

R. Vogel

Zur Rheologie von Selbstverdichtendem Beton Grundsätze, Regeln und Ziele

Die Beschreibung eines Fließvorgangs setzt **grundsätzlich** voraus die Kenntnis

- der wirkenden Kräfte,
- der Stoffeigenschaften des Fluids sowie
- der Geometrie, insbesondere der des Fließbettes,

und zwar im Einzelnen als auch in ihrer Wechselwirkung.

1. Regeln und Grundsätze

1.1 Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton 2003

„Der optimale Verarbeitbarkeitsbereich ist dadurch gekennzeichnet, dass der Beton ausreichend fließt, entlüftet und sedimentationsstabil ist.“¹⁾

Dieser Richtlinie entsprechend können optimale Verarbeitungseigenschaften des SVB dann erreicht werden, wenn die Kombination von Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit den Anforderungen nach *Abb.1* gerecht wird.

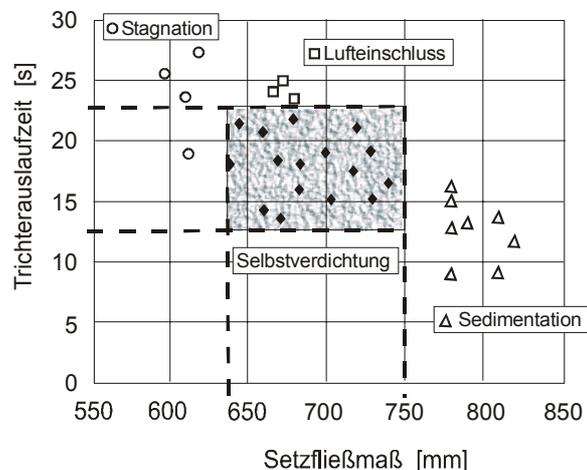
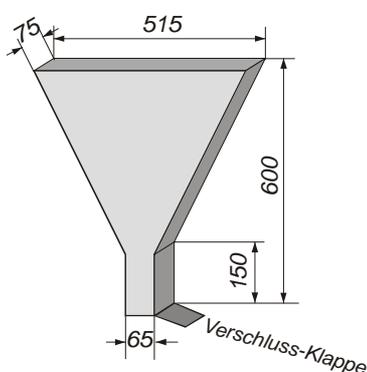
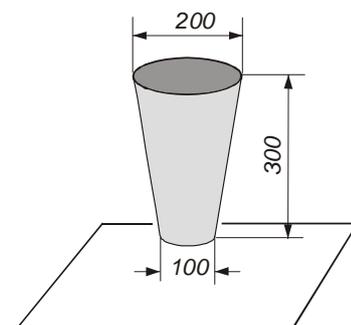


Abb.1

Anmerkung:

Die Trichterauslaufzeit gilt für einen **ebenen** Trichter mit 10,5 l Probenvolumen.

Das Setzfließmaß wird auf einer ebenen Platte nach einem **rotationssymmetrischen** Trichter mit 5,5 l Fassungsvermögen bestimmt.



¹⁾ DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (Ausgabe Nov, 2003) ANHANG Q; Q.1 Seite 32

Die Richtlinie geht davon aus, dass die unter den gegebenen Umständen erfolgte – also an die jeweilige Geometrie gebundene – Messung von Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit den meisten praktisch relevanten Strömungsvorgängen beim Einbringen des Betons in eine beliebige Schalung nahe kommt !
??

Das empfohlene Feld für den Verarbeitungsbereich des SVB kann nur zur groben Orientierung dienen, auch unter dem Gesichtspunkt der durch die Trichterkontur beeinflussten relativ unsicheren Messung der Trichterauslaufzeit.

Apparate-(Trichter)-Kennlinien geben die Geometrie des Apparates und auch Stoffdaten wieder. Schlussfolgerungen von diesen Messwerten auf die Stoff-Daten des SVB – wie Fließgrenze und Viskosität – haben nur symbolischen Wert.

