zur Anwendung gekommenen Fahrzeug- bzw. Aufbau typ noch keine Kalibrierungsdaten vor.

Nach der 6. Probenahme liegen zwei Werte des vom System Verifi ausgegebenen Ausbreitmaße bei 600 mm (vgl. rote Kurve). Auch hier ist darauf zu verweisen, dass die aktuelle Version des Systems Verifi nur auf Werte des Ausbreitmaßes von bis zu 600 mm ausgelegt ist. Die tatsächlichen Ausbreitmaße der weiteren Probenahmen zeigen die mit dem Ausbreittisch ermittelten Werte, die teilweise Werte von 700 mm erreichen.

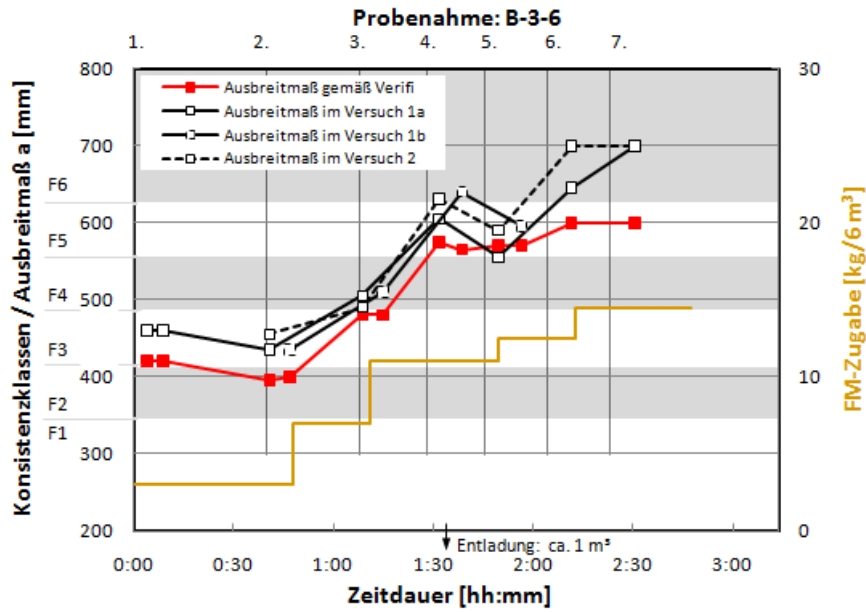


Abbildung 26: Ergebnisse B-3-6: Ausbreitmaß

Die Ergebnisse der Setzmaßbestimmung der Versuchsserie B-3-6 sind in Abbildung 27 in Abhängigkeit der Zeit und der Fließmittel-Zugabe dargestellt. Auch hier zeigt der Vergleich des Verhaltens von Ausbreitmaß und Setzfließmaß einen grundsätzlich ähnlichen Verlauf.

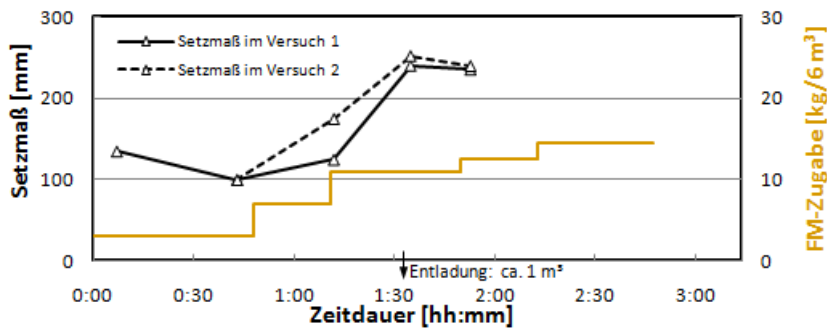


Abbildung 27: Ergebnisse B-4-6: Setzmaß

## 5.1.6. Vergleich der Versuchsserien A-3-3 und B-3-6: Ausbreitmaß

In Abbildung 28 sind die Ergebnisse der Ausbreitmaßbestimmung für die Versuchsserien A-3-3 und B-3-6 nebeneinandergestellt. Insgesamt kann eine ähnliche Tendenz des Konsistenzverhaltens der beiden Versuchsserien verzeichnet werden. Ähnlich der Versuchsserie B-2-5 ist bei B-3-6 eine Abweichung des vom System Verifi ausgegebenen Ausbreitmaß im Vergleich zu den ermittelten Werten nach DIN EN 12350-5:2009-08 zu erkennen, deren Ursache seitens RS Solutions in der Systemkalibrierung gesehen wurde.

Bei Versuchsserie B-3-6 ist wie bereits erläutert darauf hinzuweisen, dass das System Verifi in der zum Einsatz gekommenen Ausführung nur Werte für das Ausbreitmaß von bis zu 600 mm ausgibt.

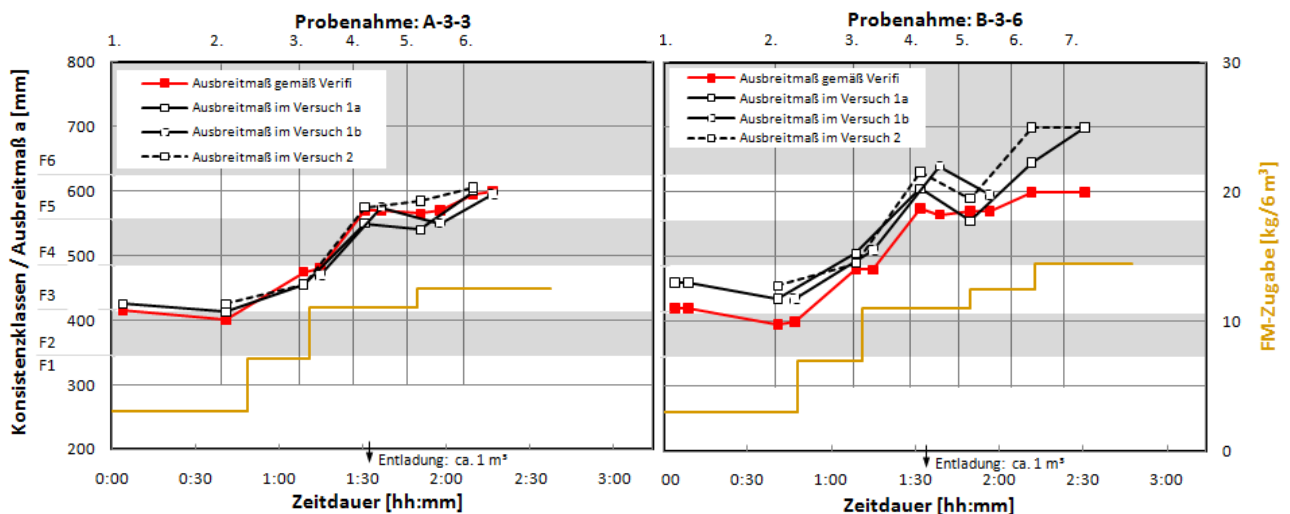


Abbildung 28: Vergleich der Versuchsserien A-3-3 und B-3-6: Ausbreitmaß

## 5.2. Rheologische Untersuchungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen vorgestellt. Die rheologischen Parameter wurden mit einem ICAR Rheometer ermittelt (vgl. Abbildung 29). Rheologische Untersuchungen lassen sich im Allgemeinen in zwei Versuchsarten untergliedern:

### 1. Test zur Ermittlung der Fließkurve und der Bingham Parameter

Bei dieser Versuchsmethode wird die dynamische Fließgrenze ermittelt. Der Versuch beginnt mit einer hohen Scherrate und bei Verringerung der Umdrehungsgeschwindigkeit über die Zeit wird das Drehmoment zu bestimmten Zeitpunkten ermittelt. Da dieser Versuch mit einer hohen Schergeschwindigkeit durchgeführt wird, können die Effekte der Thixotropie minimiert werden.

Aus den dabei ermittelten Daten können die zugehörigen Bingham Parameter (Fließgrenze und plastische Viskosität) ermittelt werden. In Abhängigkeit der Scherspannung und Scherrate lässt sich die Fließkurve am Beispiel des Bingham Modells wie in Abbildung 30 dargestellt beschreiben.

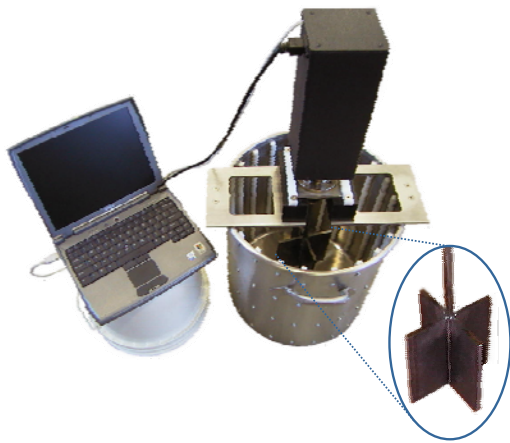


Abbildung 29: ICAR Rheometer mit Flügelrad  
(Quelle: ICAR Rheometer, Koehler, E., Grace)

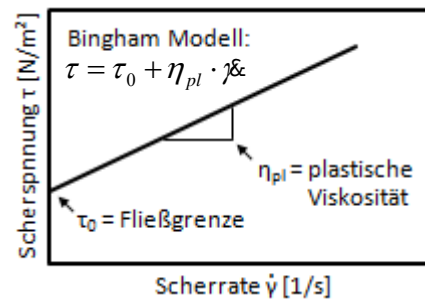


Abbildung 30: Fließkurve - Abhängigkeit der Scherspannung  $\tau$  von der Scherrate  $\dot{\gamma}$  am Beispiel des Bingham Modells

### 2. Test zur Ermittlung des Anstiegs der Scherspannung

Die statische Fließgrenze wird beim kontinuierlichen Anstieg der Scherspannung ermittelt. Hierzu dreht das Flügelrad des Beton-Rheometers mit einer konstanten Geschwindigkeit. Das maximal aufgebrauchte Drehmoment entspricht der statischen Fließgrenze.

In Abbildung 31 sind die Diagramme der Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen vereinfacht als Erläuterung dargestellt. Sofern durchgeführt, werden für jede Versuchsserie bis zu vier Diagramme angefertigt. Das linke obere und die beiden unteren Diagramme werden aus den Versuchen zur Bestimmung der Fließkurve (Ermittlung der dynamischen Fließgrenze und der plastischen Viskosität) abgeleitet. Das rechts oben angeordnete Diagramm gibt die Versuchsdaten zur Ermittlung des Anstiegs der Scherspannung und somit der statischen Fließgrenze wieder.

Die beiden oberen Diagramme dienen folglich als Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse, während die beiden unteren die Ergebnisse zu den rheologischen Parametern der entnommen Frischbetonprobe aufzeigen. Weiterhin ist anzumerken, dass der Unterschied der beiden unteren Diagrammen lediglich in der Umrechnung der Werte der Abszisse von der Drehzahl in die zugehörige Winkelgeschwindigkeit besteht.

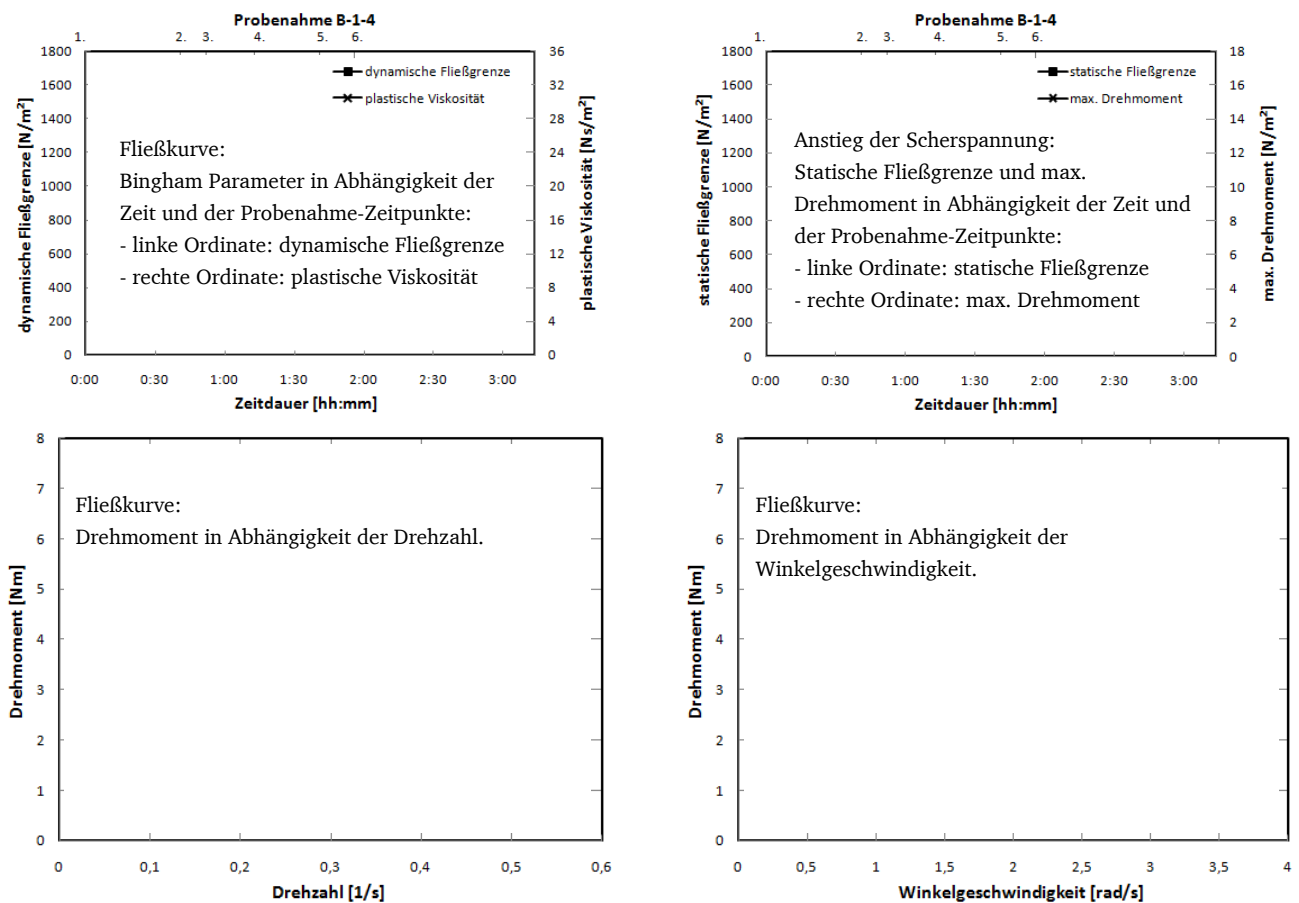


Abbildung 31: Erläuterung der Ergebnisdarstellung der rheologischen Untersuchungen

## 5.2.1. Beton 1: Rheologische Kenngrößen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen für die Versuchsserien der Beton 1 vorgestellt. Die gewonnenen Ergebnisse sind im Einzelnen in tabellarischer Form im Anhang 5 zusammengestellt.

### A-1-1

In Abbildung 32 sind die Bingham Parameter in Abhängigkeit der Zeit und der Probenahme-Zeitpunkte dargestellt. Dabei sind die Werte der dynamischen Fließgrenze in der linken Ordinate und die plastische Viskosität in der Rechten abzulesen. Signifikant erweist sich der Abfall der Fließgrenze, nachdem vor der 4. Probenahme die Frischbetonkonsistenz durch die Zugabe von Wasser gesteigert wurde. Diese Veränderung dokumentiert sich auch in Abbildung 33 und Abbildung 34. Diesen beiden Abbildungen lässt sich entnehmen, dass das kleinste gemessene Drehmoment nach der 4. Probenahme festgestellt wurde.

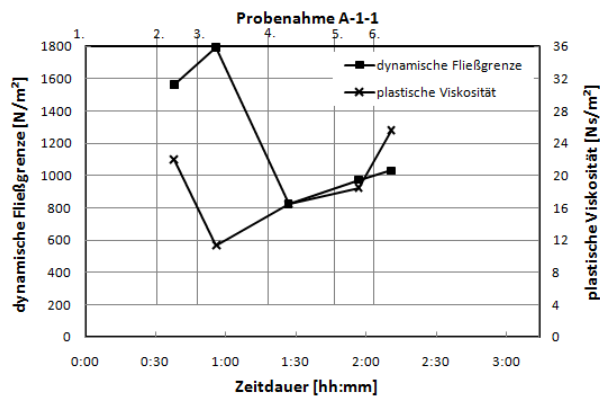


Abbildung 32: Fließkurve: Bingham Parameter - A-1-1, dynamische Fließgrenze

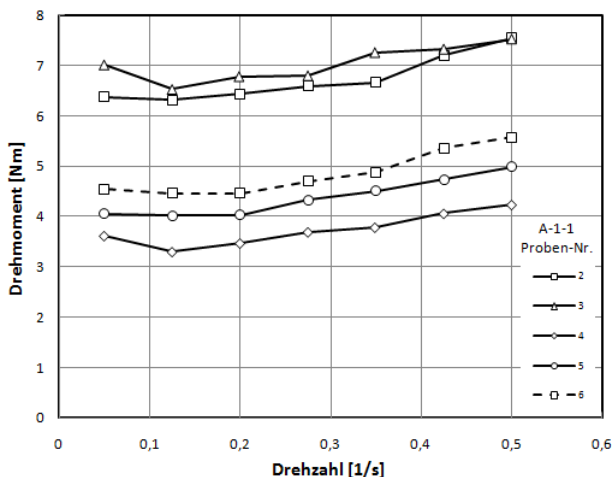


Abbildung 33: Fließkurve: Drehmoment in Abhängigkeit der Drehzahl - A-1-1

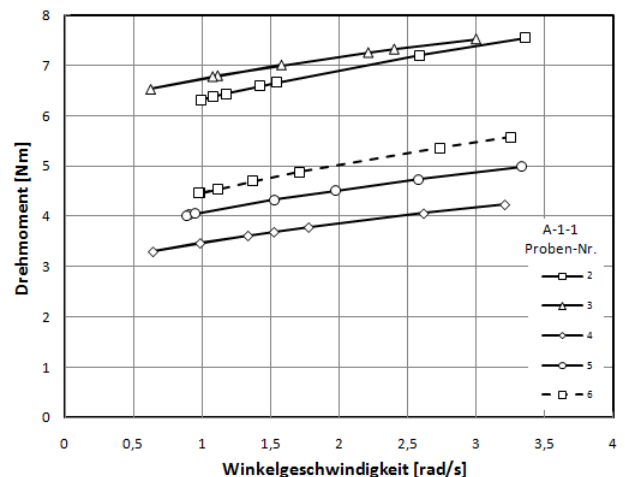


Abbildung 34: Fließkurve: Drehmoment in Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit - A-1-1

### Legende zu den Abbildungen 32 bis 34:

Eine Wasserzugabe von 80 l/6 m<sup>3</sup> erfolgte nach der 3. Probenahme

## B-1-4

In Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigt sich wie bei Versuchsserie A-1-1 ein ähnliches Verhalten der Fließgrenze, da hier wie bei der Versuchsserie A-1-1 vor der 4. Probenahme die Konsistenz des Frischbetons durch die Zugabe von Wasser geändert wurde. In Abbildung 35 wird die Fließkurve ermittelt und hieraus die dynamische Fließgrenze abgeleitet. Demgegenüber wird in Abbildung 36 der Anstieg der Scherspannung gemessen und daraus die statische Fließgrenze abgeleitet.

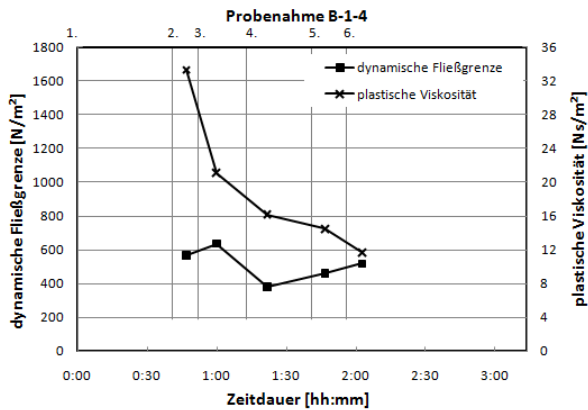


Abbildung 35: Fließkurve: Bingham Parameter - B-1-4, dynamische Fließgrenze

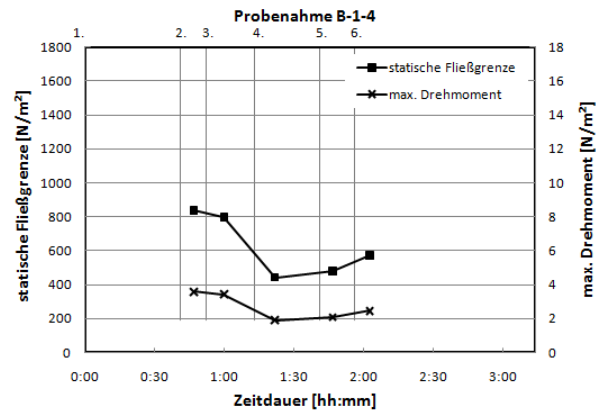


Abbildung 36: Anstieg der Scherspannung: Bingham Parameter - B-1-4, statische Fließgrenze

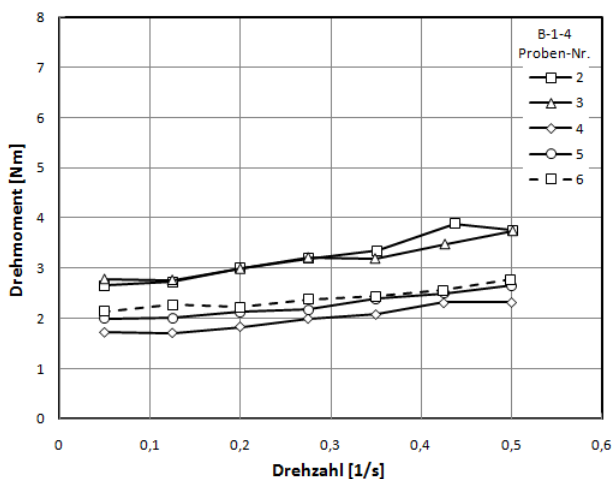


Abbildung 37: Fließkurve: Drehmoment in Abhängigkeit der Drehzahl - B-1-4

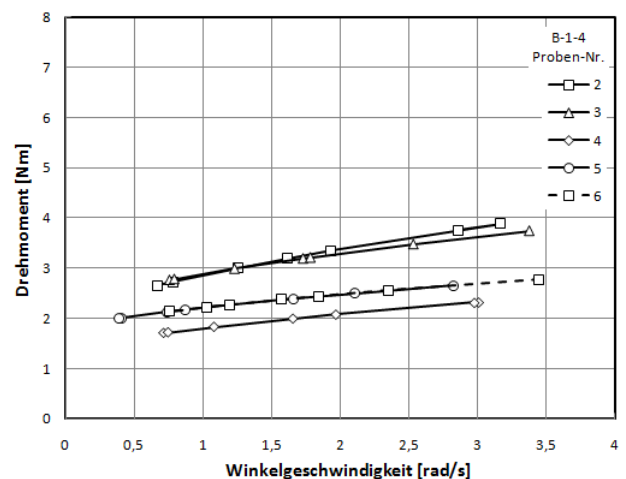


Abbildung 38: Fließkurve: Drehmoment in Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit - B-1-4

### Legende zu den Abbildungen 35 bis 38:

Eine Wasserzugabe von 80 l/6 m<sup>3</sup> erfolgte nach der 3. Probenahme



## 5.2.2. Beton 2: Rheologische Kenngrößen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen für die Versuchsserien der Beton 2 vorgestellt. Die gewonnenen Ergebnisse sind im Einzelnen in tabellarischer Form in Anhang 6 zusammengestellt.

