

# Praxisorientierte Optimierung der rheologischen Eigenschaften von UHPC

Christoph Gehlen, Thomas Kränkel, Dirk Lowke,  
Oliver Mazanec

Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Technische Universität München  
Tel +49.89.289.27062 · gehlen@tum.de



---

## **Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen**

---

2000 Promotion an der RWTH Aachen  
Dissertation: „Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken“

---

seit 2000 Partner im Ingenieurbüro Prof. Schießl, München

---

ab 2007 Gesellschafter im Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH, München

---

2006 – 2008 Lehrstuhlinhaber/Professur „Werkstoffe im Bauwesen“, Universität Stuttgart, Direktor des Institutes „Werkstoffe im Bauwesen (IWB)“ und Direktor der Materialprüfanstalt (MPA) Universität Stuttgart

---

ab 10 / 2008 Lehrstuhlinhaber/Professur „Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen“, Technische Universität München

Leiter des „cbm · Centrum Baustoffe und Materialprüfung“ der Technischen Universität München

---

## **Kurzfassung**

Ultra-Hochfeste Betone (UHPC) zeichnen sich in erster Linie durch ihre sehr hohe Festigkeit sowie die sehr guten Dauerhaftigkeitseigenschaften auf. Möglich wird dies durch sehr geringe w/z-Werte und hohe Anteile mehlfeyner Zusatzstoffe. Zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften werden daher in der Regel hohe Gehalte an Fließmitteln verwendet. Diese können

insbesondere die Fließgrenze deutlich reduzieren. Die Viskosität bleibt hingegen sehr hoch, was mit einer schlechten Verarbeitbarkeit und Entlüftungsfähigkeit des Betons einhergeht.

Der Beitrag beschäftigt mit der Rheologie Ultra-Hochfester Betone. Zum einen werden Mindestanforderungen an die plastische Viskosität und die Fließgrenze der UHPC festgelegt, um eine ausreichende Formfüllung in Abhängigkeit der geometrischen Randbedingungen minimaler Bauteilquerschnitt und Schlankheit eines Bauteils sicher zu gewährleisten. Zum anderen wird gezeigt, wie die Rheologie eines UHPC gezielt durch die Wahl der Zusatzstoffe beeinflusst werden kann, um ein optimiertes Formfüllungsvermögen zu erreichen. Zu diesem Zweck wurden Untersuchungen zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften im Rotationsrheometer mit Formfüllungsversuchen in charakteristischen Modellschalungen kombiniert.

### **Einfluss der Fließgrenze auf das Formfüllungsvermögen**

Um den Einfluss der Fließgrenze  $\tau_0$  auf das Formfüllungsvermögen zu quantifizieren, wurden Formfüllungsversuche in einer L-förmigen Modellschalung mit UHPC mit variablen Ausbreitfließmaßen durchgeführt. Es wurden Betone mit Ausbreitfließmaßen mit dem Hägermann-Konus (ohne Schlagen) von 220 bis 300 mm untersucht, was einer Variation der Fließgrenze  $\tau_0$  im Bereich von 52 bis 8 Pa entspricht. Bild 1 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem Ausbreitfließmaß und der Fließgrenze für die untersuchten UHPC. Die Variation des Ausbreitfließmaßes erfolgte durch eine Anpassung der zugegebenen Fließmittelmenge, bei sonst identischer stofflicher Zusammensetzung der Betone. Alle Betone wiesen eine vergleichbare plastische Viskosität  $\mu$  auf.

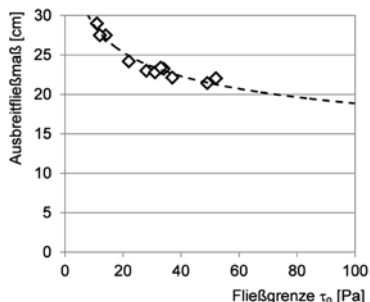


Bild 1: Zusammenhang zwischen dem Ausbreitfließmaß im Hägermann-Konus (ohne Schlagen) und der Fließgrenze  $\tau_0$

