

R. Vogel

Ein Stabilitätskriterium für Selbstverdichtenden Beton

Vorbemerkung

Es ist üblich, die Fließeigenschaften von Fluiden durch Fließkurven $\tau(\dot{\gamma})$ wiederzugeben. Je nach Ursprung und Verlauf dieser Funktion wird damit eine Materialbeschreibung vorgenommen, die auf mindestens eine, sehr oft auch auf mehrere Materialeigenschaften hinweist. Beispielsweise liefert die in Abb.1 gezeigte Fließkurve zwei solcher Eigenschaften. Diese sind erstens die Grenzfließspannung τ_0 , ab welcher Fließen erst möglich ist (Fließgrenze) und zweitens die plastische Zähigkeit η_{pl} des

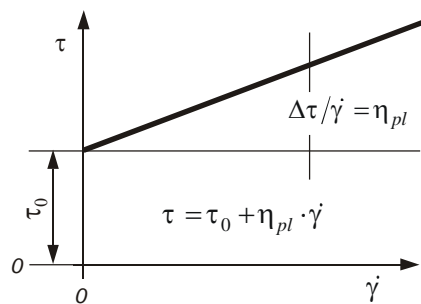


Abb.1 Fließkurve eines BINGHAM -Fluids

Fluids. Knüpft man im weiteren an dieses Beispiel an, so sind es diese beiden Eigenschaften auch, die das Fließen dieses Fluids in einem geometrischen Gebilde (Rohrleitung, Rinne, Wandelement, o.ä.) bestimmen. Die hierzu erforderlichen ursächlichen Kraftwirkungen spiegeln sich im Reibungsgesetz wieder, das neben der Stofforientierung ebenfalls die Geometrieparameter des Objektes umfasst.

Aus dieser bekannten Tatsache resultiert u.a. die Frage nach dem optimalen Zahlenwert der rheologischen Eigenschaften von SVB bzw. dessen Basismörtel, wenn eine bestimmte Aufgabe vorgezeichnet ist. Auf der Suche nach einer komplexen Lösung dieses Problems stellt der nachfolgende Beitrag einen wesentlichen Schritt dar.

Von einer Kräftebilanz zum Stabilitätskriterium

Verfolgt man den Gedanken, dass der Mörtel den Grobzuschlag ‚tragen‘ muss, so heißt dies hier, der Grobzuschlag muss im Mörtel in der Schwebe gehalten werden. Um diesen Zustand realisieren zu können, muss in einem ruhenden Fluid für jedes Korn des Zuschlags die Kräfte-Bilanz $\sum F_{\downarrow} = 0$ erfüllt werden. Bei massiver Körnung, so lehrt die Erfahrung, ist dies unter den ‚üblichen‘ Bedingungen nicht erreichbar, da aus der Differenz von Schwerkraft F_G und Auftriebskraft F_A ein abwärts gerichteter Kraftbetrag verbleibt, der bekanntlich dazu führt, dass sich das Zuschlagkorn anfangs beschleunigt, dann mit konstanter Geschwindigkeit, der Sinkgeschwindigkeit, abwärts bewegt. Die damit zwangsläufig bedingte Sedimentation des Zuschlages ist letztlich eine Frage der zur Verfügung stehenden Zeit.

Um das Anliegen zu verdeutlichen, zeigt Abb.2 eine schematische Darstellung der Kräftebilanz. Und zwar einerseits für schweren Zuschlag (links im Bild), andererseits für extrem leichten Zuschlag unter der Voraussetzung gleicher Mörtelqualität. Damit das skizzierte Korn in der Schwebe verbleibt, ist einmal eine gegen die Schwerkraft gerichtete Vertikalkraft F_{V1} , im anderen Fall (rechts im Bild) eine gegen die Auftriebskraft gerichtete Kraft F_{V2} erforderlich. Wären die Anteile $F_{V1} = 0 = F_{V2}$, so würde das schwere Korn zu Boden sinken und das extrem leichte an die Fluidoberfläche treiben.

