

---

### 3 Art und Umfang der Untersuchungen

#### 3.1 Versuchsprogramme

Bevor auf die einzelnen Versuchsprogramme eingegangen wird, werden zunächst die wichtigsten Begriffe definiert.

Üblicherweise wird zur Bindemittelphase der gesamte Mehlkornanteil der Gesteinskörnung gerechnet, weil sich das der Gesteinskörnung anhaftende Mehlkorn rheologisch gesehen ähnlich verhält wie Zement [KRELL, 1987]. Andererseits erfolgte die Charakterisierung der Gesteinskörnung z.B. durch die relative Feststoffkonzentration (siehe Abschnitt 3.2.4 und 5) mit dem anhaftenden Mehlkorn. Schon allein aus praktischen Gründen wurde deshalb der Leim im entsprechenden Trichterauslaufversuch (siehe Abschnitt 3.3.1) ohne das der Gesteinskörnung anhaftende Mehlkorn untersucht. Fortan wird daher als Bindemittel die Summe aus Zement und mehlfeinen Zusatzstoffen ohne das der Gesteinskörnung anhaftende Mehlkorn definiert. Folglich setzt sich der Bindemittelleim aus dem Bindemittel, dem Zugabewasser inkl. der Zusatzmittel und dem eingeschlossenen Luftvolumen zusammen und kann nach Gl. (3.1) berechnet werden. Bei der Berechnung des Leimvolumens wurde der Anteil des pulverförmigen Stabilisierers vernachlässigt.

$$V_{Leim} = \frac{m_z}{\rho_z} + \frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_w}{\rho_w} + \frac{m_{FM}}{\rho_{FM}} + V_{Luft} \quad (3.1)$$

mit:

$V_{Leim}$	[dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Leimvolumen je Kubikmeter Frischbeton
$m_z$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Masse des Zementes je Kubikmeter Frischbeton
$m_f$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Masse des Zusatzstoffes je Kubikmeter Frischbeton
$m_w$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Masse des zugegebenen Wassers je Kubikmeter Frischbeton
$m_{FM}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Fließmittelmenge je Kubikmeter Frischbeton
$V_{Luft}$	[dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Eingeschlossenes Luftvolumen je Kubikmeter Frischbeton, Annahme $V_{Luft} = 15 \text{ dm}^3/\text{m}^3$
$\rho_z$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	Korndichte des Zements
$\rho_f$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	Korndichte des Zusatzstoffes
$\rho_w$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	Dichte von Wasser bei 20°C, $\rho_w = 1,000 \text{ kg/dm}^3$
$\rho_{FM}$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	Dichte des Fließmittels

Entsprechend wird das Mörtelvolumen  $V_M$  nach Gl. (3.2) berechnet:

$$V_M = V_{Leim} + \frac{m_{g,0/4}}{\rho_{g,0/4}} \quad (3.2)$$

mit:

$V_M$	[dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Mörtelvolumen je Kubikmeter Frischbeton
$V_{Leim}$	[dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Leimvolumen je Kubikmeter Frischbeton
$m_{g,0/4}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Masse der Gesteinskörnung 0/4, vereinfachend als Summe der Massen der Lieferkörnungen 0/2 und 2/4 berechnet
$\rho_{g,0/4}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Gesteinskörnung 0/4

Das volumenbezogene Wasser-Bindemittel-Verhältnis  $V_w/V_b$  berechnet sich nach Gl. (3.3):

$$V_w / V_b = \frac{\frac{m_w}{\rho_w}}{\frac{m_z}{\rho_z} + \frac{m_f}{\rho_f}} \quad (3.3)$$

mit:

$m_z$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Masse des Zementes je Kubikmeter Frischbeton
$m_f$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Masse des Zusatzstoffes je Kubikmeter Frischbeton
$m_w$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Masse des Wassers je Kubikmeter Frischbeton (Zugabewasser inkl. Wasseranteil aus Fließmittel)
$\rho_z$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	Korndichte des Zements
$\rho_f$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	Korndichte des Zusatzstoffes
$\rho_w$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	Dichte von Wasser bei 20°C, $\rho_w = 1,000 \text{ kg/dm}^3$

Zur Klärung der Fragestellung, wie die Zusammensetzung des selbstverdichtenden Betons das Fließverhalten beeinflusst, sind verschiedene Versuchsprogramme durchgeführt worden, die in Tabelle 3.1 zusammengestellt sind.

Im Einzelnen wurden die Zement- und Zusatzstoffart (Füllertyp) sowie die deren Massenverhältnis variiert. Im Versuchsprogramm I wurden grundlegende Abhängigkeiten zwischen dem Fließverhalten und der Sieblinie der Gesteinskörnung untersucht, wobei die Sieblinien im Bereich zwischen A16 und C16 nach Anhang L der DIN 1045-2 variiert wurden.

Wegen der optimalen Fließeigenschaften der Betone mit Sieblinie AB16 erfolgten die Versuche des Versuchsprogramms II ausschließlich unter Verwendung der Sieblinie AB16. Untersucht wurde nun die Beziehung zwischen Leimvolumen, Leimzähigkeit (Wasser-Bindemittel-Verhältnis) und Fließverhalten jeweils für die drei Zementarten Portlandkalksteinzement, Portlandhüttenzement sowie Portlandölschieferzement. Ebenso variiert wurde das Massenverhältnis von Zement und Zusatzstoff. Sämtliche Betone verfügten dabei über einen konstanten äquivalenten Wasserzementwert.

Ab Versuchsprogramm III stand das Betonrheometer „BTRHEOM“ zur Verfügung (siehe Abschnitt 3.3.3). Damit konnten die Zusammenhänge zwischen der Betonzusammensetzung und den fundamentalen rheologischen Kennwerten Fließgrenze und plastische Viskosität untersucht werden. Variiert wurden die Steuergrößen Wassergehalt, Fließmittelgehalt, Stabilisierergehalt, Leimgehalt, Mörtelgehalt sowie die Grobkornzusammensetzung. Ergänzend zu den Rheometerversuchen wurden auch die Standardkonsistenzprüfverfahren durchgeführt, wie sie bereits in den Versuchsprogrammen I und II angewandt wurden. Dies war erforderlich, um zu klären, welche Kennwerte der Standardkonsistenzprüfverfahren auf die fundamentalen rheologischen Kenngrößen Fließgrenze und plastische Viskosität zurückgeführt werden können.

Im Versuchsprogramm IV wurde im Unterschied zum Versuchsprogramm III anstelle von Kalksteinmehl Steinkohlenflugasche eingesetzt. Damit unterschieden sich die Betone der Versuchsprogramme III und IV auch durch ihre äquivalenten Wasserzementwerte  $(w/z)_{eq}$ . Die Betone mit Kalksteinmehl waren als normalfeste, die mit Steinkohlenflugasche als höherfeste Betone konzipiert.

Weitere Konsistenzmessungen erfolgten im Rahmen der Versuchsprogramme V und VI, wobei die Betone im Versuchsprogramm VI mit gebrochener Gesteinskörnung hergestellt wurden.

