

# Konsistenzprüfung von Frischbeton

Von Justus Bonzel und Jürgen Krell, Düsseldorf

## Übersicht

*Die Frischbetonverarbeitbarkeit ist im allgemeinen die für die Baustelle wichtigste Frischbetoneigenschaft. Sie wird in der Regel mit Hilfe der Konsistenz beurteilt.*

*Zur Konsistenzbestimmung des Frischbetons wurden viele z. T. unterschiedliche Verfahren entwickelt, die die Teilbereiche der Frischbetonverarbeitbarkeit unterschiedlich erfassen. Mit Hilfe von Frischbetonuntersuchungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie an rd. 1000 Betonen wurden für die im europäischen Bereich gebräuchlichen Konsistenzprüfverfahren Ausbreitmaß, Verdichtungsmaß, Setzmaß (Slump) und Vebe-Zeit der Anwendungsbereich und der Zusammenhang untereinander untersucht. Für Ausbreitmaß und Setzmaß wurde die Prüfgenauigkeit abgeschätzt. Es werden Empfehlungen für die Baupraxis über Eignung und Anwendungsbereich der Konsistenzprüfverfahren gegeben.*

## 1. Einleitung

Eine Voraussetzung für das Erreichen der gewünschten Gebrauchseigenschaften des erhärteten Betons ist eine Frischbetonbeschaffenheit, die einen sachgerechten Transport und Einbau des Frischbetons ohne wesentliche Veränderungen (z. B. Entmischen) gut ermöglicht. Die wichtigste Frischbetoneigenschaft ist daher im allgemeinen seine Verarbeitbarkeit. Sie wird von verschiedenen Eigenschaften, wie z. B. Zusammenhaltevermögen, Fließvermögen und Verdichtbarkeit, bestimmt.

Es ist notwendig, die Verarbeitbarkeit des Frischbetons den vorgesehenen Baumaßnahmen (feingliedrige Bauteile, vorhandenes Verdichtungsgerät) anzupassen; dafür ist die Verarbeitbarkeit durch aussagekräftige und reproduzierbare Kenngrößen festzulegen. Da die Gesamtheit der Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons bislang nicht mit praktikablen einfachen Meßgrößen (wie z. B. Viskosität oder Scherkraft) ausreichend geprüft werden kann, hat man sich darauf beschränkt, die Frischbetonkonsistenz zu prüfen. Dafür wurden in der Vergangenheit zahlreiche mehr oder weniger einfache Prüfverfahren entwickelt, die z. T. sehr unterschiedlich auf Teilbereiche der Verarbeitbarkeit ansprechen. Diese Prüfverfahren sollen möglichst einfach und für den jeweiligen Anwendungsfall möglichst aussagekräftig und reproduzierbar sein.

Im deutschen und europäischen Bereich kommen zur Kennzeichnung der Frischbetonkonsistenz überwiegend das Ausbreitmaß nach DIN 1048 Teil 1, das Verdichtungsmaß nach DIN 1048 Teil 1 oder ISO 4111, das Setzmaß (Slump) nach ISO 4109 oder die Vebe-Zeit nach ISO 4110 zur Anwendung. Da diese vier Prüfverfahren verschiedene Teilbereiche der Verarbeitbarkeit unterschiedlich erfassen, sind eine Identität der Aussage und eine allgemeingültige Korrelation zwischen den Ergebnissen dieser Prüfverfahren nicht zu erwarten.

In der vorliegenden Arbeit sollen diese Prüfverfahren hinsichtlich Anwendbarkeit, Aussagekraft und Genauigkeit miteinander verglichen, mögliche Zusammenhänge der Ergebnisse der unterschiedlichen Konsistenzprüfverfahren dargestellt und daraus Empfehlungen für die Baupraxis abgeleitet werden.

## 2. Stand der Erkenntnisse

### 2.1 Allgemeines

In der Vergangenheit wurden über 50 verschiedene Konsistenzprüfverfahren für Frischbeton entwickelt [1 bis 41]. Die bekanntesten Prüfverfahren lassen sich gemäß ihrem Grundprinzip in sechs Gruppen einteilen, siehe Tafel 1. Im folgenden werden davon ausschließlich die Verfahren Ausbreitmaß, Verdichtungsmaß, Setzmaß und Vebe-Zeit behandelt, die in Deutschland und Europa überwiegend verwendet werden.

### 2.2 Kurzbeschreibung der Verfahren

Bei der Bestimmung des *Ausbreitmaßes* wird ein in 2 Schichten eingefüllter und durch je 10 leichte Stöße mit einem Holzstamper verdichteter Betonkegelstumpf ( $d_o = 13 \text{ cm}$ ,  $d_u = 20 \text{ cm}$ ,  $h = 20 \text{ cm}$ ) nach Abziehen der Form auf einem Klapp Tisch einer 15maligen definierten Beanspruchung unterworfen. Als Ausbreitmaß gilt der mittlere Durchmesser in cm (2 Messungen parallel zu den Tischkanten) des dabei entstandenen Betonkuchens (Bild 1 a). Das Verfahren wird vorzugsweise für plastische und weiche Betone angewendet, nicht aber für steife Betone, weil dabei der Betonkegelstumpf zerfällt und sich kein geschlossener Betonkuchen ergibt.

Das *Verdichtungsmaß* stellt den Quotienten aus dem Volumen bei definierter loser Schüttung des Frischbetons in einer Kastenform (20 cm x 20 cm,  $h = 40 \text{ cm}$ ) und dem Volumen bei praktisch vollständiger Verdichtung des Betons durch Rütteln dar. Die erforderliche Rüttelzeit wird dabei nicht erfaßt (Bild 1 b).

Als *Setzmaß* (Slump) wird die Verminderung der Höhe eines in 3 Schichten mit jeweils 25 definierten Stößen verdichteten Betonkegelstumpfes ( $d_o = 10 \text{ cm}$ ,  $d_u = 20 \text{ cm}$ ,  $h = 30 \text{ cm}$ ) bestimmt, die sich durch Verformung des Kegelstumpfes nach dem Abziehen der Form ergibt (Bild 1 c).

Die *Vebe-Zeit* ist die Zeit in Sekunden, die erforderlich ist, um einen leicht verdichteten Kegelstumpf (Setzmaß-Kegelstumpf) nach dem Abziehen der Form unter definierter Auflast auf einem vorgegebenen Rütteltisch in einen Zylinder mit einem Durchmesser von 24 cm

Tafel 1 Verfahren der Konsistenzprüfungen für Frischbeton und Beispiele

Verdichtungsversuch	Ausbreitversuch	Setzversuch	Umformversuch	Fließversuch	Eindringversuch
Verdichtungsmaß nach Walz [1] Compactingfactor nach BS 1881 [2]	Ausbreitversuch nach Graf [3] Flow ASTM C 124 [4]	Setzmaß (Slump) nach Abrams [5]	Powers [6] Vebe-Gerät nach Bährner [7]	Rohrgerät nach Nycander [8] Trichtersteife nach Pilny [9] Auslaufzeit nach Werse [10]	Betonsonde nach Humm [11] Eindringversuch nach Graf [12] Eindringzeit nach Vasilu [13]

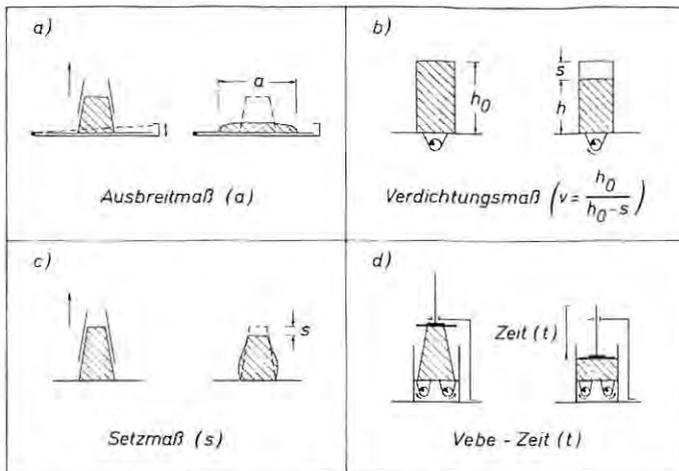


Bild 1 Schematische Darstellung der Konsistenzprüfverfahren

umzuformen. Als Beurteilungskriterium dient die vollständige Benetzung der durchsichtigen Auflageplatte (Bild 1 d).

