

# Rheologische Eigenschaften von Zementleim und Frischbeton \*)

Von K. Wesche und W. vom Berg, Aachen

## 1. Allgemeines

Neben der Zementart und dem Wasserzementwert, die entsprechend den Anforderungen an den Festbeton festgelegt werden müssen, wird der Frischbeton noch durch die Konsistenz charakterisiert, die im wesentlichen von den vorhandenen oder vorgesehenen Geräten für Mischen, Transport, Einbringen und Verdichten bestimmt wird. Nur wenn auch diese Konsistenz auf die Anforderungen des Festbetons abgestimmt wird, können dessen vorgesehene Eigenschaften optimal werden. Daneben ist die Kenntnis, Festlegung und Bestimmung der Konsistenz für verschiedene Verarbeitungsverfahren und für spezielle Anwendungsbereiche des Zementleims und Zementmörtels notwendig, z. B. für

Einpressen in Spannkäule, Lockerböden und Fels,

Einbringen in geschüttete oder gepackte Zuschläge nach dem Colcrete- oder Prepacverfahren,

Pumpen von Beton, besonders von Leichtbeton.

Die Konsistenz, die das Verhalten des Frischbetons unter äußerer Beanspruchung beim Mischen, Transportieren, Einbringen, Verdichten und Verarbeiten maßgeblich beeinflusst, ist also genauso wie die Zielgröße Druckfestigkeit eine maßgebende Betoneigenschaft, deren Wichtigkeit durch die Bezeichnung verschiedener Konsistenzgruppen mit steif, plastisch und weich in DIN 1045 und die Festlegung von Prüfverfahren in DIN 1048 unterstrichen wird.

Damit beginnt aber auch bereits das Problem: da die Konsistenz kein physikalischer Begriff ist, sondern eine unbekannte Mischung der Eigenschaften Fließvermögen, Verformbarkeit und Verdichtungswilligkeit darstellt, ist eine eindeutige physikalische Definition und damit Prüfung der Konsistenz überhaupt nicht möglich. Hinzu kommt, daß sich der Frischbeton beim Transport im plastischen, beim Mischen und Verdichten dagegen im flüssigen Zustand und beim Einbringen zeitweise in beiden Zuständen befindet. Während man sich nun bei der Verformung des Festbetons und dessen Prüfung weitgehend rheologischer Kenntnisse und Verfahren bedient, wurde die Frischbetonverformung zunächst einmal in bezug auf die vorgesehene Beanspruchung qualitativ nach Augenschein

---

\*) Vortrag auf der technisch-wissenschaftlichen Zementtagung des Vereins Deutscher Zementwerke in Berlin am 21. September 1972.

beurteilt, z. B. nach der Neigung zum Entmischen in Behältern und Pumpleitungen, nach dem Fließen des Betons beim Einbringen und Rütteln, nach dem Schließen des Betons beim Ziehen des Innenrüttlers usw.

Darüber hinaus wurden praxisnahe Prüfverfahren entwickelt, die den Frischbeton auch quantitativ beurteilen sollen, die jedoch jeweils nur Teilbereiche der Frischbetonverformung erfassen wie z. B. der Ausbreitversuch ein Gemisch von Transportierbarkeit und Fließvermögen und das Verdichtungsmaß die Verdichtbarkeit. Da man in diesen Versuchen die komplexe Beanspruchung in der Praxis nur zum Teil simulieren kann, ergeben sich Kennwerte, die von ganz speziellen Versuchsbedingungen abhängen.

Die Literatur enthält über 50 verschiedene Konsistenzprüfverfahren, die alle den Nachteil haben, daß die während des Versuchs aufgebrauchte Beanspruchung quantitativ nicht zu erfassen ist, und die daher nur relative und physikalisch nicht definierbare Vergleichswerte für dasselbe Verfahren liefern können. Diese Vergleichswerte beschreiben zwar die Unterschiede verschieden zusammengesetzter Betone in einem mehr oder minder weiten Bereich hinsichtlich einer ganz bestimmten Beanspruchung, lassen jedoch eine allgemeine Aussage über die Frischbetonverformung nicht zu. Hinzu kommt, daß die Ergebnisse verschiedener Versuche im allgemeinen nicht ohne weiteres zu vergleichen sind und manche Verfahren nur einen Teil des gesamten Verformungsbereiches erfassen. So reagieren z. B. steife Betone nicht auf den Setzversuch (slump), so daß diese Betone als „no slump-Betone“ bezeichnet werden und hinsichtlich ihrer Verformungsfähigkeit nicht weiter differenziert werden können. Außerdem führt ein gewisser Konservatismus und manchmal noch mehr ein Nationalprestige zur Beibehaltung einmal im Lande eingeführter Verfahren und damit zur Erschwerung internationaler Vereinheitlichung.

Wenn man sich also von all diesen Einschränkungen freimachen, praxisnahe Prüfverfahren auf ihre physikalische Aussagefähigkeit untersuchen und das Verhalten des Frischbetons wissenschaftlich erforschen will, benötigt man Kennwerte, die weitgehend von Versuchs- und Umwelteinflüssen unabhängig sind. Diese erhält man durch Untersuchungsmethoden der Rheologie, mit deren Hilfe das Verformungsverhalten viskoser Stoffe als Zusammenhang zwischen Spannung und Verformung unter physikalisch definierten Bedingungen ermittelt wird.

Genau wie der Festbeton ist der Frischbeton ein Zweiphasenstoff, dessen Verformungsverhalten von beiden Phasen beeinflusst wird, nämlich vom Mörtel, einer Suspension aus Wasser, Zement und Feinzuschlag, und dem darin bewegten Grobzuschlag. Eine Voraussage des Verformungsverhaltens des Frischbetons aus den Daten der Ausgangsstoffe, die für einen zielsicheren Betonentwurf eigentlich selbstverständlich sein muß, ist daher nur möglich, wenn das Verhalten der Suspension, d. h. des Zementleims oder Mörtels, und der Einfluß des Grobzuschlages auf die Suspension bekannt sind. Es ist daher logisch, bei der rheologischen Erforschung des Frischbetons zunächst einmal den Zementleim

zu untersuchen und dann schrittweise durch Zugabe immer größeren Zuschlags zum Beton zu gelangen.

Wie weit die Forschung auf diesem Gebiet gediehen und wie der heutige Stand der Erkenntnisse ist, soll dieser Bericht zeigen, wobei zum besseren Verständnis zunächst einige rheologische Grundbegriffe kurz erläutert werden müssen.

## 2. Rheologische Begriffe

Das Verformungsverhalten von Flüssigkeiten und Suspensionen kann in einem laminaren, stationären Schervorgang untersucht werden.

Die Flüssigkeit setzt ihrer Verformung einen Widerstand entgegen, der von der aufgebrachtene Belastung abhängt. Im Versuch wird in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  eine Scherspannung  $\tau$  ermittelt. Im einfachsten Fall besteht eine Proportionalität zwischen Scherspannung und Schergeschwindigkeit, die durch das Newtonsche Fließgesetz

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad \text{oder} \quad \dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta}$$

ausgedrückt wird (Bild 1, Linie 1).

