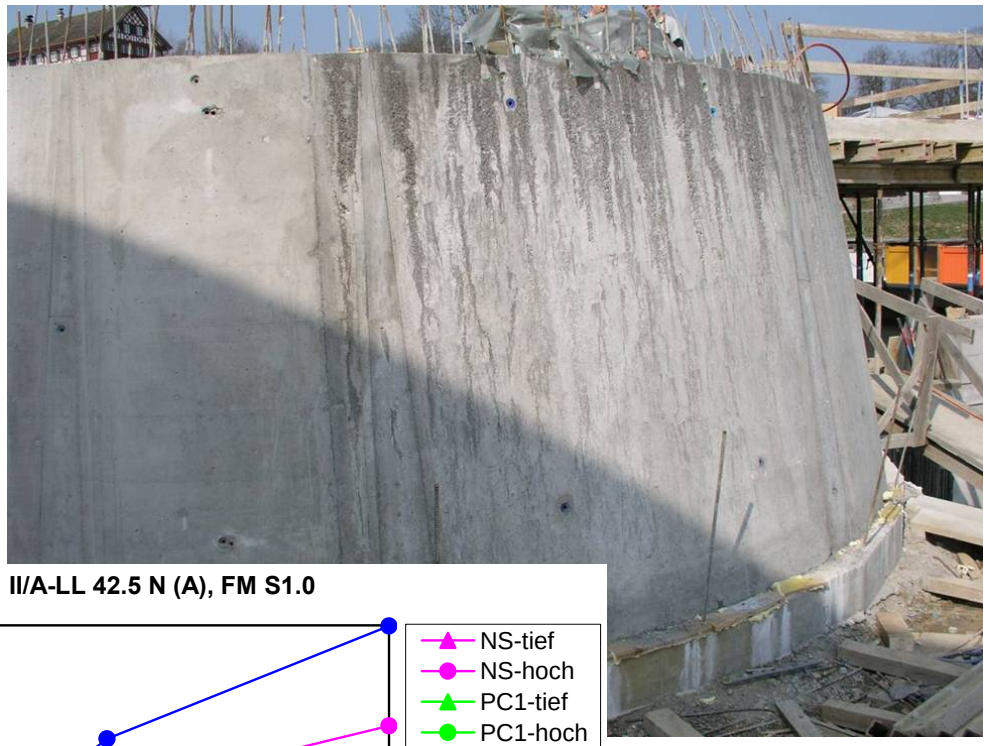
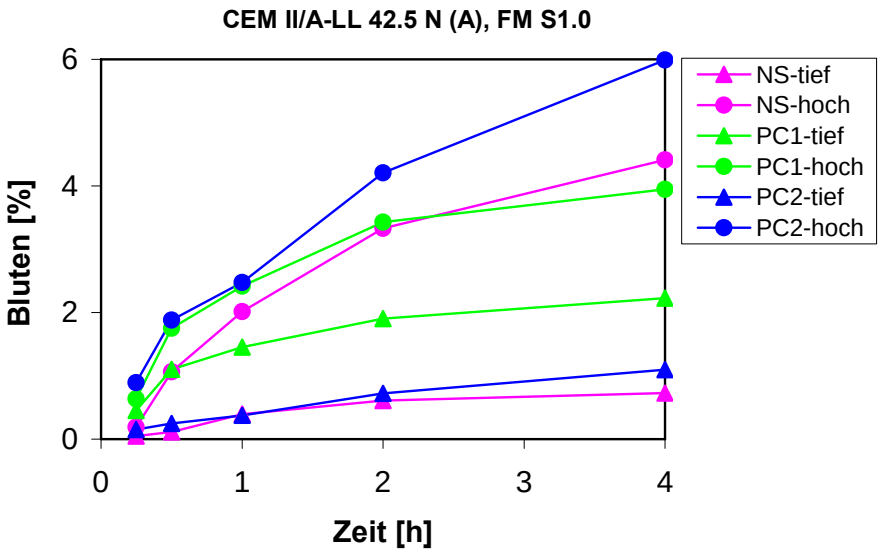
Materials Science & Technology

Abteilung Beton / Bauchemie Schlussbericht

cemsuisse-Projekt SB4:

Sedimentation und Bluten von Beton





Für das cemsuisse Projekt SB4: Sedimentation und Bluten von Beton

Abteilung Beton/Bauchemie

Dübendorf, 25.07.2007

Dr. Andreas Leemann

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **4**

1 Grundlagen **5**

2 Ausgangslage **7**

3 Materialien und Methoden **8**

4 Resultate **10**

4.1 Zementleimversuche 10

4.1.1 Sättigungspunkt 10

4.1.2 Kalorimetrie 11

4.2 Mörtelversuche 13

4.2.1 Einfluss des w/z, des Ausbreitmasses und der Verdichtungsdauer 13

4.2.2 Einfluss des Zements und Zusatzstoffes 14

4.2.3 Einfluss der Mörteltemperatur 15

4.2.4 Einfluss der Fliessmitteldosierung 17

4.2.5 Einfluss des Fliessmitteltyps 18

4.2.6 Einfluss der Kombination Zement-Fliessmittel 19

4.2.7 Sichtflächen 20

4.3 Beton 21

4.3.1 Einfluss des w/z, des Ausbreitmasses, der Verdichtungsdauer und von Luftporenmittel 21

4.3.2 Einfluss der Zemente 22

4.3.3 Einfluss der Fliessmitteldosierung und des Fliessmitteltyps 23

4.3.4 Einfluss der Betontemperatur 24

5 Diskussion **26**

5.1 Mörtelversuche 26

5.2 Betonversuche 27

5.3 Vergleich Mörtel- und Betonversuche 28

5.4 Korrelation mit den Ergebnissen des Projektes SB3 29

Literatur **30**

Zusammenfassung

Das Bluten von zementären Baustoffen wird massgebend durch das Ausbreitmass respektive die Verarbeitbarkeit beeinflusst. Tiefe Temperaturen verstärken das Bluten wesentlich. Beim Beton hat der Einsatz von Fliessmitteln das Bluten nicht verstärkt wie es beim Mörtel der Fall ist. Der verwendete Fliessmitteltyp wirkt sich nicht auf das Bluten aus. Tendenziell bluten Mörtel- und Betonmischungen hergestellt mit CEM II/A-LL 42.5 N weniger stark als solche, die mit CEM I 42.5 N hergestellt werden. In der verwendeten Versuchsanordnung spielt die Verdichtungsdauer eine untergeordnete Rolle, obwohl Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass das Bluten durch übermässiges Verdichten verstärkt werden kann. Aus diesen Ergebnissen kann geschlossen werden, dass die Gefahr des Blutens vor allem dann hoch ist, wenn einerseits ein Beton mit hohem Ausbreitmass verwendet wird und andererseits relativ tiefe Temperaturen herrschen. Bei starkem Bluten entstehen im Bauwerksbeton Wasserporen angereichert mit Feinfraktion, die bis zu einigen Zentimetern Durchmesser erreichen können. Porenwasser sammelt sich unter Gesteinskörnern und Bewehrungseisen an. Diese Phänomene wirken sich negativ auf die Dauerhaftigkeit der Bauwerke aus. Zudem beeinträchtigen Blutungskanäle an der Oberfläche die Sichtbetonqualität erheblich.

Die Sedimentation von zementären Baustoffen wird wie das Bluten hauptsächlich durch das Ausbreitmass respektive die Verarbeitbarkeit beeinflusst. Des Weiteren kann die Sedimentation durch langes Verdichten und die Verwendung eines Luftporenmittels verstärkt werden. Von untergeordneter Bedeutung sind der verwendete Zement, der Einsatz von Fliessmitteln und der Fliessmitteltyp. Sedimentiert Beton während des Einbaus stark, bilden sich im Bauteil Bereiche mit erhöhtem respektive reduziertem Feinanteil. Dies führt zu inhomogenen Schwindspannungen, die das Risspotential wesentlich erhöhen. Das Sedimentieren kann vermieden werden, wenn der Beton nur solange vibriert wird, bis er verdichtet ist und nicht solange, bis er entmischt. Dies bedingt, dass die Verdichtungsdauer der Verarbeitbarkeit des vorliegenden Betons angepasst wird.

Aus betontechnologischer Sicht besteht die grösste Wahrscheinlichkeit für gleichmässige Sichtflächen, wenn mit einem Beton gearbeitet wird, der ein Ausbreitmass im Bereich von 50-60 cm aufweist. Die Verwendung von CEM II/A-LL 42.5 N scheint im Vergleich zu einem CEM I 42.5 N vorteilhaft zu sein. Die Herstellung von Sichtbetonflächen bei tiefen Temperaturen gilt es zu vermeiden, da bei diesen Bedingungen das Bluten stark erhöht wird und mit Sichtbetonflächen inhomogener Helligkeitsverteilung gerechnet werden muss.

1 Grundlagen

Der Einsatz von neuen, stärker wirkenden Fliessmitteln erschliesst dem Betonbau neue Möglichkeiten. Einerseits ermöglichen diese Produkte das Entwickeln neuer Betontypen wie ultrahochfeste oder selbstverdichtende Betone, andererseits können bewährte Betontypen optimiert werden. Aufgrund der äusserst komplexen Wechselwirkungen zwischen diesen Fliessmitteln und dem Zement, insbesondere während der frühen Phase der Hydratation (bis einige Stunden nach dem Anmischen), kann es allerdings auch zu diversen unerwünschten Nebenwirkungen kommen. Zu diesen auftretenden Effekten gehören die Entmischungsphänomene Sedimentation und Bluten des Betons, die zumindest die Ästhetik der Betonoberfläche beeinträchtigen können. Bei einer Sedimentation im Dezimeter- und Meterbereich kann die resultierende Anreicherung von Feinanteilen zu inhomogenen Schwindspannungen und damit zu einer vermehrten Rissbildung im Beton führen. Über die massgebenden Einflussgrössen der Sedimentation und des Blutens ist relativ wenig bekannt. Dies hängt damit zusammen, dass Kenngrössen des Zements wie chemisch-mineralogische Zusammensetzung und Mahlfeinheit für jeden Zement, respektive jedes Zementwerk charakteristisch sind. Zudem können die beiden Phänomene Sedimentation und Bluten durch den Einsatz von Zusatzmitteln (Fliessmittel und Stabilisierer) beeinflusst werden [Svermova et al., 2003]. Diese Situation erschwert die Identifikation der grundlegenden Mechanismen der Sedimentation und des Blutens. Die Wechselwirkung zwischen Zementen und Zusatzmitteln weist nach wie vor einen Forschungsbedarf auf.

Es gibt allerdings einige bekannte grundsätzliche Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften von Zementen und Beton mit der Sedimentation einerseits und dem Bluten andererseits. Die Sedimentation oder die Entmischung zeigt einen Zusammenhang mit der Verarbeitbarkeit, dem Luftporengehalt und der zugeführten Verdichtungsenergie [Leemann et al., 2006]. Feingemahlene Zemente mit einer hohen spezifischen Oberfläche neigen weniger zum Bluten als grobgemahlene [Neville, 1994]. Nicht nur die Sedimentation sondern auch das Bluten scheint durch übermässiges Verdichten begünstigt zu werden.