### 2.3 Reproduzierbarkeit der Konsistenzprüfverfahren

Über die Reproduzierbarkeit der genannten vier Konsistenzprüfverfahren finden sich in der Literatur nur wenige Angaben. Für das Verdichtungsmaß  $v$  fand Walz [1] bei jeweils 8 Messungen an einem steifen Beton ( $v = 1,44$ ) und an einem plastischen Beton ( $v = 1,22$ ) mit einem Zementgehalt von  $270 \text{ kg/m}^3$  und Kiessandzuschlag der Sieblinie A/B 32 für die Wiederholprüfstreuung eine Standardabweichung von 0,02. Nach Banfill [14 a] beträgt die Standardabweichung für das Setzmaß 1,1 cm und für die Vebe-Zeit rund 25 % des jeweiligen Meßwertes. Für den Compacting-Factor (siehe Tafel 1), der dem Verdichtungsmaß sehr ähnlich ist, wird eine Standardabweichung von 0,024 angegeben. Über die geprüften Betone und die Anzahl der Versuche enthält [14a] keine Angaben.

Dratva [16] fand bei 5 Wiederholungsprüfungen mit den vier Konsistenzprüfverfahren nach Abschnitt 2.2 eine Abweichung der Einzelergebnisse vom Mittelwert von  $\pm 3$  bis 5 %. Auch dieser Bericht enthält keine Angaben über die geprüften Betone und Konsistenzbereiche.

### 2.4 Vergleich der Verfahren

Die Wirkungsweise der Verfahren wird in der Literatur nicht beschrieben. Es finden sich dort lediglich Angaben, daß das Ausbreitmaß überwiegend für weichere Betone anwendbar ist, während die drei anderen Verfahren für den gesamten Konsistenzbereich verwendet werden können. Dabei werden keine Angaben hinsichtlich

der Aussagekraft der Prüfverfahren im jeweiligen Konsistenzbereich gemacht.

Die Literatur enthält jedoch tendenzielle Angaben über den Zusammenhang zwischen den Prüfergebnissen der verschiedenen Verfahren in Form von Kurven oder Kurvenbereichen. Zum Beispiel werden Ausbreitmaß und Verdichtungsmaß in [ 1, 8, 9, 17 und 18], Setzmaß und Verdichtungsmaß in [8, 9 und 19], Vebe-Zeit und Verdichtungsmaß in [19] und Setzmaß und Vebe-Zeit in [9 und 22 bis 27] vergleichend gegenübergestellt. Der prinzipielle Verlauf der je Kombination angegebenen Zusammenhänge ist ähnlich, jedoch ergibt sich bei der Zusammenstellung aller Literaturangaben je Kombination ein sehr breiter Streubereich, der möglicherweise auf unterschiedliche, zumeist nicht angegebene Betonzusammensetzungen zurückzuführen ist.

### **3. Aufgabe und Umfang der Untersuchungen**

Zur weiteren Klärung der Aussagekraft der vier Konsistenzprüfverfahren des Abschnitts 2.2 (Ausbreitmaß, Verdichtungsmaß, Setzmaß und Vebe-Zeit) sowie eines Zusammenhangs zwischen diesen vier Konsistenzprüfverfahren wurden die Konsistenzergebnisse von rd. 1000 Betonen verschiedener Ausgangsstoffe, Zusammensetzung und Konsistenz der Untersuchungen ausgewertet, die seinerzeit zur Frage des Wasseranspruchs des Frischbetons im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführt wurden [28].

Von den damals untersuchten Betonen wurden jedoch nur die Betone mit Rheinkiessand der Korngruppen 0/8, 0/16, 0/32 und 0/63 mm aus dem Raum Düsseldorf in die Gesamtauswertung einbezogen. Der gesamte Konsistenzbereich K 1, K 2, K 3 und weicher als K 3 wurde dabei erfaßt.

Um auch einen Anhalt über die Reproduzierbarkeit der Konsistenzbestimmung zu erhalten, wurden als Ergänzungsversuche für das Ausbreitmaß und das Setzmaß an einigen Betonen auch Wiederholungsversuche bei einer und mehreren Betonherstellungen sowie mit derselben und mit verschiedenen Laborantengruppen durchgeführt.

### **4. Durchführung der Untersuchungen**

#### **4.1 Ausgangsstoffe**

Für die Herstellung der in die Auswertung einbezogenen Betone aus [28] wurden drei Zemente verschiedener Art und Festigkeitsklasse (PZ 35 F, PZ 55 und HOZ 35 L) verwendet, für die orientierenden Ergänzungsversuche eine spätere Lieferung des PZ 35 F. Die Zemente entsprachen DIN 1164, ihre wichtigsten Kenndaten sind in Tafel 2 zusammengestellt.

Als Betonzuschlag kamen Rheinkiessand der Korngruppen 0/2, 1/2, 2/8, 8/16, 16/32 und 32/63 mm aus dem Raum Düsseldorf sowie Quarzmehl 0/0,2 mm aus dem Raum Köln zur Anwendung.

Tafel 2 Zemente nach DIN 1164

Eigenschaften nach DIN 1164		Zement			
		Werk M		Werk S	Werk D
		PZ 35 F 1 nach [28]	PZ 35 F 1a Ergän- zungs- versuche	PZ 55 2 nach [28]	HOZ 35 L 3 nach [28]
Spezifische Ober- fläche n. Blaine	cm <sup>2</sup> /g	2900	3050	6000	3800
Wasseranspruch	Gew.-%	25,0	24,5	36,0	29,0
Hüttensandgehalt	Gew.-%	–	–	–	rd. 60
28-Tage- Druckfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	50	50	61	47

#### 4.2 Zusammensetzung, Herstellung und Prüfung des Betons

Die Betone wurden mit Zementgehalten von 240, 270, 300, 330, 360 und 400 kg/m<sup>3</sup> und Zuschlaggemischen 0/8, 0/16, 0/32 und 0/63 mm nach DIN 1045 hergestellt. Der Wassergehalt wurde so variiert, daß die Konsistenzbereiche K 1 bis K 3 nach DIN 1045 voll abgedeckt waren. Zum Teil wurden auch etwas weichere Konsistenzen erreicht. Dabei ergaben sich Wasserzementwerte zwischen 0,35 und 1,00. Die Betonzusammensetzungen für die Ergänzungsversuche gehen aus Tafel 3 hervor.

Tafel 3 Betonzusammensetzung für die Ergänzungsversuche (Zement 1a nach Tafel 2, Sieblinie A/B 32)

Beton	Zementgehalt kg/m <sup>3</sup>	w/z – Wert
1	330	0,50
2	360	0,50
3	360	0,54

Der Beton wurde in Chargen von 30 l Festbeton in einem 150-l-Tellermischer, bei den Ergänzungsversuchen in einem 50-l-Tellermischer 120 Sekunden gemischt. Die Frischbetontemperatur betrug  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Nahezu gleichzeitig wurden etwa 10 Minuten nach der Betonherstellung das Ausbreitmaß und das Verdichtungsmaß sowie rd. 13 Minuten nach der Betonherstellung das Setzmaß und die Vebe-Zeit gemäß den entsprechenden Prüfvorschriften bestimmt. Die Prüfergebnisse gehen aus den Bildern 2 bis 7 hervor.

In Ergänzungsversuchen wurden an den drei Betonen nach Tafel 3 – beginnend etwa 4 Minuten nach Mischende – gleichzeitig von zwei

Tafel 4 Prüfstreuung bei der Bestimmung des Ausbreitmaßes für die Betone nach Tafel 3

Ausbreitmaße in cm nach DIN 1048 Teil 1										
Herstellung	Laborantenteam	Beton 1 nach Tafel 3			Beton 2 nach Tafel 3			Beton 3 nach Tafel 3		
		Meßzeitpunkt			Meßzeitpunkt			Meßzeitpunkt		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1	35	34	35	42	39	39	48	47	43
	2	36	33	35	45	41	39	49	47	45
2	1	35	35	33	41	39	37	48	47	47
	2	35	34	33	42	39	38	51	51	46
3	1	32	33	34	41	38	37	48	48	44
	2	35	34	35	41	37	38	50	48	45
Mittelwert		35	34	34	42	39	38	49	48	45
Standardabweichung		1,4	0,8	1,0	1,5	1,3	0,9	1,3	1,6	1,4
Gesamtmittel		34			40			47		
Mittelwert der Standardabweichung		1,0			1,2			1,4		
Variationskoeffizient (gemittelt) %		3,0			3,0			3,0		

Tafel 5 Prüfstreuung bei der Bestimmung des Setzmaßes für die Betone nach Tafel 3

Setzmaß in cm nach ISO 4109										
Herstellung	Laborantenteam	Beton 1 nach Tafel 3			Beton 2 nach Tafel 3			Beton 3 nach Tafel 3		
		Meßzeitpunkt			Meßzeitpunkt			Meßzeitpunkt		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1	6,3	3,7	3,0	18,5	16,0	(20,5)*	20,0	19,0	17,7
	2	6,0	3,4	3,9	19,6	15,2	10,3	21,8	18,5	20,9
2	1	8,0	4,3	3,9	14,5	17,3	8,8	19,0	18,8	20,5
	2	(19,0)*	6,0	3,6	15,2	15,0	12,3	18,7	19,3	18,1
3	1	9,9	6,1	4,7	16,0	10,4	15,0	20,4	19,5	15,5
	2	7,0	5,7	4,5	17,8	13,8	10,5	20,7	18,8	16,5
Mittelwert		7,4	4,9	3,9	17	15	11	20	19	18
Standardabweichung		1,6	1,2	0,6	2,0	2,4	2,4	1,1	0,4	2,2
Gesamtmittel		5,3			14			19		
Mittelwert der Standardabweichung		1,1			2,3			1,2		
Variationskoeffizient (gemittelt) %		21			16			6,3		

\*) zerfallen, nicht bei Mittelwert und Standardabweichung berücksichtigt

Laborantengruppen zunächst das Setzmaß und unmittelbar danach das Ausbreitmaß ermittelt. Am Beton derselben Mischerfüllung wurden diese Konsistenzbestimmungen von beiden Laborantengruppen rd. 10 und 16 Minuten nach Mischende wiederholt. Der gesamte Prüfvorgang wurde mit denselben Laborantengruppen an erneut hergestellten Betonen noch 2mal wiederholt. Die Prüfergebnisse sind für das Ausbreitmaß in Tafel 4 und für das Setzmaß in Tafel 5 zusammengestellt.

