

R. Vogel

## Stabilität und Fließverhalten von Selbstverdichtendem Beton <sup>1)</sup>

In der deutschsprachigen Fachliteratur über die Verarbeitungseigenschaften von Selbstverdichtendem Frisch-Beton haben seit geraumer Zeit Aussagen über seine ‚Fließfähigkeit‘ und ‚Robustheit‘, über ‚Tragfähigkeit‘ und ‚Sedimentationsstabilität‘ ebenso wie über seine ‚Entlüftungs- und ‚Blockierneigung‘ etc. einen festen Platz. Man findet auch, dass diese Begriffe vom praktisch tätigen Technologen, den Bedürfnissen entsprechend, geprägt und verstanden werden. Allerdings ist nur unscharf zu erkennen, durch welche konkreten Messwerte diese Aussagen im Einzelnen belegt werden können. Der Hinweis auf die bekannten, teilweise genormten Messverfahren bzw. -größen, z.B. Ausbreitmaß, Setzfließmaß, L-Kasten sowie auch U-Box Höhendifferenzmessungen etc. , bringt diesbezüglich nur begrenzten Erkenntnisgewinn, da diese begriffsübergreifende Aussagen liefern. Die ebenfalls oft praktizierte Aufnahme von Fließkurven für Mörtel bzw. Frischbeton zeigt zwar sehr anschaulich den Einfluss einzelner Gemengekomponenten, eine quantifizierte, zu realisierende Zielstellung für die mit der Fließkurve fixierten Materialkenngrößen ist bisher noch nicht genannt worden.

Anliegen dieser Ausarbeitung ist es, die oben genannten Frischbeton-Eigenschaften physikalisch zu deuten und zu beschreiben – und zwar ausschließlich aus rheologischer, strömungsmechanischer Sicht. Damit soll es ermöglicht werden, einzelnen Begriffen eigenschaftstypische Kenngrößen und -zahlen zuzuordnen. Ziel ist es, u.a. den Verarbeitungseigenschaften die typischen Materialkenngrößen des SVB zuzuordnen.

Bei allen Betrachtungen wird vorausgesetzt, dass sowohl Basismörtel als auch Frischbeton gut durchmischt sind, also durchweg gleiche Eigenschaften besitzen und ein stabiles Gemisch darstellen, das auch bei mechanischer Beanspruchung in sich geschlossen bleibt. Aus diesem Blickwinkel betrachtet, können für Selbstverdichtenden Frischbeton auch die Regeln und Gesetze der Kontinuumsmechanik angewendet werden. Selbstverständlich wird davon ausgegangen, dass mit diesem SVB auch die erforderlichen Eigenschaften des angestrebten Festbetons realisiert werden können.

### Einleitung

Geht man davon aus, dass die Fließeigenschaften von Frischbeton ebenso wie die des Basismörtels mit Hilfe der Fließkurve  $\tau(\dot{\gamma})$  hinreichend beschrieben werden können, so ist anzunehmen, dass die daraus ablesbaren Materialkenngrößen die eingangs genannten Verarbeitungseigenschaften mitbestimmen. Aus der grafischen Darstellung des prinzipiellen Verlaufs möglicher Fließkurven – Abb.1 – folgt, dass wenigstens zwei, sehr oft auch drei Materialparameter dazu gehören. Das sind die Grenzfließspannung  $\tau_0$  , also die Fließspannung ab welcher Fließen beginnt (Fließgrenze), die Viskosität  $\eta$  , die durch den Gradienten  $\Delta\tau/\Delta\dot{\gamma}$  repräsentiert wird sowie eine Materialkenngröße, die sich

---

<sup>1)</sup> Vortrag zur 16. IBAUSIL, Weimar 2006

in der Krümmung des Kurvenverlaufes widerspiegelt. Wichtig ist in diesem Zusammenhang der Hinweis auf die Tatsache, dass diese drei Größen nicht völlig frei von der Geometrie der verwendeten Messzelle sind. Was insbesondere bei Vergleichen zu

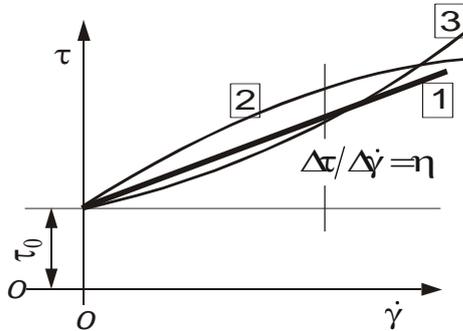


Abb.1

*Fließkurven des SVB bzw. des Mörtels.*

*Schematische Wiedergabe bei  
 plastischem (1), pseudoplastischem (2)  
 und dilatantem Materialverhalten (3).*

beachten ist. Ebenso spielen weitere Geometriefaktoren eine Rolle, z.B. die der Körnung der groben Zuschläge.

Auch muss bei der Deutung der eingangs genannten Verarbeitungsaussagen der Geometriebezug hinsichtlich Form und Abmessungen der Fließumgebung beachtet und hergestellt werden.

Die vorliegende Abhandlung ist eine Fortführung des bereits veröffentlichten Beitrages /1/ zum gleichen Themenkomplex.