In Bezug auf die Wechselwirkungen mit Fliessmitteln stellen sich die Zusammenhänge äusserst komplex dar. Einerseits beeinflusst der Chemismus und die molekulare Architektur des Fliessmittels die rheologischen Eigenschaften (z. B. Fliessgrenze, Viskosität) sowie die Kinetik der Zementhydratation (z. B. Abbindebeginn) [vgl. u. a. Uchikawa et al., 1997; Kinoshita et al., 2000; Yamada et al., 2000; Plank et al., 2005; sowie eigene Untersuchungen u. a. in Kreppelt et al. 2002, Winnefeld und Peters, 2003; Winnefeld et al., 2005, 2006, 2007a, Leemann und Winnefeld, 2007]. Andererseits spielen die Zusammensetzung des Zementes (v. a. Phasengehalt, lösliche Alkalien, Verfügbarkeit der löslichen Sulfate, Zumahlstoffe) und seine Feinheit eine wichtige Rolle bezüglich der Wirksamkeit von Fliessmitteln im Beton [Collepardi, 1998; Jolicoer und Simard, 1998; Hanehara und Yamada, 1999; Mollah et al., 2000; Flatt and Houst, 2001; sowie eigene Untersuchungen u. a. in Kreppelt et al., 2002, Winnefeld und Peters, 2003, Vikan et al., 2005, Winnefeld, 2007b].

Der C_3A-Gehalt des Zementes ist hierbei ein sehr wichtiger Faktor [Prince et al., 2002, Winnefeld, 2007b], da die Adsorption der Fliessmittel bevorzugt an dieser Phase und ihren Hydratationsprodukten stattfindet [Yoshioka et al., 2001]. Speziell bei Zementen, welche viel und/oder reaktives C_3A enthalten, ist ein optimaler Sulfathaushalt hinsichtlich der Kompatibilität mit Zusatzmitteln von Bedeutung [Yamada et al., 2001]. Optimaler Sulfathaushalt bedeutet in diesem Sinne, dass während der Verarbeitungszeit des Betons ausreichend lösliches Sulfat zur Verfügung steht, um das C_3A des Zementes zu Ettringit umzusetzen. Ist nicht ausreichend Sulfat vorhanden, bilden sich stattdessen aus dem C_3A andere Phasen wie Monosulfat oder

Calciumaluminathydrate, welche Fliessmittel einbinden können, die dann für die Dispergierung nicht mehr zur Verfügung stehen [Flatt und Houst, 2001]. In diesem Zusammenhang kommt auch den löslichen Alkalien des Zementes, welche in sulfatischer Form vorliegen, eine besondere Bedeutung zu. Experimentelle Daten [Jiang et al., 1999; sowie eigene Untersuchungen in Winnefeld und Peters, 2003] zeigen, dass Zemente mit tiefem Gehalt an löslichen Alkalien eher Inkompatibilitäten mit Fliessmitteln aufweisen als solche mit einem höheren Gehalt an löslichen Alkalien (0.4-0.5 %). Hingegen ist bei sehr hohen Alkaligehalten mit der Bildung leistenförmigen Syngenits zu rechnen [Stark et al., 2001], wodurch u. U. die Verarbeitungseigenschaften wieder verschlechtert werden können.

2 Ausgangslage

Im vorliegenden Projekt wird der Aspekt der Betonoberfläche in den Vordergrund gestellt. In der Sichtbetonbauweise wird grosser Wert auf qualitativ hochwertige Sichtflächen gelegt. Sedimentiert oder blutet der Beton während des Einbaus, wird die Qualität der Sichtflächen gemindert. Deshalb ist es von grosser Wichtigkeit, dass der Zusammenhang zwischen Zusammensetzung und Verarbeitbarkeit des Betons mit seinem Verhalten bezüglich Sedimentation und Bluten bekannt ist. Speziell mit der Einführung von neuen Fliessmittel- und Beton-Typen müssen diese Zusammenhänge überprüft werden, damit frühzeitig ein mögliches Schadenspotential identifiziert werden kann.

Im vorliegenden Projekt wird der Einfluss der folgenden Parameter auf die Sedimentation und das Bluten von Beton abgeklärt:

- Zementart
- Fliessmittel-Typ und Dosierung
- Verarbeitbarkeit und w/z-Wert
- Verdichtungsdauer
- Temperatur

Die Untersuchung wird in verschiedene Phasen unterteilt. Damit die Fliessmittel für die Versuche in einer sinnvollen Dosierung eingesetzt werden können, wird in der Phase "Zementleim" der Sättigungspunkt der verschiedenen Kombinationen Zement-Fliessmittel ermittelt. In der Phase "Mörtel" wird der Einfluss der ersten fünf oben aufgeführten Parameter auf die Sedimentation und das Bluten abgeklärt. Um die Übertragbarkeit der Mörtelresultate auf den Beton abzusichern, wird in der Phase "Beton" das Verhalten von Beton untersucht.

3 Materialien und Methoden

Die Kennwerte der verwendeten Zemente und der Flugasche sind in Tabelle 1 aufgeführt. Als Standardzement, mit dem die meisten Versuche durchgeführt wurden, wurde der CEM II/A-LL 42.5 N von Hersteller A verwendet.

Bezeichnung	Hersteller	Dichte [kg/m^3]	Blaine [cm^2/g]
CEM II/A-LL 42.5 N	A	3060	3620
CEM II/A-LL 42.5 N	B	-	3750
CEM I 42.5 N	A	3130	3070
Steinkohleflugasche (V)	A	2270	-

Tabelle 1: Verwendete Zemente und verwendeter Zusatzstoff. Bei den Mischungen mit Steinkohleflugasche wurden 15 Masse-% des CEM I 42.5 N ersetzt.

Bei den Fliessmitteln wurde auf einen Wirkstoff, der sich bereits seit Jahren auf dem Markt befindet, sowie zwei Produkte der neusten Generation zurückgegriffen (Tabelle 2). Ihr Feststoffgehalt wurde nach EN 480-8 bestimmt.

Bezeichnung	Feststoffgehalt [%]
Naphtalinsulfonate ("NF")	34.4
Polycarboxylate Ether 1 ("PC1")	19.9
Polycarboxylate Ether 2 ("PC2")	28.0

Tabelle 2: Verwendete Fliessmittel.

Zur Bestimmung des Sättigungspunktes wurde eine Rheometer (Paar Physica MCR 300) mit einem koaxialen, rotierenden Zylindersystem verwendet. Fliessgrenze und plastische Viskosität wurden mit dem Bingham-Modell berechnet. Die Fliessmitteldosierung der gemessenen Zementleime, die bei einem konstanten Wasser-Zement-Wert (w/z) von 0.35 hergestellt wurden, wurde kontinuierlich erhöht. Der Punkt, an dem die Fliessgrenze durch die Zugabe des Fliessmittels nicht mehr weiter gesenkt werden konnte, wurde als Sättigungspunkt definiert.

Die isothermale Wärmeflusskalorimetrie wurde an Zementleimproben mit einem w/z von 0.40 ausgeführt. Für diese Versuche wurde das Kalorimeter Thermometric TAM Air verwendet. Es wurden jeweils 6 g Zement in die Probegefässe eingebracht und danach das Wasser und das Fliessmittel zugegeben. Nach zwei Minuten rühren wurde das Probegefäss in das Kalorimeter gestellt. Die Messdauer betrug jeweils 72 h.

Damit sich die Resultate der Mörtel mit den unterschiedlichen Zementen und Zusatzmitteln vergleichen lassen, wurde die Verarbeitbarkeit über den w/z eingestellt. Bei den Mörtelmischungen mit dem Standard-Zement wurde ein Fenster für das Ausbreitmass von 150-160 mm (steife Konsistenz), respektive 200-210 mm (plastische Konsistenz) angesteuert. Das Ausbreitmass der Mörtel, hergestellt mit den weiteren Zementen und dem Zusatzstoff, wurde auf 200-210 mm eingestellt. Nach der Herstellung wurden die Mörtel in senkrecht stehende Prismenschalungen mit den Abmessungen 40x40x160 mm gefüllt. Von jeder Mischung wurden drei Prismen hergestellt.

Die gefüllten Schalungen wurden für 1.5 min auf einem Vibriertisch verdichtet. Um den Einfluss der Verdichtungsdauer erfassen zu können, wurden gewisse Mischungen für 6.0 min verdichtet. Nach dem Verdichten wurde in zeitlichen Abständen von 15 und 30 min, 1, 2 und 4 h das sich an der Oberfläche ansammelnde Wasser abgesaugt und gewogen. Das abgesaugte Wasser wird als Anteil der Gesamtmenge des verwendeten Anmachwasser ausgedrückt. Nach 24 h Stunden wurden die Prismen ausgeschalt. Bei jedem Prisma wurde oben wie auch unten eine 1.5 cm dicke Scheibe weggeschnitten und für 24 h in Wasser gelagert. Nach der Wasserlagerung wurde das Gewicht erfasst und die Scheiben für 24 h bei 110°C getrocknet. Die Differenz zwischen dem Gewicht nach der Wasserlagerung und nach dem Trocknen beschreibt den mit Wasser füllbaren Porenraum im Mörtel. Die relative Differenz zwischen der oberen und der unteren Scheibe wird als Mass für das Entmischen respektive die Sedimentation des Mörtels verwendet.

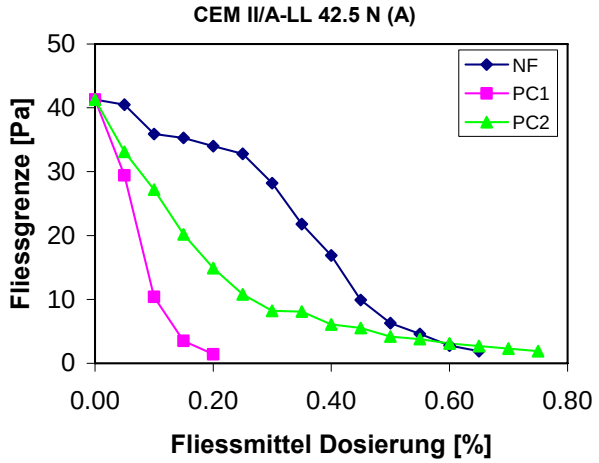
Für die Betonmischungen wurde ein Alluvialkies mit einem Grösstkorn von 32 mm verwendet (0-4 mm: 32%, 4-8 mm: 16%, 8-16 mm 17%, 16-32 mm: 35% / Tabelle der Mischungen im Anhang). Nach der Herstellung der Betonmischungen im 75-l-Mischer wurde als erstes das Ausbreitmass (nach EN 12350-5) gemessen und danach die Rohdichte (nach EN 12350-6) sowie der Luftporengehalt (nach EN 12350-7) bestimmt. Das Fenster für das Ausbreitmass bei den Betonmischungen lag bei 43-47 cm (steife Konsistenz) respektive 57-63 cm (plastische Konsistenz). Das Bluten wurde nach EN 480-4 bestimmt. Als einzige Abweichung zu dieser Norm wurde der Beton einlagig in den Messzylinder eingebracht. Das Wasser an der Oberfläche des Betons wurde 15 und 30 min, 1, 2 und 4 h nach dem Einbringen in den Messzylinder abgesaugt und gewogen. Da die Mischungen mit Fliessmitteln auch nach 4 h Stunden noch bluteten, wurde die Messdauer auf 8 h verlängert. Zur Bestimmung des Entmischungsmasses wurde der Beton 60 s im Walztopf verdichtet. Um den Einfluss der Verdichtungsdauer auf das Bluten und die Sedimentation zu bestimmen, wurden zwei Betonmischungen für jeweils 20 s respektive 60 s mit dem Vibrator (Frequenz 270 Hz, Amplitude 0.40 mm) verdichtet. Bei allen anderen Mischungen betrug die Verdichtungsdauer beim Bluten 20 s und bei der Sedimentation 60 s. Zur Bestimmung des Entmischungsmasses wurden nach dem Verdichten oben respektive unten im Walztopf je 7.0-7.5 kg Material entnommen, das anschliessend auf einem 2 mm Sieb ausgewaschen wurde. So konnte der Anteil an Feinkorn < 2 mm bestimmt werden. Das Entmischungsmass entspricht dem Verhältnis an Feinkorn aus dem oberen zum unteren Teil des Walztopfs. Je grösser dieser Wert ist, umso stärker neigt der Beton während des Einbaus zum Entmischen.