1.2 Rühr-/Mischmaschineneinsatz²⁾

Zur Bestimmung der Fließfähigkeit von SVB bzw. dessen Basismörtel werden oft markante Punkte von Maschinenkennlinien genutzt. Einem bestimmten Drehmoment wird hierbei eine Konsistenzaussage, praktischer Erfahrung gemäß, zugeordnet. Aussagen dieser Art sind immer Maschinentyp gebunden.

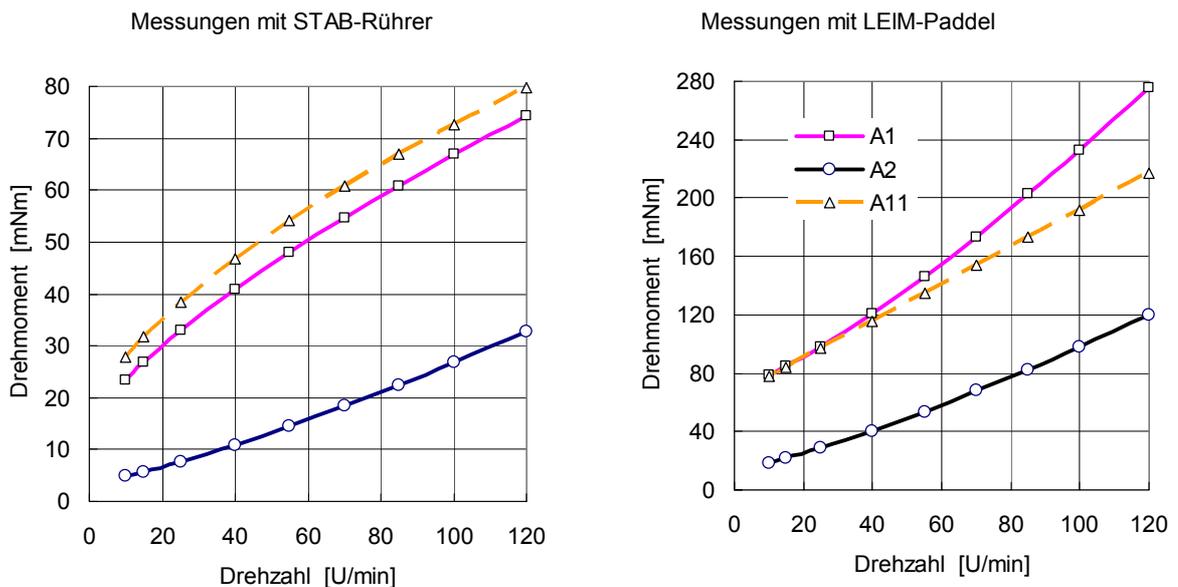


Abb.2

Die in Abb.2 wiedergegebenen Maschinen-Kennlinien gehören zu zwei Rührsystemen, die sich nur durch das Rührorgan unterscheiden, also mit einem gleichen Rührgefäß ausgerüstet sind, Ebenfalls wird das gleiche Material gerührt.

Der Vergleich ergibt:

- Bei gleicher Drehzahl sehr verschiedene Momente sowie
- unterschiedliche Kurvenordnung und Tendenz.

Maschinenkennlinien sind ein Abbild der Geometrie des gesamten Rührsystems (Rührer + Gefäß), der Rührdynamik und des zu rührenden Materials. Bei Rühr/Mischprozessen ist eine Trennung der Einzelanteile, und damit eine korrekte Angabe der Stoffdaten nicht möglich.

²⁾ Mögliche Varianten für Apparate und Maschinen sind zusammengestellt in:

H.-J. Wierig Verfahren zur Prüfung der Konsistenz von Frischmörtel und Frischbeton – Beton-Verlag 1984

1.3 Spezialfall – COUETTE Strömung

Auch hier gilt die integrale Aussage vom Zusammenwirken von

- **Kräften,**
- **Stoffeigenschaften des Fluids** und
- **Geometrie.**

Das Messergebnis ist hier ebenfalls eine Maschinen-Kennlinie. Durch die besondere Gestalt der Messkörper (Geometrie der Messzelle) ist aus der ausschließlichen Abhängigkeit der wirkenden Kräfte vom gescherten Material der direkte Schluss auf die Fließkurve und somit auf die Stoffdaten möglich.