### **Bedeutung und Gewicht der Grenzfließspannung**

Die Tragfähigkeit des Basismörtels für grobe Zuschläge, insbesondere für massive, erkennt man auch an der Sedimentationsneigung des Frischbetons. Eine *vollkommene* Tragfähigkeit heißt: Keine Sedimentation der Zuschläge. Wie in /1/ gezeigt wird, kann dieser Zustand über einer Kräftebilanz erfasst werden. Danach ist Frischbeton ausreichend sicher gegenüber Sedimentationserscheinungen, wenn der Basismörtel das Stabilitätskriterium

$$\frac{\tau_{0,M}}{d \cdot g \cdot |\Delta\rho_{K-M}|} = \text{konst.} = \Lambda \quad (1)$$

erfüllt, d.h. wenn er eine ausreichend große Grenzfließspannung  $\tau_{0,M}$  besitzt.

Das Stabilitätskriterium verkörpert ein Kräfteverhältnis, gebildet aus inneren, stoffspezifischen und äußeren Kräften, die am Korn angreifen. Die Konstante ist abhängig von der Kornform des Zuschlages. Besteht der Grobzuschlag aus natürlichem Korn und wird seine maximale Kornabmessung der Maschenweite  $d$  des verwendeten Siebes gleichgesetzt, so kann  $\Lambda \geq 0,3$  angesetzt werden. Größere Werte bringen zwar einen Zuwachs an Tragfähigkeit, aber gleichzeitig eine Einbuße an Fließfähigkeit, wie noch gezeigt wird.

Wird das  $\Lambda$ -Kriterium eingehalten, kann schwerer Zuschlag nicht sedimentieren bzw. kann sich leichter nicht an der Oberfläche sammeln.

Nimmt man das Stabilitätskriterium als Grundlage für weitere Überlegungen, so ist zu beachten bzw. zu schlussfolgern:

1. Da in Gl.(1) die Größe  $\tau_{0,M}$  nicht im Sinne einer Spannung, sondern als Stoffgröße zu verstehen ist, muss die Dichtedifferenz  $\Delta\rho_{K-M}$  als Betrag gesetzt werden, wenn alle Zuschlagvarianten Berücksichtigung finden sollen.
2. Die Angabe  $\Lambda \approx 0,3$  setzt voraus, dass weitere äußere Kräfte vernachlässigbar klein sind bzw. klein gehalten werden.
3. Die Gültigkeit des  $\Lambda$ -Kriteriums ist nicht beschränkt auf das Gemenge Mörtel / Grobzuschlag. Es gilt auch für **jede andere Kombination** von Fluid / Korn.
4. Über Gl.(1) ist es möglich, die erforderliche Fließspannung  $\tau_{0,M}$  des Basismörtels zu bestimmen, wenn Dichtedifferenz  $|\Delta\rho_{K-M}|$  und maximaler Korndurchmesser des Zuschlages bzw. Siebmaschenweite  $d$  bekannt sind. Wird  $\tau_{0,M}$  wesentlich größer gewählt, so wird die damit erreichte Stabilitätszunahme auf Kosten des Fließwiderstandes erkauft.
5. Bei gegebener Fließspannung  $\tau_{0,M}$  und bekannter Dichtedifferenz  $|\Delta\rho_{K-M}| \hat{=} |\rho_{LB} - \rho_B| \approx |\rho_B|$  kann mit dem Stabilitätskriterium auch die kleinste Luftblasenabmessung  $d_{LB}$  bestimmt werden, die ein Entlüften gerade noch ermöglicht.

Abb.2 zeigt eine Auswertungsvariante des Stabilitätskriteriums. Über den Parameter Siebmaschenweite  $d$  kann man dort von der effektiven Dichtedifferenz  $|\Delta\rho_{K-M}|$  ausgehend, den Sollwert für die erstrebenswerte Fließgrenze des Basismörtels finden. Zu einer gängigen Dichtedifferenz zwischen Zuschlag und Mörtel von etwa  $350 \text{ kg/m}^3$  gehört

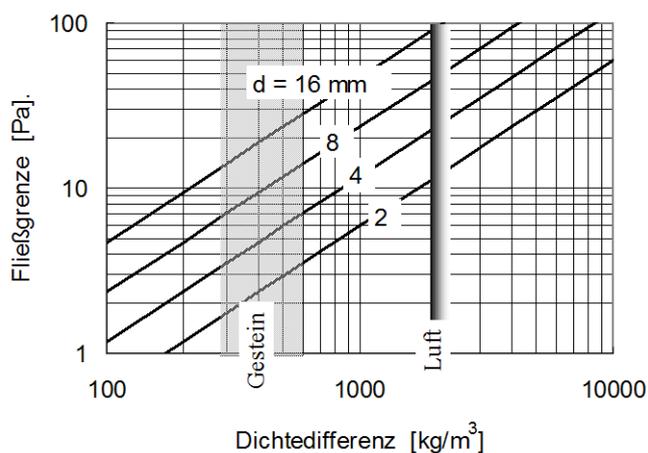


Abb.2

Die erstrebenswerte Mindestfließgrenze  $\tau_{0,M}$  in Abhängigkeit vom Betrag der Dichtedifferenz  $|\Delta\rho_{K-M}|$  zwischen Zuschlag und dem tragenden Mörtel.