## 5. Erörterung der Ergebnisse

### 5.1 Allgemeines

Bei den in die Auswertung einbezogenen Betonen lagen die gefundenen Werte für das Ausbreitmaß zwischen 26 und 55 cm, für das Verdichtungsmaß zwischen 1,00 und 1,58, für das Setzmaß zwischen 0 und 19 cm und für die Vebe-Zeit zwischen 0 und 25 Sekunden.

Die Prüfergebnisse sind für Ausbreitmaß und Verdichtungsmaß in Bild 2, für Vebe-Zeit und Verdichtungsmaß in Bild 3, für Setzmaß und Ausbreitmaß in Bild 5, für Vebe-Zeit und Ausbreitmaß in Bild 6 sowie für Setzmaß und Vebe-Zeit in Bild 7 aufgetragen. Bei den jeweiligen Darstellungen der Ergebnisse derjenigen Konsistenzbereiche, in denen beide betrachteten Prüfverfahren ganz oder teilweise anwendbar sind (vorwiegend Bilder 2, 3, 4 und 5), ergeben sich relativ breite Streubreiche, die nur die Tendenz eines Zusammenhangs erkennen lassen. Die Streubreite der Ergebnisse ist dabei erwartungsgemäß in den Konsistenzbereichen gering, in denen jeweils nur eines der beiden Prüfverfahren anwendbar ist (z. B. Bilder 3 und 7).

Die bei diesen Versuchen gefundenen Streubreiche überdecken die in der Literatur angegebenen Kurvenbereiche weitgehend. Ein-

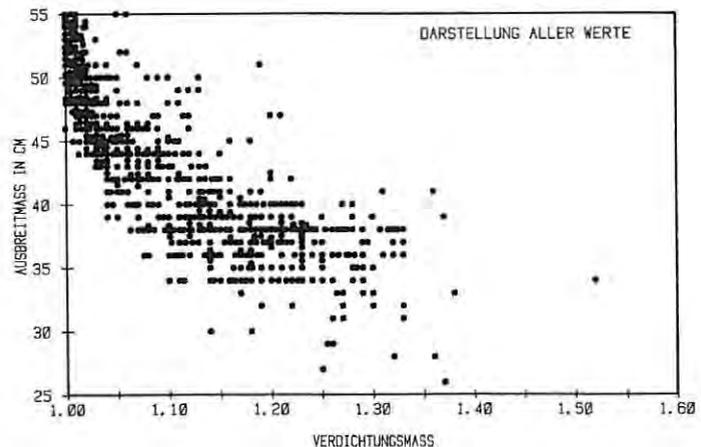


Bild 2 Ergebnisse für Ausbreitmaß und Verdichtungsmaß

zige Ausnahme bildet der Vergleich von Setzmaß und Vebe-Zeit (Bild 7), dabei wurden in der Literatur z. T. längere Vebe-Zeiten bei Setzmaßen unter 10 cm, d. h. im Bereich der plastischen Betone, gefunden.

## 5.2 Eignung der Verfahren zur Konsistenzbeurteilung

Aus den in den Bildern 2 bis 7 dargestellten Zusammenhängen läßt sich abschätzen, für welche Konsistenzbereiche die einzelnen Prüfverfahren grundsätzlich geeignet sind und welches der geeigneten Verfahren die jeweilige Konsistenz zutreffender beschreibt. Die Veränderung der Neigung des tendenziellen Kurvenverlaufs ermöglicht eine Abschätzung darüber, welches der jeweils verglichenen Konsistenzprüfverfahren das Betonverhalten besser spreizt und damit eine differenziertere Beurteilung der Konsistenz erlaubt.

Die Darstellung von Ausbreitmaß und Verdichtungsmaß (Bild 2) zeigt einen gekrümmten Kurvenverlauf, der sich für die weicheren Betonkonsistenzen der Ordinate (Ausbreitmaß) und für die steiferen Konsistenzen einer Parallelen zur Abszisse (Verdichtungsmaß) nähert. Daraus ist abzuleiten, daß für weichere Betone (Verdichtungsmaß unter 1,10) das Ausbreitmaß und für steifere Betone (Ausbreitmaß unter etwa 40 cm) das Verdichtungsmaß die bessere Beurteilung des Betonverhaltens erlaubt. Verdichtungsmaße unter 1,04 sollten zur Beurteilung der Frischbetonkonsistenz nicht herangezogen werden, da das Verdichtungsmaß in diesem Konsistenzbereich praktisch keine Differenzierung des Betonverhaltens ermöglicht. Die Beurteilung der Frischbetonkonsistenz mit Hilfe von Ausbreitmaßen unter 35 cm ist nur bei Betonen mit sehr gutem Zusammenhaltevermögen möglich.

Der Kurvenverlauf bei der Darstellung von Setzmaß und Verdichtungsmaß (Bild 3) entspricht im Grundsatz dem in Bild 2, d. h. die Frischbetonkonsistenz wird bei weicheren Betonen besser mit dem

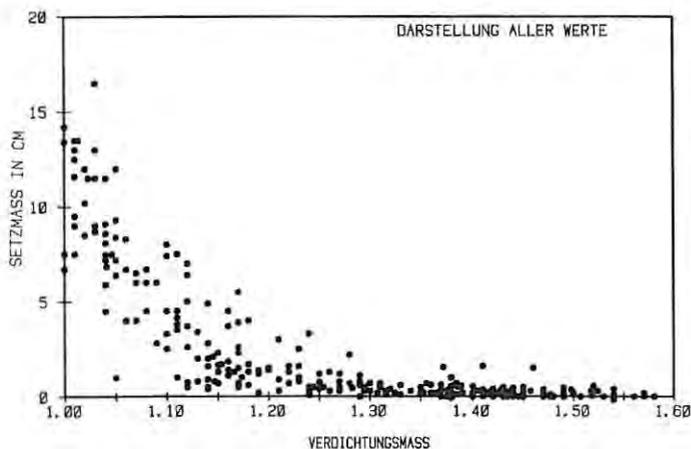


Bild 3 Ergebnisse für Setzmaß und Verdichtungsmaß

Setzmaß und bei steiferen besser mit dem Verdichtungsmaß gekennzeichnet. Die Streubreite des Zusammenhangs ist hier jedoch kleiner als in Bild 2. Dies ist überwiegend auf den relativ geringen gemeinsamen Anwendungsbereich der beiden Verfahren zurückzuführen, allerdings liegen hier im Vergleich zu Bild 2 auch weniger Meßwerte vor. Das Setzmaß erlaubt bei Werten unter etwa 2 cm keine Differenzierung des Betonverhaltens, da der Meßwert hier in der Größenordnung der Prüfstreuung (Abschnitt 5.3) liegt. Für Betone mit Setzmaßen über etwa 7 cm ist jedoch das Verdichtungsmaß ( $v \leq 1,04$ ) für die Beurteilung des Frischbetonverhaltens nicht mehr geeignet, so daß hier nur ein relativ enger gemeinsamer Konsistenzbereich verbleibt, in dem beide Verfahren sinnvoll anzuwenden sind.

Wie aus Bild 4 hervorgeht, sind Vebe-Zeit und Verdichtungsmaß gleichgerichtet, ihre Kennwerte steigen mit steiferer Konsistenz. Die mit beiden Verfahren erfaßbaren Konsistenzbereiche überdecken sich weitgehend. Der tendenzielle Kurvenverlauf macht aber deutlich, daß für plastische Konsistenzen bis etwa einem Verdichtungsmaß unter 1,35 das Verdichtungsmaß und für steifere Betone mit einer Vebe-Zeit über etwa 8 Sekunden die Vebe-Zeit die Frischbetonkonsistenz zutreffender beschreibt.

