

Entwicklung von selbstverdichtenden Betonen mit hoher Grünstandfestigkeit für den Einsatz in Gleitschalungsfertigern im Betonstraßenbau

von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Ruhr-Universität Bochum zur Erlangung
des Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte

Dissertation

von

Diego Sarmiento

Bochum, im Juni 2011

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum. Mit der Fertigstellung dieser Dissertation schließt sich eine Etappe in meinem Leben. Hiermit möchte ich ganz besonders meinen Eltern Alicia und Omar danken, die mir nicht nur das Leben geschenkt, sondern auch meine persönliche Entwicklung und Talente immer wieder gefördert und unterstützt haben.

Ein besonderes Anliegen ist es mir, Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher zu danken, der mir nicht nur die Gelegenheit zur Promotion an seinem Lehrstuhl gegeben hat, sondern mich auch Teil einer Gemeinschaft werden ließ, in der ich mich sehr wohl fühlte.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gehlen möchte ich mich für die freundliche Übernahme des Koreferates bedanken.

Ich möchte mich ebenso sehr herzlich bei Herrn Dr.-Ing. Hussein Alawieh bedanken, der mich nicht nur fachlich unterstützt hat, sondern auch für sein Vertrauen, dass er vom ersten Tag an in mich gesetzt hat.

Auch möchte ich meinen Kollegen des Lehrstuhls für Baustofftechnik meinen Dank für ihre zuverlässige Mitarbeit und Hilfe aussprechen. Dazu gehören Herr Dr.-Ing. Hursit Ibuk und Herr Dr.-Ing. Björn Siebert, die für wissenschaftliche Diskussionen immer ein offenes Ohr hatten, ebenso Frau Dipl.-Ing. Andrea Lutter, Herr Dipl.-Ing. Joose Penttilae und Herrn cand. Ing. Stefan Hendricks für ihre Hilfe bei der Korrektur des Manuskriptes. Für Ihre Unterstützung bei den Verwaltungsverfahren während meiner Promotionszeit möchte ich mich bei Frau Marita Fritsche-Kühnemuth herzlich bedanken.

Auch danke ich den Baustoffprüfern der Konstruktionsteilprüfung, die mich stets unterstützt haben. Ganz besonderen Dank gilt Herrn Ruben Sewald, Herrn Thomas Behrendt und Frau Katrin Müller, ohne deren Arbeit keine Promotion durchführbar gewesen wäre.

Diese Arbeit wäre ohne die große Unterstützung der Research School nicht möglich gewesen, weswegen ich mich ganz ausdrücklich bei Frau Dr. Ursula Justus und Frau Maria Sprung, die mir stets freundlich mit Rat und Tat zur Seite standen, bedanken möchte.

Bochum, im Juni 2011

Diego Sarmiento

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur.....	IX
1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise.....	3
2. Stand der Erkenntnisse	5
2.1 Stand der Technik im Betonstraßenbau	5
2.2 Technologie des selbstverdichtenden Betons.....	9
2.2.1 Allgemeines	9
2.2.2 Konzept für die Herstellung eines SVBs: Okamura-Verfahren.....	11
2.2.3 Frischbetoneigenschaften von selbstverdichtendem Beton	15
2.2.4 Festbetoneigenschaften: SVB gegenüber konventionellem Beton.....	20
2.3 Rheologie.....	21
2.3.1 Allgemeines	21
2.3.2 Lineares Fließverhalten.....	23
2.3.3 Nichtlineares Fließverhalten	24
2.3.3.1 Geschwindigkeitsabhängige Erscheinungsformen.....	24
2.3.3.2 Zeitabhängige Erscheinungsformen	25
2.4 Fließverhalten von Bindemittelleimen bzw. Betonen.....	29
2.4.1 Allgemeines	29
2.4.2 Fließgrenze und Viskosität	30
2.4.2.1 Thixotropie in zementösen Suspensionen	35
2.4.2.2 Interpartikuläre Wechselwirkungen im Frischbeton.....	37
2.4.3 Modelle für die Beschreibung des Fließverhaltens von Beton	43
2.5 Packungsdichte.....	45
2.6 Grünstandfestigkeit	46
2.7 Hydratation.....	47