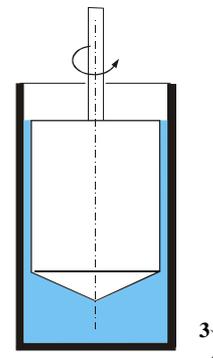
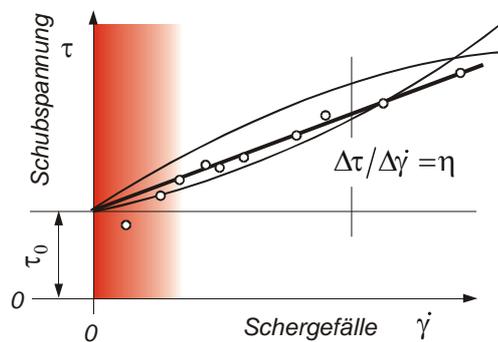


Abb.3

Die Fließkurve als Ergebnis einer Fluidscherung in einer Messzelle aus coaxialen Zylindern, z.B. nach DIN 53 019.

Mögliche Approximation des Verlaufes $\tau(\dot{\gamma})$ durch

$$\tau - \tau_0 = \eta_{pl} \dot{\gamma} ;$$

oder $\tau = k \cdot \dot{\gamma}^m ;$

oder $\tau = \frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{1 + \frac{\eta_0}{2\sigma} \cdot \dot{\gamma}} ; \text{ etc.}$

Bevor eine bindende Aussage zu den daraus folgenden Stoffwerten des Fluids gemacht wird, muss geprüft werden, ob ein augenscheinlich nicht linearer Funktionsverlauf insbesondere im Bereich kleiner Scherraten physikalisch gerechtfertigt werden kann.

Denn auch hier sind Grenzen zu beachten, die sich aus der Geometrie der Mörtel-/SVB-Körnung ergeben und die aus gerätetechnischen Gründen einen verhältnismäßig großen relativen Messspalt $\delta = R_a/R_i$ erfordern. Bedingt durch die hyperbolische Spannungsverteilung im Messspalt werden nämlich bei Fluiden mit Fließgrenze ab einer kritischen Scherrate die Scherbedingungen verletzt.

$$\dot{\gamma}_{krit} \quad \text{folgt aus} \quad Bm_{krit} = \frac{4}{\delta^2 - 1 - 2 \cdot \ln \delta} .$$

³⁾ Für mörtelartige Fluide wird eine prinzipielle ähnliche Lösung empfohlen in:
 R. Vogel, Eine Messzelle für Spezialmörtel BFT 01/2008 S. 124...126

Zwischenbilanz

- 1.1 **Trichter**-Apparate: Schwerkraft (instationäre Strömung), Geometrieinfluss,
Stoffäquivalent: sm ; t_{Tr}
- 1.2 **Rührer**/Misch-Maschinen: Trägheitskraft /Widerstandsmoment (stationäre Strömung)
Geometrieinfluss
Stoffäquivalent: T ; $T(t)$; $T(N)$
- 1.3 **Rheometer**-Koaxialzylinder: Trägheitskraft /Widerstandsmoment (stationäre Strömung)
Geometrieinfluss vernachlässigbar !?
Stoffäquivalent: $T(N) \rightarrow \tau(\dot{\gamma})$
Stoffwerte: τ_0 ; η_{pl} etc.

WERTUNG:

Setzt man voraus, dass bei der praktischen Nutzung der Messwerte der genannten drei Kategorien **genügend Einsatz-Erfahrung** im Rahmen bestimmter Anwendungen vorliegt,

so kann man **alle drei** als **gleichwertig** betrachten.

