
7 Konzept zur Herstellung von SVB

Es gibt eine Reihe bislang veröffentlichter Konzepte zur Herstellung von SVB. Zum Teil beruhen sie auf fundamentalen rheologischen Kenngrößen, auf Kennwerten der Standardverfahren oder auf einer Verknüpfung von beiden.

Eine Übersicht über verschiedene Konzepte zur Herstellung von SVB enthalten beispielsweise [REINHARDT ET AL., 2004]⁶⁾ und [DOMONE, 2000], auf die an dieser Stelle verwiesen wird. Am bekanntesten ist sicherlich das iterative Verfahren von OKAMURA [1995]. Auch LEMMER [2003] beschreibt ein Verfahren zur Herstellung von SVB, er gibt Zielfenster auf Basis der Trichterauslaufzeit und des Setzfließmaßes von Beton an ($t_{V,B} = 11 \pm 3$ s, $sf_B = 690 \pm 30$ mm), innerhalb derer weder Sedimentieren noch Blockieren auftreten soll. Ebenso enthalten sind Empfehlungen zur Steuerung der Eigenschaften während der Produktion. Hinweise zur Betonzusammensetzung unter Anwendung statistischer Modelle sind in [SONEBI, 2004] zusammengestellt.

In den vorigen Abschnitten wurde gezeigt, dass das Fließverhalten von SVB durch die Zusammenwirkungen komplexer Wechselwirkungen bestimmt wird. Deshalb ist es praktisch kaum möglich, allgemeingültige Zielbereiche anzugeben, die allein auf makroskopischen Kennwerten wie etwa dem Setzfließmaß sf_B und der Trichterauslaufzeit $t_{V,B}$ basieren. Eine Abschätzung der voraussichtlichen Frischbetoneigenschaften kann deshalb nur vorgenommen werden, wenn die Betone ähnlich zusammengesetzt sind. Ähnlich bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das gleiche Bindemittel (gleiches Verhältnis von Zement und Zusatzstoffen), die gleichen Zusatzmittel sowie eine ähnlich zusammengesetzte Gesteinskörnung gleicher Herkunft verwendet wird.

Im Hinblick auf den Mischungsentwurf können die folgenden groben Zielbereiche angegeben werden, die auf eigenen Versuchsergebnissen basieren. Innerhalb dieser Zielbereiche lagen mehrheitlich robuste Betone, d.h. Betone, die in der Regel nur schwach blockierten und nicht sedimentierten. Die Trichterauslaufzeit solcher robuster Betone lag dann in der Regel zwischen 10 s und 16 s und das Setzfließmaß zwischen 700 mm und 760 mm. Hierbei ist nochmals zu betonen, dass im Einzelfall die Eignung einer Rezeptur dennoch gesondert nachgewiesen werden muss. So lagen innerhalb dieses Bereiches auch Betone, die vereinzelt stärker blockierten oder sedimentierten. Weiter ist zu beachten, dass die Trichterauslaufzeit auch durch dynamische Entmischungseffekte beeinflusst werden kann.

Eine etwas differenziertere Betrachtung ist möglich, wenn die Betone nicht nur anhand ihrer makroskopischen Kennwerte beurteilt werden, sondern anhand der Eigenschaften ihrer flüssigen und festen Phasen verglichen werden. Eine solche Zwei-Phasen-Betrachtung, wie sie im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen wurde, liegt beispielsweise auch dem Konzept von SAAK ET AL. [2001] zugrunde. Dort wurde der selbstverdichtende Beton durch den Leim und die darin dispergierte Gesteinskörnung idealisiert. Allerdings wurden nur Einflüsse berücksichtigt, die von der Variation der Leimeigenschaften herrührten, die durch die Fließgrenze, Viskosität und Dichte charakterisiert wurden.

⁶⁾ Siehe auch [MARQUARDT, 2002] und [LICHTMANN ET AL., 2003]

BUI ET AL. [2002] gingen einen Schritt weiter und bezogen auch die Rolle der Gesteinskörnung mit ein, die sie durch den mittleren Kornabstand und die mittlere Korngröße berücksichtigten. Ein Modellansatz für die Vorhersage der Frischbetoneigenschaften von selbstverdichtendem Faserbeton ist in [GRÜNEWALD, 2004] angegeben.

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommene Idealisierung des selbstverdichtenden Betons durch die im Abschnitt 5 eingeführten Modellgrößen in Verbindung mit den im Abschnitt 6.3 vorgenommenen Einschränkungen zur Gewähr blockierfreier und sedimentationsstabiler Betone gestatten es nun, die Modellgrößen soweit einzugrenzen, dass die Schlüsseleigenschaften mehrheitlich erfüllt werden. Diese Eingrenzung basiert auf den Modellgrößen Leimschichtdicke und Leimauslaufzeit. Bei der Bereichseingrenzung muss beachtet werden, dass eine Steigerung der Fließmitteldosierung die Sedimentationsgefahr erhöhen kann, obwohl die Trichterauslaufzeit des Leimes nur wenig verkürzt wird.

Anhand von Bild 7.1 und Bild 7.2 wird deutlich, wie eng begrenzt die Bereiche sind, innerhalb derer weder Sedimentieren noch starkes Blockieren zu beobachten ist. Die Blockierneigung ist dabei durch den Höhenunterschied st_J angegeben (vgl. Abschnitt 3.3.2). Es liegen zwar nur vergleichsweise wenig Daten vor, dennoch kann abhängig vom Füllertyp eine ungefähre Bereichseinteilung vorgenommen werden. Weil größere Leimschichtdicken nur bei höheren Leimzähigkeiten zu robusten Betonen führen, sind günstige rechteckige Bereiche (Fenster) nicht möglich.

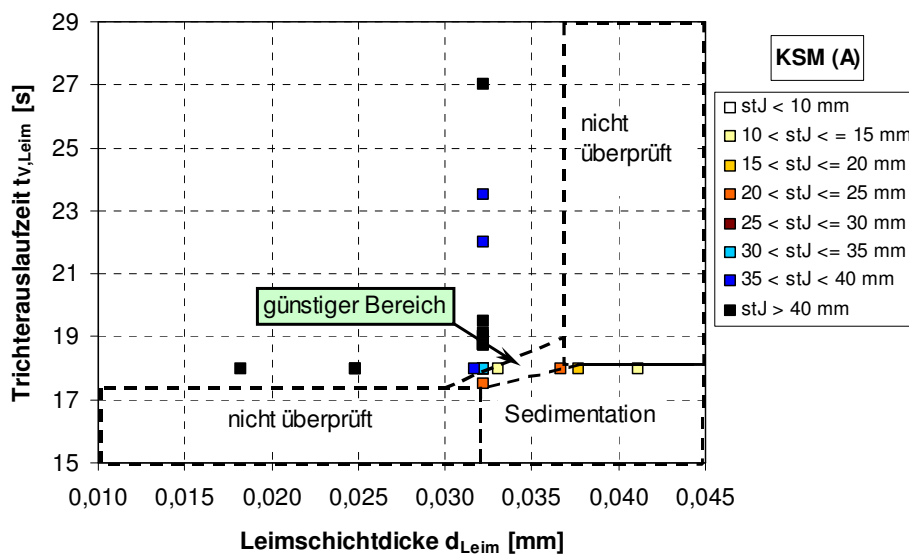


Bild 7.1: Aufteilung der Modellparameter in Bereiche mit sedimentierenden und stark blockierenden Betonen; Füllertyp: Kalksteinmehl (A); Versuchsprogramm III

Die äquivalenten Wasserzementwerte der untersuchten Betone lagen im Bereich zwischen 0,65 und 0,7 für den Füllertyp Kalksteinmehl KSM (A) bzw. zwischen 0,41 und 0,47 bei Verwendung von Steinkohlenflugasche SFA (A).

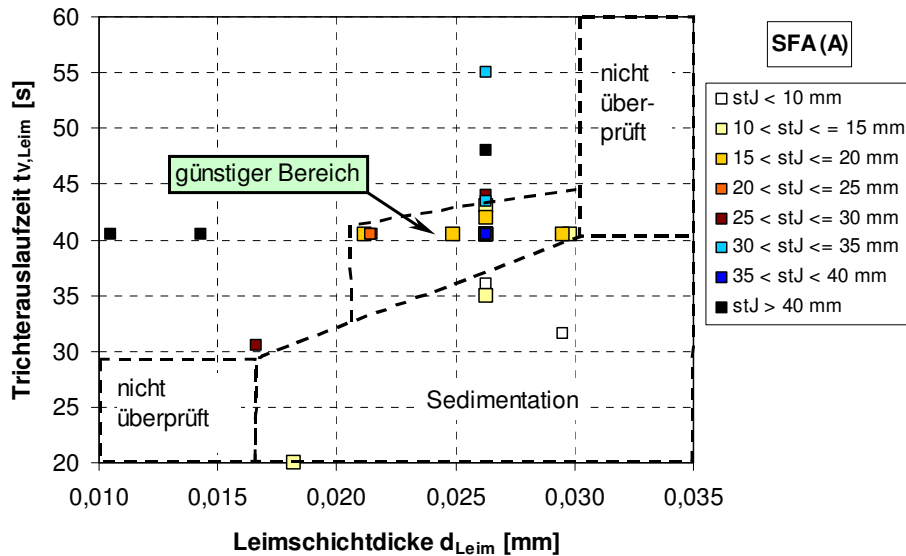


Bild 7.2: Aufteilung der Modellparameter in Bereiche mit sedimentierenden und stark blockierenden Betonen; Füllertyp: Steinkohlenflugasche (A); Versuchsprogramm IV

Eine präzise Trennung zwischen günstigem und ungünstigem Verhalten gestaltet sich insbesondere bei den Betonen mit Kalksteinmehl schwierig, weil diese Betone über vergleichsweise niedrigviskose Leime verfügen. Weil die Auflösungsfähigkeit des Trichterauslaufversuches mit steigender Trichterauslaufzeit zunimmt, ist die Verwendung kleinerer Trichteröffnungen insbesondere für Betone mit Kalksteinmehl ratsam. Durch eine solche Maßnahme ließe sich das Spektrum der Trichterauslaufzeiten verbreitern und damit die Auflösung erhöhen.

Oberstes Ziel ist – wie auch bei herkömmlichem Rüttelbeton – stets eine optimierte Kornpackung, vgl. auch [MARQUARDT, 2002]. Diese lässt sich durch geschickte Kombination einzelner Kornfraktionen erzielen. Hierzu eignen sich Zuschlagsieblinien im Bereich von AB 16 nach DIN 1045-2 (Anhang L), vgl. hierzu Abschnitt 5. Vorversuche zur Bestimmung der optimalen Kornzusammensetzung können anhand von einfachen Schüttversuchen bzw. Verdichtungsversuchen gemäß Abschnitt 3.2.4 erfolgen.

Prinzipiell sind beim Entwurf von selbstverdichtendem Beton die durch die Expositionsklasse vorgegebenen Randbedingungen wie etwa der maximale äquivalente Wasserzementwert $(w/z)_{eq,max}$ oder der minimale Zementgehalt z_{min} nach DIN 1045-2 einzuhalten. Andererseits ist der maximale Mehlkorngelgehalt nach Vorgabe der SVB-Richtlinie auf 650 kg/m^3 begrenzt [DAFSTB, 2003]. Bei Wahl günstiger Kornabstufungen können sogar Gesamtmehlkorngelgehalte kleiner 500 kg/m^3 realisiert werden (siehe hierzu die Betonzusammensetzungen im Anhang).