**Tabelle 3.1: Durchgeführte Versuchsprogramme; verwendete Zemente und Zusatzstoffe**

Versuchsprogramm	Variationen	Zusammensetzung (Herkunft bzw. Charge)					Typ	Messung mit Rheometer
		Gesteinskörnung	Zement	Zusatzstoff	Fließmittel	(w/z) <sub>eq</sub> [-]		
I	Sieblinie zwischen A16 und C16, Leimgehalt konstant	ungebrochen	CEM II/A-LL 32,5R	SFA (B)	A	0,46	K	nein
II	Zementart, Zement- bzw. Zusatzstoffgehalt, jeweils mit konstantem äquivalentem Wasserzementwert	ungebrochen	CEM II/A-LL 32,5R	SFA (B)	A	0,46	K	nein
			CEM II/A-S 32,5R					
			CEM II/B-T 32,5R					
III	Wasser-Bindemittel-Verhältnis Leimgehalt Fließmittelgehalt Stabilisierergehalt Mörtelgehalt Grobkorngehalt	ungebrochen	CEM II/A-LL 32,5R	KSM (A)	A	0,65 bis 0,70	M, K	ja
IV	wie bei III	ungebrochen	wie bei III	SFA (A)	A	0,41 bis 0,47	M, K	ja
V	Ergänzende Versuche zu III und IV: Stabilisierertyp Kombination der Füllertypen	ungebrochen	wie bei III	SFA (A) KSM (A)	A	0,33 bis 0,70	M, K, S	ja
VI	Ergänzende Versuche Leim-, Wasser- und Fließmittelgehalt	gebrochen	CEM II/A-LL 42,5R	KSM (B)	B	≈ 0,44	M	ja

**Zusatzstoff:** SFA = Steinkohlenflugasche, KSM = Kalksteinmehl, (A) und (B) stehen stellvertretend für die Lieferchargen (siehe Tabelle 3.3);

**Fließmittel:** A oder B, siehe Tabelle 3.2

**Typ:** M = Mehlkorntyp, K = Kombinationstyp, S = Stabilisierertyp

### 3.2 Charakterisierung der verwendeten Ausgangsstoffe

#### 3.2.1 Wasser

Für sämtliche Versuche an Leim, Mörtel und Beton wurde Trinkwasser der Stadt Stuttgart verwendet.

#### 3.2.2 Zusatzmittel

Tabelle 3.2 enthält Dichte und Feststoffgehalt der verwendeten Zusatzmittel. Es wurden zwei unterschiedlich zusammengesetzte Fließmittel A und B verwendet, deren Wirksubstanzen auf Polycarboxylatether (PCE) basieren. Am Institut durchgeführte Analysen ergaben, dass sich die Wirkkomponenten des Stabilisierers aus Polysacchariden und ca. 3,4 % Naphthalinsulfonat (Derivat) zusammensetzten. Durch den Anteil von Naphthalinsulfonat wird eine zusätzliche verflüssigende Wirkung erreicht.

**Tabelle 3.2: Daten der Zusatzmittel**

Zusatzmittel	Dichte bei 20°C	Feststoffgehalt
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[M.- %]
Fließmittel A (Woermann FM/BV 375)	1,08	35
Fließmittel B (Glenium 51)	1,09	30
Stabilisierer-Pulver (Woermann Unterwassercompound ST)	0,60 (Schüttdichte)	100

3.2.3 Bindemittel

Zur Charakterisierung des Bindemittels wurde der Wasseranspruch nach PUNTKE [PUNTKE, 2002] bzw. das so genannte Wasserrückhaltevermögen nach OKAMURA ( $\beta_p$ -Wert) [OKAMURA ET AL., 1995] ermittelt. Die Kennwerte der verwendeten Zemente und Zusatzstoffe enthält Tabelle 3.3.

Tabelle 3.3: Kennwerte der eingesetzten Zemente und Zusatzstoffe

Bindemittel	Bezeichnung	Verwendung für Versuchsprogramm	Korndichte $\rho_s$ bzw. $\rho_f$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	Wasseranspruch nach	
				PUNTKE	OKAMURA
				$n_H$	$\beta_p$
<b>Zemente</b>					
Portlandkalksteinzement	CEM II/A-LL 32,5R	III, IV, V	3,05	n.b.	0,974
	CEM II/A-LL 32,5R	I, II	3,05	0,384	n.b.
	CEM II/A-LL 42,5R	VI	3,15	n.b.	1,047
Portlandhüttenzement	CEM II/A-S 32,5R	II	3,05	0,408	n.b.
Portlandölschieferzement	CEM II/B-T 32,5R	II	3,00	0,418	n.b.
<b>Zusatzstoffe</b>					
Steinkohlenflugasche	SFA (A)	IV, V	2,30	n.b.	0,840
Steinkohlenflugasche	SFA (B)	I, II	2,30	0,375	n.b.
Kalksteinmehl	KSM (A)	III, V	2,70	n.b.	0,855
Kalksteinmehl	KSM (B)	VI	2,68	n.b.	1,122

In Bild 3.1 sind die mit dem Lasergranulometer bestimmten Korngrößenverteilungen der verwendeten Zemente dargestellt, die der Zusatzstoffe<sup>\*)</sup> enthält Bild 3.2.

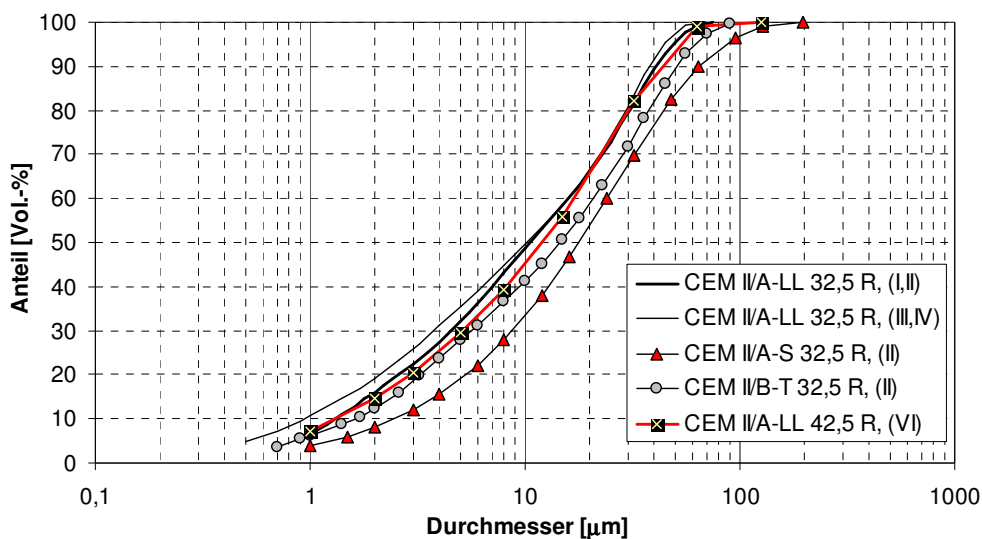


Bild 3.1: Korngrößenverteilung der verwendeten Zemente; (I) bis (VI) = Versuchsprogramme

<sup>\*)</sup> Die Korngrößenverteilung des Kalksteinmehles KSM (B) wurde nicht bestimmt.