4 Resultate

4.1 Zementleimversuche

4.1.1 Sättigungspunkt

Fliessgrenze und plastische Viskosität werden durch die stufenweise Erhöhung der Fliessmittel-Dosierung kontinuierlich reduziert. Zwischen den einzelnen Fliessmitteln sind deutliche Unterschiede bezüglich ihrem Wirkungsgrad vorhanden (Abb. 1 und 2). Das PC1 weist den deutlich stärksten Wirkungsgrad auf und der Sättigungspunkt wird bei entsprechend tiefen Dosierungen erreicht (Tabelle 3). Die Fliessmittel NF und PC2 erreichen den Sättigungspunkt bei einer vergleichbaren Dosierung, obwohl das Fliessmittel PC2 bei tiefen Dosierungen wirkungsvoller ist als das Fliessmittel NF. Die Wirkung der Fliessmittel ist bei allen Zementen und der Kombination Zement mit Zusatzstoff vergleichbar. Deshalb wurde für die Mörtelversuche bei allen Zementen dieselbe Fliessmittel-Dosierung gewählt. Fliessmitteldosierungen werden im Folgenden in Bezug zum Sättigungspunkt angegeben (Beispiel: S1.0 entspricht einer Dosierung in der Höhe des Sättigungspunktes).



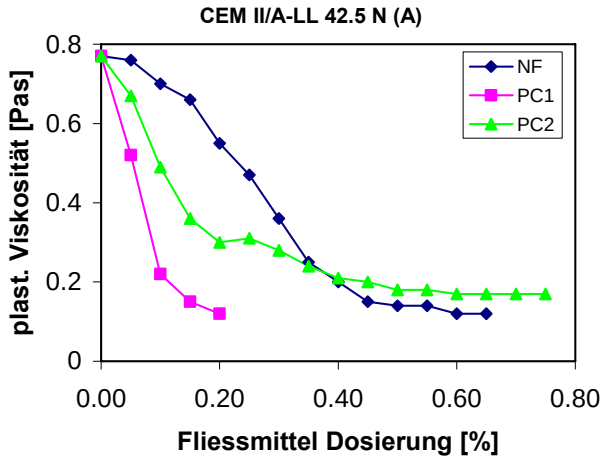


Abbildung 1 und 2: Fliessgrenze und plastische Viskosität des Zementes CEM II/A-LL 42.5 N (A) als Funktion der Fliessmittel-Dosierung (Angabe Dosierung als Festsubstanz).

Zemente	Sättigungspunkt		
	NF [%]	PC1 [%]	PC2 [%]
CEM II/A-LL42.5 N (A)	0.60	0.20	0.60
CEM II/A-LL42.5 N (B)	0.60	0.25	0.65
CEM I 42.5 N	0.60	0.20	0.60
CEM I 42.5 N + V*	0.60	0.15	0.55
Mörtelversuche	0.60	0.20	0.60

* Dosierung: 15 Masse-% des Bindemittels

Tabelle 3: Sättigungspunkt der verschiedenen Kombinationen von Zement und Fliessmittel sowie der für die Mörtelversuche verwendete Sättigungspunkt (Mengenangaben bezogen auf den Feststoffanteil der Fliessmittel).

4.1.2 Kalorimetrie

Der CEM II/A-LL 42.5 N (A) und der CEM I 42.5 N weisen einen ähnlichen Wärmefluss auf (Abb. 3). Der CEM II/A-LL 42.5 N (B) erreicht einen leicht höheren, maximalen Wärmefluss mit einem zeitlich etwas späteren Maximum im Vergleich zum CEM II/A-LL 42.5 N (A). Die Substitution von Zement durch Flugasche verringert den maximalen Wärmefluss im Vergleich zum reinen CEM I 42.5 N.

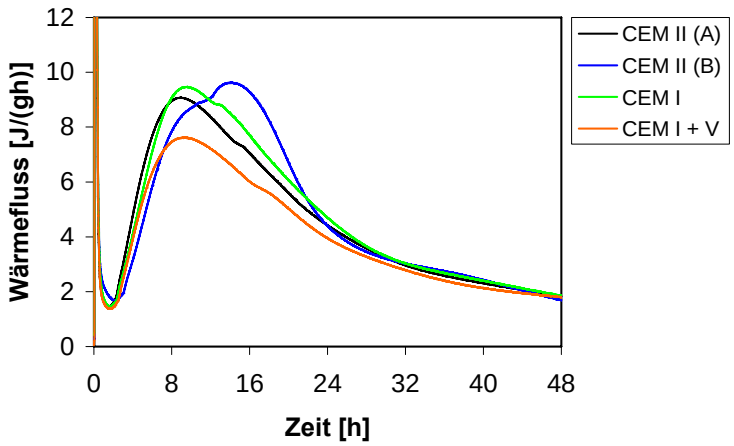


Abbildung 3: Wärmefluss der verwendeten Zemente und der Zement-Flugasche-Mischung.

Alle Fliessmittel führen in der verwendeten Dosierung zu einer Verzögerung der Hydratation (Abb. 4). Die am stärksten verzögernde Wirkung weist das Fliessmittel PC2 auf, die kleinste das Fliessmittel PC1.

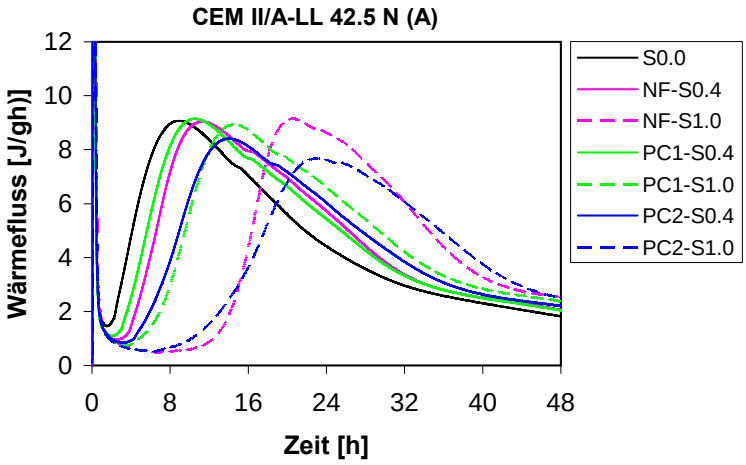


Abbildung 4: Wärmefluss des CEM II/A-LL 42.5 N kombiniert mit unterschiedlichen Dosierungen verschiedener Fliessmittel.

4.2 Mörtelversuche

4.2.1 Einfluss des w/z, des Ausbreitmasses und der Verdichtungsdauer

Die Mörtel mit dem höheren w/z respektive dem höheren Ausbreitmass weisen bei allen Mischungen sowohl ein stärkeres Bluten als auch eine stärkere Sedimentation auf (Abb. 5 und 6). Je länger verdichtet wird, umso mehr steigen Bluten und Sedimentation an.

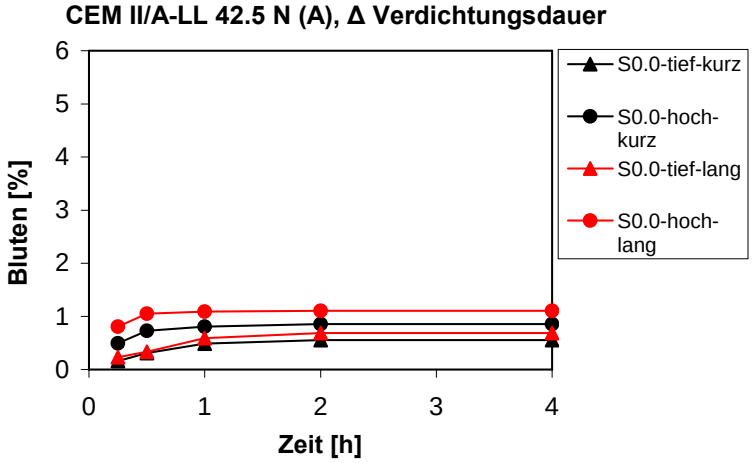


Abbildung 5 : Einfluss der Verdichtungsdauer ("kurz", "lang"), des Ausbreitmasses respektive des w/z ("tief", "hoch") auf das Bluten von Mörtel.

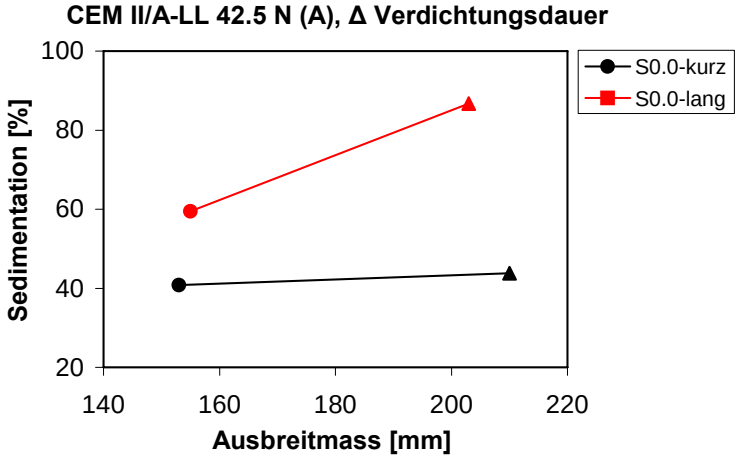


Abbildung 6: Einfluss der Verdichtungsdauer ("kurz", "lang"), des Ausbreitmasses respektive des w/z ("tief", "hoch") auf die Sedimentation von Mörtel.

4.2.2 Einfluss des Zements und Zusatzstoffes

Die verschiedenen Zementtypen und der verwendete Zusatzstoff weisen im allgemeinen bei vergleichbarem Ausbreitmass keine signifikanten Unterschiede beim Sedimentieren und Bluten auf (Abb. 7 und 8). Der Mörtel mit CEM I 42.5 N blutet leicht stärker und der Mörtel mit CEM II/A-LL 4.5 N (B) sedimentiert etwas mehr. Einzig die Mischung mit CEM I 42.5 N + V blutet bei hohem Ausbreitmass deutlich stärker als die anderen Mischungen. Andererseits sedimentiert sie verhältnismässig wenig.