Die Messungen der dritten Kategorie haben nur dann einen bedeutenden Vorteil, wenn der Anwendungsfall theoretisch fundiert ist und allgemeine Aussagen zulässt, wie nachfolgend exemplarisch gezeigt wird.

2. Grundsätze und Zielorientierung

Die Bestimmung rheologischer Kennwerte von SVB bzw. seiner Komponenten ist begründet mit ihrer aktiven Nutzung. (Ansonsten hat dieser Aufwand wenig Sinn!) Voraussetzung für die Nutzung ist wiederum die gesamtheitliche Betrachtung von **Stoff**, **Geometrie** und wirkenden **Kräften**.

2.1 Interne (stoffbezogene) Aussagen

→ **Sedimentationsstabilität**

Eine wesentliche Bedingung für eine optimale Verarbeitbarkeit ist die Sedimentationsfreiheit des SVB. Der Basismörtel muss in der Lage sein, auch grobe Partikel sicher zu tragen.

Aus einer Kräftebilanz am Größtkorn (Geometrie entsprechend der Siebmaschenweite) folgt für natürliche Kornform das *Stabilitätskriterium* Λ ⁴⁾

$$\frac{\tau_0}{|\Delta\rho_{K-Fl}| \cdot d_K \cdot g} = \Lambda \geq 0,3$$

Wird diese Bedingung eingehalten, ist Sedimentation ausgeschlossen. Aus $\Lambda = 0,3$ folgt bei gegebener Dichtedifferenz eine Vorgabe für die Fließkurve, nämlich die Fließgrenze τ_0 .

Sind zusätzliche Kräfte z.B. durch Stoß beim Einbringen des Betons nicht zu vermeiden, so kann dies im Stabilitätskriterium durch den Faktor

$$\left[1 + \left| \frac{F_S}{F_G - F_A} \right| \right] \quad \text{berücksichtigt werden.}$$

⁴⁾ R. Vogel, Ein Stabilitätskriterium für Selbstverdichtenden Beton BFT 12/2005, S. 42...49
o.a. <http://www.vogel-labor.de/>

Wird $\Lambda \gg 0,3$ gewählt, so bedingt die höhere Fließgrenze einen steiferen Beton und damit eine Einbuße an Fließfähigkeit.

Schließt man den Sonderfall $|\Delta\rho_{K-Fl}| = 0$ aus, so resultiert aus dem Stabilitätskriterium die grundsätzliche Aussage:

Selbstverdichtender (im Allgemeinen fließfähiger) **Beton verlangt immer eine Fließgrenze.**
 Ansonsten sedimentiert er.

Mit dem Stabilitätskriterium ist auch eine Aussage zum Entlüften des Betons möglich. Wird anstelle der Dichte ρ_K die Luftdichte gesetzt, so erhält man aus der Λ - Bedingung die kleinstmögliche Luftblase, die aus dem Beton gerade noch entweichen kann.

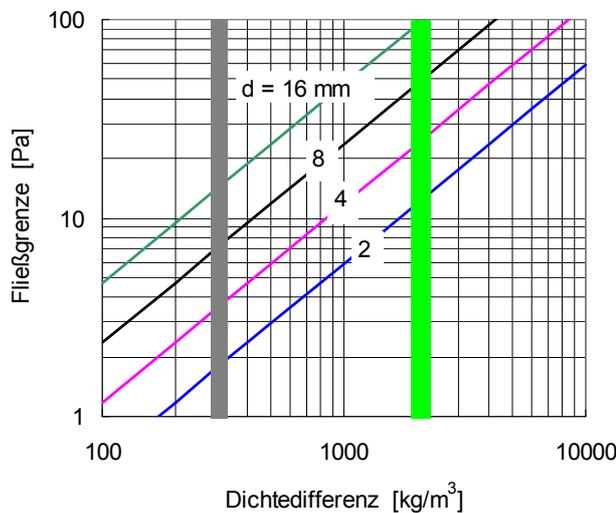


Abb.4

Nebenstehende Abbildung spiegelt das Stabilitätskriterium wieder. Nach den derzeit vorliegenden experimentellen Befunden kann bei Verwendung natürlicher Körnung mit $\Lambda = 0,3$ gerechnet werden.