Flüssigkeiten, die diesem Fließgesetz entsprechen, z. B. Wasser und Öle, werden „Newtonsche Flüssigkeiten“ genannt. Der Proportionalitätsfaktor  $\eta$  ist die Viskosität der Flüssigkeit und ist im Scherdiagramm der Kotangens des Neigungswinkels  $\alpha$ .

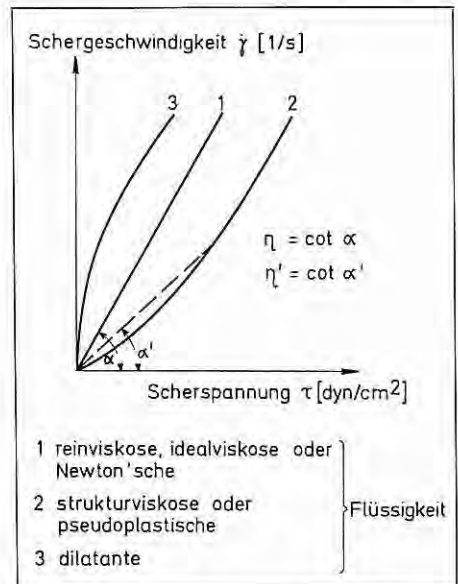


Bild 1  
Fließkurven von Flüssigkeiten ohne Fließgrenze

Das Fließverhalten vieler Flüssigkeiten weicht jedoch vom rein Newtonschen Fließen ab und ergibt Fließkurven wie 2 und 3 in Bild 1. So wird eine strukturviskose Substanz mit steigender Beanspruchung dünnflüssiger, so daß ihre Fließkurve (2 in Bild 1) eine Verringerung der Scherspannungsänderung mit zunehmender Schergeschwindigkeit zeigt. Eine Flüssigkeit, deren Verhalten entgegengesetzt ist, die mit zunehmender Scherbeanspruchung dickflüssiger wird und der Fließkurve 3 in Bild 1 entspricht, nennt man dilatant. Für diese beiden Flüssigkeitsarten kann man keine Viskosität als physikalische Stoffkonstante im Newtonschen Sinne definieren. Daher wurde eine scheinbare Viskosität  $\eta' = \cot \alpha'$  eingeführt, deren Größe von der Schergeschwindigkeit abhängt.

Eine Reihe von Flüssigkeiten, vor allem viele Suspensionen, verhalten sich bei Scherbeanspruchung zunächst wie feste Körper und beginnen erst oberhalb einer Fließgrenze  $\tau_f$  zu fließen (Bild 2). Ist das Verhalten rein- oder idealplastisch, d. h. entspricht es

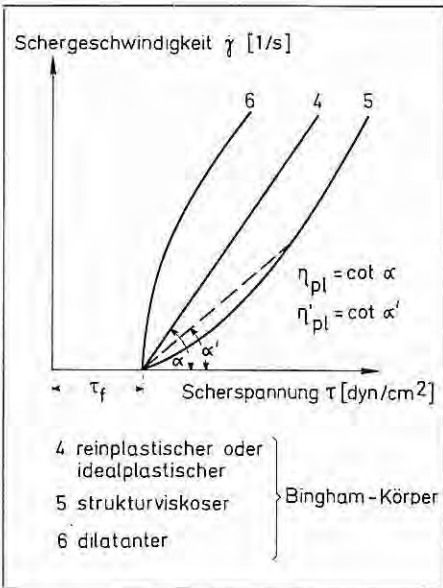


Bild 2  
Fließkurven von Flüssigkeiten mit Fließgrenze

oberhalb der Fließgrenze der Newtonschen Flüssigkeit (Kurve 4), so spricht man von einem Bingham-Körper mit einer konstanten Viskosität  $\eta_{pl}$ . Das Fließverhalten entspricht dann der Gleichung

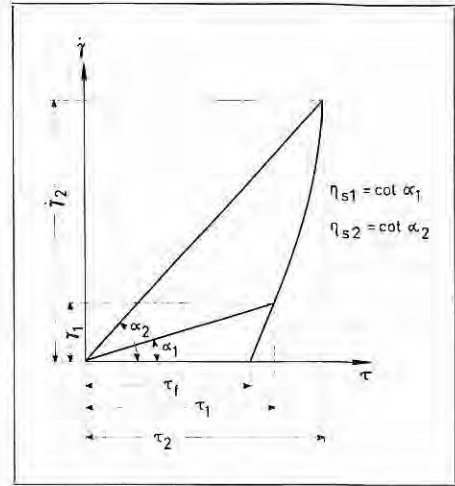
$$\tau = \tau_f + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$$

oder

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta_{pl}} \cdot (\tau - \tau_f)$$

Für die Fließkurven 5 (strukturviskoser Bingham-Körper) und 6 (dilatanter Bingham-Körper) wird wiederum eine scheinbare Vis-

Bild 3  
Definition von  $\eta_s$  als  
scheinbare Viskosität



kosität  $\eta'_{pl}$  definiert, deren Größe sich mit der Beanspruchung ändert.

Neben den genannten scheinbaren Viskositäten wird in der Literatur oft eine Größe als scheinbare Viskosität  $\eta_s$  bezeichnet, die nach Bild 3 als Kotangens des Neigungswinkels der Verbindungsgeraden zwischen dem ermittelten Fließkurvenpunkt und dem Nullpunkt des Koordinatensystems bestimmt wird. Es ist verständlich, daß ein solcher Wert für den Fließkurvenverlauf keine Aussagekraft hat.

### 3. Meßverfahren

Zur Durchführung des Scherversuches werden sogenannte Rheometer oder Viskosimeter benutzt. Von ihnen gibt das Rotationsrheometer den umfassendsten Aufschluß über das Fließverhalten und hat sich auch für Untersuchungen an Zementleim und Zementmörtel bewährt. Ein Rotationsrheometer (Bild 4) besteht aus zwei konzentrischen Zylindern, von denen der eine, meist der äußere Zylinder, in eine Rotationsbewegung versetzt wird, während der zweite Zylinder als Meßzylinder praktisch feststeht. In einem möglichst engen Spalt zwischen diesen beiden Zylindern befindet sich die zu untersuchende Substanz, wobei die Spaltweite vom Größtkorn der dispersen Phase der Substanz abhängt.

Durch die Bewegung des Drehzylinders wird die Substanz in eine laminare Strömung versetzt. Sie überträgt dabei Scherkräfte auf den Meßzylinder, der so gelagert ist, daß das auf einen Torsionsstab oder eine Torsionsfeder übertragene Drehmoment zur Vermeidung von Störungen der Scherströmung fast weglos gemessen wird. Der Versuch läuft dann unter folgenden Randbedingungen ab: Außen bewegt sich die Meßsubstanz mit der Geschwindigkeit des Drehzylinders, innen ist die Fließgeschwindigkeit der Substanz praktisch Null, wobei darauf geachtet werden muß, daß

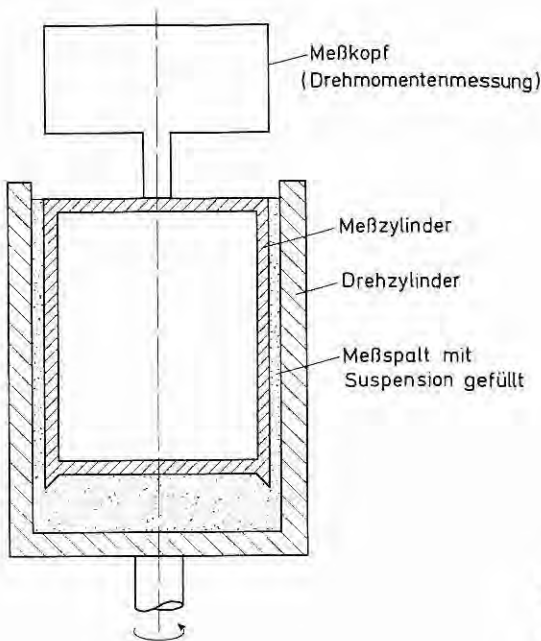


Bild 4  
Schemaskizze  
eines Rotations-  
rheometers

keine Wandgleiteneffekte auftreten. Über die Spaltbreite stellt sich eine Geschwindigkeitsverteilung entsprechend dem Fließgesetz der Substanz ein.

