

R. Vogel

Deutung von U-BOX-Messungen

Zur Einschätzung der Fließfähigkeit von Selbstverdichtendem Beton wird u.a. die sogen. U-BOX verwendet. Im Prinzip stellt dieses Messgerät ein zweischenkliges kommunizierendes Rohr dar, das im Scheitel abgeschottet werden kann. Die Messprozedur beginnt mit der vollständigen Füllung eines Schenkels und der nachfolgenden, allmählichen Öffnung des Absperrschiebers (a) – s. Abb.1 . Das zu prüfende Material strömt nun in den anderen Schenkel über; dabei wird ein ‚Schießen‘ des Fluids

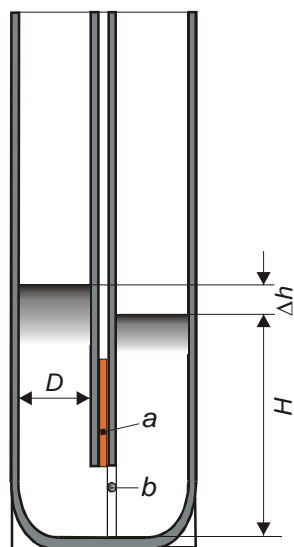


Abb.1 Prinzipdarstellung der U-BOX .

Beachte: $D \hat{=} D_{hydr}$.

durch den Strömungswiderstand des Schiebers selbst und weniger durch die im Scheitelbereich der U-BOX eingebauten senkrecht stehenden Stäbe (b) verhindert. Nach kurzer Zeit stellt sich bei vollständiger Schieberöffnung in den Flüssigkeitssäulen ein Gleichgewicht ein. Wie in Abb.1 dargestellt, kommt es entgegen der allgemeinen Erwartung zu keiner vollständigen Materialnivellierung. Fließt das Material vom linken in den rechten Schenkel der BOX , so verbleibt im linken Schenkel ein Restbetrag Δh .

Der nicht erreichte Niveaueausgleich ist offenbar auf Reibung an den BOX-Wänden zurückzuführen. Da bis Messwernerfassung ein Ruhezustand angestrebt wird, handelt es

$$F_G - F_{W,0} = 0$$

mit $F_G = m \cdot g = D^2 \cdot \Delta h \cdot \rho_B \cdot g$

und $F_{W,0} = \tau_0 \cdot 4D \cdot (2H + \Delta h)$

die Höhendifferenz zu

$$\Delta h = \frac{H \cdot 8 \cdot \tau_0}{\rho_B \cdot g \cdot D - 4 \cdot \tau_0} .$$

Wie man sieht, ist die Messgröße Δh sowohl von den Materialeigenschaften ρ_B und τ_0 , als auch von den Abmessungen der U-BOX abhängig. Da die Existenz des SVB an das Vorhandensein der Grenzfließspannung τ_0 gebunden ist [1][2], führt jeder Frischbetontest zu einem mehr oder weniger großem Δh . Unterschiede liegen im SVB selbst begründet.

Löst man nach der Grenzfließspannung τ_0 auf, so folgt aus dem Gleichgewicht

$$\tau_0 = \frac{D \cdot \Delta h}{4 \cdot (2H + \Delta h)} \cdot \rho_B \cdot g \cdot$$

Mit dieser Beziehung wird einmal mehr deutlich, dass die U-BOX-Messung keine komplexe Aussage zur ‚Fließfähigkeit‘ liefert, sondern nur eine Fließeigenschaft des SVB repräsentiert. Aus dem verbreiteten Einsatz dieses Gerätes und der damit erreichten erfolgreichen Beurteilung von SVB kann man schließen, dass die damit ausgewiesene Materialeigenschaft von hervorragender Bedeutung ist.

Ist man bemüht, eine U-BOX-Kenngröße herzuleiten, so muss man unter Bezugnahme auf D Geometrie-Simplexe bilden und durch Verknüpfung von Ursache τ_0 und Wirkung Δh einen Komplex herausarbeiten. Als Ergebnis erhält man

$$\frac{\tau_0}{\Delta h \cdot \rho_B \cdot g} = \frac{1}{8 \cdot \left[\frac{H}{D} + \frac{\Delta h}{2D} \right]} \approx \frac{1}{8 \cdot H/D} \cdot$$

Danach wird der U-BOX-Komplex durch die relativen Abmessungen des Geräts geprägt. Mit den bei *Brameshuber*¹⁾ zu findenden Angaben, liegt dieser nahe bei $1/(8 \cdot H/D) \approx 1/17$.

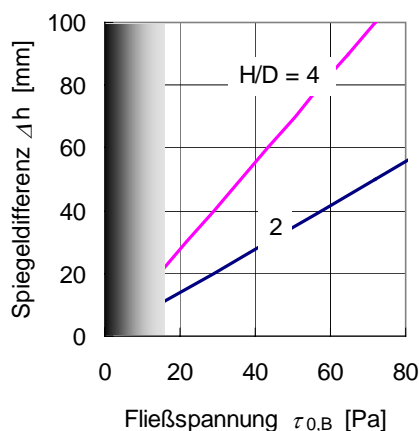


Abb.2 Die Abhängigkeit $\Delta h(\tau_0)$ für zwei ausgewählte Gerätegrößen.