Bei einer Dichtedifferenz von rund 320 kg/m^3 ist danach eine Fließgrenze des Frischmörtels als Trägerfluid von wenigstens 14 Pa erforderlich, um Sedimentationsfreiheit für ein Beton-Größtkorn von 16 mm und somit optimale Verarbeitbarkeit sicher zu stellen. Bei Einhaltung dieser Fließgrenze können der Grafik gemäß alle Luftblasen $> 2,5 \text{ mm}$ entweichen – grüne Markierung.

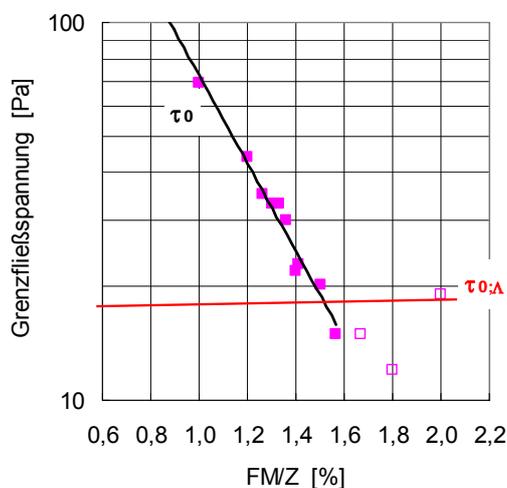


Abb.5

Die für ein gegebenes Mörtelgemenge;
 $W/Z = 0,52$; $BM/Z = 0,333$
 sowie $S/Z = 1,70$

voraus erforderliche, voraus berechenbare Mindest-Grenzfließspannung $\tau_{0,\Lambda}$, um ein Grobkorn des Betons zu tragen, kann z.B. als Zielgröße für eine experimentell zu bestimmende Fließmittelmenge benutzt werden. In Abb.5 ist diese für $d_K = 16 \text{ mm}$ angegeben (rote Kurve).

Bei einer sukzessiven Erhöhung der Fließmittelmenge verbessert sich die Fließfähigkeit, was in einer Verringerung der Fließgrenze zum Ausdruck kommt. Nach Abb.5 ist dies zulässige bis $FM / Z \approx 1,5\%$.

Bei Werten > 1,6 % sedimentiert der Mörtel,

er ist also nicht in der Lage sein eigenes Größtkorn zu tragen.

Aus Abb.4 lässt sich für SVM die **Faustregel** ableiten:

Die Fließgrenze des Basismörtels sollte etwa gleich der zu tragenden Korngröße des Betons sein.
 Z.B. $d_K = 8\text{mm} \rightarrow \tau_0 = 8\text{Pa}$.

2.2 Externe (anwendungsbezogene) Aussagen

→ Ermittlung der Druckverluste bei der Durchströmung von Rohren und Spalten

Nur bei Kenntnis der physikalischen Daten eines Fluids ($\rho; \eta; \tau_0$) gelingt es, den Strömungsverlauf in durchströmten Bauteilen (Schalungen) zu berechnen und zu interpretieren.

Wenn z.B. $\Delta p = f[\bar{c}; \tau(\dot{\gamma}); D]$ gefragt ist,

so führt die Lösung der Diff.-Gleichung $dp + \tau \cdot \frac{u \cdot dl}{a} = 0$ ⁵⁾ (eindimensionale, stationäre Strömung) in dimensionsloser Schreibweise zu den Lösungen:

	Kreisrundes Rohr	Enger Spalt
NEWTON	$Ha = 32$	$Ha = 48$
BINGHAM	$Ha = 32 \left[1 + \frac{Bm}{6} - \frac{8 Bm^4}{3 Ha^3} \right]$	$Ha = 48 \left[1 + \frac{Bm}{8} - \frac{2 Bm^3}{3 Ha^2} \right]$