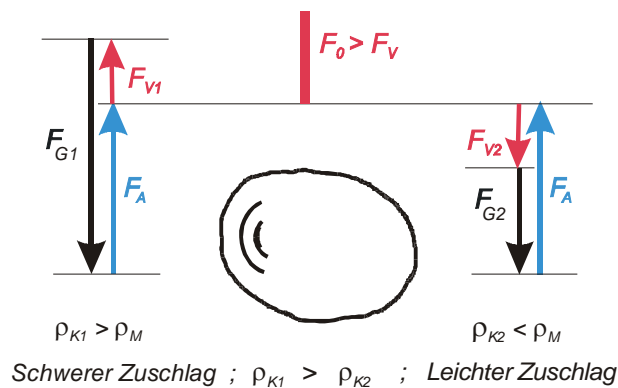


Abb.2 Kräfte in einem Fluid
am Einzelkorn.

Voraussetzung:
 gleiche Korngröße,
 gleiche Fluid-Dichte.

Da äußere Kräfte ausscheiden, kann demnach das aus technologischer Sicht bedeutungsvolle Phänomen ‚Tragfähigkeit‘ nur an eine besondere Eigenschaft des Fluids, des Mörtels gebunden sein. Bei einem unbekanntem Trägerfluid muss man davon ausgehen, dass die Kraft F_V wenigstens durch zwei Summanden (siehe Fließkurve) geprägt wird, und zwar durch einen schergefälleabhängigen ebenso wie einen unabhängigen.

Wenn der Zuschlag so in den Basismörtel eingebettet wird, dass keine Eigenbewegung stattfinden kann, so scheidet der schergefälleabhängige Teil, der durch die Viskosität charakterisierte, bei der weiteren Betrachtung aus, da Ruhezustand $\dot{\gamma} = 0$ bedeutet. Der Schergefälle unabhängige Anteil von F_V wird durch die Grenzfließbedingung, die Fließgrenze τ_0 bestimmt und eingegrenzt. Daraus folgt die Proportionalität $F_V \sim \tau_0$ und die Verknüpfung mit der dazu gehörenden Angriffsfläche. Definiert man d_K als charakteristische Abmessung eines Zuschlagkorns, so resultiert daraus $F_V \sim \tau_0 \cdot d_K^2$.

Betrachtet man die allgemeine Gesamtbilanz $\sum F_{\downarrow} = F_G - F_A \pm F_V = 0$, so kann F_V sowohl positiv als auch negativ erscheinen. Aus der schematischen Kräftedarstellung geht hervor, dass diese Vorzeichenänderung eine Folge der unterschiedlichen Größe der Schwerkraft und damit der Vorzeichenänderung der Kräftedifferenz $F_G - F_A$ ist. Berücksichtigt man diese Tatsache, so gilt für das Gleichgewicht auch $|F_G - F_A| = F_V$.

Bedenkt man weiterhin, dass die Kräfteffferenz $|F_G - F_A|$ ursächlich durch die Dichtedifferenz bedingt ist und dass Proportionalität zum Kornvolumen besteht, so gilt für alle Zuschlag-Mörtel-Kombinationen $|F_G - F_A| \sim |\rho_K - \rho_{Fl}| \cdot d_K^3 \cdot g$.

Wird die Gleichgewichtsbedingung schließlich in dimensionslose Form gebracht, so erhält man


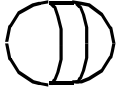

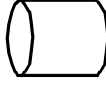


$$\frac{F_V}{|F_G - F_A|} = 1 \quad \text{bzw.} \quad \frac{F_V}{|F_G - F_A|} \sim \frac{\tau_{0,Fl} \cdot d_K^2}{|\rho_K - \rho_{Fl}| \cdot d_K^3 \cdot g} = \frac{\tau_{0,Fl}}{|\Delta\rho_{K-Fl}| \cdot d_K \cdot g} = KK = konst.$$

Unter der Voraussetzung, dass der Basismörtel des SVB gleichmäßig durchmischt und einem Fluid mit durchgängig gleichen Eigenschaften, also einem Kontinuum gleichgesetzt werden darf, verkörpert

der Komplex $\frac{\tau_{0,Fl}}{|\Delta\rho_{K-Fl}| \cdot d_K \cdot g} \hat{=} \frac{\tau_{0,M}}{|\Delta\rho_{K-M}| \cdot d_K \cdot g}$ ein Kriterium, das in allgemeiner Form eine