### A-2-2

Abbildung 39 zeigt die Bingham Parameter der Versuchsserie A-2-2 in Abhängigkeit der Zeit und der Zeitpunkte der Probenahme. Im Vergleich zu Abbildung 19: Ausbreitmaß – Beton: A-2-2" zeigt sich im Falle einer Konsistenzsteigerung eine Verringerung der dynamischen Fließgrenze. Abbildung 40 und Abbildung 41 bestätigen diesen Sachverhalt, da ein geringeres Drehmoment bei Proben mit höherer Konsistenz gemessen wurde.

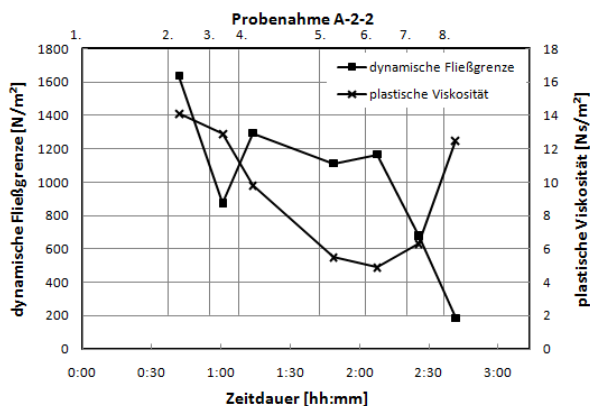


Abbildung 39: Fließkurve: Bingham Parameter - A-2-2, dynamische Fließgrenze

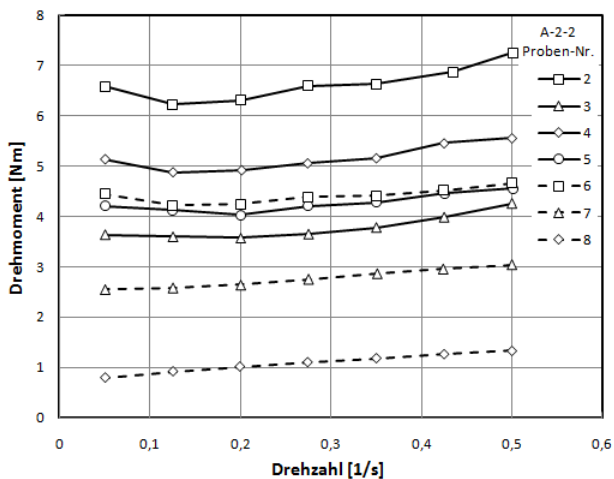


Abbildung 40: Fließkurve: Drehmoment in Abhängigkeit der Drehzahl - A-2-2

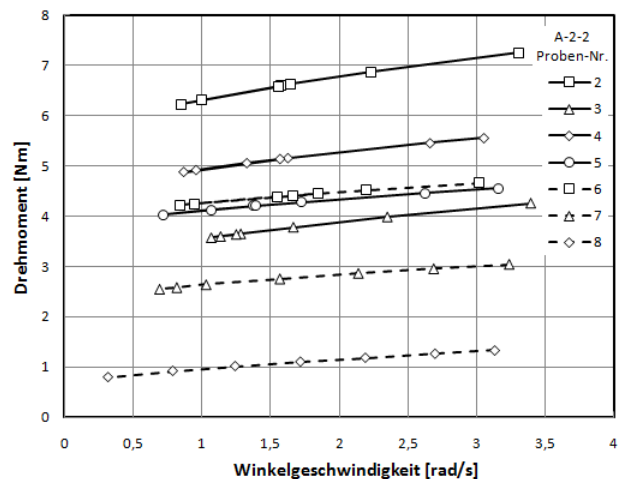


Abbildung 41: Fließkurve: Drehmoment in Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit - A-2-2

#### Legende zu den Abbildungen 39 bis 41:

Die Zugabe von Fließmittel erfolgte:

- nach der 2. Probenahme mit 2,2 kg/6 m<sup>3</sup>
- nach der 4. Probenahme mit 3,0 kg/6 m<sup>3</sup>
- nach der 6. Probenahme mit 3,0 kg/6 m<sup>3</sup>
- nach der 7. Probenahme mit 3,0 kg/6 m<sup>3</sup>

## B-2-5

Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen die Fließgrenzen der Versuchsserie B-2-5 in Abhängigkeit der Zeit und der Zeitpunkte der Probenahme. Im Vergleich zu Abbildung 21: Ausbreitmaß – Beton: B-2-5" zeigt sich im Falle einer Konsistenzsteigerung wie bei A-2-2 eine Verringerung der dynamischen und statischen Fließgrenze. Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse der Versuchsdurchführung, mit der die Fließkurve ermittelt wird, aus der sich dann die dynamische Fließgrenze ergibt. Demgegenüber zeigt Abbildung 43 den Anstieg der Scherspannung, aus dem die statische Fließgrenze abgeleitet werden kann. Abbildung 44 und Abbildung 45 bestätigen die vorgenannten Ergebnisse, da mit einer höheren Konsistenz ein geringeres Drehmoment gemessen wird.

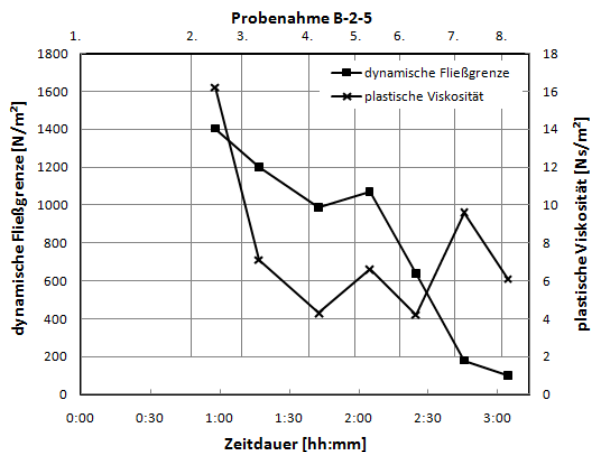


Abbildung 42: Fließkurve: Bingham Parameter - B-2-5, dynamische Fließgrenze

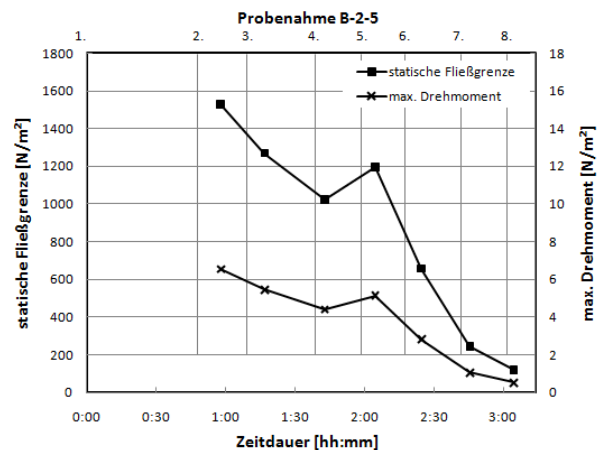


Abbildung 43: Anstieg der Scherspannung: Bingham Parameter - B-2-5, statische Fließgrenze

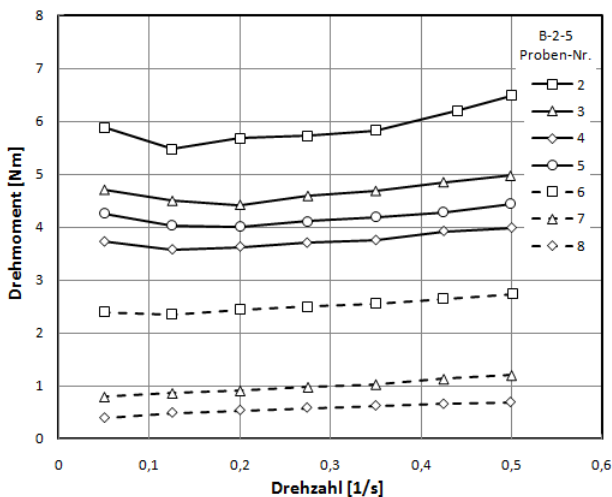


Abbildung 44: Fließkurve: Drehmoment in Abhängigkeit der Drehzahl - B-2-5

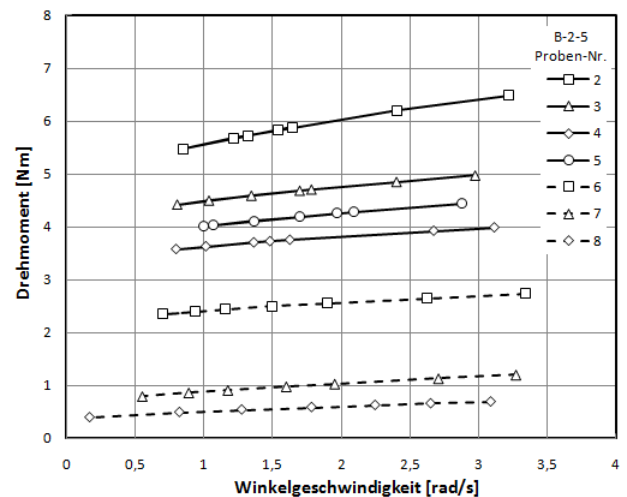


Abbildung 45: Fließkurve: Drehmoment in Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit - B-2-5

### Legende zu den Abbildungen 42 bis 45:

Die Zugabe von Fließmittel erfolgte:

- nach der 2. Probenahme mit 2,2 kg/6 m<sup>3</sup>
- nach der 3. Probenahme mit 3,0 kg/6 m<sup>3</sup>
- nach der 5. Probenahme mit 3,0 kg/6 m<sup>3</sup>
- nach der 6. Probenahme mit 3,5 kg/6 m<sup>3</sup>
- nach der 7. Probenahme mit 2,5 kg/6 m<sup>3</sup>

### 5.2.3. Beton 3: Rheologische Kenngrößen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen für die Versuchsserien der Beton 3 vorgestellt. Die gewonnenen Ergebnisse sind im Einzelnen in tabellarischer Form in Anhang 7 zusammengestellt.

#### A-3-3

Für die Versuchsserie A-3-3- liegen keine Daten vor, da diese bei dem Vorgang des Abspeicherns nach deren Ermittlung verloren gingen. Daher ist hier keine Auswertung möglich.

#### B-3-6

Abbildung 46 und Abbildung 47 zeigen die Fließgrenzen der Versuchsserie B-3-6 in Abhängigkeit der Zeit und der Probenahme-Zeitpunkte. Im Vergleich zu Abbildung 26: Ergebnisse B-3-6: Ausbreitmaß" zeigt sich im Falle einer Konsistenzsteigerung eine Verringerung der dynamischen und statischen Fließgrenze. Abbildung 48 und Abbildung 49 bestätigen diesen Sachverhalt, da ein geringeres Drehmoment bei Proben mit höherer Konsistenz gemessen wurde.

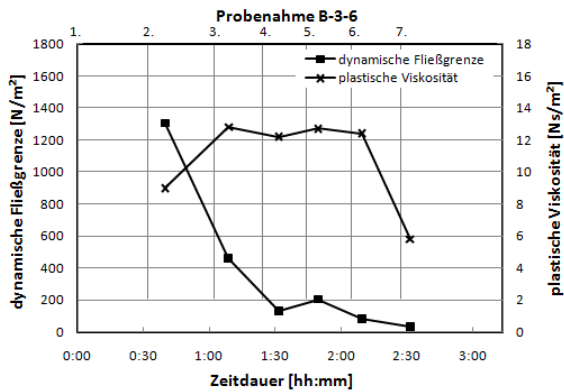


Abbildung 46: Fließkurve: Bingham Parameter - B-3-6, dynamische Fließgrenze

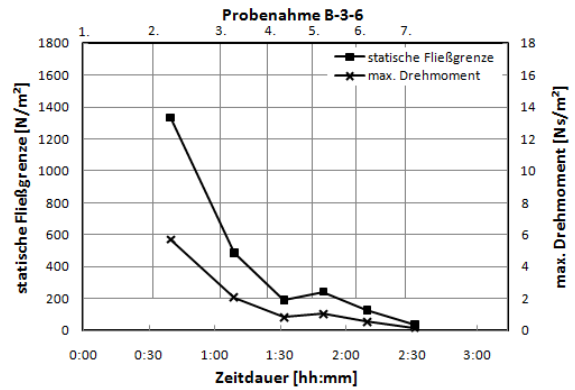


Abbildung 47: Anstieg der Scherspannung: Bingham Parameter - B-3-6, statische Fließgrenze

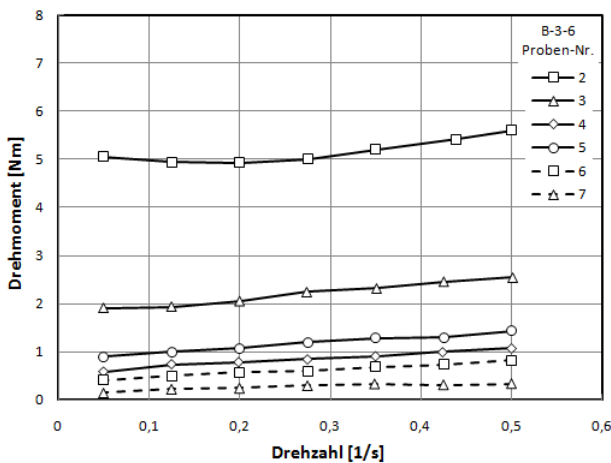


Abbildung 48: Fließkurve: Drehmoment in Abhängigkeit der Drehzahl - B-3-6

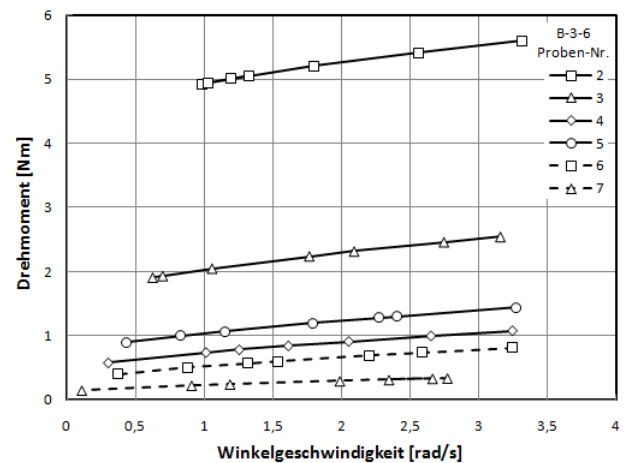


Abbildung 49: Fließkurve: Drehmoment in Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit - B-3-6

#### Legende zu den Abbildungen 46 bis 49:

Die Zugabe von Fließmittel erfolgte:

- bei der Beladung mit 3,0 kg/6 m<sup>3</sup>
- nach der 2. Probenahme mit 4,0 kg/6 m<sup>3</sup>

- nach der 3. Probenahme mit 4,0 kg/6 m<sup>3</sup>
- nach der 5. Probenahme mit 1,5 kg/6 m<sup>3</sup>
- nach der 6. Probenahme mit 2,0 kg/6 m<sup>3</sup>

### 5.3. Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Fließgrenze

Ein Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und den rheologischen Parametern konnte bereits unter "5.2 Rheologische Untersuchungen" im Vergleich zu den vorgestellten Ergebnissen in "5.1 Ausbreitmaß und Setzmaß" festgestellt werden. Zur weiteren Untersuchung dieser Beziehung wird in den nachfolgend aufgezeigten Ergebnissen das Ausbreitmaß in Abhängigkeit der dynamischen Fließgrenze dargestellt. In [4] konnte dieser Zusammenhang bereits für das Setzmaß und der Fließgrenze belegt werden.

Die Bildung der Trendlinie erfolgt auf Basis der Werte, die nach DIN EN 12350-5:2009-08 ermittelt wurden. Die durch das System Verifi ermittelten Ausbreitmaße werden in Abhängigkeit der zeitlich zugeordneten dynamischen Fließgrenze, wie sie im Rahmen der rheologischen Untersuchungen bestimmt wurden, angegeben. Somit stellt die Zuordnung der Daten bzgl. der Abszissenwerte eine Annahme dar.

In den einzelnen nachfolgenden Diagrammen ist jeweils das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) als Maßzahl der Variation in Bezug zur linearen Trendlinie für die experimentell ermittelten Werte des Ausbreitmaßes angegeben. Der Streubereich gibt Grenzlinien der Einzelwerte nach DIN EN 12350-5:2009-08 mit einer Abweichung von  $\pm 5\%$  zum Mittelwert an (gestrichelte Linien).

#### 5.3.1. Ergebnisse der Beton 1

In diesem Abschnitt werden die Zusammenhänge zwischen Ausbreitmaß und der dynamischen Fließgrenze für die Beton 1 veranschaulicht.

##### A-1-1

In Abbildung 50 sind die Ergebnisse der Ausbreitmaßbestimmung in Abhängigkeit der dynamischen Fließgrenze für die Versuchsserie A-1-1 dargestellt. Den Ausgabewerten des Systems Verifi, bei einer dynamischen Fließgrenze zwischen 1300 und 1500  $N/m^2$ , sind keine manuell ermittelten Werte des Ausbreitmaßes nach DIN EN 12350-5:2009-08 gegenübergestellt, da diese zugehörigen Werte nicht zu einer Auswertung herangezogen wurden. Grund hierfür ist, dass bei zwei Prüfzyklen Ungenauigkeiten bei der experimentellen Prüfgrößenbestimmung vorlagen, da die Ausbreittische zu Beginn der Prüfungen nicht optimal standen. Aus diesem Grund reichen die Werte des Systems Verifi über den Bereich der Trendlinie hinaus. Innerhalb des Bereichs der Grenzlinien der Einzelwerte liegen alle Prüfgrößen innerhalb des Streubereichs.

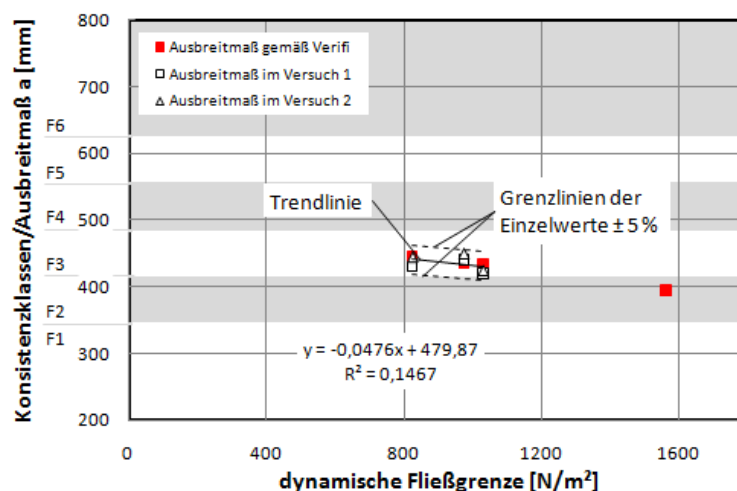


Abbildung 50: Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Fließgrenze für A-1-1, der Streubereich stellt die Grenzlinien der Einzelwerte mit einer Abweichung von  $\pm 5\%$  zum Mittelwert dar

## B-1-4

In Abbildung 51 sind die Ausbreitmaß-Ergebnisse in Abhängigkeit der dynamischen Fließgrenze für die Versuchsserie B-1-4 dargestellt. Es ist ein linearer Zusammenhang zwischen den Prüfgrößen ohne signifikante Veränderungen zu erkennen. Lediglich die Werte des Systems Verifi (rote Punkte), welche außerhalb des Streubereichs liegen, resultieren aus dem unter Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Sachverhalt, dass das System Verifi bei der Kalibrierung nicht optimal eingestellt wurde.

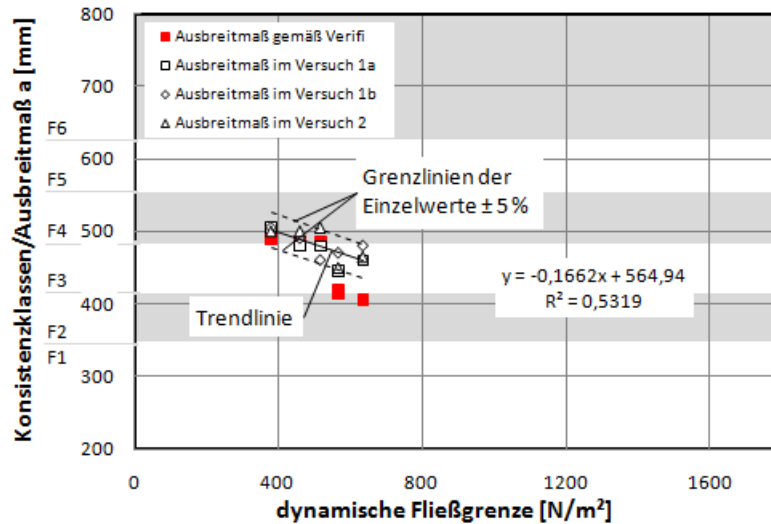


Abbildung 51: Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Fließgrenze für B-1-4, der Streubereich stellt die Grenzl意思ien der Einzelwerte mit einer Abweichung von  $\pm 5\%$  zum Mittelwert dar

### 5.3.2. Ergebnisse der Beton 2

In diesem Abschnitt werden die Zusammenhänge zwischen Ausbreitmaß und der dynamischen Fließgrenze für die Beton 2 veranschaulicht.