2.7.1	Ablauf der Hydratation.....	47
2.7.2	Thixotropie infolge Hydratation.....	49
2.8	Beanspruchung des grünstandfesten Betons beim Betonstraßenbau	50
2.8.1	Allgemeines	50
2.8.2	Äußere Reibung: Haft- und Bewegungsreibung	51
2.8.3	Innere Reibung.....	52
2.8.4	Interaktion Beton-Schalung	52
3.	Übersicht über das Versuchsprogramm	55
3.1	Allgemeines.....	55
3.2	Methodik	55
3.3	Charakterisierung der verwendeten Ausgangsstoffe	57
3.3.1	Allgemeines	57
3.3.2	Zement.....	57
3.3.3	Betonzusatzstoffe.....	57
3.3.4	Betonzusatzmittel.....	58
3.3.5	Gesteinskörnung	61
4.	Basisuntersuchungen an Bindemittelleimen	62
4.1	Bestimmung des Wasseranspruchs der Bindemittelleime	62
4.2	Kombinierte Fließ- und thixotrope Eigenschaften der Bindemittelleime	62
4.3	Rheologische Untersuchungen im Rotationsviskosimeter	64
5.	Ergebnisse der Basisuntersuchungen an den Bindemittelleimen.....	67
5.1	Auswirkungen einzelner Zusätze.....	67
5.1.1	Bestimmung des Wasseranspruchs	67
5.1.2	Wassergehalt	67
5.1.3	Fließmittel	68
5.1.4	Zementart.....	70
5.1.5	Betonzusatzstoffe.....	72
5.1.6	Thixotropierende Zusätze.....	74
5.1.7	Thixotropiermittel.....	76
5.1.8	Gesamtbetrachtung und Diskussion.....	78

5.2	Auswirkungen von Kombinationen zweckmäßiger Zusätze	82
5.2.1	Gruppe T2 und Gruppe T3	82
5.2.2	Gruppe T2	84
5.2.2.1	Untersuchung der rheologischen Parameter im Viskosimeter	84
5.2.2.2	Untersuchung der Fließfähigkeit	84
5.2.2.3	Untersuchung der thixotropen Eigenschaften anhand der Formstabilität	87
5.2.2.4	Gesamtbetrachtung und Diskussion - Bindemittelleime der Gruppe T2	88
5.2.3	Gruppe T3	91
5.2.3.1	Untersuchung der rheologischen Parameter im Viskosimeter	91
5.2.3.2	Untersuchung der thixotropen Eigenschaften im Viskosimeter	95
5.2.3.3	Untersuchung der Fließfähigkeit	98
5.2.3.4	Untersuchung der thixotropen Eigenschaften anhand der Formstabilität ...	100
5.2.3.5	Gesamtbetrachtung und Diskussion. Bindemittelleime der Gruppe T3	102
5.3	Zusammenfassung	105
6.	Untersuchungen an thixotrop eingestellten SVB	107
6.1	Allgemeines	107
6.2	Entwicklung der Matrix (Mörtel) für einen SVB	107
6.2.1	Setzfließmaß und Formstabilität	107
6.2.2	Grünstandfestigkeit	107
6.3	Entwicklung eines SVBs	109
6.3.1	Basisuntersuchungen am SVB	109
6.3.2	Hauptuntersuchungen	110
6.3.2.1	Allgemeines	110
6.3.2.2	Frischbetonuntersuchungen	110
6.3.2.2.1	Setzfließmaß und Formstabilität	110
6.3.2.2.2	Trichterauslaufzeit	111
6.3.2.2.3	Frischbetonrohddichte und Luftgehalt	111
6.3.2.2.4	Grünstandfestigkeit	111
6.3.2.2.5	Beurteilung der Formstabilität anhand eines Mini-Pavers	111
6.3.2.3	Festbetonuntersuchungen	113