Die wichtigen Entwurfparameter Zementgehalt, äquivalenter Wasserzementwert und Wasser-Bindemittel-Verhältnis lassen sich ohne gegenseitige Beeinflussung nicht beliebig festlegen. Daher zeigt Bild 7.3 beispielhaft die Abhängigkeiten zwischen den Entwurfparametern Wasser-Bindemittel-Verhältnis V_w/V_b , äquivalentem Wasserzementwert $(w/z)_{eq}$ und Trichterauslaufzeit $t_{v,Leim}$ für ausgesuchte Leime.

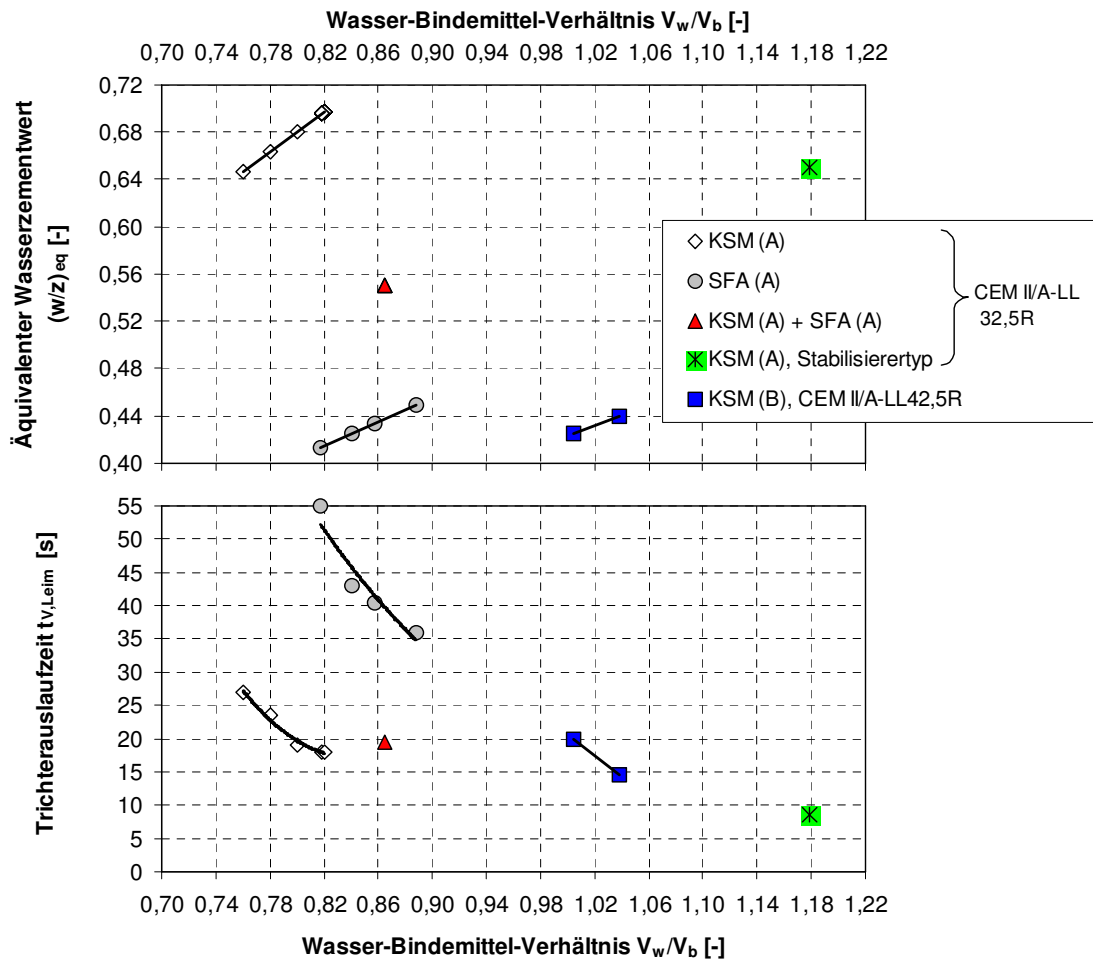


Bild 7.3: Beispielhafter Zusammenhang zwischen Wasser-Bindemittel-Verhältnis, äquivalentem Wasserzementwert und Trichterauslaufzeit verschiedener Leime bei konstantem Zusatzmittelgehalt; Versuchsprogramme III bis VI

Wenn also für bestimmte Bindemittelkombinationen die günstigen Bereiche gemäß Bild 7.1 bzw. Bild 7.2 vorliegen, so kann bei bekanntem Zusammenhang zwischen Wasser-Bindemittel-Verhältnis, äquivalentem Wasserzementwert und Trichterauslaufzeit (Bild 7.3), eine Ausgangsmischung konzipiert werden, deren Fließeigenschaften anhand praktischer Versuche verifiziert werden muss. Aufgrund des begrenzten Datenumfangs soll Bild 7.3 nicht als Entwurfsdiagramm verstanden werden. Es soll jedoch andeuten, dass die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Leimzusammensetzung und resultierendem Fließverhalten bei der Mischungskonzeption hilfreich eingesetzt werden kann. Freilich stellen die obigen Zusammenhänge auch keine allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten dar, vielmehr werden die Fließeigenschaften der Leime von komplexen chemischen und physikalisch mineralogischen Wechselwirkungen beeinflusst. Im Einzelfall sind daher Eignungsversuche beim Wechsel einer Bindemittel-Fließmittel-Kombination unverzichtbar. Die Kenntnis der tendenziellen Zusammenhänge ermöglicht jedoch eine rasche Anpassung an neue Randbedingungen, wenn zudem jede neue Bindemittelkombination auf ihren Wasseranspruch hin untersucht wird.

Bei den Betonen in Bild 7.3 mit Kalksteinmehl KSM (A) und $(w/z)_{eq} = 0,65$ bis $0,70$ liegen die Druckfestigkeiten im Bereich von 35 bis 40 N/mm²; diese Betone sind niedrigviskos (siehe Abschnitt 4). Für höherfeste Betone ($f_{ck} = 50$ bis 60 N/mm²) kann auch Steinkohlenflugasche eingesetzt werden [REINHARDT ET AL., 2004]. Zur Gewähr blockierfreien Fließens sind bei etwa

gleichem Leimgehalt höhere Wasser-Bindemittel-Verhältnisse erforderlich. Die rheologischen Messungen offenbarten vergleichsweise viskoses Fließen. Werden hingegen anstelle normalfester Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 R höherfeste Zemente der Festigkeitsklasse 42,5 R in Verbindung mit Kalksteinmehl KSM (B) als Zusatzstoff verwendet, so sind aufgrund des höheren Wasseranspruches bei etwa gleichem $(w/z)_{eq}$ -Wert grundsätzlich höhere Wasser-Bindemittel-Verhältnisse erforderlich (siehe auch Abschnitt 3.2.3).

Einen Sonderfall stellen Betone des Stabilisierertyps dar. Bedingt durch den geringen Mehlkorn- bzw. Leimgehalt, der zu geringen Leimschichtdicken führt, ist die Anwendung auch aufgrund des geringen Nachentlüftungsverhalten im Ruhezustand auf wenige Einsatzbereiche beschränkt. Aufgrund der sehr niedrigen Leimschichtdicken ergeben sich dementsprechend hohe Wasser-Bindemittel-Verhältnisse (Bild 7.3).

Werden die Daten der Versuchsprogramme I und II einbezogen, für die jedoch keine Leimauslaufzeiten vorliegen, kann anstelle der Leimauslaufzeit auch die Steuergröße Wasser-Bindemittel-Verhältnis herangezogen werden (Bild 7.4 ff). Grün dargestellt sind die Betonzusammensetzungen, die optimale selbstverdichtende Eigenschaften aufweisen (Bild 7.4 ff). Sedimentierende Betone sind durch „S“ gekennzeichnet. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass der Entwurfparameter Wasser-Bindemittel-Verhältnis die komplexen chemisch-mineralogischen Wechselwirkungen im Prinzip nur indirekt über das resultierende Fließvermögen erfasst. Wird hingegen der Versuchsparameter Leimauslaufzeit verwendet, so werden auch Zemente mit unterschiedlichem Wasseranspruch vergleichbar. Weil jedoch die Massenverhältnisse von Zement und Zusatzstoffen sowie die Zusatzmittelgehalte der Betone in Bild 7.4 und Bild 7.5 vergleichbar sind, können Unterschiede der Setzfließmaße direkt auf die verschiedenen Zemente bzw. auf die Wechselwirkungen zwischen Zement, Zusatzstoff und Fließmittel zurückgeführt werden. Eine erste Abschätzung der günstigen Bereiche im Rahmen der Entwurfsphase kann daher unter Berücksichtigung der Kombination von Zement und Zusatzstoffen durchaus erfolgen.

In Bild 7.4 sind die Wasser-Bindemittel-Verhältnisse über den Leimschichtdicken aufgetragen für Betone unter Verwendung von CEM II/A-LL32,5R und Steinkohlenflugasche SFA (B). Prinzipiell sind zwei unterschiedliche Konzepte zur Herstellung einer robusten Basismischung denkbar.

1. Einerseits kann bei konstanter Leimzusammensetzung die Leimschichtdicke erhöht werden. Dies kann entweder durch Variation der Sieblinie, eine Erhöhung der Leimmenge oder durch die gleichzeitige Variation beider Entwurfparameter, etwa durch die Modifikation des Mörtelgehaltes, erfolgen. Diese Vorgehensweise ist durch den waagrechten Pfeil angedeutet. In Klammern sind die auf einen Kubikmeter Beton bezogenen Zement- und Zusatzstoffmassen angegeben.
2. Eine andere Möglichkeit besteht beispielsweise darin, den Zementgehalt bei einem konstanten äquivalenten Wasserzementwert $(w/z)_{eq}$ schrittweise zu erhöhen (angedeutet durch den schräg verlaufenden Pfeil), ohne jedoch den Zusatzstoffgehalt zu verändern. Dabei vergrößert sich die Leimschichtdicke und gleichzeitig nimmt die Leimzähigkeit ab. Bezogen auf einen Kubikmeter Frischbeton steigt dabei der Zementgehalt an, während der Zusatzstoffgehalt sinkt. Bei zu großer Erhöhung des Zementgehaltes droht jedoch die Gefahr der statischen (S) bzw. der dynamischen Entmischung.