#### A-2-2

In Abbildung 52 sind die Ausbreitmaß-Ergebnisse in Abhängigkeit der dynamischen Fließgrenze für die Versuchsserie A-2-2 dargestellt. Es ist ein linearer Zusammenhang zwischen den Prüfgrößen ohne signifikante Abweichungen zu erkennen. Bei dieser Versuchsserie wurde das Fließmittel zunächst in die Förderschnecke zugegeben. Daraus resultierten entnommene Frischbetonproben, die anteilig mehr Fließmittel enthielten, und somit ein größeres Ausbreitmaß aufwiesen, als dieses für eine Frischbetonprobe zu verzeichnen gewesen wäre, dass direkt aus dem Trommelinneren hätte entnommen werden können. Folglich wurden die experimentell ermittelten Werte vollständig in dem Diagramm aufgenommen, da sowohl die Prüfungen für Frischbeton als auch die rheologischen Untersuchungen aus der selben Probe stammen. Die entsprechenden Ausgabewerte des Systems Verifi konnten folglich in dieser Auswertung nicht berücksichtigt werden. Insgesamt liegen bei der Versuchsserie A-2-2 alle Werte, teilweise mit unwesentlichen Abweichungen, im Streubereich der Grenzlinien.

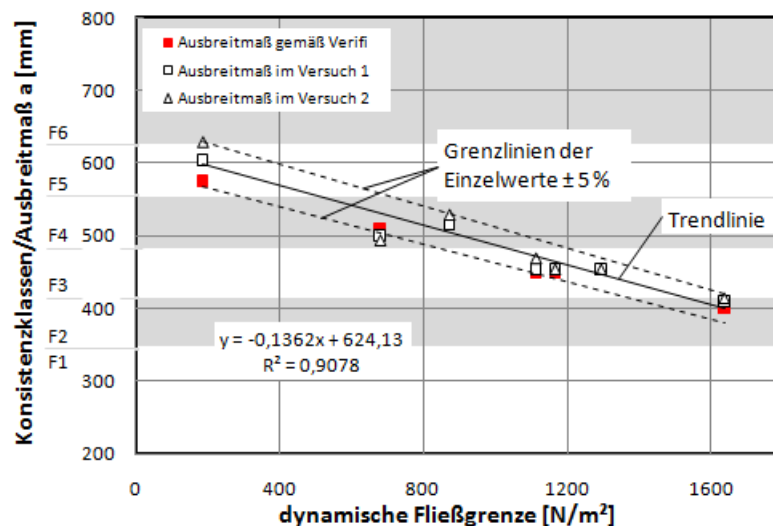


Abbildung 52: Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Fließgrenze für A-2-2, der Streubereich stellt die Grenzlinien der Einzelwerte mit einer Abweichung von  $\pm 5\%$  zum Mittelwert dar

#### B-2-5

In Abbildung 53 sind die Ausbreitmaß-Ergebnisse in Abhängigkeit der dynamischen Fließgrenze für die Versuchsserie B-2-5 dargestellt. Es ist ein linearer Zusammenhang zwischen den Prüfgrößen ohne signifikante Abweichungen zu erkennen. Die Ausgabewerte des Systems Verifi liegen vorwiegend außerhalb des Streubereichs der Grenzlinien. Dies ist auf die bereits erwähnte Abweichung des Systems Verifi infolge erforderlicher Nachkalibrierung zurückzuführen. Insgesamt liegen bei der Versuchsserie B-2-5 alle Werte der experimentellen Bestimmung des Ausbreitmaßes, teilweise mit unwesentlichen Abweichungen, im Streubereich der Grenzlinien. Auch bei den von der Trendlinie abweichenden Werten des Systems Verifi ist eine in sich lineare Tendenz und somit eine linearer Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und dynamische Fließgrenze zu erkennen.

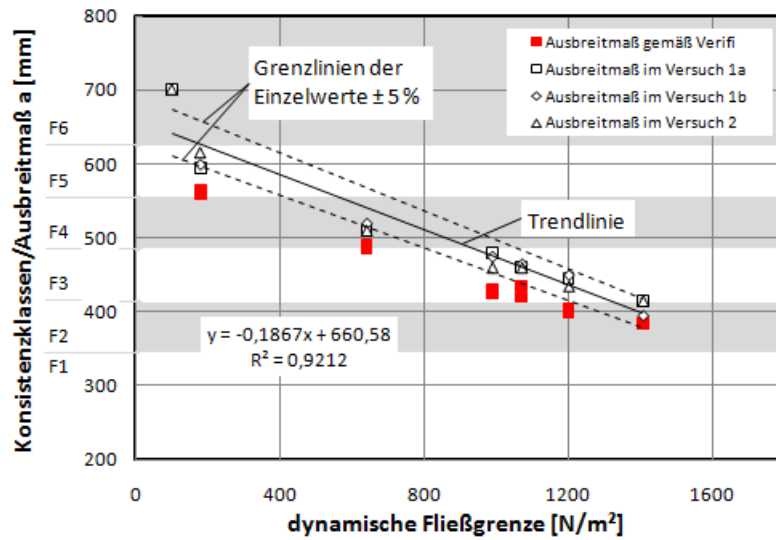


Abbildung 53: Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Fließgrenze für B-2-5, der Streubereich stellt die Grenzl意思ien der Einzelwerte mit einer Abweichung von  $\pm 5\%$  zum Mittelwert dar

### 5.3.3. Ergebnisse der Beton 3

In diesem Abschnitt werden die Zusammenhänge zwischen Ausbreitmaß und der dynamischen Fließgrenze für die Beton 3 veranschaulicht.

#### A-3-3

Für die Versuchsserie A-3-3- liegen keine Daten vor, da diese bei dem Vorgang des Abspeicherns nach deren Ermittlung verloren gingen. Daher ist hier keine Auswertung möglich.

#### B-3-6

In Abbildung 54 sind die Ausbreitmaß-Ergebnisse in Abhängigkeit der dynamischen Fließgrenze für die Versuchsserie B-3-6 dargestellt. Entgegen der vorherig vorgestellten Ergebnisse ist den Ergebnissen von B-3-6 ein potenzieller Zusammenhang der nach DIN EN 12350-5:2009-08 Prüfgrößen zu erkennen. Alle manuell ermittelten Ausbreitmaß-Ergebnisse liegen ohne signifikante Veränderungen im Bereich der Grenzl意思en. Die Ergebnisse des Systems Verifi liegen hier an der Grenze des Streubereichs. Der Grund liegt in der bereits beschriebenen Abweichung des Systems.

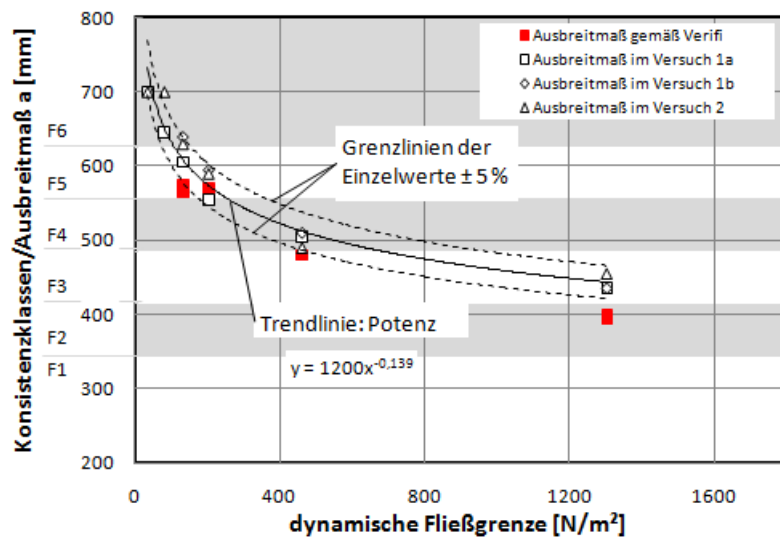


Abbildung 54: Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Fließgrenze für B-3-6, der Streubereich stellt die Grenzl意思en der Einzelwerte mit einer Abweichung von ± 5 % zum Mittelwert dar



---

## 5.4. Statistische Auswertung

Wie im Abschnitt 5.3 dargestellt wurde, besteht zwischen dem Ausbreitmaß und der dynamischen Fließgrenze ein unmittelbarer Zusammenhang. Auf Grundlage der ermittelten Kenngrößen lässt sich eine Beziehung anhand linearer Funktionen bzw. Potenzfunktionen herleiten. Dabei kann unter den gegebenen Randbedingungen eine "gegenseitige Annäherung" der "unabhängigen Ermittlungsergebnisse"<sup>2</sup> angenommen werden. Diese ergibt sich aus der Einteilung der Prüfergebnisse in einen Streubereich, der durch eine Bildung zweier Grenzlinien der Einzelwerte mit  $\pm 5\%$  zum Mittelwert dargestellt wird.

Diese mathematische Formulierungen erlauben auf Grund ihres einfachen Aufbaus nicht nur eine praxisgerechte Anwendung, sondern liefern auch im Allgemeinen hohe Anpassungsgüten. Bevor diese jedoch in der Praxis einen Eingang finden können, müssen diese – auf Basis der den Auswertungen zu Grunde liegenden geringen Anzahl von Datenpunkten – im Hinblick auf ihre Aussagekraft überprüft werden. Hierzu dienen statistische Methoden wie z. B. die Bestimmung von Konfidenzintervallen. Konfidenzintervalle, auch als Vertrauensbereiche bezeichnet, dienen der Quantifizierung der Sicherheit einer statistischen Schätzung. Dabei wird eine Bandbreite angegeben, innerhalb derer "Aussagen über die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Parameterschätzungen auf der Grundlage der Wahrscheinlichkeitsrechnung" [6] ermöglicht werden.

Von einer Vergleichbarkeit zweier Versuchsserien eines Betons wird auf Grund der unterschiedlicher Konsistenzwerte bereits zu Beginn der Versuchsserien abgesehen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Versuchsserien zeitlich unterschiedliche Abläufe aufweisen. Um hier eine genaue Angabe über eine Sicherheit bzw. Aussagewahrscheinlichkeit über die unabhängigen Prüfergebnisse herleiten zu können, bedarf es einer größeren Anzahl an Messwerten, um daraus konkret für eine Versuchsserie bestimmbare Standardabweichungen und Schwellenwerte bestimmen und damit im Weiteren zwei Versuchsserien miteinander vergleichen zu können.

In diesem Abschnitt wird die statistische Auswertung über die im Rahmen des Projekts gewonnenen Versuchswerte vorgestellt. Hierbei sind Vereinfachungen und Annahmen erforderlich, da die Anzahl der Prüfgrößen keine weitergehende erschöpfend konkrete, definiert mathematische statistische Auswertung zulässt.

---

<sup>2</sup> Definition der Präzision gemäß DIN ISO 5725-1:1997-11 [5]: "Das Ausmaß der gegenseitigen Annäherung zwischen unabhängigen Ermittlungsergebnissen, die unter festgelegten Bedingungen gewonnen sind.

Anmerkung 9: Präzision hängt ausschließlich von der Verteilung zufälliger Abweichungen ab und bezieht sich nicht auf den wahren oder den vorgegeben Wert.

Anmerkung 10: Das Präzisionsmaß wird üblicherweise damit ausgedrückt, "wie unpräzise etwas ist". Errechnet wird es als Standardabweichung der Ermittlungsergebnisse. Geringere Präzision spiegelt sich wieder in einer größeren Standardabweichung.

Anmerkung 11: "Unabhängige Ermittlungsergebnisse" bedeutet Ergebnisse, die unbeeinflusst durch irgendein vorausgehendes Ergebnis am selben oder an einem ähnlichen Untersuchungsobjekt gewonnen werden. Quantitative Präzisionsmaße hängen entscheidend von den festgelegten Bedingungen ab. Wiederholbedingungen und Vergleichbedingungen sind ein besonderes Paar von extremen Bedingungen."

In Tabelle 7 sind die Präzisionsdaten für die Wiederholbedingungen und Vergleichbedingungen<sup>3</sup> gemäß DIN EN 12350-5:2009-09 [7] dargestellt. Diese Daten beziehen sich auf ein Ausbreitmaß von 555 mm.

Tabelle 7: Präzisionsdaten für die Bestimmungen des Ausbreitmaßes gemäß DIN EN 12350-5:2009-08<sup>\*,3</sup>

| Ausbreitmaß | Wiederholbedingungen |      | Vergleichbedingungen |      |
|-------------|----------------------|------|----------------------|------|
|             | $s_r$                | R    | $s_R$                | R    |
| [mm]        | [mm]                 | [mm] | [mm]                 | [mm] |
| 555         | 24,6                 | 69   | 32,5                 | 91   |

\* $s_r$  Wiederholstandardabweichung  $s_R$  Vergleichstandardabweichung  
r Wiederholbarkeitswert R Vergleichbarkeitswert

Eine Definition zu der Bildung der Daten (Tabelle 7) und deren Anwendung ist nach [5]:

"Maße für die Präzision eines vereinheitlichen Meßverfahrens sind im Allgemeinen die Standardabweichungen der unter Wiederholbedingungen, Zwischenbedingungen und Vergleichbedingungen gewonnenen Meßwerte. Aus dem Präzisionsmaß Standardabweichung kann man auch die früher häufig benutzten speziellen Präzisionsmaße Wiederholgrenze  $r$  und Vergleichgrenze  $R$  als "kritische Differenzbeträge" berechnen. Diese sind im Vergleich mit den Standardabweichungen um einen angegebenen Faktor größere Beträge, unter denen oder höchstens gleich denen der Betrag der Differenz zweier Einzelergebnisse (gemessen unter den betreffenden Bedingungen) mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit  $P = 95\%$  eingesetzt. Der genannte Faktor hängt von der gewählten oder vorgegebenen Wahrscheinlichkeit ab und hat bei  $P = 95\%$  den Zahlenwert 2,8<sup>4</sup>. Dem Anwender der Norm (beispielsweise einem Normenausschuß) ist es nach wie vor prinzipiell freigestellt, ob er als Präzisionsmaße eines vereinheitlichten Meßverfahrens

- Wiederholstandardabweichung, Zwischenstandardabweichung und Vergleichstandardabweichung oder
- Wiederholgrenze, Zwischengrenze und Vergleichgrenze

angibt. Empfohlen wird, nur die erstgenannten zu verwenden."

Nach Tabelle 7 werden demnach für die nachfolgende statistische Auswertung die Vergleichbedingungen mit den Werten  $s_r = 32,5$  mm und  $R = 91$  mm zum Vergleich der manuell ermittelten Werte nach DIN EN 12350-5:2009-08 und den Prüfgrößen des Systems Verifi angesetzt. Jedoch gilt für den R-Wert (Vergleichbarkeitswert) das Messergebnis aus der halben Breite des Vertrauensbereiches, gebildet aus der Messunsicherheit von  $91/2$  mm. Für den ausgewerteten Fall nach DIN EN 12350-5:2009-08 bedeutet dies:  $555 \pm 45,5$  mm.

<sup>3</sup> Anmerkungen zu Tabelle 7: Präzisionsdaten für die Bestimmungen des Ausbreitmaßes gemäß DIN EN 12350-5:2009-08

- Anmerkung 1: Die Präzisionsdaten wurden im Rahmen eines im Jahre 1987 im Vereinigten Königreich durchgeführten Versuchs bestimmt, bei dem Präzisionsdaten durch mehrere Prüfungen nach der Reihe BS 1881 erzielt wurden. An dem Versuch waren 16 Laboranten beteiligt. Die Betone wurden aus üblichem Portlandzement, Thames-Valley-Sand und Thames-Valley-Grobgesteinskörnungen (10 mm und 20 mm) hergestellt.
- Anmerkung 2: Der Unterschied zwischen zwei Prüfergebnissen, die mit derselben Probe von einem Laboranten mit demselben Gerät innerhalb eines möglichst kurzen Zeitraums erzielt wurden, überschreitet den Wiederholbarkeitswert  $r$  bei üblicher und korrekter Durchführung des Verfahrens im Durchschnitt nicht mehr als einmal in 20 Fällen.
- Anmerkung 3: Prüfergebnisse, die an derselben Probe innerhalb eines möglichst kurzen Zeitraums von zwei Laboranten mit ihrer eigenen Geräteausstattung erzielt wurden, weichen vom Vergleichbarkeitswert  $R$  bei üblicher und korrekter Durchführung des Verfahrens im Durchschnitt nicht mehr als einmal in 20 Fällen ab.
- Anmerkung 4: Für weitere Informationen über die Präzision und für Definitionen der statistischen Begriffe, die im Zusammenhang mit der Präzision verwendet werden, siehe Reihe ISO 5725.

<sup>4</sup> "Dieser Faktor ergibt sich aus dem auf 2,0 gerundeten Quantil  $u_{97,5\%} = 1,96$  sowie aus  $\sqrt{n}$  mit  $n = 2$ . Aus deren Multiplikation folgt, für die Zwecke der Schätzung hinreichend genau der Faktor 2,8."

In den nachfolgenden Tabellen wird hierzu zunächst aus den einem Prüfzyklus zugehörigen Einzelwerten der manuell ermittelten Ausbreitmaße und den Verifi-Werten die Differenz ermittelt, bei der sich die größte Abweichung ergibt. Auf eine Angabe der Ergebnisse als Betrag wird hierbei verzichtet, da dadurch die Richtung der Abweichung angegeben wird. Im Weiteren wird die Differenz der Mittelwerte aller Prüfergebnisse eines Prüfzyklus und den Verifi-Werten angegeben. Alle Ergebnisse werden mit dem zulässigen Vergleichbarkeitswert verglichen und angegeben, ob die Anforderungen erfüllt werden (Ja/Nein). Dabei werden im Rahmen dieses Berichts die Präzisionsdaten, die einem Ausbreitmaß von 555 mm entsprechen, als richtig für alle ermittelten Ausbreitmaße in den entsprechenden Konsistenzbereichen angenommen.<sup>5</sup> Anschließend werden die Standardabweichungen eines Prüfzyklus aus mindestens drei Prüfergebnissen gebildet und diese mit der Vergleichstandardabweichung verglichen.

In den Versuchsserien, bei denen pro Prüfzyklus jeweils drei Ausbreitmaße manuell ermittelt wurden, wird zusätzlich eine Parameterstudie durchgeführt. Dabei wird untersucht, welche Verifi-Werte einem bestimmten Vertrauensbereich (mit  $t_s = 4,30$  und  $n = 3$ ) zugeordnet werden können, der in Abhängigkeit des ermittelten Mittelwertes (aus den manuelle ermittelten Werten) und mehrerer angenommener Standardabweichungen gebildet wird.

Generell stellen Mittelwert und Standardabweichung, auf der Basis kleiner Stichproben, nur genäherte Schätzwerte für eine Grundgesamtheit dar. Daher wird mit Hilfe der t-Verteilung [8] und [9] und stark vereinfachter Annahmen ein Vertrauensbereich gemäß nachfolgender Gleichung aufgestellt, für eine gewählte statistische Sicherheit von  $P = 95 \%$ :

$$\bar{x} - t_s \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_s \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

|           |  |
|-----------|--|
| $\bar{x}$ | Mittelwert einer Stichprobe/eines Prüfzyklus   |
| $t_s$     | Schwellenwert für eine statistische Sicherheit von $95 \% \triangleq 4,30$ bei $f = 2$ |
| $s$       | Standardabweichung   |
| $f$       | Freiheitsgrade; $f = n - 1 = 2$  |
| $n$       | Umfang der Stichprobe; $n = 3$   |
| $\mu$     | Mittelwert einer Grundgesamtheit   |

Der Variationskoeffizient dient zum Vergleich von Streuungen verschiedener Messreihen, gibt den relativen Fehler einer Versuchsreihe an und bereinigt als Maß ohne Einheit das Streuungsband [10]. Es kann ein Vergleich von Messreihen hergestellt werden, da der Variationskoeffizient unabhängig von einer Einheit ist.

$$v = \frac{s}{\bar{x}} * 100 [\%] \quad (2)$$

|     |                                |
|-----|--------------------------------|
| $v$ | Variationskoeffizient [-], [%] |
|-----|--------------------------------|

<sup>5</sup> Untersuchungsbedarf besteht hierbei in welchen Konsistenzbereichen sich größere bzw. geringere Präzisionsdaten ergeben würden, oder ob sich diese Annahme bestätigen würde.

### 5.4.1. Ergebnisse der Beton 1

In diesem Abschnitt wird die statistische Auswertung der Beton 1 vorgestellt.

#### A-1-1

In Tabelle 8 sind die Ausbreitmaß-Ergebnisse für die Versuchsserie A-1-1 dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine statistische Auswertung unter Einbeziehung des Vergleichbarkeitswertes gemäß DIN EN 12350-5:2009-08. Die Werte des Systems Verifi weichen bei keinem der Ergebnisse eines Prüfzyklus von den geforderten Werten ab.