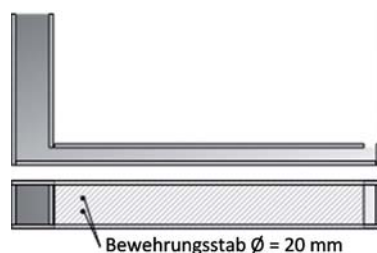


Bild 2: Für die Formfüllungsversuche eingesetzte L-förmige Modellschalung

Die für die Formfüllungsversuche eingesetzte L-förmige Modellschalung (Bild 2) besaß einen horizontalen Schenkel mit einem Querschnitt  $B/H = 150/50$  mm sowie einer Länge  $L = 1.200$  mm. Der vertikale Schenkel wies ein zum horizontalen Schenkel identisches Fassungsvermögen auf, um gerade eine vollständige Formfüllung bei geeigneter Frischbetonrheologie zu ermöglichen. Für die Formfüllungsversuche wurde zunächst der vertikale Schenkel mit UHPC gefüllt. Anschließend wurde zügig das Trennblech zum horizontalen Schenkel geöffnet und die Fließstrecke über die Zeit dokumentiert.

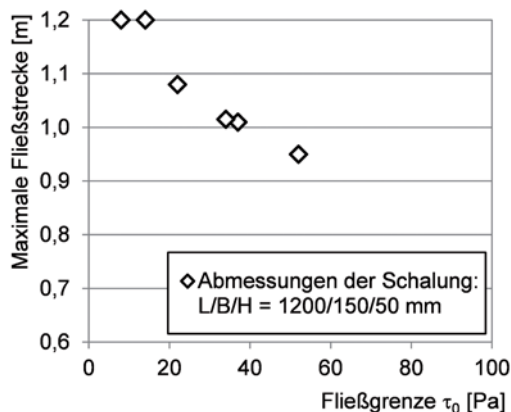


Bild 3: Einfluss der Fließgrenze  $\tau_0$  auf das Formfüllungsvermögen einer L-förmigen Modellschalung

Bild 3 stellt die Ergebnisse der Formfüllungsversuche mit den UHPC in der Modellschalung dar. Sinkende Fließgrenzen führten erwartungsgemäß zu einer gesteigerten Formfüllung. Dies zeigt sich in der steigenden Fließstrecke bis zum Stillstand der Fließbewegung (maximale Fließstrecke) im horizontalen Schenkel der Modellschalung. Um eine vollständige Formfüllung durch selbständiges Fließen zu erreichen, darf dabei ein Grenzwert der Fließgrenze von  $\tau_0 \approx 20$  Pa nicht überschritten werden, Bild 3.

## **Einfluss der Viskosität auf das Formfüllungsvermögen**

Um den Einfluss der plastischen Viskosität  $\mu$  auf das Formfüllungsvermögen zu untersuchen, wurden, ausgehend von einer Referenzrezeptur, die Wasser/Feststoff-Volumenverhältnisse eines UHPC mit  $V_w/V_p = 0,47$  schrittweise auf  $V_w/V_p = 0,65$  gesteigert und somit die Viskosität reduziert. Weiterhin wurde die Viskosität des UHPC durch eine Optimierung der stofflichen Zusammensetzung seiner Feststoffe (volumengleicher Austausch eines mittelfeinen durch ein feines Quarmehl) sowie die Wahl eines alternativen Fließmittels verringert. Es wurden UHPC mit Viskositäten  $\mu$  von 83 bis 11 Pa·s hergestellt. Alle Rezepturen wiesen aufgrund eines angepassten Fließmittelgehalts ein Ausbreitfließmaß mit dem Hägermann-Konus (ohne Schlagen) von  $255 \pm 5$  mm und somit eine vergleichbare Fließgrenze auf. Bild 4 stellt die Ergebnisse der Formfüllungsversuche mit den UHPC in einer L-förmigen Modellschalung dar. Sinkende Viskositäten führten dabei zu einer gesteigerten Formfüllung. Dies zeigt sich in der steigenden Fließstrecke bis zum Stillstand der Fließbewegung (maximale Fließstrecke) im horizontalen Schenkel der Modellschalung.

Der Einfluss der plastischen Viskosität auf das Formfüllungsvermögen kann dabei insbesondere auf thixotrope Effekte zurückgeführt werden. So führen die während des Mischens in den Beton eingebrachten hohen Scherraten zum Absinken deren Fließgrenze auf ein Minimum zu Beginn der Formfüllungsversuche. Während der Fließbewegung der hochviskosen UHPC herrscht dagegen lediglich eine geringe Scherrate und es kommt zu einem thixotropen Strukturaufbau, welcher in einem neuerlichen Anstieg der Fließgrenze  $\tau_0$  mündet. Übersteigt die Fließgrenze einen kritischen Wert, kommt es zum Erliegen der Fließbewegung. Mit zunehmender Viskosität der UHPC, kommt es zu einer Verringerung der Fließgeschwindigkeit und folglich der maximalen Fließstrecke in der Modellschalung. Bild 4 stellt dar, dass die

UHPC maximal eine plastische Viskosität  $\mu$  von 25 Pa·s aufweisen dürfen, um die L-förmige Modellschalung durch selbständiges Fließen vollständig zu füllen.