6.3.2.3.1	Druckfestigkeit	113
6.3.2.3.2	Biegezugfestigkeit.....	113
6.3.2.3.3	Frost-Taumittel Widerstand (CDF-Test)	113
7.	Ergebnisse der Untersuchungen an thixotrop eingestellten SVBs	114
7.1	Ermittlung des Mindestwassergehaltes β_p	114
7.2	Entwicklung der Matrix (Mörtel) für einen SVB	115
7.2.1	Ausgangsuntersuchungen.....	115
7.2.2	Optimierung der Matrix.....	117
7.3	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das Betonverhalten	124
7.3.1	Basisuntersuchungen.....	124
7.3.1.1	Wassorzementwert	124
7.3.1.2	Fließmittelgehalt	126
7.3.1.3	Thixotropierende Zusätze	127
7.3.2	Hauptuntersuchungen: Auswirkungen von Kombinationen zweckmäßiger Zusätze.....	128
7.3.2.1	Ausgangsmischungen	128
7.3.2.2	Frischbetonrohichte und Luftgehalt.....	129
7.3.2.3	Gesamtbetrachtung des Setzfließmaßes und der Formstabilität.....	131
7.3.2.4	Trichterauslaufzeiten	133
7.3.2.5	Grünstandfestigkeit.....	134
7.3.2.6	Druckfestigkeit.....	135
7.3.2.7	Biegezugfestigkeit.....	136
7.3.2.8	Bestimmung des Frost-Taumittel-Widerstands (CDF-Test).....	137
7.3.2.8.1	Abwitterung.....	137
7.3.2.8.2	Relative Feuchteaufnahme und relativer dynamischer E-Modul.....	139
7.4	Optimierung der thixotrop eigestellten Betone	141
7.4.1	Optimierung der Eigenschaften des Betons M-2	141
7.4.2	Optimierung der Eigenschaften des Betons M-10	143
7.4.3	Übertragbarkeit auf Betone mit Zement CEM I 42,5 R.....	146
7.4.3.1	Setzfließmaß und Formstabilität	146

7.4.3.2	Entwicklung der Grünstandfestigkeit.....	150
7.4.3.3	Anforderungen an SVBs und Betone für Fahrbahndecken.....	152
8.	Zusammenführende Diskussion	154
9.	Zusammenfassung.....	165
10.	Literaturverzeichnis.....	170
11.	Normative Verweise.....	180
	Anhänge.....	182

Nomenklatur

Abkürzungen und Symbole

SVB	selbstverdichtender Beton
sm	Setzfließmaß
K_i	Formstabilitätskoeffizient
Gfk	Grünstandfestigkeit
T_i	Thixotropiezahl
SF_i	Setzfließmaßklasse
τ_0	dynamische Fließgrenze
τ_{0R}	statische Fließgrenze
$\eta`$	dynamische Viskosität
η_B	plastische Viskosität
η_r	relative Viskosität
η_F	Viskosität der flüssigen Phase
ρ	dichte
β_p -Wert	Wasserrückhaltemaß
V_w/V_p	Wasser-Mehlkorn-Volumenverhältnissen
Γ_i	relative Setzfließfläche
E_p	Deformationsfaktor
E-Modul	Elastizitätsmodul
τ	Schubspannung
F	Scherkraft
A	Scherfläche
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
v	Geschwindigkeit
λ_i	Schubspannung (Cross / Ellis)
H	Plattenabstand
tr	Ruhezeit
A_{thix}	Flockungskoeffizient
σ	Normalspannung

φ	Innerer Reibungswinkel
C	Kohäsion
σ_n	Druckspannung normal zur betrachteten Ebene
φ_m	mittlere Winkel der inneren Reibung
n.F _w	Anteil der Adhäsionskräfte bei n Partikeln je Scherfläche
ϕ	Feststoffkonzentration
$\phi_{\max}$	maximale Feststoffkonzentration
R ²	Bestimmtheitsmaß
DLVO	Derjagun-Landau-Verwey-Overbeek Theorie
E _{tot}	Gesamtenergie
E _A	anziehende Energie, Van-der-Waals-Energie
E _R	abstoßende Energie
E _B	Energie-Barriere
E _S	sterische Abstoßung
H	Hamaker-Konstante
D	Abstand zwischen den Partikeloberflächen
a ₀	Partikelradius
ϵ_0, ϵ_R	Permittivität
ψ_0	Oberflächenpotential
Q	Quarzmehl
M	Metakaolin
K	Kalksteinmehl
FM	Fließmittel
PCE	Polycarboxylatether
LP	Luftporenbildner
SK	Schichtsilikate
ST	Stabilisierer
T	Thixotropiermittel
CDF-Test	Capillary Suction, De-icing agent and Freeze-thaw Test
FTW	Frost-Tau-Wechsel