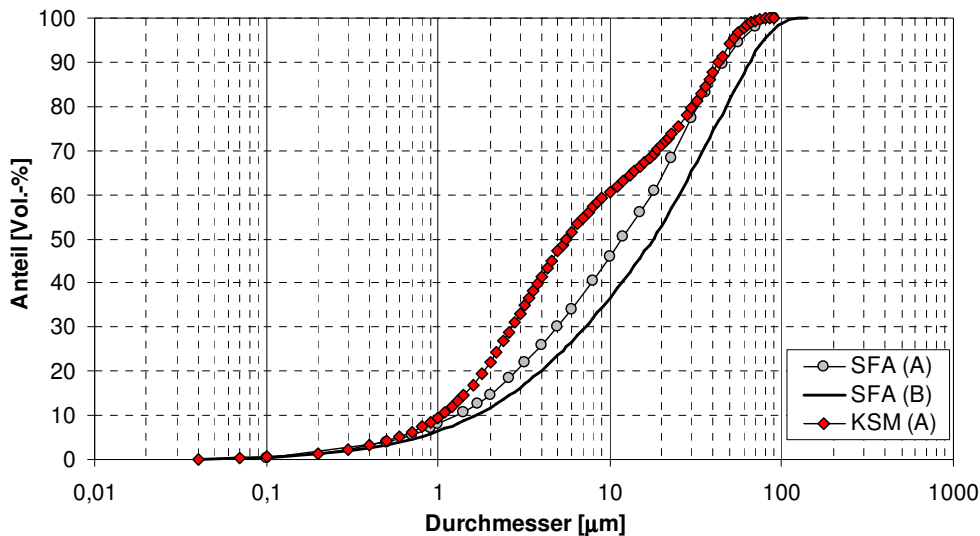


Bild 3.2: Korngrößenverteilung der verwendeten Zusatzstoffe

### 3.2.4 Gesteinskörnung

Der Hauptteil der in dieser Arbeit beschriebenen Versuche (Versuchsprogramme I bis V) wurde unter Verwendung von ungebrochener Gesteinskörnung (Sand und Kies aus dem Rheingebiet) durchgeführt. Das Größtkorn betrug 16 mm. Die genaue Zusammensetzung der Gesteinskörnung jeder einzelnen Betonrezeptur ist im Anhang zusammengestellt. Für die Versuche des Versuchsprogramms VI wurde Marinesand (0/4) und gebrochener Granit (4/16) verwendet.

Zur Charakterisierung der Gesteinskörnung wurde die Schüttdichte ermittelt. Hierzu wurde eine 20-kg-Probe der Gesteinskörnung 0/16 im Mischer homogenisiert und dann unter kreisförmigem Einfüllen vom Rand her in den 10-Liter-Topf (DIN EN 1097 T3) eingefüllt. Durch Rückwägung unter Verwendung der bekannten mittleren Korndichte der Gesteinskörnung kann zunächst der Feststoffgehalt  $n_{g,Schütt}$  nach Gl. (3.4) bzw. der Hohlraumgehalt  $n_{g,H,Schütt}$  nach Gl. (3.5) berechnet werden.

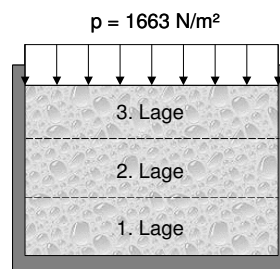
$$n_{g,Schütt} = \frac{V_g}{V_{ges}} = \frac{m_g}{V_{ges} \cdot \rho_g} = \frac{m_g}{V_{ges}} \cdot \frac{1}{\rho_g} = \frac{\rho_{g,Schütt}}{\rho_g} \quad (3.4)$$

mit:

$n_{g,Schütt}$	[-]	Feststoffgehalt der losen Gesteinschüttung
$V_g$	[dm <sup>3</sup> ]	Volumen der Gesteinskörnung (reines Kornvolumen)
$V_{ges}$	[dm <sup>3</sup> ]	Volumen der losen Gesteinsschüttung = Behältervolumen (Kornvolumen + eingeschlossenes Hohlraumvolumen)
$m_g$	[kg]	Masse der Gesteinskörnung
$\rho_g$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	Mittlere Korndichte der Gesteinskörnung
$\rho_{g,Schütt}$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	Schüttdichte der Gesteinskörnung

$$n_{g,H,Schütt} = 1 - n_{g,Schütt} = 1 - \frac{\rho_{g,Schütt}}{\rho_g} \quad (3.5)$$

Zur Bestimmung der Volumenkonzentration der Gesteinskörnung bei verdichteter Packung  $\phi_{max}$  (vgl. Abschnitt 2 und 5.1) wurde der Schüttversuch wie folgt abgewandelt: Die lose geschüttete Gesteinskörnung ( $V_{ges} = 10$  Liter) wurde wiederverwendet und ebenfalls in den oben beschriebenen 10-Liter-Topf – jedoch im Unterschied zum Schüttversuch – nacheinander in drei Lagen eingefüllt (Bild 3.3). Nach Befüllen jeder Lage erfolgte ein anschließender Verdichtungsvorgang (Vibration) für 30 Sekunden unter einer Auflast von 9 kg. Diese Auflast entspricht einer gleichmäßigen Flächenpressung von  $p = 1663 \text{ N/m}^2$ .



**Bild 3.3:** Versuchsaufbau zur Bestimmung der Feststoffkonzentration bei dichtester Packung

Die volumenbezogene Konzentration der Gesteinskörnung im verdichteten Zustand  $\phi_{max}$  wird mit Gl. (3.6) berechnet. Anstelle der Schüttdichte  $\rho_{g,Schütt}$  tritt dann die Packungsdichte bei verdichteter Packung  $\rho_{g,Pack}$ .

$$\phi_{max} = \frac{m_{g,verdichtet}}{V_{ges,verdichtet}} \cdot \frac{1}{\rho_g} = \frac{\rho_{g,Pack}}{\rho_g} \quad (3.6)$$

Die Parameter Hohlraumgehalt bzw. Volumenkonzentration bei loser und verdichteter Gesteinskörnung stellen die notwendigen Ausgangsparameter zur Modellierung des Kornreibungsanteils im Abschnitt 5.1 dar.

### 3.3 Rheologische Untersuchungen

#### 3.3.1 Prüfungen an Leim

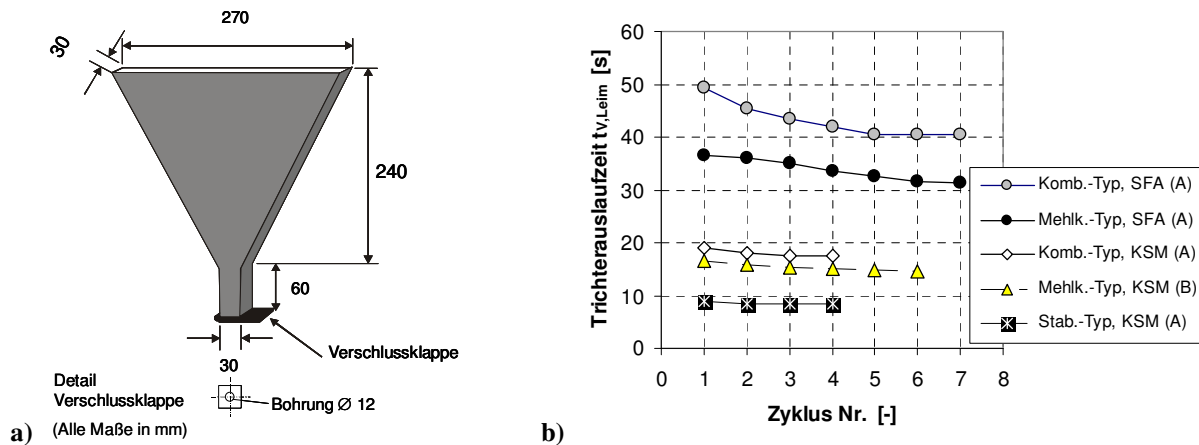
Als Indikator für die Zähigkeit des Bindemittelleimes wurde die Trichterauslaufzeit bestimmt. Aus praktischen Gründen wurde die Prüfung allerdings an reinem Bindemittelleim durchgeführt, also ohne den Mehlkornanteil der Gesteinskörnung. Ein ähnliches Verfahren beschreiben auch HELA ET AL. [2003]. Die Charakterisierung des Leimes anhand seiner Auslaufzeit lässt Rückschlüsse auf unterschiedliche Wasseransprüche verschiedener Bindemittelkombinationen zu und liefert gleichzeitig wichtige Informationen über mögliche Wechselwirkungen zwischen Bindemittel und Zusatzmittel. Sie stellt damit eine Erweiterung des von PASCHMANN [1999] beschriebenen Verfahrens dar, der zur Charakterisierung des Wasseranspruches die Trichterauslaufzeiten von Bindemittelleimen ohne Zusatzmittel gemessen hat. Als Auslaufrichter diente der V-förmige Trichter der Mörtelversuche, jedoch mit modifizierter Austrittsöffnung nach Bild 3.4. Anstelle der rechteckigen Austrittsöffnung bestand die Austrittsöffnung aus einer in der Ver-