Tabelle 8: Statistische Auswertung zu den Ausbreitmaß-Ergebnissen: A-1-1

| Nr. der Probe     | Zeit    | Ausbreitmaß |          |        | Statistik und Präzision                              |        |            |                 |        |
|-------------------|---------|-------------|----------|--------|--|--------|------------|-----------------|--------|
|                   |         | Prüfer 1    | Prüfer 2 | Verifi | größte Abweichung zw. Einzelprüfwert und Verifi-Wert | <±91/2 | Prüfwerte  | Abweichung      | <±91/2 |
|                   |         | Tisch a     | Tisch b  |        |  |        | Mittelwert | MW minus Verifi |        |
| [-]               | [hh:mm] | [mm]        | [mm]     | [mm]   |  |        |            |                 |        |
|                   | 00:00   |             |          |        |  |        |            |                 |        |
| A-1-1-1           | 00:04   | 420         |          | 415    | 5  | Ja     |            |                 |        |
| A-1-1-2           | 00:38   |             | 355      | 395    | Bemerkung: Stand der Ausbreittische nicht optimal    |        |            |                 |        |
| A-1-1-3           | 00:55   | 365         | 360      | 390    |  |        |            |                 |        |
| A-1-1-4           | 01:27   | 430         | 445      | 445    | -15  | Ja     | 437,5      | -7,5            | Ja     |
| A-1-1-5           | 01:57   | 440         | 450      | 435    | 15   | Ja     | 445,0      | 10,0            | Ja     |
| A-1-1-6           | 02:11   | 420         | 425      | 435    | -15  | Ja     | 422,5      | -12,5           | Ja     |
| größte Abweichung |         |             |          |        | 15   |        |            | -12,5           |        |

#### B-1-4

In Tabelle 9 sind die Ausbreitmaß-Ergebnisse für die Versuchsserie B-1-4 dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine statistische Auswertung unter Einbeziehung des Vergleichbarkeitswertes und der Vergleichsstandardabweichung gemäß DIN EN 12350-5:2009-08. Die Werte des Systems Verifi weichen vereinzelt bei Prüfzyklus B-1-4-2 und B-1-4-3 von den manuell ermittelten Ergebnissen eines Prüfzyklus von den geforderten Werten ab. Die größte Abweichung von 75 mm und die einzelnen Abweichungen bei den Prüfzyklen sind auf die Kalibrierung des Systems zurückzuführen (vgl. hierzu Abschnitt 5.1.1). Die Standardabweichungen liegen jedoch alle im zulässigen Bereich.

Tabelle 9: Statistische Auswertung zu den Ausbreitmaß-Ergebnissen: B-1-4

| Nr. der Probe     | Zeit    | Ausbreitmaß |          |          |        | Statistik und Präzision                              |        |                      |                            |        |                    |        |
|-------------------|---------|-------------|----------|----------|--------|--|--------|----------------------|----------------------------|--------|--------------------|--------|
|                   |         | Prüfer 1    | Prüfer 1 | Prüfer 2 | Verifi | größte Abweichung zw. Einzelprüfwert und Verifi-Wert | <±91/2 | Prüfwerte Mittelwert | Abweichung MW minus Verifi | <±91/2 | Standardabweichung | < 32,5 |
|                   |         | Tisch a     | Tisch b  | Tisch b  |        |  |        |                      |                            |        |                    |        |
| [-]               | [hh:mm] | [mm]        | [mm]     | [mm]     | [mm]   |  |        |                      |                            |        |                    |        |
|                   | 00:00   |             |          |          |        |  |        |                      |                            |        |                    |        |
| B-1-4-1           | 00:03   | 455         |          |          | 465    | -10  | Ja     |                      |                            |        |                    |        |
| B-1-4-2           | 00:47   | 445         |          | 450      | 420    | 50   | Nein   | 455,0                | 35,0                       | Ja     | 13,2               | Ja     |
|                   | 00:52   |             | 470      |          | 415    | 55   | Nein   |                      | 40,0                       | Ja     |                    |        |
| B-1-4-3           | 00:59   | 460         |          | 465      | 405    | 75   | Nein   | 468,3                | 63,3                       | Nein   | 10,4               | Ja     |
|                   | 01:05   |             | 480      |          | 405    | 75   | Nein   |                      | 63,3                       | Nein   |                    |        |
| B-1-4-4           | 01:21   | 505         |          | 500      | 500    | 5  | Ja     | 503,3                | 3,3                        | Ja     | 2,9                | Ja     |
|                   | 01:27   |             | 505      |          | 490    | 15   | Ja     |                      | 13,3                       | Ja     |                    |        |
| B-1-4-5           | 01:48   | 480         |          | 500      | 485    | 15   | Ja     | 490,0                | 5,0                        | Ja     | 10,0               | Ja     |
|                   | 01:54   |             | 490      |          | 480    | 20   | Ja     |                      | 10,0                       | Ja     |                    |        |
| B-1-4-6           | 02:03   | 480         |          | 505      | 480    | 25   | Ja     | 481,7                | 1,7                        | Ja     | 22,5               | Ja     |
|                   | 02:09   |             | 460      |          | 485    | -25  | Ja     |                      | -3,3                       | Ja     |                    |        |
| größte Abweichung |         |             |          |          |        | 75   |        |                      | 63                         |        | 23                 |        |

In Tabelle 10 werden in Abhängigkeit des Mittelwerts aus den manuell ermittelten Ergebnissen des Ausbreitmaßes und der angenommenen Standardabweichungen Vertrauensbereiche gebildet. Hierbei wird geprüft, ob die Verifi-Werte in diese Vertrauensbereiche eingeordnet werden können. Die überwiegende Anzahl der Ergebnisse liegt in diesem Vertrauensbereich. Lediglich die Werte, welche bereits in Tabelle 9 die Anforderungen auf Grund der Kalibrierung des Systems für den Fahrnischer B nicht erfüllt haben, erfordern höhere Werte für die Standardabweichung. Die Variationskoeffizienten zeigen eine eindeutige Tendenz von Werten um 1 % bei einer Standardabweichung von 5 mm bis zu > 6 % bei 30 mm. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass sich bei den geringeren Ausbreitmaß-Werten der Variationskoeffizient größer ist als bei denen mit einer fließfähigeren Konsistenz.

Tabelle 10: Parameterstudie der Vertrauensgrenzen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Standardabweichungen und die entsprechenden Variationskoeffizienten- B-1-4: Ausbreitmaß

| Probe              | Einzelwerte System Verifi                     | Mittelwerte der Prüfwerte | Einzelwerte von Verifi liegen im Bereich der Vertrauensgrenzen in Abhängigkeit der Mittelwerte, Standardabweichung [mm] – angenommene Werte |      |      |      |      |      | Bemerkung   |
|--------------------|---|---------------------------|---|------|------|------|------|------|---|
|                    |   |                           | 5   | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   |   |
| [-]                | [mm]  | [mm]                      |   |      |      |      |      |      |   |
| B-1-4-2            | 420   | 455,0                     | Nein  | Nein | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   | Abweichung der Werte des Systems, Grund: Kalibrierung |
|                    | 415   |                           |   |      | Nein |      |      |      |   |
| B-1-4-3            | 405   | 468,3                     | Nein  | Nein | Nein | Nein | Nein | Ja   |   |
|                    | 405   |                           |   |      |      |      |      |      |   |
| B-1-4-4            | 500   | 503,3                     | Ja  | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   |   |
|                    | 490   |                           | Nein  | Nein |      |      |      |      |   |
| B-1-4-5            | 485   | 490,0                     | Ja  | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   |   |
|                    | 480   |                           |   |      |      |      |      |      |   |
| B-1-4-6            | 480   | 481,7                     | Ja  | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   |   |
|                    | 485   |                           |   |      |      |      |      |      |   |
| Standardabweichung |   |                           | 5   | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   |   |
| B-1-4-2            | Variationskoeffizient<br>$v = s/MW * 100$ [%] |                           | 1,10  | 2,20 | 3,30 | 4,40 | 5,49 | 6,59 |   |
| B-1-4-3            |   |                           | 1,07  | 2,14 | 3,20 | 4,27 | 5,34 | 6,41 |   |
| B-1-4-4            |   |                           | 0,99  | 1,99 | 2,98 | 3,97 | 4,97 | 5,96 |   |
| B-1-4-5            |   |                           | 1,02  | 2,04 | 3,06 | 4,08 | 5,10 | 6,12 |   |
| B-1-4-6            |   |                           | 1,04  | 2,08 | 3,11 | 4,15 | 5,19 | 6,23 |   |
|                    |   |                           |   |      |      |      |      |      |   |

## 5.4.2. Ergebnisse der Beton 2

In diesem Abschnitt wird die statistische Auswertung der Beton 2 vorgestellt.

### A-2-2

In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Ausbreitmaßbestimmung für die Versuchsserie A-2-2 dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine statistische Auswertung unter Einbeziehung des Vergleichbarkeitswertes gemäß DIN EN 12350-5:2009-08. Die Werte des Systems Verifi weichen bei keinem Ergebnis eines Prüfzyklus von den geforderten Werten ab. Bei Prüfzyklus A-2-2-8 werden keine Werte einer Auswertung herangezogen, da der Messbereich des Systems Verifi bei maximal 600 mm liegt.

Tabelle 11: Statistische Auswertung zu den Ausbreitmaß-Ergebnissen: A-2-2

| Nr. der Probe     | Zeit    | Ausbreitmaß |          |        | Statistik und Präzision                               |        |            |                 |        | Bemerkung           |
|-------------------|---------|-------------|----------|--------|---|--------|------------|-----------------|--------|---------------------|
|                   |         | Prüfer 1    | Prüfer 2 | Verifi | größte Abweichung zw. Einzelprüfwert                  | <±91/2 | Prüfwerte  | Abweichung      | <±91/2 |                     |
|                   |         | Tisch a     | Tisch b  |        |   |        | Mittelwert | MW minus Verifi |        |                     |
| [ - ]             | [hh:mm] | [mm]        | [mm]     | [mm]   |   |        |            |                 |        |                     |
|                   | 00:00   |             |          |        |   |        |            |                 |        |                     |
| A-2-2-1           | 00:03   | 405         |          | 410    | -5  | Ja     |            |                 |        |                     |
| A-2-2-2           | 00:41   | 410         | 415      | 400    | 15  | Ja     | 412,5      | 12,5            | Ja     |                     |
| A-2-2-3           | 01:01   | 515         | 530      | 420    |   |        |            |                 |        |                     |
| A-2-2-4           | 01:14   | 455         | 455      | 410    | Bemerkung: FM über Schnecke in Mischtrommel zugegeben |        |            |                 |        |                     |
| A-2-2-5           | 01:48   | 455         | 470      | 450    | 20  | Ja     | 462,5      | 12,5            | Ja     |                     |
| A-2-2-6           | 02:07   | 455         | 455      | 450    | 5   | Ja     | 455,0      | 5,0             | Ja     |                     |
| A-2-2-7           | 02:25   | 500         | 495      | 510    | -15   | Ja     | 497,5      | -12,5           | Ja     |                     |
| A-2-2-8           | 02:42   | 605         | 630      | 575    |   |        | 617,5      |                 |        | Verifi: max. 600 mm |
| größte Abweichung |         |             |          |        | 20  |        |            | 12,5            |        |                     |

### B-2-5

In Tabelle 12 sind die Ausbreitmaß-Ergebnisse für die Versuchsserie B-2-5 dargestellt. Zusätzlich erfolgte eine statistische Auswertung unter Einbeziehung des Vergleichbarkeitswertes und der Vergleichsstandardabweichung gemäß DIN EN 12350-5:2009-08. Die Werte des Systems Verifi weichen teilweise von den geforderten Werten ab. Dies ist auf die Kalibrierung des Systems zurückzuführen. Insgesamt sind die Abweichungen bei Fahrnischer B höher als bei Fahrnischer A. Die Standardabweichungen liegen jedoch alle im zulässigen Bereich.

Tabelle 12: Statistische Auswertung zu den Ausbreitmaß-Ergebnissen: B-2-5

| Nr. der Probe     | Zeit    | Ausbreitmaß |          |          |        | Statistik und Präzision                              |        |            |                 |         |                    |        |
|-------------------|---------|-------------|----------|----------|--------|--|--------|------------|-----------------|---------|--------------------|--------|
|                   |         | Prüfer 1    | Prüfer 1 | Prüfer 2 | Verifi | größte Abweichung zw. Einzelprüfwert und Verifi-Wert | <±91/2 | Prüfwerte  | Abweichung      | < ±91/2 | Standardabweichung | < 32,5 |
|                   |         | Tisch a     | Tisch b  | Tisch b  |        |  |        | Mittelwert | MW minus Verifi |         |                    |        |
| [-]               | [hh:mm] | [mm]        | [mm]     | [mm]     | [mm]   |  |        |            |                 |         |                    |        |
|                   | 00:00   |             |          |          |        |  |        |            |                 |         |                    |        |
| B-2-5-1           | 00:03   | 450         |          |          | 400    | 50   | Nein   |            | 50,0            | Nein    |                    |        |
|                   | 00:09   | 455*        |          |          | 395    | 60   | Nein   |            | 60,0            | Nein    |                    |        |
| B-2-5-2           | 00:58   | 415         |          | 415      | 385    | 30   | Ja     | 408,3      | 23,3            | Ja      | 11,5               | Ja     |
|                   | 01:03   |             | 395      |          | 385    | 30   | Ja     |            | 23,3            | Ja      |                    |        |
| B-2-5-3           | 01:17   | 445         |          | 435      | 405    | 45   | Ja     | 443,3      | 38,3            | Ja      | 7,6                | Ja     |
|                   | 01:22   |             | 450      |          | 400    | 50   | Nein   |            | 43,3            | Ja      |                    |        |
| B-2-5-4           | 01:43   | 480         |          | 460      | 425    | 55   | Nein   | 471,7      | 46,7            | Nein    | 10,4               | Ja     |
|                   | 01:49   |             | 475      |          | 430    | 50   | Nein   |            | 41,7            | Ja      |                    |        |
| B-2-5-5           | 02:05   | 460         |          | 460      | 420    | 45   | Ja     | 461,7      | 41,7            | Ja      | 2,9                | Ja     |
|                   | 02:11   |             | 465      |          | 435    | 30   | Ja     |            | 26,7            | Ja      |                    |        |
| B-2-5-6           | 02:24   | 510         |          | 510      | 485    | 35   | Ja     | 513,3      | 28,3            | Ja      | 5,8                | Ja     |
|                   | 02:30   |             | 520      |          | 490    | 30   | Ja     |            | 23,3            | Ja      |                    |        |
| B-2-5-7           | 02:45   | 595         |          | 615      | 565    | 50   | Nein   | 603,3      | 38,3            | Ja      | 10,4               | Ja     |
|                   | 02:51   |             | 600      |          | 560    | 55   | Nein   |            | 43,3            | Ja      |                    |        |
| B-2-5-8           | 03:06   | > 700       |          | > 700    | 600    |  |        |            |                 |         |                    |        |
| größte Abweichung |         |             |          |          |        | 60   |        |            | 60              |         | 12                 |        |

In Tabelle 13 werden in Abhängigkeit des Mittelwerts aus den manuell ermittelten Ausbreitmaß-Ergebnissen und angenommenen Standardabweichungen Vertrauensbereiche gebildet. Hierbei wird geprüft, ob die Verifi-Werte in diese Vertrauensbereiche eingeordnet werden können. Bei den Prüfzyklen B-2-5-3 bis B-2-5-5 sind Standardabweichungen von mehr als mindestens 15 bis 20 mm erforderlich, sodass die Verifi-Werte im Vertrauensbereich liegen. Bei den weiteren Prüfzyklen reduziert sich dies auf > 10 bzw. > 5 mm. Dies weist auf eine erforderliche Nachkalibrierung des Systems Verifi hin.

Die Variationskoeffizienten steigen um so höher, je höher die Standardabweichungen und reduzieren sich wieder bei fließfähigeren Konsistenz-Klassen.

Tabelle 13: Parameterstudie der Vertrauensgrenzen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Standardabweichungen und die entsprechenden Variationskoeffizienten - B-2-5: Ausbreitmaß

| Probe   | Einzelwerte System Verifi                     | Mittelwerte der Prüfwerte | Einzelwerte von Verifi liegen im Bereich der Vertrauensgrenzen in Abhängigkeit der Mittelwerte, Standardabweichung [mm] -- angenommene Werte |      |      |      |      |      | Bemerkung   |
|---------|---|---------------------------|--|------|------|------|------|------|---|
|         |   |                           | 5  | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   |   |
|         | [mm]  | [mm]                      |  |      |      |      |      |      |   |
| B-2-5-2 | 385   | 408,3                     | Nein   | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   | Abweichung der Werte des Systems, Grund: Kalibrierung |
|         | 385   |                           |  |      |      |      |      |      |   |
| B-2-5-3 | 405   | 443,3                     | Nein   | Nein | Nein | Ja   | Ja   | Ja   |   |
|         | 400   |                           |  |      |      |      |      |      |   |
| B-2-5-4 | 425   | 471,7                     | Nein   | Nein | Nein | Ja   | Ja   | Ja   |   |
|         | 430   |                           |  |      |      |      |      |      |   |
| B-2-5-5 | 420   | 461,7                     | Nein   | Nein | Nein | Ja   | Ja   | Ja   |   |
|         | 435   |                           |  | Ja   |      |      |      |      |   |
| B-2-5-6 | 485   | 513,3                     | Nein   | Nein | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   |   |
|         | 490   |                           | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   |      |      |   |
| B-2-5-7 | 565   | 603,3                     | Nein   | Nein | Nein | Ja   | Ja   | Ja   |   |
|         | 560   |                           |  |      |      |      |      |      |   |
|         | Standardabweichung                            |                           | 5  | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   |   |
| B-2-5-2 | Variationskoeffizient<br>$v = s/MW * 100$ [%] |                           | 1,22   | 2,45 | 3,67 | 4,90 | 6,12 | 7,35 |   |
| B-2-5-3 |   |                           | 1,13   | 2,26 | 3,38 | 4,51 | 5,64 | 6,77 |   |
| B-2-5-4 |   |                           | 1,06   | 2,12 | 3,18 | 4,24 | 5,30 | 6,36 |   |
| B-2-5-5 |   |                           | 1,08   | 2,17 | 3,25 | 4,33 | 5,42 | 6,50 |   |
| B-2-5-6 |   |                           | 0,97   | 1,95 | 2,92 | 3,90 | 4,87 | 5,84 |   |
| B-2-5-7 |   |                           | 0,83   | 1,66 | 2,49 | 3,31 | 4,14 | 4,97 |   |



### 5.4.3. Ergebnisse der Beton 3

In diesem Abschnitt wird die statistische Auswertung der Beton 3 vorgestellt.

#### A-3-3

In Tabelle 14 sind die Ergebnisse der Ausbreitmaßbestimmungen für die Versuchsserie A-3-3 dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine statistische Auswertung unter Einbeziehung des Vergleichbarkeitswertes gemäß DIN EN 12350-5:2009-08. Die Werte des Systems Verifi weichen bei keinem Ergebnis eines Prüfzyklus von den geforderten Werten ab. Die ermittelte größte Abweichung ist mit -30 mm gegeben. Auch die Standardabweichungen liegen alle im zulässigen Bereich.

Tabelle 14: Statistische Auswertung zu den Ausbreitmaß-Ergebnissen: A-3-3

| Nr. der Probe     | Zeit<br>[hh:mm] | Ausbreitmaß         |                     |                     |        | Statistik und Präzision                                    |         |            |                    |         |                         |        |
|-------------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------|--|---------|------------|--------------------|---------|-------------------------|--------|
|                   |                 | Prüfer 1<br>Tisch a | Prüfer 1<br>Tisch b | Prüfer 2<br>Tisch b | Verifi | größte Abweichung<br>zw. Einzelprüfwert<br>und Verifi-Wert | < ±91/2 | Prüfwerte  | Abweichung         | < ±91/2 | Standard-<br>abweichung | < 32,5 |
|                   |                 | [mm]                | [mm]                | [mm]                | [mm]   |  |         | Mittelwert | MW<br>minus Verifi |         |                         |        |
|                   | 00:00           |                     |                     |                     |        |  |         |            |                    |         |                         |        |
| A-3-3-1           | 00:04           | 425                 |                     |                     | 415    | 10   | Ja      |            | 10,0               | Ja      |                         |        |
| A-3-3-2           | 00:41           | 412,5               |                     |                     | 400    | 25   | Ja      | 418,8      | 12,5               | Ja      |                         |        |
| A-3-3-3           | 01:09           | 455                 |                     |                     | 475    | -20  | Ja      | 460,0      | -15,0              | Ja      | 8,7                     | Ja     |
|                   | 01:15           |                     | 470                 |                     | 480    | -25  | Ja      |            | -20,0              | Ja      |                         |        |
| A-3-3-4           | 01:31           | 550                 |                     |                     | 575    | -20  | Ja      | 566,7      | -3,3               | Ja      | 14,4                    | Ja     |
|                   | 01:37           |                     |                     | 575                 | 570    | -20  | Ja      |            | -3,3               | Ja      |                         |        |
| A-3-3-5           | 01:51           | 540                 |                     |                     | 585    | -25  | Ja      | 558,3      | -6,7               | Ja      | 23,6                    | Ja     |
|                   | 01:58           |                     |                     | 550                 | 570    | -30  | Ja      |            | -11,7              | Ja      |                         |        |
| A-3-3-6           | 02:10           | 600                 |                     |                     | 595    | 10   | Ja      | 600,0      | 5,0                | Ja      | 5,0                     | Ja     |
|                   | 02:17           |                     |                     | 595                 | 600    | 5  | Ja      |            | 0,0                | Ja      |                         |        |
| größte Abweichung |                 |                     |                     |                     |        | -30  |         |            | -20                |         | 24                      |        |

In Tabelle 15 wurde in Abhängigkeit des Mittelwerts aus den manuell ermittelten Ausbreitmaß-Ergebnissen und angenommenen Standardabweichungen Vertrauensbereiche gebildet. Hierbei wird geprüft, ob die Verifi-Werte in diese Vertrauensbereiche eingeordnet werden können. Alle Ergebnisse liegen mit lediglich einer Ausnahme im Vertrauensbereich, bei einer minimalen Standardabweichung von 5 mm.

Die Variationskoeffizienten steigen um so höher, je höher die Standardabweichungen und reduzieren sich wieder bei fließfähigeren Konsistenz-Klassen.