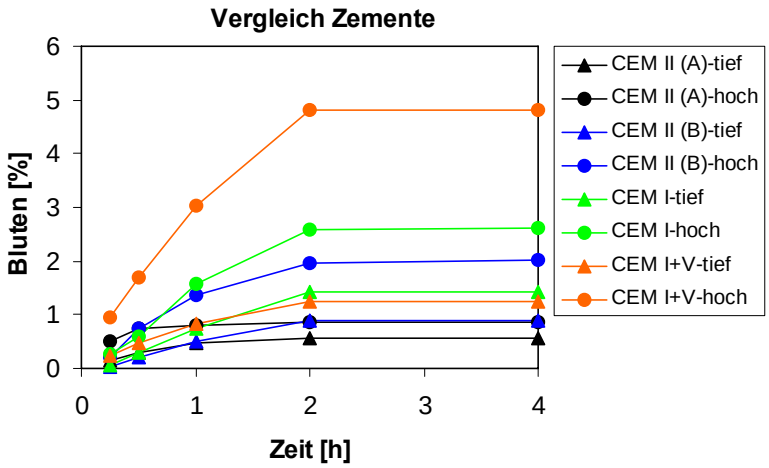
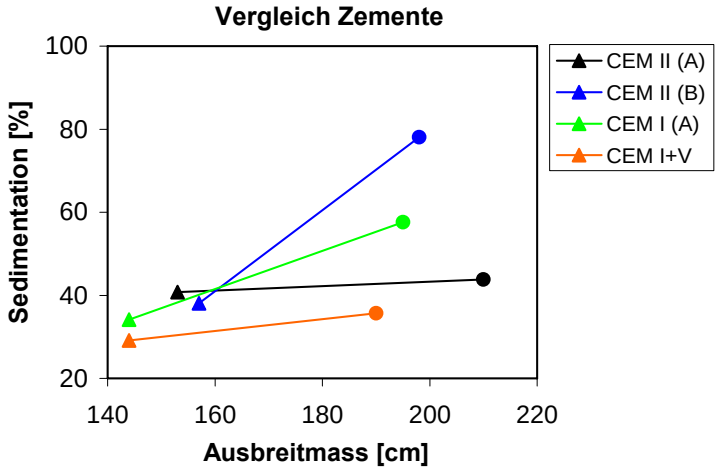


Abbildung 7: Bluten der Mörtel auf Basis der verschiedenen Zemente bei tiefem ("tief") und hohem ("hoch") Ausbreitmass.



Abbildungen 8: Sedimentieren der Mörtel auf Basis der verschiedenen Zemente bei tiefem und hohem Ausbreitmass.

4.2.3 Einfluss der Mörteltemperatur

Eine Erhöhung der Mörteltemperatur von 20 auf 37 °C bewirkt keine prinzipiellen Unterschiede bezüglich Bluten und Sedimentation (Abb. 9-11). Bei einer Temperatur von ~8 °C steigt das Bluten sowohl bei Mörtelmischungen ohne als auch mit Fliessmittel stark an. Auch beim Sedimentieren ist eine ansteigende Tendenz festzustellen.

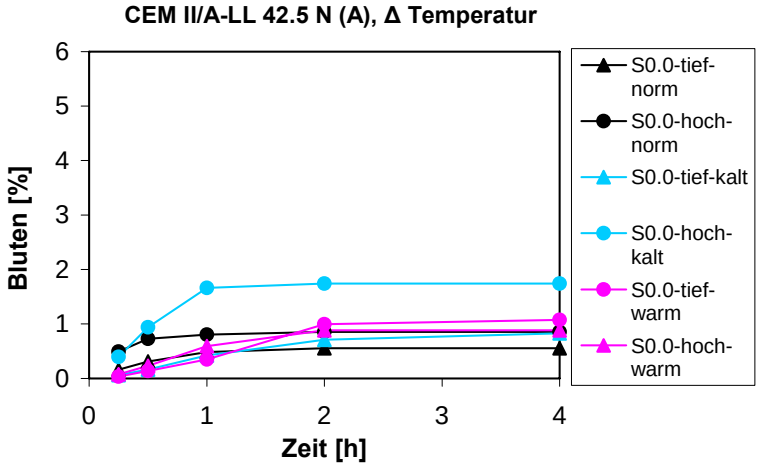


Abbildung 9: Einfluss der Temperatur auf das Bluten der Mörtelmischungen ohne Fliessmittel.

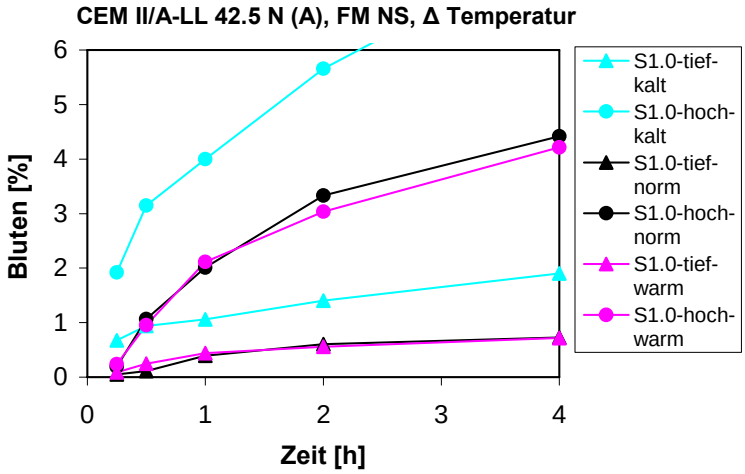


Abbildung 10: Einfluss der Temperatur auf das Bluten der Mörtelmischungen mit Fliessmittel.

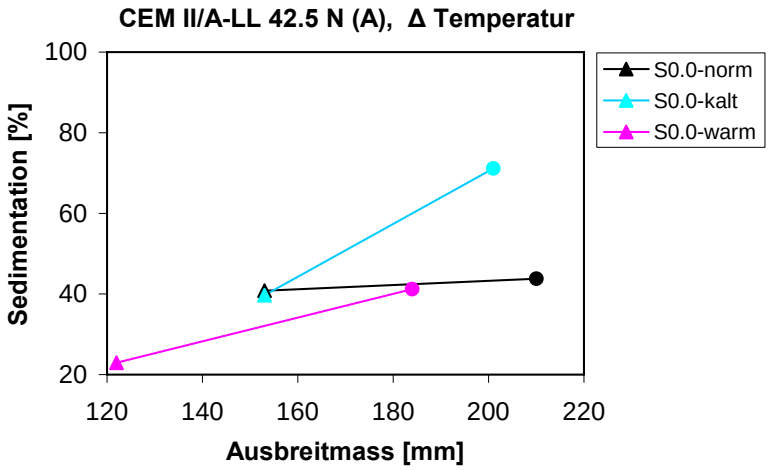


Abbildung 11: Einfluss der Temperatur auf das Entmischen der Mörtelmischungen ohne Fliessmittel.

4.2.4 Einfluss der Fliessmitteldosierung

Die Mörtelmischungen mit Fliessmittel (Abb. 12) bluten deutlich stärker als die Referenzmischungen ohne Fliessmittel (Abb. 5). Die Sedimentation hingegen wird nur geringfügig erhöht (Abb. 13). Die Dosierung der Fliessmittel scheint beim Bluten keine Rolle zu spielen. Die Mörtelmischung mit der höchsten Dosierung an Fliessmittel sedimentiert deutlich weniger als die Mischungen mit tieferen Dosierungen.

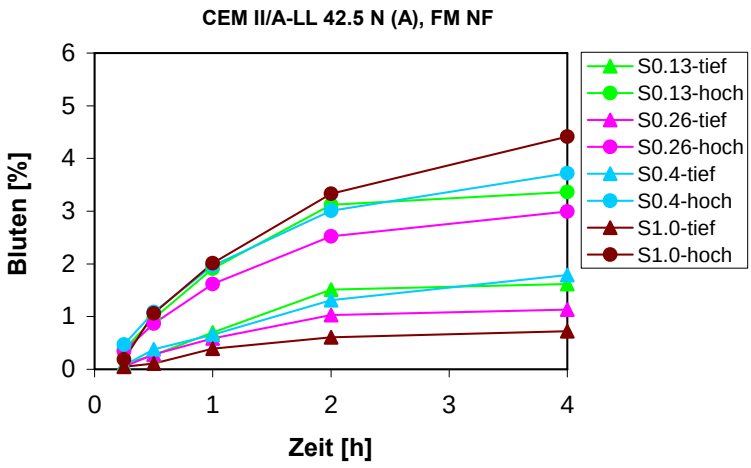


Abbildung 12: Einfluss der Dosierung des Fliessmittels NF auf das Bluten bei Mörtelmischungen mit tiefem und hohem Ausbreitmass.

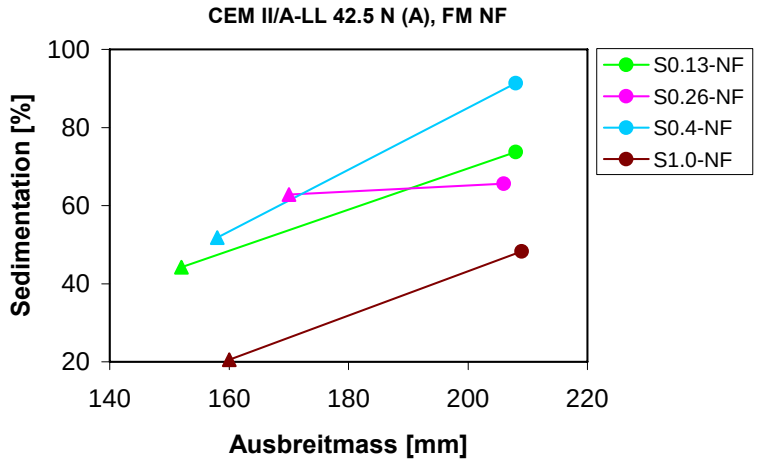


Abbildung 13: Einfluss der Dosierung des Fliessmittels NF auf die Sedimentation bei Mörtelmischungen mit tiefem und hohem Ausbreitmass.

4.2.5 Einfluss des Fliessmitteltyps

Die Auswirkungen der verwendeten Fliessmittel sind relativ gering (Abb. 14). Während beim tiefen Ausbreitmass das Fliessmittel PC1 zum stärksten Bluten führt, verzeichnen die Mörtelmischungen mit dem Fliessmittel PC2 bei hohem Ausbreitmass die höchsten Messwerte. Bei allen Zementen sind dieselben relativen Unterschiede zwischen den Fliessmitteln zu verzeichnen. Alle Mörtelmischungen mit einer Fliessmittel-Dosierung von S1.0 bluten im Zeitintervall von 2 bis 4 h stärker als die Mischungen ohne Fliessmittel. Bei der Sedimentation sind keine systematischen Differenzen vorhanden (Abb. 15). Allerdings gilt es zu bemerken, dass die Mörtelmischungen mit den Fliessmitteln weniger stark sedimentieren als die Mischungen ohne Fliessmittel.

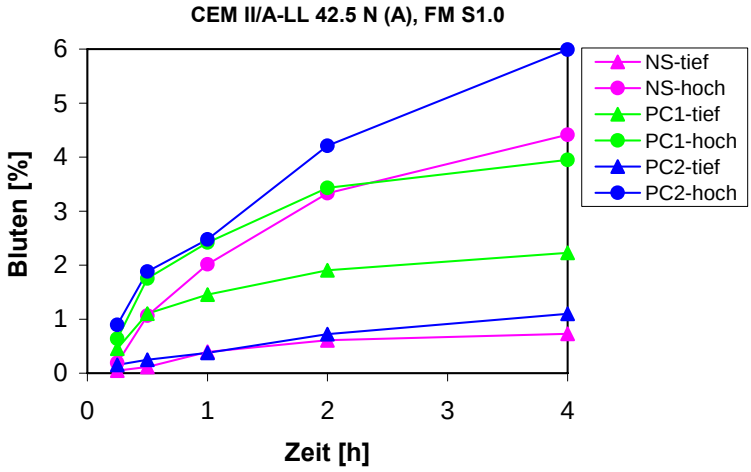


Abbildung 14: Einfluss des Fliessmitteltyps auf das Bluten von Mörtelmischungen mit tiefem und hohem Ausbreitmass.