Zu Nr. 2 ist anzumerken, dass mit Vergrößerung des Zementgehaltes bei konstantem $(w/z)_{eq}$ -Wert das Verhältnis V_w/V_b nach Gl. (7.3) ansteigt, wenn der Flugaschegehalt m_f oberhalb der Anrechenbarkeitsgrenze von 33 % des Zementgehaltes m_z liegt, weil dann der $(w/z)_{eq}$ -Wert nach Gl. (7.1) bestimmt wird. Gl. (7.3) wird erhalten, indem Gl. (7.1) in Gl. (7.2) eingesetzt wird.

$$(w/z)_{eq} = \frac{m_w}{m_z + 0,4 \cdot m_{f,max}} = \frac{m_w}{m_z + 0,4 \cdot 0,33 \cdot m_z} \quad \text{und} \quad \frac{V_w}{V_b} = \frac{V_w}{V_z + V_f} \quad (7.1) \quad (7.2)$$

$$\frac{V_w}{V_b} = \frac{V_w}{V_z + V_f} = \frac{1,132 \cdot m_z \cdot (w/z)_{eq}}{\frac{m_z}{\rho_z} + \frac{m_f}{\rho_f}} = \frac{1,132 \cdot (w/z)_{eq}}{\frac{1}{\rho_z} + \frac{m_f}{m_z} \cdot \frac{1}{\rho_f}} \quad (7.3)$$

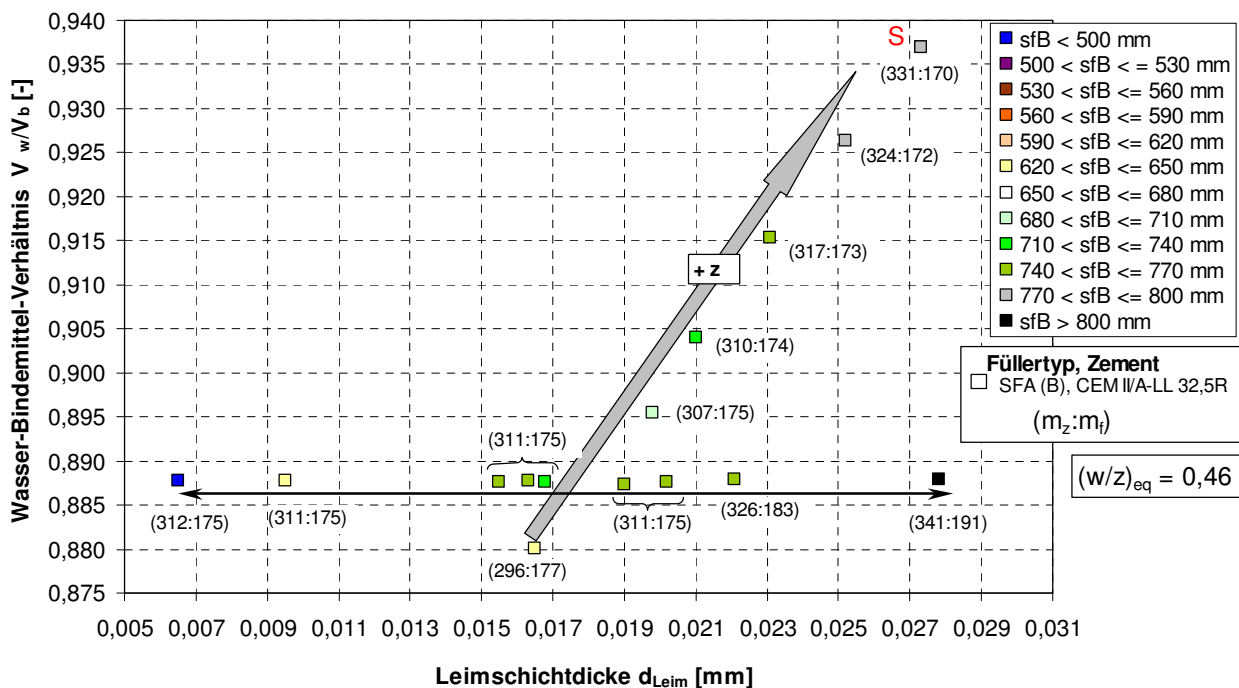


Bild 7.4: Überblick über die Steuerparameter Leimschichtdicke und Wasser-Bindemittel-Verhältnis; der Fließmittel- bzw. Stabilisierergehalt blieb bei allen Betonen konstant: $m_{FM} = 1,25\%$ v.z., $m_{St} = 0,10\%$ v.z.; Versuchsprogramme I und II

Auch für die Zemente CEM II/A-S 32,5R und CEM II/B-T 32,5R wurde der Zementgehalt bei konstantem $(w/z)_{eq}$ -Wert schrittweise gesteigert (Bild 7.5). In gewissen Grenzen ist es ebenso möglich, den Flugaschegehalt zu verringern. Das dadurch vergrößerte Wasser-Bindemittel-Verhältnis führt trotz Verringerung der Leimschichtdicke zu einer Steigerung der Nivellierfähigkeit.

Bild 7.6 zeigt, wie sich die Änderung der Steuergrößen Wasser-Bindemittel-Verhältnis und Leimschichtdicke auf die Nivellierfähigkeit von SVB unter Verwendung der Füller Kalksteinmehl KSM (A) und Flugasche SFA (A) auswirkt. Im Gegensatz zu den vorigen Bildern wurde bei diesen Rezepturen das Wasser-Bindemittel-Verhältnis ausschließlich über den Wassergehalt eingestellt; d.h. das Massenverhältnis von Zement / Zusatzstoff blieb konstant. Die äquivalenten

Wasserzementwerte sind in Bild 7.6 in Klammern angegeben. Die mit „R“ gekennzeichnete Rezeptur neigte zur Sedimentation im Rheometer, ohne dass statisches Sedimentieren anhand des Sedimentationszylinders beobachtet wurde.

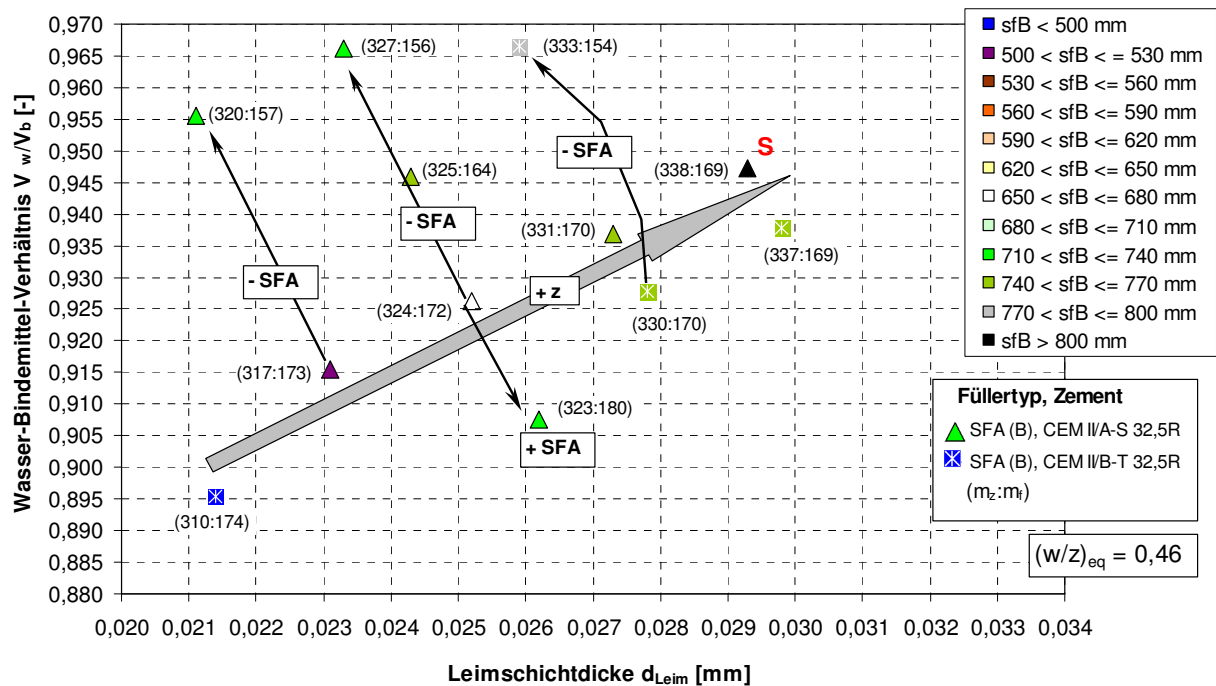


Bild 7.5: Überblick über die Steuerparameter Leimschichtdicke und Wasser-Bindemittel-Verhältnis; der Fließmittel- bzw. Stabilisierergehalt blieb bei allen Betonen konstant: $m_{FM} = 1,25$ % v.z., $m_{St} = 0,10$ % v.z.; Versuchsprogramm II

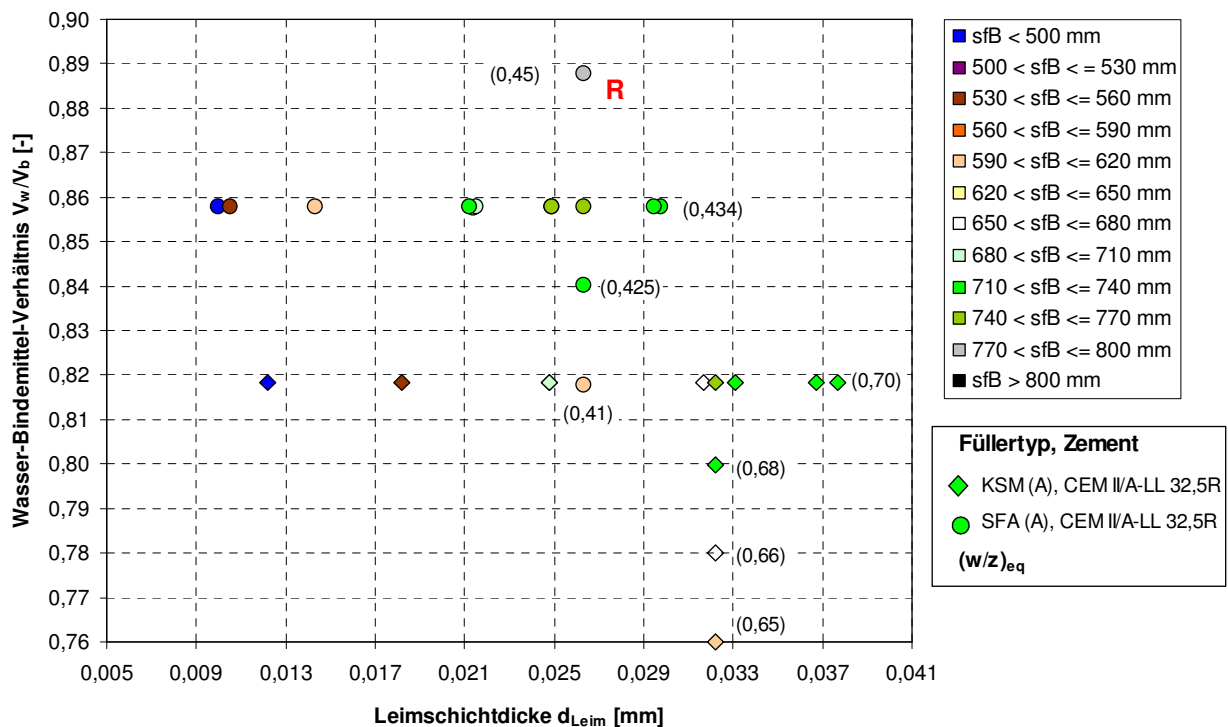


Bild 7.6: Überblick über die Steuerparameter Leimschichtdicke und Wasser-Bindemittel-Verhältnis; der Fließmittel- bzw. Stabilisierergehalt blieb jeweils bei allen Betonen der Versuchsprogramme III und IV konstant: KSM (A): $m_{FM} = 1,00$ % v.z., $m_{St} = 0$ % v.z., SFA (A): $m_{FM} = 1,05$ % v.z., $m_{St} = 0,10$ % v.z.

Bild 7.7 zeigt abschließend die Wasser-Bindemittel-Verhältnisse V_w/V_b über den Leimschichtdicken d_{Leim} für die Betone der Versuchsprogramme I bis IV. Diese gemeinsame Betrachtungsweise unterstreicht nochmals die Bedeutung verschiedener Zement/Zusatzstoffkombinationen.