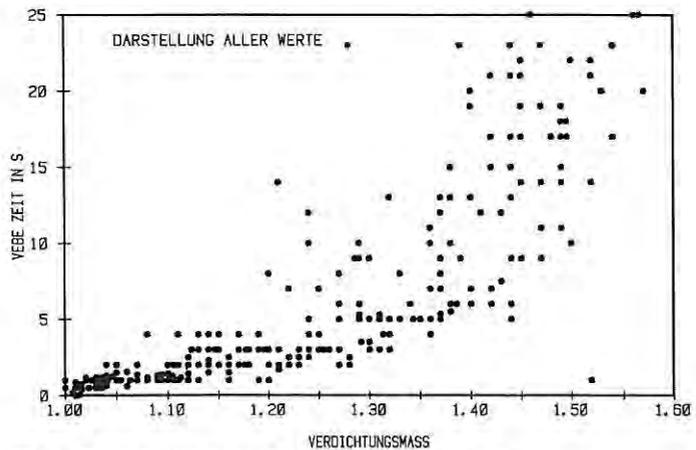


Bild 4 Ergebnisse für Vebe-Zeit und Verdichtungsmaß

Bild 5 zeigt, daß auch Setzmaß und Ausbreitmaß gleichgerichtet sind. Es wurde ein etwa linearer Zusammenhang der beiden Konsistenzmaße, die mit steifer werdender Konsistenz steigen, gefunden. Beide Verfahren eignen sich zur Beurteilung der plastischen bis weichen Frischbetonkonsistenz. Die Darstellung erlaubt keine gesicherte Aussage darüber, welches der beiden Verfahren sich für die Konsistenzbeurteilung besser eignet (siehe Abschnitt 5.3.2).

Die Darstellung der Ergebnisse von Vebe-Zeit und Ausbreitmaß (Bild 6) läßt einen nutzbaren Zusammenhang der beiden Prüfverfahren nicht erkennen. Dies ist auch zu erwarten, da mit Hilfe der

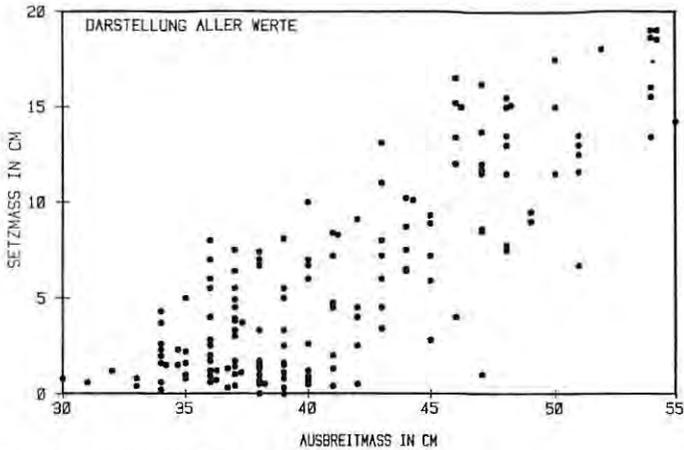


Bild 5 Ergebnisse für Setzmaß und Ausbreitmaß

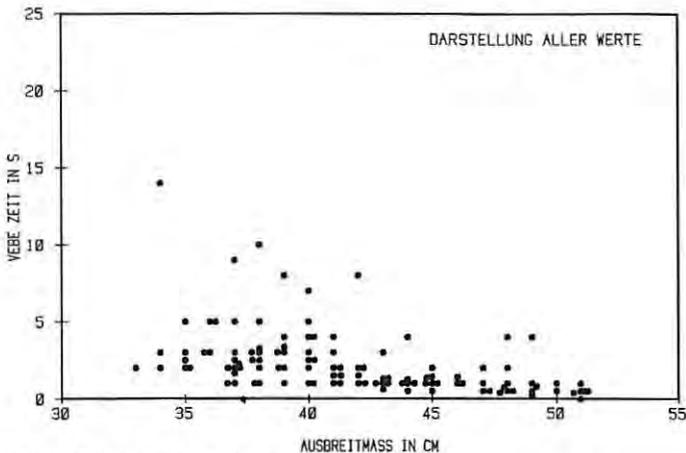


Bild 6 Ergebnisse für Vebe-Zeit und Ausbreitmaß

Vebe-Zeit primär die Konsistenz von steifen Betonen erfaßt werden kann, während durch das Ausbreitmaß mehr die plastischen und weichen Betone erfaßt werden können. Somit besteht praktisch keine nutzbare Überdeckung der Anwendungsbereiche dieser beiden Verfahren.

Das gleiche gilt im Grundsatz für die Gegenüberstellung von Setzmaß und Vebe-Zeit (Bild 7). Der nahe am Koordinatenursprung verlaufende Kurvenbereich mit sehr kleiner Streubreite läßt zunächst einen engen Zusammenhang der beiden Verfahren vermuten, der aber nicht gegeben ist. Das Bild zeigt vielmehr, daß ein sich überdeckender Anwendungsbereich der beiden Konsistenzprüfverfahren nicht existiert. Für steifere Betone mit Vebe-Zeiten zwischen 2,5

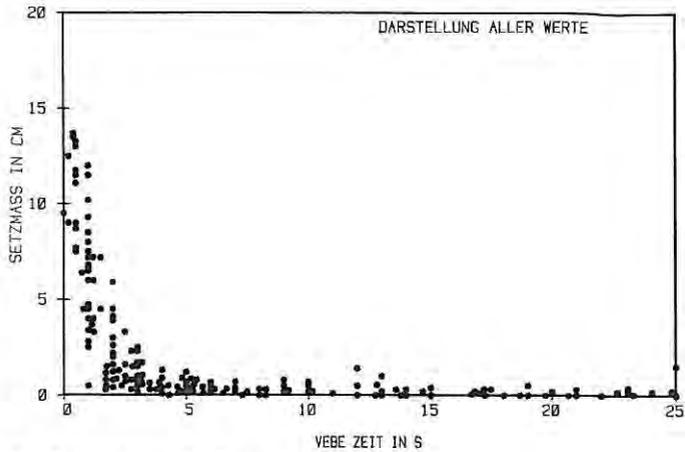


Bild 7 Ergebnisse für Setzmaß und Vebe-Zeit

bis 25 Sekunden liegt das Setzmaß mit Werten aller unter 2 cm im Bereich der Prüfstreuung, während für weichere Betone mit einem Setzmaß von 2 bis 15 cm die Vebe-Zeit unter 2,5 Sekunden, d. h. im Bereich der Prüfstreuung, liegt.

Die Folgerungen aus den obengenannten Ergebnissen und aus den Auswertungen der Bilder 2 bis 7 sind in Tafel 6 zusammengestellt. Die Tafel enthält Angaben über die Eignung der Verfahren für die

Tafel 6 Eignung und Anwendungsbereiche der Konsistenzprüfverfahren

Beschreibung der Frischbetonkonsistenz	erdfeucht	steif	plastisch		weich	fließfähig
			schwach	gut		
Konsistenzbereich nach DIN 1045						
Ausbreitmaß [cm]		~30	35	40	50	60
Verdichtungsmaß [-]	> 1.50	1.45	(1.25*) 1.25	1.11	1.04	
Setzmaß [cm]			1	5	15	20
Vebe - Zeit [s]	> 25	15	3	1		
*) nach DIN 1045						

verschiedenen Konsistenzbereiche; dabei wurde zwischen „bedingt geeignet“, „geeignet“ und „gut geeignet“ unterschieden. Voraussetzung für die Beurteilung eines Meßergebnisses mit einem bestimmten Prüfverfahren gemäß Tafel 6 ist, daß das Konsistenzergebnis nicht aufgrund eines unsachgerechten Versuchsablaufes, wie z.B. Zerfallen des Kegelstumpfes beim Bestimmen des Ausbreitmaßes oder des Setzmaßes, zustande gekommen ist.

### 5.3 Genauigkeit der Verfahren

#### 5.3.1 Allgemeine Versuchserfahrung

Das *Ausbreitmaß* stellt ein relativ einfaches Konsistenzprüfverfahren dar, welches neben einem Konsistenzmaß die visuelle Beurteilung des Zusammenhaltevermögens des Betons ermöglicht. Die Beurteilung der Frischbetonkonsistenz durch das Ausbreitmaß ist nur sinnvoll, wenn sich beim Ausbreiten ein stets geschlossener „Betonkuchen“ ergibt. Die Entscheidung, ob ein Zerfallen des Kegelstumpfes aufgetreten ist, kann z. T. schwierig sein, da es Grenzzustände zwischen plastischem Verformen und Zerfallen gibt. Diejenigen Meßwerte, bei denen ein Auseinanderkippen während des Versuchs (z. B. auch beim ersten Schlag) auftritt, sollten verworfen werden. Ferner sollte der Meßwert durch eine Wiederholungsprüfung überprüft werden, wenn die beiden ermittelten Durchmesser um mehr als 5 cm voneinander abweichen, da derartige Unterschiede auf ein leichtes Zerfallen oder unsachgemäßes Herstellen des Betonkegelstumpfes schließen lassen, wodurch der Meßwert z. T. erheblich verändert werden kann.

