

1	Untersuchungsmethoden	2
1.1	mini-slump-Ausbreitfließmaß.....	2
1.2	Mörtelausbreitfließmaß	2
1.3	Messungen mit dem Rotationsviskosimeter	3
1.3.1	Messprofil	3
1.3.2	Fließkurve	3
2	Untersuchungen an Zementleimen	4
2.1	Zement.....	4
2.2	Einfluss des w/z-Wertes	4
2.3	Einfluss des Fließmittels.....	6
3	Untersuchungen an Hochleistungs-Feinkorn-Beton.....	8
3.1	Einfluss des Silikastaub-Gehaltes	8
3.2	Einfluss des w/z-Wertes	10
3.3	Einfluss der Luftporen.....	11

Zusammenspiel von Wasser, Feinststoffen, Fließmittel und Luftporen in der modernen Betontechnologie

1 Untersuchungsmethoden

1.1 mini-slump-Maß

Zur Bestimmung des mini-slump-Maßes wurde ein Kegelstumpf ($D/d/H = 40/20/60$ mm) verwendet. Mit Hilfe eines kleinen Aufsetztrichters wurde der Kegelstumpf mit dem Bindemittelleim ohne Verdichtungseinwirkung gefüllt und der überstehende Leim abgestrichen. Über den mittleren Durchmesser wurde die Ausbreitfläche in cm^2 bestimmt.

Der Untersuchungsbereich des mini-slump-Maßes wurde einerseits bei zäheren Leimen ($w/z = 0,30$, kein FM) durch die Handhabbarkeit beim Befüllen des Kegelstumpfes (min. Ausbreitfläche entspr. $12,6 \text{ cm}^2$ siehe **Bild 1**) und andererseits bei sehr flüssigen Leimen ($w/z=0,50$) durch auftretende Sedimentation und Entmischung (Auftreten von Schlieren und einen ausgefransten Rand s. **Bild 2**) begrenzt.

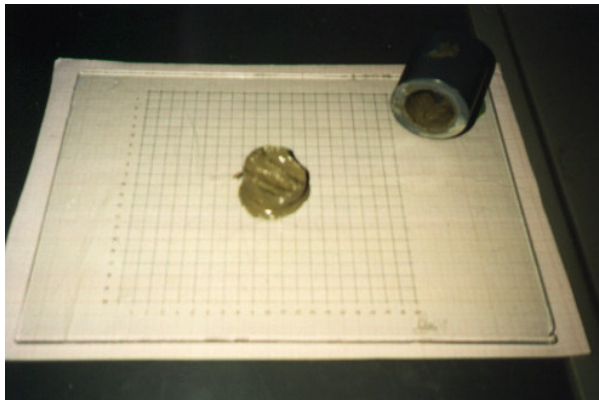


Bild 1: zäher Leim – kein mini-slump mögl.

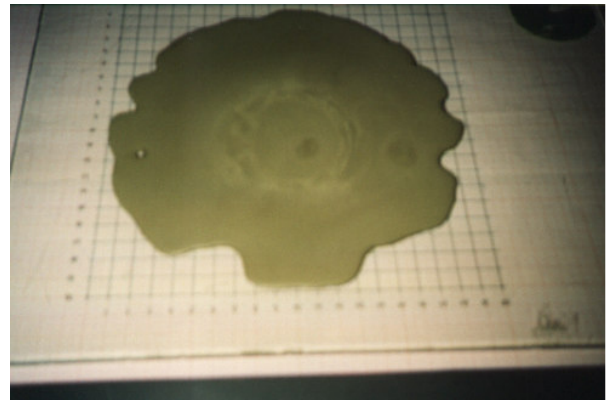


Bild 2: Entmischungserscheinungen

Die Bestimmung des mini-slump-Maßes erfolgte zeitgleich (Anheben des Kegelstumpfes auf 2 cm) mit Beginn der Messung mit dem Rotationsviskosimeter (Viskomat NT). Abschließend wurde noch das Verhalten des Leimes hinsichtlich Wasserabsondern (Bluten) und Entmischung augenscheinlich beurteilt.

1.2 Mörtelausbreitfließmaß

Der Frischmörtel wurde in den Kegelstumpf gemäß DIN 1060 T.3 ($d/D/H = 70/100/60$ mm) zur Bestimmung des Mörtelausbreitmaßes gefüllt und der Durchmesser des Mörtelausbreitfließmaßes (ohne Schocken) in cm bestimmt.

1.3 Messungen mit dem Rotationsviskosimeter

1.3.1 Messprofil

Das zur Bestimmung der rel. Fließgrenze und der rel. Viskosität der Bindemittelleime gewählte Geschwindigkeitsprofil ist in **Diagramm 1** dargestellt.