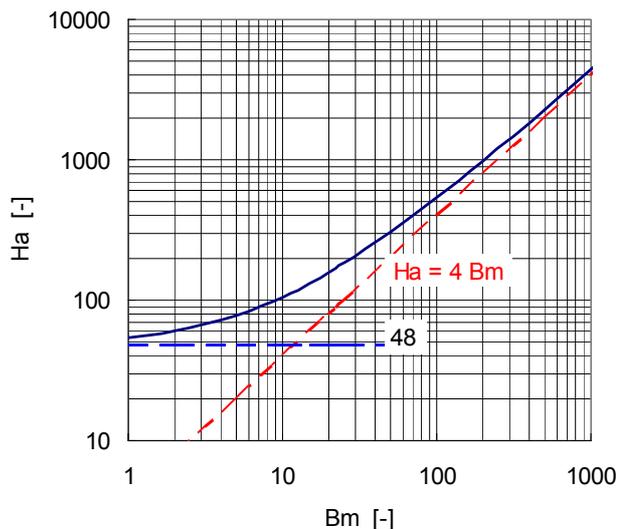


Abb.6

Die Kürzel bedeuten:

$$Ha = \frac{\Delta p \cdot D}{\eta_{pl} \cdot \bar{c} \cdot \frac{L}{D}}; \text{ HAGEN-Zahl}$$

$$Bm = \frac{\tau_0 \cdot D}{\eta_{pl} \cdot \bar{c}} \text{ BINGHAM-Zahl .}$$

Aus der dimensionslosen Schreibweise folgt z.B. für den **engen** Spalt unter Nutzung von Abb.6 und Beachtung von

$$D_{hydr} = \frac{4 \cdot A}{U} = 2 \cdot S \text{ der Druckverlust}$$

$$\Delta p = \eta_{pl} \cdot \bar{c} \cdot \frac{L}{4 \cdot S^2} \cdot [Ha(Bm)] .$$

Das letztlich iterativ zu gewin-

⁵⁾ o.a. R. Vogel, Fließen von Selbstverdichtendem Beton – Das Reibungsgesetz für den engen Spalt –
<http://www.vogel-labor.de/>

nende Ergebnis weist zwei aufschlussreiche Extremwerte aus. Einerseits für $Bm = 0$ die *NEWTON'sche*-Lösung (siehe Tabelle), andererseits bei $Bm \rightarrow \infty$ das Resultat $Ha = 4 \cdot Bm$.

Es ist wichtig zu erkennen, dass der *NEWTON*-Fall mit **einem** Zahlenwert die entsprechende Geometrie beschreibt, der Grenzwert $Ha = 4 \cdot Bm$ dagegen für **alle geometrischen Figuren** gilt. Auch z.B. für den Anwendungsfall *horizontale Rinne*, mit dem man z.B. den Fließstrich-Verlauf verfolgen kann.

→ **Ermittlung der Spiegeldifferenz beim Ausbreiten in einer Ebene**

In wieweit ist eine Selbstnivellierung realistisch? Für die horizontale Rinne mit geringer Fluidbedeckung bzw. großer Breitenausdehnung gilt $S/B \rightarrow 0$ was wiederum $D_{hydr.} \hat{=} 4 \cdot S$ entspricht. Für das Spiegelgefälle, das aus $Ha = 4 \cdot Bm$ folgt, erhält man damit

$$\frac{\Delta h}{L} = \frac{\eta_{pl} \cdot \bar{c}}{16 \cdot S^2} \frac{Ha}{\rho_B \cdot g} = \frac{\tau_0}{\rho_B \cdot g \cdot S}$$

Das relative Spiegelgefälle $\Delta h/L$ zum Ende des Ausbreitvorganges wird danach hauptsächlich von den Stoffdaten τ_0 sowie ρ_B bestimmt.