Grenzbedingung für die gerade noch zulässige Grenzfließspannung des Basismörtels beschreibt. Das Kräfteschema in Abb.2 dokumentiert diesen Fall. Die dort separat gezeichnete Strecke (ohne Richtungsangabe) in Bildmitte über dem Korn soll die Kraft symbolisieren, die bei gegebenem τ_0 im Höchstfall als Vertikalkomponente auftreten kann. Die erforderliche Kraft F_V sollte wegen der (rheologischen) Stabilität des Gemenges kleiner sein als die materialbedingte Größe F_0 . Wird diese Bedingung erfüllt, so kann schwerer Zuschlag nicht sedimentieren bzw. kann sich bei sonst gleichem Habitus des Mörtels leichter Zuschlag nicht an der Oberfläche sammeln. Eine Lageänderung des Korns im Mörtelbett wird allerdings erreicht, wenn äußere Kräfte einwirken, z.B. beim Einbringen des Betons. Es ist jedoch auch wichtig zu erkennen, dass eine so erzwungene Umverteilung des Haufwerks nur rückgängig gemacht werden kann durch mindest gleich große entgegen gerichtete äußere Kräfte.

Tafel 1 *Angaben zur Kennzeichnung einfacher Körper nach Form und Lage*

						
Korn-Konstante	$\frac{2}{3\pi}$	$\frac{2}{3\pi} \cdot \frac{1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{l}{d}}{1 + \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{l}{d}}$	$\frac{2}{3\pi} \cdot \frac{1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{h}{d}}{1 + \frac{4}{\pi} \cdot \frac{h}{d}}$	$\frac{\pi \cdot \frac{l}{d}}{2\pi + 8 \cdot \frac{l}{d}}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
KK	0,212	0,293 $\left\langle \frac{l}{d} = 1 \right\rangle$	0,233 $\left\langle \frac{h}{d} = 1 \right\rangle$	0,282 $\left\langle \frac{l}{d} = 2 \right\rangle$	0,250	0,250

Der Zahlenwert, der sich hinter der Konstanten KK verbirgt, wird ausschließlich durch die die Korn-Geometrie kennzeichnenden Simplexe und die Lageorientierung im Fluid bestimmt. In Tafel 1 sind hierfür Werte einiger abstrakter Körper angegeben.

Formal mathematisch lässt sich zwar eine Vielfalt von Geometrie-Simplexen erfassen und durch einen KK -Wert ausdrücken, jedoch ist es für die praktische Handhabung zweckmäßiger, die Kornabmessung d_K durch die Siebmaschenweite d zu ersetzen. In diesem Fall muss allerdings ein Zusatz über die Herkunft des Haufwerks die Kennzeichnung vervollständigen. Unter Beachtung dieses Umstands soll anstelle des oben fixierten Komplexes

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

Entsprechend unserer Erfahrung kann man bei Verwendung von Drahtsieben bei der Klassierung von Grobzuschlag und der Wahl natürlicher Körnungen mit $\Lambda \approx 0,3$ rechnen. Vergleicht man dieses Ergebnis mit den in Tafel 1 festgehaltenen Kornkennzahlen, so ist dieser Wert der Größenordnung nach mit den KK -Angaben für längliche, liegende Körner vergleichbar.

Eine erste Auswertung des Λ -Kriteriums ist in Abb.3 festgehalten. Bei einer gängigen Dichtedifferenz $|\Delta\rho_{K-M}|$ von etwa 300 kg/m^3 bei Verwendung von massiven Zuschlag kann man aus dieser Grafik einen Sollwert für die Fließgrenze des Basismörtels von rund 14 Pa ablesen, wenn die Maschenweite des Siebes für den Zuschlag mit 16 mm angesetzt wird. Im Hinblick auf die mit dem Mörtel zu realisierenden Eigenschaften $[\tau_0; \eta_{pl.}]_M$ ist dies eine zwingende Vorgabe für dessen Fließkurve $\tau(\dot{\gamma})$.