Im Versuch wird eine Meßkurve aufgenommen, indem die Drehzahl des Außenzylinders und damit die Schergeschwindigkeit stufenweise erhöht und jeweils das übertragene Moment gemessen wird. Aus den Meßwerten kann die Fließkurve unter Zugrundelegung eines Fließgesetzes der untersuchten Flüssigkeit  $\dot{\gamma} = f(\tau)$  ermittelt werden.

#### 4. Rheologische Eigenschaften von Zementleim

##### 4.1 Fließkurven

Über das Fließverhalten von Zementleim liegt eine Reihe von Untersuchungen vor, deren zum Teil widersprüchliche Ergebnisse auf eine unterschiedliche Versuchsdurchführung zurückgeführt werden können. Die hier erläuterten Vorstellungen stützen sich daher auf Versuche, die in jüngster Zeit im Institut für Bauforschung der Technischen Hochschule Aachen als Belastungsversuche mit stufenweise ansteigender Schergeschwindigkeit und als Entlastungsversuche mit stufenweise abfallender Schergeschwindigkeit durchgeführt wurden. Nach diesen Untersuchungen [1] ergibt sich für Zementleim das in Bild 5 dargestellte Scherdiagramm, das in ähnlicher Weise auch von Delyes [2] gefunden wurde.

Nach der konkav gekrümmten Belastungskurve AC ist der Zementleim ein strukturviskoser Bingham-Körper. Wird jedoch nach der

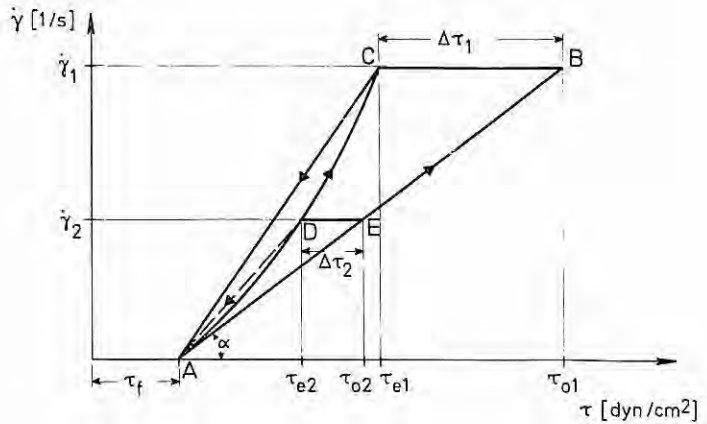


Bild 5 Be- und Entlastungskurven für Zementleim

Belastung wieder stufenweise entlastet, so ergibt sich ein geradliniger Verlauf der Entlastungskurve CA, die die Abszisse wieder im Punkt  $\tau_f$  schneidet. Geht der Belastungsversuch bis zur geringeren Schergeschwindigkeit beim Punkt D, so erhält man als Entlastungsgerade die Linie DA.

Belastet man Zementleim nun nicht stufenweise, sondern sofort mit einer Schergeschwindigkeit, die die Scherspannung  $\tau_o$  ergibt, und hält diese über längere Zeit konstant, so nimmt das Moment im Laufe der Zeit ab, bis es einen konstanten Wert erreicht (Bild 6). (In der Darstellung sind gewisse, die Messung verfälschende Entmischungserscheinungen nicht berücksichtigt.) Im  $\dot{\gamma}$ - $\tau$ -Diagramm entspricht dieser Abfall der Scherspannung von  $\tau_o$  auf  $\tau_e$  der Strecke BC bzw. ED. Trägt man die bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten gemessenen Scherspannungen  $\tau_o$  im Schergeschwindigkeits-Spannungs-Diagramm (Bild 5) auf, so er-

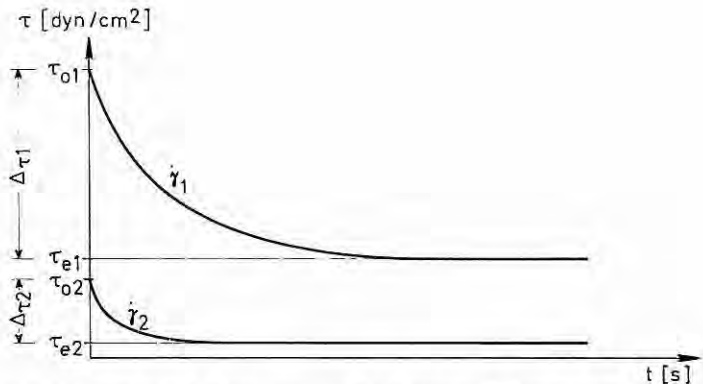


Bild 6 Abnahme der Scherspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit; nach Flatten [1]

gibt sich die Fließkurve AB, während sich die Fließkurve AC aus den Scherspannungen  $\tau_e$  ergibt.

Das Fließverhalten des Zementleims ist also sowohl bei der Belastung als auch bei der Entlastung von der Zeit und von der Vorbelastung abhängig.

Die Abweichung der Entlastungsgeraden von der Belastungskurve bedeutet thixotropes Verhalten, worunter man die Erscheinung versteht, daß Suspensionen fester Teilchen in einer Flüssigkeit in Ruhe zu Gelen erstarren und unter mechanischer Beanspruchung wieder flüssig werden. Die Thixotropie des Zementleimes ist auf eine Strukturbildung der Zementteilchen in der Substanz zurückzuführen, die einem Konglomerat entspricht und deren Ursache in der Wirkung der inneren Kräfte in der Suspension liegt.

Zwischen den Teilchen wirken anziehende oder aufgrund ihrer elektrischen Ladung auch abstoßende Kräfte [3]:

- a) die Schwerkraft, die bestrebt ist, die Teilchen nach dem Behälterboden hin auszufällen,
- b) die van-der-Waalschen Kräfte, die durch die Einwirkung eines Atomkerns auf die Peripherie-Elektronen benachbarter Atome entstehen,
- c) Kapillarkräfte, hervorgerufen durch die Oberflächenspannung des Dispersionsmittels zwischen den Teilchen, die in einer angereicherten Aufschlämmung ein Netz feiner Kanäle bilden,
- d) anziehende elektrische Kräfte zwischen Teilchen entgegengesetzter Ladung und
- e) abstoßende elektrische Kräfte zwischen Teilchen gleicher Ladung.