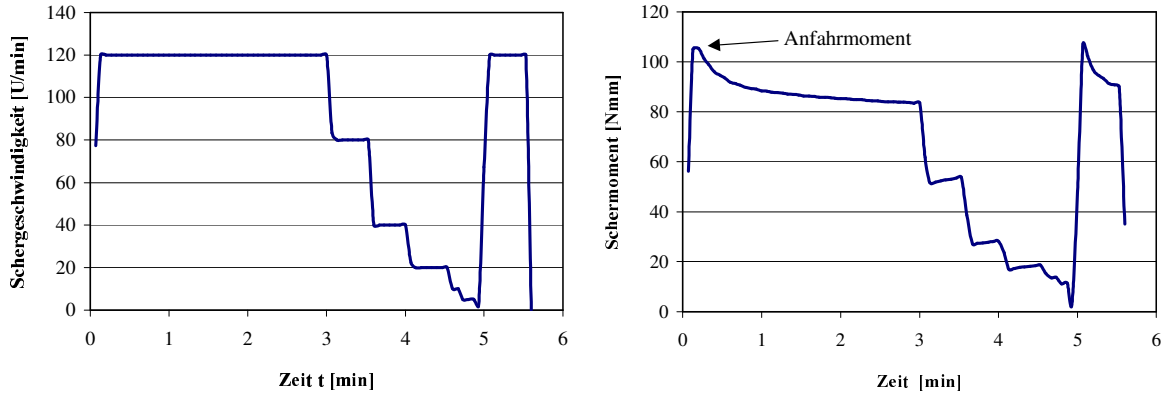


Diagramm 1: Gewähltes Geschwindigkeitsprofil und Schermomentenverlauf

Auf das rasche kontinuierliche Hochfahren der Schergeschwindigkeit auf 120 U/min folgte eine 3 minütige Rührphase mit konstanter Geschwindigkeit, an deren Ende sich das Schermoment auf einen konstanten Wert eingestellt hatte. In diesen ersten drei Minuten wurden bereits gebildete Agglomerate durch die andauernde Scherung bei hoher Geschwindigkeit zerstört. Anschließend wurden bei den Geschwindigkeiten von 80, 40 und 20 U/min die Schermomente je eine halbe Minute lang gemessen. Um ein Sedimentieren bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten 10, 5, 2 U/min zu verhindern, wurden diese Geschwindigkeitsstufen nur fünf Sekunden lang gehalten. Die Bestimmung der Fließkurve erfolgte anhand des Endwertes der ersten Geschwindigkeitsstufe (120 U/min) und der Mittelwerte der folgenden Stufen.

Abschließend wurde nochmals die Ausgangsgeschwindigkeit von 120 U/min für eine halbe Minute gehalten. Dies ermöglichte durch den Vergleich mit den Schermomenten aus der Anfangsphase eine Beurteilung der Konsistenzveränderung im Versuchszeitraum und der Entmischungsneigung.

Als Anfahrmoment wurde das maximale Schermoment zu Beginn der Messung bezeichnet (siehe **Diagramm 1 - rechts**). Es ist im Vergleich zu den berechneten Kennwerten der Fließkurven ein Wert, der an der noch ungescherten Probe ermittelt wurde. Frühere Untersuchungen an Bindemittelleimen hatten gezeigt, dass eine gute Korrelation zwischen Anfahrmoment und mini-slump-Ausbreitfließmaß besteht.

1.3.2 Fließkurve

Die Fließkurve gibt das bei einer bestimmten Umdrehungsgeschwindigkeit gemessene Schermoment wieder (siehe **Diagramm 2**). Hier wurde beispielhaft die Fließkurve der Messung aus **Diagramm 1** dargestellt.

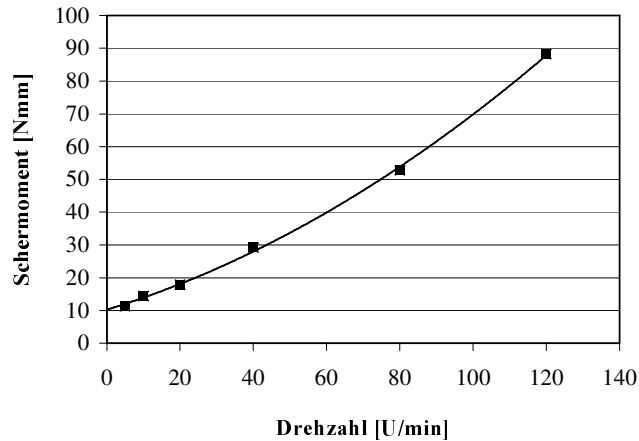


Diagramm 2: Fließkurve

2 Untersuchungen an Zementleimen

2.1 Zement

Für die Untersuchungen wurde ein CEM I 32,5-NW/HS eingesetzt (chem. Analyse, Klinkerphasen siehe **Tabelle 1**), der sich durch einen niedrigen C_3A -Gehalt (0,4 %) auszeichnete. Um Einflüsse durch das Wasser auszuschließen, wurde ein 20 °C temperiertes bi-distilliertes Wasser verwendet.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung (RFA-Analyse) und Klinkerphasen des verwendeten Zementes

	[M.-%]		[%] ^{1.)}
GV	2,4	C_3S	48,8
unlös. Anteil	0,9	C_2S	19,9
SiO_2	19,8	C_3A	0,4
Al_2O_3	4,4	C_4AF	21,0
Fe_2O_3	7,1		
CaO	60,4	Na_2O -Äquiv.	0,73
MgO	1,8		
SO_3	2,3		
K_2O	0,8		
Na_2O	0,2		

1.) berechnet nach Bogue

2.2 Einfluss des w/z-Wertes

Rheologische Untersuchungen an Zementleimen reagieren empfindlich auf Veränderungen von Temperatur und Mischzeiten. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, war eine genaue Festlegung des Misch- und Versuchablaufes zwingend erforderlich.