Tabelle 15: Parameterstudie der Vertrauensgrenzen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Standardabweichungen und die entsprechenden Variationskoeffizienten - A.3.3: Ausbreitmaß

| Probe   | Einzelwerte System Verifi                 | Mittelwerte der Prüfwerte | Einzelwerte von Verifi liegen im Bereich der Vertrauensgrenzen in Abhängigkeit der Mittelwerte, Standardabweichung [mm] – angenommene Werte |      |      |      |      |      | Bemerkung |
|---------|---|---------------------------|---|------|------|------|------|------|-----------|
|         |   |                           | 5   | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   |           |
|         | [mm]                                      | [mm]                      |   |      |      |      |      |      |           |
| A-3-3-3 | 475<br>480                                | 460,0                     | Nein  | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   |           |
| A-3-3-4 | 570<br>570                                | 566,7                     | Ja  | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   |           |
| A-3-3-5 | 565<br>570                                | 558,3                     | Ja  | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   |           |
| A-3-3-6 | 595<br>600                                | 600,0                     | Ja  | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   |           |
|         | Standardabweichung                        |                           | 5   | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   |           |
| A-3-3-3 | Variationskoeffizient<br>$v=s/MW*100$ [%] |                           | 1,09  | 2,17 | 3,26 | 4,35 | 5,43 | 6,52 |           |
| A-3-3-4 |   |                           | 0,88  | 1,76 | 2,65 | 3,53 | 4,41 | 5,29 |           |
| A-3-3-5 |   |                           | 0,90  | 1,79 | 2,69 | 3,58 | 4,48 | 5,37 |           |
| A-3-3-6 |   |                           | 0,83  | 1,67 | 2,50 | 3,33 | 4,17 | 5,00 |           |

### B-3-6

In Tabelle 16 sind die Ausbreitmaß-Ergebnisse für die Versuchsserie B-3-6 dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine statistische Auswertung unter Einbeziehung des Vergleichbarkeitswertes und der Vergleichsstandardabweichung gemäß DIN EN 12350-5:2009-08. Die Werte des Systems Verifi weichen teilweise von den geforderten Werten ab. Dies ist auf die Kalibrierung des Systems zurückzuführen. Insgesamt sind die Abweichungen bei Fahrnischer B höher als bei Fahrnischer A. Die Standardabweichungen liegen jedoch alle im zulässigen Bereich.

Tabelle 16: Statistische Auswertung zu den Ausbreitmaß-Ergebnissen: B-3-6

| Nr. der Probe | Zeit    | Ausbreitmaß       |          |          |        | Statistik und Präzision                              |         |            |                 |         |                    |        |
|---------------|---------|-------------------|----------|----------|--------|--|---------|------------|-----------------|---------|--------------------|--------|
|               |         | Prüfer 1          | Prüfer 1 | Prüfer 2 | Verifi | größte Abweichung zw. Einzelprüfwert und Verifi-Wert | < ±91/2 | Prüfwerte  | Abweichung      | < ±91/2 | Standardabweichung | < 32,5 |
|               |         | Tisch a           | Tisch b  | Tisch b  |        |  |         | Mittelwert | MW minus Verifi |         |                    |        |
|               | [hh:mm] | [mm]              | [mm]     | [mm]     | [mm]   |  |         |            |                 |         |                    |        |
|               | 00:00   |                   |          |          |        |  |         |            |                 |         |                    |        |
| B-3-6-1       | 00:04   | 460               |          |          | 420    | 40   | Ja      |            | 40,0            | Ja      |                    |        |
|               | 00:09   | 460*              |          |          | 420    | 40   | Ja      |            | 40,0            | Ja      |                    |        |
| B-3-6-2       | 00:41   | 435               |          | 455      | 395    | 60   | Nein    | 441,7      | 46,7            | Nein    | 11,5               | Ja     |
|               | 00:47   |                   | 435      |          | 400    | 55   | Nein    |            | 41,7            | Ja      |                    |        |
| B-3-6-3       | 01:09   | 505               |          | 490      | 480    | 30   | Ja      | 501,7      | 21,7            | Ja      | 10,4               | Ja     |
|               | 01:15   |                   | 510      |          | 480    | 30   | Ja      |            | 21,7            | Ja      |                    |        |
| B-3-6-4       | 01:32   | 605               |          | 630      | 575    | 65   | Nein    | 625,0      | 50,0            | Nein    | 18,0               | Ja     |
|               | 01:39   |                   | 640      |          | 565    | 75   | Nein    |            | 60,0            | Nein    |                    |        |
| B-3-6-5       | 01:50   | 555               |          | 590      | 570    | 25   | Ja      | 580,0      | 10,0            | Ja      | 21,8               | Ja     |
|               | 01:57   |                   | 595      |          | 570    | 25   | Ja      |            | 10,0            | Ja      |                    |        |
| B-3-6-6       | 02:12   | 645               |          | > 700    | 600    |  |         |            |                 |         |                    |        |
| B-3-6-7       | 02:31   | > 700             |          | > 700    | 600    |  |         |            |                 |         |                    |        |
|               |         | größte Abweichung |          |          |        | 75   |         |            | 60              |         | 22                 |        |

In Tabelle 17 werden in Abhängigkeit des Mittelwerts aus den manuell ermittelten Ausbreitmaß-Ergebnissen und angenommenen Standardabweichungen Vertrauensbereiche gebildet. Hierbei wird geprüft, ob die Verifi-Werte in diese Vertrauensbereiche eingeordnet werden können. Bei den Prüfzyklen B-3-6-2 und B-3-6-4 sind größere Standardabweichungen erforderlich, sodass die Verifi-Werte im Vertrauensbereich liegen. Dies weist auf eine erforderliche Nachkalibrierung des Systems Verifi hin.

Die Variationskoeffizienten steigen um so höher, je höher die Standardabweichungen und reduzieren sich wieder bei fließfähigeren Konsistenz-Klassen.

Tabelle 17: Parameterstudie der Vertrauensgrenzen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Standardabweichungen und die entsprechenden Variationskoeffizienten - B-3-6: Ausbreitmaß

| Probe   | Einzelwerte System Verifi                       | Mittelwerte der Prüfwerte | Einzelwerte von Verifi liegen im Bereich der Vertrauensgrenzen in Abhängigkeit der Mittelwerte, Standardabweichung [mm] – angenommene Werte |      |      |      |      | Bemerkung |   |  |
|---------|---|---------------------------|---|------|------|------|------|-----------|---|--|
|         |   |                           | 5   | 10   | 15   | 20   | 25   |           | 30  |  |
|         | [mm]  | [mm]                      |   |      |      |      |      |           |   |  |
| B-3-6-2 | 395   | 441,7                     | Nein  | Nein | Nein | Ja   | Ja   | Ja        | Abweichung der Werte des Systems, Grund: Kalibrierung |  |
|         | 400   |                           |   |      |      |      |      |           |   |  |
| B-3-6-3 | 480   | 501,7                     | Nein  | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   | Ja        |   |  |
|         | 480   |                           |   |      |      |      |      |           |   |  |
| B-3-6-4 | 575   | 625,0                     | Nein  | Nein | Nein | Nein | Ja   | Ja        |   |  |
|         | 565   |                           |   |      |      |      |      |           |   |  |
| B-3-6-5 | 570   | 580,0                     | Ja  | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   | Ja        |   |  |
|         | 570   |                           |   |      |      |      |      |           |   |  |
|         | Standardabweichung                              |                           | 5   | 10   | 15   | 20   | 25   | 30        |   |  |
| B-3-6-2 | Variationskoeffizient<br>$v = s / MW * 100$ [%] |                           | 1,13  | 2,26 | 3,40 | 4,53 | 5,66 | 6,79      |   |  |
| B-3-6-3 |   |                           | 1,00  | 1,99 | 2,99 | 3,99 | 4,98 | 5,98      |   |  |
| B-3-6-4 |   |                           | 0,80  | 1,60 | 2,40 | 3,20 | 4,00 | 4,80      |   |  |
| B-3-6-5 |   |                           | 0,86  | 1,72 | 2,59 | 3,45 | 4,31 | 5,17      |   |  |
|         |   |                           |   |      |      |      |      |           |   |  |

## 5.5. Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul

In diesem Abschnitt erfolgt die Vorstellung der Ergebnisse der Festbetonprüfungen. Für die Ermittlung der Prüfergebnisse wurden zu jedem Probenahme-Zeitpunkt jeweils drei Probekörper für die Druckfestigkeitsprüfung und einen Probekörper für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls hergestellt. Die Probelagerung erfolgte nach Ausschalen für sechs Tage im Wasserbad und anschließend, bis zu 28 Tagen bei einer Lagerung von 20 °C und 65 % relativer Feuchte. Die Berechnung der Druckfestigkeitswerte nach dem Referenzverfahren erfolgt mit dem Faktor 0,92. Die Höchstlast für die E-Modul-Prüfung wurde aus den drei Ergebnissen der Druckfestigkeit ermittelt.

Während in dem vorliegenden Abschnitt die Ergebnisse graphisch dargestellt sind, werden die kompletten Daten tabellarisch im Anhang aufgelistet.

### 5.5.1. Ergebnisse der Beton 1

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul der Beton 1 vorgestellt. Bei der Beton 1 handelt es sich planmäßig um einen Beton der Festigkeitsklasse C20/25. Die gewonnenen Ergebnisse sind im Einzelnen in tabellarischer Form in Anhang 8 zusammengestellt.

In Abbildung 55 sind die Ergebnisse der zwei Versuchsserien A-1-1 und B-1-4 gegenübergestellt. Zwischen der 3. und 4. Probenahme erfolgte die Wasserzugabe, vgl. Abschnitt 5.1.1. Demnach erhöhte sich der Wasserzement- und Wasserbindemittelwert der beiden Versuchsserien. Dabei fielen ab dieser Wasserzugabe die Werte der Druckfestigkeit bei beiden Versuchsserien tendenziell ab.

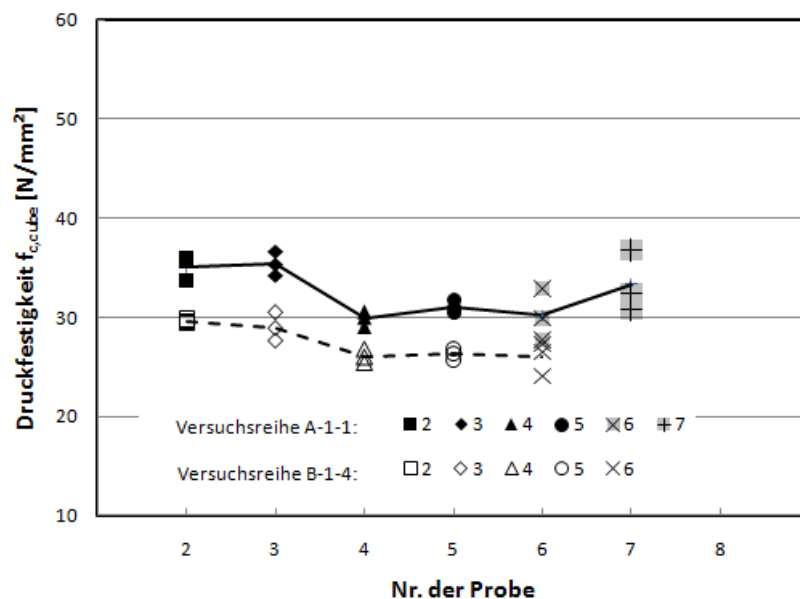


Abbildung 55: Druckfestigkeit – Beton: A-1-1 und B-1-4

In Abbildung 56 sind die Ergebnisse der Elastizitätsmodule der Versuchsserien A-1-1- und B-1-4 dargestellt. Hierbei handelt es sich lediglich um Einzelwerte.

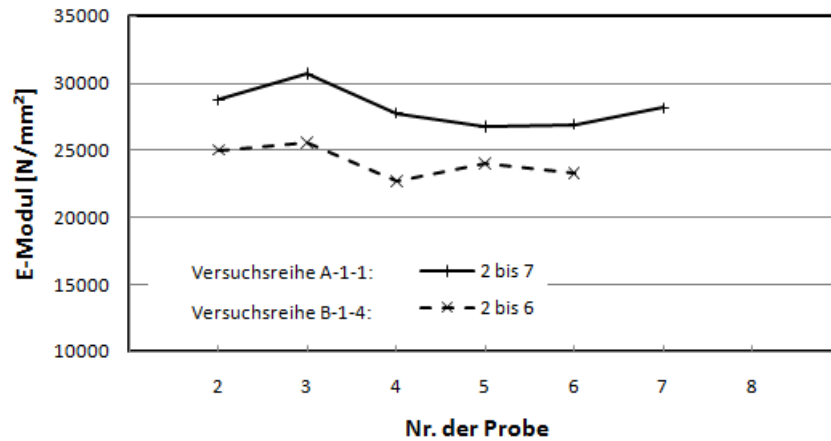


Abbildung 56: E-Modul – Beton: A-1-1 und B-1-4

### 5.5.2. Ergebnisse der Beton 2

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul der Beton 2 vorgestellt. Bei der Beton 2 handelt es sich planmäßig um einen Beton der Festigkeitsklasse C25/30. Die gewonnenen Ergebnisse sind im Einzelnen in tabellarischer Form in Anhang 9 zusammengestellt.

In Abbildung 57 sind die Ergebnisse der zwei Versuchsserien A-2-2 und B-2-5 gegenübergestellt. Tendenziell ist ein Anstieg der beiden Kurven zu erkennen. Dies kann auf eine vermehrte Fließmittel-Zugabe zurückzuführen sein und einer daraus resultierenden besseren Verdichtung des Betons. Alle Proben wurden unabhängig von Fließmittelanteil in gleicher Art und Weise verdichtet.

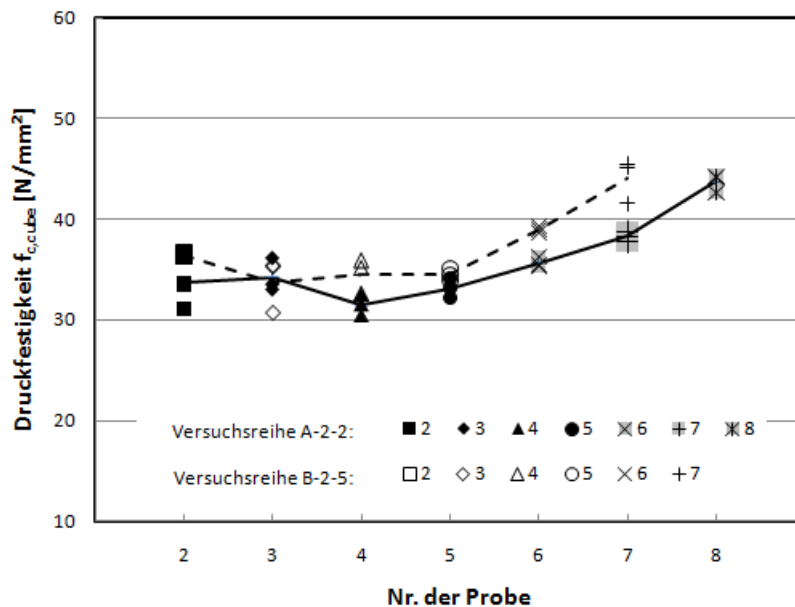


Abbildung 57: Druckfestigkeit – Beton: A-2-2 und B-2-5

In Abbildung 58 sind die Ergebnisse der Elastizitätsmodule der Versuchsserien A-2-2 und B-2-5 dargestellt. Hierbei handelt es sich lediglich um Einzelwerte.

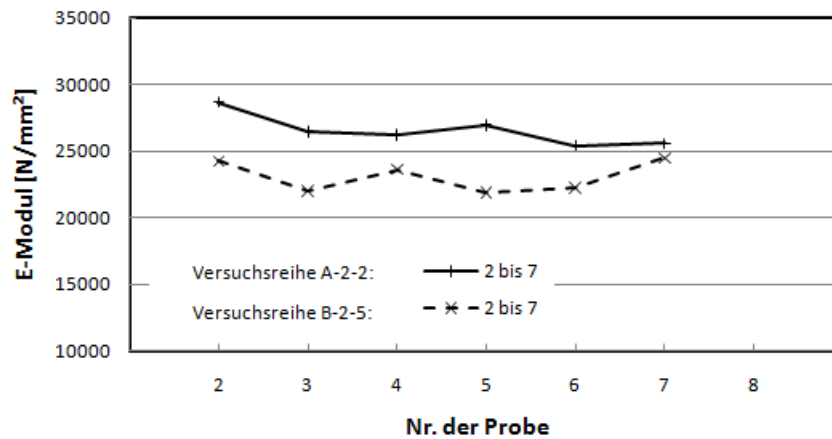


Abbildung 58: E-Modul – Beton: A-2-2 und B-2-5

### 5.5.3. Ergebnisse der Beton 3

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul der Beton 3 vorgestellt. Bei der Beton 3 handelt es sich planmäßig um einen Beton der Festigkeitsklasse C35/45. Die gewonnenen Ergebnisse sind im Einzelnen in tabellarischer Form in Anhang 10 zusammengestellt.

In Abbildung 59 sind die Ergebnisse der zwei Versuchsserien A-3-3 und B-3-6 gegenübergestellt. Tendenziell ist ein Anstieg der beiden Kurven zu erkennen. Dies kann auf eine vermehrte Fließmittel-Zugabe zurückzuführen sein und einer daraus resultierenden besseren Verdichtung des Betons. Alle Proben wurden unabhängig vom Fließmittelanteil in gleicher Art und Weise verdichtet.

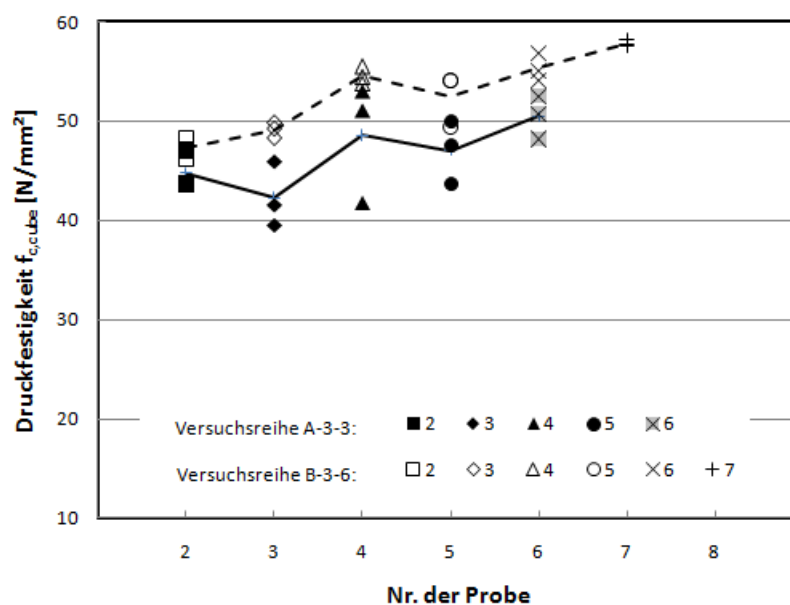


Abbildung 59: Druckfestigkeit – Beton: A-3-3 und B-3-6

In Abbildung 60 sind die Ergebnisse der Elastizitätsmodule der Versuchsserien A-3-3 und B-3-6 dargestellt. Hierbei handelt es sich lediglich um Einzelwerte.

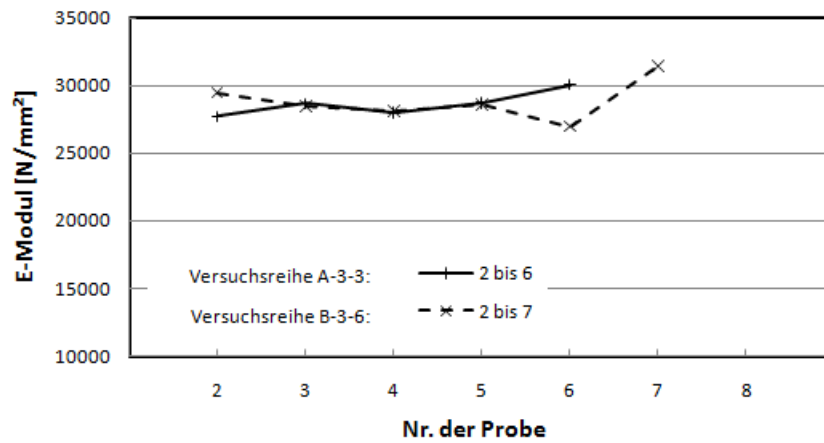


Abbildung 60: E-Modul – Beton: A-3-3 und B-3-6

---

## 6. Schlussfolgerung und Ausblick

---

Im Auftrag der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V., Nimmendorferstr. 124 in 47475 Kamp-Lintfort untersuchte das Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt das System Verifi im Hinblick auf dessen Einsetzbarkeit in der Praxis. Das System Verifi erfasst und dokumentiert die Konsistenz des transportierten Frischbetons im Fahrmischer.

Um das System Verifi bewerten zu können, wurden im Rahmen einer 1. Projektphase sechs Versuchsserien mit zwei Fahrmischern und drei Mischungsrezepturen für Normalbetone untersucht. Zu dem Untersuchungsprogramm gehörten simulierte Transportbetonfahrten über eine Zeitdauer von teilweise mehr als zwei Stunden. Eine Steigerung der Konsistenz des transportierten Frischbetons erfolgte stufenweise mit Wasser oder Fließmittel. Bei jeder Versuchsserie wurden bis zu acht Prüfzyklen mit verschiedenen Frisch- und Festbetonprüfungen durchgeführt. Im Fokus der Untersuchungen stand vorwiegend das Ausbreitmaß. Desweiteren erfolgten Prüfungen des Setz- und Setzfließmaßes sowie rheologische Untersuchungen. Neben den Frischbetonprüfungen wurden Druckfestigkeiten und Elastizitätsmodule ermittelt. Zusätzlich wurden die Angaben des System Verifi über die ermittelten Ausbreitmaße sowie die Zugabe- und Probenahme-Zeitpunkte dokumentiert, um einen direkten Vergleich herstellen zu können. Die Grenzen des Systems liegen in der Limitierung des Messbereichs der Konsistenzermittlung. Bei der Ermittlung des Ausbreitmaßes ist ein Bereich von 320 bis 600 mm möglich, während beim Setzmaß von 0 bis 255 mm gemessen werden kann. Weiterhin ist zu beachten, dass die Mindestlademenge einer Mischtrommel mit einem Fassungsvermögen von 6 bis 8 m<sup>3</sup> nicht weniger als eine Ladung von 3 m<sup>3</sup> Frischbeton aufweisen darf, um sichere Werte ermitteln zu können. Diese Mindestlademenge ist unabhängig von dem maximalen Ladevolumen der Mischtrommel.