Vorgabe:

Natürliches Korn  
und  $\Lambda = 0,3$

danach ein Sollwert für die Fließgrenze von rund 15 Pa , wenn das Größtkorn des Zuschlages mit der Siebmaschenweite  $d = 16 \text{ mm}$  fixiert wird. Unter sonst gleichen Bedingungen, aber kleinerem Korn kann die Fließgrenze weit niedriger liegen. Allgemein gültig muss man allerdings festhalten, dass Sedimentations- und Separationsstabilität nur erreicht werden kann mit Fluiden, die eine Fließgrenze besitzen. **Selbstverdichten den Beton ohne Fließgrenze herstellen zu wollen, ist demnach eine unrealistische physikalisch-technische Zielstellung.** Aus dem Stabilitätskriterium folgt auch, dass eine Lage- bzw. Ortänderung des Kornes erreicht wird, wenn weitere äußere Kräfte einwirken, z.B. beim Einbringen des Betons. Es ist allerdings auch wichtig zu erkennen, dass eine so erreichte Umverteilung des Haufwerks nur rückgängig gemacht werden kann durch gleich große entgegen gerichtete äußere Kräfte.

Will man die Entlüftungswilligkeit des Frischbetons beurteilen, so ist das  $\Lambda$ -Kriterium auch hilfreich. Der in diesem Fall wirksame Betrag der Dichtedifferenz  $|\Delta\rho_{K-M}| \hat{=} |\rho_{LB} - \rho_B| \approx |-\rho_B|$  ist wegen der verhältnismäßig geringen Luftdichte  $\rho_{LB}$  etwa der Betondichte  $\rho_B$  gleichzusetzen. Unter der Annahme einer Fließgrenze von 15 Pa (wie oben) folgt aus Abb.2 eine Luftblasengröße von  $> 2..3 \text{ mm}$  , die entweichen kann.

Mit dem Stabilitätskriterium gewinnt die Materialkonstante  $\tau_{0,M}$  an Bedeutung – mehr als bisher. Ihre Bestimmung kann in bekannter Weise mit Hilfe der Fließkurve geschehen, aber nur dann, wenn eine verhältnismäßig sichere Extrapolation der Messwerte nach  $\dot{\gamma} = 0$  möglich ist. Ansonsten muss sie mit Hilfe eines Eintauchkörpers ermittelt werden. Verfolgt man den zuerst genannten Weg, so sind bei der Approximation von Versuchswerten die bekannten Fließmodelle auf Anwendbarkeit zu prüfen.

### Ein Fließmodell für SVB, Mörtel und Komponenten

Da für SVB bzw. dessen Basismörtel je nach Zusammensetzung sowohl plastisches, pseudoplastisches als auch dilatantes Materialverhalten festgestellt werden kann, wird zur Erfassung der Fließkurve einerseits das *BINGHAM*-Gesetz , andererseits die empirische Modellbeziehung von *HERSCHEL-BULKLEY* verwendet. Die Nutzung letzterer ist insofern problematisch, da bei SVB relativ kleine Grenzfließspannungen zu verzeichnen sind und diese außerdem durch Extrapolation nach  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  ermittelt werden müssen.

Genau für diesen Anwendungsfall liefert die *HERSCHEL-BULKLEY*-Beziehung unbefriedigende Ergebnisse, sowohl im Hinblick auf die Fließgrenze  $\tau_0$  als auch auf die Viskosität  $\eta_{\dot{\gamma} \rightarrow 0}$  .

Es bleibt also festzuhalten:

Die Gültigkeit des *HERSCHEL-BULKLEY*-Modells ist beschränkt auf relativ große Schergefälle und, damit der Extrapolationsfehler klein bleibt, auf relativ große Fließgrenzen. Es hat außerdem den Nachteil, dass kein direkter Vergleich der Konstanten mit den Stoffgrößen aus dem *BINGHAM*-Gesetz möglich ist.

Zur Überbrückung dieser Lücke wird nachfolgend eine Lösung vorgeschlagen.

Der Ansatz hierfür ist durch die Feststellung geprägt, dass jedes Fluid vom Grundsatz her *NEWTON*-Charakter besitzt. Um dies zu erkennen, muss die Belastung des Materials nur klein genug gewählt werden. Dieses Postulat bedeutet für Fluide mit definierter Fließgrenze, dass das *BINGHAM*-Gesetz z.B. auch bei Dilatanz gilt, aber eben nur für sehr kleine Scherraten. Darüber hinaus muss es angepasst werden, was nachfolgend geschehen soll.

Ein gekrümmter Verlauf der Fließkurve weist darauf hin, dass die Scherbelastung auch eine Änderung der Viskosität bewirkt. Für die Fließkurve  $\tau(\dot{\gamma})$  gilt dann

$$\tau = \eta(\tau) \cdot \dot{\gamma} \quad .$$

Zur Veranschaulichung dieses Effekts zeigt Abb.3 beispielsweise für ein Fluid mit pseudoplastischen Eigenschaften die Schergefälleabhängigkeit  $\dot{\gamma}(\tau)$ . Die dort eingetragene Tangente soll den *NEWTON*'schen Ursprung dieser Funktion verdeutlichen. Im oberen Teil dieses Bildes ist die damit verbundene Änderung der relativen Viskosität  $\varphi = \eta/\eta_0$  dargestellt. Die Abweichung der Funktion  $\varphi(\tau)$  von 1,0 (*NEWTON*) bringt die mit der Belastung einhergehende ‚Verflüssigung‘ des Materials zum Ausdruck. Mit Abb.3 wird der obengenannte Grundsatz realisiert, der sich im Falle  $\tau = 0$  in einem  $\varphi = \eta/\eta_0 = 1$  bzw.  $\eta = \eta_0$  widerspiegelt. Alle denkbar möglichen mathematischen Beziehungen  $\varphi(\tau)$  müssen diesem Sachverhalt Rechnung tragen.