schlussklappe integrierten kreisrunden Bohrung ( $\varnothing = 12$  mm). Die Dimensionierung der Bohrung erfolgte unter der Maßgabe, dass die Auslaufzeit auch geringfügig unterschiedlicher Leime bestimmt werden kann. Zur Abdichtung der Verschlussklappe wurde ein 5 mm dicker Moosgummistreifen verwendet, der über ein ebenso mittig angeordnetes kreisrundes Loch ( $\varnothing = 12$  mm) verfügte. Für Wasser ( $T = 20$  °C) ergab sich eine Trichterauslaufzeit von 5,5 s. Nachfolgend zeigt Tabelle 3.4 den Zeitplan, der den Leimversuchen zugrunde lag.

**Tabelle 3.4: Zeitplan für die Herstellung und Prüfung der Bindemittleime (Trichterauslaufversuch)**

Arbeitsgang	Zeit nach Wasserzugabe [min]
Mischen von Zement und Zusatzstoffen von Hand, ggf. Zugabe von Stabilisierer (30 s)	-
Abwiegen von Fließmittel und Wasser (100%)	-
<b>Zugabe des Bindemittels</b>	0
Mischen für 2 x 90 s (Mörtelmischer und Mischprogramm gemäß DIN 196-3)	-
<b>Trichterauslaufversuch Leim <math>\rightarrow t_{V,Leim}</math></b>	+ 4

Zur Bestimmung des Mischeinflusses wurden mehrere Messzyklen hintereinander durchgeführt. Zwischen den einzelnen Messzyklen wurde der Bindemittleim jeweils 30 s im Mischer gemischt. Charakteristisch für alle Bindemittleime ist der Abfall der Trichterauslaufzeit verbunden mit einer Näherung gegen einen Endwert (Bild 3.4).



**Bild 3.4: a) Verwendeter Trichter zur Ermittlung der Leimauslaufzeit  
b) Typische Entwicklung der Leimauslaufzeiten für unterschiedlich zusammengesetzte Leime**

Während die Auslaufzeiten der Leime mit KSM nur wenig abnehmen, zeigen die Leime mit SFA einen deutlichen anfänglichen Abfall. Sehr wahrscheinlich spielen thixotrope Effekte eine Rolle (vgl. Abschnitt 2.5.1.1). Durch die bei darauffolgenden Mischzyklen ständig neu zugeführte Mischenergie erfolgte ein ständig fortschreitender Strukturbruch, bis allmählich kein weiterer Abfall der Auslaufzeit verzeichnet wurde. Die Messzyklen wurden beendet, sofern der Unterschied zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen  $< 0,5$  s betrug. Für alle weiteren Berechnungen wurde dieser kleinste Wert verwendet. Für jede Bindemittelzusammensetzung stand somit für die Modellierung ein charakteristischer Kennwert zur Verfügung.

3.3.2 Standardprüfverfahren für Mörtel und Beton (1-Punkt-Verfahren)

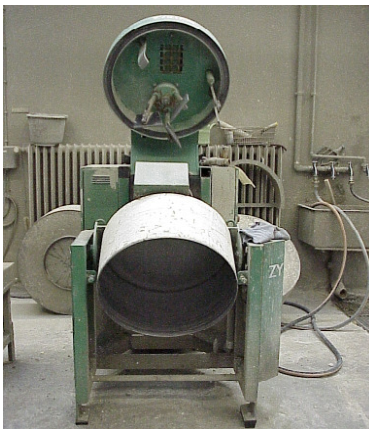


Bild 3.5: Verwendeter Betonmischer

Für die Prüfung jeder Betonrezeptur wurden 40 Liter Frischbeton in einem Zwangsmischer (Bild 3.5) hergestellt. Die Herstellung und Prüfung erfolgte nach dem in Tabelle 3.5 angegebenen Zeitplan.

Die verwendeten Standardprüfverfahren sind in [REINHARDT ET AL., 2001] beschrieben. Wegen des thixotropen Verhaltens von Frischbeton wurde der Beton vor jeder Einzelprüfung für 30 Sekunden im Zwangsmischer gemischt.

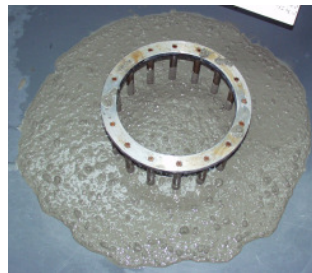
Tabelle 3.5: Zeitplan zur Herstellung und Prüfung der Mörtel- bzw. Betonmischungen

Arbeitsgang	Kenngröße	Beginn der Prüfung Zeit nach Wasserzugabe [min]
2 Minuten mischen von Zuschlägen (< 4mm <sup>*)</sup> ), Zement und Zusatzstoffen und ggf. Stabilisierer		
<b>Erste Wasserzugabe (80%)</b>		<b>0</b>
1 Minute mischen		
Zugabe des Fließmittels zusammen mit den restlichen 20 % Zugabewasser		
Mischen für 2 Minuten		
Mischrührwerk ggf. von anhaftenden Teilen säubern		
2 Minuten mischen		
<b>Mörtelversuche</b>		
Setzfließversuch	Setzfließmaß $sf_M$	+10
30 Sekunden mischen		
Trichterauslaufversuch	Trichterauslaufzeit $t_{V,M}$	+15
Zugabe der Zuschläge 4/16 <sup>**)</sup>		
Mischen für 3 Minuten		
<b>Betonversuche</b>		
Füllen des Rheometers <sup>°)</sup>	Aufzeichnen der Fließkurve	+20
30 Sekunden mischen		
Setzfließversuch	Setzfließmaß $sf_B$ , Fließzeit $t_{500}$	+25
30 Sekunden mischen		
Füllen von Zylindern <sup>°)</sup> ( $\varnothing = 150, h = 300$ mm) zur Beurteilung der Sedimentationsneigung und Oberflächengüte.		+30
30 Sekunden mischen		
Trichterauslaufversuch	Trichterauslaufzeit $t_{V,B}$	+35
30 Sekunden mischen		
Blockierringversuch	Setzfließmaß $sf_{B,J}$ Fließzeit $t_{500,J}$ Höhenunterschied $st_J$	+40
30 Sekunden mischen		
Luftgehaltsprüfung (Messung 5 Minuten nach Beendigung des Einfüllvorganges)	Luftgehalt $a_B$	+45