Das *Setzmaß* ist sehr einfach zu prüfen und im angloamerikanischen Bereich sehr verbreitet. In der Regel genügt es jedoch nicht, ausschließlich die Verminderung der Höhe des Kegels in der Kegelmittle zu bestimmen. Hierbei muß vielmehr das Verformungsverhalten des Kegels berücksichtigt werden, da zumeist nicht rotations-symmetrische Verformungen auftreten. Bild 8 zeigt schematisch sechs Grundfälle der Verformung des Setzmaßes. Rutscht der Betonkegel, wie in „e“ dargestellt, einseitig ab oder fällt er um, so ist die Bestimmung des Setzmaßes nicht sinnvoll. Dies gilt auch für den Fall „d“, weil eine scharfe Trennung zwischen halbseitigem Abrutschen „d“ und einseitigem Abrutschen „e“ nicht möglich ist und eine nicht sachgerechte Herstellung des Betonkegelstumpfes die Ursache sein könnte. Für die Fälle „a“ und „f“ ist das Setzmaß zur Beurteilung der Konsistenz nicht geeignet, weil der Kegelstumpf ab einer gewissen steifen Konsistenz unverformt stehenbleibt (Null-Slump-Beton „a“) und ab einer bestimmten Fließfähigkeit stets völlig auseinanderläuft (Collapse-Slump „f“).

Die Differenzierung der Konsistenz ist mit dem *Verdichtungsmaß* bei sehr weichem Beton nur beschränkt und bei fließfähigem Beton nur unzureichend möglich. Das Verfahren wird überwiegend in Labors angewendet.

Bei der Bestimmung der *Vebe-Zeit* muß visuell das vollständige Benetzen der durchsichtigen Kunststoffplatte festgestellt werden. Bei steiferen Betonen, für die das Verfahren gedacht ist (Abschnitt 5.2),

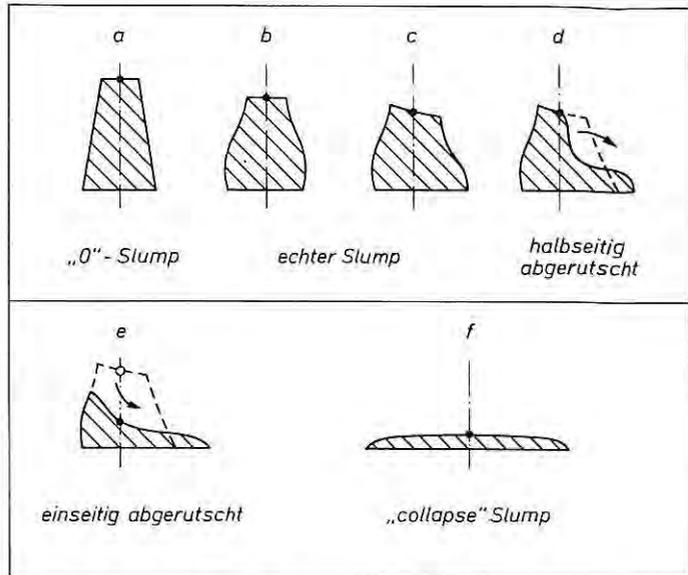


Bild 8 Ausbildungsformen des Setzmaß-Kegelstumpfes

ist die Beurteilung der vollständigen Benetzung oft problematisch, da bei leimarmen Mischungen je nach Art des „Zusammensackens“ des Setzmaß-Kegelstumpfes stets Hohlräume unter der Auflageplatte verbleiben. Dadurch ergibt sich eine gewisse Prüfunsicherheit, die große Streuungen zur Folge haben kann.

### 5.3.2 Prüfstreuungen

Für die Verfahren Ausbreitmaß und Setzmaß, deren sinnvoll nutzbarer Meßbereich die üblichen Baustellenkonsistenzen abdeckt, wurde die Prüfstreuung mit einer orientierenden Versuchsreihe (siehe Abschnitt 4.2) abgeschätzt. Dabei ist die Konsistenz von Beton 2 etwas steifer und die von Beton 3 etwas weicher als die für üblichen Beton empfohlene Regelkonsistenz (Ausbreitmaß  $45 \pm 3$  cm).

Wie aus den Tafeln 4 und 5 hervorgeht, zeigen Ausbreitmaß und Setzmaß der Meßzeitpunkte 1, 2 und 3, die im Mittel 4, 10 bzw. 16 Minuten nach dem Mischende liegen, durchweg ein während der ersten Minuten nach der Betonherstellung übliches Ansteifen des Betons. Um diesen systematischen Einfluß des Werkstoffverhaltens nicht bei der Ermittlung der Prüfstreuung zu erfassen, wurden jeweils die sechs zeitgleichen Messungen aus drei Betonherstellungen und zwei parallelen Bestimmungen in die statistische Auswertung mit Mittelwert und Standardabweichung einbezogen. Zur Einbindung der 18 erfaßten Meßwerte je Betonzusammensetzung wurde der Mittelwert aller Meßwerte und der Mittelwert der drei gefundenen Einzelstandardabweichungen für die drei Meßzeitpunkte berechnet und in den Tafeln mitangegeben.

Für das Ausbreitmaß der 3 untersuchten Betone mit den mittleren Ausbreitmaßen 34, 40 und 47 cm zeigt Tafel 4, daß die über die 3 Meßzeitpunkte je Beton gemittelte Standardabweichung mit weicher werdender Frischbetonkonsistenz von 1,0 auf 1,4 cm zunimmt. Die auf das zugehörige mittlere Ausbreitmaß bezogene Standardabweichung (mittlerer Variationskoeffizient) ist für die 3 Betone mit rd. 3 % konstant.

Eine systematische Beeinflussung der Ergebnisse durch Wiederhol- (mehrere Betonherstellungen) und Vergleichsstreuung (verschiedene Laborantengruppen) kann aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden, da die Spannweite, d. h. der Unterschied zwischen Größt- und Kleinstwert, sowohl beim Vergleich der drei Betonherstellungen für jeweils eine Laborantengruppe als auch beim Vergleich der zwei Laborantengruppen für jeweils eine Betonherstellung sowie beim Gesamtvergleich aller zusammengehörigen Ergebnisse stets 4 cm beträgt.

Für das Setzmaß der drei untersuchten Betone mit den mittleren Setzmaßen 5,3, 14 und 19 cm zeigt die Tafel 5, daß die über die drei Meßzeitpunkte je Beton gemittelte Standardabweichung für die Betone 1 und 3 rd. 1,2 cm und für Beton 2 rd. 2,3 cm beträgt. Daß die Standardabweichung der Betone 1 und 3 deutlich kleiner ist als für Beton 2, könnte daran liegen, daß die Betone 1 und 3 schon jenseits der Grenzen des Konsistenzbereiches liegen, für den das Setzmaß als gut geeignet angesehen wird. Der Variationskoeffizient, d. h. die auf das mittlere Setzmaß je Beton bezogene und gemittelte Standardabweichung, sinkt mit weicher werdender Betonkonsistenz von 21 % (Beton 1) über 16 % (Beton 2) auf 6,3 % (Beton 3) und ist damit deutlich größer als beim Ausbreitmaß.

Als maximale Differenz zusammengehöriger Meßergebnisse der drei Betone ergibt sich für mehrere Betonherstellungen und eine Laborantengruppe eine Spannweite von 6,9 cm, für die zwei Laborantengruppen und jeweils eine Herstellung eine Spannweite von 4,5 cm und beim Gesamtvergleich eine Spannweite von 6,9 cm. Die Vergleichsstreuung ist demnach tendenziell etwas geringer als die Wiederholstreuung, insgesamt ist die Streubreite der Ergebnisse jedoch deutlich größer als beim Ausbreitmaß. Wegen der größeren absoluten Streuungen und der wesentlich kleineren Meßwerte beim Setzmaß ist die Reproduzierbarkeit des Ausbreitmaßes deutlich besser als die des Setzmaßes. Demnach ist in dem Konsistenzbereich, für den beide Verfahren als geeignet angesehen werden können, dem Ausbreitmaß der Vorzug zu geben.