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Bei der Herstellung von Fahrbahndecken aus Beton werden bislang Betone von steifer bis sehr steifer Konsistenz mit Gleitschalungsfertigern eingebaut. Dementsprechend ist es unumgänglich, den Beton mit am Fertiger fest angeordneten Innenrüttlern zu verdichten. Der verteilte Beton muss auf der gesamten Einbaubreite der zukünftigen Fahrbahndecke gleichmäßig und vollständig verdichtet werden. Eine gute Verdichtung des Frischbetons erfordert eine genaue Abstimmung der notwendigen Verdichtungsenergie bzw. der ausreichenden Rütteldauer sowie des Abstandes der Eintauchstellen und der Frequenz des Innenrüttlers. Eine gelungene Verdichtung des Frischbetons verbessert die geforderten Eigenschaften des Festbetons hinsichtlich der Festigkeit, der Dauerhaftigkeit sowie der Oberflächengeschlossenheit.

Im Gegenteil dazu führt eine ungenaue Bestimmung der Rüttelenergie zu einem nicht ausreichend verdichteten oder überverdichteten Beton, dessen Konsequenz eine Verschlechterung der Festbetoneigenschaften ist [158].

Einerseits führt 1% nicht entwichene Luft, die sich als Resultat einer nicht ausreichenden Verdichtung ergibt, zu einer Verringerung der Druck- und Biegezugfestigkeit um ca. 5%. In gleicher Weise erfolgt durch eine nicht ausreichende Verdichtung eine Verminderung der Festbetonrohddichte. Eine 1%-ige Reduktion der Festbetonrohddichte verkürzt die Lebensdauer der Fahrbahndecke um 10 bis 15 Jahre [86]. Andererseits ist eine zu intensive Frischbetonverdichtung eine häufige Ursache der lokalisierten Entmischung des Betons infolge Überverdichtung. Bei einer Überverdichtung steigen die feinen Anteile des Betons auf und die groben sinken ab. Dies führt zu einem erhöhten Feinmörtelanteil in den Rüttelgassen, wodurch sich die Betoneigenschaften in diesen Bereichen u. U. gegenüber denen der außerhalb liegenden Flächen verändern [102][145][153]. Beispielsweise sind die Druckfestigkeit sowie die Biegezugfestigkeit im oberen Teil der Betonschicht ca. 5 bis 10% geringer als in einem nicht überverdichteten Beton. Gleichzeitig ist dies mit einer Abnahme des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes verbunden, was auf eine Erhöhung der Wasserleitfähigkeit in der oberen überverdichteten Schicht zurückzuführen ist. Ausserdem wird bei dicken Deckenplatten, wie z. B. Fahrbahndecken, der Zementsteingehalt in den Rüttelgassen stark erhöht. Dies führt zu einer inhomogenen Betonqualität mit inhomogenen Schwindspannungen in der Außenschicht der Fahrbahndecke [95]. In solchen systembedingten Schwachstellen können sich dann im Laufe der Nutzung Risse bilden, wobei die Rüttelgassen nicht zwangsläufig als Ursache, sondern lediglich als lokalisierend zu bezeichnen sind.

Mit selbstverdichtendem Beton könnte beim Bau von Fahrbahndecken der Einbau technisch und wirtschaftlich verbessert und die oben als potentielle Schwachstellen dargelegten Rüttelgassen eliminiert werden. Nach [30] führt das extrem gute Fließverhalten sowie die selbständige Entlüftung von selbstverdichtendem Beton zu einem nahezu dichten Betongefüge und einer porenfreien Betonoberfläche, was für die Herstellung von Fahrbahndecken besonders günstig ist.