Für Versuchsprogramm I und II gelten die folgenden Ausnahmen: <sup>\*)</sup> < 2 mm; <sup>\*\*)</sup> 2/16; <sup>°)</sup> entfällt in Versuchsprogramm I und II



Der Blockierringversuch wird nun näher betrachtet, da das in [REINHARDT ET AL., 2001] beschriebene Verfahren aus folgenden Gründen ergänzt wurde. Abhängig von der Anzahl der Stäbe und der Mischungszusammensetzung kann trotz eines bestimmten Ausbreitkuchendurchmessers ein erhöhter Grobkorngehalt innerhalb des Ringes festgestellt werden (Bild 3.6), insbesondere dann, wenn die Betone auch zur Sedimentation neigen (vgl. auch Abschnitt 6.3). Beide Betone in Bild 3.6 zeigen etwa das gleiche Setzfließmaß im Blockierringversuch mit  $sf_{B,J} \cong 660$  mm, dennoch verfügt Beton B im Vergleich zu Beton A über einen deutlich erhöhten Grobkornanteil innerhalb des Ringes.



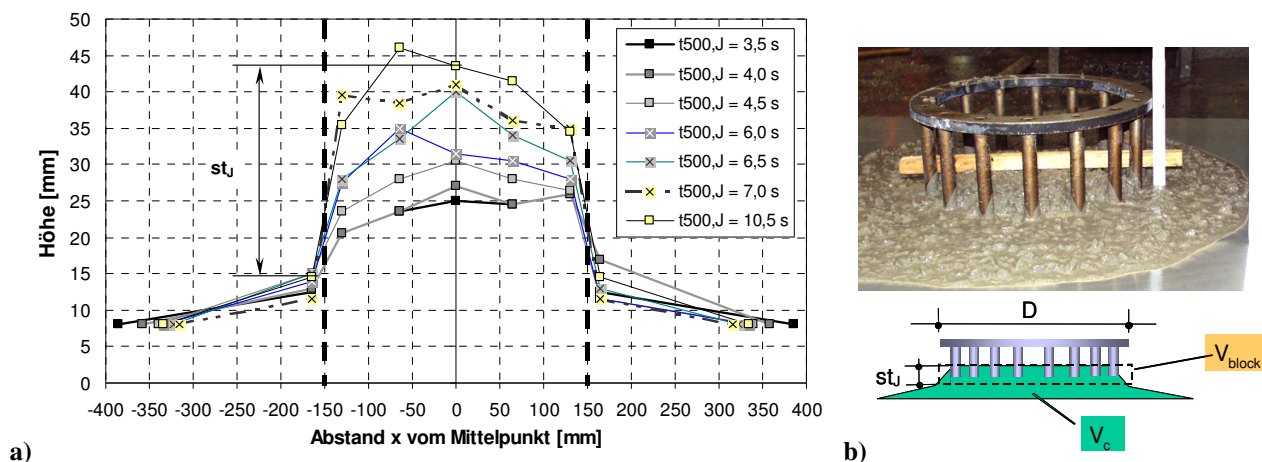
**Beton A:**  
Setzfließmaß  $sf_{B,J}$  ca. 670 mm



**Beton B:**  
Setzfließmaß  $sf_{B,J}$  ca. 650 mm

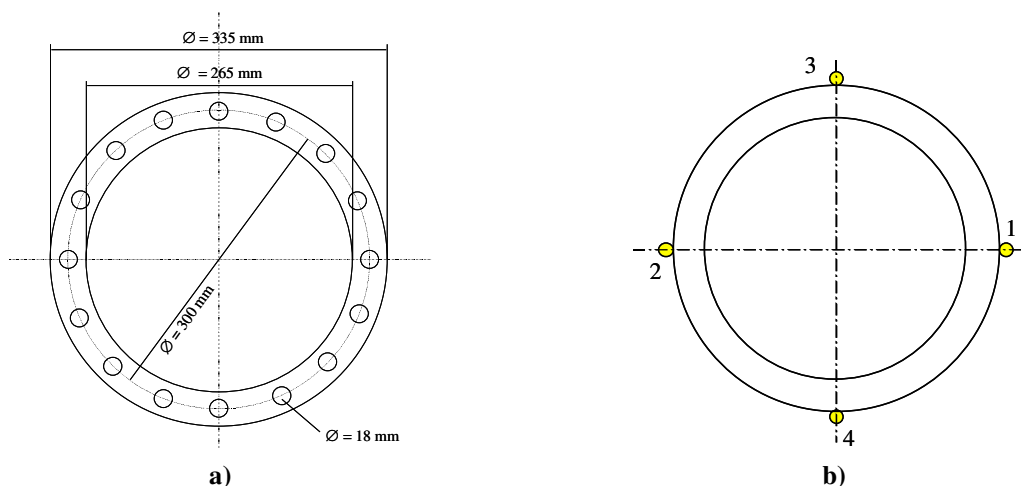
**Bild 3.6:** Blockierverhalten zweier unterschiedlich zusammengesetzter Betone

Bild 3.7a) zeigt die beispielhaften Betonkonturen von Betonen mit unterschiedlichen Fließeigenschaften im Blockierringversuch. Wird der Höhenunterschied  $st_J$  des Betons im Innern des Blockierendes (Ringmitte) und unmittelbar an den Stäben außerhalb des Ringes gemessen (Bild 3.7a, b), dann kann das blockierte Betonvolumen abgeschätzt werden. Wenn der Ausbreitkuchen des Betons gemäß Bild 3.7b) plateauartig idealisiert wird, dann ist das blockierte Betonvolumen  $V_{block}$  näherungsweise proportional zum gemessenen Höhenunterschied  $st_J$  [WÜSTHOLZ, 2003]. Die tatsächliche Betonkontur in Bild 3.7a) ist aufgrund der Fließgrenze des Betons jedoch nicht eben, sondern eher gekrümmt. Für alle Versuche wurde ein Blockierring mit den in Bild 3.8a) dargestellten Abmessungen verwendet.



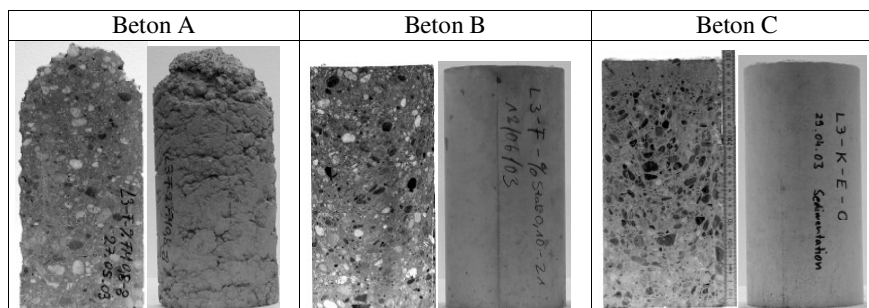
**Bild 3.7:** a) Gemessene Betonkontur im Blockierringversuch für verschiedene Betone mit Angabe der Fließzeit  $t_{500,J}$  (Blockierring mit 16 Stäben, Größtkorn 16 mm, gebrochene Gesteinskörnung); die Position der vertikalen Stäbe ist durch die zwei fett eingezeichneten gestrichelten Linien angedeutet  
b) Fotografie des Höhenunterschiedes  $st_J$  (oben) und Idealisierung der Betonkontur (unten)

Zur Messung des Höhenunterschiedes  $st_j$  wurde eine Holzleiste vorsichtig auf den Betonausbreitkuchen gelegt (Bild 3.7b) und der Höhenunterschied zwischen Beton und Holzleiste am Rand des Ringes bestimmt (Messpunkte Nr. 1 und 2 in Bild 3.8b). Diese Prozedur wurde dann in Querrichtung wiederholt (Messpunkte Nr. 3 und 4 in Bild 3.8b). Aus den vier ermittelten Höhenunterschieden wurde schließlich das arithmetische Mittel gebildet und mit  $st_j$  bezeichnet. Auch in [EFNARC, 2002] wird die Messung des Höhenunterschiedes zur Quantifizierung der Blockierneigung empfohlen.