Eine Auswertung der bisherigen Erkenntnisse ist in nebenstehender Abbildung zu finden. Angenommen wurde ein SVB mit $\rho_B = 2350 \text{ kg/m}^3$. Die Grafik unterstreicht die Notwendigkeit der Angabe von Geräteabmessungen, wenn Spiegel-differenzmessungen von verschiedenen Autoren untereinander verglichen werden.

Der Bildbereich in der Nähe des Ordinatenursprungs ist besonders markiert. Es ist der Bereich, der bei Anwendung des Stabilitätskriteriums [2] auf SVB mit 16 mm Maximalkorn ausgeschlossen werden muss.

Der Materialstrom in der U-BOX kann auch mit Hilfe des aus [6] bekannten Reibungsgesetzes erfasst werden. Danach gilt für schleichende Strömung – um diese handelt es sich in der allerletzten Phase beim Annähern an Δh – die einfache Beziehung $Ha = 4 \cdot Bm$. Ersetzt man diese Kenngrößenkombination durch die entsprechenden dimensionslosen Ausdrücke, so ist

¹⁾ Brameshuber, W. Selbstverdichtender Beton, Schriftenreihe Spezialbetone, Bd.5, Verlag Bau + Technik 2004

$$\frac{\Delta p}{\eta_{pl} \cdot \bar{c}} \cdot \frac{D}{L/D} = 4 \cdot \frac{\tau_0}{\eta_{pl} \cdot \bar{c}} D \quad \text{sowie nach Kürzung} \quad \frac{\Delta p}{L/D} = 4 \cdot \tau_0 .$$
 Werden nun noch die

für die U-BOX relevanten Größen $\Delta p \hat{=} \Delta h \cdot \rho_B \cdot g$ und $L \hat{=} 2H$ eingeführt, so kommt man auch mit dem Reibungsgesetz zu der bereits genannten Beziehung:

$$\frac{\tau_0}{\Delta h \cdot \rho_B \cdot g} = \frac{1}{8 \cdot H/D}$$

Allgemein gültige Schlussfolgerungen:

1. Mit der U-BOX wird Δh gemessen. Bei bekannter Dichte ρ_B des SVB ist dieser Messwert das Abbild der Grenzfließspannung $\tau_0 \hat{=} \tau_{0,B}$, denn es gilt

$$\Delta h = \frac{H \cdot 8 \cdot \tau_0}{\rho_B \cdot g \cdot D - 4 \cdot \tau_0} \approx \tau_0 \cdot \frac{8 \cdot H/D}{\rho_B \cdot g} .$$

2. Angaben von Δh für verschiedene Betone sind nur vergleichbar bei gleicher Geometrie der U-BOX, insbesondere dem gleichen Simplex H/D .
3. Je größer die relative BOX-Höhe H/D ausgeführt wird, umso kleiner ist der Fehler der Höhendifferenzmessung Δh .
4. Durch konstruktive Veränderungen der BOX kann man den Höhenausschlag Δh bei gleichem SVB vergrößern und damit die Messgenauigkeit verbessern. Und zwar, wenn anstelle eines quadratischen Schenkelquerschnitts ein rechteckiger gleicher Fläche gewählt wird. Oder auch weit wirksamer, wenn die beiden senkrechten Schenkel des U-Kanals durch eine waagerechte Strecke ergänzt werden. Besitzt der waagerechte Verbindungskanal die Länge L , dann

gilt
$$\Delta h \approx \frac{4\tau_0}{\rho_B \cdot g} \cdot \left(\frac{2H}{D} + \frac{L}{D} \right) .$$

Hinweis zu den Konstruktionsregeln der U-BOX. Es sollten sein:

Abmessung $D \geq 10 \cdot d_K$;

Lichter Abstand der Stäbe im Scheitelbereich $> 3 \cdot d_K$.

Verwendete Formelzeichen

A	[m ²]	Kanalquerschnitt
\bar{c}	[m/s]	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
d_K	[m]	Kornabmessung
D	[m]	charakteristische Kanalabmessung, hydraulischer Durchmesser
F	[N]	Kraft
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
Δh	[m]	Spiegeldifferenz
H	[m]	Höhe
L	[m]	Kanallänge (waagrecht)
$\eta_{pl.}$	[Pa s]	plastische Viskosität
$\dot{\gamma}$	[s ⁻¹]	Schergefälle, Scherrate
m	[kg]	Masse
Δp	[Pa]	Druckdifferenz
U	[m]	benetzter Umfang des Strömungsquerschnittes
ρ	[kg/m ³]	Dichte
τ	[Pa]	Schubspannung, Fließspannung
τ_0	[Pa]	(Schubspannung an der) Fließgrenze

Indices

A	Auftrieb
G	für Schwerkraft
W	Widerstand

Kenngrößen

$D = D_{hydr.} = \frac{4 \cdot A}{U}$	[m]	hydraulischer Durchmesser
$Bm = \frac{\tau_0 \cdot D}{\eta_{pl.} \cdot \bar{c}}$	[-]	<i>BINGHAM</i> -Zahl
$Ha = \frac{\Delta p \cdot D}{\eta_{pl.} \cdot \bar{c} \cdot L / D}$	[-]	<i>HAGEN</i> -Zahl