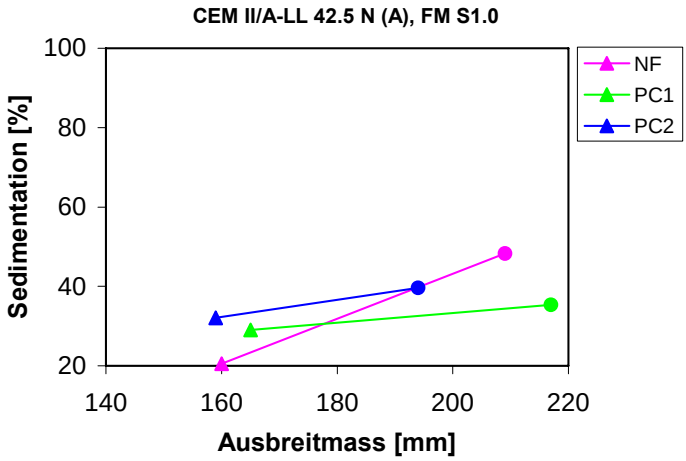


Abbildung 15: Einfluss des Fliessmitteltyps auf die Sedimentation von Mörtelmischungen mit tiefem und hohem Ausbreitmass.

4.2.6 Einfluss der Kombination Zement-Fliessmittel

Die verschiedenen Kombinationen von Zement und Fliessmittel weisen Differenzen bezüglich Bluten und Sedimentation auf (Abb. 16 und 17). Während die Mörtelmischungen mit beiden CEM II/A-LL 42.5 N gleich bluten, liegen die Werte für die Mörtelmischungen hergestellt mit CEM I 42.5 N + V, leicht höher, diejenigen mit CEM I 42.5 N deutlich höher. Die Unterschiede bei der Sedimentation sind klein. Die Mörtelmischungen mit CEM II/A-LL 42.5 N (A) sedimentieren leicht stärker als die anderen Mischungen. Es fällt auf, dass die Mörtelmischung mit CEM I 42.5 N am stärksten blutet, während bei den Mischungen ohne Fliessmittel diejenige mit CEM I 42.5 N + V das stärkste Bluten aufwies.

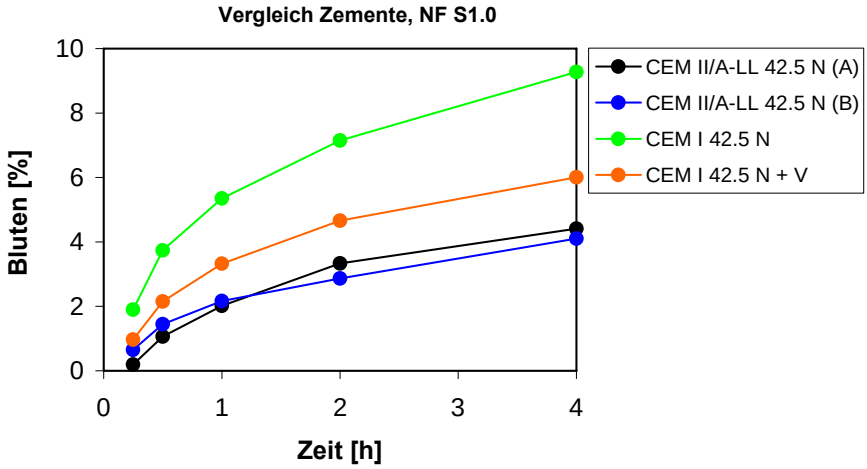


Abbildung 16: Einfluss des Zementes auf das Bluten bei Mörtelmischungen mit hohem Ausbreitmass und der Verwendung des Fliessmittels NF in der Höhe des Sättigungsgrades (Achtung: Skalierung der y-Achse von 6 auf 10 erweitert).

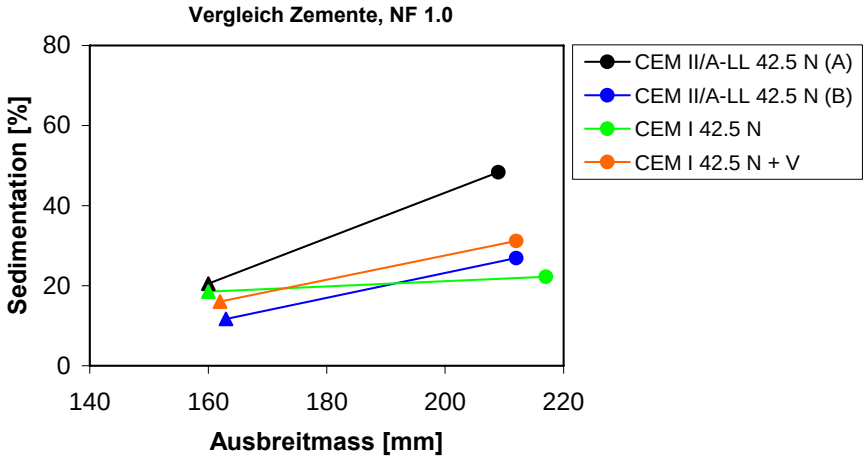


Abbildung 17: Einfluss des Zementes auf die Sedimentation bei Mörtelmischungen mit hohem Ausbreitmass und der Verwendung des Fliessmittels NF in der Höhe des Sättigungsgrades (Achtung: Skalierung der y-Achse von 20-100 auf 0-80 geändert).

4.2.7 Sichtflächen der Mörtelprismen

Die Oberflächen der Mörtelprismen wurden photographiert (s. Anhang), aber nicht quantitativ ausgewertet. Die meisten Prismen weisen tadellose Oberflächen auf (wie im Anhang, Abb. A2 gezeigt). Es fällt auf, dass die Oberflächen hauptsächlich bei Mörtelmischungen mit einer hohen Fliessmitteldosierung von S1.0 Unregelmässigkeiten in Form von Poren, Farbdifferenzen oder gar Blutungskanälen aufweisen. Zudem sind fast ausschliesslich Mischungen mit plastischer Konsistenz betroffen. Durch starkes Bluten bilden sich an er Oberfläche Blutungskanäle und zum Teil Wasserporen mit Feinanteilen. Die Mörtelmischungen hergestellt mit CEM I 42.5 N (mit und ohne Flugasche) weisen deutlich mehr solcher Mängel auf als die Mischungen hergestellt mit CEM II/A-LL 42.5 N (A + B). Dies ist ein Hinweis darauf, dass der verwendete Zement zwar nicht entscheidend für die Menge des gebluteten Wasser ist, aber trotzdem massgebend für die Erscheinung der Sichtfläche sein kann.

Im Anhang sind Bilder von Mörtelprismen enthalten, die unregelmässige Oberflächen aufweisen (Ausnahme Abb. A2). Die obersten und untersten 1.5 cm der Prismen fehlen jeweils, da sie zur Bestimmung der Sedimentation verwendet wurden. Links befinden sich immer die drei Prismen mit der steifen Konsistenz, rechts diejenigen mit der plastischen Konsistenz.

4.3 Beton

4.3.1 Einfluss des w/z, des Ausbreitmasses, der Verdichtungsdauer und von Luftporenmittel

Die Betonmischung mit dem höheren w/z respektive dem höheren Ausbreitmass weist sowohl ein stärkeres Bluten als auch ein höheres Entmischungsmass auf (Abb. 18 und 19). Die Verdichtungsdauer wirkt sich auf das Bluten nicht aus oder verringert es sogar, während das Entmischungsmass mit der Verdichtungsdauer ansteigt. Der Einsatz eines Luftporenmittels beeinflusst das Bluten nicht, erhöht das Entmischungsmass aber wesentlich.

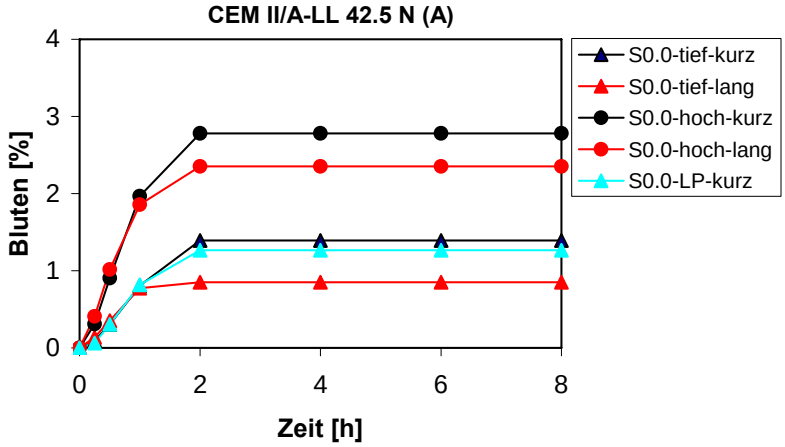


Abbildung 18: Einfluss der Verdichtungsdauer ("kurz", "lang"), des Ausbreitmasses respektive des w/z ("tief", "hoch") sowie eines Luftporenmittels auf das Bluten von Beton.

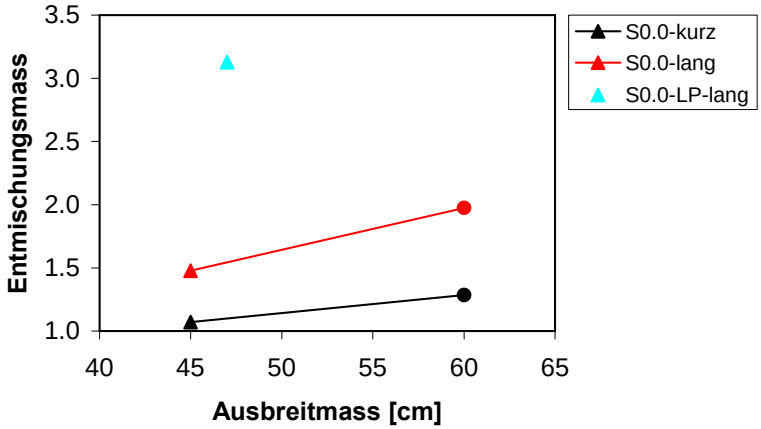


Abbildung 19: Einfluss der Verdichtungsdauer ("kurz", "lang"), des Ausbreitmasses respektive des w/z ("tief", "hoch") sowie eines Luftporenmittels auf das Entmischungsmass von Beton.

4.3.2 Einfluss der Zemente

Die Betonmischungen hergestellt mit CEM II/A-LL 42.5 N (A + B) weisen ein tieferes Bluten auf als die Mischungen hergestellt mit CEM I 42.5 N (mit und ohne Flugasche / Abb. 20). Wird das Leimvolumen bei der Betonmischung mit CEM II/A-LL 42.5 N (A) um 25 l/m^3 erhöht, steigt das Bluten an. Alle Betonmischungen bluten im Zeitintervall von 6 zu 8 h immer noch (s. auch Kapitel 4.3.3). Das Entmischungsmass ist bei allen Betonmischungen als hoch zu bezeichnen (Abb. 21).