Bei sehr kleinen Scherraten kann man die Änderung der relativen Viskosität durch

$\varphi \approx 1 - q \cdot \tau$  näherungsweise wiedergeben und damit die Viskositätsänderung durch

$$\eta(\tau) \approx \eta_0 \cdot (1 - q \cdot \tau) \quad \text{beschreiben.}$$

Darin ist der Gradient  $q$  auch als eine Bezugsspannung im Sinne von

$$q = \frac{1 - \varphi/\varphi_0}{\tau} = 1/\sigma \quad \text{deutbar. Von}$$

dieser Vorstellung ausgehend, wird nun geschrieben:

$$\eta = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = \eta_0 \cdot (1 - \tau/\sigma) \quad \text{und}$$

$$\text{folglich} \quad \eta_0 \cdot d\dot{\gamma} = \frac{d\tau}{1 - \tau/\sigma} \quad .$$

Die Integration dieses Ausdrucks liefert

$$\tau - \tau_0 = \sigma \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{\eta_0}{\sigma} \cdot \dot{\gamma} \right] \right\} \quad . \quad (2)$$

Für bestimmte Anwendungsfälle ist es zweckmäßig und vielfach auch anschaulicher die damit charakterisierte Fließkurve umzuschreiben. Entwickelt man den Exp.-Anteil in eine Reihe, so

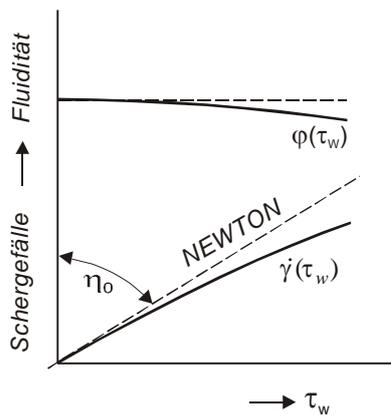


Abb.3 Schergefälle- und Viskositätsverlauf für eine pseudoplastische Flüssigkeit.

erhält man an Stelle von Gl.(2)

$$\tau - \tau_0 = \sigma \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 + \frac{1}{1!} \left( -\frac{\eta_0}{\sigma} \cdot \dot{\gamma} \right) + \frac{1}{2!} \left( -\frac{\eta_0}{\sigma} \cdot \dot{\gamma} \right)^2 + \frac{1}{3!} \left( -\frac{\eta_0}{\sigma} \cdot \dot{\gamma} \right)^3 + \dots \right] \right\}$$

$$\tau - \tau_0 = \eta_0 \cdot \dot{\gamma} \cdot \left\{ 1 - \left[ \frac{\eta_0}{2\sigma} \cdot \dot{\gamma} \right] + \frac{2}{3} \cdot \left[ \frac{\eta_0}{2\sigma} \cdot \dot{\gamma} \right]^2 - \frac{1}{3} \cdot \left[ \frac{\eta_0}{2\sigma} \cdot \dot{\gamma} \right]^3 + \dots \right\}, \quad (3)$$

oder auch als Näherungslösung für  $\frac{\eta_0}{2\sigma} \cdot \dot{\gamma} < 1$

$$\tau - \tau_0 \approx \eta_0 \cdot \dot{\gamma} \cdot \frac{1}{\left\{ 1 + \frac{\eta_0}{2\sigma} \cdot \dot{\gamma} \right\}}. \quad (4)$$

Die genannten Beziehungen gelten für die beschriebene pseudoplastische Verformung. Bei dilatantem Materialverhalten kann sinngemäß vorgegangen werden. Im Ergebnis ist ein Vorzeichenwechsel in der geschweiften Klammer festzustellen. Verwendet man die Näherungslösung, so gilt allgemein für die Fließkurve bei kleinen Scherraten

$$\begin{array}{ll} \text{Bei pseudoplast. Materialverhalten (+)} & \tau = \tau_0 + \eta_0 \cdot \dot{\gamma} \cdot \frac{1}{\left\{ 1 \pm \frac{\eta_0}{2 \cdot \sigma} \cdot \dot{\gamma} \right\}}. \quad (5) \\ \text{bei Dilatanz (-)} & \end{array}$$

Wird beabsichtigt in der Nähe von  $\dot{\gamma} \geq 0$  zu arbeiten, so wäre diese Beziehung an Stelle der *HERSCHEL-BULKLEY*-Formulierung zu empfehlen.