Mit der Verringerung des w/z-Wertes (Masseverhältnis) vom Zementleim verkleinert sich das Volumenverhältnis zwischen Wasser und Zement (vgl. **Tabelle 2**) und führt aufgrund der gegenüber Wasser höheren Rohdichte des Klinkers zu einer höheren Frischleimdichte. Zusätzlich werden Wechselwirkungen zwischen den Zementkörnern durch die Verringerung des Abstandes zwischen den Partikeln gefördert. Die Kombination dieser beiden Effekte führte zur einer Verschlechterung der rheologischen Eigenschaften mit fallendem w/z-Wert.

Tabelle 2: Verhältnis zwischen fester und flüssiger Phase in Abhängigkeit des w/z-Wertes

w/z-Wert	V _{Wasser} / V _{Feinstoff}
0,55	1,72
0,50	1,55
0,45	1,40
0,40	1,24
0,35	1,09
0,30	0,93
0,25	0,78
0,20	0,62

Referenzleime

Um den Einfluss des w/z-Wertes auf die Rheologie von Zementleimen beurteilen zu können, wurden Zementleime mit unterschiedlichen Wassergehalten (w/z = 0,30 bis 0,50) hergestellt, mit Hilfe eines Rotationsviskosimeters untersucht und das mini-slump-Maß bestimmt.

Der mit Hilfe des Rotationsviskosimeters mögliche Untersuchungsbereich wurde für den verwendeten Zement bei zäheren Leimen (w/z=0,30) durch das maximal aufnehmbare Moment des Gerätes und bei sehr flüssigen Leimen (w/z=0,50) durch ihre Sedimentations- und Entmischungsneigung begrenzt.

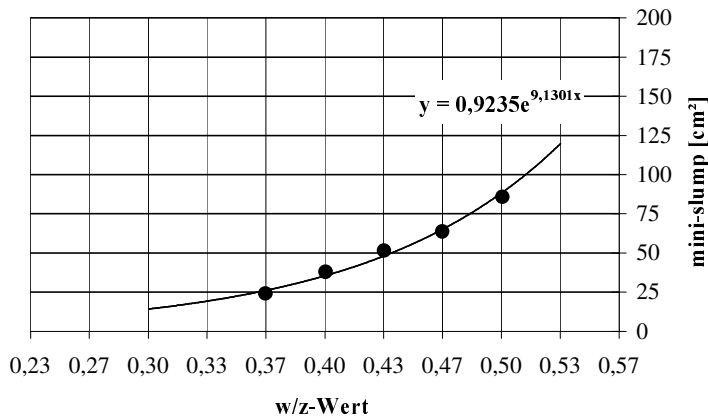


Diagramm 3: mini-slump Ausbreitmaß in Abhängigkeit des w/z-Wertes

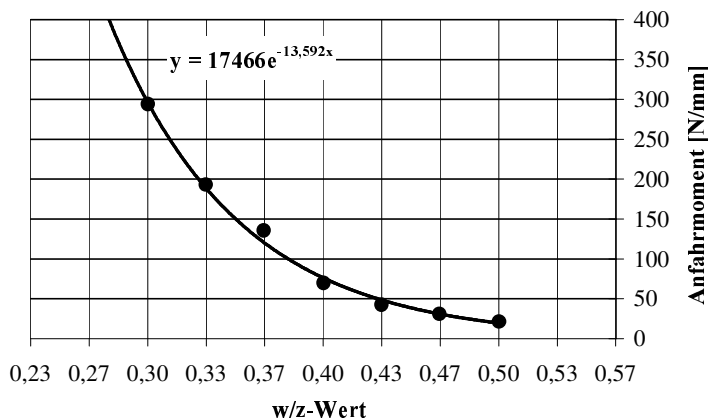


Diagramm 4: Anfahrmoment des Rotationsviskosimeters in Abhängigkeit des w/z-Wertes

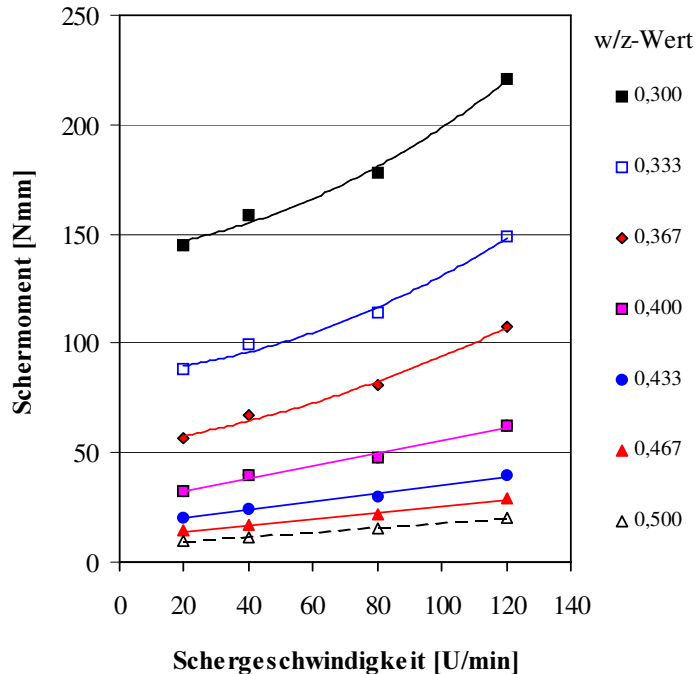


Diagramm 5: Fließkurven der Zementleime in Abhängigkeit des w/z-Wertes

Mit geringerem w/z-Wert stieg sowohl die Fließgrenze (Schnittpunkt der gedachten Verbindungslinie bzw. -kurve mit der Y-Achse), als auch die relative Viskosität (die Steigung als Maß für die innere Reibung) der Zementleime an.