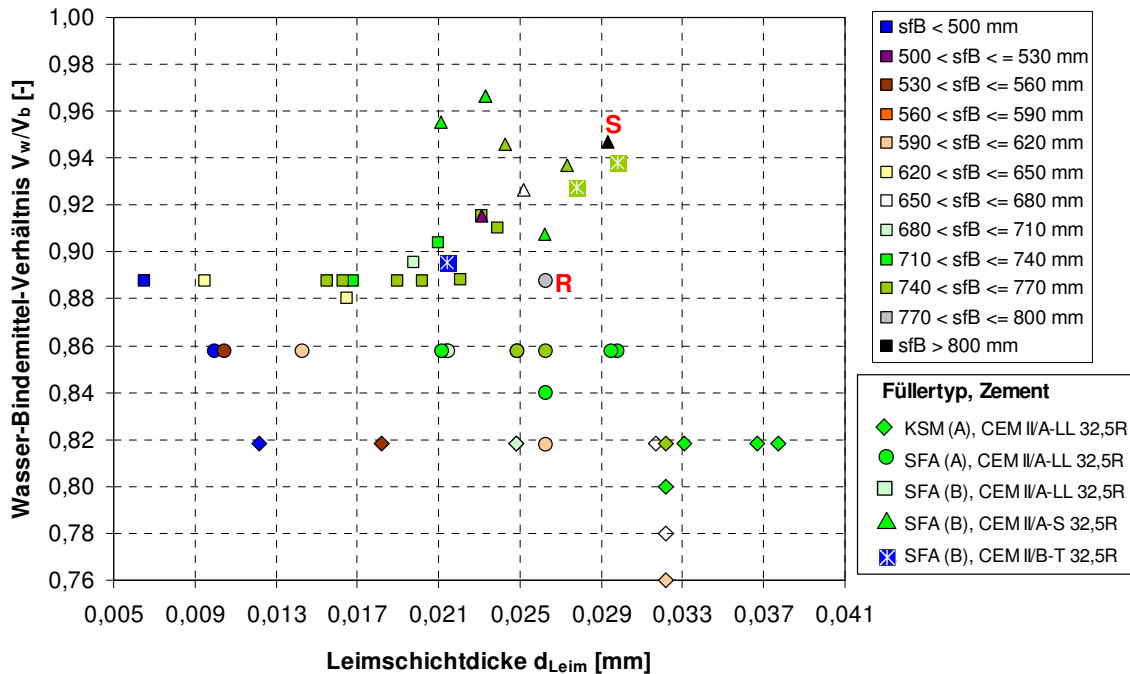


Bild 7.7: Überblick über die Steuerparameter Leimschichtdicke und Wasser-Bindemittel-Verhältnis; der Fließmittel- bzw. Stabilisiergehalt blieb bei allen Betonen der Versuchsprogramme I bis IV konstant: KSM (A): $m_{FM} = 1,00$ % v.z., $m_{St} = 0$ % v.z., SFA (A): $m_{FM} = 1,05$ % v.z., $m_{St} = 0,10$ % v.z., SFA (B): $m_{FM} = 1,05$ % v.z., $m_{St} = 0,10$ % v.z.

Bislang wurde die Rolle des Fließmittels im Hinblick auf die Konzeption zur Herstellung robuster selbstverdichtender Betone bewusst ausgespart, obwohl sie auch die Leimzähigkeit und damit die Leimauslaufzeit beeinflusst (vgl. Abschnitt 4).

Die zahlreichen unterschiedlichen auf dem Markt erhältlichen hochwirksamen Fließmittel, die teilweise bereits über organisch stabilisierende Anteile verfügen, machen einen allgemeingültigen Ansatz unmöglich. Die Steuerparameter Leimschichtdicke und Wasser-Bindemittel-Verhältnis stellen die notwendige Grundlage zur Rezepturentwicklung dar, weil sie sämtliche – insbesondere die Festigkeit und Dauerhaftigkeit betreffenden – Einflüsse berücksichtigen.

Die Art und Dosierung des Fließmittels muss immer durch Eignungsversuche nachgewiesen werden. Insbesondere die Zement-Zusatzstoff-Kombination sowie das erforderliche Verarbeitungszeitfenster entscheiden über die Auswahl sowie über eine mögliche Nachdosierungsempfehlung, die immer eine Funktion der Frischbetontemperatur ist. In diesem Zusammenhang muss nochmals auf eine mögliche Beeinflussung der Dauer der verflüssigenden Wirkung von Fließmittel bei Verwendung von Kalksteinmehl hingewiesen werden [STARK ET AL., 2004]. Dies ist insbesondere bei der Konzeption normalfester Betone von Belang.

Liegt eine robuste Basismischung vor, so sollte der Wasseranspruch (z.B. β_p -Wert) verschiedener Bindemittelchargen regelmäßig kontrolliert werden. Gegebenenfalls kann in die Rezeptur eingegriffen werden. Besser ist es jedoch, zusätzlich die Wechselwirkung zwischen Bindemittel und Fließmittel durch regelmäßige Kontrollen der rheologischen Kenngrößen des Leimes zu überprüfen, die, wenn geeignete Verfahren ausgewählt werden, auch dazu geeignet sind, Änderungen des Wasseranspruches zu erkennen. Von ausreichender Genauigkeit für die Praxis dürften hier Leimauslaufversuche sein, wie sie im Abschnitt 3 beschrieben wurden. Weil über die Leimauslaufzeit im Prinzip noch keine Aussage über die Leimfließgrenze möglich ist, können zusätzlich Setzfließversuche an Leim durchgeführt werden.

Im Hinblick auf die praktische Durchführbarkeit kann es angebracht sein, diese Versuche mit geringeren als im Beton vorgesehenen Fließmitteldosierungen durchzuführen. In diesem Zusammenhang sind die Anmerkungen im Abschnitt 2.5.1.2 zu beachten. In gleicher Weise ist es denkbar, zur regelmäßigen Qualitätssicherung die Kennwerte der Mörtelprüfungen Trichterauslaufzeit und Fließmaß heranzuziehen. Zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit kann anstelle der endgültig im Beton zum Einsatz kommenden Sandfraktion auch Normsand verwendet werden.

8 Simulation des Fließverhaltens bei baupraktischen Anwendungen

In den vorigen Abschnitten wurden Modelle vorgestellt, mit denen die rheologischen Kennwerte von SVB als Funktion der Zusammensetzung oder – mit gewissen Einschränkungen – aus den Messwerten der Standardversuche abgeschätzt werden können. Die Kenntnis dieser makroskopischen Parameter ist notwendig, wenn das Fließverhalten des Betons bei den verschiedenen Verarbeitungs- bzw. Einbauprozessen simuliert werden soll.

Für HERSCHEL-BULKLEY- und BINGHAM-Fluide existieren eine Reihe von gelösten Standardfällen zur Vorhersage von Fließvorgängen in Kanälen (z.B. in der Geologie zur Vorhersage des Fließverhaltens von Geröll-Schlamm-Muren) oder in Rohren (z.B. Bergbau). Experimentelle Studien zur Anwendbarkeit von BINGHAM-Strömungsgleichungen auf Bewegungen von Geröll-Schlamm-Muren enthält beispielsweise [PARSONS ET AL., 2001]. Weiter wird auf MEI ET AL., [2001] verwiesen. Dort sind theoretische Untersuchungen zu langsamen Fließvorgängen von BINGHAM-Fluiden in flachen Kanälen beschrieben. Soll die Herstellung komplexerer Betonstrukturen aus selbstverdichtendem Beton simuliert werden, so kann kommerzielle Strömungsmechaniksoftware eingesetzt werden.

Wie in den vorigen Abschnitten gezeigt wurde, verfügt SVB über eine Fließgrenze. Auch wenn diese im Vergleich zu Rüttelbeton naturgemäß sehr gering ist, so nimmt sie doch einen entscheidenden Einfluss auf die Strömungsvorgänge des Betons. Weil häufig der Beton durch Pumpen in die Schalung eingebracht wird, wird zunächst am Beispiel der Rohrströmung der Einfluss der Fließgrenze auf das Strömungsverhalten idealer HERSCHEL-BULKLEY- bzw. BINGHAM-Fluide erläutert. Die Betrachtung der Rohrströmung eignet sich zudem, auch die Anwendungsgrenzen aufzuzeigen, die bei der Simulation des Fließverhaltens von Beton beachtet werden müssen.

Grundsätzlich muss bei der Rohrströmung zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden werden. Typisch für die laminare (Rohr-)Strömung ist, dass sich die Teilchen auf zur Rohrachse parallelen Stromlinien bewegen, ohne sich untereinander zu vermischen. Bei der turbulenten oder wirbelhaften Strömung kommt es zu einer ständigen Vermischung der Strömungsteilchen. In diesem Fall hängt der Rohreibrungsverlust im Gegensatz zur laminaren Strömung auch von der Wandrauhigkeit ab [BOHL, 2001].

Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich ausschließlich auf die laminare Strömung, die vorliegt, wenn die folgenden Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Es darf zu keiner Entmischung kommen.
2. Bei der Idealisierung als HERSCHEL-BULKLEY-Fluid kann von einer laminaren Rohrströmung ausgegangen werden, wenn die so genannte METZNER-REED-Reynoldszahl $Re_{MR} < 2200$ ist (siehe weiter unten).

Weiter wird von einer waagrechten Rohrleitung ohne Unstetigkeiten ausgegangen. Bild 8.1 zeigt für verschiedene Flüssigkeiten die Schubspannungs- und Geschwindigkeitsprofile.

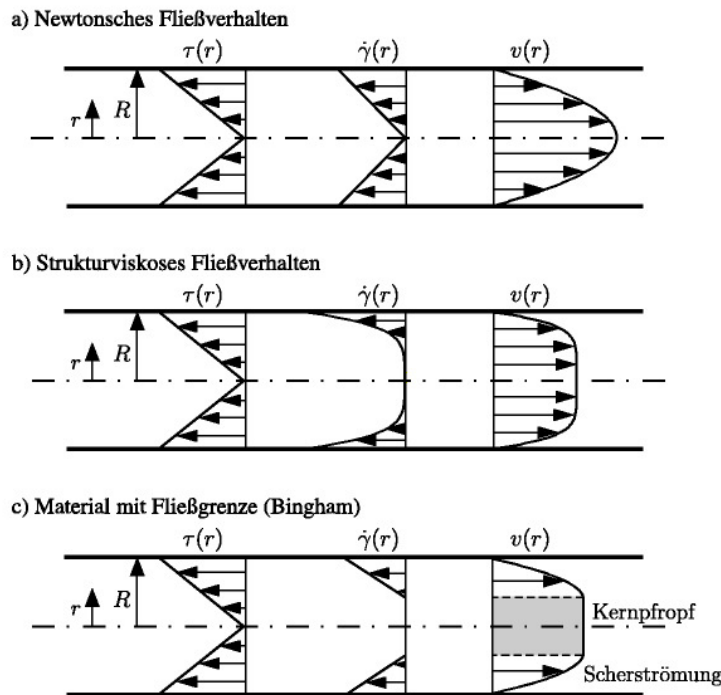


Bild 8.1: Rohrströmungen verschiedener Flüssigkeiten, nach [HANS, 2003]

Von zentraler Bedeutung ist, dass bei einem Fluid mit Fließgrenze zwischen Bereichen unterschieden werden muss, in denen die Fließgrenze unterschritten bzw. überschritten ist. In Bereichen mit unterschrittener Fließgrenze bewegt sich das Fluid als Pfropfen (engl. „plug“), d.h. die einzelnen Schichten innerhalb des Pfropfens werden nicht geschert. Da die Schubspannung von der Rohrmitte nach außen hin zunimmt, bildet sich dieser Pfropfen in Rohrmitte ($0 < r < r_{plug}$). Einen allgemeinen Überblick über Geschwindigkeitsprofile in Rohrleitungen beim Pumpen von HERSCHEL-BULKLEY-Fluiden nach Gl.(8.1) enthält beispielsweise [LI ET AL., 2002].