Alle drei Beziehungen – (2), (3) und (5) – erfüllen (voraussetzungsgemäß) die Nullbedingung, nämlich  $\eta = \eta_0$  bei  $\dot{\gamma} = 0$ . Weiterhin erkennt man mit Hilfe einer Grenzwertbetrachtung

$$\lim_{\sigma \rightarrow \infty} (\tau - \tau_0) = \eta_0 \cdot \dot{\gamma}, \quad \text{dass} \quad \eta_0 \hat{=} \eta_{pl}$$

entspricht und somit eine direkte Vergleichsmöglichkeit mit Ergebnissen aus dem *BINGHAM*-Gesetz gegeben ist. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Fließkurve  $\tau(\dot{\gamma})$  durch drei Materialeigenschaften bestimmt wird. Das sind neben der Grenzfließspannung  $\tau_0$  [Pa], die Nullviskosität  $\eta_0$  [Pa s] und der Gradient  $1/\sigma$  [1/Pa] aus  $\varphi(\tau)$ . Sie sind typisch und kennzeichnend für den jeweiligen Stoff.

Zur Einschätzung bzw. Bewertung der vorliegenden Ergebnisse, sind diese dem bekannten Wissensstand in der nachfolgenden Tafel gegenübergestellt.

In den ersten Spalten dieser Tafel stehen die bekannten Modellgleichungen, die um das Ergebnis der vorliegenden Arbeit (letzte Spalte) ergänzt wurden. Für die gegebene Situation, nämlich Fließkurven von SVB etc. durch eine treffende Modellbeziehung wiedergeben zu können, liefert Zeile 3 von Tafel 1 das Entscheidungskriterium. Dort ist die Viskosität des nachzubildenden, zu beurteilenden Fluids angegeben, die bei geringster Scherung, incl.  $\dot{\gamma} = 0$  anliegt. Sowohl beim *BINGHAM*-Modell, als auch bei allen Beziehungen in der letzten Spalte, findet man einen endlichen Wert für die Viskosität, der darüber hinaus noch untereinander vergleichbar ist, da  $\eta_0 \hat{=} \eta_{pl}$  entspricht. Bei beiden Modellbeziehungen ist dies eine Orientierungsgröße, die sowohl für die Bestimmung

der wahren als auch der scheinbaren Viskosität Gültigkeit besitzt. Wie bereits eingangs herausgearbeitet, bietet hier die *HERSCHEL-BULKLEY*-Beziehung mit  $\eta = 0$  eine unbefriedigende Lösung.

Tafel 1 Modellbeziehungen zur Auswertung von Fließkurven von Selbstverdichtendem Beton, dessen Basismörtel sowie Bestandteilen.

Gleichungsbezug	<i>BINGHAM</i>	<i>HERSCHEL-BULKLEY</i>		neuer VORSCHLAG	
		pseudoplast $n < 1 < n$	dilatant	pseudoplast (+)	dilatant (-)
1.) $\tau - \tau_0$	$\eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$	$k \cdot \dot{\gamma}^n$		$\eta_0 \cdot \dot{\gamma} \cdot \frac{1}{1 \pm \frac{\eta_0}{2\sigma} \cdot \dot{\gamma}}$	
2.) $\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}}$ wahre Viskosität	$\eta_{pl}$	$n \cdot k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$		$\eta_0 \cdot \frac{1}{[1 \pm \frac{\eta_0}{2\sigma} \cdot \dot{\gamma}]^2}$	
3.) $(\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}})_{\dot{\gamma}=0}$	$\eta_{pl}$	0		$\eta_0$	
4.) $(\tau - \tau_0) / \dot{\gamma}$ scheinbare Viskosität	$\eta_{pl}$	$k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$		$\eta_0 \cdot \frac{1}{1 \pm \frac{\eta_0}{2\sigma} \cdot \dot{\gamma}}$	

### Orientierende Experimente

Die vorangegangenen Überlegungen zum Stabilitätskriterium und Fließgesetz sind grundsätzlicher Art. Sie wurden entwickelt für beladene Fluide zur Bestimmung von Materialeigenschaften im Bereich kleinster und sehr kleiner ( $\dot{\gamma} \geq 0$ ) Schergefälle. Unter Beachtung dieses Umstandes sind sie allgemein gültig. Mit Bezug auf die anstehende Problematik werden nachfolgend ausgewählte Versuchsergebnisse diskutiert.

Als erstes sollen die Auswirkungen einer möglichen Approximation von Versuchsergebnissen durch verschiedene Modellbeziehungen betrachtet werden. Hierzu ist in Abb.4 eine willkürlich gewählte Fließkurve eines Leimes festgehalten. Dem Kurvenverlauf nach erkennt man dilatantes Materialverhalten, folglich kommt eine Approximation durch das *BINGHAM*-Gesetz nicht in Frage. Benutzt man die *HERSCHEL-BULKLEY*-Beziehung (dünn gezeichnet) sowie den neuen Vorschlag entsprechend Gl.(5) (dicker Kurvenzug), so zeigt die Grafik im Bereich  $14 < \dot{\gamma} \leq 72 \text{ s}^{-1}$  keinen nennenswerten Unterschied. Auffällig jedoch sind die Abweichungen von einander im Bereich  $\dot{\gamma} < 12 \text{ s}^{-1}$ , und zwar sowohl im Fließkurven- als auch Viskositätsverlauf (rechter Bildteil). Um die physikalische Ausgangsposition von Gl.(5) zu verdeutlichen, ist die Fließkurve durch

die Nulltangente  $\eta_0$  ergänzt worden. Zur *H.-B.*-Approximation gehört eine Fließgrenze  $\tau_0 = 16,5 \text{ Pa}$  ; über Gl.(5) erhält man  $\tau_0 = 7,01 \text{ Pa}$ .