Ab einem w/z-Wert kleiner 0,433 stiegen diese überproportional (siehe **Diagramm 5**) an. Auffällig war auch die Veränderung des Fließverhaltens der Leime. Mit zunehmendem Feststoffgehalt (niedrigerer w/z-Wert), ging das binghamische (linearer Verlauf) in ein dilatantes Fließverhalten (parabolischen Verlauf) über (siehe **Diagramm 5**). Dilatantes Fließverhalten tritt bei eng gepackten, dispersen Substanzen auf. Als Ursachen werden Interaktionen zwischen den Partikeln, sowie die Immobilisierung des Dispersionsmittels aufgeführt. Derartige Fließkurven sind auch von rheologischen Messungen an fließfähigen, feinststoffreichen SCC-Mischungen bekannt. Um Betone mit w/z-Werten kleiner 0,40 und evtl. erhöhtem Feinststoffgehalt (Silikastaub, FA) in einer verarbeitbaren Konsistenz herzustellen, müssen FM oder BV zugegeben werden.

2.3 Einfluss des Fließmittels

Das Feststoffverhältnis im Leim blieb durch die Zugabe des FM unbeeinflusst, da der Wassergehalt des FM bei dem Anmachwasser ($w/z = 0,30$) berücksichtigt wurde. Die Zugabe von Fließmittel verbesserte die Verarbeitbarkeit deutlich, dabei wirkte sich das FM vorrangig auf die Erniedrigung der Fließgrenze aus, was an der Parallelverschiebung der Fließkurven (siehe **Diagramm 6**) zu erkennen ist. Das FM A war selbst bei einer niedrigeren Dosierung gegenüber dem FM B hinsichtlich der Verarbeitbarkeit effektiver, was die deutlichere Reduzierung der Fließgrenze und das höhere mini-slump-Ausbreitfließmaß zeigte.

Die rel. Viskosität (Neigung der Fließkurve) wurde von der FM-Art und der FM-Dosierung (M.-% FM-Wirkstoff vom z) nicht beeinflusst und hängt offensichtlich nur von dem Feststoffverhältnis und der Korngrößenverteilung ab.

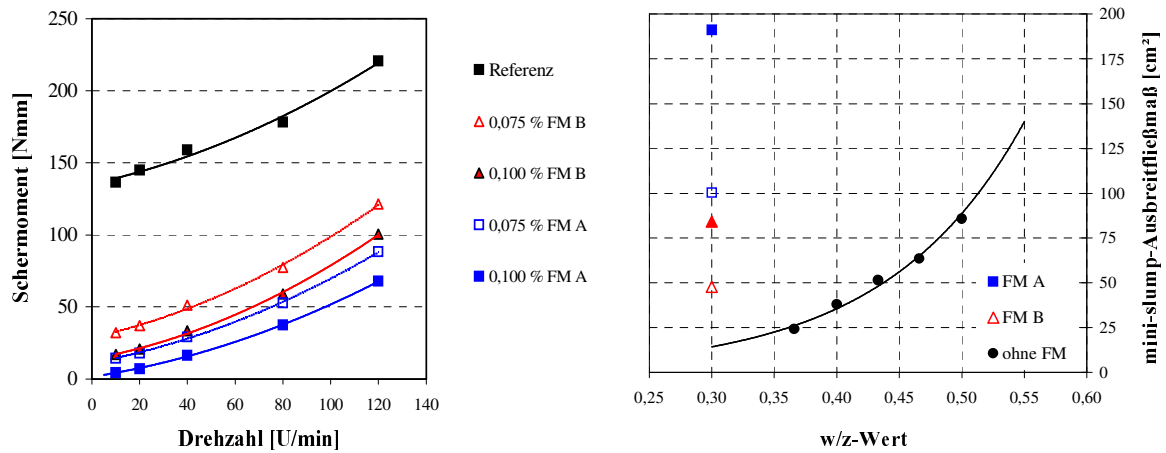


Diagramm 6: Einfluss des FM auf die Fließkurve und das mini-slump-Ausbreitfließmaß der Leime ($w/z = 0,30$)

Die schon beim reinen Zementleim angedeutete Tendenz (siehe **Diagramm 5**), dass die Fließkurven mit zunehmendem Feststoffgehalt (geringerer w/z -Wert) bauchiger werden (dilatantes Fließverhalten vgl. **Diagramm 7 b.**), zeigt sich auch bei den Zementleimen mit sehr niedrigen w/z -Werten, deren Verarbeitbarkeit über die Zugabe von FM A (Angabe der Dosierung in M.-% Wirkstoff bez. a. Zement) eingestellt wurde.