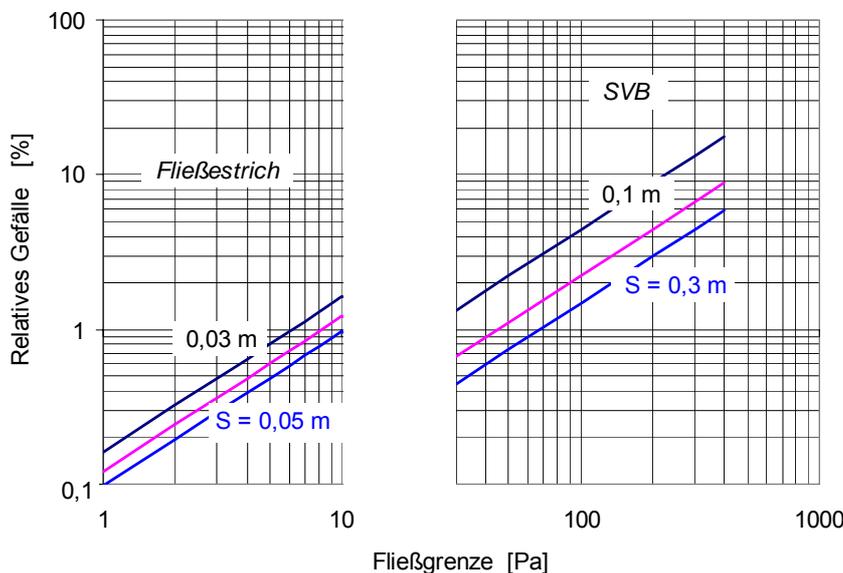


Abb.7

Die unterschiedlichen Dichten einerseits, andererseits die zu realisierenden Schichtdicken sowie der prägnante Unterschied bei den erforderlichen Mindestfließgrenzen bedingen ein relatives Spiegelgefälle, das nur durch Einbringen zusätzlicher Kräfte (mechanisches Ausgleichen) reguliert werden kann.

→ **Strömungsverlauf in Schalungen**

Nur wenn die Stoffwerte des Fluids hinreichend bekannt sind, lässt sich dieses Problem lösen. Für einen SVB mit $\tau_0 = 20 \text{ Pa}$ und $\eta_{pl} \approx 30 \text{ Pas}$ wird in Abb.7 das Ergebnis einer schrittweisen Berechnung des Strömungsverlaufs bei einer Einpressung in eine Pfeiler-Schalung gezeigt.

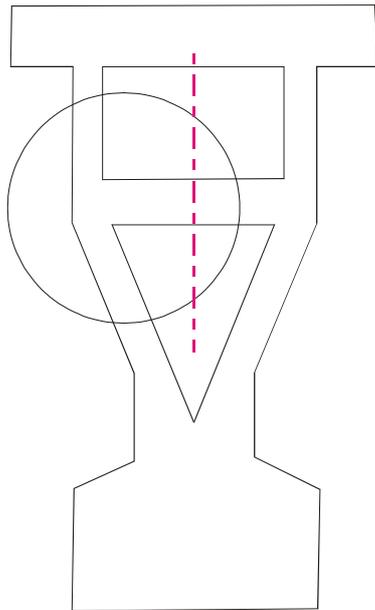
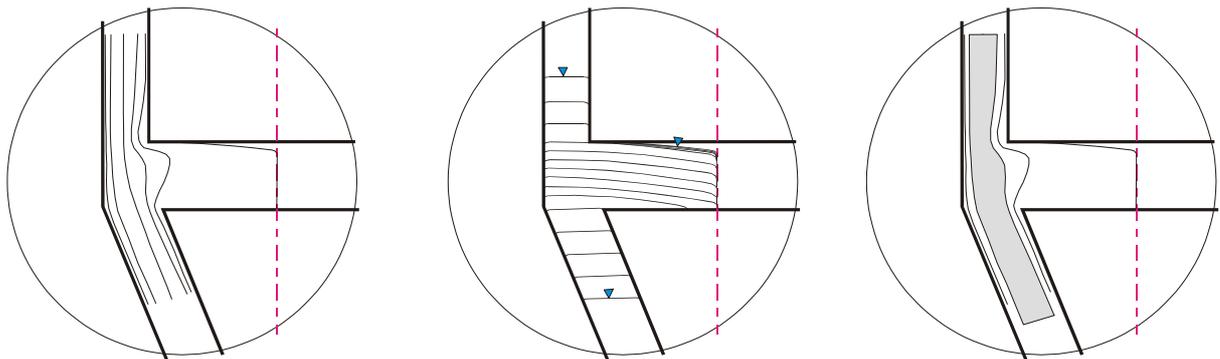