Diese Kräfte, einschließlich der inneren Reibung, sind abhängig von der Korngröße der dispersen Phase, der Feststoffkonzentration in der Suspension und den Reaktionen zwischen flüssiger und fester Phase. Je nach Größe und Art der Kräfte bildet sich eine mehr oder weniger starke Struktur aus. Diese wird durch Verformungen zerstört, wobei der Grad der Zerstörung von der Schergeschwindigkeit, also der äußeren Belastung, und der Belastungszeit abhängt und sich für eine bestimmte Beanspruchung ein Gleichgewichtszustand zwischen den inneren Kräften und der äußeren Belastung einstellt.

Die Gerade AB kennzeichnet den Zustand der unzerstörten Struktur, während die Belastungskurve AC den Gleichgewichtszustand zwischen inneren und äußeren Kräften für jede Geschwindigkeitsstufe darstellt. Der geradlinige Verlauf der Entlastungskurve CA zeigt, daß im Versuch die dem Gleichgewichtszustand entsprechende Struktur nicht zurückgebildet wird. Lediglich im Punkt A, also bei der Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma} = 0$ , wird das Verformungsverhalten des Zementleims von der Belastungsgeschichte unabhängig.

Die Hysteresisfläche zwischen Be- und Entlastungsast kann als relatives Maß für die Größe des Strukturbruches gewertet werden, wobei jedoch die maximal erreichte Schergeschwindigkeit angegeben werden muß.



Für die mathematische Auswertung der Fließkurven konnte ein Fließgesetz entwickelt werden, das die Erfassung des Fließverhaltens des Zementleims, Feinstzuschlags und Zementmörtels auf die Kenntnis zweier dimensionsbehalteter Kennwerte A und C zurückführt und die allgemeine dimensionslose Form hat

$$\frac{\dot{\gamma}}{C} = f\left(\frac{\tau - \tau_f}{A}\right)$$

Für die Zementleimversuche konnten die Fließkurven durch die Gleichung

$$\frac{\dot{\gamma}}{C} = \frac{\tau - \tau_f}{A} + \frac{(\tau - \tau_f)^3}{A^3}$$

in sehr guter Näherung wiedergegeben werden.

Im Belastungsnullpunkt ergibt sich aus dieser Gleichung die Anfangsviskosität  $\eta_0 = \frac{A}{C}$ .

Da das Verformungsverhalten des Zementleims nur im Belastungsnullpunkt von der Belastungsvorgeschichte unabhängig ist, erscheint es sinnvoll, nur solche Kennwerte zuzulassen, die im Belastungsnullpunkt auftreten, also die Fließgrenze  $\tau_f$  und die Anfangsviskosität  $\eta_0$ .

#### 4.2 Einflußgrößen für das Fließverhalten

Da Art und Größe der Strukturbildung von der Wirkung der inneren Kräfte zwischen den Teilchen in der Suspension und den Reaktionen zwischen dem Dispersionsmittel und der dispersen Phase abhängen, wird sich jede Veränderung der Konzentration

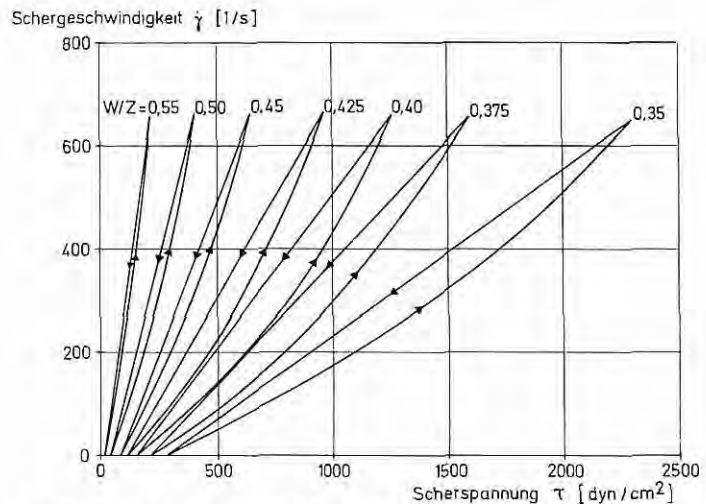


Bild 7 Fließkurven für einen PZ 275 bei verschiedenen W/Z-Werten; nach Flatten [1]

der Suspension und der Größe der Teilchen auf das Fließverhalten auswirken. Bild 7 zeigt, daß erwartungsgemäß mit zunehmendem W/Z-Wert die Scherspannungen, die Fließgrenze und die Viskosität kleiner werden, was für verschiedene Zemente auch den Bildern 8 und 9 zu entnehmen ist. Untersuchungen mehrerer Forscher [1, 4, 5] zeigten, daß diese Abhängigkeit der Fließgrenze und der Viskosität vom W/Z-Wert durch Funktionen der Form

$$\tau_f = a_1 \cdot e^{-b_1 \cdot W/Z}$$

und

$$\eta_o = a_2 \cdot e^{-b_2 \cdot W/Z}$$

dargestellt werden kann.

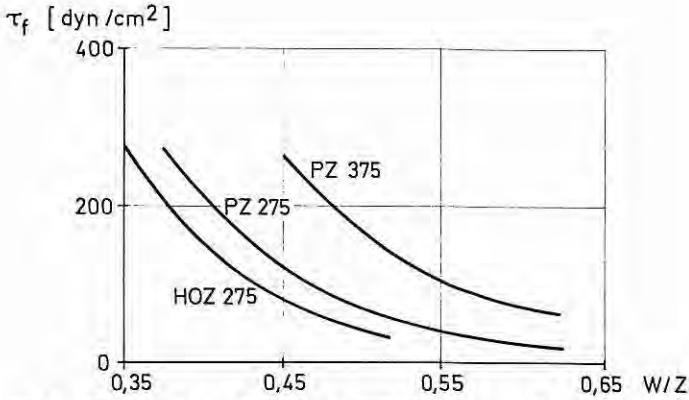


Bild 8 Fließgrenze  $\tau_f$  als Funktion des W/Z-Wertes; nach Flatten [1]

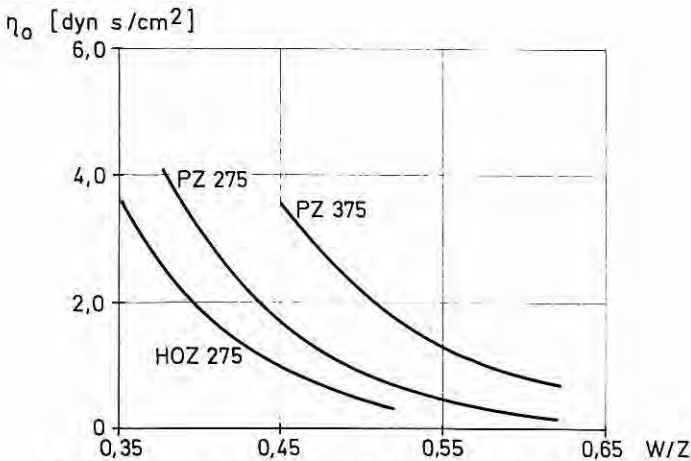


Bild 9 Viskosität  $\eta_o$  als Funktion des W/Z-Wertes; nach Flatten [1]

Überträgt man nach Flatten [1] die Belastungskurven, z. B. aus Bild 7, in das System  $(\tau/A; \dot{\gamma}/C)$ , so fallen die Kurven für alle W/Z-Werte eines Zementes mit geringer Streuung in einer Fließkurve zusammen. Für unterschiedliche Zemente ergeben sich dabei parallele Kurven, die sich nur durch den Kennwert  $\tau_f/A$  unterscheiden (Bild 10). Es ist noch nicht bekannt, ob ein funktioneller Zusammenhang zwischen diesem Kennwert und den Zementeigenschaften besteht.