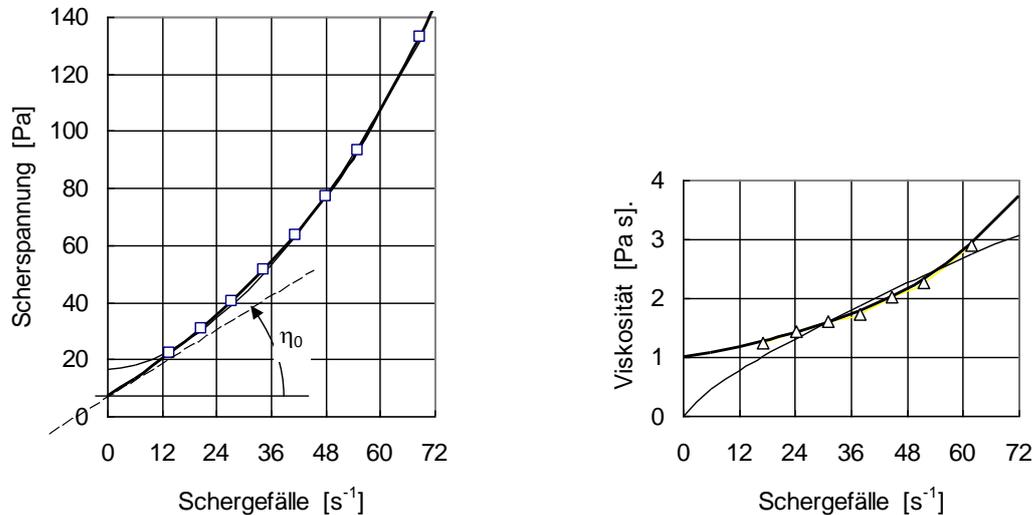


Abb.4 Fließkurve und Viskositätsverlauf für Leim mit CEM I 32,5 R.

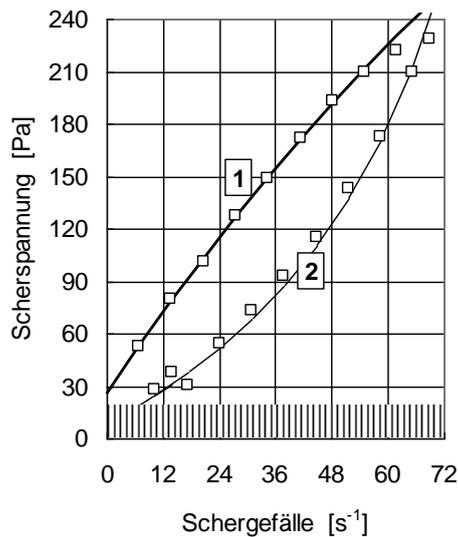
$$W/Z = 0,45; \quad KM/Z = 0,9 \quad FM/Z = 0,02 \quad \rho_L = 2120 \text{ kg/m}^3$$

Da im experimentell belegten Bereich beide Ansätze eine etwa gleichwertige Approximation liefern, andererseits durch die Viskositätsaussage im rechten Bildteil von Abb.4 die *H.-B.*-Potenzfunktion für  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  nicht verwendet werden darf, bleibt die Frage offen, wie nahe kommen dort die mit Gl.(5) getroffenen Aussagen der Realität? Oder anders formuliert: Mit welcher Sicherheit kann mit Gl.(5) extrapoliert, d.h. die Grenzfließspannung bestimmt werden? Vom Ansatz her erfüllt Gl.(5) die Nullbedingung, bleibt demnach nur die Forderung, Messzelle und Messregime so zu wählen, dass der Extrapolationsbereich so klein wie möglich bleibt.

Mit der Fließgrenze aus Abb.4 kann nun geprüft werden, ob der beschriebene Leim eine ausreichende Tragfähigkeit für Grobkorn besitzt. Für natürliche Sande bis 2,5 mm ist diese gegeben; denn mit Hilfe des Stabilitätskriteriums G.(1) erhält man mit  $\rho_S = 2620 \text{ kg/m}^3$  eine wirksame Dichtedifferenz  $|\Delta\rho_{S-L}| = 500 \text{ kg/m}^3$  und damit ein  $\tau_{0,\Lambda} \geq 3,68 \text{ Pa} < 7,01 = \tau_0$ . Betrachtet man allerdings den praxisfremden Sonderfall Leim+16mm-Grobkorn (ohne Sand), so ist  $\tau_{0,\Lambda} < \tau_0$  und es müsste mit Sedimentation gerechnet werden. Dieses Resultat wird durch einfache Sinkversuche infrage gestellt; denn bei diesen stellt man unter sonst gleichen Bedingungen kein Absinken dieses groben Kornes fest. Bei Überprüfung aller Versuchsergebnisse wurde schließlich festgestellt, dass die Ursache im Versuchsregime der Fließkurvenmessung liegt.