Selbstverdichtende Betone (SVB) bedürfen keiner externen Verdichtungsenergie und sind allein unter dem Einfluss der Schwerkraft in der Lage, sich vollständig selbst zu entlüften [30][52][79][81][154]. Der SVB muss dazu einen hohen Widerstand gegen Sedimentieren der Gesteinskörnungen und Bluten aufweisen. Darüber hinaus muss bei bewehrten Bauteilen sichergestellt sein, dass die groben Gesteinskörnungen durch die Zwischenräume der Bewehrungsstäbe hindurch transportiert werden können.

Damit die Anwendung von selbstverdichtenden Betonen im Straßenbau möglich ist, müssen zwei einander entgegenlaufende Eigenschaften in Einklang gebracht werden. In diesem Fall muss der Beton neben seiner hohen Fließfähigkeit und Selbstentlüftung gleichzeitig nach Verlassen des Gleitschalungsfertigers, d.h. nach wenigen Minuten, eine erhöhte Grünstandfestigkeit aufweisen, damit die Fahrbahndecke auch im frischen Zustand ihre eingeprägte geometrische Kontur beibehält. Dementsprechend muss der Frischbeton ausgeprägte thixotrope Eigenschaften aufweisen, die nur über eine entsprechende Optimierung seiner Zusammensetzung unter Verwendung verschiedener Ausgangskomponenten erreicht werden können. Zweifelsohne muss das rheologische Verhalten des zu entwickelnden Betons erfasst werden, um die gewünschte Zusammenstellung der entgegenlaufenden Eigenschaften einstellen zu können.

Die Leistungsfähigkeit von solchen Betonen, die für den Einsatz in Gleitschalungsfertigern im Straßenbau geeignet sein sollen, ist durch Untersuchungen hinsichtlich der Frischbetoneigenschaften, Grünstandfestigkeit und weiterer, dort wesentlicher Festbetoneigenschaften (Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Frost-Taumittel-Widerstand, Sedimentationsstabilität) nachzuweisen.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es abzuschätzen, inwieweit für den Fahrbahndeckenbau ein Beton entwickelt werden kann, der die oben beschriebenen entgegenlaufenden Anforderungen (Kompromiss aus hoher Fließfähigkeit und ausgeprägter Grünstandfestigkeit) erfüllt. Da die zu entwickelnden Betone eine wesentliche Abweichung in ihren rheologischen Eigenschaften

zu herkömmlichen selbstverdichtenden Betone aufweisen, ist zunächst das rheologische Verhalten des neuen Betons zu untersuchen und zu beschreiben.

Insbesondere soll geklärt werden, durch welche Zusatzmittel/-stoffe der Kompromiss aus hoher Fließfähigkeit und ausgeprägter Grünstandfestigkeit bzw. Formstabilität erreicht werden kann. Zu diesem Zweck ist das Verständnis der Abhängigkeit zwischen der Fließfähigkeit und der Entwicklung der Grünstandfestigkeit des Betons unumgänglich. Als Grünstandfestigkeit wird dabei die Festigkeit bezeichnet, bei der der Beton auch ohne die stützende Wirkung des Schalungskörpers unmittelbar nach dem Entformen bzw. im Alter von wenigen Minuten einzig aufgrund physikalischer Effekte, also noch nicht auf hydraulischen Reaktionen beruhend, von selbst in der eingebrachten Form verbleibt [35].

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen einen Beitrag zur Entwicklung eines neuen Baustoffes leisten, der den aktuellen Straßenbau erheblich verbessern kann. Aus diesem Grund konzentrieren sich die Ausführungen sowohl auf die Festlegung von Kriterien (unabhängig von den Komponenten der Betonzusammensetzungen) bezüglich der maximalen erreichbaren Fließfähigkeit in Verbindung mit erhöhter Grünstandfestigkeit bzw. Formstabilität eines freistehenden frischen Betonkörper innerhalb wenigen Minuten (3 bis 10), als auch auf die Bestimmung möglicher Anwendungsgrenzen, die zur Orientierung während der Entwicklung von selbstverdichtenden Betonen mit ausgeprägter Grünstandfestigkeit innerhalb wenigen Minuten dienen könnten.