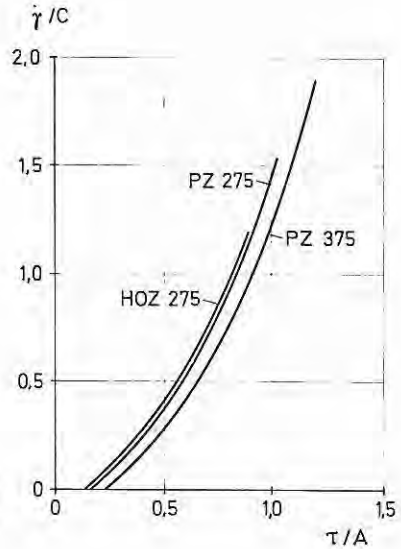


Bild 10 Kennlinien der untersuchten Zementleime im System  $\dot{\gamma}/C - \tau/A$ ; nach Flatten [1]

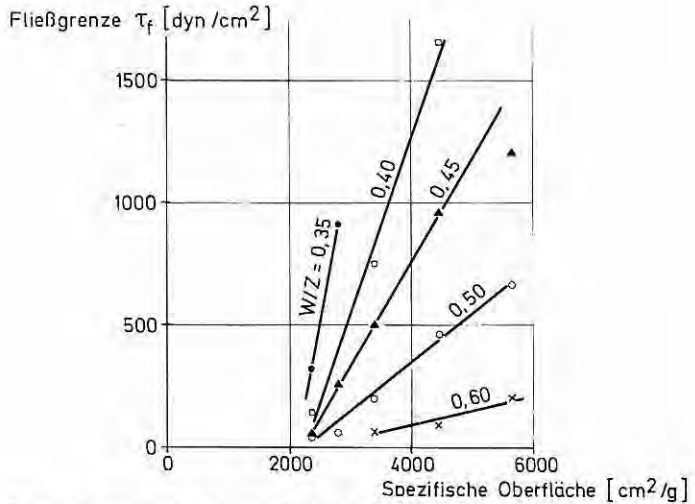


Bild 11 Abhängigkeit der Fließgrenze des Zementleims von Mahlfeinheit und W/Z-Wert; nach Papadakis [6]

Der Einfluß der Mahlfeinheit wurde bisher von Papadakis [6] untersucht. Bild 11 zeigt den Einfluß auf die Fließgrenze, Bild 12 den auf die Viskosität. Dabei ist zunächst einmal festzustellen, daß sich die Mahlfeinheit bei steifen Zementleimen, d. h. bei kleinen W/Z-Werten, viel stärker auf die Fließgrenze als auf die Viskosität auswirkt. Versuche von Kaiser [7] an Zementleimen mit W/Z-Werten zwischen 0,5 und 2,0 führten ebenfalls zu einer näherungsweise linearen Abhängigkeit zwischen den rheologischen Kenngrößen Viskosität und Fließgrenze und der Mahlfeinheit, ausgedrückt durch die spezifische Oberfläche nach Blaine.

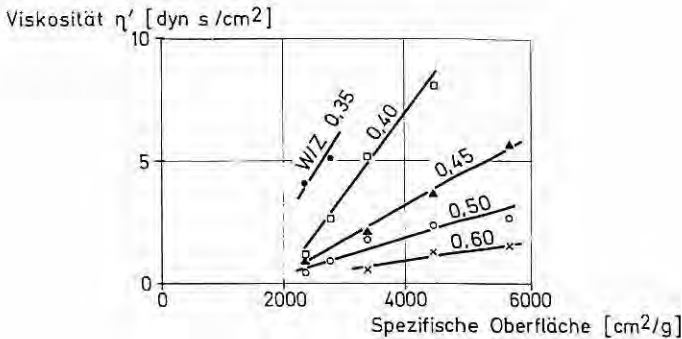


Bild 12 Abhängigkeit der Viskosität des Zementleims von Mahlfeinheit und W/Z-Wert; nach Papadakis [6]

Eine wichtige Anwendung des beschriebenen Verfahrens ist die Beurteilung der Wirkung von Betonzusatzmitteln auf das Fließverhalten des Zementleims, Mörtels und damit auch des Betons. Bekanntlich wirkt jedes Zusatzmittel auf jeden Zement anders, und diese Wirkung, die für das Fließverhalten besonders bei Beschleunigern, Verzögerern, Verflüssigern und Einpreßhilfen interessiert, war bisher im wesentlichen nur punktuell mit dem Vicatgerät festzustellen. Nunmehr können die Kennwerte für das Fließverhalten über die Zeit genau bestimmt und entsprechend den Bildern 13 und 14 aufgetragen werden.

Bei diesen Versuchen wurden allerdings gestörte Proben untersucht, d. h. für jede Messung im Rheometer wurde die jeweils verwendete Probe aus versuchstechnischen Gründen noch einmal durchgemischt, wodurch ein Teil der bereits vorhandenen Hydrationsprodukte wieder zerstört wurde. Trotzdem zeigen die Ergebnisse, daß das Verfahren sowohl den Einfluß eines Zusatzmittels auf die Fließeigenschaften des Zementleims als auch den Erstarrungsvorgang selbst erfaßt. Im übrigen ist es technisch möglich, Versuche in Rotationsrheometern auch an ungestörten Proben durchzuführen und somit die Änderung der Fließeigenschaften während der Hydratation zu messen.

Das für die verschiedenen Anwendungsgebiete wichtige Fließverhalten des Zementleims ist also mit rheologischen Methoden zu

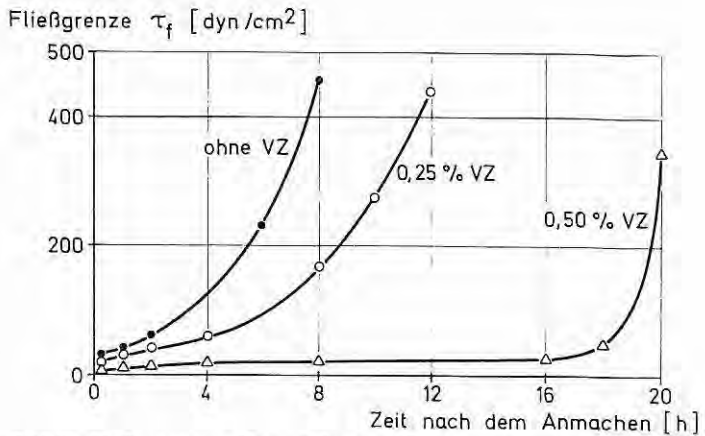


Bild 13 Fließgrenze von Zementleim aus PZ 275 in Abhängigkeit vom Verzögererzusatz und von der Zeit