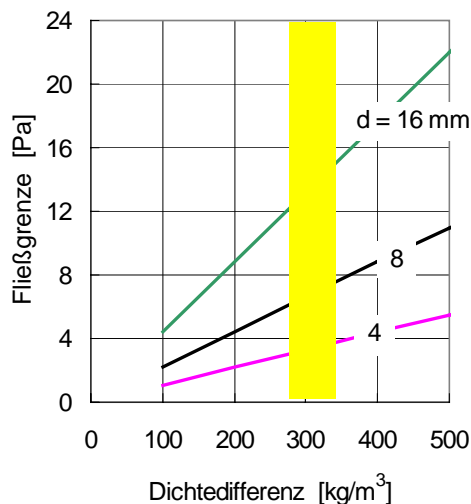


Abb.3 Sollwerte für die Fließgrenze $\tau_{0,M}$ des Mörtels in Abhängigkeit von der Dichtedifferenz $|\Delta\rho_{K-M}|$.

Parameter ist die Siebmaschenweite. Zur Berechnung wurde $\Lambda = 0,3$ verwendet.

Mit dem Λ -Kriterium, wegen der weitreichenden Bedeutung für Fluid-Haufwerk-Kombinationen als Stabilitätskriterium bezeichnet, 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 Null möglich ist. Ansonsten muss sie

mit Hilfe eines Eintauchkörpers ermittelt werden. Verfolgt man den zuerst genannten Weg, so sind bei der Approximation der Versuchdaten die bekannten Fließmodelle auf Anwendbarkeit zu prüfen.

Insgesamt sind an Hand des Stabilitätskriteriums folgende Feststellungen/Aussagen möglich:

1. Die Gültigkeit des Kriteriums ist nicht beschränkt auf die Komponenten Mörtel / Grobzuschlag. Es gilt auch für jede andere Kombination von Fluid / Korn.
2. Es ermöglicht die Bestimmung der erforderlichen Fließspannung $\tau_{0,M}$ des Basismörtels, wenn Dichtedifferenz $\Delta\rho_{K-M}$ und maximaler Korndurchmesser des Zuschlags bzw. Siebmaschenweite d bekannt sind. Dieses Resultat ist als notwendige Zielvorgabe für die Fließkurve $\tau_M(\dot{\gamma})$ des Mörtels zu werten.
Wird $\tau_{0,M}$ wesentlich größer gewählt, so wird die damit erreichte Stabilitätszunahme auf Kosten des Fließwiderstandes und der Entlüftungseigenschaften erkaufte.
3. Die Angabe $\Lambda \approx 0,3$ setzt voraus, dass natürliches Korn zum Einsatz kommt und zusätzliche äußere Kräfte klein gehalten werden.
4. Einhaltung des Stabilitätskriteriums bedeutet auch Vermeidung von Sedimentationserscheinungen.
5. Bei gegebener Fließspannung $\tau_{0,M}$ und bekannter Dichtedifferenz $|\Delta\rho_{K-M}| \triangleq |\rho_L - \rho_M| \approx |-\rho_M|$ kann mit dem Stabilitätskriterium auch die kleinste Luftblasenabmessung bestimmt werden, die ein Entlüften gerade noch ermöglicht.

Wie KK , so beschreibt auch Λ einen Grenzzustand. Man muss $\Lambda > 0,3$ wählen und damit den Nachteil ungünstiger Fließeigenschaften in Kauf nehmen, wenn dies bestimmte Einbaubedingungen rechtfertigen. Insbesondere beim Einbringen des SVB von oben können zusätzliche äußere Kräfte durch Stoß auftreten, die die Kräftebilanz beeinflussen. Um die Stabilität des SVB zu gewährleisten, kann einem solchen Fall durch Einführen eines Zusatzgliedes in folgender Weise Rechnung getragen werden.

$$\frac{\tau_{0,M}}{d \cdot g \cdot |\Delta\rho_{K-M}|} = \Lambda \geq KK \cdot \left[1 + \left| \frac{F_S}{F_G - F_A} \right| \right]. \quad \text{Daraus ist erkennbar, dass nicht der absolute}$$

Wert der Stosskraft F_S , sondern seine Einbindung ins System von Bedeutung ist.