**Bild 3.8:** a) Abmessungen des verwendeten Blockierringes mit 16 Stäben (Draufsicht); Länge der vertikalen Stahlstäbe: 125 mm; b) Position der Messpunkte

Zur Beurteilung der statischen Sedimentationsneigung wurden Betonzylinder ( $\varnothing = 150$  mm,  $h = 300$  mm) hergestellt. Das Befüllen der zylindrischen Schalungen erfolgte 30 Minuten nach Wasserzugabe über eine 1,5 m lange und um ca.  $20^\circ$  geneigte Rinne. Bis zum Einsetzen der Erhärtung wurden die Zylinder vor Erschütterungen geschützt, ehe sie am darauffolgenden Tag entschalt und entlang ihrer Längsachse zersägt wurden. Die Herstellung von Sedimentationskörpern bietet den Vorteil, dass neben der Verteilung der Grobzuschläge zusätzlich auch die Oberflächengüte anhand von Lufteinschlüssen beurteilt werden kann (Bild 3.9). Aufgrund zu geringer Fließfähigkeit füllte Beton A die zylindrische Schalung nur unzureichend aus. Beton B verfügte über optimale Fließeigenschaften bei gleichzeitig hoher Gefügestabilität. Dies äußerte sich durch eine homogene Grobzuschlagverteilung und nur wenigen Lufteinschlüssen an der Schalungsseite. Beton C weist zwar die geringsten Lufteinschlüsse an der Schalungsseite auf, er neigte jedoch offensichtlich deutlich zur Sedimentation (inhomogene Grobzuschlagverteilung).

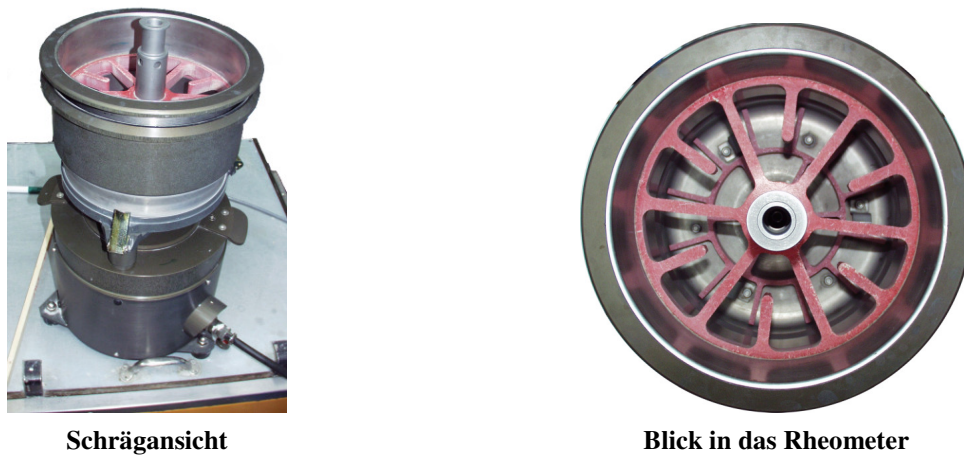


**Bild 3.9:** Beispiele hergestellter Betonzylinder zur Beurteilung der Sedimentationsneigung und der Oberflächengüte

### 3.3.3 Rheometrische Prüfverfahren für Beton (2-Punkt-Verfahren)

Sämtliche rheologischen Messungen an selbstverdichtendem Frischbeton wurden mit einem Parallel-Platten-Rheometer, dem sog. BTRHEOM (Bild 3.10), durchgeführt. Entwickelt worden ist dieses Gerät am LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) in Frankreich [LCPC, 2003].

Häufig kommen in der Frischbetonrheometrie auch so genannte Koaxial-Zylinder-Viskosimeter zum Einsatz, die sich vom BTRHEOM in der Art der Scherbeanspruchung unterscheiden. Eine Übersicht über weitere gebräuchliche Betonrheometer enthält beispielsweise [CHANG ET AL., 2002] und [FERRARIS ET AL., 2001]. Insbesondere in [FERRARIS ET AL., 2001] sind detaillierte Untersuchungen zum Vergleich rheologischer Kennwerte beschrieben, die mit unterschiedlichen Betonrheometern ermittelt worden sind. Einen Sonderfall unter den Betonrheometern stellt das so genannte Kugelfallviskosimeter dar, das in [BUCHENAU, 2004] beschrieben ist.

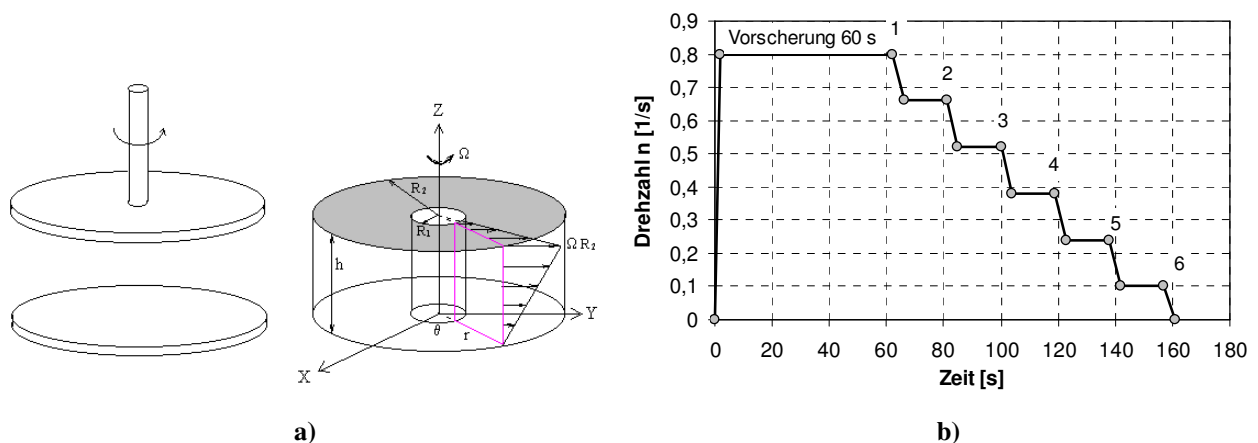


Schrägansicht

Blick in das Rheometer

**Bild 3.10: Betonrheometer „BTRHEOM“**

Beim Schervorgang wird durch den inneren rotierenden Zylinder und die damit fest verbundenen oberen Flügel theoretisch das in Bild 3.11a) dargestellte Geschwindigkeitsgefälle erzwungen; der Beton wird quasi tordiert. Damit wird der häufig bei Koaxial-Zylinder-Viskosimetern beobachtete so genannte „Plug Flow“, bei dem ganze Bereiche des Betons nicht geschert werden (vgl. auch Abschnitt 8), unterbunden [HU ET AL, 1996].