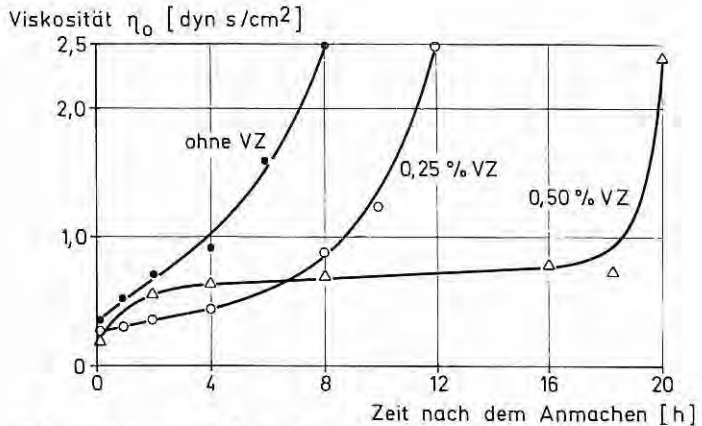


Bild 14 Viskosität von Zementleim aus PZ 275 in Abhängigkeit vom Verzögererzusatz und von der Zeit

erfassen, und die Kennwerte sind physikalisch definiert. Inwieweit die aus dem Scherversuch, d. h. aus der eindimensionalen Belastung, ermittelten Kennwerte für die räumliche Beanspruchung im Anwendungsfall kennzeichnend sind, müssen Vergleichsversuche noch zeigen.

## 5. Rheologische Eigenschaften von Mörteln

Auch das Fließverhalten von Mörteln kann in entsprechend konstruierten Rotationsrheometern untersucht werden. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, daß das Fließverhalten des Mörtels qualitativ mit dem des Zementleims übereinstimmt. Einflußgrö-

ßen sind hier neben den Eigenschaften des Zementleims die Korngröße und Kornzusammensetzung des Zuschlags sowie der Volumenanteil von Zementleim und Zuschlag.

Als Beispiel sind in Bild 15 die Belastungskurven von Zement-Quarzmehl-Suspensionen dargestellt, bei denen das Verhältnis von Wasser zu Trockenstoffen konstant war, während jeweils der Anteil dreier Quarzmehle mit folgenden Feinheiten variiert wurde:

Quarzmehl W3	740 cm <sup>2</sup> /g <sup>1)</sup>
Quarzmehl W6	2330 cm <sup>2</sup> /g
Quarzmehl W12	3550 cm <sup>2</sup> /g

zum Vergleich PZ 275                    2120 cm<sup>2</sup>/g

Bild 15 zeigt deutlich den Einfluß der Feinheit des Zuschlags auf das rheologische Verhalten der untersuchten Feinmörtel. Während beim Quarzmehl W6 mit etwa gleicher Feinheit wie der Zement

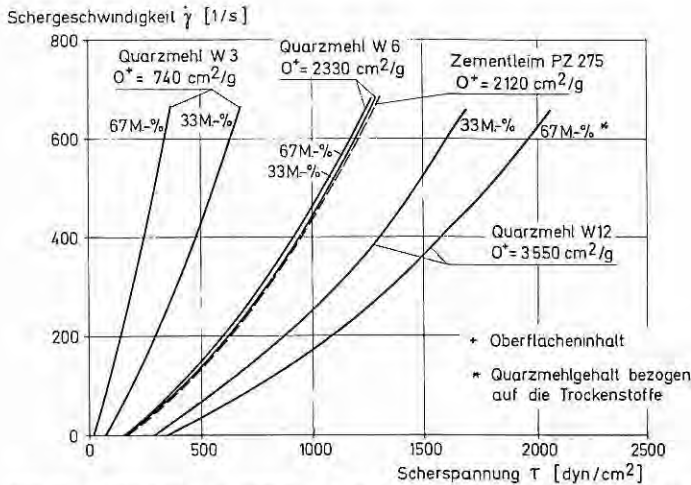


Bild 15 Fließkurven von Zementmörteln aus PZ 275 und verschiedenen Zuschlägen; Wasser/Trockenstoffe = 0,40; nach Flatten [1]

die Zuschlaganteile die Fließkurven gegenüber dem Zement praktisch nicht beeinflussen, nehmen Viskosität und Fließgrenze bei größerem Quarzmehl (W3) ab und umgekehrt bei feinerem Quarzmehl (W12) zu.

Die wenigen Ergebnisse zeigen bereits, daß beim Mörtel das Fließverhalten besonders stark durch den Zuschlag, vor allem durch dessen Feinheit oder Kornzusammensetzung bestimmt wird. Die Strukturbildung im Zementleim wird vor allem durch die Wirkung der inneren Kräfte bei sehr feinen Quarzmehlen verstärkt, die

<sup>1)</sup> Oberflächeninhalt, berechnet mit dem Formfaktor für kugelförmige Teilchen

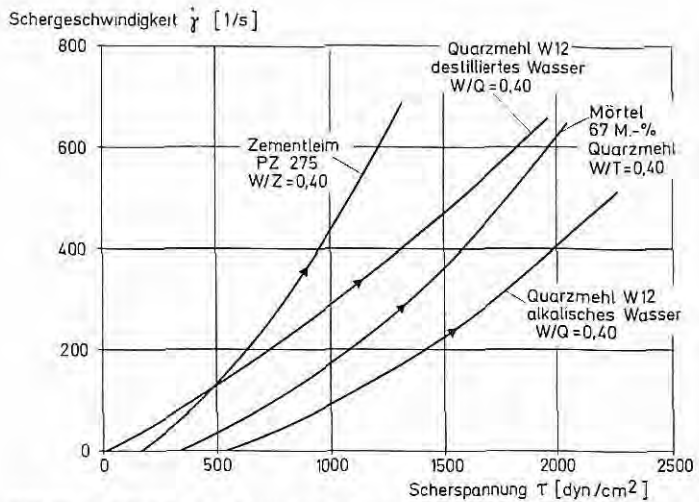


Bild 16 Fließkurven von Quarzmehl-Suspensionen im Vergleich zu Zementleim und Mörtel

im alkalischen Medium besonders groß ist. Letzteres geht aus Bild 16 hervor, in dem Fließkurven von Suspensionen aus Quarzmehl und normalem bzw. alkalischem Wasser dargestellt sind. Danach wird die normale Quarzmehl-Suspension, die fast einer Newtonschen Flüssigkeit entspricht, bei alkalischem Wasser zu einem Bingham-Körper mit großer Fließgrenze und größerer Viskosität. Die Mörtel-Fließkurven liegen dann zwischen den Kurven der alkalischen Suspension und des Zementleims.

## 6. Rheologische Eigenschaften von Frischbeton

Über das rheologische Verhalten von Frischbeton läßt sich bis heute noch keine allgemeingültige Aussage machen, da einerseits der Grobzuschlag das Verhalten des Betons in starkem Maße beeinflusst, andererseits rheologische Messungen infolge des groben Kornes sehr schwierig sind. Betrachtet man den Normalbeton als Dispersion, so besteht seine disperse Phase aus Körnern von wenigen  $\mu m$  bis zu über 30 mm Durchmesser, die somit einen Bereich von rd. 4 Zehnerpotenzen umfassen. Abgesehen von der Schwierigkeit, ein Rotationsrheometer für eine solche Korngröße zu bauen, ist es unwahrscheinlich, daß in einer so groben Dispersion die Grundvoraussetzung für die oben beschriebenen rheologischen Messungen, ein Fließvorgang mit laminarer Strömung, erreicht werden kann.