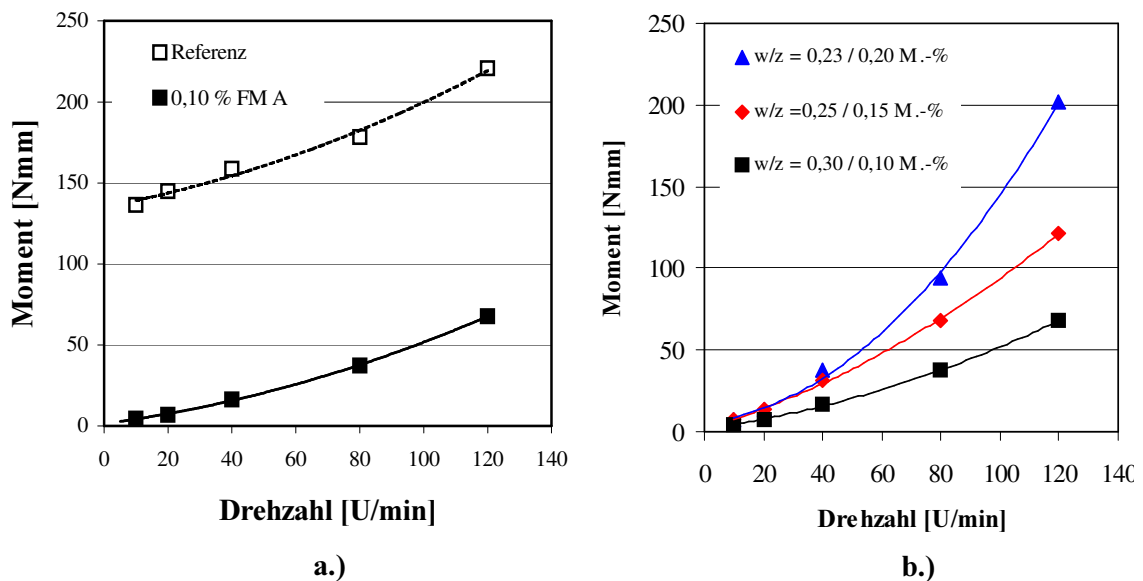


Diagramm 7: Einfluss des FM (a.) und w/z -Wertes (b.) auf den Verlauf der Fließkurven

Tabelle 3: mini-slump-Ausbreitfließmaße der in den Diagramm 6 und 7 dargestellten Mischungen

w/z-Wert	FM- Dosierung und Art [M.-% FM-Wirkst.]	mini-slump-Ausbreitfließmaß [cm ²]
0,30	ohne	nicht möglich (< 12,6)
0,30	0,075 FM B	47,8
0,30	0,100 FM B	84,1
0,30	0,075 FM A	100,3
0,30	0,100 FM A	191,1
0,25	0,150 FM A	185,1
0,233	0,200 FM A	250,2

3 Untersuchungen an Hochleistungs-Feinkorn-Beton

Um einen Hochleistungs-Feinkorn-Beton (dt. Bezeichnung für „Reactive Powder Concrete“), welcher sich durch extrem niedrige w/b-Werte < 0,2; ausschließlich Feinststoffe (Größtkorn < 1 mm) und große reaktive Oberflächen (große Mengen an CEM + SF) auszeichnet, einbauen zu können, ist es erforderlich, die Rheologie der Mischung zu optimieren.

3.1 Einfluss des Silikastaub-Gehaltes

An zwei Rezepturen wurde der Einfluss des Silikastaub-Gehaltes auf die rheologischen Kennwerte rel. Fließgrenze und rel. Viskosität sowie das mini-slump- und das Mörtel-Ausbreitfließmaß untersucht. Um die Dispergierung des Silikastaubes (sf) zu gewährleisten, wurde der FM-Gehalt an die unterschiedl. sf-Gehalte angepasst (0,29 / 0,36 / 0,40 M.-% Wirkstoff bez. a. CEM+sf). Die Mischungen mit unterschiedlichen sf-Gehalten wiesen nahezu identische Frischbetondichten (2425-2430 kg/m³) auf.

Durch die Erhöhung des Silikastaubgehaltes von 8 auf 12 M.-% (bez. a. CEM) erfolgte eine Verbesserung der Zwickelfüllung und des Kugellagereffektes, so dass die innere Reibung der Mischung herabgesetzt wurde und somit die rel. Viskosität abnahm (vgl. **Diagramm 8**). Dies hatte auch eine Erhöhung des Mörtelfließmaßes zur Folge (vgl. **Diagramm 9**).