Abb.8

Erster Entwurf einer Brückenpfeiler-Schalung.
SVB-Einpressung von unten.
Auszugsweise Betrachtung des markierten Teilbereichs.

Vergrößerte Ausschnitte



Von links nach rechts: Stromlinienverlauf Spiegelverlauf Pfropfenbereich .

AUSWERTUNG:

Alle drei Bilder machen deutlich, dass der Übergang zur Querstrebe ein verbesserungsbedürftiges Störglied ist. Sowohl aus dem Stromlinienverlauf, als auch aus dem Spiegelverlauf ist erkennbar, dass im Symmetrie-Zentrum des Pfeilers (rote Linie) Lufteinschlüsse nicht zu vermeiden sind.

Beseitigt werden kann dieser Mangel durch Entlüftungsbohrungen, oder besser durch Veränderung der Schalungswände. Sowohl Beseitigung des scharfkantigen Einlaufs, als auch Anpassung der Neigung der oberen Begrenzung der Querstrebe an den Spiegelverlauf (mittleres Bild).

3. Zusammenfassung + Ausblick

Eine zuverlässige rheologische Einschätzung des Fließverhaltens von Frischbeton/-mörtel gelingt nur auf der Basis einer komplexen Betrachtung der

wirkenden Kräfte, Stoffeigenschaften und der Geometrie
sowie die dadurch bedingte Wechselwirkung.

Zur Beurteilung des Fließverhaltens von Frischbeton (SVB) /-mörtels sind geeignet:

- Die bekannten Apparate und Geräte
– z.B. Trichter + Ausbreittisch; L-Kasten; U-Box; Rührgeräte etc. –
in Verbindung mit praxisrelevanten **Regeln** und **Erfahrungen**.
- **Stoffeigenschaften**
in Verbindung mit den wirkenden Kräften sowie geometrischen Gebilden.

Zielvorgabe muss sein:

- U.a. auch die rheologische Optimierung der Stoffeigenschaften,
z.B. mit Hilfe des Stabilitätskriteriums.
- Die hydrodynamische Optimierung der Schalungsgeometrie,
im Rahmen von Modellversuchen bzw. einer computergestützten Abbildung der
Frischbetonbewegung in Formen unter Berücksichtigung der Bewehrung.

Einschätzung für die praktische Handhabung:

Wenn kein Rheometer bzw. Tauchstab zur Verfügung steht, gibt das
Ausbreitmaß die sicherste rheologische Stofforientierung.

Verwendete Formelzeichen

a, A	[m ²]	lichter Strömungsquerschnitt
B	[m]	Kanal-Breite
\bar{c}	[m/s]	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
$D \triangleq D_{hydr}$	[m]	$= \frac{4 \cdot A}{U}$ hydraulischer Durchmesser
F	[N]	Kraft
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
Δh	[m]	Spiegeldifferenz
H	[m]	Höhe
η	[Pa s]	dynamische Viskosität
$\eta_{pl.}$	[Pa s]	plastische Viskosität
$\dot{\gamma}$	[s ⁻¹]	Schergefälle, Scherrate
$l; L$	[m]	Länge
p	[Pa]	Druck
Δp	[Pa]	Druckdifferenz
S	[m]	Spaltabmessung; Schalungsabstand
$u; U$	[m]	benetzter Umfang des Strömungsquerschnittes
τ	[Pa]	Schubspannung, Fließspannung
τ_0	[Pa]	(Schubspannung an der) Fließgrenze
ρ	[kg/m ³]	Dichte