Auf Grundlage der ermittelten Daten konnte eine gute Übereinstimmung der Ausbreitmaß-Ergebnisse des Systems Verifi im Vergleich zu den konventionell ermittelten Daten nach DIN EN 12350-5:2009-08 festgestellt werden. Zusätzlich zu der vergleichenden Gegenüberstellung der Ausbreitmaß-Ergebnisse über die Zeit konnte auch über den Zusammenhang des Ausbreitmaßes in Abhängigkeit von der Fließgrenze eine gute Übereinstimmung der Konsistenzwerte festgestellt werden. Abweichungen ergaben sich hauptsächlich bei dem Fahrmischer B, bei dem eine Nachkalibrierung erforderlich wurde. Laut RS Solutions ist dieser Sachverhalt auf das System und dessen Kalibrierung zurückzuführen. Aus diesem Grund ist besonders bei der Kalibrierung des Systems auf unterschiedlichen Fahrmischer-Typen eine besonders genaue Vorgehensweise erforderlich, unter Beachtung der geltenden Normen für Prüfungen von Frischbeton. Darüber hinaus empfiehlt es sich besonders in der Einführungsphase des Systems Verifi die Ausgabewerte durch Ausbreitmaßversuche zu bestätigen. Fahrmischer A lieferte hingegen Werte, die im Vergleich zu den manuell ermittelten Ausbreitmaßen größtenteils gute Übereinstimmungen mit vernachlässigbaren Abweichungen aufwiesen.

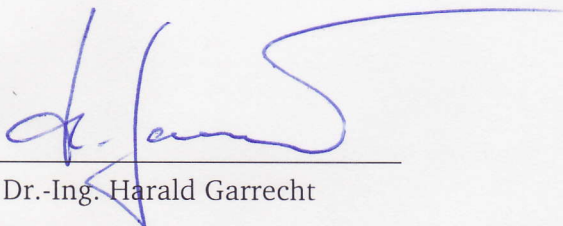
Diese abschließende Bewertung, mit dem Ergebnis der guten Übereinstimmung der Prüfwerte des Systems im Vergleich zu den manuell ermittelten Ausbreitmaßen, erfolgte zunächst visuell über die dargestellten Diagramme. Im Weiteren gab die durchgeführte statistische Auswertung – auf Basis der den Auswertungen zu Grunde liegenden geringen Anzahl von Datenpunkten – quantifizierbare Informationen zu dem System Verifi. Jedoch ist im Hinblick auf den praktischen Einsatz des Systems die Frage zu stellen, inwieweit Kriterien formuliert werden sollten bzw. auch können, denen das System in Untersuchungen gerecht werden muss, und wie Daten ermittelt werden können, die für eine durchzuführende statistische Auswertung ausreichend sind. Dabei sind auch die bekannten praxisrelevanten Faktoren, wie z. B. unterschiedliche Ausbreittische, unterschiedliche Prüfer, Wetterverhältnisse usw. zu berücksichtigen, da besonders diese einen maßgebenden Einfluss auf das Ausbreitmaß haben können. Die Präzisionsdaten nach DIN EN 12350-5:2009-08 verdeutlichen, in welcher Bandbreite zutreffende Ausbreitmaße ermittelt werden können.



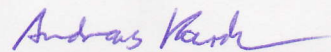
---

Im Rahmen des vorliegenden Berichts wurden insgesamt drei Normalbetone mit zwei unterschiedlichen Fahrern untersucht. In weiterführenden Untersuchungen sollten weitere Betonarten, besonders Betone mit definierten Eigenschaften und Anforderungen, z. B. Hochleistungs-, Stahlfaser- und Sichtbetone im Versuchsprogramm berücksichtigt werden. Ferner wurden die Präzisionsdaten in Form der Wiederhol- bzw. Vergleichbedingungen nach DIN EN 12350-5:2009-08 herangezogen, um auch geringere und größere Ausbreitmaße im Vergleich zu dem Bezugswert von 555 mm zu bewerten. In den Versuchen hat sich gezeigt, dass sich aus den manuell ermittelten Werten geringere Standardabweichungen, als nach DIN EN 12350-5:2009-08, zuverlässig und reproduzierbar ermitteln ließen. Dabei kann angenommen werden, dass sich bei der Ermittlung des Ausbreitmaßes durch das System Verifi geringere Wiederholstandardabweichungen ergeben. Dies kann jedoch nur ein Ringversuch mit unterschiedlichen Fahrern, auf denen das System installiert wurde, bestätigen. Des Weiteren sollten im Vorfeld für eine 2. Projektphase Durchführungskriterien für die statistische Auswertung festgelegt werden und entsprechend das Versuchsprogramm ausgelegt werden.

Bei der Durchführung dieser 1. Phase des Projekts wurden im Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen umfangreiche Erfahrungen gesammelt, sodass großes fachliches und wissenschaftliches Interesse besteht, die angedachten Untersuchungen der 2. Projektphase wiederum wissenschaftlich zu begleiten. Unabhängig hiervon wird eine Fortsetzung der Untersuchungen im Rahmen der 2. Projektphase grundsätzlich empfohlen.



Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht



Dipl.-Ing. (FH) Andreas Karden MBA

---

## 7. Literatur

---

- [1 ] Koehler, E.; Sostaric, J.; Durning, T.: In-Transit Process Control for Improved Ready Mixed Concrete Performance. Reprinted from *Proceedings of the Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting*, Washington DC (USA) 2010
- [2] Krell, J.: Die Konsistenz von Zementleim, Mörtel und Beton und ihre zeitliche Veränderung. Beton-Verlag, Düsseldorf 1985
- [3] Wierig, H.-; Restorff, B.: Konsistenz und Ansteifen des Frischbetons - Vergleichende Untersuchungen unter Labor- und großtechnischen Bedingungen. Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 1998
- [4] Wallevik, J. E.: Relationship between the Bingham parameters and slump, in *Cement and Concrete Research*, 36 (2006), S. 1214-1221
- [5] DIN ISO 5725: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen – Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe, Ausgabe November 1997
- [6] Papula, L.: Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 8., durchgesehene und ergänzte Auflage, Vieweg & Sohn Verlage, Wiesbaden, 2003
- [7] DIN EN 12350: Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß, Ausgabe August 2009
- [8] Haacke, W. / Hirle, M. / Maas, O.: Mathematik für Bauingenieure. 2. , neubearbeitete Auflage, Teubner-Verlag, Stuttgart, 1980
- [9] DIN 53804: Statistische Auswertungen – Teil 1: Kontinuierliche Merkmale, Ausgabe April 2002
- [10] Hartung, J.: Statistik, Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 15., überarbeitet und wesentlich erweiterte Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 2009

---

## Anhang

---

|   |    |
|---|----|
| Anhang 1: Tabellarische Ergebnisse zu den Voruntersuchungen im Labor                    | 64 |
| Anhang 2: Tabellarische Ergebnisse: Ausbreitmaß, Setzmaß und Setzfließmaß A-1-1 / B-1-4 | 65 |
| Anhang 3: Tabellarische Ergebnisse: Ausbreitmaß, Setzmaß und Setzfließmaß A-2-2 / B-2-5 | 67 |
| Anhang 4: Tabellarische Ergebnisse: Ausbreitmaß, Setzmaß und Setzfließmaß A-3-3 / B-3-6 | 71 |
| Anhang 5: Tabellarische Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen: A-1-1 / B-1-4      | 75 |
| Anhang 6: Tabellarische Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen: A-2-2 / B-2-5      | 77 |
| Anhang 7: Tabellarische Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen: B-3-6              | 79 |
| Anhang 8: Tabellarische Ergebnisse: Druckfestigkeit und E-Modul: A-1-1 / B-1-4          | 81 |
| Anhang 9: Tabellarische Ergebnisse: Druckfestigkeit und E-Modul: A-2-2 / B-2-5          | 82 |
| Anhang 10: Tabellarische Ergebnisse: Druckfestigkeit und E-Modul: A-3-3 / B-3-6         | 83 |

## Anhang 1: Tabellarische Ergebnisse zu den Voruntersuchungen im Labor

Tabelle 18: Voruntersuchungen im Labor: Rezeptur 2

| Zeit    | FM-Zugabe | Ausbreitmaß | Konsistenzklasse | Bemerkung                      |
|---------|-----------|-------------|------------------|--------------------------------|
| [hh:mm] | [g]       | [mm]        |                  |                                |
| 00:00   |           |             |                  | Durchmischung beendet, ohne FM |
| 00:04   |           | 400         | F2               |                                |
| 00:09   | 9         |             |                  |                                |
| 00:13   |           | 450         | F3               |                                |
| 00:23   | 9         |             |                  |                                |
| 00:29   |           | 450         | F3               |                                |
| 00:38   |           | 430         | F3               |                                |
| 00:41   | 12        |             |                  |                                |
| 00:45   |           | 470         | F3               |                                |
| 00:55   |           | 450         | F3               |                                |
| 00:57   | 12        |             |                  |                                |
| 01:02   |           | 500         | F3               |                                |
| 01:10   | 16        |             |                  |                                |
| 01:14   |           | 500         |                  |                                |
| 01:20   | 12        |             |                  |                                |
| 01:26   |           | 530         | F4               |                                |
| 01:28   | 15        |             |                  |                                |
| 01:31   |           | 560         | F5               |                                |
| 01:35   |           | 550         | F4               |                                |

Tabelle 19: Voruntersuchungen im Labor: Rezeptur 3

| Zeit    | FM-Zugabe | Ausbreitmaß | Konsistenzklasse | Bemerkung                      |
|---------|-----------|-------------|------------------|--------------------------------|
| [hh:mm] | [g]       | [mm]        |                  |                                |
| 00:00   |           |             |                  | Durchmischung beendet, ohne FM |
| 00:02   |           | 340         | F1/F2            |                                |
| 00:04   | 28        |             |                  |                                |
| 00:10   |           | 470         | F3               |                                |
| 00:22   |           | 410         | F2               |                                |
| 00:39   |           | 400         | F2               |                                |
| 00:41   |           | 400         | F2               |                                |
| 00:43   | 28        |             |                  |                                |
| 00:47   |           | 460         | F3               |                                |
| 00:55   |           | 450         | F3               |                                |
| 01:00   |           | 430         | F3               |                                |
| 01:02   | 28        |             |                  |                                |
| 01:06   |           | 530         | F4               |                                |
| 01:15   |           | 510         | F4               |                                |
| 01:17   | 14        |             |                  |                                |
| 01:21   |           | 560         | F5               | "klebt" stark                  |
| 01:28   |           | 540         | F5               | "klebt"                        |
| 01:31   | 14        |             |                  |                                |
| 01:35   |           | 560         | F5               | "klebt"                        |

## Anhang 2: Tabellarische Ergebnisse: Ausbreitmaß, Setzmaß und Setzfließmaß A-1-1 / B-1-4

Datum: 25.08.2010  
 Fahrmischer: A (Nr.: 280)  
 Rezeptur: 1  
 Untersuchungstag: 1  
 Temperatur (außen) 16 °C  
 Witterung: kühl, trocken, klar, sonnig  
 Ladezeit: 8:45 Uhr

Tabelle 20: zeitlicher Ablauf der Wasserzugabe und Probenahme: A-1-1

| Uhrzeit | Zeit    | Wasser-Zugabe | Probenahme | Entladung | Temperatur |
|---------|---------|---------------|------------|-----------|------------|
| [hh:mm] | [hh:mm] | [l]           |            | [m³]      | [°C]       |
| 08:57   | 00:00   |               | 1.         |           | 21,3       |
| 09:30   | 00:33   |               | 2.         |           | -          |
| 09:48   | 00:51   |               | 3.         |           | 22,0       |
| 10:06   | 01:09   | 80            |            |           |            |
| 10:20   | 01:23   |               | 4.         |           | 22,7       |
| 10:38   | 01:41   |               |            | ca. 2     |            |
| 10:50   | 01:53   |               | 5.         |           | 23,6       |
| 11:01   | 02:04   |               | 6.         |           | 23,5       |

Tabelle 21: Ausbreitmaß: A-1-1

| Nr. der Probe | Zeit    | Ausbreitmaß |          |        | Bemerkung   |
|---------------|---------|-------------|----------|--------|---|
|               |         | Prüfer 1    | Prüfer 2 | Verifi |   |
|               |         | Tisch a     | Tisch b  |        |   |
| [-]           | [hh:mm] | [mm]        | [mm]     | [mm]   |   |
|               | 00:00   |             |          |        |   |
| A-1-1-1       | 00:04   | 420         |          | 415    |   |
| A-1-1-2       | 00:38   |             | 355      | 395    | Bemerkung: Stand der Ausbreittische nicht optimal |
| A-1-1-3       | 00:55   | 365         | 360      | 390    |   |
| A-1-1-4       | 01:27   | 430         | 445      | 445    |   |
| A-1-1-5       | 01:57   | 440         | 450      | 435    |   |
| A-1-1-6       | 02:11   | 420         | 425      | 435    |   |

Tabelle 22: Setzmaß und Setzfließmaß: A-1-1

| Nr. der Probe | Zeit    | Setzmaß  |          | Zeit    | Setzfließmaß |          | Bemerkung                                   |
|---------------|---------|----------|----------|---------|--------------|----------|---|
|               |         | Prüfer 1 | Prüfer 2 |         | Prüfer 1     | Prüfer 2 |   |
| [-]           | [hh:mm] | [mm]     | [mm]     | [hh:mm] | [mm]         | [mm]     |   |
|               | 00:00   |          |          | 00:00   |              |          |   |
| A-1-1-1       | 00:10   | 45       |          |         |              |          |   |
| A-1-1-2       | 00:41   |          | 28       |         |              |          |   |
| A-1-1-3       | 00:58   | 35       | 28       |         |              |          |   |
| A-1-1-4       | 01:29   | 80       | 109      |         |              |          | 2: zu schnell hochgezogen                   |
| A-1-1-5       | 01:59   | 85       | 127      |         |              |          | 2: zu schnell hochgezogen / halb abgeschert |
| A-1-1-6       | 02:13   | 80       | 67       |         |              |          |   |

Datum: 30.08.2010  
 Fahrmischer: B (Nr.: 277)  
 Rezeptur: 1  
 Untersuchungstag: 4  
 Temperatur (außen) 18 °C  
 Witterung: leicht bewölkt, zeitweise sonnig  
 Ladezeit: 9:10 Uhr

Tabelle 23: zeitlicher Ablauf der Wasserzugabe und Probenahme: B-1-4

| Uhrzeit | Zeit    | Wasser-Zugabe | Probenahme | Entladung | Temperatur |
|---------|---------|---------------|------------|-----------|------------|
| [hh:mm] | [hh:mm] | [l]           |            | [m³]      | [°C]       |
| 09:25   | 00:00   |               | 1.         |           | 19,1       |
| 10:08   | 00:43   |               | 2.         |           | 20,5       |
| 10:21   | 00:56   |               | 3.         |           | 20,6       |
| 10:30   | 01:05   | 80            |            |           |            |
| 10:44   | 01:19   |               | 4.         |           | 21,5       |
| 11:03   | 01:38   |               |            | ca. 1     |            |
| 11:09   | 01:44   |               | 5.         |           | 21,6       |
| 11:24   | 01:59   |               | 6.         |           | 21,6       |

Tabelle 24: Ausbreitmaß: B-1-4

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Ausbreitmaß |          |          |        | Bemerkung   |
|------------------|---------|-------------|----------|----------|--------|---|
|                  |         | Prüfer 1    | Prüfer 1 | Prüfer 2 | Verifi |   |
|                  |         | Tisch a     | Tisch b  | Tisch b  |        |   |
| [-]              | [hh:mm] | [mm]        | [mm]     | [mm]     | [mm]   |   |
|                  | 00:00   |             |          |          |        |   |
| B-1-4-1          | 00:03   | 455         |          |          | 465    |   |
| B-1-4-2          | 00:47   | 445         |          | 450      | 420    | Abweichung der<br>Werte des Systems,<br>Grund: Kalibrierung |
|                  | 00:52   |             | 470      |          | 415    |   |
| B-1-4-3          | 00:59   | 460         |          | 465      | 405    |   |
|                  | 01:05   |             | 480      |          | 405    |   |
| B-1-4-4          | 01:21   | 505         |          | 500      | 500    |   |
|                  | 01:27   |             | 505      |          | 490    |   |
| B-1-4-5          | 01:48   | 480         |          | 500      | 485    |   |
|                  | 01:54   |             | 490      |          | 480    |   |
| B-1-4-6          | 02:03   | 480         |          | 505      | 480    |   |
|                  | 02:09   |             | 460      |          | 485    |   |

Tabelle 25: Setzmaß: B-1-4

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Setzmaß  |          |
|------------------|---------|----------|----------|
|                  |         | Prüfer 1 | Prüfer 2 |
| [-]              | [hh:mm] | [mm]     | [mm]     |
|                  | 00:00   |          |          |
| B-1-4-1          | 00:06   | 150      |          |
| B-1-4-2          | 00:49   | 135      | 132      |
| B-1-4-3          | 01:02   | 140      | 144      |
| B-1-4-4          | 01:25   | 175      | 185      |
| B-1-4-5          | 01:48   | 165      | 188      |
| B-1-4-6          | 02:06   | 170      | 179      |

### Anhang 3: Tabellarische Ergebnisse: Ausbreitmaß, Setzmaß und Setzfließmaß A-2-2 / B-2-5

Datum: 26.08.2010  
 Fahrmischer: A (Nr.: 280)  
 Rezeptur: 2  
 Untersuchungstag: 2  
 Temperatur (außen) 22 °C  
 Witterung: sonnig, leicht bewölkt  
 Ladezeit: 9:14 Uhr

Tabelle 26: zeitlicher Ablauf der FM-Zugabe und Probenahme: A-2-2

| Uhrzeit | Zeit    | FM-Zugabe | Probenahme | Entladung | Temperatur |
|---------|---------|-----------|------------|-----------|------------|
| [hh:mm] | [hh:mm] | [kg]      |            | [m³]      | [°C]       |
| 09:29   | 00:00   |           | 1.         |           | 22,6       |
| 10:07   | 00:38   |           | 2.         |           | 23,7       |
| 10:12   | 00:43   | 2,2       |            |           |            |
| 10:26   | 00:57   |           | 3.         |           | 24,7       |
| 10:39   | 01:10   |           | 4.         |           | 25,2       |
| 10:55   | 01:26   | 3,0       |            |           |            |
| 11:13   | 01:44   |           | 5.         |           | 26,0       |
| 11:22   | 01:53   |           |            | ca. 1     |            |
| 11:33   | 02:04   |           | 6.         |           | 26,2       |
| 11:34   | 02:05   | 3,0       |            |           |            |
| 11:50   | 02:21   |           | 7.         |           | 27,3       |
| 11:53   | 02:24   | 3,5       |            |           |            |
| 12:07   | 02:38   |           | 8.         |           | 27,7       |

Tabelle 27: Ausbreitmaß: A-2-2

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Ausbreitmaß |            |        | Bemerkung   |
|------------------|---------|-------------|------------|--------|---|
|                  |         | Prüfer 1    | Prüfer 2   | Verifi |   |
|                  |         | Tisch a     | Tisch b    |        |   |
| [-]              | [hh:mm] | [mm]        | [mm]       | [mm]   |   |
|                  | 00:00   |             |            |        |   |
| A-2-2-1          | 00:03   | 405         |            | 410    |   |
| A-2-2-2          | 00:41   | 410         | 415        | 400    |   |
| A-2-2-3          | 01:01   | <b>515</b>  | <b>530</b> | 420    | Bemerkung: FM über Schnecke in Mischtrommel zugegeben |
| A-2-2-4          | 01:14   | <b>455</b>  | <b>455</b> | 410    |   |
| A-2-2-5          | 01:48   | 455         | 470        | 450    |   |
| A-2-2-6          | 02:07   | 455         | 455        | 450    |   |
| A-2-2-7          | 02:25   | 500         | 495        | 510    |   |
| A-2-2-8          | 02:42   | 605         | 630        | 575    |   |

Tabelle 28: Setzmaß und Setzfließmaß: A-2-2

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Setzmaß    |            | Zeit    | Setzfließmaß |          | Bemerkung                                     |
|------------------|---------|------------|------------|---------|--------------|----------|---|
|                  |         | Prüfer 1   | Prüfer 2   |         | Prüfer 1     | Prüfer 2 |   |
| [ - ]            | [hh:mm] | [mm]       | [mm]       | [hh:mm] | [mm]         | [mm]     |   |
|                  | 00:00   |            |            | 00:00   |              |          |   |
| A-2-2-1          | 00:07   | 65         |            |         |              |          |   |
| A-2-2-2          | 00:44   | 40         | 28         |         |              |          |   |
| A-2-2-3          | 01:04   | <b>160</b> | <b>156</b> |         |              |          | FM über Schnecke in Mischtrommel<br>zugegeben |
| A-2-2-4          | 01:16   | <b>80</b>  | <b>88</b>  |         |              |          | 2: schnell gezogen                            |
| A-2-2-5          | 01:51   | 95         | 116        |         |              |          |   |
| A-2-2-6          | 02:09   | 90         | 96         |         |              |          |   |
| A-2-2-7          | 02:28   | 170        | 194        |         |              |          |   |
| A-2-2-8          | 02:45   | 240        | 250        |         |              |          |   |
|                  |         |            |            | 02:49   | 495          | 480      | großer Ø des Setztrichters unten              |



Datum: 31.08.2010  
 Fahrmischer: B (Nr.: 277)  
 Rezeptur: 2  
 Untersuchungstag: 5  
 Temperatur (außen) 16 °C  
 Witterung: leicht bewölkt bis sonnig klar  
 Ladezeit: 8:55 Uhr

Tabelle 29: zeitlicher Ablauf der FM-Zugabe und Probenahme: B-2-5

| Uhrzeit | Zeit    | FM-Zugabe | Probenahme | Entladung | Temperatur |
|---------|---------|-----------|------------|-----------|------------|
| [hh:mm] | [hh:mm] | [kg]      |            | [m³]      | [°C]       |
| 09:14   | 00:00   |           | 1.         |           | 21,8       |
| 10:06   | 00:52   |           | 2.         |           | 22,6       |
| 10:10   | 00:56   | 2,2       |            |           |            |
| 10:26   | 01:12   |           | 3.         |           | 23,8       |
| 10:37   | 01:23   | 3         |            |           |            |
| 10:53   | 01:39   |           | 4.         |           | 24,2       |
| 11:03   | 01:49   |           |            | ca. 1     |            |
| 11:14   | 02:00   |           | 5.         |           | 23,6       |
| 11:18   | 02:04   | 3         |            |           |            |
| 11:33   | 02:19   |           | 6.         |           | 24,2       |
| 11:39   | 02:25   | 3,5       |            |           |            |
| 11:54   | 02:40   |           | 7.         |           | 24,9       |
| 12:00   | 02:46   | 2,5       |            |           |            |
| 12:15   | 03:01   |           | 8.         |           | 25,3       |