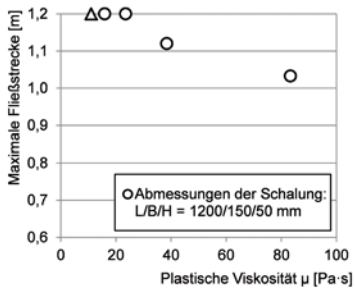


Bild 4: Einfluss der plastischen Viskosität  $\mu$  auf das Formfüllungsvermögen einer L-förmigen Modellschalung

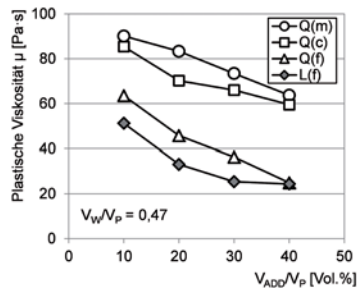


Bild 5: Einfluss von Art (Quarzmittel - Q und Kalksteinmittel - L), Feinheit (grob - c, mittel - m, fein - f) und Gehalt ( $V_{ADD}/V_p$ ) des Zusatzstoffs auf die plastische Viskosität  $\mu$  von UHPC 10 min nach der Wasserzugabe

## Einfluss von Art, Feinheit und Gehalt des Zusatzstoffs auf die plastische Viskosität der UHPC

In weiterführenden Experimenten wurde der Einfluss von Art, Feinheit und Gehalt mineralischer Zusatzstoffe auf die plastische Viskosität der UHPC untersucht. Neben dem mittelfeinen Quarzmehl Q(m) der Referenzmischung ( $d_{50} = 14,7 \mu\text{m}$ ) wurden dabei ein grobes Quarzmehl Q(c) ( $d_{50} = 59,7 \mu\text{m}$ ), ein feines Quarzmehl Q(f) ( $d_{50} = 4,4 \mu\text{m}$ ) sowie ein feines Kalksteinmehl L(f) ( $d_{50} = 4,7 \mu\text{m}$ ) eingesetzt. Die Variation des Zusatzstoffgehalts erfolgte durch eine Substitution des Zementanteils. Der Zusatzstoffgehalt wurde in Schritten von  $V_{ADD} = 10, 20, 30$  und  $40$  Vol.% bezogen auf den Feststoffanteil des Bindemittels  $V_p$  variiert. Die Untersuchungen erfolgten bei einem Wasser-Feststoffverhältnis von  $V_w/V_p = 0,47$  bzw. einem Feststoffanteil von  $\Phi = 78,8 \%$ . Der Fließmittelgehalt wurde wiederum bei allen Variationen derart gewählt, dass der UHPC 10 min nach Wasserzugabe ein Ausbreitmaß von  $255 \pm 5$  mm aufwies.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass mit zunehmendem Zusatzstoffgehalt und entsprechend abnehmendem Zementgehalt eine signifikante Reduzierung der plastischen Viskosität einhergeht, Bild 5. Ursächlich für den ausge-

prägten Abfall der Viskosität ist eine Reduzierung des Feststoffanteils  $\Phi$  im Bindemittelleim. Die Reduzierung des Feststoffanteils erfolgt indirekt durch eine Reduktion des chemisch gebundenen Wassers infolge der sehr frühen Hydratationsreaktion in den ersten 10 min. Das chemisch gebundene Wasser  $\Phi_{\text{hyd}}$  muss im Hinblick auf die rheologischen Eigenschaften eines UHPC dem effektiven Feststoffanteil  $\Phi_{\text{eff}} = \Phi + \Phi_{\text{hyd}}$  zugerechnet werden. Bei einem Anteil des chemisch gebundenen Wassers von 44 ml/g<sub>CEM</sub> ergibt sich  $\Phi_{\text{hyd}}$  bei Zusatzstoffgehalten zwischen 10 und 40 Vol.% zu 4.3 und 2.6 %, was einer Differenz des rheologisch verfügbaren Wassers von ca. 17 l/m<sup>3</sup> (ca. 10% des Gesamtzubehewassers) entspricht.