$$\tau = \tau_0 + a \cdot \dot{\gamma}^b \quad (8.1)$$

Allgemein hängt die Schubspannung τ_w an der Wand von Rohrradius R und vom statischen Druckgefälle $\Delta p/l$ ab und kann aus dem Kräftegleichgewicht bestimmt werden (vgl. auch Bild 8.1):

$$\tau_w = \frac{\Delta F}{A_{Rohrumfang}} = \frac{\Delta p \cdot A_{Rohrquerschnitt}}{A_{Rohrumfang}} = \frac{\Delta p \cdot \pi \cdot R^2}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot l} = \frac{\Delta p \cdot R}{2 \cdot l} \quad (8.2)$$

Ein Fließen ist nur dann möglich, wenn $\tau_w > \tau_0$ ist, also wenn der Druckunterschied Δp folgender Bedingung genügt:

$$\Delta p > \frac{2 \cdot l}{R} \cdot \tau_0 \quad (8.3)$$

Für eine waagrechte Leitungslänge von 100 m, einem Rohrradius von 0,10 m und einer Fließgrenze $\tau_0 = 100 \text{ N/m}^2$ ergibt sich eine theoretisch erforderliche Mindestdruckdifferenz von $2 \cdot 10^5$

N/m² bzw. 2 bar. Weil in der Rohrmitte nach Bild 8.1 die Schubspannung Null ist sowie bei laminarer Rohrströmung proportional zum Radius r und unabhängig vom Material ist, kann der Radius des Propfens berechnet werden, wenn $\tau(r) = \tau_0$ ist.

$$r_{plug} = \frac{2 \cdot \tau_0}{\Delta p / l} \quad (8.4)$$

Für HERSCHEL-BULKLEY-Fluide ist in [LI ET AL., 2002] und [FEESA, 2003] die folgende Beziehung zur Berechnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit \bar{v} im geraden Kreisrohr bei laminarer Strömung angegeben:

$$\bar{v} = \frac{R \cdot b}{d^{1/b} \tau_w^3} (\tau_w - \tau_0)^{\frac{1+b}{b}} \left[\frac{(\tau_w - \tau_0)^2}{1+3b} + \frac{2\tau_0(\tau_w - \tau_0)}{1+2b} + \frac{\tau_0^2}{1+b} \right] \quad (8.5)$$

Den Sonderfall der HERSCHEL-BULKLEY-Fluide stellen für $b = 1$ die BINGHAM-Fluide dar. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit kann dann mit Gl. (8.6) berechnet werden [LI ET AL., 2002].

$$\bar{v} = \frac{d^2 \cdot \Delta p}{32 \cdot \eta_{pl} \cdot l} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_0}{\tau_w} + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^4 \right] \quad (8.6)$$

mit:

$d = 2R$	[m]	Rohrdurchmesser
Δp	[N/m ²]	Statischer Druckunterschied zwischen Rohranfang und Rohrende
l	[m]	Rohrlänge
η_{pl}	[Pa.s]	Plastische Viskosität

Die Gleichungen (8.5) und (8.6) sind auf den laminaren Fall begrenzt. Die Rohrströmung ist dann laminar, wenn die METZNER-REED-Reynoldszahl $Re_{MR} < 2200$ ist [FEESA, 2003].

$$Re_{MR} = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot 2R}{\mu_w \left(\frac{3b+1}{4b} \right) \left(\frac{1}{1 - c(\tau_0/\tau_w) - d(\tau_0/\tau_w)^2 - e(\tau_0/\tau_w)^3} \right)} \quad (8.7)$$

$$\mu_w = \left(\frac{a}{1 - \tau_0/\tau_w} \right)^{\frac{1}{b}} \cdot \tau_w^{\frac{b-1}{b}} \quad (8.8)$$

$$c = \frac{1}{2b+1} \quad (8.9)$$

$$d = \frac{2b}{(b+1)(2b+1)} \quad (8.10)$$

$$e = \frac{2b^2}{(b+1)(2b+1)} \quad (8.11)$$

Diese Gleichungen lassen sich jedoch nur teilweise auf Beton übertragen. In der Literatur wird berichtet, dass sich bei Normalbeton im Bereich der Rohrwand während des Pumpvorganges eine Gleitschicht aus Zementleim ausbildet [BANFILL, 2003], [TATTERSALL, 1991]. Bei Rüttelbeton ist Voraussetzung zur Aufrechterhaltung dieser Gleitschicht die druckbedingte Absonderung von Wasser („pressurised bleeding“), die keineswegs mit konventionellem Bluten verwechselt werden darf. Diese Gleitschicht führt dazu, dass eine Scherbewegung im Bereich der Rohrmitte unterbunden wird. Es entsteht ein Betonpfropfen; lediglich die Gleitschicht wird einer Scherbewegung unterworfen. Ist das druckbedingte Bluten zu gering, so steigt die Viskosität der gescherten Gleitzzone aufgrund des höheren Feststoffgehaltes an und der erforderliche Pumpendruck steigt trotz Ausbildung eines Betonpfropfens stark an.

Die Fließgrenze üblicher Normalbetone liegt laut BANFILL [2003] im Bereich zwischen 500 und 2000 Pa, übliche plastische Viskositäten liegen zwischen 50 und 100 Pa.s. Die Fließgrenze und die plastische Viskosität der Gleitschicht dürfte dazu im Vergleich vernachlässigbar klein sein. Wie die Ergebnisse der rheologischen Messungen im Rahmen dieser Arbeit zeigen, liegen die Fließgrenzen von SVB deutlich unterhalb von 500 Pa (vgl. Bild 4.56), andererseits liegt ein gegenüber Normalbeton erhöhter Leimanteil vor. Neuere Untersuchungen zeigen, dass auch das Pumpverhalten von selbstverdichtendem Beton bzw. selbstverdichtendem Leichtbeton (SVLB) durch die Ausbildung von Gleitschichten bestimmt wird [MÜLLER ET AL., 2004], [MÜLLER ET AL., 2003]. Nach gegenwärtigem Stand können daher die makroskopischen rheologischen Kenngrößen nicht zur Simulation von Pumpvorgängen verwendet werden.

Die makroskopischen Kennwerte spielen jedoch eine wichtige Rolle bei allen anderen Fließvorgängen, sofern keine Entmischung stattfindet. Auch wenn die einfachen Gleichungen der Rohrströmung nicht direkt auf die Simulation des Pumpverhaltens von Rüttelbeton bzw. SVB anwendbar sind, so konnte für den Sonderfall der idealen BINGHAM-Flüssigkeit aufgezeigt werden, welche Rolle die Fließgrenze und die plastische Viskosität bei Strömungsproblemen spielen. Während Strömungen in Kanälen einfacher Geometrie unter Einwirkung des Eigengewichtes noch geschlossen gelöst werden können [PARSONS ET AL., 2001], sind für Simulation des Fließverhaltens von SVB in Schalungen Computerberechnungen notwendig. Die hierfür erforderlichen Eingangsparameter wurden im Rahmen dieser Arbeit ermittelt. In Verbindung mit der vorgenommenen Modellierung im Abschnitt 5 könnte direkt von der Betonzusammensetzung auf das Fließverhalten geschlossen werden.

Erste Simulationsansätze existieren bereits, in denen der Beton nicht mehr als Kontinuum, sondern durch einzelne flüssige und feste Elemente modelliert wird. Dies stellt die Grundlage für die Simulation von Entmischungsvorgängen dar. PETERSSON [2003] berichtet beispielsweise von Computer-Simulationen, in denen das Fließverhalten von SVB im L-Kasten-Versuch⁷⁾ und im Blockierringversuch untersucht wurde. Der Beton wurde dabei durch einzelne Mörtel- und Grobkornelemente idealisiert; somit ließen sich die Bewegungen einzelner Grobkornelemente verfolgen. Aufgrund des enormen Rechenaufwandes bleiben solche Anwendungen bislang auf die Simulation von Versuchen mit kleinen Betonmengen beschränkt.

⁷⁾ siehe [REINHARDT ET AL., 2001]

9 Zusammenfassung und Ausblick

Das komplexe Zusammenwirken verschiedenster Mechanismen, die in der Summe die Fließfähigkeit von selbstverdichtendem Beton (SVB) bestimmen, ist eine Ursache für die erhöhte Sensibilität gegenüber Rüttelbeton. Andererseits begründet sich gerade in der Komplexität dieser Mechanismen eine Vielzahl von möglichen Steuerparametern, die – werden sie maßvoll eingestellt – zum vorgegebenen Fließverhalten führen.

Das Ziel war deshalb, möglichst viele Konsistenzsteuergrößen in einem auf die Praxis übertragbarem Rahmen zu variieren, um die Abhängigkeiten zwischen Zusammensetzung und resultierendem Fließverhalten aufzuzeigen sowie die dahinter stehenden Mechanismen zu verstehen. Die zahlreichen unterschiedlichen Parametervariationen und die Verwendung verschiedener Zemente und Zement-Zusatzstoffkombinationen geben dem entwerfenden Ingenieur auch eine Hilfestellung bei der Konzeption und Optimierung von SVB.

Die Fließeigenschaften wurden sowohl durch die Standardkonsistenzprüfverfahren als auch durch die Aufzeichnung von Fließkurven mit dem Frischbetonrheometer „BTRHEOM“ charakterisiert. Die Überprüfung der Reproduzierbarkeit ergab, dass bei den komplexeren rheometrischen Verfahren größere Streuungen in Kauf genommen werden müssen als bei den einfacheren Standardprüfverfahren.

Die Auswertung der Fließkurven der rheometrischen Verfahren hat gezeigt, dass das Fließverhalten von SVB besser mit dem einer dilatanten HERSCHEL-BULKLEY-Flüssigkeit verglichen werden kann. Nachteilig ist jedoch, dass zur Beschreibung einer HERSCHEL-BULKLEY-Flüssigkeit drei Parameter notwendig sind, wovon nur die Fließgrenze physikalisch zu deuten ist. Daher wurde in dieser Arbeit auch eine kombinierte Kurvenanpassung vorgenommen: Im ersten Schritt wurde zur Bestimmung der Fließgrenze die HERSCHEL-BULKLEY-Gleichung angesetzt. Im zweiten Schritt wurde dann eine lineare Anpassung (BINGHAM-Modell) bei festgehaltener Fließgrenze durchgeführt und die plastische Viskosität bestimmt. Somit konnten die physikalisch nicht erklärbaren negativen Fließgrenzen vermieden werden, die insbesondere bei den hochviskosen Flugaschebetonen in einer direkten BINGHAM-Anpassung ermittelt worden sind. Es konnte gezeigt werden, dass sich der Zusammenhang zwischen der plastischen Viskosität, die nach direkter BINGHAM-Anpassung und indirekter BINGHAM-Anpassung ermittelt wurde, durch eine einfache Näherungsbeziehung beschreiben lässt.

Zur Klärung der Frage, welche Rolle die Leimzusammensetzung beim Fließverhalten spielt, wurde der Wassergehalt, der Fließmittelgehalt und der Stabilisierergehalt variiert. Die äquivalenten Wasserzementwerte $(w/z)_{eq}$ lagen – abhängig vom eingesetzten Füllertyp – zwischen 0,33 und 0,70. Schwerpunktartig wurde jedoch das Fließverhalten der niedrigviskosen Betone mit Kalksteinmehl bei $(w/z)_{eq} = 0,65$ bis 0,70 sowie das der vergleichsweise hochviskosen Betone mit Steinkohlenflugasche bei $(w/z)_{eq} = 0,41$ bis 0,47 untersucht. Weiter variiert wurde der Leimgehalt, der Mörtelgehalt sowie die Grobkornzusammensetzung.

Zur Vorhersage des Fließverhaltens wurde der Beton als Zwei-Phasen-System modelliert, wobei der Bindemittelleim als flüssige Phase und die Gesteinskörnung als Feststoffphase betrachtet wurde. Die Wechselwirkung zwischen beiden Phasen kann entweder durch die Dicke der Leimschicht auf der Gesteinskörnung oder aber durch die relative Feststoffkonzentration beschrieben werden. Die Leimschichtdicke kann berechnet werden, wenn für die Gesteinskörnung die

spezifische Kornoberfläche sowie der Hohlraumgehalt bei loser Schüttung vorliegen, während die relative Feststoffkonzentration auf Verdichtungsversuchen der Gesteinskörnung basiert.

Die Betrachtung des Hohlraumgehaltes und der spezifischen Kornoberfläche verschieden zusammengesetzter Zuschlagsieblinien zeigte, dass ein Optimum etwa im Bereich der Sieblinien B16 und AB16 vorliegt, wobei auch die Kornbeschaffenheit eine Rolle spielt. In Frischbetonuntersuchungen, in denen die Zuschlagsieblinie im Bereich zwischen A16 und C16 bei konstantem Leimvolumen und bei gleicher Leimzusammensetzung variiert worden war, wurde festgestellt, dass der Beton mit der Sieblinie AB16 nach DIN 1045-2 (Anhang L) das maximale Setzfließmaß aufwies. Durch die Berechnung der Leimschichtdicken auf den Zuschlägen konnte gezeigt werden, dass das maximale Setzfließmaß dann vorlag, sofern auch die berechnete Leimschichtdicke maximal war. Von besonderer Bedeutung war, dass es im Hinblick auf die Modellierung der Standard- und der rheometrischen Kenngrößen keine Rolle spielte, ob das Leimvolumen, das Mörtelvolumen oder die Grobkornzusammensetzung variiert wurde. Während bislang in der Literatur fast ausschließlich die rheologischen Kennwerte Fließgrenze und plastische Viskosität modelliert worden waren, wurde in dieser Arbeit besonders Wert darauf gelegt, dass parallel dazu auch die Kennwerte der Standardprüfverfahren modelliert wurden. Bei konstanter Leimzusammensetzung genügte pro Konsistenzkennwert eine einzige Funktion zur Beschreibung der Abhängigkeit zwischen Konsistenzkennwert und dem Modellparameter relative Feststoffkonzentration, so dass nicht zwischen den Füllertypen unterschieden werden musste. Bei Verwendung der Leimschichtdicke musste hingegen zwischen den Füllertypen unterschieden werden. Durch die Verwendung des zweiten Modellparameters Leimauslaufzeit (Leimzähigkeit) konnte die Wirkung unterschiedlicher Variationen der Leimzusammensetzung bei der Modellierung der plastischen Viskosität berücksichtigt werden. Die Leimauslaufzeit ist für die Vorhersage des Setzfließmaßes des Betons bedingt geeignet, für die Vorhersage der Fließgrenze und der Trichterauslaufzeit des Betons hingegen nicht geeignet.

Im Hinblick auf eine mögliche Rationalisierung des Prüfaufwandes wurden Zusammenhänge zwischen den einzelnen Kennwerten der Standardprüfverfahren untersucht. Vor dem Hintergrund makroskopischer rheologischer Kennwerte wurden die einzelnen Standardprüfverfahren beleuchtet. Anhand einer BINGHAM-Modellflüssigkeit ließ sich beispielsweise zeigen, dass sich das Setzfließmaß bei Vernachlässigung des Viskositätseinflusses hauptsächlich auf die Fließgrenze und die Dichte des Betons zurückführen lässt. Der Vergleich zwischen dem Modell und den gemessenen Werten zeigte, dass die gefundene Beziehung eine Untergrenze der Messwerte darstellte.

Die Rolle der rheologischen Kennwerte und ihre Auswirkung auf die Selbstentlüftung von SVB wurde anhand einer BINGHAM-Modellflüssigkeit diskutiert. Aufbauend auf den Erkenntnissen des Modells wurden die gemessenen Frischbetonluftgehalte durch die makroskopischen rheologischen Kennwerte ausgedrückt, dennoch spielt insbesondere die Gesteinskörnung eine wichtige Rolle. Ähnlich wie die Entlüftungsfähigkeit wird auch das Entmischungsverhalten durch mikroskopische Aspekte beeinflusst, die jedoch durch die eingeführten Modellparameter berücksichtigt werden können. Somit konnten Bereiche eingegrenzt werden, innerhalb derer die Betone sedimentierten. Diese Bereiche hingen von der Zusammensetzung und damit auch vom Füllertyp ab. Weiterer Forschungsbedarf besteht noch hinsichtlich der thixotropen Eigenschaft von SVB, besonders im Zusammenhang mit der Sedimentationsneigung und der Selbstentlüftungsfähigkeit im Ruhezustand.

Eine Besonderheit stellt der Blockierringversuch dar. Makroskopisch betrachtet wird die gemessene Blockierneigung nicht nur von der plastischen Viskosität, sondern auch von der Nivellierfähigkeit selbst beeinflusst. Um die Blockierneigung unabhängig vom Setzfließmaß quantifizieren zu können, wurde der Höhenunterschied st_J des Betons in Ringmitte im Vergleich zur Betonhöhe unmittelbar außerhalb des Ringes gemessen. Zwar ist auch die Betonkontur im Blockierring von der Fließgrenze des Betons abhängig, dennoch kann näherungsweise das blockierte Betonvolumen durch den gemessenen Höhenunterschied ausgedrückt werden.

Weiter konnte gezeigt werden, dass die Fließzeit t_{500} im Setzfließversuch – unabhängig von der Zusammensetzung – näherungsweise durch die plastische Viskosität beschrieben werden kann. Damit kann aus den Kennwerten des Setzfließversuches sowohl die Fließgrenze als auch die plastische Viskosität abgeschätzt werden. Eigentlich soll der Trichterauslaufversuch zur Abschätzung der Zähigkeit einer Betonrezeptur dienen. Zwar hing auch die Trichterauslaufzeit von der plastischen Viskosität ab, es musste jedoch zwischen den Füllertypen unterschieden werden, da insbesondere die Betone unter Verwendung von Steinkohlenflugasche bei gleicher Trichterauslaufzeit etwa doppelt so hohe plastische Viskositäten aufwiesen, wie die Betone mit Kalksteinmehl. Problematisch ist ebenso, dass auch die Trichterauslaufzeit durch Blockiereffekte beeinflusst wird. Zur Abschätzung der plastischen Viskosität ist die Trichterauslaufzeit daher nicht geeignet. Zwischen der Trichterauslaufzeit $t_{V,B}$ und den Fließzeiten im Setzfließversuch t_{500} bzw. im Blockierringversuch $t_{500,J}$ konnte keine von der Zusammensetzung unabhängige Beziehung angegeben werden.

Der vorletzte Abschnitt war dem Konzept zur Herstellung robuster selbstverdichtender Betone gewidmet. Anhand der eingeführten Modellparameter Leimauslaufzeit und Leimschichtdicke konnten günstige und von der Zusammensetzung abhängige Bereiche angegeben werden, in denen robuste selbstverdichtende Betone erzielt wurden. Ebenso wurden günstige Bereiche in Abhängigkeit von der Zementart, des Modellparameters Leimschichtdicke und des Steuerparameters Wasser-Bindemittel-Verhältnis angegeben. Portlandkalksteinzement erwies sich als besonders günstig; robuste selbstverdichtende Betone konnten bereits mit einem Gesamtmehlkorngehalt unter 500 kg/m^3 hergestellt werden. Die geringere Fließfähigkeit der Betone, die mit Portlandhütten- und Portlandölschieferzement hergestellt wurden, konnte auf einen erhöhten Wasseranspruch zurückgeführt werden. Möglich sind auch chemisch-mineralogische Einflüsse und Wechselwirkungen mit dem eingesetzten Fließmittel. Die angegebenen günstigen Bereiche zur Herstellung von SVB können freilich nicht auf beliebige Anwendungen übertragen werden. Hierzu sind schon allein die Kombinationsmöglichkeiten der auf dem Markt erhältlichen Ausgangsstoffe zu groß. Sie sind vielmehr als Ansätze zu verstehen, mit denen im konkreten Einzelfall, beispielsweise im Rahmen eines Mischungsentwurfes, eine robuste Betonrezeptur entwickelt werden kann oder beispielsweise im laufenden Herstellungsprozess die Qualität kontinuierlich gesichert werden kann.

Im letzten Abschnitt wurden schließlich die Besonderheiten aufgezeigt, die beispielsweise bei der Rohrströmung von HERSCHEL-BULKEY- bzw. BINGHAM-Fluiden zu beachten sind. Trotzdem scheint das reale Fließverhalten beim Pumpvorgang von SVB – wie auch bei Rüttelbeton – hauptsächlich durch die Ausbildung und Aufrechterhaltung von Gleitschichten bestimmt zu werden und weniger von den makroskopischen rheologischen Kenngrößen abzuhängen. Bei allen anderen Strömungsvorgängen – von Entmischungsvorgängen einmal abgesehen – spielen jedoch die makroskopischen Kennwerte die entscheidende Rolle. Insbesondere, wenn vor der

eigentlichen Bauwerksherstellung das Fließverhalten simuliert werden soll. Hierfür kann kommerzielle strömungsmechanische Software verwendet werden.

In anderen Disziplinen – wie etwa beim Kunststoffspritzen – ist es bereits heute Stand der Technik, den Formfüllungsvorgang vorab zu simulieren. Weitere Beispiele sind etwa die Simulationen von Murenbewegungen in der Geologie. Für diese Anwendungsfälle sind die Fließkurven und die davon abgeleiteten Parameter immer die zentrale Voraussetzung. Die vorgenommene Modellierung dieser physikalischen Fließparameter stellt dabei eine wichtige Vereinfachung dar, kann doch damit das voraussichtliche Fließverhalten während der Simulationen direkt auf die Zusammensetzung zurückgeführt werden.

Dennoch besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der dynamischen Entmischung von Beton, die etwa durch komplexe Bauteilgeometrien oder durch kritische Bewehrungskonzentrationen hervorgerufen werden kann. Wenn die Entmischungsneigung simuliert werden soll, dann genügt es nicht mehr, nur die makroskopischen Fließkurven und die davon abgeleiteten Parameter zu bestimmen. Jedoch können auch solche Simulationen auf einer Zweiphasenbetrachtung basieren. So ist es denkbar, dass zukünftig die rechnerische Modellierung von Beton so weit fortgeschritten sein wird, dass selbst die Bewegung einzelner Zuschlagkörner auch bei komplexen Betoniervorgängen simuliert werden kann.