Anwendungsaspekte

Das Kriterium Λ fixiert die rheologische Stabilität eines Gemisches aus Fluid und Haufwerk und muss körnungsspezifisch ermittelt werden. Es ist allgemeingültiger Natur, es gilt für Zementleim und andere Bindebaustoffe etc. ebenso wie für Fäkalien oder Grundsubstanzen der Lebensmittelbranche.

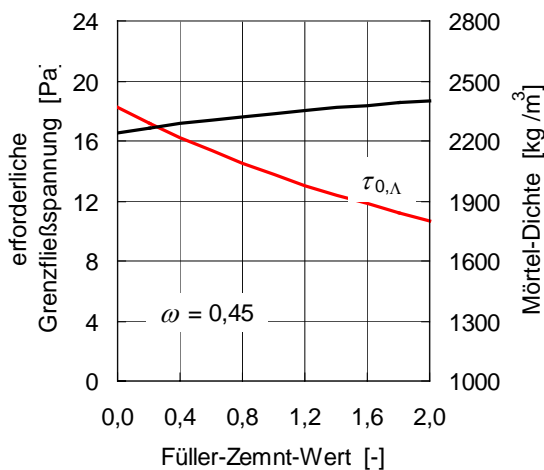
Orientiert man sich bei der Beurteilung der rheologischen Stabilität eines Mörtels am Wasser-Zement-

Wert ω und bestimmt dessen Dichte in bekannter Weise über

$$\rho_{ZL;F;S} = \frac{M}{V} = \frac{m_Z + m_W + m_F + m_S}{V_Z + V_W + V_F + V_S} = \rho_Z \cdot \frac{1 + \omega + \frac{m_F}{m_Z} + \frac{m_S}{m_Z}}{1 + \omega \cdot \frac{\rho_Z}{\rho_W} + \frac{m_F}{m_Z} \cdot \frac{\rho_Z}{\rho_F} + \frac{m_S}{m_Z} \cdot \frac{\rho_Z}{\rho_S}} = \rho_M = \rho_{TF} ,$$

so erhält man über das Stabilitätskriterium Λ die Abhängigkeit $\tau_{0;TF} = f(m_F/m_Z)_{\Lambda;\omega;d}$, oder auch $\tau_{0;TF} = f(\omega)_{\Lambda;m_F/m_Z;d}$, wenn als weitere Parameter die Dichten $\rho_K; \rho_Z; \rho_F$ sowie das Masseverhältnis m_S/m_Z beachtet werden.

In Abb.4 wird beispielhaft gezeigt, wie sich der Füllereinsatz auf die erforderliche Grenzfließspannung des Trägerfluids auswirkt. Die für einen Wasser-Zement-Wert $\omega = 0,45$ entworfene Grafik



Berechnungsgrundlage der Grafik:

$$\rho_Z = 3050 \text{ kg/m}^3; \quad \rho_F = 2740 \text{ kg/m}^3; \\ \rho_K = 2630 = \rho_S \text{ kg/m}^3 .$$

Voraussetzung:

Trägerfluid: Mörtel mit $m_S/m_Z = 2$;
 Zuschlag: Kies $d = 16 \text{ mm}$.

Abb.4 Veränderung der erforderlichen Grenzfließspannung $\tau_{0,\Lambda} = \tau_{0,M}$ mit der Füllermasse.

lässt folgende grundsätzliche Schlussfolgerungen zu:

Die Dichte des Trägerfluids ρ_{TF} nimmt mit wachsendem Füller-Zement-Wert zu. Daraus resultiert eine Verminderung der wirksamen Dichtedifferenz $\Delta\rho_{K-TF}$, was wiederum eine Verringerung der erforderlichen Grenzfließspannung $\tau_{0,M} = \tau_{0,TF}$ des Trägerfluids nach sich zieht.