Tabelle 30: Ausbreitmaß: B-2-5

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Ausbreitmaß |          |          |        | Bemerkung  |
|------------------|---------|-------------|----------|----------|--------|--|
|                  |         | Prüfer 1    | Prüfer 1 | Prüfer 2 | Verifi |  |
|                  |         | Tisch a     | Tisch b  | Tisch b  |        |  |
| [-]              | [hh:mm] | [mm]        | [mm]     | [mm]     | [mm]   |  |
|                  | 00:00   |             |          |          |        |  |
| B-2-5-1          | 00:03   | 450         |          |          | 400    | Abweichung der<br>Werte des<br>Systems, Grund:<br>Kalibrierung |
|                  | 00:09   | 455*        |          |          | 395    |  |
| B-2-5-2          | 00:58   | 415         |          | 415      | 385    |  |
|                  | 01:03   |             | 395      |          | 385    |  |
| B-2-5-3          | 01:17   | 445         |          | 435      | 405    |  |
|                  | 01:22   |             | 450      |          | 400    |  |
| B-2-5-4          | 01:43   | 480         |          | 460      | 425    |  |
|                  | 01:49   |             | 475      |          | 430    |  |
| B-2-5-5          | 02:05   | 460         |          | 460      | 420    |  |
|                  | 02:11   |             | 465      |          | 435    |  |
| B-2-5-6          | 02:24   | 510         |          | 510      | 485    |  |
|                  | 02:30   |             | 520      |          | 490    |  |
| B-2-5-7          | 02:45   | 595         |          | 615      | 565    |  |
|                  | 02:51   |             | 600      |          | 560    |  |
| B-2-5-8          | 03:06   | > 700       |          | > 700    | 600    |  |

\* Prüfung wurde von einem Mitarbeit von Grace durchgeführt

Tabelle 31: Setzmaß und Setzfließmaß: B-2-5

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Setzmaß  |          | Zeit    | Setzfließmaß |          | Bemerkung                        |
|------------------|---------|----------|----------|---------|--------------|----------|----------------------------------|
|                  |         | Prüfer 1 | Prüfer 2 |         | Prüfer 1     | Prüfer 2 |                                  |
| [-]              | [hh:mm] | [mm]     | [mm]     | [hh:mm] | [mm]         | [mm]     |                                  |
|                  | 00:00   |          |          | 00:00   |              |          |                                  |
| B-2-5-1          | 00:06   | 80       |          |         |              |          |                                  |
| B-2-5-2          | 01:01   | 60       | 58       |         |              |          |                                  |
| B-2-5-3          | 01:19   | 80       | 79       |         |              |          |                                  |
| B-2-5-4          | 01:46   | 105      | 127      |         |              |          |                                  |
| B-2-5-5          | 02:08   | 93       | 86       |         |              |          |                                  |
| B-2-5-6          | 02:29   | 170      | 175      |         |              |          |                                  |
| B-2-5-7          | 02:48   | 235      | 247      |         |              |          |                                  |
| B-2-5-8          |         |          |          | 03:08   | 640          | 655      | großer Ø des Setztrichters unten |
| B-2-5-9          |         |          |          | 03:22   | 700          | 745      | großer Ø des Setztrichters unten |
| B-2-5-10         |         |          |          | 03:25   | 660          |          | großer Ø des Setztrichters oben  |

## Anhang 4: Tabellarische Ergebnisse: Ausbreitmaß, Setzmaß und Setzfließmaß A-3-3 / B-3-6

Datum: 27.08.2010  
 Fahrmischer: A (Nr.: 280)  
 Rezeptur: 3  
 Untersuchungstag: 3  
 Temperatur (außen) 20 °C  
 Witterung: bewölkt  
 Ladezeit: 8:55 Uhr

Tabelle 32: zeitlicher Ablauf der FM-Zugabe und Probenahme: A-3-3

| Uhrzeit | Zeit    | FM-Zugabe | Probenahme | Entladung         | Temperatur |
|---------|---------|-----------|------------|-------------------|------------|
| [hh:mm] | [hh:mm] | [kg]      |            | [m <sup>3</sup> ] | [°C]       |
| 08:56   |         | 3,0       |            |                   |            |
| 09:22   | 00:00   |           | 1.         |                   | 24,2       |
| 09:58   | 00:36   |           | 2.         |                   | 25,4       |
| 10:11   | 00:49   | 4,0       |            |                   |            |
| 10:27   | 01:05   |           | 3.         |                   | 26,4       |
| 10:33   | 01:11   | 4,0       |            |                   |            |
| 10:48   | 01:26   |           | 4.         |                   | 26,9       |
| 10:53   | 01:31   |           |            | ca. 1             |            |
| 11:08   | 01:46   |           | 5.         |                   | 26,3       |
| 11:12   | 01:50   | 1,5       |            |                   |            |
| 11:28   | 02:06   |           | 6.         |                   | 26,9       |

Tabelle 33: Ausbreitmaß: A-3-3

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Ausbreitmaß         |                     |                     |        |
|------------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|--------|
|                  |         | Prüfer 1<br>Tisch a | Prüfer 1<br>Tisch b | Prüfer 2<br>Tisch b | Verifi |
| [ - ]            | [hh:mm] | [mm]                | [mm]                | [mm]                | [mm]   |
|                  | 00:00   |                     |                     |                     |        |
| A-3-3-1          | 00:04   | 425                 |                     |                     | 415    |
| A-3-3-2          | 00:41   | 412,5               |                     | 425                 | 400    |
| A-3-3-3          | 01:09   | 455                 |                     | 455                 | 475    |
|                  | 01:15   |                     | 470                 |                     | 480    |
| A-3-3-4          | 01:31   | 550                 |                     | 575                 | 570    |
|                  | 01:37   |                     | 575                 |                     | 570    |
| A-3-3-5          | 01:51   | 540                 |                     | 585                 | 565    |
|                  | 01:58   |                     | 550                 |                     | 570    |
| A-3-3-6          | 02:10   | 600                 |                     | 605                 | 595    |
|                  | 02:17   |                     | 595                 |                     | 600    |

Tabelle 34: Setzmaß und Setzfließmaß: A-3-3

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Setzmaß  |          | Zeit    | Setzfließmaß |          | Bemerkung                        |
|------------------|---------|----------|----------|---------|--------------|----------|----------------------------------|
|                  |         | Prüfer 1 | Prüfer 2 |         | Prüfer 1     | Prüfer 2 |                                  |
| [-]              | [hh:mm] | [mm]     | [mm]     | [hh:mm] | [mm]         | [mm]     |                                  |
|                  | 00:00   |          |          | 00:00   |              |          |                                  |
| A-3-3-1          | 00:06   | 75       |          |         |              |          |                                  |
| A-3-3-2          | 00:44   | 55       | 45       |         |              |          |                                  |
| A-3-3-3          | 01:12   | 120      | 142      |         |              |          |                                  |
| A-3-3-4          | 01:34   | 225      | 242      |         |              |          |                                  |
|                  |         |          |          | 01:38   | 420          | 475      | großer Ø des Setztrichters unten |
| A-3-3-5          | 01:54   | 220      |          | 01:54   |              | 415      | großer Ø des Setztrichters oben  |
| A-3-3-6          | 02:14   | 240      | 251      |         |              |          |                                  |
|                  |         |          |          | 02:20   |              | 445      |                                  |

Datum: 01.09.2010  
 Fahrmischer: B (Nr.: 277)  
 Rezeptur: 3  
 Untersuchungstag: 6  
 Temperatur (außen) 14 °C  
 Witterung: bewölkt, trocken  
 Ladezeit: 8:50 Uhr

Tabelle 35: zeitlicher Ablauf der FM-Zugabe und Probenahme: B-3-6

| Uhrzeit | Zeit    | FM-Zugabe | Probenahme | Entladung | Temperatur |
|---------|---------|-----------|------------|-----------|------------|
| [hh:mm] | [hh:mm] | [kg]      |            | [m³]      | [°C]       |
| 08:52   |         | 3,0       |            |           |            |
| 09:12   | 00:00   |           | 1.         |           | 20,5       |
| 09:48   | 00:36   |           | 2.         |           | 20,2       |
| 10:00   | 00:48   | 4,0       |            |           |            |
| 10:17   | 01:05   |           | 3.         |           | 22,2       |
| 10:23   | 01:11   | 4,0       |            |           |            |
| 10:38   | 01:26   |           | 4.         |           | 22,7       |
| 10:44   | 01:32   |           |            | ca. 1     |            |
| 10:57   | 01:45   |           | 5.         |           | 22,5       |
| 11:02   | 01:50   | 1,5       |            |           |            |
| 11:17   | 02:05   |           | 6.         |           | 22,8       |
| 11:25   | 02:13   | 2,0       |            |           |            |
| 11:40   | 02:28   |           | 7.         |           | 22,6       |

Tabelle 36: Ausbreitmaß: B-3-6

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Ausbreitmaß |          |          |        | Bemerkung   |
|------------------|---------|-------------|----------|----------|--------|---|
|                  |         | Prüfer 1    | Prüfer 1 | Prüfer 2 | Verifi |   |
|                  |         | Tisch a     | Tisch b  | Tisch b  |        |   |
| [-]              | [hh:mm] | [mm]        | [mm]     | [mm]     | [mm]   |   |
|                  | 00:00   |             |          |          |        |   |
| B-3-6-1          | 00:04   | 460         |          |          | 420    | Abweichung der<br>Werte des<br>Systems,<br>Grund:<br>Kalibrierung |
|                  | 00:09   | 460*        |          |          | 420    |   |
| B-3-6-2          | 00:41   | 435         |          | 455      | 395    |   |
|                  | 00:47   |             | 435      |          | 400    |   |
| B-3-6-3          | 01:09   | 505         |          | 490      | 480    |   |
|                  | 01:15   |             | 510      |          | 480    |   |
| B-3-6-4          | 01:32   | 605         |          | 630      | 575    |   |
|                  | 01:39   |             | 640      |          | 565    |   |
| B-3-6-5          | 01:50   | 555         |          | 590      | 570    |   |
|                  | 01:57   |             | 595      |          | 570    |   |
| B-3-6-6          | 02:12   | 645         |          | > 700    | 600    |   |
| B-3-6-7          | 02:31   | > 700       |          | > 700    | 600    |   |

\* Prüfung wurde von einem Mitarbeiter von Grace durchgeführt

Tabelle 37: Setzmaß und Setzfließmaß: B-3-6

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Setzmaß  |          | Zeit    | Setzfließmaß |          | Bemerkung                        |
|------------------|---------|----------|----------|---------|--------------|----------|----------------------------------|
|                  |         | Prüfer 1 | Prüfer 2 |         | Prüfer 1     | Prüfer 2 |                                  |
| [-]              | [hh:mm] | [mm]     | [mm]     | [hh:mm] | [mm]         | [mm]     |                                  |
|                  | 00:00   |          |          | 00:00   |              |          |                                  |
| B-3-6-1          | 00:07   | 135      |          |         |              |          |                                  |
| B-3-6-2          | 00:43   | 100      | 100      |         |              |          |                                  |
| B-3-6-3          | 01:12   | 125      | 175      |         |              |          |                                  |
| B-3-6-4          | 01:35   | 240      | 252      |         |              |          |                                  |
|                  |         |          |          | 01:39   |              | 465      | großer Ø des Setztrichters unten |
| B-3-6-5          | 01:53   | 235      | 240      |         |              |          |                                  |
|                  |         |          |          | 01:57   |              | 450      | großer Ø des Setztrichters unten |
| B-3-6-6          |         |          |          | 02:13   | 570          | 580      | großer Ø des Setztrichters unten |
| B-3-6-7          |         |          |          | 02:34   | 740          |          | großer Ø des Setztrichters unten |

## Anhang 5: Tabellarische Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen: A-1-1 / B-1-4

Tabelle 38: Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen von A-1-1

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Fließkurve         |                 |                |                           |                          |       |
|------------------|---------|--------------------|-----------------|----------------|---------------------------|--------------------------|-------|
|                  |         | Relative Parameter |                 |                | Bingham Parameter         |                          |       |
|                  |         | Dreh-<br>moment    | Dreh-<br>impuls | R <sup>2</sup> | dynamische<br>Fließgrenze | plastische<br>Viskosität | mse   |
| [-]              | [hh:mm] | [Nm]               | [Nms]           |                | [N/m <sup>2</sup> ]       | [Ns/m <sup>2</sup> ]     |       |
| A-1-1-1          | 00:00   |                    |                 |                |                           |                          |       |
| A-1-1-2          | 00:38   | 6,01               | 2,62            | 0,84           | 1563,2                    | 22,0                     | 0,172 |
| A-1-1-3          | 00:56   | 6,57               | 1,70            | 0,62           | 1795,8                    | 11,4                     | 0,304 |
| A-1-1-4          | 01:27   | 3,25               | 1,76            | 0,77           | 824,8                     | 16,5                     | 0,194 |
| A-1-1-5          | 01:57   | 3,76               | 2,24            | 0,91           | 974,5                     | 18,5                     | 0,097 |
| A-1-1-6          | 02:11   | 4,16               | 2,52            | 0,93           | 1030,9                    | 25,6                     | 0,162 |

R<sup>2</sup> Bestimmtheitsmaß  
mse mittlere quadratische Abweichung

Tabelle 39: Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen von B-1-4

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Fließkurve         |                 |                |                           |                          |       | konstante Drehzahl      |                          |
|------------------|---------|--------------------|-----------------|----------------|---------------------------|--------------------------|-------|-------------------------|--------------------------|
|                  |         | Relative Parameter |                 |                | Bingham Parameter         |                          |       | max.<br>Dreh-<br>moment | statische<br>Fließgrenze |
|                  |         | Dreh-<br>moment    | Dreh-<br>impuls | R <sup>2</sup> | dynamische<br>Fließgrenze | plastische<br>Viskosität | mse   |                         |                          |
| [-]              | [hh:mm] | [Nm]               | [Nms]           |                | [N/m <sup>2</sup> ]       | [Ns/m <sup>2</sup> ]     |       | [Nm]                    | [N/m <sup>2</sup> ]      |
| B-1-4-1          | 00:00   |                    |                 |                |                           |                          |       |                         |                          |
| B-1-4-2          | 00:47   | 2,44               | 2,83            | 0,95           | 568,2                     | 33,3                     | 0,068 | 3,58                    | 835,6                    |
| B-1-4-3          | 01:00   | 2,58               | 2,14            | 0,94           | 637,0                     | 21,1                     | 0,074 | 3,42                    | 796,9                    |
| B-1-4-4          | 01:22   | 1,56               | 1,57            | 0,95           | 380,6                     | 16,2                     | 0,057 | 1,90                    | 443,1                    |
| B-1-4-5          | 01:47   | 1,84               | 1,53            | 0,96           | 461,3                     | 14,5                     | 0,057 | 2,07                    | 481,6                    |
| B-1-4-6          | 02:03   | 2,05               | 1,28            | 0,91           | 517,9                     | 11,7                     | 0,110 | 2,45                    | 571,1                    |

R<sup>2</sup> Bestimmtheitsmaß  
mse mittlere quadratische Abweichung

Tabelle 40: Messwerte der rheologischen Untersuchungen A-1-1 und B-1-4

| Proben-Nr. | Zeit    | Drehzahl           | Drehmoment |
|------------|---------|--------------------|------------|
| [-]        | [hh:mm] | [s <sup>-1</sup> ] | [Nm]       |
| A-1-1-1    | 00:00   |                    |            |
| A-1-1-2    | 00:38   | 0,500              | 7,541      |
|            |         | 0,425              | 7,199      |
|            |         | 0,349              | 6,660      |
|            |         | 0,275              | 6,590      |
|            |         | 0,200              | 6,435      |
|            |         | 0,125              | 6,313      |
| 0,050      | 6,371   |                    |            |
| A-1-1-3    | 00:56   | 0,500              | 7,523      |
|            |         | 0,425              | 7,325      |
|            |         | 0,349              | 7,258      |
|            |         | 0,275              | 6,804      |
|            |         | 0,199              | 6,786      |
|            |         | 0,125              | 6,535      |
| 0,050      | 7,013   |                    |            |
| A-1-1-4    | 01:27   | 0,500              | 4,237      |
|            |         | 0,425              | 4,062      |
|            |         | 0,349              | 3,785      |
|            |         | 0,275              | 3,692      |
|            |         | 0,200              | 3,470      |
|            |         | 0,125              | 3,300      |
| 0,050      | 3,618   |                    |            |
| A-1-1-5    | 01:57   | 0,500              | 4,986      |
|            |         | 0,425              | 4,734      |
|            |         | 0,350              | 4,509      |
|            |         | 0,275              | 4,325      |
|            |         | 0,200              | 4,028      |
|            |         | 0,125              | 4,018      |
| 0,050      | 4,054   |                    |            |
| A-1-1-6    | 02:11   | 0,500              | 5,574      |
|            |         | 0,425              | 5,357      |
|            |         | 0,350              | 4,876      |
|            |         | 0,275              | 4,694      |
|            |         | 0,200              | 4,465      |
|            |         | 0,125              | 4,458      |
| 0,050      | 4,546   |                    |            |
| B-1-4-1    | 00:00   |                    |            |
| B-1-4-2    | 00:47   | 0,501              | 3,758      |
|            |         | 0,437              | 3,885      |
|            |         | 0,351              | 3,348      |
|            |         | 0,275              | 3,194      |
|            |         | 0,200              | 3,006      |
|            |         | 0,125              | 2,724      |
| 0,050      | 2,648   |                    |            |
| B-1-4-3    | 01:00   | 0,501              | 3,742      |
|            |         | 0,426              | 3,476      |
|            |         | 0,349              | 3,192      |
|            |         | 0,275              | 3,212      |
|            |         | 0,200              | 2,990      |
|            |         | 0,125              | 2,766      |
| 0,050      | 2,784   |                    |            |
| B-1-4-4    | 01:22   | 0,500              | 2,322      |
|            |         | 0,425              | 2,315      |
|            |         | 0,350              | 2,077      |
|            |         | 0,275              | 1,995      |
|            |         | 0,200              | 1,828      |
|            |         | 0,125              | 1,703      |
| 0,050      | 1,715   |                    |            |
| B-1-4-5    | 01:47   | 0,500              | 2,653      |
|            |         | 0,425              | 2,501      |
|            |         | 0,350              | 2,395      |
|            |         | 0,275              | 2,177      |
|            |         | 0,200              | 2,133      |
|            |         | 0,125              | 2,006      |
| 0,050      | 1,996   |                    |            |
| B-1-4-6    | 02:03   | 0,499              | 2,775      |
|            |         | 0,424              | 2,554      |
|            |         | 0,350              | 2,439      |
|            |         | 0,275              | 2,374      |
|            |         | 0,200              | 2,225      |
|            |         | 0,125              | 2,273      |
| 0,050      | 2,140   |                    |            |



## Anhang 6: Tabellarische Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen: A-2-2 / B-2-5

Tabelle 41: Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen von A-2-2

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Fließkurve         |                 |                |                           |                          |       |
|------------------|---------|--------------------|-----------------|----------------|---------------------------|--------------------------|-------|
|                  |         | Relative Parameter |                 |                | Bingham Parameter         |                          |       |
|                  |         | Dreh-<br>moment    | Dreh-<br>impuls | R <sup>2</sup> | dynamische<br>Fließgrenze | plastische<br>Viskosität | mse   |
| [-]              | [hh:mm] | [Nm]               | [Nms]           |                | [N/m <sup>2</sup> ]       | [Ns/m <sup>2</sup> ]     |       |
| A-2-2-1          | 00:00   |                    |                 |                |                           |                          |       |
| A-2-2-2          | 00:42   | 6,17               | 1,7             | 0,65           | 1637,9                    | 14,1                     | 0,319 |
| A-2-2-3          | 01:01   | 3,41               | 1,35            | 0,75           | 872,6                     | 12,9                     | 0,240 |
| A-2-2-4          | 01:14   | 4,82               | 1,27            | 0,64           | 1294,5                    | 9,8                      | 0,309 |
| A-2-2-5          | 01:49   | 4,01               | 0,93            | 0,67           | 1113,3                    | 5,5                      | 0,269 |
| A-2-2-6          | 02:08   | 4,23               | 0,67            | 0,50           | 1166,7                    | 4,9                      | 0,428 |
| A-2-2-7          | 02:26   | 2,46               | 1,14            | 0,98           | 679,7                     | 6,3                      | 0,034 |
| A-2-2-8          | 02:42   | 0,76               | 1,17            | 0,99           | 186,2                     | 12,5                     | 0,000 |

R<sup>2</sup> Bestimmtheitsmaß  
mse mittlere quadratische Abweichung

Tabelle 42: Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen von B-2-5

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Fließkurve         |                 |                |                           |                          |       | konstante Drehzahl      |                          |
|------------------|---------|--------------------|-----------------|----------------|---------------------------|--------------------------|-------|-------------------------|--------------------------|
|                  |         | Relative Parameter |                 |                | Bingham Parameter         |                          |       | max.<br>Dreh-<br>moment | statische<br>Fließgrenze |
|                  |         | Dreh-<br>moment    | Dreh-<br>impuls | R <sup>2</sup> | dynamische<br>Fließgrenze | plastische<br>Viskosität | mse   |                         |                          |
| [-]              | [hh:mm] | [Nm]               | [Nms]           |                | [N/m <sup>2</sup> ]       | [Ns/m <sup>2</sup> ]     |       | [Nm]                    | [N/m <sup>2</sup> ]      |
| B-2-5-1          | 00:00   |                    |                 |                |                           |                          |       |                         |                          |
| B-2-5-2          | 00:58   | 5,45               | 1,61            | 0,60           | 1404,4                    | 16,2                     | 0,360 | 6,55                    | 1527,2                   |
| B-2-5-3          | 01:17   | 4,44               | 0,85            | 0,50           | 1199,3                    | 7,1                      | 0,418 | 5,45                    | 1269,2                   |
| B-2-5-4          | 01:43   | 3,55               | 0,76            | 0,69           | 987,7                     | 4,3                      | 0,269 | 4,40                    | 1024,7                   |
| B-2-5-5          | 02:05   | 4,03               | 0,60            | 0,39           | 1069,3                    | 6,6                      | 0,525 | 5,14                    | 1197,4                   |
| B-2-5-6          | 02:25   | 2,30               | 0,81            | 0,92           | 640,2                     | 4,2                      | 0,085 | 2,82                    | 657,3                    |
| B-2-5-7          | 02:46   | 0,75               | 0,89            | 0,99           | 179,4                     | 9,6                      | 0,024 | 1,05                    | 245,7                    |
| B-2-5-8          | 03:05   | 0,40               | 0,62            | 0,96           | 100,8                     | 6,1                      | 0,004 | 0,52                    | 121,4                    |