## **5.4 Einfluß der Betonzusammensetzung auf den Zusammenhang zwischen den Konsistenzmaßen**

### **5.4.1 Allgemeines**

Bei der Erörterung der Eignung der Konsistenzprüfverfahren in Abschnitt 5.2, bei der lediglich die Konsistenzwerte aller Betone, nicht aber andere Einflüsse, wie z. B. die Betonzusammensetzung, betrachtet wurden, ergaben sich in einigen Fällen relativ breite Streubereiche. In der nachfolgenden Auswertung werden daher beispielhaft für den Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Verdich-

tungsmaß, Setzmaß und Verdichtungsmaß, Vebe-Zeit und Verdichtungsmaß sowie Setzmaß und Ausbreitmaß einiger Betone die Konsistenzergebnisse in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung aufgetragen, um festzustellen, ob sich dabei für bestimmte Betonzusammensetzungen deutlich kleinere Streubereiche ergeben.

Der Übersicht wegen haben wir uns bei den Auswertungen hier auf Betone aller Konsistenzbereiche gemäß Abschnitt 3 mit Kiessand der Korngruppen 0/16 und 0/32 mm und den Sieblinien A, B und C nach DIN 1045 sowie mit 300 und 360 kg/m<sup>3</sup> Zement nach Tafel 2 beschränkt. Die Ergebnisse sind in den Bildern 9 bis 14 dargestellt. Zur Erleichterung der Punktzuordnung wurde für Werte weitgehend gleichen Frischbetonverhaltens eine geschätzte Ausgleichskurve eingetragen. Dabei ergaben sich in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung unterschiedliche Lagen und Krümmungen der Kurven, die im folgenden knapp erläutert werden. Hierzu sind zunächst einige Ausführungen über das Verformungsverhalten von Frischbeton erforderlich, das von den verschiedenen Konsistenzprüfverfahren unterschiedlich erfaßt wird.

Vereinfacht läßt sich die Frischbetonverarbeitbarkeit durch Kohäsion und durch die Kräfte der inneren Reibung beschreiben. Diese Größen können durch Parameter der Betonzusammensetzung z. T. sehr unterschiedlich beeinflußt werden. Nach Ritchie [26] und Thassios [29] bewirkte z. B. bei sonst gleicher Betonzusammensetzung eine Erhöhung des Wassergehaltes eine Verringerung der inneren Reibung sowie gleichzeitig eine Erhöhung der Kohäsion. Aus diesem Grund kann eine Veränderung der Betonzusammensetzung bei zwei Konsistenzmaßen, die auf Kohäsion und innere Reibung verschieden stark ansprechen, eine Verschiebung ihres Zusammenhangs zur Folge haben.

Die nachfolgenden Bilder machen deutlich, daß bei Kenntnis der Betonzusammensetzung für zwei verschiedene Konsistenzmaße in dem sich überdeckenden erfaßbaren Konsistenzbereich (Tafel 6) relativ gute Zusammenhänge mit deutlich geringeren Streubereichen als in Abschnitt 5.2 zu erwarten sind.

#### 5.4.2 Ausbreitmaß und Verdichtungsmaß

In den Bildern 9 und 10 ist der Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Verdichtungsmaß, der sich bei den genannten Versuchen ergeben hat, in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung aufgetragen. Während das Verdichtungsmaß (insbesondere bei steiferen Betonen) überwiegend von der inneren Reibung des Frischbetons, d. h. von seiner Sperrigkeit beim Einfüllen in die Form, bestimmt wird, wirkt sich beim Ausbreitmaß mehr die Kohäsion des Frischbetons aus.

In Bild 9 ist der Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Verdichtungsmaß für die untersuchten Betone mit der Sieblinie B durch die geschätzten Ausgleichskurven „a“ und „b“ wiedergegeben. Der Kurve „a“ sind die Betone mit Zement 1 und dem geringeren Zementgehalt (300 kg/m<sup>3</sup>) und der Kurve „b“ die Betone mit Zement 1 und dem höheren Zementgehalt (360 kg/m<sup>3</sup>) und darüber hinaus die Betone mit den feineren Zementen 2 und 3 zuzuordnen. Die Betone

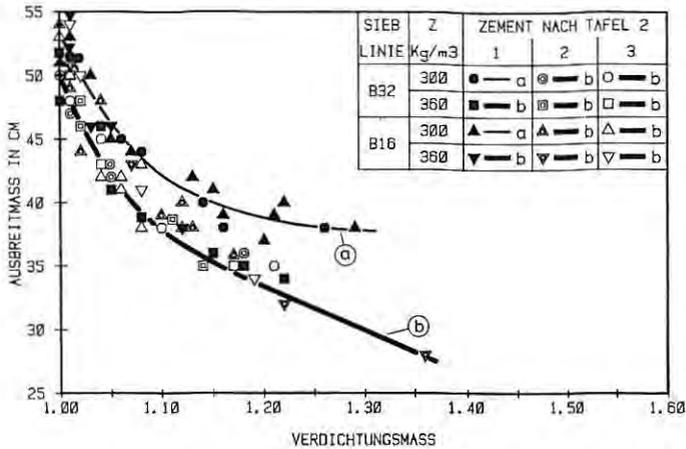


Bild 9 Ausbreitmaß und Verdichtungsmaß (Sieblinie B)

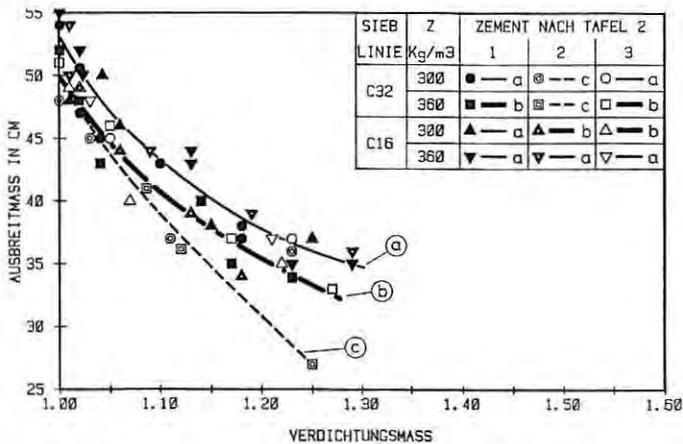


Bild 10 Ausbreitmaß und Verdichtungsmaß (Sieblinie C)

der Kurve „b“ weisen demnach aufgrund des höheren Feinstoffgehaltes bzw. der höheren Mahlfeinheit der Zemente eine höhere Kohäsion und gleichzeitig eine geringere innere Reibung als die Betone der Kurve „a“ auf. Dies kommt auch dadurch zum Ausdruck, daß für die Betone der Kurve „b“ bei gleichem Verdichtungsmaß das Ausbreitmaß, das die Kohäsion deutlicher erfäßt, und bei gleichem Ausbreitmaß das Verdichtungsmaß, das die innere Reibung deutlicher erfäßt, geringer ist als für die Betone der Kurve „a“. Das Zusammenlaufen der Kurven „a“ und „b“ im weichen Konsistenzbe-

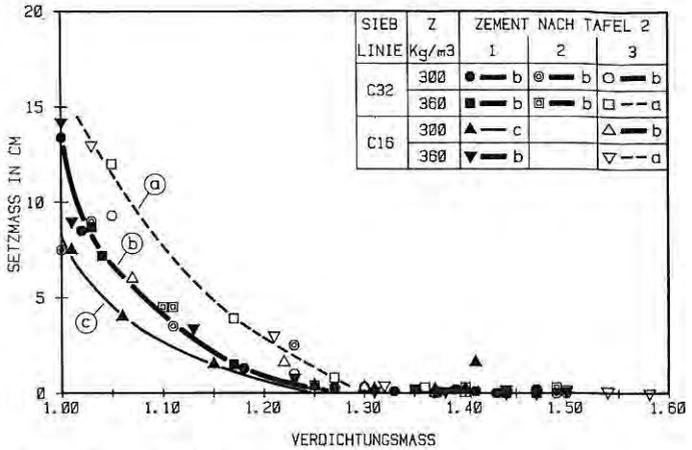


Bild 11 Setzmaß und Verdichtungsmaß (Sieblinie C)

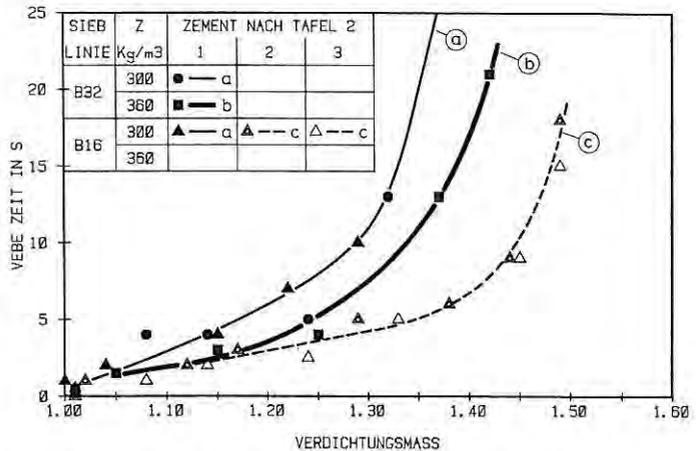


Bild 12 Vebe-Zeit und Verdichtungsmaß (Sieblinie B)

reich ist dadurch zu erklären, daß sich diese Unterschiede mit weicher werdender Konsistenz nicht mehr so stark auswirken.