Weiterhin kann ein deutlicher Abfall der plastischen Viskosität bei Austausch des Quarzmehls Q(m) mit dem gröberen Quarzmehl Q(c) sowie dem feineren Quarzmehl Q(f) und dem feineren Kalksteinmehl L(f) beobachtet werden, Bild 5. Da das Quarzmehl Q(m) in etwa die gleiche Korngrößenverteilung aufweist wie der Zement kommt es sowohl bei Austausch mit einem gröberen als auch mit einem feineren Zusatzstoffen zu einer Erhöhung der maximalen Packungsdichte  $\Phi_m$  der Feststoffe (Gemisch aus Zement, Gesteinsmehl, Silikastaub und Sand). Mit zunehmender maximaler Packungsdichte verringert sich der Hohlraumgehalt der Packung, wodurch die die Wasserfilmdicke um die feinen Partikel zunimmt. Der mittlere Abstand zwischen den Partikeloberflächen nimmt zu, was mit einer Verringerung der interpartikulären Wechselwirkungen einhergeht.

Quantitativ können die zuvor diskutierten Einflussgrößen Wasser-/Feststoff-Volumenverhältnis  $V_w/V_p$ , Zusatzstoffgehalt  $V_{\text{ADD}}/V_p$  und Feinheit des Zusatzstoffs durch den relativen Feststoffanteil, welcher durch das Verhältnis von tatsächlichem Feststoffanteil und maximaler Packungsdichte  $(\Phi + \Phi_{\text{hyd}})/\Phi_m$  beschrieben wird, erfasst werden, Bild 6. Mit zunehmendem relativen Feststoffanteil steigt die plastische Viskosität  $\mu$  überproportional an. Das heißt je geringer die Differenz zwischen tatsächlichem Feststoffanteil  $(\Phi + \Phi_{\text{hyd}})$  und maximaler Packungsdichte  $\Phi_m$ , desto höher ist die plastische Viskosität  $\mu$  der Suspension.

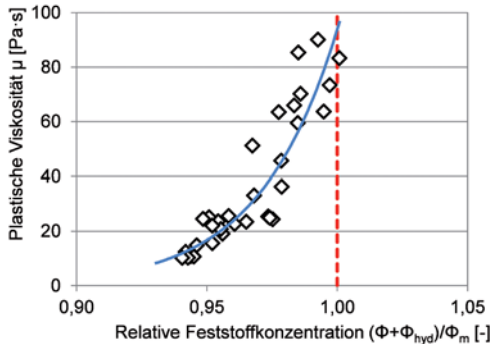


Bild 6: Einfluss des relativen Feststoffanteils  $(\Phi + \Phi_{hyd}) / \Phi_m$  auf die plastische Viskosität  $\mu$  von UHPC mit Variation in Zusatzstoffart, -feinheit und -gehalt

Die gezielte Variation des relativen Feststoffanteils durch Änderung von Art, Feinheit und Gehalt der Zusatzstoffe stellt somit ein wertvolles Mittel dar, um die plastische Viskosität von UHPC zu reduzieren und somit seine Verarbeitungseigenschaften zu erhöhen. Für eine Reduzierung der plastischen Viskosität bei konstantem  $V_w / V_p$ -Verhältnis lassen sich entsprechend der vorangegangenen Ausführungen schließlich zwei Strategien ableiten:

- a** Reduzierung des tatsächlichen Feststoffanteils durch Reduzierung des chemisch gebundenen Wassers mit zunehmender Substitution des Zements durch inerte Zusatzstoffe und
- b** Erhöhung der maximalen Packungsdichte der Feststoffe durch Einsatz größerer bzw. feinerer Zusatzstoffe.

Überträgt man schließlich diese Erkenntnisse auf die Anforderungen für die Formfüllung einer Schalung mit 50 mm hohem Querschnitt ( $\mu < 25 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) entsprechend Abschnitt Einfluss der Fließgrenze auf das Formfüllungsvermögen, so muss ein UHPC mit dem feinem Quarzmehl Q(f) bzw. Kalksteinmehl L(f) und möglichst hohem Zusatzstoffgehalt verwendet werden, Bild 5.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung.