cemsuisse Forschungsförderung

Self Compacting Concrete (SCC): Qualität und Qualitätskontrolle

Schlussbericht, April 2006

Verfasser:

Dr. Martin F. Bäuml und Dr. Giovanni Martinola
Concretum Construction Science AG

Inhaltsverzeichnis

1 Das Wichtigste in Kürze 3

2 Projektvoraussetzungen und Ziele 4

2.1 Zielsetzung 4

2.2 Lösungsansatz 4

3 Durchgeführte Arbeiten 5

3.1 Datensammlung und Datenauswertung 5
Literatur 5
Korngrössenverteilung der Zuschlagstoffe 5
Partikelgrössenverteilung des Mehlkorns 6
Produktionspräzision bei der Betonherstellung 6

3.2 Experimentelle Untersuchungen 6
Einleitung 6
Wasserrückhaltevermögen des Mehlkorns 6
Verflüssigeranspruch der Mörtelkomponente 6
Ergänzung der Kiesfraktionen: SVB-Rezeptur 7
Sensibilitätsuntersuchungen an unterschiedlichen SVBs 7
Erprobung baustellentauglicher Frischbetonkontrollverfahren 7

3.3 Umsetzung und Anwendung der Ergebnisse 7
Formulierung einer Checkliste 7
Vorgaben für Frischbetonkontrollen 8

4 Resultate

4.1 Datensammlung und Datenauswertung 9
Korngrössenverteilung der Zuschlagstoffe 9
Partikelgrössenverteilung des Mehlkorns 10
Produktionspräzision bei der Betonherstellung 10

4.2 Experimentelle Untersuchungen 12
Einleitung 12
Wasserrückhaltevermögen der Mehlkorntypen 13
Verflüssigeranspruch der Mörtelkomponente 13
Entwicklung der SVB-Rezeptur 15
Sensibilitätsuntersuchungen 16
Erprobung baustellentauglicher Frischbetonkontrollverfahren 18

5 Diskussion der Ergebnisse und Bedeutung für die Praxis 19

5.1 Steigerung der Produktionspräzision bei der Betonherstellung 19
Ausgangsstoffe 19
Steuergrösse bei der SVB-Produktion 20

5.2 Entwicklung robuster SVB-Rezepturen 20

5.3 Einsatz praxistauglicher Frischbetonprüfverfahren 20

6 Empfehlung für die weitere Umsetzung: Checkliste 22

7 Literatur 24

1. Das Wichtigste in Kürze

Herkömmliche Betone müssen mit Vibrationsgeräten eingerüttelt werden. Dies ist erforderlich, um Hohlräume zu vermeiden und ein dichtes Betongefüge sicherzustellen. Dieses sogenannte Verdichten stellt hohe Anforderungen an eine sachgerechte Ausführung. Nur so kann eine hohe Betonqualität erreicht werden. Zunehmender Zeitdruck und Mangel an qualifizierten Arbeitskräften beeinträchtigen zunehmend die Qualität des Verdichtens.

Selbstverdichtende Betone (SVBs) unterscheiden sich von herkömmlichen Betonen durch eine sehr hohe Fliessfähigkeit. Diese Eigenschaft ermöglicht ein dichtes und hohlraumfreies Betongefüge auch ohne zusätzliches Verdichten.

Das Projekt „SCC - Qualität und Qualitätskontrolle“ hat zum Ziel, Vorgehensweisen für die Herstellung von SVB mit gleichbleibend hoher Qualität zu erarbeiten. Dies ist von besonderer Bedeutung, da sich die Rezepturen selbstverdichtender Betone (SVBs) durch ein sensibles Gleichgewicht zwischen ausreichender Fliessfähigkeit und ausreichendem Widerstand gegen Entmischung auszeichnen. Um trotz dieser im Vergleich zu Rüttelbetonen (RBs) ausgeprägteren Sensibilität SVBs mit gleich bleibender und hoher Qualität herstellen zu können, müssen bei jedem Schritt der Betonbearbeitung besondere Anforderungen gestellt und entsprechende Massnahmen getroffen werden.

Für alle Arbeitsschritte werden allgemeingültige (modellhafte) Vorgehensweisen definiert. Diese erlauben es, zu beurteilen, ob in einem konkreten Fall (gegebene Betonproduktionsanlage und gegebene Ausgangsstoffe) die Herstellung von SVB mit gleich bleibender und hoher Qualität möglich ist. Ausserdem enthalten sie Massnahmen, die zur erfolgreichen Umsetzung notwendigerweise getroffen werden müssen.

Bei den Anforderungen an die Ausgangsstoffe handelt es sich um eine Beschränkung der Variation ihrer Eigenschaften. Während der Mittelwert der Eigenschaften im Rahmen der Rezepturentwicklung berücksichtigt werden kann, muss deren Variation beschränkt werden, um das oben erwähnte Gleichgewicht dauerhaft und zuverlässig zu erreichen. Bei den Zuschlagstoffen betrifft dies insbesondere den Wasseranspruch und die Korngrössenverteilung.

Die Rezepturentwicklung muss nach einem erprobten Verfahren erfolgen. Neben der Herleitung der Mischungsverhältnisse muss hierbei eine geeignete Kombination aus Zement und Zusatzstoff ausgewählt, und deren Wasserrückhaltevermögen bestimmt werden. Ausserdem wird ein Verflüssiger benötigt, der hinsichtlich seiner Kompatibilität mit dem verwendeten Mehlkorn und seiner zeitabhängigen Verflüssigungswirkung überprüft wurde. Eine gewissenhafte Rezepturentwicklung kann die Empfindlichkeit eines SVBs gegenüber Wassergehaltsschwankungen mehr als halbieren.

Die Präzision bei der Betonherstellung muss konkreten Anforderungen genügen. Um die nicht vollständig vermeidbaren Schwankungen der Ausgangsstoffe zu kompensieren, muss der Gesamtwassergehalt des SVB während der Herstellung mit einer gegebenen Genauigkeit bekannt sein. Dies ist nur durch eine präzise Messung der Eigenfeuchte aller Zuschlagsfraktionen und der Beachtung bestimmter Verfahrensschritte erreichbar.

Aufgrund seiner grösseren Sensibilität ist die Qualitätskontrolle bei der Verwendung von SVB von besonderer Bedeutung. Sowohl im Betonwerk als auch auf der Baustelle muss der SVB hinsichtlich zweier Kriterien überprüft werden: Fliessfähigkeit und Entmischungsneigung. Zur Überprüfung beider Kenngrössen mit Hilfe nur eines Prüfverfahrens wird das Setzfliessmass (mit Blockierring) und die Messung der t500-Zeit vorgeschlagen. Grenzwerte und Korrelationen zu herkömmlichen Verfahren werden aufgezeigt.

Eine zentrales **Fazit** der vorliegenden Arbeit ist, dass bei Beachtung der kritischen Aspekte und bei der Erfüllung bestimmter Auflagen hinsichtlich der Ausgangsstoffe, der Rezeptur und des Produktionsverfahrens, die zuverlässige Herstellung von SVBs mit gleichbleibend hoher Qualität möglich ist. Die dafür notwendigen Massnahmen sind in einer Checkliste zusammengefasst, die sowohl den Einstieg in die SVB-Produktion als auch deren Optimierung unterstützt.

2. Projektvoraussetzungen und Ziele

2.1 Zielsetzung

In diesem Projekt werden die wesentlichen Kriterien für eine SVB-Rezeptur mit gleich bleibend hoher Qualität erarbeitet. Hierfür wird eine Checkliste mit einem modellhaften Vorgehen für Produktion, Transport und Einbau erarbeitet. Neben den Ausgangsstoffen, werden auch die Arbeitsabläufe und Schnittstellen berücksichtigt.

Ausserdem wird eine wirksame Frischbetonprüfung für SVB festgelegt, indem Art und Anzahl der Prüfungen definiert werden. Hierbei kommen einfache und heute schon in der Baupraxis eingeführte Prüfmethoden zum Einsatz.

Sowohl die Checklisten als auch die Frischbetonprüfungen sind allgemein anwendbar und gelten für Transport- und Ortbeton ebenso wie für Betone im Bereich der Vorfabrikation. Neben verfügbaren Daten aus der Literatur, werden ausgewählte experimentelle Untersuchungen ergänzt. Erfahrungen der Projektverfasser im Rahmen ausgeführter SVB-Applikationen werden ebenfalls mitberücksichtigt.

2.2 Lösungsansatz

Für die Entwicklung von SVB-Rezepturen existieren verschiedene Ansätze, die grundsätzlich alle zu funktionierenden SVBs führen (z.B.: [Okam95] und [Hoff04]). Ziel aller Verfahren ist es, eine ausreichende Fliessfähigkeit mit einem ausreichenden Widerstand gegen Entmischung zu kombinieren. Grundsätzlich führen all diese Verfahren zu SVB-Retepturen mit ausreichend hoher Qualität. Das Ziel einer gleich bleibend hohen Qualität, also ihre Konstanz über einen grossen Zeitraum, beziehungsweise über eine grosse Anzahl einzelner Produktionschargen, stellt zusätzliche Anforderungen, deren Erfüllung nicht zwangsläufig in diesen Verfahren zur Rezepturentwicklung enthalten sind.

Diese zusätzliche Anforderung lässt sich unter dem Stichwort der Robustheit zusammenfassen. Das Erreichen einer ausreichenden Fliessfähigkeit verlangt es, bei der Rezepturentwicklung an die Grenze des Entmischungswiderstandes zu gehen. Entsprechend führen kleine Änderungen der Betonzusammensetzung bereits zu einem Verlust des Entmischungswiderstandes. Eine Erhöhung des Entmischungswiderstandes zum Abfangen dieses Risikos ist kaum möglich, da dies mit einem Verlust der Fliessfähigkeit einhergeht. Grundsätzlich gilt, dass SVBs an der Grenze zur Entmischung formuliert werden müssen, um die geforderten Eigenschaften hinsichtlich des Fliessvermögens zu erreichen. Die grösste Herausforderung besteht nun darin, dass auch kaum, bzw. nur schwierig beeinflussbare Schwankungen, wie beispielsweise die Variation der Zuschlagsieblinien, Temperaturänderungen, maschinell bedingte Ungenauigkeiten bei der Wasserdosierung, zu einem Verlust der Entmischungsstabilität bzw. der optimalen Fliessfähigkeit führen.

Eine gleich bleibend hohe Qualität lässt sich also nur folgendermassen erreichen:

- Gesteigerte Robustheit der SVB-Rezepturen gegenüber diesen Schwankungen
- Reaktion auf diese Schwankungen mit Hilfe vorgängig definierter Regelkreise
- Reduktion dieser Schwankungen

Während das vorliegende Projekt in erster Linie den ersten Lösungsansatz verfolgt, werden Grenzen und Möglichkeiten der zweiten und dritten ebenfalls beleuchtet.

3. Durchgeführte Arbeiten

Die durchgeführten Arbeiten gliedern sich in drei Gruppen, die in Tabelle 1 zusammengefasst sind.

Datensammlung, Datenauswertung	**Experimentelle Untersuchungen**	**Umsetzung der Ergebnisse**
Literaturrecherche	Wasserrückhaltevermögen des Mehlkorns (Zement und Zusatzstoffe)	Erarbeitung einer Checkliste
Schwankungen der Korngrössenverteilung der Zuschlagstoffe zweier Quellen	Verflüssigeranspruch der Mörtelkomponente (Mehlkorn + Sand 0/4 mm)	
Partikelgrössenverteilung der Zemente und Zusatzstoffe (Mehlkorn)	Sensibilitätsuntersuchungen (Bestimmung der Robustheit) an unterschiedlichen SVBs	Verfassen des Schlussberichtes einschliesslich der Checkliste und der Anweisungen für die Frischbetonkontrollen
Frischbetonkontrolldaten versus Mischerprotokolle einer SVB-Gross-Applikation (Produktionspräzision)	Anwendung SVB-tauglicher Frischbetonkontrollverfahren im Rahmen der Sensibilitätsuntersuchungen	

Tabelle 1: Durchgeführte Arbeiten

3.1 Datensammlung und Datenauswertung

Literatur

Zahlreiche Autoren haben sich mit Verfahren zum Mischungsentwurf von SVBs beschäftigt. Eines der am weitesten verbreiteten Verfahren geht auf Okamura zurück, der als erster ein Vorgehen vorschlug, das auf beliebige Ausgangsstoffe angewendet werden kann [Okam95]. Es beruht auf der Begrenzung des Zuschlagstoffgehaltes sowie auf der Gewährleistung einer ausreichenden Viskosität und Fliessfähigkeit des Mehlkornleims. Eine jüngere Arbeit von Hoffmann geht vom Hohlraumgehalt des Zuschlagshaufwerkes aus und definiert eine minimal notwendige Menge an Mehlkornleim, die über die Füllung dieses Hohlraumes hinaus notwendig ist, um eine ausreichende Fliessfähigkeit zu erreichen [Hoff04]. Dieses Verfahren erlaubt es, die Eigenschaften unterschiedlicher Zuschlagstypen (z.B. rund und gebrochen) zu berücksichtigen und damit unnötig hohe Mehlkorngehalte zu vermeiden. Persson beispielsweise definiert darüber hinaus Kriterien für eine optimale Sieblinie aller Feststoffkomponenten [Pers01].

Eine der jüngsten und umfangreichsten Arbeit zum Thema der Eigenschaften selbstverdichtender Betone stammt von Schießl und Lohaus [Schi04]. Die Autoren untersuchen den Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die Fliessfähigkeit und die Entmischungsstabilität von SVB. Diese Parameter sind der Wassergehalt, die Zugabe von stabilisierenden Zusatzmitteln, die Eigenfeuchte des Sandes, die Sandsieblinie, die Frischbetontemperatur und die Partikelgrössenverteilung der Mehlkornkomponenten. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse fliessen in die vorliegende Arbeit ein.

Um die sich von Rüttelbetonen deutlich unterscheidenden Frischbetoneigenschaften im Rahmen der Qualitätskontrolle zu überprüfen, sind zahlreiche Frischbetonkontrollverfahren entwickelt worden. Mit diesen Verfahren werden die rheologischen Eigenschaften (Fliessfähigkeit und Viskosität), die Blockierneigung an Fliesshindernissen (Bewehrungsstäben) und die Entmischungsstabilität untersucht. Neben vielen anderen Autoren fassen Grübl [Grüb00] und Hoffmann [Hoff04] die verschiedenen Verfahren zusammen. Die SVB-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [DAfS01] enthält ausserdem einen weiteren Vorschlag für einen Test zur Überprüfung des Entmischungsverhaltens.

Kongrössenverteilung der Zuschlagstoffe

Einen wesentlichen Beitrag zur unvermeidbaren Schwankung der Zusammensetzung selbstverdichtender Betone leistet die Variation der Korngrössenverteilung des Zuschlags. Die Bedeutung dieser Variation steigt mit zunehmender Feinheit des Zuschlags und betrifft demzufolge in erster Linie die Sandkomponente. Um die Relevanz und das Ausmass dieser Variation abzuschätzen, wurde die Schwankung der Siebelinie von Zuschlagstoffen aus zwei unterschiedlichen Abbaugebieten über zwei Jahre bestimmt. Die massgebende Folge einer Variation der Korngrössenverteilung ist die Änderung des Wasseranspruchs. Im Gegensatz dazu ist der Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften vernachlässigbar.

Da bei der Herstellung gebrochener Zuschläge das Erreichen einer bestimmten Korngrössenverteilung besser kontrolliert werden kann als bei der Verarbeitung gerundeter Zuschlagsfraktionen, wurde im Sinne einer oberen Grenze nur der zweitgenannte Fall betrachtet.

Partikelgrössenverteilung des Mehlkorns

Ein häufig genanntes Element der unbeeinflussbaren Schwankungen der Ausgangsstoffe ist der Wasseranspruch des Zementes. Der Wasseranspruch des Zementes wird in erster Linie von dessen Mahlfeinheit beeinflusst. Diese wiederum wird nicht nach dem Wasseranspruch ausgerichtet, sondern nach der vorgegebenen Festigkeitsentwicklung. Die entsprechenden Schwankungen werden quantifiziert und deren Einfluss bewertet.

Hinsichtlich des Wasseranspruchs der weiteren Mehlkornkomponenten (z.B. Steinmehle, Flugaschen, etc.) wird eine begründete, konservative Annahme hinsichtlich der Wasseranspruchsschwankungen getroffen.

Produktionspräzision bei der Betonherstellung

Neben den Schwankungen der Ausgangsstoffe ist die Dosiergenauigkeit bei der Herstellung im Betonwerk ein weiterer wichtiger Faktor, der die Qualität eines SVB und deren Konstanz beeinflusst. Hierbei sind vier unterschiedliche Dosiersysteme zu unterscheiden:

- Freifalldosierung der Zuschlagstoffe über Bandwaagen
- Förderschneckendosierung der Mehlkornkomponenten über Waage
- Volumetrisch oder gravimetrisch kontrollierte Zugabewasserdosierung
- gravimetrisch kontrollierte Zusatzmitteldosierung

Die zu erwartenden Ungenauigkeiten dieser Systeme werden diskutiert und deren Einfluss auf die Qualität von SVBs bewertet.

Neben der Dosiergenauigkeit sind es vor allem der Regelkreis und die Steuergrösse, welche bei der Betonproduktion verwendet werden, um die Vorgaben (Rezeptur, Frischbetoneigenschaften, etc.) zu erfüllen. Anhand von Produktions- und Frischbetonprüfprotokollen wird untersucht, inwieweit das herkömmliche Konsistenzverfahren die Anforderungen der SVB-Herstellung erfüllt.

3.2 Experimentelle Untersuchungen

Einleitung

Drei Ziele wurden mit der Durchführung der experimentellen Untersuchungen verfolgt:

- Systematische Entwicklung dreier SVB-Rezepturen, die sich im Wesentlichen durch die verwendeten Zemente und Zusatzstoffe unterscheiden
- Untersuchung der Sensibilität dieser unterschiedlichen SVBs hinsichtlich üblicher Produktionsschwankungen
- Ermittlung der Korrelation zwischen herkömmlichen und SVB-spezifischen Frischbetonkontrollverfahren zur Qualitätssicherung

Wasserrückhaltevermögen des Mehlkorns

Bei der systematischen Rezepturentwicklung nach Okamura [Okam95] wird in einem ersten Schritt das Wasser-Mehlkornvolumenverhältnis bestimmt, bei dem das gesamte Wasser durch das Mehlkorn gebunden ist. Die genaue Kenntnis dieses sogenannten β_p-Wertes der verwendeten Kombination aus Zement und Zusatzstoff dient dem Ziel, eine Wasserüber- bzw. -unterdosierung zu vermeiden. Hierbei wird das Ausbreitfliessmass für unterschiedliche Wasser-Mehlkornvolumenverhältnisse bestimmt. Hierzu wird ein Hägermanntrichter nach EN 1015-3 verwendet. Durch Regression wird schliesslich diejenige Wassermenge ermittelt, bei der gerade keine Fliessbewegung mehr, stattfindet. Dies erlaubt die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens. Das entsprechende Volumenverhältnis ist der gesuchte β_P-Wert.

Verflüssigeranspruch der Mörtelkomponente

Das Gleichgewicht zwischen Fliessfähigkeit einerseits und Viskosität andererseits ist entscheidend dafür, dass ein SVB nicht entmischt. Das hierfür relevante Verhältnis zwischen Wasser- und Verflüssigermenge wird an der Mörtelkomponente des Betons bestimmt, welche aus Zement, Zusatzstoff, Sand (0/4 mm), Wasser und Verflüssiger besteht. Hierbei wird neben dem Ausbreitfliessmass die Trichterauslaufzeit des Mörtels gemessen, die eine Aussage über die Viskosität zulässt. Das Verfahren ist beispielsweise in [Grüb00] beschrieben. Liegen beide Kenngrössen in einer vorgegebenen Bandbreite, ist die gewählte Materialkombination zur Herstellung eines SVBs geeignet.

Ausserdem wird durch die Messung der zeitlichen Veränderung des Ausbreitfliessmasses untersucht, ob die Fliessfähigkeit über den notwendigen Zeitraum von zwei Stunden bestehen bleibt, die für die Anwendung eines SVBs unter realen Bedingungen erforderlich ist.
Ein mögliches Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass sich eine gewählte Kombination zwischen Mehlkorn und Verflüssiger nicht zur Herstellung eines SVBs eignet.

Ergänzung der Kiesfraktionen: SVB-Rezeptur

Die tauglichen Mörtel werden schliesslich mit zwei Kiesfraktionen (4/8 und 8/16 mm) ergänzt. In der Regel sind hierbei nur noch geringfügige Anpassungen der Wasser- und Verflüssigerdosierungen notwendig, um die Anforderungen des Betons hinsichtlich Setzfliessmass (EN 12350-2) und Trichterauslaufzeit (siehe z.B. [Grüb00] und [EFCA05] zu erfüllen.

Ergebnis dieses letzten Schrittes sind 3 SVB-Rezepturen, die bei präziser Einhaltung der Mengenverhältnisse, das notwendige Gleichgewicht zwischen Fliessfähigkeit und Entmischungsstabilität aufweisen.

Sensibilitätsuntersuchungen an unterschiedlichen SVBs

Die sich in erster Linie durch die Eigenschaften des Mehlkorns unterscheidenden Betone wurden auf ihre Sensibilität gegenüber Wassergehaltsschwankungen untersucht. Hierfür wurde der Einfluss gezielter Wasserüber- und -unterdosierungen auf das Setzfliessmass und die Trichterauslaufzeit bestimmt. Ergebnis dieser Untersuchungen ist ein Mass für die Robustheit der untersuchten SVBs. Dabei handelt es sich um diejenige Wassergehaltsschwankung, bei der die geforderte Bandbreite der beiden Kenngrössen gerade noch eingehalten wird.

Einer der so untersuchten SVBs wurde ausserdem zusätzlich modifiziert, um die Wirkung weiterer Rezeptureigenschaften auf die Robustheit zu untersuchen: (1) erhöhter Sandanteil, (2) Einsatz eines viskositätssteigernden Zusatzmittels (Stabilisierer).

Erprobung baustellentauglicher Frischbetonkontrollverfahren

Bereits bei den Sensibilitätsuntersuchungen (siehe oben) wurden Frischbetonkontrollverfahren angewendet, die die Besonderheiten von SVB berücksichtigen: Setzfliessmass und Trichterauslaufzeit. Um die Baustellentauglichkeit von Frischbetonkontrollen sicherzustellen, die im Rahmen der praktischen Anwendung von SVB eingesetzt werden, wurde ein Versuchsablauf festgelegt, der mit nur einer Frischbetonkontrollvorrichtung auskommt. Es handelt sich dabei um die Bestimmung des Setzfliessmasses mit Blockierring als Fliesshindernis einschliesslich der Messung der sogenannten t500-Zeit, die vom SVB benötigt wird, um ein Setzfliessmass von 500 mm zu erreichen. Das Verfahren ist in [DAfS01] und [EFCA05] beschrieben. Dieses Vorgehen erlaubt es, mit nur einer Messung, sowohl die Fliessfähigkeit, als auch die Viskosität zu überprüfen.

Indem bei den Sensibilitätsmessungen (siehe oben) sowohl Setzfliessmass und Trichterauslaufzeit, als auch das Setzfliessmass mit Blockierring und die t500-Zeit bestimmt wurden, kann eine entsprechende Korrelation zwischen den Prüfergebnissen ermittelt werden. Damit können die entsprechenden Grenzwerte in Anlehnung an die Im Labor üblichen Messverfahren für das Vorgehen auf der Baustelle festgelegt werden.
Auf diese Weise ist es gelungen, ausschliesslich einfache und heute schon in der Baupraxis eingeführte Prüfmethoden bei der Akzeptanzkontrolle von SVB auf der Baustelle einzusetzen. Der Einsatz des Blockierrings lässt sich mit geringfügigem Aufwand umsetzten. Der zeitliche Mehraufwand für die Durchführung der Messung ist hierbei vernachlässigbar. Alle Prüfungen können von einer Person durchgeführt werden.

3.3 Umsetzung und Anwendung der Ergebnisse

Formulierung einer Checkliste

Auf der Basis der im Rahmen der Datensammlung und der experimentellen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse wurde eine Checkliste entwickelt, die ein modellhaftes Vorgehen für die erfolgreiche Anwendung von SVB vorgeben. Diese Checkliste ist in die folgenden Hauptgruppen gegliedert:

- Schnittstelle Materiallieferanten
- Entwicklung SVB-Rezeptur
- Produktion SVB
- Schnittstelle Transport
- Schnittstelle Einbau

Aufgabe dieser Checkliste ist es nicht, konkrete Vorgaben, beispielsweise in Form von Rezepturvorschlägen zu machen, sondern alle relevanten Prozesse zu erfassen, Kontrollen zu definieren und Massnahmen festzulegen. Entsprechend ist die Erfüllung der in der Checkliste definierten Punkte nicht eine einmalige Vorbereitung der SVB-Produktion; vielmehr müssen diese Punkte ständig überwacht werden. Es handelt sich um ein Arbeitsinstrument, das aufgrund seines modellhaften Charakters auch die Änderung wichtiger Randbedingungen, wie beispielsweise der Ausgangsstoffe, mitberücksichtigt.

Die Checklisten beinhalten klare Aussagen darüber, in welchen Fällen es aufgrund der gegebenen Randbedingungen (Produktionsanlagen, Ausgangsstoffe, etc.) nicht möglich ist, SVBs mit gleichbleibend hoher Qualität herzustellen.

Vorgaben für Frischbetonkontrollen

Neben einem Vorschlag für die zur Frischbetonkontrolle von SVB verwendeten Prüfverfahren werden ausserdem die Zielgrössen und Toleranzen festgelegt. Die vorgeschlagenen Prüfungen dienen sowohl der Abgangskontrolle im Betonwerk (Eigenüberwachung der Produktion), als auch der Akzeptanzkontrolle auf der Baustelle.

4. Resultate

4.1 Datensammlung und Datenauswertung

Korngrössenverteilung der Zuschlagstoffe

Es gibt zwei Ursachen für die Schwankung der Korngrössenverteilung nicht gebrochener Zuschläge. Einerseits handelt es sich um ein Naturprodukt, andererseits wird der Zuschlag nach dem Abbau fraktioniert und bei der Betonproduktion wieder kombiniert. Gerade der Einfluss des zweiten Aspektes wird deutlich, wenn man die Variationen der Einzelfraktionen mit den Variationen des Gesamtzuschlags vergleicht, der aus diesen Einzelfraktionen kombiniert wird.

In Abbildung 1 ist die Standardabweichung des Gehaltes der einzelnen Korngruppen bezogen auf einen Kubikmeter SVB angegeben, die sich aufgrund der laufenden Qualitätsüberwachung während zwei Jahren bei der Verwendung von Moräne-Zuschlag aus dem Zürcher Unterland ergibt. Es wird ein Gesamtzuschlagsgehalt des Betons von 1'700 kg/m^3 und ein Sandanteil (Korngruppe 0/4 mm) von 50% zu Grunde gelegt. Mit Hilfe der Wasseranspruchszahlen der einzelnen Korngruppen [Koch71] ergibt sich daraus die ebenfalls angegebene Änderung des Wasseranspruchs des SVBs. Abbildung 2 zeigt dasselbe Ergebnis für Seekies aus dem Vierwaldstättersee.

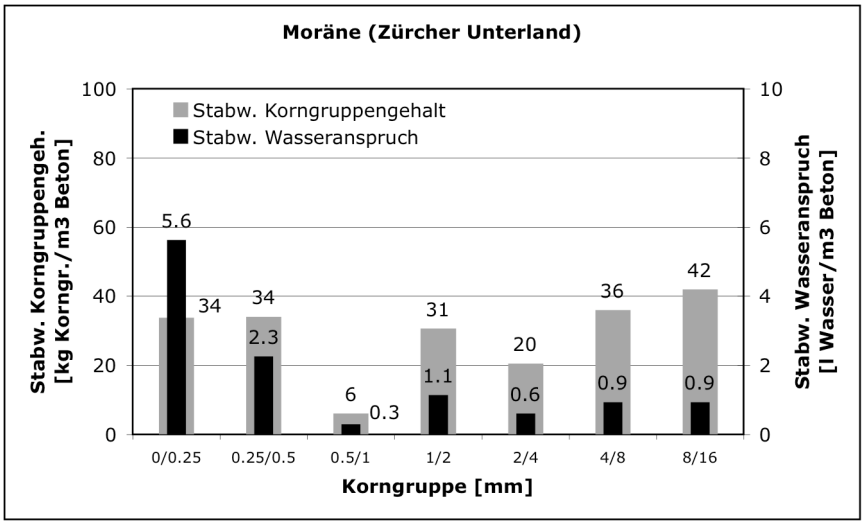

Abbildung 1: Standardabweichung der Korngruppengehalte und des Wasseranspruchs des Gesamtzuschlags (Moräne)

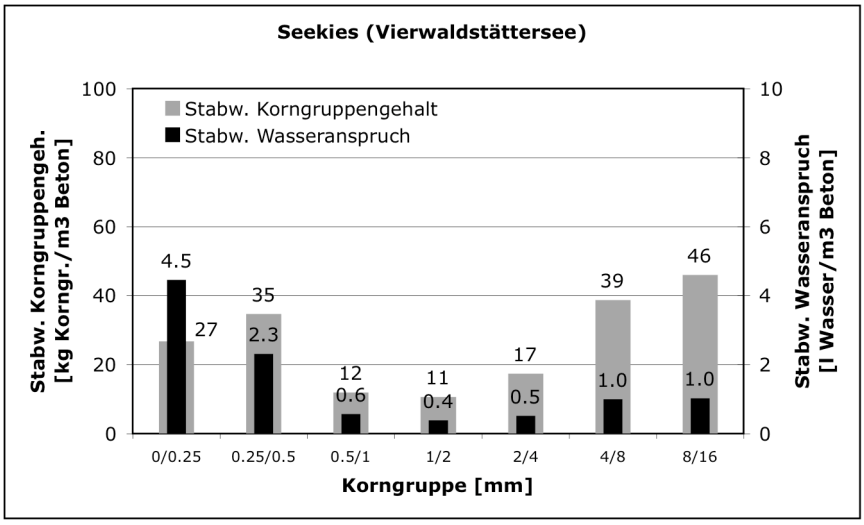

Abbildung 2: Standardabweichung der Korngruppengehalte und des Wasseranspruchs des Gesamtzuschlags (Seekies)

Die in den Diagrammen getrennt aufgeführten Korngruppen schwanken innerhalb der Zuschlagsfraktionen (0/4, 4/8 und 8/16) nicht unabhängig voneinander. Vor diesem Hintergrund ergibt sich eine Standardabweichung des Wasseranspruchs infolge Sieblinienschwankungen für Moräne und Seekies von ±10 l/m^3 (±8 l/m^3 für die Korngruppe 0/4 mm, ±2 l/m^3 für die Korngruppe 4/16 mm).

Die Standardabweichung des Gehaltes der für das Fliessverhalten relevanten Korngruppe 0/0.5 mm beträgt für die Moräne ±68, und für den Seekies ±61 kg/m^3.

Die Eigenfeuchte der Zuschlagstoffe wird im Kapitel „Produktionspräzision bei der Betonherstellung" diskutiert.

Partikelgrössenverteilung des Mehlkorns

Abbildung 3 zeigt die für den Wasseranspruch und das Wasserrückhaltevermögen von Zement relevante spezifische Oberfläche. Das Wasserrückhaltevermögen des Zementes, welches bei der Entwicklung von SVB-Rezepturen als Grundlage zur Bestimmung des Wassergehaltes bestimmt wird, nimmt mit zunehmender spezifischer Oberfläche des Zementes zu. Die produktionsbedingte Standardabweichung dieser Kenngrösse beträgt ca. 100 g/m^2 (ermittelt aus 50 Einzelmessungen an unterschiedlichen Produktionschargen).

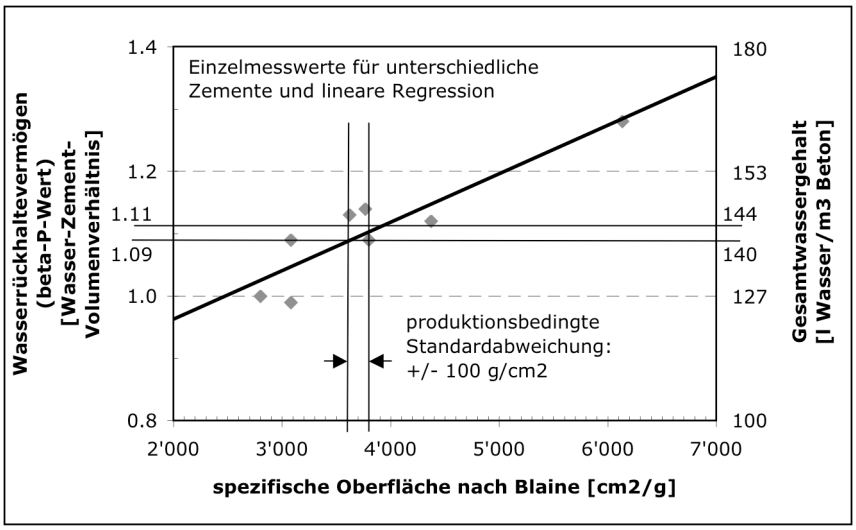

Abbildung 3: Schwankungen des notwendigen Gesamtwassergehaltes eines SVB zur Aufrechterhaltung derselben Konsistenz infolge Produktionsschwankungen bei der Zementherstellung

Die dadurch bedingte Schwankung des Gesamtwassergehaltes eines SVBs bei identischer Konsistenz beträgt maximal ± 2 l/m^3 (Annahme: Zementgehalt: 400 kg/m^3).

Für Steinmehle, die industriell zerkleinert (gemahlen) werden, ist die Schwankung des Wasseranspruchs sogar geringer, da die Mahlfeinheit selbst die Zielgrösse ist und nicht durch das Anstreben anderer Eigenschaften, wie beispielsweise der Festigkeitsentwicklung, beeinflusst wird.

Im Falle von Flugaschen ist der Wasseranspruch in erster Linie von der Art des Brennprozesses abhängig, aus dem das Produkt gewonnen wird. Dieser beeinflusst sowohl die Oberflächeneigenschaften als auch die Partikelgrössenverteilung. Relevante Schwankungen werden also primär durch Änderungen im Brennprozess hervorgerufen. Die Kontrolle bzw. Reaktion auf solche Änderungen muss durch ein Qualitätssicherungskonzept mit dem Lieferanten bzw. Hersteller gewährleistet werden. Bleibt der Brennprozess unverändert, gilt für die Schwankung des Wasseranspruchs der Flugasche der gleiche Grundsatz wie für Steinmehle.

Geht man davon aus, dass der Zusatzstoffanteil maximal 50% des Zementgehaltes beträgt und dessen Beitrag zur Schwankung des Wasseranspruchs des Mehlkorns kleiner ist als der des Zementes, kann folgendes Ergebnis festgehalten werden: Die Standardabweichung des Wasseranspruchs eines SVB infolge produktionsbedingter Schwankungen der Mehlkorneigenschaften beträgt maximal ± 3 l/m^3.

Produktionspräzision bei der Betonherstellung

Die Zuschlagstoffe werden aus Silos auf eine Bandwaage eingewogen. Je nach Füllungsgrad des Silos und Eigenfeuchte des Materials kann es vor allem bei der Sandkomponente (0/4 mm) dazu kommen, dass die Siloöffnung nicht rasch genug schliesst und zuviel Sand abgefüllt wird, oder aber, dass nicht ausreichend Sand nachrutscht und demzufolge zu wenig Sand dosiert wird. Durch diese Freifalldosierung kann es zu Dosierungsschwankungen der Korngruppe 0/4 mm von ± 50 kg/m^3 kommen. Dies hat eine Schwankung des Wasseranspruchs des Betons von ± 4 l/m^3 zur Folge. Die dadurch verursachte Schwankung des Gehaltes der für das Fliessverhalten relevanten Korngruppe 0/0.5 mm ist ± 25 kg/m^3.

Die Analyse von Produktionsprotokollen zeigt, dass die anderen Fraktionen (Korngruppen 4/8 mm und grösser) aufgrund des geringeren Verstopfungsrisikos von diesem Phänomen nicht betroffen sind. Ausserdem wären die Auswirkungen weniger relevant.

Die Einwaage des Zementes und des Zusatzstoffes ist anlagenbedingt so präzise, dass keine relevanten Auswirkungen auf den Gesamtwasseranspruch resultieren.

Die Wasserdosierung setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Von entscheidender Bedeutung ist hierbei dasjenige Wasser, das durch die Eigenfeuchte der Zuschläge beigesteuert wird. Abbildung 4 zeigt die übliche Bandbreite der Eigenfeuchten der für SVBs verwendeten Zuschlagsfraktionen.

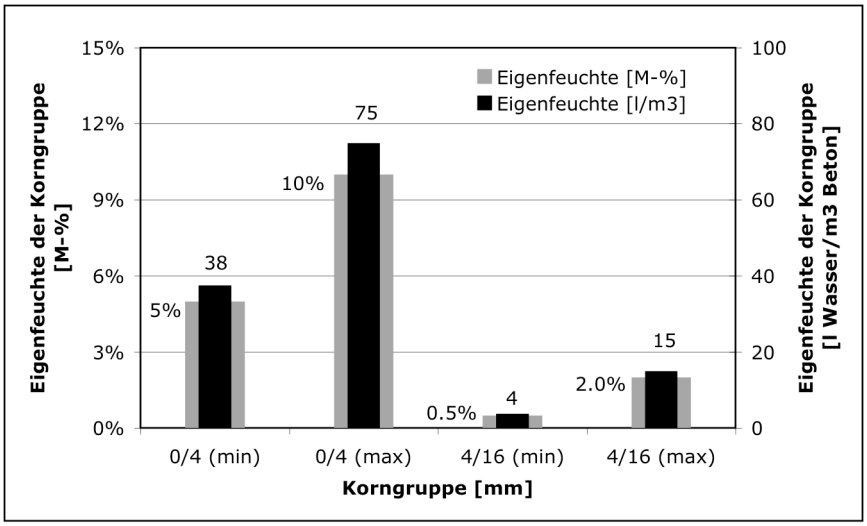

Abbildung 4: Eigenfeuchten der Zuschlagstoffe und deren Beitrag zum Wassergehalt im Beton

Wird der tatsächliche Gehalt der Eigenfeuchte nicht bestimmt, sondern eine feste Annahme innerhalb der in Abbildung 4 dargestellten Grenzen getroffen, resultiert daraus eine Schwankung des Wassergehaltes des SVBs von ± 24 l/m^3 (± 18.5 l/m^3 aus der Korngruppe 0/4, ± 5.5 l/m^3 aus der Korngruppe 4/16).

Das Zugabewasser kann vergleichsweise präzise über volumetrische oder gravimetrische Verfahren dosiert werden. Dies trifft auch auf die Zusatzmitteldosierung zu. Der Wasseranteil der flüssigen Zusatzmittel kann somit präzise erfasst werden. Zu achten ist jedoch auf die Spülung der Zusatzmittelwaage nach der Verwägung. Bei den gängigen Anlagen, wird dieses Spülwasser (ca. 5 l) in den Betonmischer entleert. Damit wird zwar sichergestellt, dass die gesamte Zusatzmittelmenge dosiert wird, häufig wird das verwendete Wasser aber nicht als Zugabewasser erfasst. Daraus resultiert eine weitere Unsicherheit hinsichtlich des Wassergehaltes des SVB von ± 2.5 l/m^3.

Obwohl die präzise Erfassung der Gesamtwassermenge wichtig ist, ist die Steuergrösse bei der Betonproduktion nicht die Menge der Einzelkomponenten sondern die Konsistenz des Betons. Zusätzlich zur Rezeptur (Stoffgehalte pro m^3) wird eine „Maschinenkonsistenz“ vorgegeben. Während der Betonproduktion wird die Leistungsaufnahme des Betonmischers erfasst und daraus ein Konsistenzwert (ohne Einheit) bestimmt. Die Steuergrösse zur Erreichung dieses Konsistenzwertes ist die Zugabewassermenge. Es wird schrittweise soviel Wasser zugegeben, bis die entsprechende „Konsistenz“ erreicht ist. Dies erlaubt es, andere Abweichungen zu kompensieren. Bei Rüttelbetonen ist dieses Vorgehen äusserst effizient und erlaubt konstante Frischbetoneigenschaften auch über eine grosse Anzahl Produktionschargen.

Bei SVBs, deren Rezepturen grundsätzlich an der Grenze zur Entmischung formuliert sind, ist eine präzise Einhaltung der vorgegebenen Mengenverhältnisse wichtig. Abweichungen, die bei RBs keinen signifikanten Einfluss auf die Frischbetoneigenschaften haben, können bei SVBs bereits die Grenze zur Entmischung oder zu mangelnder Fliessfähigkeit überschreiten. Die Kompensation von Abweichungen der Komponenten (z. B. Sieblinie) oder von Dosierungenauigkeiten lediglich durch die Anpassung der Zugabewassermenge kann demzufolge zu einer mangelnden Frischbetonqualität des SVB führen.

Dieser Effekt wird durch Messreihen in Transportbetonwerken bestätigt, die zeigen, dass die Konsistenzmessung im Betonmischer und die Konsistenzmessung im Rahmen der Frischbetonkontrollen im Falle von SVB nicht korrelieren (siehe Abbildung 5: Untersuchung von 85 aufeinanderfolgende Produktionschargen).

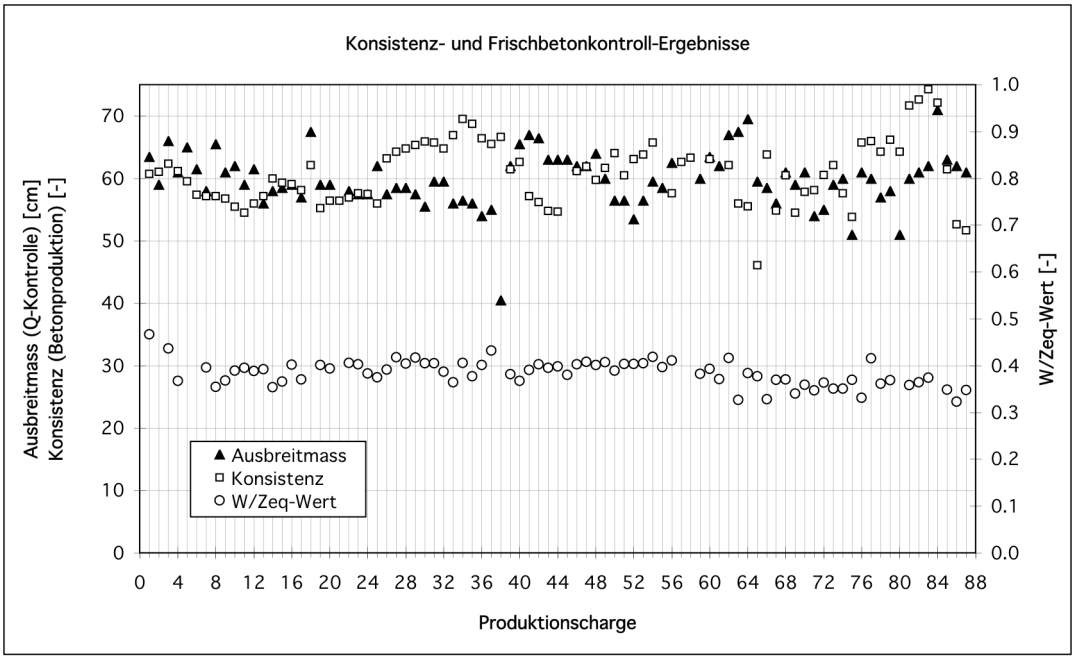

Abbildung 5: Vergleich der Konsistenzmessungen bei der Betonproduktion mit Ergebnissen aus Frischbetonkontrollprüfungen

4.2 Experimentelle Untersuchungen

Einleitung

Es wurden drei unterschiedliche SVB-Grundrezepturen entwickelt, die sich durch die Bandbreite der Mehlkornpartikelgrössenverteilung unterschieden. Aus der Literatur [Schi04] ist bekannt, dass diese Eigenschaft die Robustheit eines Betons gegenüber Wassergehaltsschwankungen wesentlich beeinflusst. Die drei gewählten Mehlkorntypen sind im Folgenden kurz beschrieben. Die Partikelgrössenverteilungen sind in Abbildung 6 dargestellt.:

- MK1: Dieser Mehlkorntyp entspricht einem in der Fertigteilproduktion häufig zur Anwendung kommenden Typ. Er besteht ausschliesslich aus einem CEM I 52.5 R, der eine vergleichsweise enge Partikelgrössenverteilung aufweist. Die Rohdichte von MK1 beträgt 3.2 kg/dm^3.
- MK2: Dieser Mehlkorntyp entspricht dem in der Schweiz am häufigsten verwendeten Typ. Er besteht aus 75 M-% CEM II A/LL 42.5 N und aus 25 M-% Steinkohlenflugasche. Die Partikelgrössenverteilung ist vergleichsweise breit. Die Rohdichte von MK2 beträgt 2.9 kg/dm^3.
- MK3: Dieser Mehlkorntyp wurde nur zu Vergleichszwecken gewählt. Er weist eine noch breitere Partikelgrössenverteilung auf als MK2. MK3 besteht aus 75 M-% CEM II A/LL 42.5 N, aus 20 M-% Quarzmehl (Grösstkorn: 125 µm) und aus 5 M-% Mikrosilika (Grösstkorn: 10 µm). Die Rohdichte von MK3 beträgt 3.0 kg/dm^3.

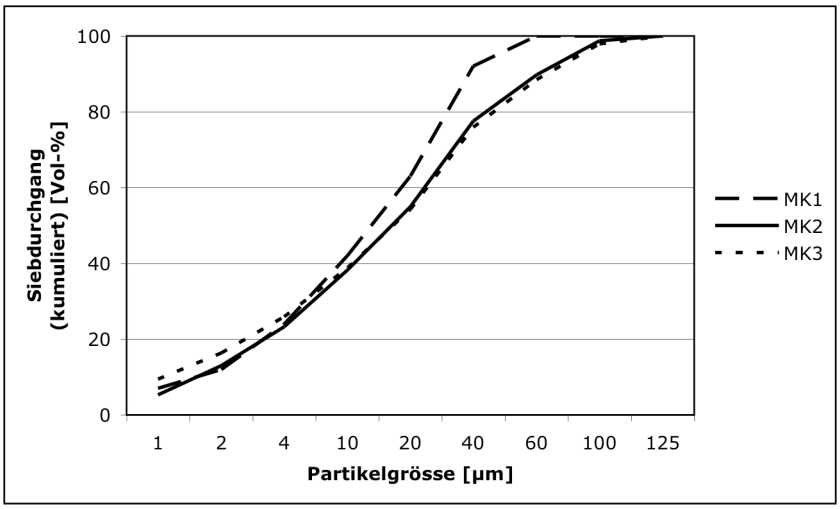

Abbildung 6: Partikelgrössenverteilung der verwendeten Mehlkorntypen

Aus Abbildung 6 wird ersichtlich, dass sich die Partikelgrössenverteilung von MK1 in einem grossen Bereich (4 bis 125 µm) von MK2 unterscheidet. MK3 hingegen weicht lediglich im Bereich unterhalb einer Partikelgrösse von 10 µm von MK2 ab.

Wasserrückhaltevermögen der Mehlkorntypen

In einem ersten Schritt wurde der sogenannte β_P-Wert bestimmt. Dieser gibt das Wasser-Mehlkornvolumenverhältnis an, bei dem der Mehlkornleim (Mehlkorn und Wasser) keine Fliessbewegung mehr zeigt. Da dies nicht direkt, sondern nur über eine Regression von Messwerten möglich ist, wird zuerst für unterschiedliche Wasser-Mehlkornvolumenverhältnisse das relative Ausbreitfliessmass bestimmt.

Abbildung 7 zeigt diese Messergebnisse. Hierbei wird das relative Ausbreitfliessmass Γ_P verwendet, das aus dem Ausbreitfliessmass r und dem grösseren Durchmesser des Hägermanntrichters r_0 (= 100 mm) folgendermassen berechnet wird: $\Gamma_P = (r/ r_0)^2 - 1$. Es ist deutlich zu erkennen, dass MK1 und MK3 für ein identisches Ausbreitfliessmass mehr Wasser benötigen als MK2. Ausserdem ist bereits die unterschiedliche Sensibilität gegenüber Änderungen des Wassergehaltes erkennbar. Je geringer die Steigung der Tangente im Wendepunkt der sich aus den Messwerten ergebenden Kurve ist, desto sensibler reagiert die Fliessfähigkit des Mehlkorns. Während diese Steigung für MK2 und MK3 ähnlich ist, fällt sie für MK1 flacher aus. Wie bereits die enge Partikelgrössenverteilung von MK1 erwarten lässt, ist dessen Sensibilität verglichen mit MK2 und MK3 also höher.

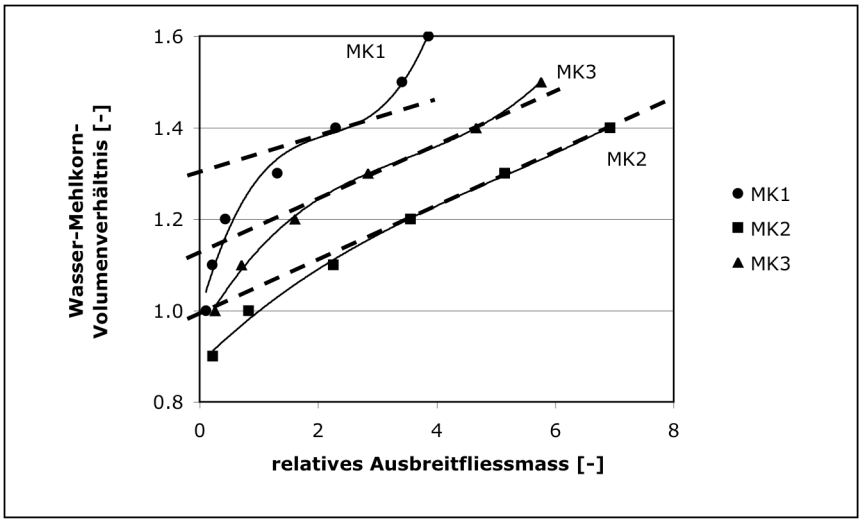

Abbildung 7: Relatives Ausbreitfliessmass als Funktion des Wasseranteils

Die β_P-Werte der drei Mehlkorntypen, also deren Wasserrückhaltevermögen, ergeben sich aus einer linearen Regression der ersten vier Werte des relativen Ausbreitfliessmasses, die grösser sind als 1.25 [Schi04]. Tabelle 2 fasst die Werte zusammen.

	MK1	MK2	MK3
β_P-Wert (Wasserrückhaltevermögen)	1.16 ± 0.01	0.96 ± 0.01	1.09 ± 0.01

Tabelle 2: β_P-Werte der untersuchten Mehlkorntypen

Verflüssigeranspruch der Mörtelkomponente

In einem zweiten Schritt wird für jeden Mehlkorntyp die notwendige Verflüssigerdosierung bestimmt. Hierbei wird mit der Mörtelkomponente gearbeitet, die aus Mehlkorn (Zement und Zusatzstoff), Sand (Korngruppe 0/4 mm) und Wasser besteht. Auf diese Weise wird der vergleichsweise hohe Wasseranspruch des Sandes mit berücksichtigt. Das Verhältnis zwischen dem Mehlkornleim-Volumen (Zement, Zusatzstoff, Wasser) und dem Sandvolumen wird dabei auf 55:45 festgelegt. Der Volumenanteil des Sandes im Mörtel ist also 45%.

Bei den Zuschlägen handelt es sich um Moräne aus dem Zürcher Unterland. Alle verwendeten Verflüssiger basieren auf Polycarboxylaten.

Die Verflüssigermenge wird so gewählt, dass folgende Zielgrössen erreicht werden:

- Ausbreitfliessmass: ≥ 245 mm (entmischungsfrei)
- Trichterauslaufzeit: 10 ± 1 s

Hierfür werden Mörtel hergestellt, deren Wasseranteil bezogen auf das Mehlkorn 80 bis 90% des vorgängig bestimmten β_P-Wertes ist. Hierduch wird die Wirkung des Verflüssigers und des Sandes berücksichtigt. Die Steuergrösse beim Erreichen der oben erwähnten Anforderungen ist das Verhältnis zwischen Wasser und Verflüssiger. Dieses wird so lange variiert bis die Zielgrössen erreicht sind. Eine Erhöhung des Verflüssigergehaltes bei gleichzeitiger Reduktion des Wasseranteils führt hierbei zu einer Zunahme der Trichterauslaufzeit und umgekehrt. Tabelle 3 zeigt die Mörtelzusammensetzungen.

Mörtel	**M1**	**M2**	**M3**
Mehlkorntyp	MK1	MK2	MK3
Sand 0/4 mm	51.21	51.82	52.07
CEM I 52.5 R	36.41		
CEM II A/LL 42.5 N		27.78	27.31
Flugasche		9.26	
Quarzmehl			7.19
Mikrosilika			1.44
Wasser	11.80	10.69	11.60
Verflüssiger	0.58	0.44	0.40
Anpassung β_P-Wert [%]	87	85	89
Wasser/MK [%]	32.4	28.9	32.3
Verflüssiger/MK [%]	1.6	1.2	1.1
W/Z_{eq}-Wert [-]	0.32	0.34	0.40
Ausbreitfliessmass [mm]	252	308	278
Trichterauslaufzeit [s]	9.2	11.2	9.5

Tabelle 3: Zusammensetzungen (in Massenanteilen von 100) und ausgewählte rheologische Eigenschaften der Mörtel

Bei diesen Versuchen kann sich herausstellen, dass eine gewählte Kombination aus Zement, Zusatzstoff, Verflüssiger und Sand nicht zur Herstellung von SVB geeignet ist. In diesem Fall muss ein Austausch von Komponenten durchgeführt werden. Am Beispiel der Mörtelzusammensetzung M2 wurden drei weitere Verflüssiger getestet, die auf derselben Wirkstoffbasis (Polycarboxylat) aufbauen, jedoch von unterschiedlichen Anbietern sind. Abbildung 8 zeigt die mit den unterschiedlichen Verflüssigern bestenfalls erreichbaren Konsistenzparameter.

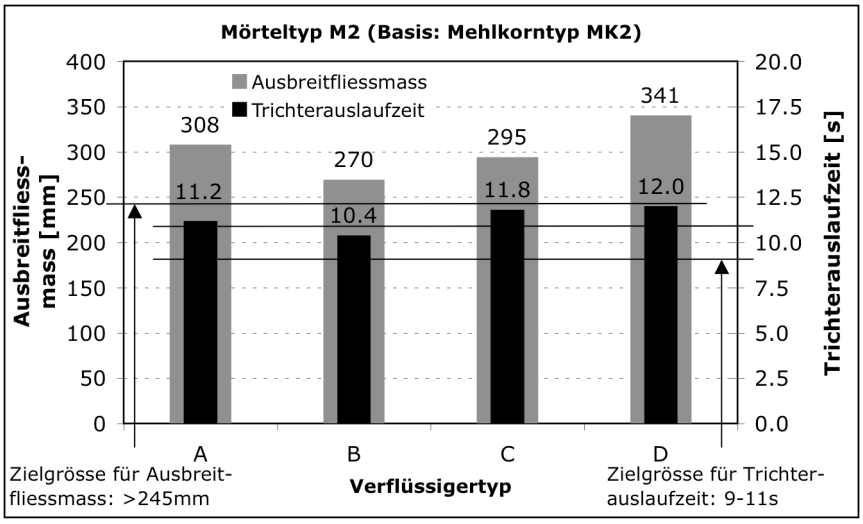

Abbildung 8: Bestenfalls erreichbare Konsistenzwerte mit Verflüssigern unterschiedlicher Anbieter

In diesem Fall wurde der Verflüssigertyp A gewählt, da dieser in Kombination mit den Mörteltypen M1 und M3 ebenfalls das Erreichen der Zielvorgaben ermöglichte. Ausserdem wurde die zeitliche Entwicklung des

Ausbreitfliessmasses der vier unterschiedlichen Verflüssiger während zwei Stunden nach der Mörtelherstellung überprüft. Abbildung 9 zeigt, dass diese bei ansonsten identischen Komponenten ebenfalls vom Verflüssigertyp abhängt. Der Mörtel wurde vor jeder Messung erneut aufgemischt. Die Mischzeiten sind für alle Mischungen identisch.

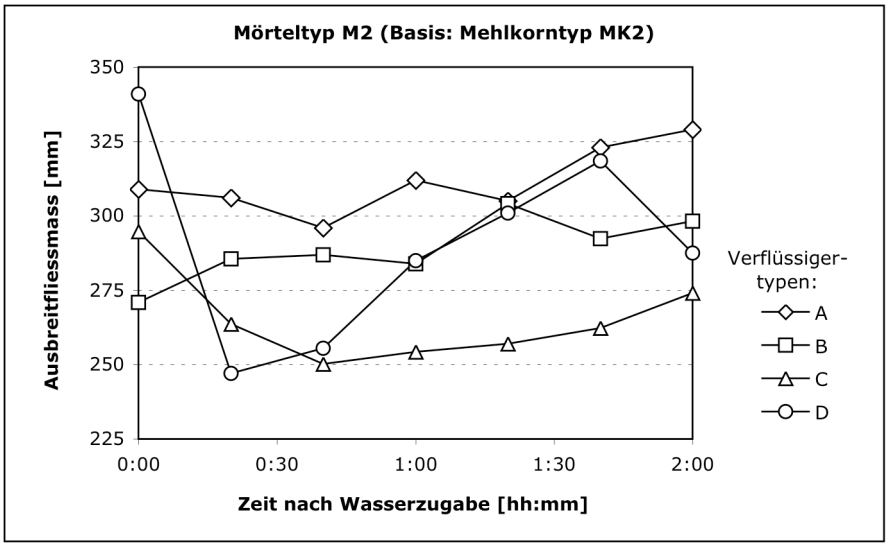

Abbildung 9: Zeitliche Entwicklung des Ausbreitfliessmasses für Verflüssiger unterschiedlicher Anbieter

Entwicklung der SVB-Rezepturen

In einem letzten Schritt wurden auf der Basis der drei Mehlkorn- bzw. Mörteltypen drei SVB-Rezepturen entwickelt. Alle drei Rezepturen weisen ein Mehlkornvolumen von 166 l/m^3 auf. Der Volumenanteil des Sandes am Mörtelvolumen ist 45% (wie bei den Mörtelversuchen). Die Korngruppe 4/16 mm setzt sich zu 40 % aus der Fraktion 4/8 mm und zu 60% aus der Fraktion 8/16 mm zusammen. Die in Tabelle 4 gezeigten Rezepturen wurden mit folgenden Zielvorgaben entwickelt:

- Setzfliessmass: 75 ± 5 cm
- Trichterauslaufzeit: 6 ± 2 s

Beton	**B1**	**B2**	**B2-Sand**	**B2-Stabi**	**B3**
Mehlkorntyp	MK1	MK2	MK2	MK2	MK3
Sand 0/4 mm [kg/m^3]	794	769	939	769	789
Kies 4/8 mm [kg/m^3]	353	375	307	375	357
Kies 8/16 mm [kg/m^3]	529	563	461	563	536
CEM I 52.5 R [kg/m^3]	534				
CEM II A/LL 42.5 N [kg/m^3]		357	357	357	381
Flugasche [kg/m^3]		120	120	120	
Quarzmehl [kg/m^3]					100
Mikrosilika [kg/m^3]					19
Wasser [kg/m^3]	192	181	181	181	190
Verflüssiger [kg/m^3]	7.48	3.80	3.80	3.80	5.50
Stabilisierer [kg/m^3]				1.00	
Anpassung β_P-Wert [%]	99	113	113	113	104
Wasser/MK [%]	36	38	38	38	38
Verflüssiger/MK [%]	1.40	0.80	0.8	0.80	1.10
W/Z$_{eq}$-Wert [-]	0.36	0.45	0.45	0.45	0.47
Frischbetonrohdichte [kg/m^3]	2'410	2'367	2'360	2'355	2'378
Luftporengehalt [Vol-%]	1.3	1.6	1.8	2.0	1.4
Setzfliessmass [cm]	79.1	79.2	77.8	76.7	78.0
Trichterauslaufzeit [s]	6.2	6.4	4.1	6.3	5.8

Tabelle 4: SVB-Basis-Rezepturen und ausgewählte Eigenschaften

Zur Überprüfung des tatsächlichen Einflusses zweier weiterer Massnahmen zur Robustheitssteigerung wurden vom Beton B2 (Basis: Mehlkorntyp MK2) zwei zusätzliche Rezepturversionen entwickelt, die ebenfalls in Tabelle 4 enthalten sind. Zum einen wurde der Sandanteil am Gesamtzuschlag von 45 auf 55% erhöht („B2-Sand“), zum anderen wurde ein viskositätssteigerndes Zusatzmittel, ein sogenannter Stabilisierer, zugegeben („B2-Stabi“).

Sensibilitätsuntersuchungen

Um die Sensibilität der drei Basis-SVBs und der zwei Variationen von B2 auf Schwankungen des Wassergehaltes zu untersuchen, wurden Mischungen mit systematisch variiertem Wassergehalt hergestellt und die Konsistenzkenngrössen Setzfliessmass und Trichterauslaufzeit bestimmt. Mit Hilfe der oben genannten Toleranzen kann auf diese Weise die maximal tolerierbare Abweichung vom Soll-Wassergehalt bestimmt werden. Die Abbildungen 10 bis 14 zeigen die Messergebnisse.

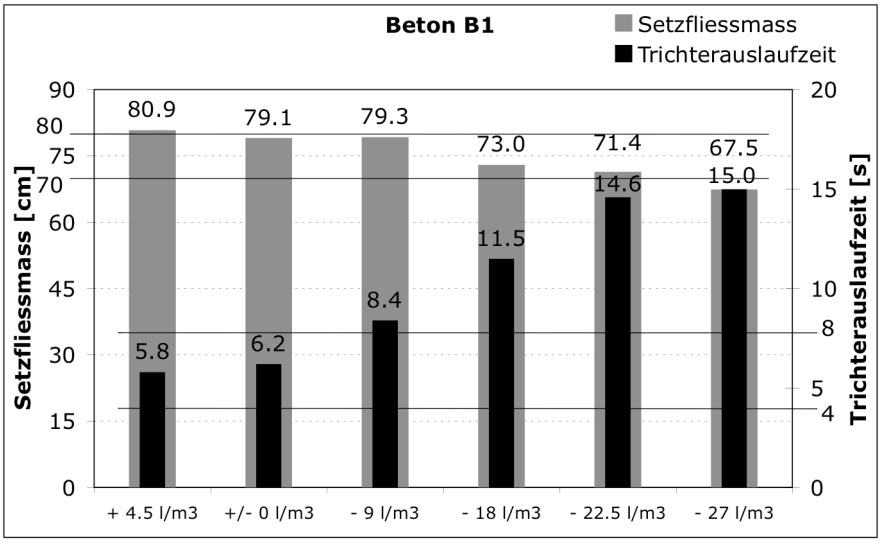

Abbildung 10: Bestimmung der Robustheit am Beton B1

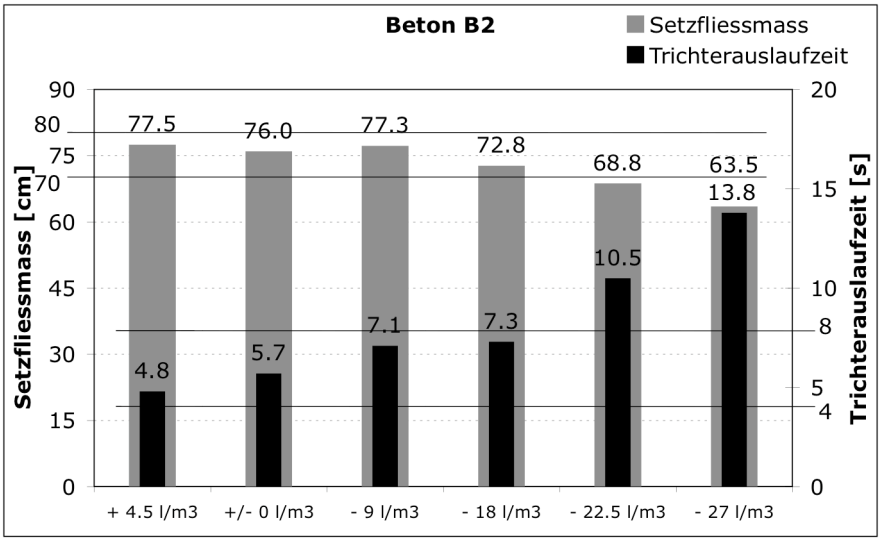

Abbildung 11: Bestimmung der Robustheit am Beton B2

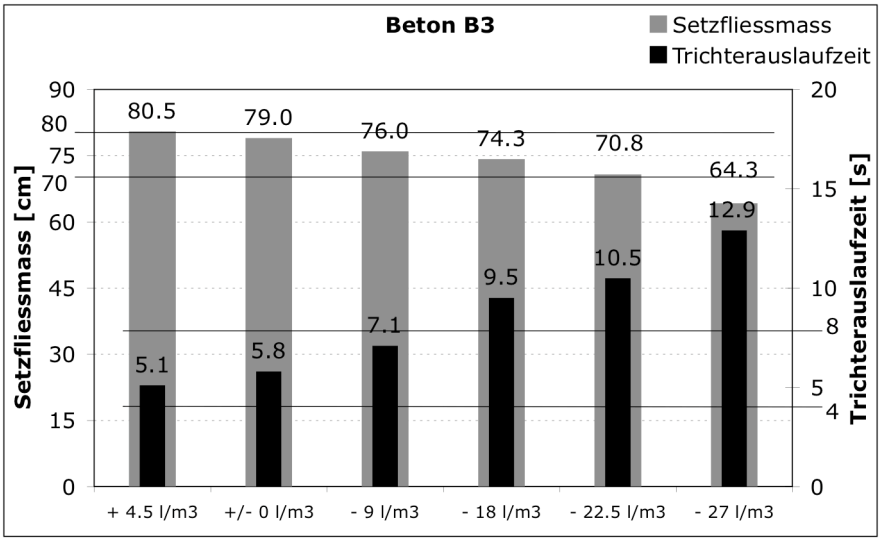

Abbildung 12: Bestimmung der Robustheit am Beton B3

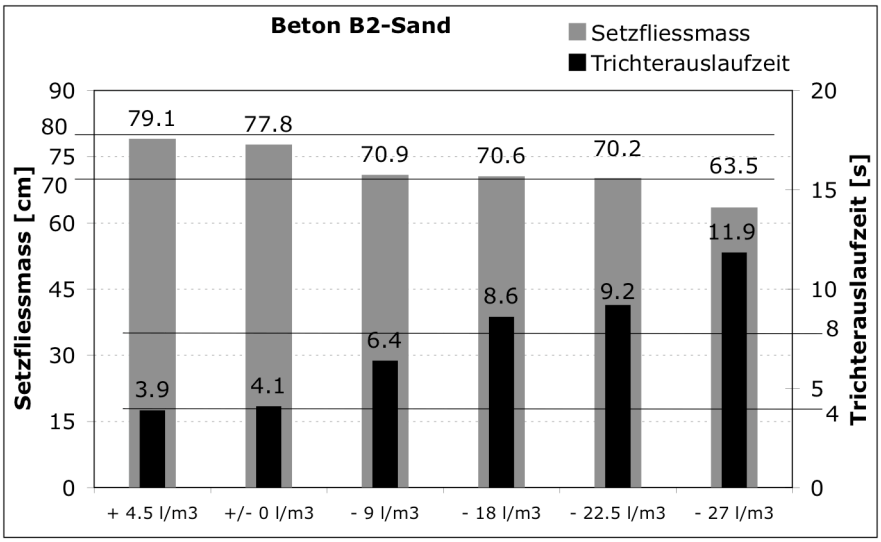

Abbildung 13: Bestimmung der Robustheit am Beton B2-Sand

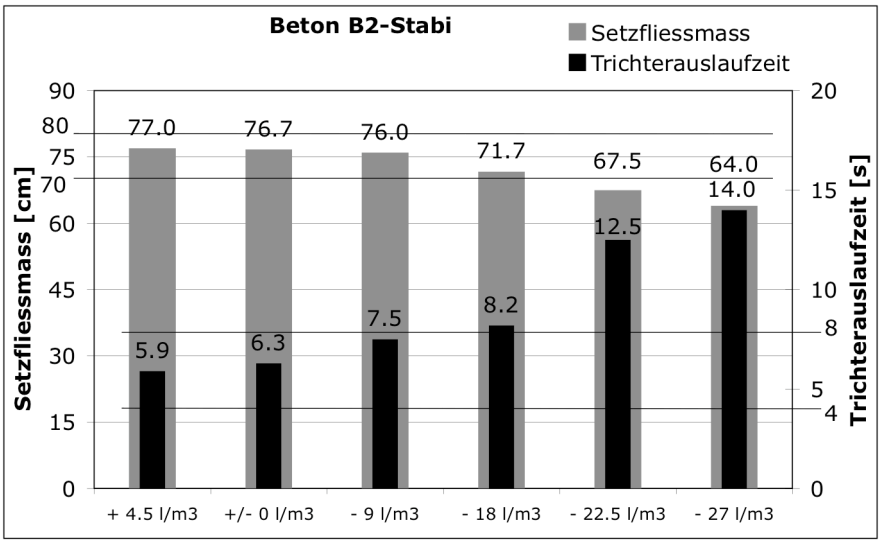

Abbildung 14: Bestimmung der Robustheit am Beton B2-Stabi

Tabelle 5 fasst die Robustheit der Betone gegenüber Wassergehaltsschwankungen zusammen:

Betontyp	B1	B2	B2-Sand	B2-Stabi	B3
Robustheit des Setzfliessmasses	± 13.5 l/m^3	± 11.3 l/m^3	± 13.5 l/m^3	± 11.3 l/m^3	± 13.5 l/m^3
Robustheit der Trichterauslaufzeit	± 4.5 l/m^3	± 11.3 l/m^3	± 9.0 l/m^3	± 9.0 l/m^3	± 9.0 l/m^3
Massgebende Robustheit	**± 4 l/m^3**	**± 11 l/m^3**	**± 9 l/m^3**	**± 9 l/m^3**	**± 9 l/m^3**

Tabelle 5: Robustheiten der unterschiedlichen SVB gegenüber Wassergehaltsschwankungen

Erprobung baustellentauglicher Frischbetonkontrollverfahren

Ein Teil der Konsistenzmessungen im Rahmen der Ermittlung der Robustheit wurden nicht nur mit dem Setzfliess- und Trichterauslaufversuch, sondern ausserdem mit dem Setzfliessversuch mit Blockierring durchgeführt. Die t500-Zeit wurde sowohl mit als auch ohne Blockierring bestimmt.

Mit diesen Daten lassen sich Korrelationen zwischen den herkömmlichen und den hier empfohlenen Kenngrössen herleiten, so dass die entsprechenden Zielgrössen und Toleranzen definiert werden können. Die entsprechenden Messergebnisse sind in den Abbildungen 15 und 16 dargestellt. Die Abbildungen enthalten die Kennzeichnung der Grenzwerte der herkömmlichen sowie der hier vorgeschlagenen Kenngrössen.

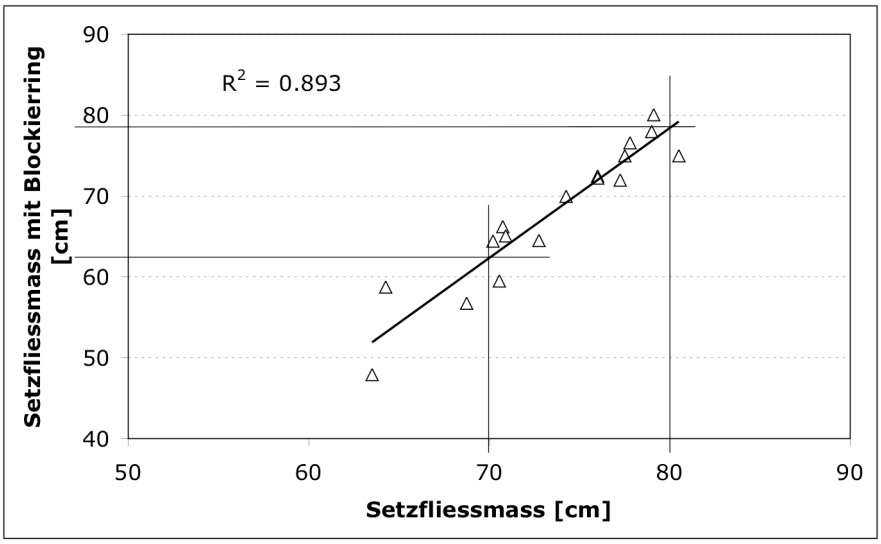

Abbildung 15: Korrelation zwischen Setzfliessmass mit und ohne Blockierring

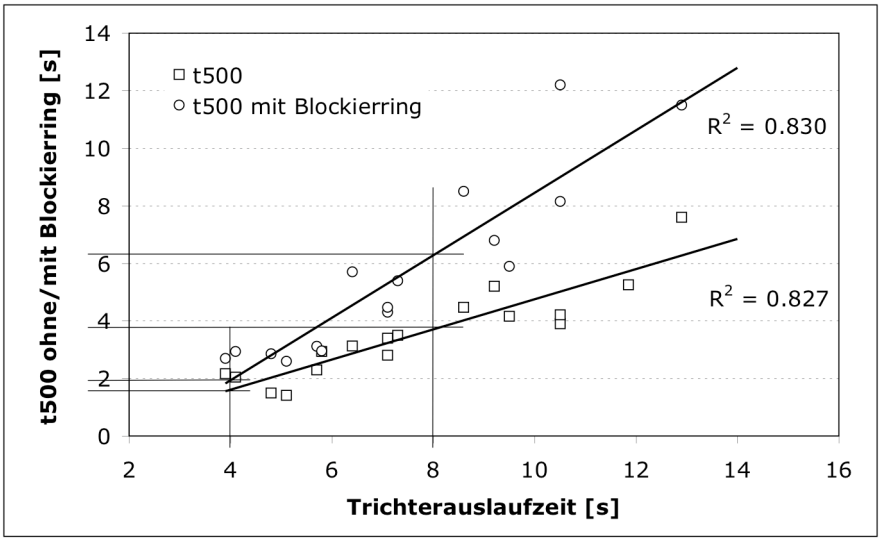

Abbildung 16: Korrelation zwischen Trichterauslaufzeit und der t500-Zeit ohne und mit Blockierring

5. Diskussion der Ergebnisse und Bedeutung für die Praxis

5.1 Steigerung der Produktionspräzision bei der Betonherstellung

Ausgangsstoffe

Zwei Ursachen wurden für die Beeinträchtigung der Qualität von SVBs als massgebend beurteilt. Zum einen können Schwankungen des Gehaltes an Sand der Korngruppe 0/0.5 mm eine Änderung der rheologischen Eigenschaften bewirken. Zum anderen sind es Variationen des Wassergehaltes sowie Variationen des Wasseranspruchs der mineralischen Komponenten, die die Fliesseigenschaften beeinflussen.

Diese Schwankungen wurden in den letzten Kapiteln im Einzelnen quantifiziert und werden in Tabelle 6 der Robustheit sorgfältig entwickelter SVBs gegenübergestellt.

	Schwankung ohne gezielte Massnahmen	**Reduzierte Schwankungen mit gezielten Massnahmen**	**Robustheit/ Toleranz**
Anteil der Korngruppe 0/0.5 (Summe)	**± 95 kg/m^3**	**± 45 kg/m^3**	**± 80 kg/m^3** [Schi04]
infolge Sieblinien-Schwankungen	± 70 kg/m^3	± 35 kg/m^3	
infolge Dosierschwankungen	± 25 kg/m^3	± 10 kg/m^3	
Wasserfehlbetrag (Summe aus Wassergehalt und Wasseranspruch)	**± 45 l/m^3**	**± 14 l/m^3**	**± 11 l/m^3**
Wassergehalt (Summe)	**± 28 l/m^3**	**± 3 l/m^3**	
Eigenfeuchte der Korngruppe 0/4	± 19 l/m^3	± 2 l/m^3	
Eigenfeuchte der Korngruppe 4/16	± 6 l/m^3	± 1 l/m^3	
Zusatzmittelspülung	± 3 l/m^3	± 0 l/m^3	
Wasseranspruch (Summe)	**± 17 l/m^3**	**± 11 l/m^3**	
Wasseranspruch der Korngruppe 0/4 infolge Sieblinienschwankungen	± 8 l/m^3	± 4 l/m^3	
Wasseranspruch der Korngruppe 0/4 infolge Dosierschwankungen	± 4 l/m^3	± 2 l/m^3	
Wasseranspruch der Korngruppe 4/16 infolge Sieblinienschwankungen	± 2 l/m^3	± 2 l/m^3	
Wasseranspruch des Mehlkorns	± 3 l/m^3	± 3 l/m^3	

Tabelle 6: Vergleich der Herstellungsschwankungen und der Robustheit von SVB

Folgende Massnahmen (siehe dritte Spalte in Tabelle 6) müssen getroffen werden, um die Schwankungen so zu reduzieren, dass die Toleranzen nicht überschritten werden. Nur auf diese Weise ist die Herstellung von SVBs mit gleich bleibend hoher Qualität gewährleistet:

- Die Sieblinienschwankungen müssen aufgrund der Anforderungen an die Konstanz des Wasseranspruchs präziser werden (siehe unten). Diese Massnahme halbiert die Schwankung des Gehaltes der Korngruppe 0/0.5 mm.
- Auch die Abweichung bei der Sanddosierung (Korngruppe 0/4) muss aufgrund der Anforderungen an die Konstanz des Wasseranspruchs (siehe unten) durch entsprechende Einrichtungen auf ± 20 kg/m^3 reduziert werden. Damit sinkt der Beitrag dieser Schwachstelle zur Schwankung der relevanten Korngruppe 0/0.5 mm auf ± 10 kg/m^3.
- Die Zuschlagsilos müssen mit Feuchtemesssonden ausgestattet sein, die während des Entnahmevorgangs den Eigenfeuchtegehalt der Zuschläge bestimmen. Dieser Wert muss vom Gesamtwasser abgezogen werden.
- Eventuell aus der Spülung der Zusatzmittelwaage in den Mischer entleertes Wasser muss vollständig berücksichtigt werden.
- Die Schwankungen der Sieblinie muss so beschränkt werden, dass die daraus resultierende Schwankung des Wasseranspruchs der Sandkomponente (0/4 mm) gegenüber dem herkömmlichen Wert halbiert wird. Dies wird beispielsweise erreicht, wenn die Abweichung der

Siebdurchgänge 0.5, 1, 2 und 4 mm vom Zielwert auf maximal 2% beschränkt wird. Dies kann beispielsweise durch den Ersatz natürlicher durch gebrochene Zuschläge erfolgen.

- Indem die Schwankung der Sanddosierung reduziert wird, sinkt auch die entsprechende Schwankung des Wasseranspruchs von 4 auf 2 l/m^3.
- Die Folgen der Sieblinienschwankungen der Korngruppe 4/16 mm und die Wasseranspruchsschwankungen des Mehlkorns sind vergleichsweise gering und deren Reduktion ist mit grossem Aufwand verbunden. Aus diesem Grund werden hier keine weiteren Schritte empfohlen.

Während diese Massnahmen die Einhaltung der Toleranz hinsichtlich der Korngruppe 0/0.5 mm erlauben, führen sie zu einem verbleibenden Wasserfehlbetrag von ±14 l/m^3, wenn die einzelnen Beträge addiert werden. Da es sich gesamthaft um sieben statistisch verteilte Grössen handelt, ist die Wahrscheinlichkeit einer gleichgerichteten Addition der Abweichungen vernachlässigbar klein.

Aus diesem Grund können die vorgeschlagenen Massnahmen im Sinne einer 80/20-Lösung als geeignet gewertet werden, um die zulässigen Toleranzen einzuhalten.