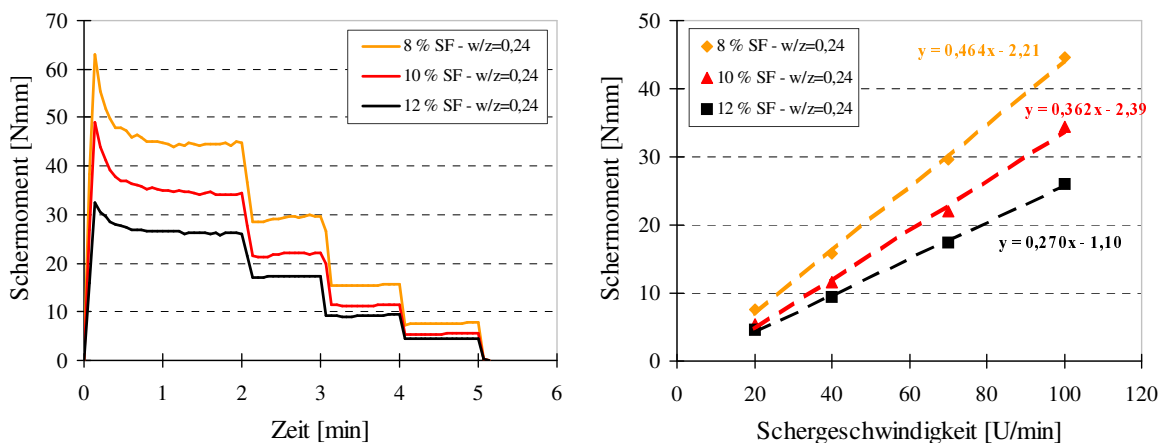


Diagramm 8: Einfluss des Silikastaubgehaltes (M.-% bez. a. CEM) auf den Schermomentenverlauf und die Fließkurve

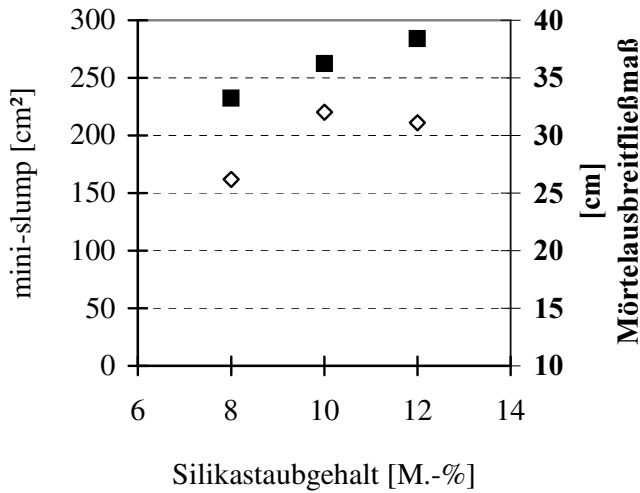


Diagramm 9: Einfluss des Silikastaubgehaltes auf das Mörtel- und mini-slump-Ausbreitfließmaß

Bei der zweiten Rezeptur wurden wesentlich höhere sf-Gehalte eingesetzt. Wieder wurden die FM-Gehalte (0,71 - 0,77 M.-% Wirkstoff bez. a. CEM+sf) an die unterschiedlichen SF-Mengen angepasst. Eine Erhöhung des sf-Gehaltes über 22 M.-% (bez. a. CEM) führte zu keiner weiteren Reduzierung der Viskosität mehr (vgl. **Diagramm 10**). Offensichtlich reichte diese Menge für eine vollständige Zwickelfüllung und einen optimalen Kugellagereffekt aus. Die Mörtelausbreitfließmaße liegen ebenfalls im gleichen Größenbereich (Durchmesser rd. 33 cm). Lediglich die Mischung mit dem höchsten sf-Gehalt hatte aufgrund einer zu geringen FM-Dosierung (0,71 M.-% Wirkstoff bez. a. CEM), erkennbar an der höheren Fließgrenze (4,8 gegenüber 1,3 und 2,0), ein geringeres Mörtelausbreitfließmaß (28 cm).

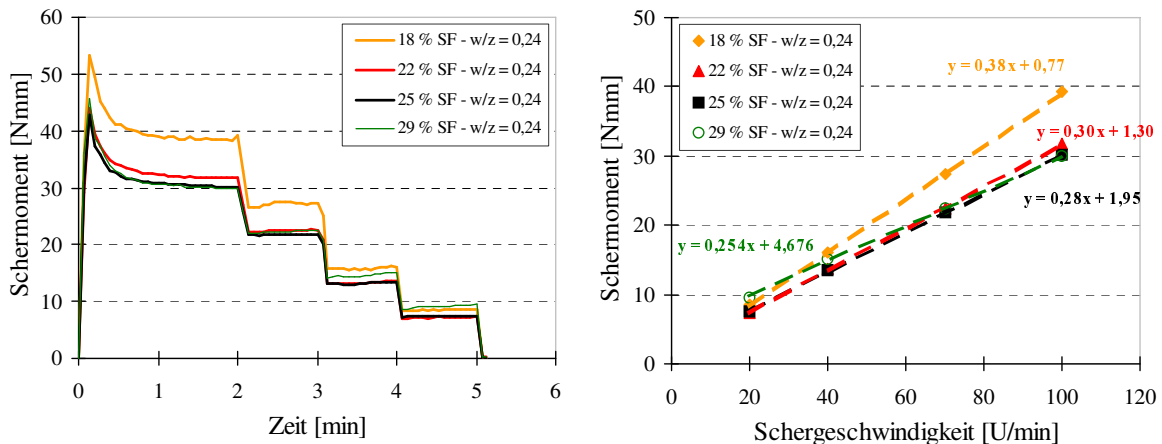


Diagramm 10: Einfluss des Silikastaubgehaltes (M.-% bez. a. CEM) auf den Schermomentenverlauf und die Fließkurve