Die Ausführungen gelten sinngemäß auch für den Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Verdichtungsmaß der in Bild 10 dargestellten Betone mit Sieblinie C. Die im Vergleich zu Bild 9 feinere Zuschlagsieblinie bedingt einen rd. 20 l/m<sup>3</sup> größeren Wassergehalt. Dadurch kann je nach Feinkorngehalt die Kohäsion verbessert und die innere Reibung vermindert oder auch die Reibung vergrößert

werden, wenn ein insgesamt „trockenerer“ relativ steiferer Feinmörtel entsteht. Die Werte für die Betone der Sieblinie A liegen im Bereich der in Bild 9 dargestellten Kurve „a“; im weichen Konsistenzbereich ergeben sich bei Ausbreitmaßen über 50 cm geringfügig größere Verdichtungsmaße.

#### 5.4.3 *Setzmaß und Verdichtungsmaß*

In Bild 11 sind Setzmaß und Verdichtungsmaß für Betone mit Sieblinie C aufgetragen. Auf die Darstellung der Betone mit Sieblinie A wurde verzichtet, weil dabei der Setzmaß-Kegelstumpf überwiegend zerfiel und dafür nur wenige Werte vorliegen. Die gefundenen Werte für Sieblinie B liegen im Bereich der in Bild 11 dargestellten Kurve „b“ und wurden daher nicht in einem gesonderten Bild angegeben. Wie in den Bildern 9 und 10 steigt die Kohäsion der zugehörigen Betone von Kurve „a“ nach „c“ an. Auch in Bild 11 zeigt sich die unterschiedliche Wirkung der Erhöhung des Feinkorgehaltes auf Kohäsion und innere Reibung. Die gefundenen Unterschiede der Kurven „a“ bis „c“ sollten nicht überbewertet werden, da die brauchbare Überdeckung der Anwendungsbereiche zwischen Verdichtungsmaß und Setzmaß relativ gering ist (Tafel 6).

#### 5.4.4 *Vebe-Zeit und Verdichtungsmaß*

In Bild 12 ist der Zusammenhang zwischen Vebe-Zeit und Verdichtungsmaß für Betone mit Sieblinie B aufgetragen. Das Vebe-Verfahren stellt einen Umformungsprozess dar, bei dem der Umformungswiderstand beim Rütteln überwiegend von der Kohäsion abhängt. Bei sehr steifen Betonen, für die das Vebe-Gerät als besonders günstig angesehen wird, wirkt sich zusätzlich die Sperrigkeit des Betons sehr stark aus. Dies drückt sich in einem relativ steilen Kurvenverlauf im Bereich der Verdichtungsmaße über etwa 1,35 aus. Die Lage des relativ steilen Anstiegs verschiebt sich mit steigendem Feinstanteil der Betone und mit feiner werdendem Zement in Richtung größerer Verdichtungsmaße (Kurven „a“ bis „c“), da die Sperrigkeit der Mischung beim Rütteln dadurch vermindert wird. Für Betone mit den Sieblinien A und C ergeben sich ähnliche Kurvenverläufe. Der Kurvenanstieg war bei den Betonen mit Sieblinie C für weichere Konsistenz und bei den Betonen mit Sieblinie A für steifere Konsistenz größer als bei den Betonen mit Sieblinie B.

#### 5.4.5 *Setzmaß und Ausbreitmaß*

In den Bildern 13 und 14 ist der Zusammenhang zwischen Setzmaß und Ausbreitmaß dargestellt. Für die Betone mit Sieblinie A war ein systematischer Zusammenhang nicht zu ermitteln, weil die Setzmaß-Betonkegelstümpfe überwiegend einseitig abrutschten und daher nur wenige Versuchsergebnisse dafür vorlagen. In Bild 13 wurden daher zusätzlich die Mittelwerte für die Sieblinien A/B 32

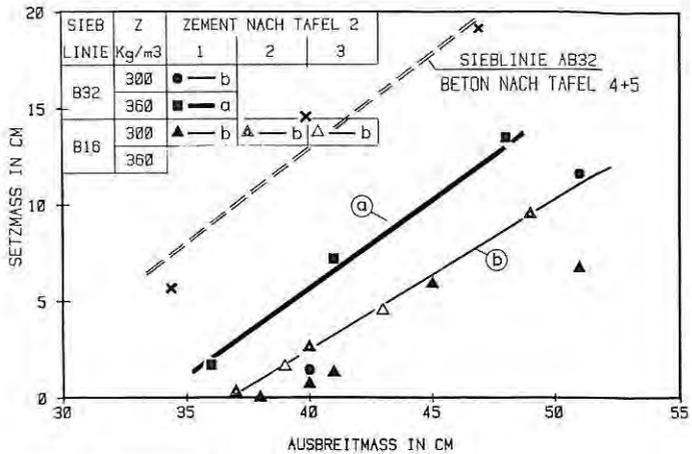


Bild 13 Setzmaß und Ausbreitmaß (Sieblinien AB und B)

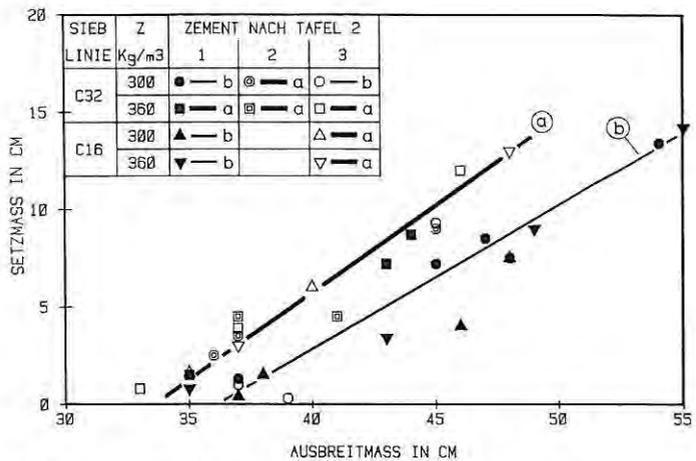


Bild 14 Setzmaß und Ausbreitmaß (Sieblinie C)

aus den Ergänzungsversuchen eingetragen. Beim Setzmaß wirkt sich die innere Reibung, beim Ausbreitmaß die Kohäsion der Mischung stärker aus. Daher liegt auch die Kurve der Betone mit Sieblinie A/B 32 am höchsten. Eine weitere systematische Unterscheidung des Frischbetonverhaltens der übrigen Betone nach Merkmalen der Betonzusammensetzung ist jedoch nicht möglich, weil sich die Ergebnisse der Betone mit den Sieblinien B und C praktisch überdecken und sich aus den vorliegenden Ergebnissen ein gesi-

cherter Einfluß des Zementgehaltes und der Zementfeinheit nicht ableiten läßt.

#### 5.4.6 *Vebe-Zeit gegen Ausbreitmaß und Setzmaß*

Wie bereits Tafel 6 gezeigt hat, überdecken sich die erfaßbaren Konsistenzbereiche der obengenannten Verfahren nahezu nicht, so daß ein brauchbarer Zusammenhang nicht zu erwarten ist (Bilder 6 und 7). Auf die Darstellung der Gegenüberstellung von Einzelergebnissen wurde daher verzichtet.

## 6. Zusammenfassung

Bei der Auswertung der rd. 1000 durchgeführten Frischbetonversuche an Betonen mit Rheinkiessand aus dem Bereich Düsseldorf und mit drei Zementen unterschiedlicher Art und Feinheit ergaben sich die folgenden Ergebnisse:

6.1 Ausbreitmaß und Setzmaß eignen sich für die Prüfung von Frischbeton mit baustellenüblicher Konsistenz der Konsistenzbereiche K 2 und K 3 nach DIN 1045, in der Regel aber nicht für erdfeuchte und steife Betone. Mit dem Ausbreitmaß können auch fließfähige Betone und schwachplastische Betone bestimmter Zusammensetzung gut erfaßt werden. Das Setzmaß ist für schwachplastische Betone nur bedingt und für fließfähige Betone nicht brauchbar. Wegen der bei sachgerechtem Vorgehen deutlich geringeren Streuung sollte dem Ausbreitmaß stets der Vorzug vor dem Setzmaß gegeben werden.