Zement-Füller-Leim besitzt danach eine größere ‚Tragfähigkeit‘ als reiner Zementleim ($m_F/m_Z = 0$). Es kann durch Füllerzugabe eine wesentliche Absenkung der erforderlichen Grenzfließspannung erreicht werden.

Wenn es gelingt, den SVB-Basismörtel so aufzubauen, dass dieser wie der Zementleim die Kontinuumsbedingung erfüllt, dann – und nur dann – ist mit den Werten für $\tau_{0,M} = \tau_{0,TF}$ aus Abb.4 zu rechnen. Oder anders ausgedrückt: Abb.4 setzt Mörtel als einen Zement-Füller-Sand-Leim voraus. Diese Annahme ist in diesem Zusammenhang zwar gang und gäbe, jedoch nicht zwingend.

Für die gegebene Mörtel-Rezeptur ist die in Abb.4 ausgewiesene Grenzfließspannung ein Beurteilungsmaß bzw. eine Zielstellung. Sie kann z.B. durch eine sukzessiv vermehrte Dosierung von Verflüssiger erreicht werden.

Wie aus der Definitionsgleichung für Λ zu erkennen, ist die Grenzfließspannung proportional der Partikelgröße des Zuschlags. Das in Abb.4 auf $d = 16$ mm bezogene Ergebnis für die erforderliche Grenzfließspannung verschiebt sich bei anderen Abmessungen mit der Partikelgröße verhältnisproportional.

Der mit dem Λ -Kriterium geschaffene Beurteilungsmaßstab für einen Basismörtel bzw. für SVB selbst gibt die Möglichkeit, aus den unterschiedlichsten, nach werkstofflichen Gesichtspunkten zusammengesetzten Mörteln, den rheologisch besten zu markieren. Diese Aussage soll mit dem folgenden Beispiel belegt werden.

In der Arbeit ¹⁾ von Eberhardt wird u.a. der Einfluss von Fließmittel auf die Fließfähigkeit (Fließkurve) von Zement-Füller-Leim sowie repräsentativer Mörtel untersucht. Abb.5 gibt daraus ausgewählte Versuchsergebnisse wieder. Aus dieser Grafik ist einerseits das Versuchskonzept zu erkennen, andererseits zeigt sie die eine Materialeigenschaft des Mörtels beschreibenden Messwerte $T_0(\omega)$. Die rechte Ordinate dieses Bildes gilt für die durch das Versuchskonzept festgelegten Masseverhältnisse, also $m_S/m_Z(\omega)$ und $m_F/m_Z(\omega)$. Der dem Mörtel zugegebene Fließmittelanteil $m_F/m_Z(\omega)$ in m% entspricht $m_S/m_Z(\omega)$, nimmt also mit ω von 1,4 bis 2,5 m% zu.

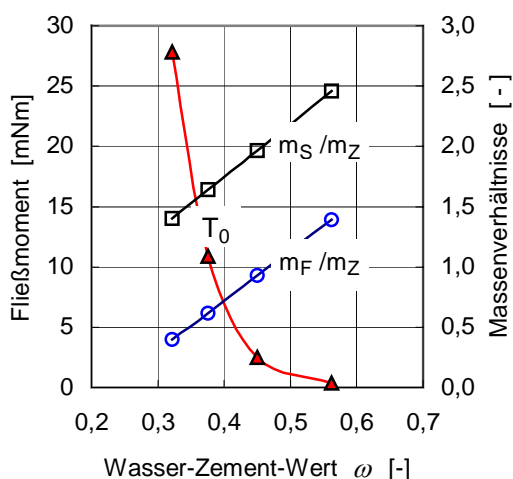


Abb.5 Versuchsvorgaben und Ergebnisse nach ¹⁾.