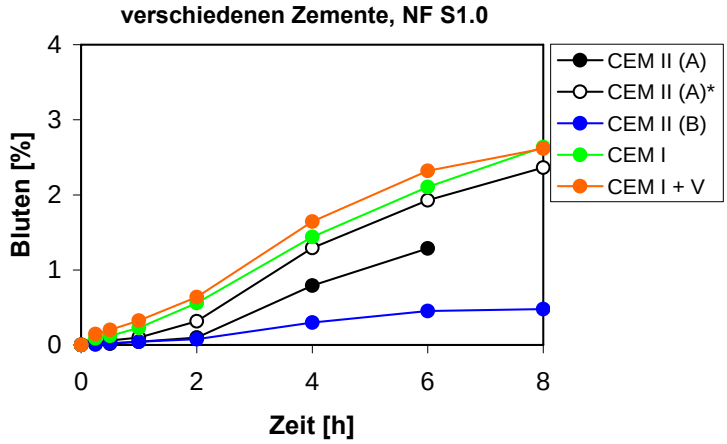


Abbildung 20: Bluten von Betonmischungen hergestellt mit unterschiedlichen Zementen und einer Naphtalinsulfonat-Dosierung auf der Höhe des Sättigungspunktes. Die Betonmischung* weist ein um 25 l/m^3 höheres Zementleimvolumen auf als die anderen in der Abbildung dargestellten Mischungen.

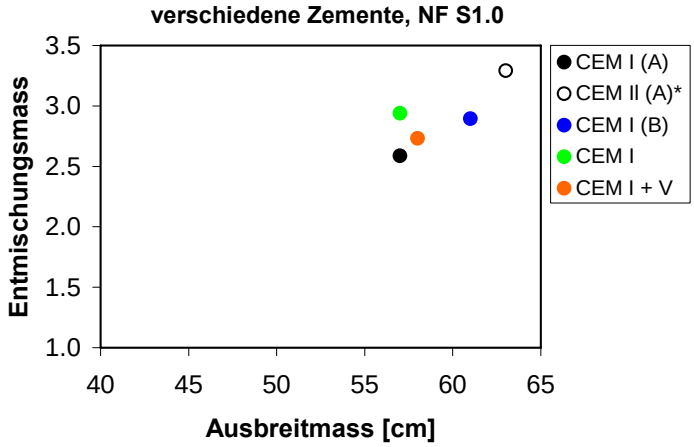


Abbildung 21: Entmischungsmass von Betonmischungen hergestellt mit unterschiedlichen Zementen und einer Naphtalinsulfonat-Dosierung auf der Höhe des Sättigungspunktes.

4.3.3 Einfluss der Fliessmitteldosierung und des Fliessmitteltyps

Der Einsatz von Fliessmitteln beeinflusst den zeitlichen Verlauf des Blutens (Abb. 22 und 23). Während die Betonmischung ohne Fliessmittel bereits in der ersten halben Stunde einen wesentlichen Teil Wasser absondern, ist die Menge bei den Mischungen mit Fliessmitteln deutlich geringer. Dafür stoppt das Bluten bei der Betonmischung ohne Fliessmittel bereits nach zwei Stunden, bei den Mischungen mit einer Fliessmitteldosierung von S0.4 bei 4 Stunden und bei den Mischungen mit einer Fliessmitteldosierung S1.0 wird bei einer Zeit von 6 bis 8 h nach der Herstellung immer noch Wasser abgesondert. Dieses Verhalten ist auf die verzögernde Wirkung der Fliessmittel zurückzuführen. Die Messwerte für das Bluten liegen bei den Betonmischungen ohne Fliessmittel und mit einer Dosierung von S0.4 im selben Bereich. Das Bluten der Betonmischungen mit einer Fliessmitteldosierung von S1.0 kann nicht abschliessend beurteilt werden, weil die Messdauer von 8 h nicht ausreichte (s. Kap. 4.3.2), um alles abgesonderte Wasser zu erfassen. Es ist keine Erhöhung des Entmischungsmasses durch den Einsatz der Fliessmittel zu beobachten (Abb. 24).

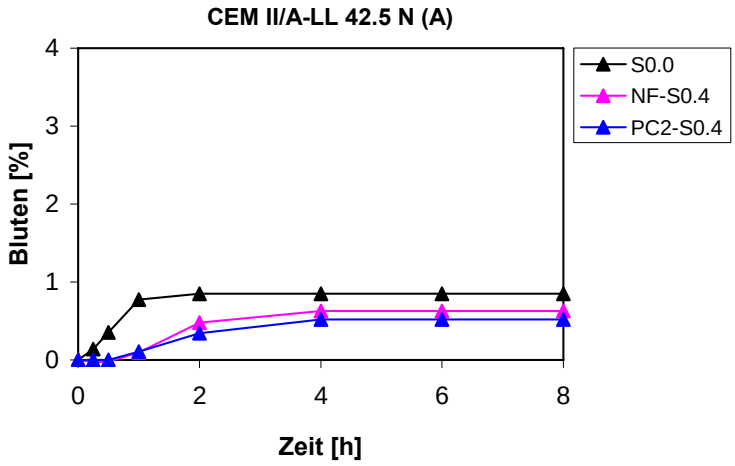


Abbildung 22: Bluten von Betonmischungen ohne und mit Fliessmittel und tiefem Ausbreitmass.

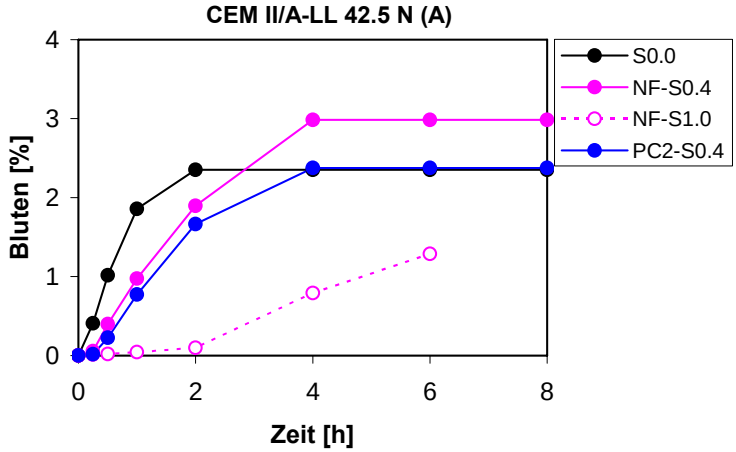


Abbildung 23: Bluten von Betonmischungen ohne und mit Fliessmittel und hohem Ausbreitmass.

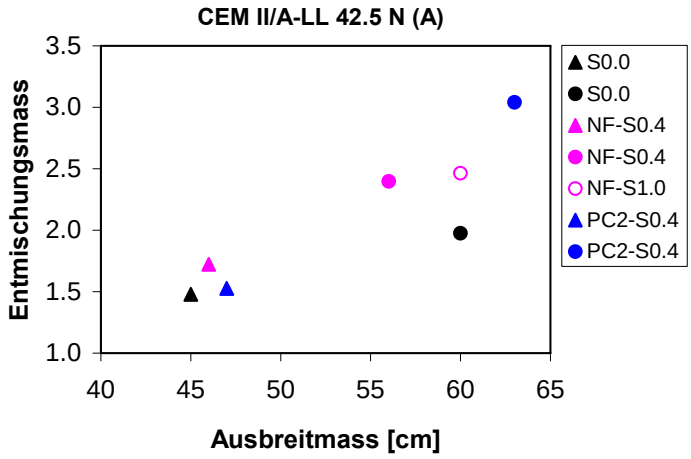


Abbildung 24: Entmischungsmass von Betonmischungen mit unterschiedlichem Ausbreitmass und unterschiedlicher Fliessmitteldosierung.

4.3.4 Einfluss der Betontemperatur

Die Reduktion der Betontemperatur von 20°C auf 5°C führt bei den Betonmischungen ohne Fliessmittel und mit einer Naphtalinsulfonat-Dosierung von S0.4 zu einem wesentlichen Anstieg des Blutens (Abb. 25). Innerhalb des gemessenen Zeitintervalls von 8 h zeigt die kältere Betonmischung mit einer Naphtalinsulfonat-Dosierung von S1.0 ein tieferes Bluten als die wärmere Mischung. Allerdings ist bei beiden Betonmischungen mit dieser hohen Fliessmittel-Dosierung immer noch ein Bluten im Zeitintervall von 4 bis 6 h vorhanden. Die Menge des abgesonderten Wassers konnte bei diesen Mischungen also nicht erfasst werden. Ein Ansteigen des Entmischungsmasses mit tieferer Temperatur lässt sich nicht feststellen, respektive lässt sich nicht vom Anstieg des Ausbreitmasses trennen (Abb. 26).

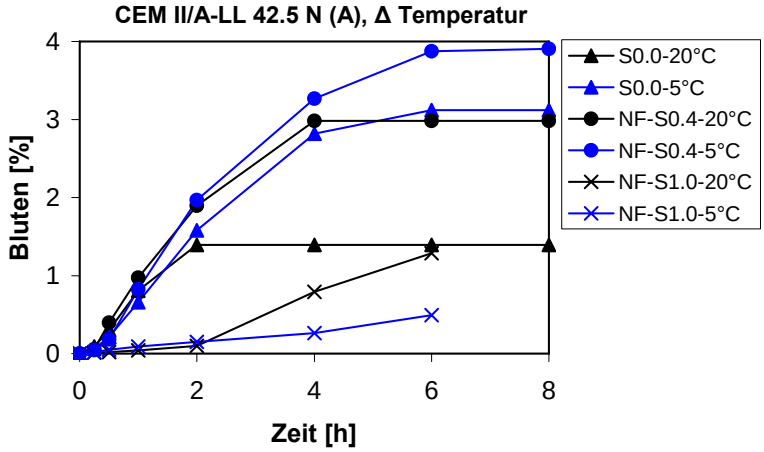


Abbildung 25: Einfluss der Temperatur auf das Bluten von Betonmischungen mit unterschiedlicher Fliessmitteldosierung.

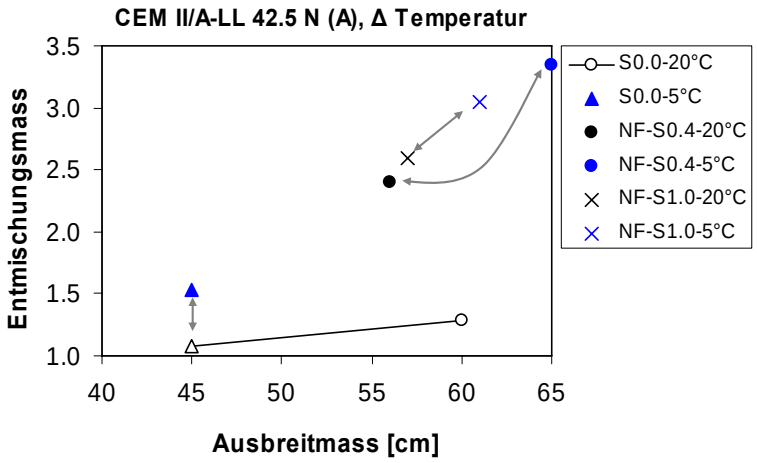


Abbildung 26: Einfluss der Temperatur auf das Entmischungsmass von Betonmischungen mit unterschiedlichen Fliessmitteldosierungen. Die Pfeile kennzeichnen die Zunahme des Entmischungsmasses durch die Erhöhung des Ausbreitmasses respektive die Reduktion der Betontemperatur.