Üblicherweise wird nach einem Probevorbereitungs- und Messprogramm verfahren, das – wie z.B. vom *VISKOMAT* -Anwenderkreis empfohlen – u.a. vorsieht, nach einer be-

stimmten, zeitlich fixierten maximalen Scherbelastung stufenweise von hohen nach niedrigen Drehzahlen zu messen. Die Ergebnisse von Abb.4 sind so aufgenommen worden. Mit der Begründung, dass Sedimentation aus dem Kräftegleichgewicht im Ruhezustand resultiert, wurde nun nach Einfüllen der Probe in die Messzelle ohne weitere Maßnahmen mit der Messung begonnen, stufenweise von niedriger zu hoher Drehzahl sowie anschließend zurück. Unter solchen Bedingungen ist so Abb.5 entstanden.



Materialkonstanten bei  
 zunehmender Belastung

$$\tau_0 = 25,6 \text{ Pa}$$

$$\eta_0 = 4,03 \text{ Pa s}$$

$$\eta_0 / 2\sigma = 3,52 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

abnehmender Belastung

$$\tau_0 = 8,67 \text{ Pa}$$

$$\eta_0 = 1,44 \text{ Pa s}$$

$$\eta_0 / 2\sigma = 8,24 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

Abb.5 Fließkurve für Leim mit CEM I 32,5 R.

$$W/Z = 0,45; \quad KM/Z = 0,9 \quad FM/Z = 0,018 \quad \rho_L = 2120 \text{ kg/m}^3$$

Der Kurvenverlauf (1) repräsentiert den Fall mit zunehmender Belastung, Kurve (2) zeigt die Auswirkungen abnehmender Belastung. Alle Messwerte wurden mit Gl.(5) abgebildet. Die hierzu gehörenden Stoffwerte sind neben der Grafik aufgeführt. Damit wird die bekannte Tatsache bestätigt, dass die Grenzfließspannung bei zunehmender Belastung größer ist als bei abnehmender.

In Abb.5 ist ein schraffierter Bereich ausgewiesen. Er ist dem Stabilitätskriterium Gl.(1) geschuldet, das bei Betrachtung des oben besprochenen Sonderfalles ein  $\tau_{0,\Delta} = 23,6 \text{ Pa}$  fordert. Nur außerhalb dieses Bereiches ist Sedimentation ausgeschlossen. Da die ‚Aufwärtskurve‘ auf dem Ruhezustand basiert, besitzt demnach dieser Leim ausreichende Tragfähigkeit. Diese Feststellung kann auch durch den schon erwähnten Sinkversuch untermauert werden.

Als Beleg für die Allgemeingültigkeit des vorgestellten Fließmodells soll die Untersuchung einer MC-Lösung dienen. Die rheologische Kennzeichnung solcher wässrigen Lösungen mit Hilfe der OSTWALD -de WAELE -Approximation ist zwar gang und gäbe, aber nicht immer befriedigend, besonders im Bereich kleiner Scherraten. Da nur dort stofforientierte Aussagen zum Material diagnostizierbar sind, liefern die jeweiligen Untersuchungen teilweise eine unsichere Materialbeschreibung.

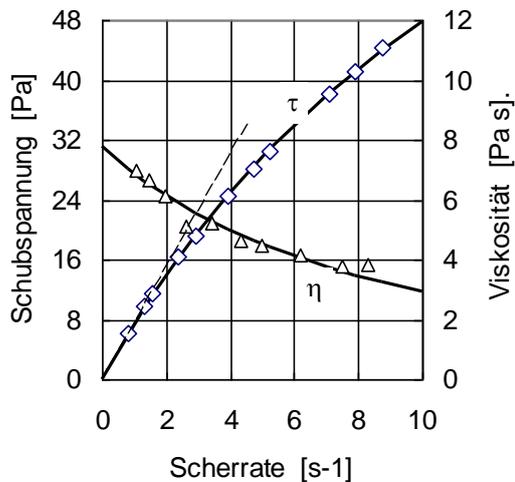


Abb.6 Fließkurve und Viskosität einer 2% wässrigen MH 10 003 P4 -Lösung

In Abb.6 ist eine Fließkurve für eine wässrige MC-Lösung festgehalten. Die Messergebnisse  $|\dot{\gamma}; \tau|$  (hohle Punkte) lassen sich mit Hilfe des neuen Fließmodells gut abbilden. Die verbindende Kurve  $\tau(\dot{\gamma})$  folgt aus Gl.(5). Zu dieser gehören die Materialkonstanten:

$$\tau_0 = 0 \text{ Pa}$$

$$\eta_0 = 7,77 \text{ Pa s} \quad \text{und}$$

$$\frac{\eta_0}{2\sigma} = 6,26 \cdot 10^{-2} \text{ s},$$

wobei die Nullviskosität  $\eta_0$  durch die in der Grafik angedeutete Tangente angezeigt wird. Mit den angegebenen Parametern kann nun auch geprüft werden, ob die Gültigkeitsbedingung für Gl.(5) eingehalten

wird. Für den Bereich  $\dot{\gamma} \leq 10 \text{ s}^{-1}$  ist diese mit  $\frac{\eta_0}{2\sigma} \cdot \dot{\gamma}_{\max} = 0,63 < 1$  erfüllt.