10 Literatur

- [ASSAAD ET AL., 2004] ASSAAD, J.; KHAYAT, K.H.; DACZKO, J.: *Evaluation of Static Stability of Self-Consolidating Concrete*. In: ACI Materials Journal, 101 (2004), No. 3, pp. 207-215.
- [BANFILL ,2003] BANFILL, P.F.G.: *The Rheology of fresh cement and concrete – review*. Accepted for publication in Proceedings of the 11th International Cement Chemistry Congress, Durban, May 2003. <http://www.schleibinger.com/k2003/banfill/banfill.pdf>
- [BARNES ET AL., 1989] BARNES, H.A.; HUTTON, J.F.; WALTERS, K.: *An Introduction to Rheology*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1989.
- [BENEDIX, 1999] BENEDIX, R.: *Chemie für Bauingenieure*. Teubner Verlag, Stuttgart und Leipzig, 1999.
- [BERBER ET AL., 1985] BERBER, J.; KACHER, H.; MEYER, H.: *Formeln und Tabellen zur Physik*. Verlag Handwerk und Technik, Hamburg, 12. Auflage, 1985.
- [VOM BERG, 1979] VOM BERG, W.: *Influence of specific surface and concentration of solids upon the flow behaviour of cement pastes*. In: Magazine of Concrete Research, Vol. 31 (1979), No. 109, pp. 211-216.
- [BILLBERG, 1999] BILLBERG, P.: *Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience*. CBI report 2:99. Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1999.
- [BILLBERG, 2003] BILLBERG, P.: *Form pressure generated by self-compacting concrete*. In: WALLEVIK, Ó.H.; NÍELSSON I. (editors). Self-compacting concrete. Proceedings of the 3rd international RILEM Symposium on self-compacting concrete (Proceedings PRO 33). Reykjavic, 17-20 August 2003, pp. 271-280.
- [BOHL, 1994, 2001] BOHL, W.: *Technische Strömungslehre*. Vogel-Verlag, Würzburg, 10. Auflage 1994 und 12. Auflage 2001.
- [BRAMESHUBER ET AL., 2003] BRAMESHUBER, W.; UEBACHS, S.: *Einfluss der Temperatur und des Fließmittels auf die rheologischen Eigenschaften und Modelle von selbstverdichtendem Mörtel und Beton*. In: STARK, J. (Hrsg.). Beiträge zur 15. Internationalen Baustofftagung am 24.-27. Sept. 2003 am F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus Universität Weimar, S. 2-0145 bis 2-0154.
- [BUCHENAU, 2004] BUCHENAU, G.: *Die rheologischen Eigenschaften eines Selbstverdichtenden Betons mit Steinmehlen*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2004.

- [BUI ET AL., 2002] BUI, V.K.; AKKAYA, Y.; SHAH, S.P.: *Rheological Model for Self-Compacting Concrete*. In: *ACI Materials Journal*, 99 (2002), No. 6, pp. 549-559.
- [CHANG ET AL., 2002] CHANG, C.-S.; CHEN, K.-H.; YEN, T.: *Developing an Active Rheometer for Cementitious Materials*. In: KÖNIG, G.; DEHN, F.; FAUST, T. (Editors). *Proceedings of the 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, Universität Leipzig, 2002, pp. 1525-1535.
- [DOMONE, 2001] DOMONE, P.: *Mix Design*. In: SKARENDAHL, Å; PETERSSON, Ö. *Self-Compacting Concrete. State-of-the-Art-Report of RILEM Technical Committee 174-SCC*. RILEM Report 23, S.A.R.L, Cachan, 2001, pp. 39-55.
- [DONTULA ET AL., 1999] DONTULA, P.; MACOSKO, C.W.: *Yield Stress of Orbitz*. In: *Rheology Bulletin*, 68 (1999), No.1, pp. 5-6.
- [EINSTEIN, 1906, 1911] EINSTEIN, A.: *Eine neue Bestimmung der Moleküldimension*. In: *Annalen der Physik*, 19 (1906), S. 289-306 und 34 (1911), S. 591-592.
- [FEESA, 2003] FEESA LIMITED: *Non-Newtonian Flows in pipelines*. A Feesa Limited Case Study, 2003.
<http://www.feesa.net/pdf/casestudies>
- [FERRARIS ET AL., 1998] FERRARIS, C.F.; DE LARRARD, F.: *Testing and modelling of fresh concrete rheology*. National Institute of Standards and Technology, NIST-Report 6094, 1998.
- [FERRARIS, 1999] FERRARIS, C.F.: *Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report*. In: *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 104 (1999), pp. 461-478.
- [FERRARIS ET AL., 2001] FERRARIS, C.F.; BROWER, L. E.: *Comparison of concrete rheometers. International tests at LCPC*. National Institute of Standards and Technology, NIST-Report 6819, 2001.
- [FREIMANN, 2002] FREIMANN, T.: *Einfluss von Steinkohleflugaschen auf das rheologische Verhalten von Zementleimen und -mörteln*. Dissertation, Universität Hannover, 2002.
- [GEIKER ET AL., 2001] GEIKER, M.R.; BRANDL, M.; THRANE, L.N.; NIELSEN, L.F.: *On the Effect of Coarse Aggregate Fraction and Shape on the Rheological Properties of Self-Compacting Concrete*. In: *Cement, Concrete and Aggregates*, 24 (2002), No. 1, pp. 3-6.

- [GRAUBNER ET AL., 2002] GRAUBNER, C.-A.; PROSKE, T.: *Einfluss der Betoniergeschwindigkeit auf das Entlüftungsverhalten sowie den entstehenden Schalungsdruck bei Verwendung von selbstverdichtendem Beton*. Forschungsbericht des Instituts für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, 2002.
- [GRÜBL ET AL., 2001] GRÜBL, P.; WEIGLER, H.; KARL, S.: *Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften. Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau*. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2. Auflage, 2001.
- [GRÜNEWALD, 2004] GRÜNEWALD, S.: *Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete*. Dissertation. Technische Universität Delft, 2004.
- [HACKLEY ET AL., 2001] HACKLEY, A.; FERRARIS, C.F.: *Guide to Rheological Nomenclature: Measurements in Ceramic Particulate Systems*. National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 946, 2001.
- [HANS, 2003] HANS, A.: *Entwicklung eines Inline-Viskosimeters auf Basis eines magnetisch-induktiven Durchflussmessers*. Universität Karlsruhe, Dissertation, 2003.
- [HAUGER ET AL., 1995] HAUGER, W.; SCHNELL, W.; GROSS, D.: *Technische Mechanik*. Band 3: Kinetik, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 5. Auflage, 1995.
- [HELA ET AL., 2003] HELA, R.; BODNÁROVÁ, L.: *Rheological research of modified cement mortar for production of self-compacting concrete*. In: WALLEVIK, Ó.H.; NÍELSSON I. (editors). *Self-compacting concrete. Proceedings of the 3rd international RILEM Symposium on self-compacting concrete (Proceedings PRO 33)*. Reykjavic, 17-20 August 2003, pp. 261-268.
- [HILLEMEIER ET AL., 2001] HILLEMEIER, B.; BUCHENAU, G.: *Kapitel 3: Rheologie*. In: REINHARDT, H.-W. (Hrsg.) ET AL. *Sachstandbericht Selbstverdichtender Beton (SVB), DAfStb Heft 516*, Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [HÖVELING ET AL., 2003] HÖVELING, H.; LOHAUSS, L.: *Robustimprovement für Selbstverdichtenden Beton (SVB)*. In: STARK, J. (Hrsg.). *Beiträge zur 15. Internationalen Baustofftagung am 24.-27. Sept. 2003 am F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus Universität Weimar*, S. 2-0176 bis 2-0186.
- [HU ET AL., 1995] HU, C.; DE LARRARD, F.; GJØRV, O.E.: *Rheological testing and modelling of fresh high performance concrete*. In: *Materials and Structures*, 28 (1995), No. 175, pp. 1-7.

- [HU ET AL., 1996] HU, C.; DE LARRARD, F.; SEDRAN, T.; BOULAY, C.; BOSC, F.; DEFLORENNE, F.: *Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete*. In: *Materials and Structures*, 29 (1996), No. 194, pp. 620-631.
- [ICHIMIYA ET AL., 2002] ICHIMIYA, K.; IDEMITSU, T.; YAMASAKI, T.: *The influence of mortar air content and fluidity on surface void characteristics in self-compacting concrete*. In *JSCE*, 56 (2002), No.711. Sonderdruck, übersetzt aus dem Japanischen.
- [KECK , 1999] KECK, H.J.: *Untersuchung des Fließverhaltens von Zementleim anhand rheologischer Messungen*. Dissertation. Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Band 5, Univ.-GH Essen, 1999.
- [KHAYAT ET AL., 2002] KHAYAT, K.H.; SARIC-CORIC, M.; LIOTTA, F.: *Influence of thixotropy on stability characteristics of cement grout and concrete*. In: *ACI Materials Journal*, 99 (2002), No. 3, pp. 234-241.
- [KOKADO ET AL., 1999] KOKADO, T.; ET AL.: *Study on a Method of Obtaining Rheological Coefficients of High-Flow Concrete from Slump Flow test*. In: *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements of JSCE*, 1999, pp. 113-130 (in Japanese).
- [KORDTS, 2002] KORDTS, S.: *Selbstverdichtender Beton*. In: Verein deutscher Zementwerke e.V (Hrsg.). Tagungsband zum 41. Forschungskolloquium des DAfStb am 11. und 12. Juli 2002 in Düsseldorf, S. 109-120.
- [KORDTS ET AL., 2003] KORDTS, S.; BREIT, W.: *Controlling the workability properties of self-compacting concrete used as ready-mixed concrete*. In: WALLEVIK, Ó.H.; NIELSSON I. (editors). *Self-compacting concrete. Proceedings of the 3rd international RILEM Symposium on self-compacting concrete (Proceedings PRO 33)*. Reykjavic, 17-20 August 2003, pp. 220-231.
- [KRELL, 1987] KRELL, J.: *Einfluss der Feinststoffe im Beton auf die Frischbetonkonsistenz*. In: *Berichte vom Fachkolloquium „Zementleim, Frischmörtel, Frischbeton“*, 1./2. Okt. 1987 in Hannover. Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover, Heft 55, S.160-176.
- [KRIEGER ET AL., 1959] KRIEGER, I.M.; DOUGHERTY, T.J.: *Transactions of the Society of Rheology*, III (1959), pp. 137-152.

- [DE LARRARD ET AL., 1993] DE LARRARD, F.; SZITKAR, J.-C.; HU, C.; Joly, M.: *Design of a rheometer for fluid concretes*. In: BARTOS, P.J.M. (Editor). Special Concretes. Workability and Mixing. Proceedings of the international RILEM Workshop (Proceedings PRO 24). Paisley, Scotland, 2-3 March 1993, pp. 201 - 208. E & FN SPON, London, 1993,
- [DE LARRARD ET AL., 1998] DE LARRARD; F.; FERRARIS, C.F.; SEDRAN, T.: *Fresh Concrete: A Herschel-Bulkley Material*. In: Materials and Structures, 31 (1998), No. 211, S. 494-498.
- [DE LARRARD, 1999] DE LARRARD, F.: *Concrete Mixture Proportioning – A Scientific Approach*. E & FN Spon, London, 1999.
- [LCPC, 2003] LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées): BTRHEOM – Fresh concrete rheology measurements with ADREHEO 13.0. Issue: 27.03.2003.
- [LEMMER, 2003] LEMMER, C.: *Ein aus experimentellen Untersuchungen abgeleitetes Produktionskonzept für Selbstverdichtenden Beton (SVB)*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2003
- [LI ET AL., 2002] LI, M.; BERNIER, L.; BOUCHER, J.-F.: *Rheology of mineral pastes and its implications on underground pipeline delivery*. In: Proceedings of Symposium 2002 en Environnement Minier, Rouyn-Noranda. Quebec, 3-5 November 2002. Canadian Institute of Mining, Metallurgy & Petroleum.
- [LICHTMANN ET AL., 2003] LICHTMANN, M.; GROB, A.: *Selbstverdichtender Beton – Praxisgerechte Bestimmung des optimalen Wassergehaltes*. In: Betonwerk + Fertigeil-Technik, 69 (2003), H. 6, S. 34-39.
- [LOWKE ET AL., 2003] LOWKE, D.; WIEGRINK, K.-H.; SCHIEBL, P.: *Sedimentationsverhalten selbstverdichtender Betone*. In: STARK, J. (Hrsg.). Beiträge zur 15. Internationalen Baustofftagung am 24.-27. Sept. 2003 am F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus Universität Weimar, S. 2-0155 bis 2-0166.
- [MARQUARDT, 2002] MARQUARDT, I.: *Ein Mischungskonzept für selbstverdichtenden Beton auf der Basis der Volumenkenngößen und Wasseransprüche der Ausgangsstoffe*. Dissertation. In: Rostocker Berichte aus dem Fachbereich Bauingenieurwesen, Heft 7, Universität Rostock, 2002.
- [MEI ET AL., 2001] MEI, C.C.; YUHI, M.: *Slow flow of a Bingham fluid in a shallow channel of finite width*. In: J. Fluid. Mech., 2001, vol. 431, pp. 135-159.
- [MOONEY, 1951] MOONEY, M.: J. Colloid Sci. 6 (1951), pp. 162-170.