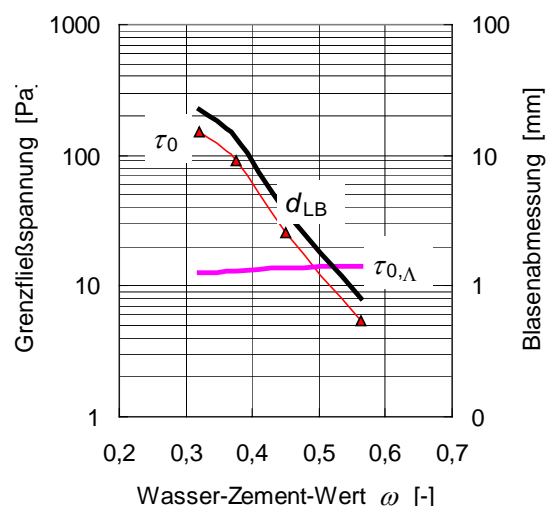


Abb.6 Das Versuchsergebnis $\tau_0(\omega)$ im Vergleich mit dem Resultat $\tau_{0,\Lambda}(\omega)$ aus dem Stabilitätskriterium.

¹⁾ Eberhardt, A. : Untersuchungen zur Rheologie von SCC-Mörteln, Studienarbeit am FINGER-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Uni Weimar, 07.2002

Das verwendete Versuchsmaterial besitzt die Eigenschaften:

$$\rho_Z = 3108 \text{ kg/m}^3; \quad \rho_F = 2750 \text{ kg/m}^3; \quad \rho_K = 2610 = \rho_S \text{ kg/m}^3; \quad \rho_{FM} = 1050 \text{ kg/m}^3; \quad d_S \leq 4 \text{ mm} .$$

Mit den genannten Stoffdaten und den Abhängigkeiten $m_F/m_Z(\omega)$ und $m_S/m_Z(\omega)$ lässt sich $\rho_M(\omega)$ berechnen und $\Delta\rho_{K-M}(\omega)$ bestimmen. Legt man der weiteren Betrachtung noch einen Grobzuschlag mit $d = 16 \text{ mm}$ zu Grunde, so liefert das Stabilitätskriterium für diesen Mörtel die erforderliche Mindest-Grenzfließspannung $\tau_{0,\Lambda}(\omega)$; siehe Abb.6 . Um einen Vergleich mit dem in Abb.5 festgehaltenen Versuchsergebnis $T_0(\omega)$ zu ermöglichen, wurde über eine Kalibrierung der verwendeten Messzelle $\tau_0(\omega)$ ermittelt und ebenfalls in Abb.6 eingetragen. Der Schnittpunkt beider τ -Funktionen markiert den größtmöglichen Wasser-Zement-Wert und gleichzeitig den maximalzulässigen Sand-, Füller- und Fließmitteleinsatz bei dem von A. Eberhardt gewählten Rezepturkonzept. Dem Schnittpunkt entsprechend sollten aus verarbeitungstechnischer, rheologischer Sicht einerseits $\omega > 0,49$ -Einstellungen vermieden werden, da dort Sedimentation nicht ausgeschlossen werden kann. Andererseits bringen wesentlich kleinere ω -Werte zwar eine höhere Frischbetonstabilität aber auch eine verminderte Fließfähigkeit. Ziel muss es daher sein, die Betonprojektierung so vorzunehmen, dass der Basismörtel dem Stabilitätskriterium sehr nahe kommt.

Neben den Spannungsfunktionen enthält Abb.6 ein weiteres Ergebnis, das aus dem Stabilitätskriterium folgt. Ausgehend vom Verlauf $\tau_0(\omega)$, der charakteristisch für den von A. Eberhardt untersuchten Mörtel ist, kann man zwei Dinge ableiten: Erstens gehört zu $\tau_0(\omega)$ eine proportionale Abhängigkeit $d_K(\omega)$, wegen $\Lambda = konst$. D.h. in Abhängigkeit vom Wasser-Zement-Wert könnten unterschiedlich grobe Zuschläge vom Mörtel getragen werden, denn nur der Schnittpunkt der τ -Funktionen ist an $d = 16 \text{ mm}$ gebunden. Und zweitens kann über $\tau_0(\omega)$ die Frage nach der Entlüftungsneigung des Mörtels beantwortet werden. Da das Stabilitätskriterium für Zuschläge beliebiger Dichte gilt, gilt es auch für solche extrem leichten wie Luftblasen. Man kann sogar annehmen, dass der Wert $\Lambda = 0,3$, der an die Korn-Eigenschaft ‚natürlich‘ gebunden ist, Gültigkeit besitzt. Unter diesem Blickwinkel folgt aus dem Stabilitätskriterium