Mit Abb.6 ist eine gute Übereinstimmung von Experiment und Modellvorstellung festzustellen. Diese Aussage bezieht sich nicht nur auf die Fließkurve, sondern auch auf den Viskositätsverlauf. Dieser wird einerseits durch den Differenzenquotienten (Dreiecke) aus den Messwerten der Fließkurve belegt, andererseits durch die ausgezogene Kurve, die auf dem Differentialquotienten von Gl.(5) fußt. Wie man sieht, besitzt die Viskosität auch bei  $\dot{\gamma} = 0$  einen endlichen Wert, nämlich  $\eta_0 = 7,77 \text{ Pas}$ .

## Zusammenfassung und Ausblick

Zur rheologischen Beurteilung von Selbstverdichtendem Beton, seinem Basismörtel bzw. seinen Bestandteilen wird ein Stabilitätskriterium vorgestellt und ein Fließmodell zur Approximation von Fließkurven entwickelt.

Mit dem Stabilitätskriterium kann die Mindest-Grenzfließspannung eines Fluids ermittelt werden, die erforderlich ist, um einerseits Grobkorn zu tragen bzw. dessen Sedimentation zu vermeiden, und um andererseits ein weitgehendes Entlüften zu gewährleisten. Damit wird die Fließgrenze sowohl Zielgröße für Fließkurven, als auch das entscheidende Maß für die Existenz von Selbstverdichtendem Beton.

Da bei SVB verhältnismäßig kleine Grenzfließspannungen angestrebt und wenn diese durch Extrapolation der Fließkurve quantifiziert werden, braucht man für den Bereich kleiner Schergefälle ein authentisches Fließmodell. Mit dem angebotenen ist eine weit bessere Erfassung der Fließgrenze als bislang möglich. Orientierende Experimente untermauern die theoretischen Befunde, sie machen aber auch deutlich, dass bei der ge-

benen Materie andere Methoden zur Bestimmung der Fließgrenze in Betracht gezogen werden sollten.

Nicht immer ist es möglich, die Fließkurve in Form von  $\tau(\dot{\gamma})$  anzugeben. Muss man mit den Basismessgrößen Drehzahl  $N$  und Drehmoment  $T$  auskommen, so tritt anstelle von Gl.(5) die Beziehung

$$T - T_0 = h_0 \cdot N \cdot \frac{1}{1 \pm a \cdot N} \quad (5.1)$$

sowie 
$$\frac{dT}{dN} = \frac{h_0}{(1 \pm a \cdot N)^2} = h \quad (6.1)$$

Die Größe  $h$  steht darin für den Momentgradienten, der die wahre Viskosität wieder spiegelt. In diese Kategorie der Fließkurven  $T(N)$ , die streng genommen ‚nur‘ Zellen-Kennlinien sind, gehören auch alle mit spezielleren Rührsystemen ermittelten. In einem solchen Fall ist zu beachten, dass an die Zellen-Kennlinien sowohl stoffliche (fluide) Eigenschaften, als auch geometrische Details der Zelle gebunden sind. Da insbesondere das Strömungsfeld nicht ohne weiteres zu beschreiben ist und überhaupt keine Vergleichsbasis zur Spaltströmung besteht, können die Größen  $h_0$  und die Kombination  $a = h_0/2s$  nur als (auf die Geometrie) bezogene Stoffgrößen gewertet werden. Trotz aller Einwände bieten die Ausdrücke (5.1) und (6.1) eine wertvolle Hilfe z.B. bei der Beurteilung von Frischmörteln. Offen bleibt jedoch die Wertung von  $a$  [mNm min /mNm], denn es besteht nur eine indirekte Proportionalität zu  $\eta_0/2\sigma$ .

## Literatur

- /1/ Vogel, R. Ein Stabilitätskriterium für Selbstverdichtenden Beton, Betonwerk+Fertigteil-Technik BFT 12 (2005) S. 42...49

## Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. habil Ruprecht Vogel  
Labor für Strömungs- und Schüttguttechnik  
Malerstieg 6

D – 99 425 WEIMAR

[r.vogel@vogel-labor.de](mailto:r.vogel@vogel-labor.de)

## Verwendete Formelzeichen, Abkürzungen und Indices

$d$	[m]	charakteristische Kornabmessung, Sieb-Maschenweite
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$\dot{\gamma}$	[s <sup>-1</sup> ]	Schergefälle, Scherrate
$\eta ; \eta_0$	[Pa s]	Wahre Viskosität ; Nullviskosität
$\varphi$	[-]	Relative Viskosität
$k$	[Pa s <sup>n</sup> ]	$H-B$ -Koeffizient
$\Lambda$	[-]	Stabilitätskennzahl
$n$	[-]	Fließexponent
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\Delta\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichtedifferenz
$\sigma$	[Pa]	Modul
$T$	[mNm]	Drehmoment
$\tau$	[Pa]	Schubspannung, Fließspannung
$\tau_0$	[Pa]	(Schubspannung an der) Fließgrenze, Grenzfließspannung
$\tau_{0,\Lambda}$	[Pa]	Grenzfließspannung nach $\Lambda$ -Kriterium

## Indices

$B$	(Frisch-) Beton	$L$	Leim
$erf$	erforderlich	$LB$	Luftblase
$F$	Füller	$M$	Mörtel
$Fl$	Fluid	$pl$	plastisch
$FM$	Fließmittel	$S$	Sand (feiner Zuschlag)
$K$	Korn, -Zuschlag	$W$	Wasser
$KM$	Kalkstein-Mehl	$Z$	Zement