**Bild 3.11: a) Theoretisches Geschwindigkeitsfeld im Rheometer [DE LARRARD ET AL., 1998]  
b) Messzyklus BTRHEOM (schematisch)**

Befüllt wurde das Rheometer mit ca. 7 Liter SVB über eine ca. 1,5 m lange und um ca. 20° geneigte Rinne. Nach Befüllen des Rheometers wurde der automatische Messzyklus gestartet (Bild 3.11b). Dem eigentlichen Messvorgang ist eine etwa 60 s dauernde Rotationsbewegung bei konstanter Drehzahl vorgeschaltet, damit ein Strukturbruch herbeigeführt wird (siehe Abschnitt 2.5.1.1 Thixotropie sowie [LCPC, 2003]). Anschließend wird das Drehmoment stufenweise zwischen 0,8 und 0,1 s<sup>-1</sup> jeweils am Ende jeder 15-sekündigen Messphase ermittelt, weil in der Regel nach 15 s kein weiterer Abfall des Drehmomentes erfolgt.

Ausgewertet wurden 5 Messpunkte zwischen 0,8 und 0,24 s<sup>-1</sup>, da bei Drehzahlen von unter 0,2 s<sup>-1</sup> teilweise eine diskontinuierliche Bewegung zu beobachten war (Übergang zwischen Gleit-/Haftreibung im Bereich der Dichtungen). Aus der in Bild 3.11 gezeigten theoretischen Geschwindigkeitsverteilung kann die Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  mit Gl. (3.7) als Funktion des Radius  $r$ , der Behälterhöhe  $h$  und der Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  bzw. der Drehzahl  $n$  berechnet werden.

$$\dot{\gamma}(r) = \frac{\Omega r}{h} = \frac{2\pi n \cdot r}{h} \quad \text{für } r > R_1 \quad (3.7)$$

Eine Integration der Drehmomentbeiträge aller Oberflächenelemente der in Bild 3.11 grau dargestellten oberen kreisförmigen Fläche muss das gemessene Drehmoment  $\Gamma$  ergeben (Gl. (3.8)), wenn bei der Integration der Momentanteil des glatten vertikalen Gefäßteils gegenüber dem horizontalen Anteil aufgrund der dort angebrachten Flügel (Bild 3.10) vernachlässigt wird [DE LARRARD ET AL., 1998], [DE LARRARD ET AL., 1993].

Wird die aufgezeichnete Drehmoment-Drehzahl-Kurve durch die HERSCHEL-BULKLEY-Beziehung  $\Gamma = \Gamma_0 + A \cdot n^b$  approximiert und die Schubspannung entsprechend mit  $\tau = \tau_0 + a \cdot \dot{\gamma}^b$  angenommen, dann setzt sich das Gesamtmoment wie folgt zusammen:

$$\Gamma = \Gamma_0 + A \cdot n^b = \int_A \tau r dA = \int_{r=R_1}^{R_2} \tau 2\pi r \cdot r dr = \int_{r=R_1}^{R_2} (\tau_0 + a \cdot \dot{\gamma}^b) 2\pi r \cdot r dr \quad (3.8)$$

mit:

$\Gamma$	[Nm]	Drehmoment
$\Gamma_0$	[Nm]	Fließmoment
$A, b$	[variabel]	Parameter
$n$	[s <sup>-1</sup> ]	Drehzahl
$\tau$	[N/m <sup>2</sup> ] bzw. [Pa]	Schubspannung im Beton
$\tau_0$	[N/m <sup>2</sup> ] bzw. [Pa]	Fließgrenze des Betons
$h$	[m]	Höhe der Betonprobe, $h = 0,1$ m
$R_1$ bzw. $R_2$	[m]	Innerer bzw. äußerer Radius, $R_1 = 0,02$ m, $R_2 = 0,12$ m
$\dot{\gamma}$	[s <sup>-1</sup> ]	Schergeschwindigkeit

Wenn in Gl. (3.8) die Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  durch Gl. (3.7) ersetzt wird, folgt:

$$\Gamma = \Gamma_0 + A \cdot n^b = \int_{r=R_1}^{R_2} \left( \tau_0 + a \cdot \left( \frac{2\pi nr}{h} \right)^b \right) 2\pi r \cdot r dr \quad (3.9)$$

Die Integration liefert dann:

$$\begin{aligned} \Gamma_0 + A \cdot n^b &= \tau_0 \frac{2\pi}{3} [r^3]_{R_1}^{R_2} + \left( 2\pi \cdot a \left( \frac{2\pi n}{h} \right)^b \frac{1}{b+3} [r^{b+3}]_{R_1}^{R_2} \right) \\ \Gamma_0 + A \cdot n^b &= \tau_0 \frac{2\pi}{3} (R_2^3 - R_1^3) + \left( 2\pi \cdot a \left( \frac{2\pi n}{h} \right)^b \frac{1}{b+3} (R_2^{b+3} - R_1^{b+3}) \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Für die Fließgrenze  $\tau_0$  folgt für  $n = 0$  unmittelbar:

$$\tau_0 = \frac{3\Gamma_0}{2\pi(R_2^3 - R_1^3)} \quad (3.11)$$

$\Gamma_0$  ist dabei der  $\Gamma$ -Achsen-Schnittpunkt der approximierten Drehmoment-Drehzahl-Messkurve. Für ein HERSCHEL-BULKLEY-Fluid folgt für den Anteil  $a$  durch Umformen von Gl. (3.10):

$$a = \frac{A \cdot (b+3) \cdot h^b}{(2\pi)^{b+1} [R_2^{b+3} - R_1^{b+3}]} \quad (3.12)$$

Auch für den Sonderfall einer BINGHAM-Approximation ( $b = 1$ ) wird die Fließgrenze mit Gl. (3.11) berechnet. Da die plastische Viskosität  $\eta_{pl}$  definitionsgemäß der Steigung der Gerade im  $\tau \cdot \dot{\gamma}$ -Diagramm entspricht, ist der Faktor  $a$  für  $b = 1$  gerade mit der plastischen Viskosität  $\eta_{pl}$  identisch. Für  $A$  ist dann die Steigung der eingepassten Gerade im Drehmoment-Drehzahl-Schaubild einzusetzen.

$$\eta_{pl} = \frac{A \cdot h}{\pi^2 [R_2^4 - R_1^4]} = \frac{\frac{\partial \Gamma}{\partial n} \cdot h}{\pi^2 [R_2^4 - R_1^4]} \quad (3.13)$$

mit:

$\eta_{pl}$	[Pa.s] oder [Ns/m <sup>2</sup> ]	Plastische Viskosität
$\frac{\partial \Gamma}{\partial n}$	[Nm.s]	Steigung der Geraden im $\Gamma$ - $n$ -Diagramm

Insbesondere bei SVB birgt der BINGHAM-Ansatz die Gefahr negativer Fließgrenzen, die physikalisch jedoch nicht möglich sind. Durch eine Kurvenanpassung auf Basis des HERSCHEL-BULKLEY-Ansatzes kann dies zwar vermieden werden, hat jedoch den Nachteil, dass die Parameter  $A$  ( $a$ ) und  $b$  physikalisch nicht erklärbar sind. Daher kann es sinnvoll sein, im ersten Schritt eine Kurvenanpassung durch die HERSCHEL-BULKLEY-Beziehung vorzunehmen und in einem zweiten Schritt nach bestimmter Fließgrenze  $\Gamma_{0,HB}$  ( $\rightarrow \tau_{0,HB}$ ) eine weitere Kurvenanpassung nach dem BINGHAM-Ansatz durchzuführen (Bild 3.12), [DE LARRARD ET AL., 1998].