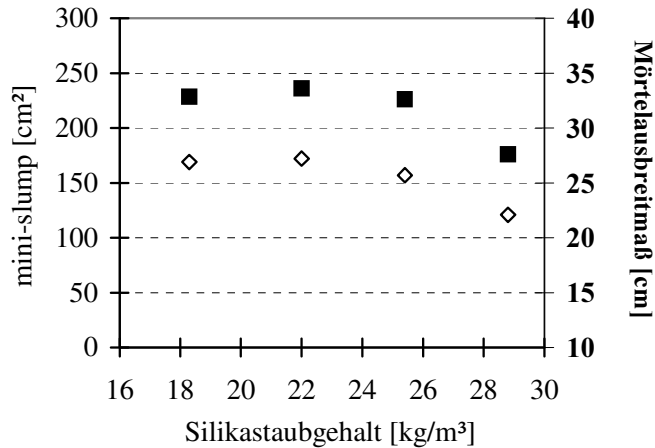


Diagramm 11: Einfluss des SF-Gehaltes auf das Mörtel- und mini-slump-Ausbreitfließmaß

3.2 Einfluss des w/z-Wertes

Wie bereits Untersuchungen an Zementleimen gezeigt hatten, (vgl. Abschnitt 2.1) erhöhte sich mit geringerem w/z-Wert die rel. Fließgrenze, die rel. Viskosität und die Frischleimdicke. Über eine Anpassung der FM-Dosierung wurde versucht das Mörtelausbreitfließmaß konstant zu halten.

Entgegen dem bei unterschiedlichen sf-Gehalten beobachteten Verhalten, dass mit geringerer rel. Viskosität das Ausbreitfließmaß zunimmt, zeigten diese Mischung ein konträres Verhalten. Ursache hierfür war die unterschiedliche Frischbetondichte der Mischungen. Mit geringerem w/z-Wert (0,28; 0,26 und 0,24) stieg die Frischbetondichte von 2370, 2395 auf 2425 kg/m³ an. Das höhere Eigengewicht überdrückte den Effekt der höheren rel. Viskosität und führte zu einem höheren Mörtelausbreitfließmaß. Untersuchungen mit Hilfe eines Rheometers und eines modifizierten Slump-Versuch von De Larrard et al. /1/ bestätigten den Einfluss der Frischbetondichte auf die Verarbeitbarkeit.

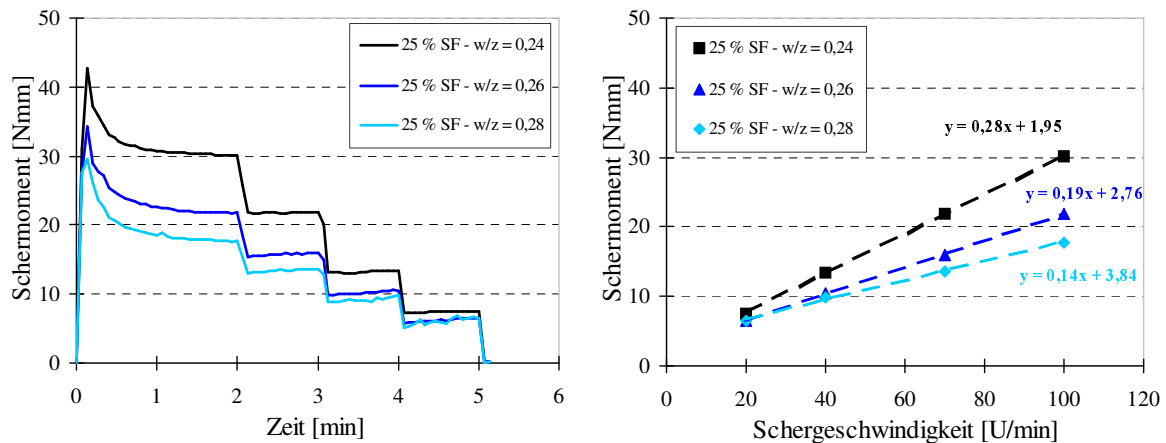


Diagramm 12: Einfluss des w/z-Wertes auf den Schermomentenverlauf und die Fließkurve

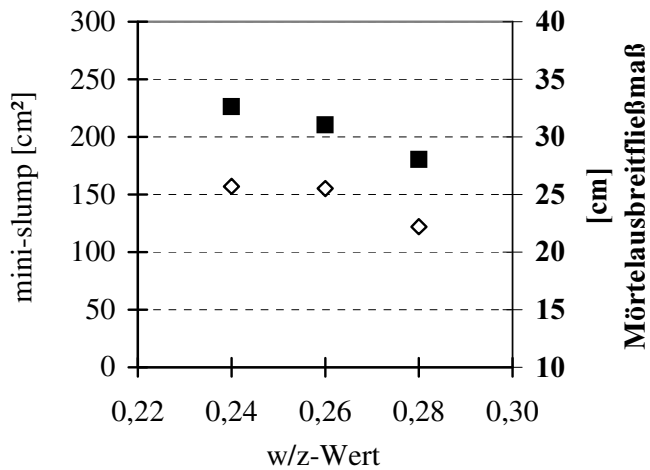


Diagramm 13 Einfluss des w/z-Wertes auf das Mörtel- und mini-slump-Ausbreitfließmaß

3.3 Einfluss der Luftporen

Um die Verformungsfähigkeit des spröden Hochleistungs-Feinkorn-Betons zu verbessern, wurde in einer Versuchsreihe dem Beton eine Kunststoffdispersion (10 M.-% bez. a. CEM) beigemischt. Als ungewünschter Effekt trat ein erhöhter Luftporeneintrag in den Frischmörtel auf. Über eine Dosierung eines Entschäumers (1, 3, 5 M.-% bez. Wirkstoff d. Dispersion) bei identischem FM-Gehalt wurde anschließend versucht den Luftporeneintrag zu reduzieren. Interessant dabei war die Wirkung der Luftporen auf die rheologische Eigenschaften des Frischbetons.