Zudem sollen die daraus entwickelten Betone die allgemeinen Anforderungen an Straßenbetone (z. B. Frost-Taumittel-Widerstand, Erzielen einer ausreichenden griffigen Oberflächenstruktur) erfüllen.

1.3 Vorgehensweise

Um den angestrebten Kompromiss aus hoher Fließfähigkeit und ausgeprägter Grünstandfestigkeit in den ersten 3 bis 10 Minuten nach Mischende näher zu kommen, sind mehrere aufeinander aufbauende Arbeitsschritte erforderlich. Zur Entwicklung von selbstverdichtenden Betonen mit erhöhter Grünstandfestigkeit wurde dieses Forschungsvorhaben in folgende 5 wesentliche Schritte unterteilt:

1. Rheologische Untersuchungen an Bindemittelleimen. Für die Fließfähigkeit von Mörtel und Beton sind die rheologischen Eigenschaften des Bindemittelleimes von essenzieller Bedeutung. Erst mit entsprechend eingestellten Bindemittelleimen kann die Weiterentwicklung über Mörtel zum Beton mit den angestrebten Eigenschaften erfolgen [73]. Daher wurden zunächst an Bindemittelleimen die wesentlichen Einflussparameter auf die Fließfähigkeit und das thixotrope Verhalten von Beton untersucht, wozu

verschiedene Betonzusatzmittel (z. B. Thixotropiermittel, thixotropierende Zusätze, Luftporenbildner und Fließmittel) sowie Betonzusatzstoffe (z. B. Quarzmehl, Metakaolin etc.) mit einbezogen wurden.

2. Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse der rheologischen Untersuchungen an Bindemittelleimen auf die Mörtelherstellung. Nach [9] kann anhand von an Mörtel durchgeführten rheologischen Untersuchungen mit hoher Wahrscheinlichkeit die Rheologie eines selbstverdichtenden Betons prognostiziert werden. Daher ist es möglich, mittels kleinmaßstäblicher Untersuchungen an Mörteln, die Wirkung verschiedener Zusatzmittel/-stoffe und deren Einfluss auf die Fließfähigkeit und Thixotropie an damit hergestellten Beton zu erfassen.
3. Herstellung von thixotrop eingestellten Betonen. In einem weiteren Schritt wurden die aus dem Bindemittelleim- und Mörteluntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse zur ersten, orientierenden Herstellung von selbstverdichtenden Beton mit ausgeprägten thixotropen Eigenschaften herangezogen.
4. Optimierung der thixotrop eingestellten Betone für die Anwendung im Straßenbau. Die von in Schritt 3 entwickelten thixotrop eingestellten Betonzusammensetzungen, die den besten Kompromiss aus hoher Fließfähigkeit und ausreichend hoher Grünstandfestigkeit gezeigt haben, wurden ausgewählt, um mittels eines „Mini-Pavers“ die Anforderungen für den Einsatz der entwickelten selbstverdichtenden Betone im Straßenbau unter Laborbedingungen zu reproduzieren [144][145].
5. Festlegung der maximalen erreichbaren Fließfähigkeit von selbstverdichtenden Betonen mit gleichzeitigen ausgeprägten thixotropen Eigenschaften. Abschließend wurden unabhängig von den Komponenten der Betonzusammensetzungen Kriterien bezüglich der maximalen erreichbaren Fließfähigkeit in Verbindung mit einer minimalen notwendigen Grünstandfestigkeit festgelegt. Diese minimale Grünstandfestigkeit müssen selbstverdichtende Betone entwickeln, um eine erhöhte Formstabilität innerhalb weniger Minuten (3 bis 10) aufweisen zu können. An diesen Kriterien kann sich die Entwicklung von selbstverdichtenden Betonen mit ausgeprägten thixotropen Eigenschaften bzw. erhöhter Grünstandfestigkeit orientieren.