Im rheologischen Verhalten von Frischbeton können, wie die bisherigen Untersuchungen gezeigt haben, zwei Verformungszustände unterschieden werden [8]. Bei der Beanspruchung beim Transport und zeitweise auch beim Einbringen befindet sich der Frischbeton in einem plastischen Zustand, der wesentlich von der

inneren Reibung der Grobzuschläge beeinflusst wird. Während des Mischens und unter Rüttelwirkung fällt demgegenüber die innere Reibung der Grobzuschläge ab, und die Matrix wird flüssig, d. h. der Frischbeton befindet sich in einem flüssigen Zustand.

Zur Untersuchung der inneren Reibung der Grobzuschläge wurden von L'Hermite und Tournon [9] Scherversuche an trockenen Zuschlägen und an Frischbeton durchgeführt. Die Versuchseinrichtung (Bild 17) besteht aus zwei kreisringförmigen Halbschalen, in denen sich der untersuchte Baustoff befindet. Die beiden Halbschalen können gegeneinander verdreht werden, wobei das eingefüllte Material in der Fuge zwischen den Schalen gesichert wird. Dabei werden verschiedene Auflasten und damit verschiedene Normalspannungen aufgebracht. Es wird die auftretende Scherspannung gemessen, deren Verlauf während der Verdrehung bei unterschiedlichen Normalspannungen Bild 18 zeigt.

Bild 17 Gerät zur Messung der Scherfestigkeit von Frischbeton; nach L'Hermite und Tournon [9]

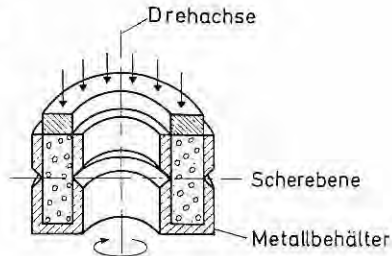
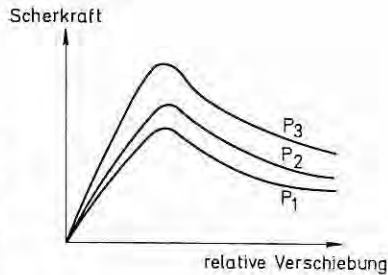


Bild 18 Beziehung zwischen Scherkraft und Verschiebung im Gerät nach Bild 17 bei Normalkräften  $P_1$  bis  $P_3$ ; nach L'Hermite und Tournon [9]



Trägt man die maximal gemessene Scherspannung über der Normalspannung auf, so erhält man ein Scherdiagramm, aus dem die innere Reibung als Tangens des Neigungswinkels  $\Phi$  der Schergeraden bestimmt werden kann. Scherdiagramme für trockenen Zuschlag und Frischbeton zeigen die Bilder 19 und 20. Die innere Reibung ist bei Beton durch die Schmierwirkung des Zementleims kleiner als beim trockenen Zuschlag. Zusätzlich wirkt aber



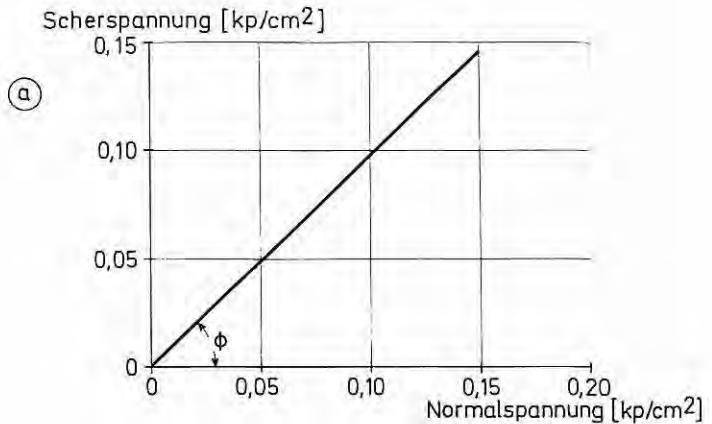


Bild 19 Scherdiagramm für Zuschlag

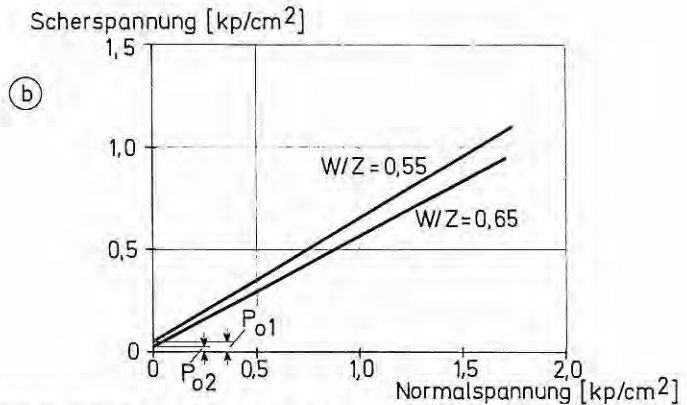


Bild 20 Scherdiagramme für Frischbeton

beim Beton die Kohäsion infolge der Fließgrenze des Zementmörtels, die sich im Abschnitt  $P_o$  auf der Ordinate ausdrückt.

L'Hermite und Tournon konnten die Abhängigkeit der inneren Reibung  $k$  des Grobzuschlags von der Korngröße  $d$  durch die Gleichung

$$k = a \cdot d^b$$

ausdrücken.

Neben diesen Untersuchungen im plastischen Zustand führten L'Hermite und Tournon auch Versuche in flüssigem Zustand, d. h. beim Rütteln, durch. Bei dem von ihnen gewählten Verfahren wurde die Bewegung einer Stahlkugel im Frischbeton unter Rüttelwirkung untersucht, wobei die Gewichtskraft und die Geschwindigkeit

keit der Kugel gemessen wurden. Daraus wurde eine scheinbare

Viskosität  $\eta_s = \frac{F}{6\pi r v}$  nach dem Gesetz von Stokes ermittelt, die der scheinbaren Viskosität nach Bild 3 entspricht. Es ist allerdings fraglich, ob in diesem Falle die Voraussetzungen für die Anwendung des Stokesschen Gesetzes gegeben sind. Desov [10] hat mit einer ähnlichen Versuchseinrichtung die Abhängigkeit der scheinbaren Viskosität von der Amplitude der Rüttelwirkung und damit von der Höhe der Belastung nachgewiesen (Bild 21).

Da die scheinbare Viskosität  $\eta_s$  entsprechend Bild 3 kein absoluter Wert, sondern von der Fließgrenze abhängig ist, ergibt sie rheologisch gesehen keinen genauen Aufschluß über das Fließverhalten des Betons, wohl aber einen guten Anhalt für das relative Verhalten.