6.2 Verdichtungsmaß und Vebe-Zeit sind für Konsistenzbestimmungen im plastischen, steifen und erdfeuchten Bereich anwendbar. Für fließfähigen Beton sind beide Verfahren ungeeignet, für weichen Beton ist das Verdichtungsmaß nur bedingt und das Vebe-Verfahren nicht geeignet. Obwohl die Vebe-Zeit im steifen bis erdfeuchten Konsistenzbereich theoretisch eine etwas schärfere Differenzierung des Frischbetonverhaltens ermöglicht, ist aufgrund der deutlich besseren Reproduzierbarkeit der Ergebnisse dem Verdichtungsmaß im gemeinsam erfaßten Konsistenzbereich gegenüber der Vebe-Zeit der Vorzug zu geben.

6.3 Die Gegenüberstellung der Ergebnisse von jeweils zwei der vier genannten Konsistenzprüfverfahren ergibt für den von beiden Prüfverfahren erfaßten Konsistenzbereich einen tendenziellen Zusammenhang mit z. T. sehr breitem Streubereich. Dies ist auf Versuchsstreuungen und darauf zurückzuführen, daß die Prüfverfahren auf die Frischbetonverarbeitbarkeit, wie z. B. Kohäsion und innere Reibung, sehr unterschiedlich ansprechen.

6.4 Dieser Streubereich läßt sich bei Kenntnis der Betonzusammensetzung deutlich reduzieren. Dadurch ergibt sich für den Vergleich der verschiedenen Konsistenzergebnisse meist eine brauchbare Korrelation, die eine Umrechnung der Ergebnisse der verschiedenen Konsistenzmaße in dem gemeinsam erfaßten Konsistenzbereich ermöglicht.

## SCHRIFTTUM

- [1] Walz, K.: Kennzeichnung der Betonkonsistenz durch das Verdichtungsmaß v. beton 14 (1964) H. 11, S. 505/509; ebenso *Beton-Verlag, Düsseldorf* 1965, S. 207/224.
- [2] BS 1881 – Part 2: Methods of testing fresh concrete (Ausgabe 1970).
- [3] Graf, O.: Die Siebprobe, die Setzprobe, die Ausbreitprobe (Fließ- oder Rüttelprobe) und ihre Anwendung. *Beton und Eisen* 21 (1926) H. 12, S. 210/213.
- [4] ASTM C 124 – Part 39: Test for flow of portland cement concrete by use of the flow table (Ausgabe 1966).
- [5] ASTM C 143: Standard method of test for slump of portland cement concrete (Ausgabe 1969).
- [6] Powers, T. C.: Studies of Workability of Concrete. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 28 (1931–32) S. 419/451.
- [7] Schrage, I., und W. vom Berg: Konsistenzprüfung des Frischbetons mit dem Setzzeitversuch. *Betonwerk und Fertigteil-Technik* 38 (1972) H. 8, S. 596/601.
- [8] Albrecht, W., und H. Schäffler: Konsistenzmessung von Beton. *DAFStb*, H. 158, Berlin 1964.
- [9] Pilny, F.: Die Messung von Steife und Rüttelwilligkeit bei Frischbeton. *Der Bauingenieur* 33 (1958) H. 5, S. 169/174.
- [10] Warse, H.P.: Kennzeichnung der Betonkonsistenz durch eine Auslaufzeit. *beton* 22 (1972) H. 10, S. 437/440.
- [11] Walz, K.: Verarbeitbarkeit und mechanische Eigenschaften des Frischbetons. *Deutscher Ausschuß für Eisenbeton*, H. 91, Berlin 1938.
- [12] Graf, O.: Versuche über das Verhalten von Eiseneinlagen in Beton verschiedener Zusammensetzung: Der Eindringversuch. *Deutscher Ausschuß für Eisenbeton*, H. 71, Berlin 1933, S. 57/60.
- [13] Vasilu, D.: Die Messung der Verarbeitbarkeit des gerüttelten Betons. *Zement-Kalk-Gips* 21 (1968) H. 10, S. 424/429.
- [14] Tattersall, G.H.: Relationship between the British Standard tests for workability and the two-point test. *Magazine of Concrete Research* 28 (1976) H. 96, S. 143/147.
- [14a] Banfill, P.F.G: Zuschrift zu [14]. *Magazine of Concrete Research* 29 (1977) H. 100, S. 156/157.
- [15] Dulieu, C.: Rhéologie des bétons frais et sa variation dans le temps. *Revue des Matériaux de Construction – Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux* (1982) H. 4-737, S. 230/235.
- [16] Dratva, T.: Messung der Betonkonsistenz. *Schweizerische Bauzeitung* 96 (1978) H. 1/2, S. 11/14.
- [17] Diamond, C. R., und S. J. Bloomer: A consideration of the DIN flow table. *Concrete* 11 (1977) H. 12, S. 29/30.
- [18] Tätigkeitsbericht 1969-71, Forschungsinstitut der Zementindustrie. *Beton-Verlag, Düsseldorf* 1971, S. 105.
- [19] Koelliker, E.: Tests on the behaviour of fresh concrete. *Cembureau-Kolloquium „The Rheology of Cement“*, Paris 1966.
- [20] Walz, K.: Das Messen mechanischer Eigenschaften des Frischbetons. *Archiv für Technisches Messen*, V 8246-1, 1948, T 41/T 42.
- [21] Roberts, J.J.: Zuschrift zu [17]. *Concrete* 12 (1978) H. 2, S. 18/19.
- [22] VEE-BEE Consistometer TR 11. Instructions, AB Vibro-Verken. Solna, Schweden.

- [23] Dewar, J.D.: Relations between various workability control tests for ready-mixed concrete. CCA-Technical Report 375 (1964).
- [24] Ionescu, I., und M. Enculescu: Quelques considerations sur l'influence des propriétés du ciment sur les propriétés du béton frais. Rilem Seminar „Fresh Concrete“, Leeds 1973, Vol. 1, Kap. 3.3, S. 1/10.
- [25] Tognon, G.: The measurement of workability and the rheological properties of concrete. Cembureau-Kolloquium „The Rheology of Cement“, Paris 1966.
- [26] Ritchie, A.G.B.: The triaxial testing of fresh concrete. Magazine of Concrete Research 14 (1962) H. 40, S. 37/42.
- [27] Hughes, B.P., und B. Bahramiam: Workability of Concrete: A comparison of existing tests. Journal of Materials 2 (1967) S. 519/536.
- [28] Bonzel, J., und J. Dahms: Über den Wasseranspruch des Frischbetons. beton 28 (1978) H. 9, S. 331/336, H. 10, S. 362/367, und H. 11, S. 413/416; ebenso Betontechnische Berichte 1978, Beton-Verlag, Düsseldorf 1979, S. 121/156.
- [29] Thassios, T.P.: Plasticity an cohesiveness of fresh concrete. Rilem Seminar „Fresh Concrete“, Leeds 1973, Vol. 1, Kap. 1, S. 1/36.
- [30] Wesche, K.: Comparison of different consistency values. Materials and Structures 8 (1975) H. 43, S. 255
- [31] Weigler, H., und S. Keuser: Beurteilung der Betonverarbeitbarkeit mit Hilfe einer Prüfsonde. Betonwerk und Fertigteil-Technik 40 (1974) H. 5, S. 325/328.
- [32] Walz, K.: Einflüsse auf die Verarbeitbarkeit des Betons. Zement 22 (1933) H. 6, S. 78/81, und H. 7, S. 93/95.
- [33] Hard, R., und N. Petersons: Workability of concrete – A testing method. CBI – Rapportier 2:76 – Studies on fresh concrete, S. 2/12.
- [34] Meyer, U.T.: Measurement of the workability of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 59 (1962) S. 1071/1079.
- [35] Flatten, H.: Untersuchungen über das Fließverhalten von Zementleim. Dissertation RWTH Aachen 1973.
- [36] vom Berg, W.: Zum Fließverhalten von Zementsuspensionen. Dissertation RWTH Aachen 1982.
- [37] Flatten, H., und W. vom Berg: Überlegungen zum Verformungsverhalten von Feinmörtel und Frischbeton. Betonwerk und Fertigteil-Technik 40 (1974) H. 7, S. 469/475.
- [38] Sieber, E.: Zum Verarbeiten des Frischbetons nach TGL 33412/05. Be-  
tontechnik 3 (1982) H. 4, S. 109/113.
- [39] Bossi, J.A.: Concrete workability measurements. Rilem Seminar „Fresh Concrete“, Leeds 1973, Vol. 1, Kap. 2.4, S. 1/10.
- [40] Losinger, R.: Die Messung der Verarbeitbarkeit von Frischbeton. Dissertation Eidgen. Techn. Hochschule Zürich 1956.
- [41] N. N.: Messung der Betonkonsistenz. Cementbulletin 42 (1975) Nr. 14. Techn. Forschungs- und Beratungsstelle der schweizerischen Zementindustrie, Wildegg.