$$d_{LB} = \tau_0 / (g \cdot |\Delta\rho_{LB-M}| \cdot \Lambda) , \quad \text{bzw.} \quad d_{LB} = \tau_0 / (g \cdot |-\rho_M| \cdot \Lambda) , \quad \text{da } \rho_{LB} \text{ gegenüber } \rho_M$$

vernachlässigbar klein ist. In Abb.6 ist das damit berechnete Ergebnis $d_{LB}(\omega)$ festgehalten. Je größer die Grenzfließspannung τ_0 ist, so folgt daraus, um so größer sind die Luftblasen, die aus dem Mörtel nicht entweichen können. Im Schnittpunkt der Spannungsfunktionen liegt diese bei rund 2 mm, bei $\omega = 0,4$ muss man mit Luftblasen bis $d_{LB} \approx 9 \text{ mm}$ rechnen, die durch den Mörtel festgehalten werden.

Zusammenfassung

Aus einer Kräftebilanz kann man erkennen, dass ein Korn in einem Fluid nur dann schwebend gehalten werden kann, wenn dieses Fluid eine besondere Materialeigenschaft, nämlich eine Fließgrenze besitzt. Diese Tatsache bildet die Existenzgrundlage für rheologisch stabilen, sedimentationsfreien Selbstverdichtenden Beton.

Aus der Kräftebilanz wird ein Kriterium, das Stabilitätskriterium Λ abgeleitet, das einen Grenzzustand beschreibt, der nicht unterschritten werden darf, wenn rheologische Stabilität des SVB gesichert sein soll. Die Gültigkeit dieses Kriteriums ist nicht beschränkt auf die Kombination Mörtel/schwerer Zuschlag, sondern gilt allgemein für jede Fluid/'Zuschlag'-Kombination. Also kann auch der Extremfall 'Luftblase als Zuschlag' behandelt und die Frage nach der Blasengröße, die aus dem Mörtel nicht entweichen kann, beantwortet werden. Oder anders formuliert: Die Einhaltung des Λ -Kriteriums garantiert auch optimale Entlüftung des SVB.

Aus dem Λ -Kriterium kann man mit der Bestimmung der Fließgrenze eine Zielvorgabe für die erstrebenswerte Fließkurve des Basismörtels bzw. des SVB ableiten.

Anwendungsaspekte dienen der Erläuterung und Untermauerung der theoretischen Zusammenhänge.

Verwendete Formelzeichen, Abkürzungen und Indices

d	[m]	charakteristische Kornabmessung, Sieb-Maschenweite
F	[N]	Kraft
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
KK	[-]	Körperkenngröße, Korngeometrie
Λ	[-]	Stabilitätskennzahl
m	[kg]	Masse
$\dot{\gamma}$	[s ⁻¹]	Schergefälle, Scherrate
ω	[-]	Wasser-Zement-Wert
ρ	[kg/m ³]	Dichte
$\Delta\rho$	[kg/m ³]	Dichtedifferenz
$ \dots $	[.]	Betrag von ...
T	[mNm]	Drehmoment
τ	[Pa]	Schubspannung, Fließspannung
τ_0	[Pa]	(Schubspannung an der) Fließgrenze, Grenzfließspannung
$\tau_{0,\Lambda}$	[Pa]	Erforderliche Grenzfließspannung bei Anwendung des Stabilitätskriteriums

Indices

A	Auftrieb	LB	Luftblase
B	(Frisch-) Beton	M	Mörtel
erf	erforderlich	0	im Abszissen-Nullpunkt
F	Füller	S	Sand (feiner Zuschlag)
Fl	Fluid	V	Vertikal
FM	Fließmittel	W	Wasser
G	Schwere(Gewichtskraft)	Z	Zement
K	Korn, massiver Zuschlag	ZL	Zementleim