Steuergrösse bei der SVB-Produktion

Der Grossteil herkömmlicher Betonwerke verfügt über die Möglichkeit der Konsistenzmessung während des Betonmischvorgangs. Als Steuergrösse für das Erreichen einer vorgegebenen Konsistenz wird die Zugabewassermenge eingesetzt. Aus zwei Gründen ist dieses Vorgehen nicht geeignet, um SVBs mit gleichbleibender Qualität herzustellen:

- Aufgrund der hohen Fliessfähigkeit von SVBs fällt die Konsistenzmessung in vielen Fällen in einen Bereich, in dem die notwendige Empfindlichkeit nicht mehr gewährleistet ist.
- Die Steuergrösse “Zugabewassermenge” ist bei SVBs nicht geeignet, um alle möglichen unterschiedlichen Dosierungenauigkeiten zu kompensieren.

Aus diesem Grund muss als Steuergrösse bei der Herstellung von SVB die Komponentendosierung und insbesondere die Wasserdosierung gemäss den Vorgaben aus der Rezepturentwicklung verwendet werden.

5.2 Entwicklung robuster SVB-Rezepturen

Die im vorangegangenen Kapitel vorausgesetzte Robustheit eines SVBs hinsichtlich Sand- und Wassergehaltsschwankungen ist nur mit SVB-Rezepturen erreichbar, die in Abhängigkeit der tatsächlich verfügbaren Ausgangsstoffe mit Hilfe eines erprobten Verfahrens ermittelt wurden. Hierbei sind die folgenden Punkte von besonderer Bedeutung:

- Verwendung einer Mehlkornkomponente mit breiter Partikelgrössenverteilung, z.B. CEM II und Flugasche oder geeignetes Steinmehl
- Verwendung eines mit dem Mehlkorn kompatiblen Verflüssigers (Verflüssiger auf Polycarboxylatbasis sind aufgrund ihrer thixotropierenden Wirkung anderen Typen vorzuziehen.)
- Kontrolle der zeitabhängigen Wirkung des Verflüssigers
- Bei mehlkornreichen SVBs zeigen viskositätsregelnde Zusatzmittel (Stabilisierer) keine weitere Steigerung der Robustheit.
- Eine Erhöhung des Sandanteils (0/4 mm) auf über 50% des Gesamtzuschlags ist nicht zwangsläufig notwendig und zeigt keine Steigerung der Robustheit.
- Auf die Verwendung von Recyclingwasser ist aufgrund der möglichen Wechselwirkung seiner Inhaltsstoffe mit dem Verflüssiger zu verzichten.
- Wassersaugende Zuschläge, insbesondere Recyclingzuschlag und Mischabbruch, sind für die Herstellung von SVB nicht geeignet, da die Abschätzung der Folgen für den wirksamen Wassergehalt des SVBs nicht mit der notwendigen Genauigkeit möglich ist.

Nur so ist gewährleistet, dass die notwendige Robustheit in der Grössenordnung von ±10 l/m^3 erreicht wird.

5.3 Einsatz praxistauglicher Frischbetonprüfverfahren

Um eine gewissenhafte Durchführung der Frischbetonprüfungen sowohl zur Qualitätskontrolle im Betonwerk als auch zur Akzeptanzkontrolle auf der Baustelle zu gewährleisten, sind einfach anwendbare und zuverlässige Verfahren vorzusehen. Die Bestimmung des Setzfliessmasses mit Blockierring und die

Bestimmung von t500 erlauben die Beurteilung der Blockierneigung, der Fliessfähigkeit und der Entmischungsstabilität.

Hierbei gelten die in Tabelle 7 zusammengefassten Zielgrössen und Toleranzen. Zum Vergleich sind ausserdem die Angaben für herkömmliche Verfahren ebenfalls aufgeführt. Die Werte wurden aus den Daten abgeleitet, die in den Abbildungen 15 und 16 dargestellt sind.

	Zielwert	**Toleranz**
Trichterauslaufzeit [s]	6 s	± 2 s
t500 [s]	3 s	± 1 s
t500 mit Blockierring [s]	4 s	± 2 s
Setzfliessmass [cm]	75 cm	± 5 cm
Setzfliessmass mit Blockierring [cm]	73 cm	± 7 cm

Tabelle 7: Zielwerte und Toleranzen der Frischbetoneigenschaften von SVB

Die Untergrenze von t500 dient der Kontrolle der Entmischungsneigung. Die Erfahrungen zeigen, dass ein SVB mit einer Trichterauslaufzeit unterhalb von 4 s, bzw. einer t500-Zeit unterhalb von 2 s ein nicht tolerierbares Risiko zur Entmischung aufweist. Aus diesem Grund eignen sich diese Verfahren zur Beurteilung der Entmischungsstabilität.

6 Empfehlung für die weitere Umsetzung: Checkliste

Auf Basis der erarbeiteten Erkenntnisse lässt sich eine Checklisten für jeden relevanten Arbeitsschritt und jede relevante Schnittstelle erstellen. Diese Checkliste richtet sich an Betonhersteller, deren Lieferanten und deren Abnehmer (Bauunternehmen).

	Kriterium für Massnahmen	**Massnahmen**
Schnittstelle zu Lieferanten		
Zuschlagskomponenten	• Abweichung des Anteils der Korngruppe 0/4 mm im Sand > ± 5% • Änderung Verhältnis Brech- zu Rundsand • Wechsel der Quelle • Wechsel des Produktes	• Überprüfung Rezeptur, eventuell Anpassung Rezeptur
	• Verwendung von Mischabbruch oder Recyclingzuschlag	• Wechsel zu Zuschlägen aus natürlichen oder gebrochenen Gesteinskörnungen
Zement & Zusatzstoffe	• Variation des Blaine-Wertes > ± 100 g/m2 • Wechsel der Quelle • Wechsel des Produktes	• Überprüfung Rezeptur, eventuell Anpassung Rezeptur
Zusatzmittel	• Wechsel der Quelle • Wechsel des Produktes (z. B. Sommer/Winter-Verflüssiger)	• Überprüfung Rezeptur, eventuell Anpassung Rezeptur
Rezeptur-Erstellung		
Rezepturentwicklung nach bewährtem Verfahren	• Wasseranspruch des Mehlkorns nicht bekannt • Bandbreite der Partikelgrössenverteilung des Mehlkorns nicht bekannt • Verflüssigereignung und –dosierung nicht geprüft • Anteil and Mehlkornleim nicht ausreichend (< 360 l/m^3) • Sieblinie zu sandreich (Anteil Korngruppe 0/4 > 50%)	• Teilweiser oder vollständiger Neuentwurf der Rezeptur
Unterscheidung Winter/Sommer	• Qualitätsprobleme bei Temperaturänderungen • Qualitätsprobleme bei Umstellung von Sommer- auf Winter-Verflüssiger	• Teilweiser oder vollständiger Neuentwurf der Rezeptur
Produktion		
Produktionsanweisung	• Keine Herstellungsanweisung vorhanden	• Bereitstellung einer SVB-Herstellungsanweisung mit Hinweisen zu Dosiergenauigkeiten, Dosierreihenfolge, Mischzeiten, Q-Kontrollen und Übergabe an Transport
Sieblinie des Zuschlags	• Abweichung der Anteile der Korngruppen 0.5, 1, 2 und 4 mm vom Zielwert der Gesamtsieblinie > 2 %-Punkte	• Anpassung der Rezeptur
Dosiergenauigkeit (Sand)	• Wiederholte Überdosierung der Sandkomponente (> ± 20 kg/m^3)	• Dosiermechanismus des Sandsilos anpassen
Eigenfeuchte	• Erste Betonproduktion des Tages (Wasseransammlung im Siloboden) • Keine online-Messung der Zuschlagseigenfeuchte aller Zuschlagsfraktionen	• Entnahme von mindestens 1 to des betroffenen Zuschlags • Installation der entsprechenden Messvorrichtungen
Zugabewasser	• Recyclingwasser	• vollständiger Wechsel zu Trinkwasser
Steuerung/Kontrolle des Wassergehaltes	• Anlage nutzt Wassergehalt als Steuergrösse zum Erreichen eines vorgegebenen Konsistenzwertes	• Umstellung der Steuerung auf das präzise Einhalten der Rezepturvorgaben
Qualitätskontrolle: Einhaltung Zielgrössen und Toleranz	• Frischbetoneigenschaften ausserhalb Toleranz	• Ursachenevaluation • Ursachenbehebung • Evtl. Anpassung Rezeptur
	• keine regelmässigen Frischbetonkontrollen	• Prüfung jeder einzelnen Fahrmischerfüllung

Schnittstelle Transport		
Fahrzeug-Vorbereitung	• Fahrzeug ungeeignet für SVB-Transport (z.B. Mulde, Kipper, etc.) • Fahrzeug nicht speziell für SVB vorbereitet	• Umstellung auf Fahrmischer • Vollständige Reinigung der Trommel von Betonrückständen • Vollständige Entleerung der Trommel (kein Restwasser)
Misch- und Entladeprozess	• Keine besonderen Anweisungen für Transport vorhanden	• Langsames Drehen der Trommel während Transport • Starkes Aufmischen vor Entladung (30 s)
Schnittstelle Einbau		
Qualitätskontrolle: Einhaltung Zielgrössen und Toleranz	• Frischbetoneigenschaften ausserhalb Toleranz	• Rücksendung der Charge • Meldung an Produktion • Ursachenevaluation • Ursachenbehebung • Evtl. Anpassung Rezeptur
	• keine regelmässigen Frischbetonkontrollen	• Prüfung jeder einzelnen Fahrmischerlieferung
Einbauzeitraum und Einbauverfahren	• Keine besonderen Einbauanweisungen vorhanden	• Einbauzeitraum auf 90 Minuten nach Betonproduktion beschränken • Freie Fallhöhe durch entsprechende Ausrüstung beschränken (z.B. Krankübel mit Schlauch)
Schalung	• Keine SVB-spezifischen Schalungsanforderungen gestellt	• Auslegung auf hydrostatischen Druck • Erhöhte Anforderungen an Schalhaut und Dichtigkeit
Nachbehandlung	• Vergleichbar mit herkömmlichen RBs	

Tabelle 8: Checkliste für die Anwendung von SVB

7 Literatur

[Okam95] Okamura, H., Maekawak, K. und Ozawa, K.; Mix-Design for Self-Compacting Concrete; Concrete Library International of JSCE; No 25; 107-120 (1995)

[DAfS01] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.); DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton; Beuth Verlag; Berlin (2001)

[EFCA05] EFCA (Hrsg.); The European Guidelines for Self-Compacting Concrete – Specifications, Production and Use (2005)

[Grüb00] Grübl, P. und Lemmer, C.; Überprüfung der Leistungsfähigkeit von selbstverdichtendem Beton (SVB); Fraunhofer IRB Verlag (2000)

[Hoff04] Hoffmann, C., Leemann A.; Selbstverdichtender Beton (Teil 1), Herstellung, Anwendung und Dauerhaftigkeit von selbstverdichtendem Beton; hrsg. vom Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen (2004)

[Koch71] Koch, K. und Würth, E.; Wasseranspruchs- und Stoffraumrechnung für Beton; beton 21; Heft 8; 324-327 (1971)

[Pers01] Persson, B.; A Comparison between Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete and the Corresponding Properties of Normal Concrete; Cement and Concrete Research; Vol 1, No 2; 193-198 (2001)

[Schi04] Schießl, P., Lowke, D., Lohaus, L. und Höveling, H.; Eigenschaften selbstverdichtender Betone; Heft 906 der Schriftenreihe Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik; herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2004).

für das cemsuisse – Projekt SCC-1: Qualität und Qualitätskontrolle

Martin Bäuml und Giovanni Martinola – 14.04.2006

Concretum Construction Science AG
Technoparkstrasse 1, 8005 Zürich
Tel: 044 445 13 46, Fax: 044 445 13 48