5 Diskussion

5.1 Mörtelversuche

Bei den Mörtelversuchen zeigt sich, dass das Bluten durch verschiedene Faktoren massgeblich vergrössert werden kann:

- Ausbreitmass (ohne Fliessmittel: +50-280%, mit Fliessmittel: 50-550%)
- Einsatz von Fliessmitteln (+400%)
- Temperatur (+100%)
- Verdichtungsdauer (+50-60%)

(Die Angaben in % beziehen sich immer auf die Mischung ohne Fliessmittel steifer Konsistenz, die mit dem Standardzement hergestellt wurde.)

Aus den Versuchsergebnissen kann geschlossen werden, dass die Verarbeitbarkeit der wichtigste Faktor bezüglich des Blutens von Mörtel ist.

Ein Anstieg des Blutens durch den Einsatz von Fliessmitteln ist vor allem bei plastischen Mörtelmischungen zu verzeichnen. Bei den Auswirkungen der verwendeten Fliessmittel bestehen keine massgeblichen Unterschiede.

Ebenfalls von grosser Wichtigkeit ist die Temperatur. Tiefe Temperaturen erhöhen auch das Bluten von Mörtelmischungen, die bereits hohe Werte (plastische Konsistenz, Einsatz von Fliessmitteln) aufweisen.

Die Verdichtungsdauer wirkt sich zwar ebenfalls auf das Bluten aus, ist aber im Vergleich zu den anderen Faktoren von relativ geringer Wichtigkeit.

Das Bluten weist auch einen Zusammenhang mit dem verwendeten Zement auf. Zwischen den Zementen zeigen sich vor allem bei den Mörtelmischungen ohne Fliessmittel Differenzen (90-470%), wobei der CEM I 42.5 N leicht stärker zum Bluten neigt (speziell in Kombination mit Flugasche) als die beiden CEM II/A-LL 42.5 N. Bei Mörtelmischungen mit Fliessmittel sind diese Unterschiede weniger ausgeprägt (90-130%). Allerdings blutet auch hier der CEM I 42.5 stärker als die beiden CEM II/A-LL 42.5 N. Da die absoluten Werte bei den Mörtelmischungen ohne Fliessmittel im Vergleich zu den Mischungen mit Fliessmitteln relativ tief liegen, dürften die Unterschiede zwischen den Zementen kaum praxisrelevant sein. Hingegen zeigt die qualitative Auswertung der Sichtflächen der hergestellten Mörtelmischungen, dass Helligkeitsdifferenzen beim CEM I 42.5 N häufiger auftreten als beim CEM II/A-LL 42.5 N.

Bei der Auswertung der Messwerte wird das Bluten immer als Anteil des Gesamtwassers und nicht als absolute Wassermenge angegeben. Bei einer Mörtelmischung mit tiefem w/z ist die absolute, durch Bluten abgesonderte Wassermenge also kleiner als bei einer Mischung mit hohem w/z, wenn das relative Bluten identisch ist. Aus dieser Sichtweise muss der Einfluss der Fliessmittel auf das Bluten etwas abgeschwächt werden, da diese Mörtelmischungen immer einen relativ tiefen w/z aufweisen. Andererseits gewinnt der Einfluss der Verarbeitbarkeit zusätzlich an Gewicht. Wird bei einer Mischung ein höheres Ausbreitmass durch eine w/z-Erhöhung erzielt, steigt mit dem relativen Bluten das absolute Bluten überproportional an. Dies trifft natürlich nicht nur auf den Mörtel sondern auch auf den Beton zu (s. Kap. 5.2).

Die Sedimentation ist in erster Linie abhängig von der Verarbeitbarkeit: steigt das Ausbreitmass an, sedimentiert der Mörtel bei der Verdichtung auch mehr. Ein leichter Anstieg der Sedimentation ist auch bei einer Reduktion der Mörteltemperatur zu beobachten. Bei hohen

Fliessmitteldosierungen und konstantem Ausbreitmass nimmt die Sedimentation ab. Dies kann vermutlich auf die höhere Viskosität der Mörtelmischungen aufgrund des tiefen w/z zurückgeführt werden.

5.2 Betonversuche

Das Bluten von Beton wird durch folgende Faktoren vergrössert:

- Ausbreitmass (ohne Fliessmittel: +100 bis +300%)
- Einsatz von Fliessmitteln (-30 bis +20%)
- Temperatur (+25 bis +100%)

Von den untersuchten Faktoren beeinflusst die Verarbeitbarkeit das Bluten am stärksten (Abb. 27).

Die Fliessmittel und Luftporenmittel beeinflussen das Bluten nicht wesentlich. Die Mischungen mit Fliessmittel liegen in der Streubreite der Mischungen ohne Fliessmittel. Es war allerdings nicht möglich, das Bluten der Betonmischungen mit einer Fliessmitteldosierung von S1.0 zu bestimmen, da der Beton wegen der verzögernden Wirkung der Fliessmittel auch nach Abschluss der Messdauer (8h) noch blutete.

Die Betontemperatur ist nach der Verarbeitbarkeit der wichtigste Faktor hinsichtlich Bluten. Eine tiefe Betontemperatur kann das Bluten wesentlich verstärken.

Bei den gewählten Zeitspannen für das Verdichten ist keine Zunahme des Blutens mit der Verdichtungsdauer zu beobachten. Beobachtungen an Sichtbetonflächen von Bauwerken weisen allerdings darauf hin, dass das Bluten mit übermässigem Verdichten mindestens lokal zunehmen kann.

Die Betonmischungen hergestellt mit CEM II/A-LL 42.5 N bluten bei gleichem Zementleimvolumen tendenziell weniger als die Betonmischungen hergestellt mit CEM I 42.5 N.

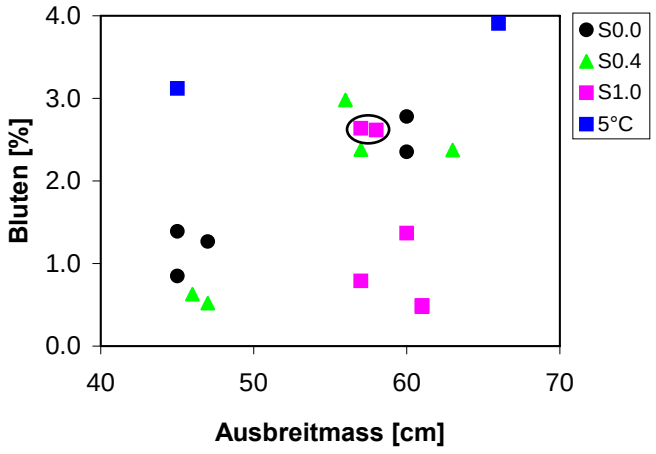


Abbildung 27: Bluten in Abhängigkeit des Ausbreitmasses. Bei den eingekreisten Punkten handelt es sich um eine Mischung hergestellt mit CEM I 42.5 N respektive CEM I 42.5 N + V.

Das Bluten des Betons scheint auch durch das Zementleimvolumen beeinflusst zu werden. Bei einer konstanten Zementdosierung, wie sie im vorliegenden Projekt verwendet wurde, nimmt das Zementleimvolumen mit sinkenden w/z ab. Entsprechend weisen die Betonmischungen mit Fliessmitteln ein kleineres Zementleimvolumen auf als solche ohne Fliessmittel. Eine Erhöhung des Zementleimvolumens bei einer Betonmischung mit einer Fliessmitteldosierung von S1.0 führte zu einer Zunahme des Blutens. Wenn das Zementleimvolumen unter einen bestimmten Wert sinkt,

ist es offenbar möglich, dass die Gesteinskörnung ein korngestütztes Gefüge bildet, was vermutlich zu einer Druckentlastung im Zementleim und einer Verringerung des Blutens führt.

Das Entmischungsmass nimmt mit steigendem Ausbreitmass (Abb. 28) und dem Einsatz von Luftporenmittel zu. Fliessmittel und Temperatur haben keinen wesentlichen Einfluss auf die Sedimentation (s. auch Leemann et al., 2006).

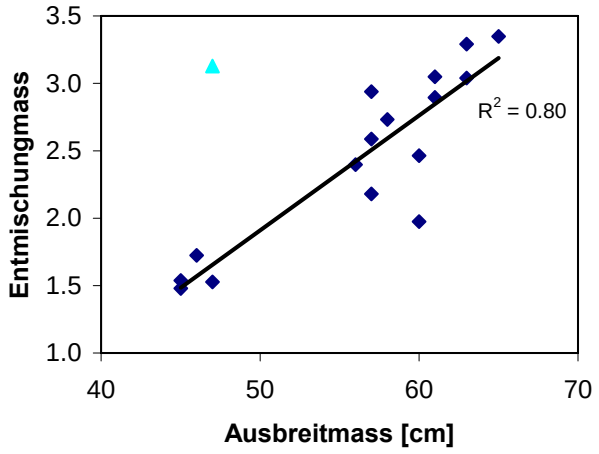


Abbildung 28: Entmischungsmass von Betonmischungen, die für 60 s verdichtet wurden. Bei der als Dreieck aufgetragenen Mischung wurde ein Luftporenmittel verwendet. Diese Mischung wurde für die Korrelation nicht berücksichtigt.

5.3 Vergleich Mörtel- und Betonversuche

Verarbeitbarkeit und Temperatur wirken sich bezüglich des Blutens von Mörtel und Beton gleich aus. Bei diesen beiden Parametern ist die Vergleichbarkeit zwischen Mörtel und Beton gewährleistet. Ganz anders verhält es sich bei den Fliessmitteln: beim Mörtel verstärkt ihr Einsatz das Bluten wesentlich, beim Beton ist keine Veränderung des Blutens festzustellen. Der Grund für diese Differenz ist nicht klar. Vermutlich hängt sie mit der unterschiedlichen Scherung von Mörtel und Beton während des Mischvorgangs zusammen: der Zementleim des Betons ist beim Mischen höheren Scherkräften ausgesetzt als der Mörtel. Entsprechend ist es möglich, dass die Feinanteile besser dispergiert sind und sich Fliessmittel nicht mehr wesentlich aufs Bluten auswirken. Des Weiteren gibt es noch drei andere Punkte, die bei dem Vergleich zwischen Mörtel und Beton genauer betrachtet werden müssen:

- Das Bluten (in % des Anmachwassers) ist beim Beton tiefer als beim Mörtel. Offenbar kann das Wasser im Mörtel besser aufsteigen als im Beton. Der massgebende Grund dürfte beim höheren Zementleimvolumen der Mörtel liegen, das ein schnelleres Aufsteigen des Wassers ermöglicht. Des Weiteren kann der Korndurchmesser der Gesteinkörnung eine Rolle spielen: die grossen Gesteinskörner im Beton können für das aufsteigende Wasser wie Barrieren wirken.
- Während beim Mörtel Mischungen mit einer hohen Fliessmitteldosierung weniger stark sedimentieren als Mischungen ohne Fliessmittel, ist es beim Beton genau umgekehrt. Dieser Unterschied kann mit der Art des Verdichtens zusammenhängen. Der Mörtel wurde auf dem Vibriertisch verdichtet, der Beton mit dem Innenvibrator. Eventuell fördert der Innenvibrator die Sedimentation stärker. Zudem sinken grosse Körner nach dem Gesetz von Stokes schneller ab als kleine. Die Sandkörner im Mörtel sind möglicherweise zu klein, um zu einer wesentlichen Entmischung zu führen. Des Weiteren muss beachtet werden, dass die Anreicherung von Feinanteilen respektive Grobanteilen im Mörtel indirekt aufgrund von Differenzen in den mit Wasser füllbaren Poren bestimmt wird. Dem gegenüber beruht

das Entmischungsmass beim Beton auf einer direkten Bestimmung der Masse an Feinanteilen < 2 mm.