Wie bekannt, verbessern künstlich eingeführte Luftporen über die Vergrößerung des Mörtelvolumens die Verarbeitbarkeit des Betons in der Praxis. Hinsichtlich der Verarbeitbarkeit erfolgt die Berücksichtigung der Luftporen, indem der Wasseranspruch der Zuschlaggemische bei dem Mischungsentwurf um 1 l Wasser je 3 bis 4 l künstl. Luftporen reduziert wird.

Ein höherer LP-Gehalt des HLF-Betons führte zu einer deutlichen Reduzierung der rel. Viskosität (vgl. **Diagramm 14**). Dieser Effekt ähnelte dem bei einer Erhöhung des w/z-Wertes beobachteten (vgl. **Diagramm 12**). Somit bestätigten die rheologischen Untersuchungen am HLF-Beton die aus der Praxis bekannte Ähnlichkeit der Auswirkungen der Erhöhung des LP-Gehaltes bzw. Wassergehaltes auf die Verarbeitbarkeit.

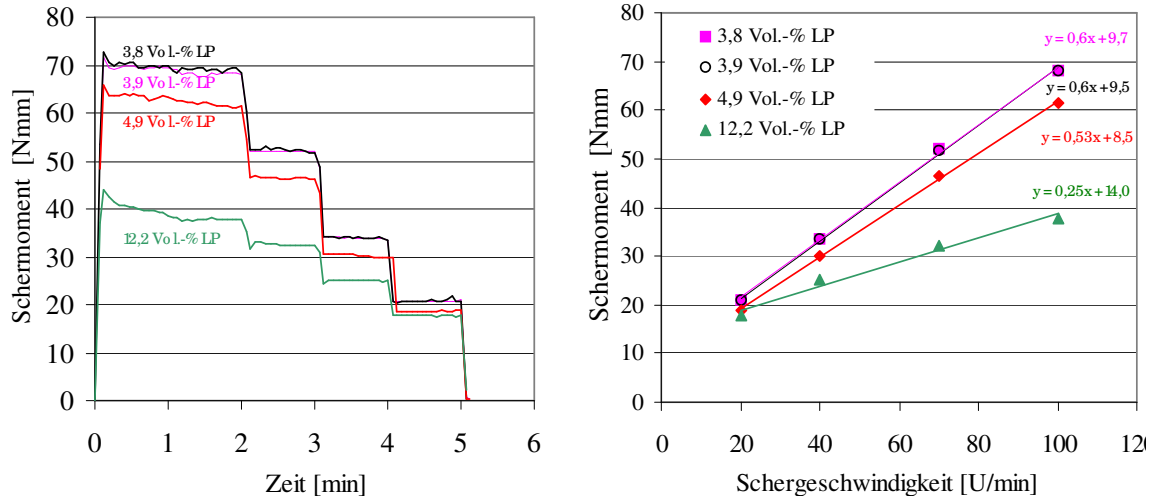


Diagramm 14: Einfluss des LP-Gehaltes auf den Schermomentenverlauf und die Fließkurve

Schlussfolgerungen

- Durch die Reduzierung des w/z-Wertes bei Zementleimen lassen sich durch den Einsatz von FM höhere Ausbreitmaße erzielen, bevor Wasserabsondern (Bluten) oder Entmischungserscheinungen auftreten.
- Sowohl die Verringerung der Fließgrenze als auch die der relativen Viskosität führt zu einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit.
- Durch den Einsatz von Fließmittel wird hauptsächlich die rel. Fließgrenze reduziert. Nachdem die Fließgrenze durch die Erhöhung des Wassergehaltes und insbesondere durch den Einsatz von FM stark beeinflusst wird, ist diese rheologische Kenngröße offensichtlich vorrangig von den chemischen Wechselwirkungen abhängig.
- Durch den Eintrag der Luftporen und den Einsatz von Feinststoffen, wird die relative Viskosität beeinflusst. Sie hängt somit maßgeblich von dem Feststoffgehalt und der Korngrößenverteilung des Feststoffes ab.
- Neben den rheologischen Kenngrößen (rel. Fließgrenze, rel. Viskosität) wirkt sich eine höhere Frischbetondichte positiv auf das Fließmaß aus.

1 De Larrard, F., Sztikar, J. C., Hu, C., Joly, M.: Design of a rheometer for fluid concretes. Proceedings, International RILEM workshop on Special Concretes: Workability and Mixing, P.J.M. Bartos Ed., E & FN SPON, pp. 201-208, 1994.