R<sup>2</sup> Bestimmtheitsmaß  
mse mittlere quadratische Abweichung

Tabelle 43: Messwerte der rheologischen Untersuchungen A-2-2 und B-2-5

| Proben-Nr. | Zeit    | Drehzahl           | Drehmoment | Proben-Nr. | Zeit    | Drehzahl           | Drehmoment |
|------------|---------|--------------------|------------|------------|---------|--------------------|------------|
| [-]        | [hh:mm] | [s <sup>-1</sup> ] | [Nm]       | [-]        | [hh:mm] | [s <sup>-1</sup> ] | [Nm]       |
| A-2-2-1    | 00:00   |                    |            | B-2-5-1    | 00:00   |                    |            |
| A-2-2-2    | 00:42   | 0,501              | 7,250      | B-2-5-2    | 00:58   | 0,500              | 6,487      |
|            |         | 0,435              | 6,868      |            |         | 0,441              | 6,195      |
|            |         | 0,350              | 6,626      |            |         | 0,350              | 5,830      |
|            |         | 0,274              | 6,593      |            |         | 0,275              | 5,725      |
|            |         | 0,200              | 6,306      |            |         | 0,200              | 5,673      |
|            |         | 0,125              | 6,221      |            |         | 0,125              | 5,474      |
|            |         | 0,050              | 6,587      |            |         | 0,050              | 5,878      |
| A-2-2-3    | 01:01   | 0,500              | 4,260      | B-2-5-3    | 01:17   | 0,499              | 4,975      |
|            |         | 0,425              | 3,988      |            |         | 0,425              | 4,853      |
|            |         | 0,350              | 3,783      |            |         | 0,350              | 4,684      |
|            |         | 0,275              | 3,653      |            |         | 0,275              | 4,588      |
|            |         | 0,200              | 3,573      |            |         | 0,200              | 4,415      |
|            |         | 0,125              | 3,599      |            |         | 0,125              | 4,494      |
| A-2-2-4    | 01:14   | 0,500              | 5,562      | B-2-5-4    | 01:43   | 0,500              | 3,986      |
|            |         | 0,425              | 5,461      |            |         | 0,425              | 3,923      |
|            |         | 0,350              | 5,159      |            |         | 0,350              | 3,752      |
|            |         | 0,274              | 5,057      |            |         | 0,274              | 3,702      |
|            |         | 0,201              | 4,916      |            |         | 0,200              | 3,628      |
|            |         | 0,125              | 4,878      |            |         | 0,125              | 3,576      |
| A-2-2-5    | 01:49   | 0,500              | 5,140      | B-2-5-5    | 02:05   | 0,500              | 3,725      |
|            |         | 0,426              | 4,552      |            |         | 0,499              | 4,443      |
|            |         | 0,350              | 4,461      |            |         | 0,425              | 4,284      |
|            |         | 0,275              | 4,285      |            |         | 0,350              | 4,196      |
|            |         | 0,200              | 4,205      |            |         | 0,275              | 4,112      |
|            |         | 0,125              | 4,026      |            |         | 0,200              | 4,010      |
| A-2-2-6    | 02:08   | 0,125              | 4,127      | B-2-5-6    | 02:25   | 0,125              | 4,030      |
|            |         | 0,050              | 4,209      |            |         | 0,050              | 4,258      |
|            |         | 0,500              | 4,660      |            |         | 0,501              | 2,734      |
|            |         | 0,424              | 4,519      |            |         | 0,425              | 2,651      |
|            |         | 0,350              | 4,414      |            |         | 0,350              | 2,557      |
|            |         | 0,275              | 4,390      |            |         | 0,275              | 2,497      |
| A-2-2-7    | 02:26   | 0,200              | 4,245      | B-2-5-7    | 02:46   | 0,200              | 2,442      |
|            |         | 0,125              | 4,215      |            |         | 0,125              | 2,354      |
|            |         | 0,050              | 4,451      |            |         | 0,050              | 2,402      |
|            |         | 0,500              | 3,036      |            |         | 0,500              | 1,205      |
|            |         | 0,424              | 2,953      |            |         | 0,425              | 1,136      |
|            |         | 0,351              | 2,863      |            |         | 0,350              | 1,036      |
| A-2-2-8    | 02:42   | 0,275              | 2,758      | B-2-5-8    | 03:05   | 0,275              | 0,985      |
|            |         | 0,200              | 2,643      |            |         | 0,200              | 0,918      |
|            |         | 0,125              | 2,590      |            |         | 0,125              | 0,868      |
|            |         | 0,050              | 2,556      |            |         | 0,050              | 0,800      |
|            |         | 0,500              | 1,328      |            |         | 0,499              | 0,690      |
|            |         | 0,425              | 1,263      |            |         | 0,425              | 0,657      |
| A-2-2-8    | 02:42   | 0,350              | 1,183      | B-2-5-8    | 03:05   | 0,350              | 0,625      |
|            |         | 0,274              | 1,103      |            |         | 0,274              | 0,586      |
|            |         | 0,199              | 1,015      |            |         | 0,200              | 0,539      |
|            |         | 0,125              | 0,919      |            |         | 0,125              | 0,491      |
|            |         | 0,050              | 0,792      |            |         | 0,050              | 0,394      |

## Anhang 7: Tabellarische Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen: B-3-6

Tabelle 44: Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen von B-3-6

| Nr.<br>der Probe | Zeit    | Fließkurve         |                 |                |                           |                          |       | konstante Drehzahl      |                          |
|------------------|---------|--------------------|-----------------|----------------|---------------------------|--------------------------|-------|-------------------------|--------------------------|
|                  |         | Relative Parameter |                 |                | Bingham Parameter         |                          |       | max.<br>Dreh-<br>moment | statische<br>Fließgrenze |
|                  |         | Dreh-<br>moment    | Dreh-<br>impuls | R <sup>2</sup> | dynamische<br>Fließgrenze | plastische<br>Viskosität | mse   |                         |                          |
| [-]              | [hh:mm] | [Nm]               | [Nms]           |                | [N/m <sup>2</sup> ]       | [Ns/m <sup>2</sup> ]     |       | [Nm]                    | [N/m <sup>2</sup> ]      |
| B-3-6-1          | 00:00   |                    |                 |                |                           |                          |       |                         |                          |
| B-3-6-2          | 00:40   | 4,79               | 1,34            | 0,74           | 1304,1                    | 9,0                      | 0,240 | 5,7                     | 1333,8                   |
| B-3-6-3          | 01:09   | 1,79               | 1,53            | 0,98           | 461,6                     | 12,8                     | 0,024 | 2,1                     | 484,8                    |
| B-3-6-4          | 01:32   | 0,57               | 1,00            | 0,98           | 132,3                     | 12,2                     | 0,014 | 0,8                     | 192,5                    |
| B-3-6-5          | 01:50   | 0,85               | 1,16            | 0,98           | 203,4                     | 12,7                     | 0,018 | 1,1                     | 243,8                    |
| B-3-6-6          | 02:10   | 0,38               | 0,87            | 0,99           | 80,9                      | 12,4                     | 0,010 | 0,6                     | 128,2                    |
| B-3-6-7          | 02:32   | 0,16               | 0,41            | 0,88           | 34,9                      | 5,8                      | 0,084 | 0,2                     | 38,0                     |

R<sup>2</sup>     Bestimmtheitsmaß  
mse     mittlere quadratische Abweichung

Tabelle 45: Messwerte der rheologischen Untersuchungen B-3-6

| Proben-Nr. | Zeit    | Drehzahl           | Drehmoment |
|------------|---------|--------------------|------------|
| [-]        | [hh:mm] | [s <sup>-1</sup> ] | [Nm]       |
| B-3-6-1    | 00:00   |                    |            |
| B-3-6-2    | 00:40   | 0,500              | 5,599      |
|            |         | 0,439              | 5,415      |
|            |         | 0,350              | 5,203      |
|            |         | 0,275              | 5,007      |
|            |         | 0,200              | 4,928      |
|            |         | 0,125              | 4,945      |
|            |         | 0,050              | 5,053      |
| B-3-6-3    | 01:09   | 0,501              | 2,543      |
|            |         | 0,425              | 2,460      |
|            |         | 0,351              | 2,318      |
|            |         | 0,274              | 2,241      |
|            |         | 0,200              | 2,052      |
|            |         | 0,125              | 1,936      |
|            |         | 0,050              | 1,910      |
| B-3-6-4    | 01:32   | 0,500              | 1,073      |
|            |         | 0,424              | 0,994      |
|            |         | 0,350              | 0,909      |
|            |         | 0,275              | 0,842      |
|            |         | 0,199              | 0,783      |
|            |         | 0,125              | 0,740      |
|            |         | 0,050              | 0,582      |
| B-3-6-5    | 01:50   | 0,500              | 1,436      |
|            |         | 0,425              | 1,299      |
|            |         | 0,350              | 1,278      |
|            |         | 0,275              | 1,194      |
|            |         | 0,200              | 1,070      |
|            |         | 0,125              | 0,998      |
|            |         | 0,050              | 0,894      |
| B-3-6-6    | 02:10   | 0,500              | 0,816      |
|            |         | 0,425              | 0,737      |
|            |         | 0,350              | 0,689      |
|            |         | 0,275              | 0,600      |
|            |         | 0,200              | 0,568      |
|            |         | 0,125              | 0,500      |
|            |         | 0,050              | 0,405      |
| B-3-6-7    | 02:32   | 0,500              | 0,339      |
|            |         | 0,425              | 0,315      |
|            |         | 0,349              | 0,333      |
|            |         | 0,275              | 0,294      |
|            |         | 0,200              | 0,243      |
|            |         | 0,125              | 0,223      |
|            |         | 0,050              | 0,145      |

## Anhang 8: Tabellarische Ergebnisse: Druckfestigkeit und E-Modul: A-1-1 / B-1-4

Tabelle 46: Ergebnisse von Druckfestigkeit und E-Modul: Rezeptur 1

| Nr. der Probe [-] | A-1-1        |                     |  |                              | B-1-4        |                     |  |                              |
|-------------------|--------------|---------------------|--|------------------------------|--------------|---------------------|--|------------------------------|
|                   | Zeit [hh:mm] | Druckfestigkeit     |  | E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ] | Zeit [hh:mm] | Druckfestigkeit     |  | E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ] |
|                   |              |                     | f <sub>c,cube</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] |                              |              |                     | f <sub>c,cube</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] |                              |
| 2                 | 00:37        | I <sub>cube</sub>   | 35,9                                     | 28764                        | 00:47        | I <sub>cube</sub>   | 29,4                                     | 25032                        |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 33,7                                     |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 29,8                                     |                              |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 35,7                                     |                              |              | III <sub>cube</sub> | 29,5                                     |                              |
|                   |              | MW                  | 35,1                                     |                              |              | MW                  | 29,6                                     |                              |
|                   |              | s                   | 1,2                                      |                              |              | s                   | 0,2                                      |                              |
| 3                 | 00:56        | I <sub>cube</sub>   | 34,2                                     | 30705                        | 01:00        | I <sub>cube</sub>   | 30,5                                     | 25618                        |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 36,7                                     |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 28,9                                     |                              |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 35,3                                     |                              |              | III <sub>cube</sub> | 27,6                                     |                              |
|                   |              | MW                  | 35,4                                     |                              |              | MW                  | 29,0                                     |                              |
|                   |              | s                   | 1,3                                      |                              |              | s                   | 1,4                                      |                              |
| 4                 | 01:28        | I <sub>cube</sub>   | 30,6                                     | 27778                        | 01:20        | I <sub>cube</sub>   | 26,0                                     | 22740                        |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 29,1                                     |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 26,8                                     |                              |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 30,0                                     |                              |              | III <sub>cube</sub> | 25,4                                     |                              |
|                   |              | MW                  | 29,9                                     |                              |              | MW                  | 26,0                                     |                              |
|                   |              | s                   | 0,8                                      |                              |              | s                   | 0,7                                      |                              |
| 5                 | 01:58        | I <sub>cube</sub>   | 30,5                                     | 26751                        | 01:49        | I <sub>cube</sub>   | 26,9                                     | 24028                        |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 31,8                                     |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 26,4                                     |                              |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 31,0                                     |                              |              | III <sub>cube</sub> | 25,7                                     |                              |
|                   |              | MW                  | 31,1                                     |                              |              | MW                  | 26,3                                     |                              |
|                   |              | s                   | 0,7                                      |                              |              | s                   | 0,6                                      |                              |
| 6                 | 02:13        | I <sub>cube</sub>   | 32,9                                     | 26936                        | 02:02        | I <sub>cube</sub>   | 24,1                                     | 23304                        |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 29,9                                     |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 27,4                                     |                              |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 27,7                                     |                              |              | III <sub>cube</sub> | 26,5                                     |                              |
|                   |              | MW                  | 30,2                                     |                              |              | MW                  | 26,0                                     |                              |
|                   |              | s                   | 2,6                                      |                              |              | s                   | 1,7                                      |                              |
| 7                 | 02:29        | I <sub>cube</sub>   | 36,8                                     | 28153                        |              |                     |  |                              |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 32,4                                     |                              |              |                     |  |                              |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 30,8                                     |                              |              |                     |  |                              |
|                   |              | MW                  | 33,3                                     |                              |              |                     |  |                              |
|                   |              | s                   | 3,1                                      |                              |              |                     |  |                              |

MW Mittelwert  
s Standardabweichung

## Anhang 9: Tabellarische Ergebnisse: Druckfestigkeit und E-Modul: A-2-2 / B-2-5

Tabelle 47: Ergebnisse von Druckfestigkeit und E-Modul: Rezeptur 2

| Nr. der Probe [-] | A-2-2        |                     |                                   |                              | B-2-5        |                     |                                   |                              |
|-------------------|--------------|---------------------|-----------------------------------|------------------------------|--------------|---------------------|-----------------------------------|------------------------------|
|                   | Zeit [hh:mm] | Druckfestigkeit     |                                   | E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ] | Zeit [hh:mm] | Druckfestigkeit     |                                   | E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ] |
|                   |              |                     | $f_{c,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |                              |              |                     | $f_{c,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |                              |
| 2                 | 00:41        | I <sub>cube</sub>   | 36,7                              | 28698                        | 00:56        | I <sub>cube</sub>   | 36,4                              | 24267                        |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 31,1                              |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 36,3                              |                              |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 33,6                              |                              |              | III <sub>cube</sub> | 36,7                              |                              |
|                   |              | MW                  | 33,8                              |                              |              | MW                  | 36,5                              |                              |
|                   |              | s                   | 2,8                               |                              |              | s                   | 0,2                               |                              |
| 3                 | 01:00        | I <sub>cube</sub>   | 36,1                              | 26480                        | 01:15        | I <sub>cube</sub>   | 35,3                              | 22055                        |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 33,0                              |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 35,4                              |                              |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 33,5                              |                              |              | III <sub>cube</sub> | 30,7                              |                              |
|                   |              | MW                  | 34,2                              |                              |              | MW                  | 33,8                              |                              |
|                   |              | s                   | 1,7                               |                              |              | s                   | 2,7                               |                              |
| 4                 | 01:14        | I <sub>cube</sub>   | 32,5                              | 26269                        | 01:41        | I <sub>cube</sub>   | 32,6                              | 23635                        |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 30,4                              |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 35,1                              |                              |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 31,5                              |                              |              | III <sub>cube</sub> | 35,9                              |                              |
|                   |              | MW                  | 31,5                              |                              |              | MW                  | 34,5                              |                              |
|                   |              | s                   | 1,0                               |                              |              | s                   | 1,7                               |                              |
| 5                 | 01:48        | I <sub>cube</sub>   | 34,1                              | 26971                        | 02:03        | I <sub>cube</sub>   | 34,0                              | 21874                        |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 32,2                              |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 34,5                              |                              |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 33,1                              |                              |              | III <sub>cube</sub> | 35,1                              |                              |
|                   |              | MW                  | 33,1                              |                              |              | MW                  | 34,5                              |                              |
|                   |              | s                   | 0,9                               |                              |              | s                   | 0,6                               |                              |
| 6                 | 02:07        | I <sub>cube</sub>   | 35,4                              | 25440                        | 02:26        | I <sub>cube</sub>   | 38,9                              | 22269                        |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 36,2                              |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 38,7                              |                              |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 35,4                              |                              |              | III <sub>cube</sub> | 39,3                              |                              |
|                   |              | MW                  | 35,7                              |                              |              | MW                  | 39,0                              |                              |
|                   |              | s                   | 0,5                               |                              |              | s                   | 0,3                               |                              |
| 7                 | 02:25        | I <sub>cube</sub>   | 38,8                              | 25584                        | 02:44        | I <sub>cube</sub>   | 45,4                              | 24504                        |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 37,8                              |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 45,2                              |                              |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 38,3                              |                              |              | III <sub>cube</sub> | 41,6                              |                              |
|                   |              | MW                  | 38,3                              |                              |              | MW                  | 44,1                              |                              |
|                   |              | s                   | 0,5                               |                              |              | s                   | 2,2                               |                              |
| 8                 | 02:41        | I <sub>cube</sub>   | 44,2                              | n. v.                        |              |                     |                                   |                              |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 42,7                              |                              |              |                     |                                   |                              |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 44,3                              |                              |              |                     |                                   |                              |
|                   |              | MW                  | 43,7                              |                              |              |                     |                                   |                              |
|                   |              | s                   | 0,9                               |                              |              |                     |                                   |                              |

MW Mittelwert  
s Standardabweichung

## Anhang 10: Tabellarische Ergebnisse: Druckfestigkeit und E-Modul: A-3-3 / B-3-6

Tabelle 48: Ergebnisse von Druckfestigkeit und E-Modul: Rezeptur 3

| Nr. der Probe [-] | A-3-3        |                     |                                   |                              | B-3-6        |                     |                                   |                              |                     |      |
|-------------------|--------------|---------------------|-----------------------------------|------------------------------|--------------|---------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------|------|
|                   | Zeit [hh:mm] | Druckfestigkeit     |                                   | E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ] | Zeit [hh:mm] | Druckfestigkeit     |                                   | E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ] |                     |      |
|                   |              |                     | $f_{c,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |                              |              |                     | $f_{c,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |                              |                     |      |
| 2                 | 00:41        | I <sub>cube</sub>   | 47,0                              | 27716                        | 00:40        | I <sub>cube</sub>   | 46,3                              | 29472                        |                     |      |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 43,5                              |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 47,1                              |                              |                     |      |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 43,8                              |                              |              | III <sub>cube</sub> | 48,3                              |                              |                     |      |
|                   |              | MW                  | 44,8                              |                              |              | MW                  | 47,2                              |                              |                     |      |
|                   |              | s                   | 1,9                               |                              |              | s                   | 1,0                               |                              |                     |      |
| 3                 | 01:11        | I <sub>cube</sub>   | 39,4                              | 28651                        | 01:07        | I <sub>cube</sub>   | 48,3                              | 28504                        |                     |      |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 41,5                              |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 49,8                              |                              |                     |      |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 45,9                              |                              |              | III <sub>cube</sub> | 49,2                              |                              |                     |      |
|                   |              | MW                  | 42,3                              |                              |              | MW                  | 49,1                              |                              |                     |      |
|                   |              | s                   | 3,3                               |                              |              | s                   | 0,8                               |                              |                     |      |
| 4                 | 01:32        | I <sub>cube</sub>   | 41,7                              | 27991                        | 01:29        | I <sub>cube</sub>   | 53,8                              | 28119                        |                     |      |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 51,1                              |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 54,5                              |                              |                     |      |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 53,0                              |                              |              | III <sub>cube</sub> | 55,6                              |                              |                     |      |
|                   |              | MW                  | 48,6                              |                              |              | MW                  | 54,6                              |                              |                     |      |
|                   |              | s                   | 6,0                               |                              |              | s                   | 0,9                               |                              |                     |      |
| 5                 | 01:50        | I <sub>cube</sub>   | 47,6                              | 28743                        | 01:48        | I <sub>cube</sub>   | 54,1                              | 28554                        |                     |      |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 49,9                              |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 49,4                              |                              |                     |      |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 43,7                              |                              |              | III <sub>cube</sub> | 54,1                              |                              |                     |      |
|                   |              | MW                  | 47,1                              |                              |              | MW                  | 52,6                              |                              |                     |      |
|                   |              | s                   | 3,1                               |                              |              | s                   | 2,7                               |                              |                     |      |
| 6                 | 02:10        | I <sub>cube</sub>   | 48,2                              | 30053                        | 02:09        | I <sub>cube</sub>   | 54,1                              | 26968                        |                     |      |
|                   |              | II <sub>cube</sub>  | 52,5                              |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 55,1                              |                              |                     |      |
|                   |              | III <sub>cube</sub> | 50,7                              |                              |              | III <sub>cube</sub> | 56,9                              |                              |                     |      |
|                   |              | MW                  | 50,5                              |                              |              | MW                  | 55,4                              |                              |                     |      |
|                   |              | s                   | 2,2                               |                              |              | s                   | 1,4                               |                              |                     |      |
| 7                 |              |                     |                                   |                              | 02:09        | I <sub>cube</sub>   | 57,6                              | 31466                        |                     |      |
|                   |              |                     |                                   |                              |              | II <sub>cube</sub>  | 58,2                              |                              | II <sub>cube</sub>  | 58,2 |
|                   |              |                     |                                   |                              |              | III <sub>cube</sub> | 57,8                              |                              | III <sub>cube</sub> | 57,8 |
|                   |              |                     |                                   |                              |              | MW                  | 57,8                              |                              | MW                  | 57,8 |
|                   |              |                     |                                   |                              |              | s                   | 0,3                               |                              | s                   | 0,3  |

MW Mittelwert  
s Standardabweichung