5.4 Korrelation mit den Ergebnissen des Projektes SB3

Im Projekt SB3 wurden zuwenig unterschiedliche Betonmischungen untersucht, um eine gesicherte Korrelation zwischen Bluten/Sedimentation und der Qualität der Sichtbetonflächen zu ermöglichen. Trotzdem gibt es gewisse Hinweise über einen solchen Zusammenhang.

Die Flächen mit der tiefsten Standardabweichung der Helligkeit wurden mit Betonmischungen erzielt, deren Ausbreitmass im Bereich von 50-60 cm lag (Ausbreitmass-Klasse nach EN 206-1: F4 und F5) und relativ wenig bluteten. Hohe Standardabweichungen resultieren bei Betonmischungen, die entweder stark bluten oder relativ steif sind und nicht entmischen.

Aus diesen Beobachtungen lässt sich die Hypothese ableiten, dass ein gewisser Partikelfluss an der Schalfläche zu einer kleinen Standardabweichung der Helligkeit führt. Diese Hypothese wird gestützt durch die Beobachtung, dass bei steifen Mischungen eine Verlängerung der Verdichtungsdauer zu gleichmässigeren Flächen führt. Ist die Teilchenbewegung allerdings so gross, dass eine Fraktionierung eintritt, wie das bei starkem Bluten der Fall ist, steigt die Standardabweichung der Helligkeit wieder an.

Beim Projekt SB3 hat die Verwendung von CEM I 42.5 N nicht zu einer messbaren Erhöhung der Standardabweichung der Helligkeit geführt. Andererseits steht das vermehrte Auftreten von Sichtflächen unregelmässiger Helligkeit bei den Mörtelprismen (qualitative Beurteilung) eindeutig im Zusammenhang mit dem Einsatz von CEM I 42.5 N (mit und ohne Flugasche). Auch wenn dies durch quantitative Daten nicht abgestützt ist, scheint die Verwendung von CEM II/A-LL 42.5 N das Potential für Helligkeitsdifferenzen der Sichtflächen gegenüber CEM I 42.5 N zu reduzieren.

Literatur

Collepardi M. (1998) Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete, Cement and Concrete Composites 20, 103-112.

EN 1015-3 (1999) Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch).

EN 196-1 (2005) Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit.

EN 480-4 (2005) Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Prüfverfahren - Teil 4: Bestimmung der Wasserabsonderung des Betons (Bluten).

Flatt R.J., Houst Y. (2001) A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. Cement and Concrete Research 31, 1169-1176.

Hanehara S., Yamada K. (1999) Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology, Cement and Concrete Research 29, 1159-1165.

Jiang S., Kim B.G. Aïtcin, P.C. (1999) Importance of adequate soluble alkali content to ensure cement/superplasticizer compatibility, Cement and Concrete Research, 29/1, 71-78.

Jolicoer C., Simard M.-A. (1998) Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts, Cement and Concrete Composites 20, 87-101.

Kinoshita M., Nawa T., Iida M., Ichiboji H. (2000) Effect of chemical structure on fluidizing mechanism of concrete superplasticizer containing polyethylene oxide graft chains, Proceedings 6th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Admixtures. Nice/France. 10-13 October 2000: ACI Special Publication 195, 163-179.

Kreppelt F., Weibel M., Zampini D., Romer M. (2002) Influence of solution chemistry on the hydration of polished clinker surfaces - a study of different types of polycarboxylic acid-based admixtures. Cement and Concrete Research 32, 187–198.

Leemann, A., Schlumpf, J., Germann, A. (2006) Massvolles Verdichten. Der Bauingenieur, 2, 34-40.

Leemann, A., Winnefeld, F. (2007): The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete. Cement and Concrete Composites, 29, 5, 341-349.

Mollah M.Y.A., Adams W.J., Schennach R., Cocke D.L. (2000) A review of cement - superplasticizer interactions and their models, Advances in Cement Research 12, 153-161.

Neville, A. M. (1995) Properties of concrete (4th edition) Longman, Essex, 1995.

Olbrecht H.P. (1997): Einfluss des Vibrierens auf die Festbeton-Eigenschaften. Schweizer Baublatt Nr. 63/64/1997, Seite 4-7.

Olbrecht H.P., Moser K. (2004): Entmischung von Beton durch Überverdichtung, tec 21 44, 13-16.

Plank J., Vlad D., Brandl P., Chatziagorastou P. (2005): Colloidal chemistry examination of the steric effect of polycarboxylate superplasticizer, Cement International 3, 100-110.

Prince W., Edwards-Lajnef M., Aïtcin P.C. (2002) Interaction between ettringite and a polynaphthalene sulfonate superplasticizer in a cementitious paste. Cement and Concrete Research, 32/1, 79-85.

RILEM Recommendation MR-6 (1982) Tendency of water to seperate from mortars (bleeding).

Stark J., Möser B., Eckart A. (2001), New approaches to cement hydration, ZKG International 54, 52-60 (Teil 1) und 114-119 (Teil 2).

Svermova Lucie, Sonebi M., Bartos P.J.M. (2003) Influence of mix proportions on rheology of cement grouts containing limestone powder. Cement & Concrete Composites 25, 737-749.

Uchikawa H., Hanehara S., Sawaki D. (1997) The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture, Cement and Concrete Research 27, 37-50.

Vikan H., Justnes H., Winnefeld F. (2005) The importance of cement type on flow resistance of cement paste, 2nd North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete & 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Chicago, Illinois, October 30 – November 2, 2005, Vol. 1, 167-172.

Winnefeld F., Becker S., Pakusch J., Götz T., Kaufmann, J. (2005): Struktur-Wirkungsbeziehungen von Polycarboxylatether – Fliessmitteln, 7. GDCH-Tagung Bauchemie, Berlin, 29.-30. September 2005, GDCh-Monographie Band 35, 330-335.

Winnefeld F., Peters A. M. (2003): Einfluss von Fliessmitteln auf die Rheologie und den Hydratationswärmefluss von Zementleimen, 5. GDCh-Tagung BAUCHEMIE, München, 9.-10. Oktober 2003, GDCh-Monographie Bd. 27, 163-169.

Winnefeld F.; Becker S.; Pakusch J.; Götz T. (2006): Polymer structure / concrete property relations of HRWRA, Proceeding 8th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, 31. Mai – 3. Juni, Montreal, Canada, 159-177.

Winnefeld, F.; Becker, S.; Pakusch, J.; Götz, T.(2007a): Effects of the molecular architecture of comb-shaped superplasticizers on their performance in cementitious systems, Cement and Concrete Composites 29, 251-262.

Winnefeld, F.; Zingg, A.; Holzer, L.; Figi, R.; Pakusch, J.; Becker, S. (2007b): Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers and cements: Influence of polymer structure and C_3A-content of cement, 12th International Congress on the Chemistry of Cement, Montreal, Canada, July 8-13, paper M6-03.2.

Yamada K., Ogawa S., Hanehara S. (2001) Controlling the adsorption and dispersing forces of polycarboxylate-type superplasticizer by sulphate ion concentration in aqueous phase, Cement and Concrete Research 31, 375-383.

Yamada K., Takahashi T., Hanehara S., Matsuhisa M. (2000) Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer, Cement and Concrete Research 30, 197-207.

Yoshioka K., Tazawa E., Kawai K., Enohata T. (2001) Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals. Cement and Concrete Research 32 (10), 1507-1513.

Anhang

Die drei Prismen auf der linken Seite wiesen im frischen Zustand ein tiefes, die Prismen rechts ein hohes Ausbreitmass auf.

Abbildung A1: CEM II/A-LL 42.5 N (A), NF-S1.0.

Abbildung A2: CEM II/A-LL 42.5 N (A), PC1-S1.0.

Abbildung A3: CEM II/A-LL 42.5 N (A), PC2-S1.0.

Abbildung A4: CEM II/A-LL 42.5 N (A), NF-S1.0, 37 °C.

Abbildung A5: CEM II/A-LL 42.5 N (B), NF-S1.0.

Abbildung A6: CEM I 42.5 N, NF-S1.0.

Abbildung A7: CEM I 42.5 N, PC1-S1.0.

Abbildung A8: CEM I 42.5 N, PC2-S1.0.

Abbildung A9: CEM I 42.5 N + V, NF-S1.0.

Abbildung A10: CEM I 42.5 N + V, PC2-S1.0.

Abbildung A11: CEM I 42.5 N + V, PC2-S1.0.

Mischung	SB-1	SB-1*	SB-1 5°C	SB-3	SB-5	SB-5.1	SB-5 5°C	SB-10	SB-10*	SB-11	SB-12	SB-13	SB-14	SB-15	SB-16	SB-17	SB-18	SB-19	SB-20
CEM II/A-LL 42.5 N (A) [kg/m^3]	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	-	-	-	320	360	320	320
CEM II/A-LL 42.5 N (B) [kg/m^3]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	320	-	-	-	-	-	-
CEM I 42.5 N [kg/m^3]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	320	272	-	-	-	-
Zusatzstoff V [kg/m^3]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48	-	-	-	-
w/z	0.50	0.58	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.58	0.58	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.42	0.50	0.41	0.46	0.46
NF [kg/m^3]	-	-	-	-	1.92	1.92	1.92	-	-	4.64	-	4.64	4.64	4.64	4.64	-	5.22	1.92	-
PC2 [kg/m^3]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.8	-	-	-	-	1.92	-	-	1.92
LP-Bildner [kg/m^3]	-	-	-	1.28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gesteinskörnung [kg/m^3]	1910	1910	1910	1826	1908	1908	1908	1842	1842	1964	1964	1964	1964	1969	1963	1908	1902	1942	1942
LP-Gehalt [%]	1.3	1.3	1.1	4.4	1.3	1.7	1.7	0.8	0.8	3.4	0.9	5.7	3.9	4.1	3.3	0.9	2.5	3.5	2.3
Ausbreitmass [cm]	45	45	45	47	57	56	66	60	60	57	60	61	61	57	58	63	63	46	47
Bluten [%]	1.39	0.85	3.12	1.27	2.38	2.98	3.91	2.78	2.35	1.29	1.37	0.49	0.48	2.64	2.61	2.37	2.36	0.63	0.52
Entmischungsmass	1.07	1.47	1.54	3.13	2.18	2.40	3.35	1.29	1.98	2.59	2.46	3.05	2.90	2.94	2.73	3.04	3.29	1.72	1.53

Tabelle A1: Verwendete Betonmischungen. Die mit * bezeichneten Mischungen wurden bei der Bestimmung des Entmischungsmasses anstatt 20 s während 60 s vibriert. Bei der Mischung SB 5.1 handelt es sich um eine Wiederholung.