- [MÜLLER ET AL., 2001] MÜLLER, H.S.; MECHTCHERINE, V.; HAIST, M.: *Development of Self-Compacting Lightweight Aggregate Concrete*. In: OZAWA, K.; OUCHI, M. (editors). Proceedings of the 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete. Tokyo, 23-25 October 2001, pp.737-742.
- [MÜLLER ET AL., 2001] MÜLLER, H.S.; MECHTCHERINE, V.: *Kapitel 7: Selbstverdichtender Leichtbeton*. In: REINHARDT, H.-W. (Hrsg.) ET AL. Sachstandbericht Selbstverdichtender Beton (SVB). DAFStb Heft 516, Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [MÜLLER ET AL., 2003] MÜLLER, H.S.; HAIST, M.; MECHTCHERINE, V.; BEITZEL, H.: *Retrofitting of building structures using pumpable Self-Compacting Lightweight Concrete*. In: WALLEVIK, Ó.H.; NIELSSON I. (editors). Self-compacting concrete. Proceedings of the 3rd international RILEM Symposium on self-compacting concrete (Proceedings PRO 33). Reykjavic, 17-20 August 2003, pp. 776-785.
- [MÜLLER ET AL., 2004] MÜLLER, H.S.; HAIST, M.: *Bauwerksertüchtigung mit selbstverdichtendem pumpbaren Leichtbeton*. Forschungsbericht des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe, 2004.
- [MURATA, 1984] MURATA, J.: *Flow and deformation of fresh concrete*. In: Matériaux et Construction, 98 (1984), No. 17, pp. 117-129.
- [NIELSEN, 2001] NIELSEN, L.F.: *Rheology of some fluid extreme composites*. In: Reprint from the Nordic Concrete Research, 2 (2001), pp. 83-93.
- [NOGUCHI ET AL., 1999] NOGUCHI, T.; OH, S.G.; TOMOSAWA, F.: *Rheological approach to passing ability between reinforcing bars of self-compacting concrete*. In: SKARENDAHL, Å; PETERSSON, Ö. (Editors). Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Stockholm, September 13-14, 1999), Pro 7, S.A.R.L., Cachan, 1999, pp. 59-70.
- [OH ET AL., 1999] OH, S.G.; NOGUCHI, T.; TOMOSAWA, F.: *Towards mix design for rheology of self-compacting concrete*. In: SKARENDAHL, Å; PETERSSON, Ö. (EDITORS). Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Stockholm, September 13-14, 1999), Pro 7, S.A.R.L., Cachan, 1999, pp. 361-372.
- [OKAMURA ET AL., 1995] OKAMURA, H., OZAWA, K.: *Mix Design for Self-Compacting Concrete*. In: Concrete Library of JSCE, 25(1995), June, pp. 107-120.

- [PARSONS ET AL., 2001] PARSONS, J.D.; WHIPPLE, K.X.; SIMONI, A.: *Experimental Study of the Grain-Flow, Fluid-Mud Transition in Debris Flows*. In: *Journal of Geology*, 109 (2001), pp. 427-447.
- [PASCHMANN, 1999] PASCHMANN, H.: *Selbstverdichtender Beton – praktische Hinweise*. In: *Betonwerk und Fertigteiltechnik*, 65 (1999), H. 11, S. 34-42.
- [PETERSSON, 2003] PETERSSON, Ö.: *Simulation of Self-Compacting Concrete Laboratory Experiments and numerical modelling of testing methods, JRING and L-Box Tests*. In: WALLEVIK, Ó.H.; NIELSSON I. (editors). *Self-compacting concrete. Proceedings of the 3rd international RILEM Symposium on self-compacting concrete (Proceedings PRO 33)*. Reykjavic, 17-20 August 2003, pp. 202-207.
- [PROSKE ET AL., 2004] PROSKE, T.; RAMGE, P.: *Influence of the particle shape on the packing density of aggregates*. In: *Darmstadt Concrete*, 19 (2004). <http://www.darmstadt-concrete.de/2004/packing.html>
- [PUNTKE, 2002] PUNTKE, W.: *Forschen, Messen, Optimieren – Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken*. In: *beton*, 52 (2002), H. 5, S. 242-248.
- [REED, 1995] REED, J.S.: *Principles of Ceramic Processing*. John Wiley and Sons, New York, 2nd edition, 1995.
- [REINER, 1958] REINER, M.: *Rheology*. In: FLÜGGE, S. (Editor). *Encyclopedia Of Physics – Vol. VI: Elasticity and Plasticity*. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1958.
- [REINHARDT ET AL., 2001] REINHARDT, H.-W. (HRSG.) ET AL.: *Sachstandbericht Selbstverdichtender Beton (SVB)*. DAfStb Heft 516. Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [REINHARDT ET AL., 2003] REINHARDT, H.-W.; WÜSTHOLZ, T.: *Passing ability of SCC. Report of workpackage 3, Task 3.2*. GROWTH Project GRD2-2000-30024. Forschungsbericht des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 2003.
- [REINHARDT ET AL., 2004] REINHARDT, H.-W.; WÜSTHOLZ, T.: *Selbstverdichtender Beton unter Verwendung lokaler Ausgangsstoffe. Teil 1: Vorversuche*. Forschungsbericht des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 2004.
- [SAAK ET AL., 2001] SAAK, A.W.; JENNINGS, H.M.; SHAH, S.P.: *New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete*. In: *ACI Materials Journal*, 98 (2001), No. 6, S. 429-439.

- [SAAK ET AL., 2004] SAAK, A.W.; JENNINGS, H.M.; SHAH, S.P.: *A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow*. In: Cement and Concrete Research, 34 (2004), No. 3, pp. 363-371.
- [SIMHA, 1952] SIMHA, R. Journal of Applied Physics 23 (1952), pp. 1020-1024.
- [SONEBI, 2004] SONEBI, M.: *Applications of Statistical Models in Proportioning Medium-Strength Self-Compacting Concrete*. In: ACI Materials Journal, 101 (2004), No. 5, pp. 339-346.
- [SPANKA ET AL., 1995] SPANKA, G.; GRUBE, H.; THIELEN, G.: *Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel*. In: Beton, 45 (1995), H. 11, S. 802-808, H. 12, S. 876-881, ebenso in Betontechnische Berichte 1995-1997, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 1998, S. 45-60.
- [STARK ET AL., 2004] STARK, J.; GATHERMANN, B.: *Hochleistungscompound – Optimierte Bindemittel für selbstverdichtenden Beton*. In: Offizielle Kongressunterlage der 48. Ulmer Beton- und Fertigteiltage (17.-19.02.2004), Betonwerk + Fertigteil Technik, 70 (2004), H. 2, S. 14-16.
- [TAKADA ET AL., 2001] TAKADA, K.; TANGTERMSIRIKUL, S.: *Testing of Fresh Concrete*. In: SKARENDAHL, Å; PETERSSON, Ö. *Self-Compacting Concrete. State-of-the-Art-Report of RILEM Technical Committee 174-SCC*. RILEM Report 23, S.A.R.L, Cachan, 2001, pp. 20-34.
- [TANGTERMSIRIKUL ET AL., 2001] TANGTERMSIRIKUL, S.; KHAYAT, K.: *Fresh concrete properties*. In: SKARENDAHL, Å; PETERSSON, Ö. *Self-Compacting Concrete. State-of-the-Art-Report of RILEM Technical Committee 174-SCC*. RILEM Report 23, S.A.R.L, Cachan, 2001, pp. 14-19.
- [TATTERSALL ET AL., 1983] TATTERSALL, G.H.; BANFILL, P.F.G.: *The Rheology of Fresh Concrete*. Pitmann Advanced Publishing Program, Boston, London, Melbourne, 1983.
- [TATTERSALL, 1991] TATTERSALL, G.H.: *Workability and Quality Control of Concrete*. E&FN SPON, London, 1991.
- [TANNER, 2000] TANNER, R.I. *Engineering Rheology*. Oxford engineering science series 52 Oxford University Press, New York, 2nd edition, 2000.
- [UCHIKAWA, 1995] UCHIKAWA, H.: *Influence of kind and added timing of organic admixture on the composition, structure and property of fresh cement paste*. In: Cement and Concrete Research, 25 (1995), Nr.2, pp. 353-364.

- [VDZ, 2000] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V. (VDZ) (HRSG.): *Zementtaschenbuch 2000*. Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 49. Ausgabe, 2000.
- [WALLEVIK, 2003] WALLEVIK, Ó. H.: *Rheology – a scientific approach to develop self-compacting concrete* In: WALLEVIK, Ó.H.; NÍELSSON I. (Editors). *Self-compacting concrete. Proceedings of the 3rd international RILEM Symposium on self-compacting concrete (Proceedings PRO 33)*. Reykjavic, 17-20 August 2003. pp. 23-31.
- [WALLEVIK ET AL., 2003] WALLEVIK, Ó.H.; NÍELSSON, I.; WALLEVIK, J.E.: *Report on Workpackage 5 (Rheology)*. GROWTH Project GRD2-2000-30024. The Icelandic Building Research Institute (IBRI), October 2004.
- [WALRAVEN ET AL., 2004] WALRAVEN, J.C.; GRÜNEWALD, S.; EMBORG, M.; CÄRLSWALD, J.; HEDIN, C.: *Test methods for filling ability of SCC. Final report of workpackage 3, Taks 3.1: filling ability of SCC*. GROWTH Project GRD2-2000-30024, Delft University of Technology and Betongindustri, July 2004.
- [WISCHERS, 1981] WISCHERS, G.: *Ansteifen und Erstarren von Zement und Beton*. Beton 31, (1981), H. 9, S.337-340 und H. 10, S.385-389, ebenso *Betontechnische Berichte*, 21 (1980/81), Beton-Verlag, Düsseldorf, 1982, S. 145-167.
- [WÜSTHOLZ, 2003] WÜSTHOLZ, T.: *Fresh properties of self-compacting concrete*. In: *Otto Graf Journal*, 14 (2003), pp. 179-188.
- [YAMADA ET AL., 1999] YMADA, K.; YANAGISAWA, T.; HANEHARA, S.: *Influence of Temperature on the Dispersibility of Polycarboxylate Type Superplasticizer for Highly Fluid Concrete*. In: SKARENDAHL, Å; PETERSSON, Ö. (Editors). *Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Stockholm, September 13-14, 1999)*, Pro 7, S.A.R.L., Cachan, 1999, pp. 437-448.

Normen und Richtlinien

- [DIN EN 196-3] DIN EN 196-3: Prüfverfahren für Zement. Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit, 1995-05.
- [DIN 1045-2] DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 2: Beton – Herstellung, Eigenschaften und Konformität (Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1), 2001-07.
- [DIN EN 1097-3] DIN EN 1097-3: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt, 1988-06.

- [DIN 1342-1] DIN 1342-1: Viskosität. Teil 1: Rheologische Begriffe, 1999-12.
- [DAFSTB, 2003] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). Teil 1-3. Ausgabe November 2003.
- [EFNARC, 2002] EFNARC: Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Farnham, February 2002. <http://www.efnarc.org>