Zur Abgrenzung der ermittelten Kenngrößen wird die folgende Nomenklatur eingeführt:

Tabelle 3.6: Nomenklatur für verschiedene Fließkurvenapproximationen

$\Gamma$ - $n$ -Beziehung		$\tau$ - $\dot{\gamma}$ -Beziehung		
$\Gamma = \Gamma_{0,B} + A_B \cdot n$	$\Gamma_{0,B}$	$\tau = \tau_{0,B} + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$	$\tau_{0,B}$	Fließgrenze (BINGHAM)
	$A_B$		$\eta_{pl}$	Plastische Viskosität (BINGHAM)
$\Gamma = \Gamma_{0,HB} + A_{B'} \cdot n$	$\Gamma_{0,HB}$	$\tau = \tau_{0,HB} + \eta_{pl,HB} \cdot \dot{\gamma}$	$\tau_{0,HB}$	Fließgrenze (HERSCHEL-BULKLEY)
	$A_{B'}$		$\eta_{pl,HB}$	Plastische Viskosität (BINGHAM mit vorgeschalteter HERSCHEL-BULKLEY-Anpassung)

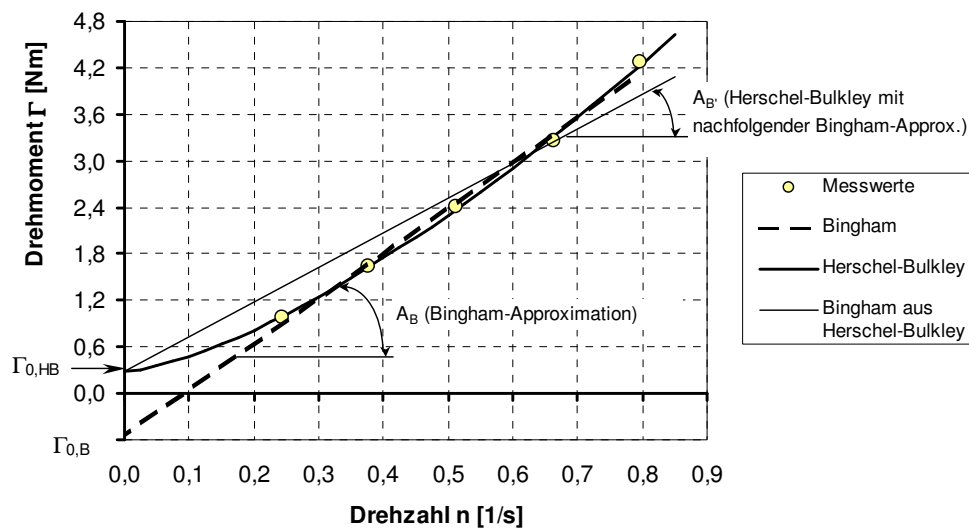


Bild 3.12: Beispiele zur Fließkurvenanpassung

Der Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Anpassungsmethoden erfolgt im Abschnitt 4.2. Durch die Umrechnung der Drehzahlen in Schergeschwindigkeiten ist ein Vergleich mit in der Literatur befindlichen Angaben möglich. REED [1995] gibt beispielsweise Anhaltswerte für auftretende Schergeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Verarbeitungsprozessen, wie etwa Pumpen und Mischen, an (Bild 3.13).

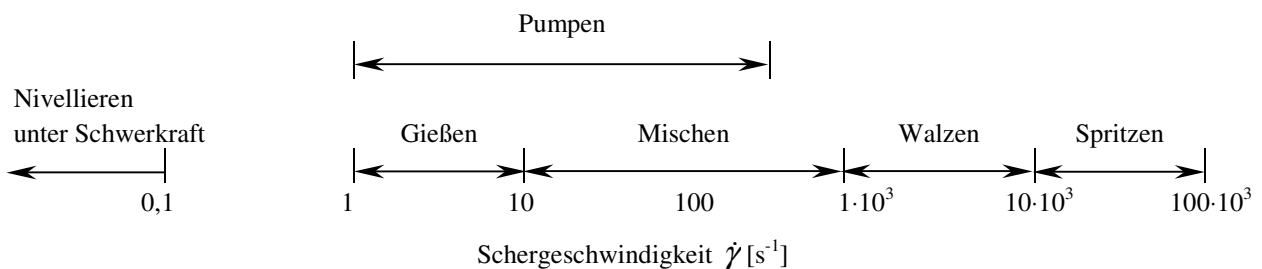


Bild 3.13: Schergeschwindigkeiten für verschiedene Verarbeitungsprozesse, nach REED [1995] in [SAAK ET AL., 2001]

Tabelle 3.7 enthält für Drehzahlen zwischen 0,2 und 0,8 s<sup>-1</sup> die zugehörigen maximalen Schergeschwindigkeiten  $\dot{\gamma}$  (berechnet für  $r = R_2$  nach Gl. (3.7)). Die in den Messungen verwendeten Drehzahlen decken damit die Bereiche „Nivellieren unter Schwerkraft“ und „Gießen“ in Bild 3.13 ab.

**Tabelle 3.7: Umrechnung der Drehzahlen  $n$  in Schergeschwindigkeiten  $\dot{\gamma}$**

Drehzahl	$n$	[s <sup>-1</sup> ]	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Schergeschwindigkeit ( $r = R_2$ )	$\dot{\gamma}$	[s <sup>-1</sup> ]	1,5	2,3	3,0	3,8	4,5	5,3	6,0

Im Rahmen des EU-Ringprojektes „Testing-SCC“ (GRD2-2000-20024) wurden im Teil 5 „Rheology“ die auftretenden Schergeschwindigkeiten bei den Standardprüfverfahren für Beton (Setzfließversuch, L-Kasten, Orimet und Trichterauslaufversuch) abgeschätzt, siehe hierzu [WALLEVIK ET AL., 2004]. Dabei ergab sich, dass die im Setzfließversuch auftretende Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}_{t_{500}}$  bei Erreichen der 500-mm-Markierung nach der folgenden Formel abgeschätzt werden kann:

$$\dot{\gamma}_{t_{500}} \approx \frac{15}{t_{500}} \quad (3.14)$$

mit:

$\dot{\gamma}_{t_{500}}$	[s <sup>-1</sup> ]	Schergeschwindigkeit im Setzfließversuch bei Erreichen der 500-mm-Markierung
$t_{500}$	[s]	Fließzeit im Setzfließversuch bis zum Erreichen der 500-mm-Markierung

Für typische selbstverdichtende Betone ergeben sich bei Fließzeiten zwischen 2 und 7 s (siehe Abschnitt 6.4) nach Gl. (3.14) Schergeschwindigkeiten  $\dot{\gamma}_{t_{500}}$  zwischen 7,5 und 2,1 s<sup>-1</sup>. Damit sind die im Setzfließversuch auftretenden Schergeschwindigkeiten – abhängig von der Zusammensetzung – etwa mit denen im Rheometersversuch vergleichbar.