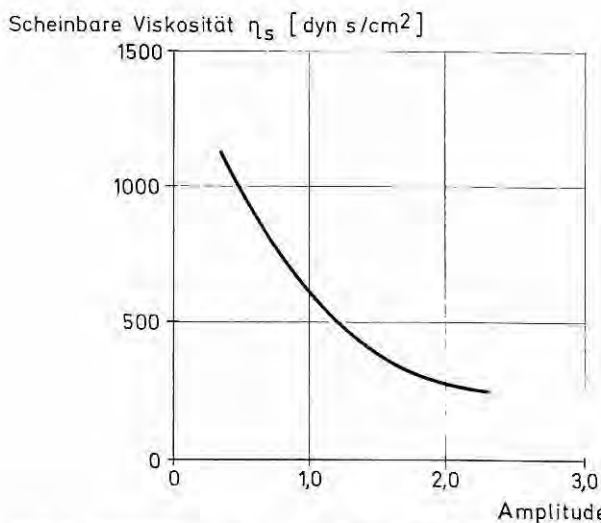


Bild 21 Scheinbare Viskosität von Zementmörtel in Abhängigkeit von der Rüttelamplitude; nach Desov [10]

Aus dem Auftreten der Kohäsion im Scherversuch an Beton (Bild 20) kann man schließen, daß sich auch der Beton im flüssigen Zustand wie ein strukturviskoser Bingham-Körper verhalten wird. Dies ist eine wichtige Feststellung, da dieses gleiche rheologische Verhalten die rheologische Synthese von Mörtel und Grobzuschlag vereinfachen wird. Man muß dabei von der rheometrischen Untersuchung des Zementleims und geeigneten Versuchen am Zuschlag und Beton ausgehen, die sich im Bereich des Sandes und Mörtels überlappen. Leider gibt es dafür bisher noch keine geeigneten Verfahren. Verdichtungsversuche mit Aufnahme der Verdichtungskurve in Anlehnung an die Versuche von Losinger [11] im Institut für Bauforschung der RWTH Aachen ergaben keine auswertbaren

Beziehungen zum rheologischen Verhalten des Zementleims, wahrscheinlich weil dabei das Fließverhalten von der Verdichtungswirkung überlagert wird. Zur Zeit wird untersucht, ob man durch Ausschalten der Verdichtungswirkung, d. h. durch das Eindringen eines Körpers in den vollkommen verdichteten Beton, das Fließverhalten des Frischbetons besser beurteilen kann. Erst nach diesen und weiteren Untersuchungen wird sich zeigen, ob man analog zu den Untersuchungsergebnissen an Zementleim auch für den Frischbeton eine Fließkurve erhalten und das rheologische Verhalten geschlossen darstellen kann.

## **7. Zusammenfassung**

Eine genaue Kenntnis des Verformungsverhaltens von Zementleim, Mörtel und Frischbeton erscheint angesichts der immer vielfältigeren Anwendungsgebiete dieser Baustoffe sehr wichtig. Die bisher verwendeten Konsistenzmeßverfahren haben den Nachteil, daß sie nur Teilbereiche des Verformungsverhaltens erfassen, wobei die ermittelten Kennwerte nur Relativwerte sein können. Physikalisch definierbare Kennwerte liefern die Meßmethoden der Rheologie, mit deren Hilfe der Zusammenhang zwischen Spannung und Verformungsgeschwindigkeit ermittelt werden kann.

Der Frischbeton ist ein Zweiphasensystem, dessen Verformungsverhalten von den beiden Phasen, der Mörtelmatrix und dem Grobzuschlag, beeinflußt wird; daher erscheint es sinnvoll, zunächst das Fließverhalten des Zementleims und des Mörtels zu untersuchen, um dann durch die Zugabe immer größeren Zuschlags zum Beton zu gelangen.

Der Zementleim weist, wie Untersuchungen im Rotationsrheometer ergaben, das Fließverhalten eines strukturviskosen Bingham-Körpers mit thixotropen Eigenschaften auf. Dieses Verhalten wird durch eine Strukturbildung infolge der inneren Kräfte verursacht. Die Fließkurve des Zementleims kann durch ein allgemeines Fließgesetz in guter Näherung mathematisch beschrieben werden, wobei die gewonnenen Parameter als rheologische Kennwerte in einem funktionellen Zusammenhang zu verschiedenen Baustoffeigenschaften stehen.

So kann der Zusammenhang zwischen Fließgrenze und Viskosität und dem Wasserzementwert durch eine Exponentialfunktion dargestellt werden, während zwischen der Mahlfineinheit des Zementes und den rheologischen Kennwerten eine näherungsweise lineare Abhängigkeit vorliegt.

Wenige an Mörtel durchgeführte Versuche zeigten, daß auch die Korngröße und Kornzusammensetzung des Zuschlags die rheologischen Eigenschaften des Mörtels beeinflussen.

Über das Verformungsverhalten von Frischbeton ist heute noch keine geschlossene Aussage möglich, da der Grobzuschlag eine exakte rheologische Untersuchung im Rotationsrheometer unmöglich macht.

Der Einfluß des Grobkorns auf das Verformungsverhalten kann durch Scherversuche nachgewiesen werden, die darauf schließen

lassen, daß der Beton im flüssigen Zustand rheologisch ähnliches Verhalten wie der Mörtel zeigt. Es erscheint daher möglich, durch die Synthese getrennter Untersuchungen an der Mörtelmatrix und am Grobzuschlag zu einer geschlossenen Beschreibung des rheologischen Verhaltens von Frischbeton zu gelangen.

#### SCHRIFTTUM

- [1] Flatten, H.: Untersuchungen über das Fließverhalten von Zementleim. Diss. RWTH Aachen (noch nicht veröffentlicht).
- [2] Delyes, R.: La rhéologie des pâtes à ciment dans la voie humide. Revue des Matériaux de Construction Nr. 466/467 (1954), S. 193/213 und Nr. 468 (1954), S. 231/243; ebenso Publication Technique No. 68, Centre d'Etudes et des Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques, Paris 1954.
- [3] Papadakis, M.: Die Bedeutung der Feinstoffe in der Fließkunde des Frischbetons. Betonstein-Zeitung 29 (1963) H. 11, S. 554/557.
- [4] Ish-Shalom, M., und S. E. Greenberg: The Rheology of Fresh Portland Cement Pastes. Proc. Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement, NBS Monograph 43,2, Washington 1962, S. 731/743.
- [5] Papadakis, M.: Rhéologie des suspensions de ciment. Revue des Matériaux de Construction Nr. 476 (1955), S. 121/137.
- [6] Papadakis, M.: L'injectabilité des coulis et mortiers de ciment. Revue des Matériaux de Construction Nr. 531 (1959), S. 285/302.
- [7] Kaiser, W.: Die technologischen Eigenschaften von Zementsuspensionen und die daraus ableitbaren Folgerungen für die Praxis im Tiefbau. Otto-Graf-Institut, Universität Stuttgart, Schriftenreihe Heft 42/1969.
- [8] Powers, T. C.: The Properties of Fresh Concrete. Chapter 10. John Wiley & Sons, New York/London/Sydney/Toronto 1968, S. 437/532.
- [9] L'Hermite, R., und G. Tournon: La vibration du beton frais. Publication Technique No. 2, Centre d'Etudes et des Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques, Paris 1948; ebenso Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, N.S. 1 (1948) Nr. 11, S. 1/76.
- [10] Desov, A. E.: Strukturviskosität von Zementleim und Beton (in russisch). Kolloidnyj Zhurnal 13 (1951) Nr. 5, S. 346/356.
- [11] Losinger, R.: Die Messung der Verarbeitbarkeit von Frischbeton. Diss. ETH Zürich 1956.