2. Stand der Erkenntnisse

2.1 Stand der Technik im Betonstraßenbau

Betonfahrbahndecken müssen in kürzester Zeit über sehr große Strecken (mehrere Kilometer innerhalb weniger Tage) hergestellt werden. Um einen immensen Schalungsaufwand zu vermeiden, hat sich die Gleitschalungsfertigung auf diesem Sektor als wirtschaftliche Bauweise etabliert. Hierzu muss der Beton bereits wenige Minuten nach dem Einbau ausreichend grünstandfest sein.

Die im Fahrbahndeckenbau gegenwärtig verwendeten Betone weisen eine steife bis plastische Konsistenz (Verdichtungsmaßklassen C1 - C2) auf. Aufgrund dieser Konsistenz weisen die frischen Betone eine extrem hohe Fließgrenze τ_0 und ebenso eine hohe Viskosität η auf und sind daher nicht fließfähig [N 31].

Beim üblichen Herstellungsprozess von Fahrbahndecken wird der Beton aus dem Mischwerk mit Fahrmischern oder LKW mit offener Mulde zum Einbauort transportiert und vor dem Gleitschalungsfertiger aufgeschüttet. Mit einer Förderschnecke verteilt der Gleitschalungsfertiger den Beton auf die gesamte Einbaubreite, dieser gelangt dann in eine Schalung, wo der Beton durch Innenrüttler verdichtet und das Betonprofil seine spätere Form erhält (Abbildung 1).

Aufgrund der steifen Konsistenz sind die in Fahrbahndecken verwendeten Frischbetone durch Innenrüttler zu verdichten [N 2]. Eine gute Frischbetonverdichtung ist unabdingbar, um die geforderten Eigenschaften des Festbetons hinsichtlich der Festigkeit (Druck-, Biegezug-, und Verschleißfestigkeit), des Frostwiderstandes (niedrigere Wasseraufnahmefähigkeit) und der Oberflächengeschlossenheit (verringertes Porenraum) zu verbessern [1]. Eine nicht ausreichende Frischbetonverdichtung hat eine dramatische Auswirkung auf die Druck- und Biegezugfestigkeit. Je 1% nicht entwichener Luft führt bis zu rd. 6% Verlust der Druckfestigkeit bzw. bis zu rd. 4% Verlust der Biegezugfestigkeit.

Allerdings muss ein zu langes und/oder zu intensives Verdichten des Frischbetons, das zu einer Überverdichtung bzw. Betonentmischung führen könnte, vermieden werden. Die Innenrüttler sind in Gleitschalungsfertigern im Abstand von rd. 50 cm befestigt, zugleich ist der Abstand der Eintauchstellen im Frischbeton 5 bis 10 cm kleiner als der 10-fache Durchmesser des Innenrüttlers [158]. Wenn der Abstand der Eintauchstellen zu gering und/oder die Verdichtungsdauer sowie die verwendete Frequenz der Innenrüttler zu hoch wären, bestünde das Risiko einer lokalen übermäßigen Verdichtung im Bereich der Rüttelgassen. Entlang der Rüttelgassen würden die groben Anteile der Gesteinskörnung absinken. Infolge dessen wiese der Festbeton in der oberen Schicht einen höheren

Zementsteinanteil und einen geringeren Zuschlaganteil auf, was zu einer Verringerung von rd. 5 bis 10% der Druck-/Biegezugfestigkeit im Vergleich zur unteren Betonschicht führen würde. Die Anreicherung von Feinmörtel in der oberen Betonschicht würde gleichzeitig zu einer Erhöhung der Wasserleitfähigkeit führen, was mit einer Abnahme des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes und mit inhomogenen Schwindspannungen einherginge, die letztlich eine Rissbildung im Laufe der Nutzung zur Folge hätten [19][95][158]. Parallel dazu würden Bohrkerne, die aus den Rüttelgassen genommen wurden, infolge Überverdichtung auf einen Luftporengehalt von weniger als 3 Vol.- % aufweisen. Durch einen so niedrigen Luftporengehalt wären Frostschäden zu erwarten [95][144].

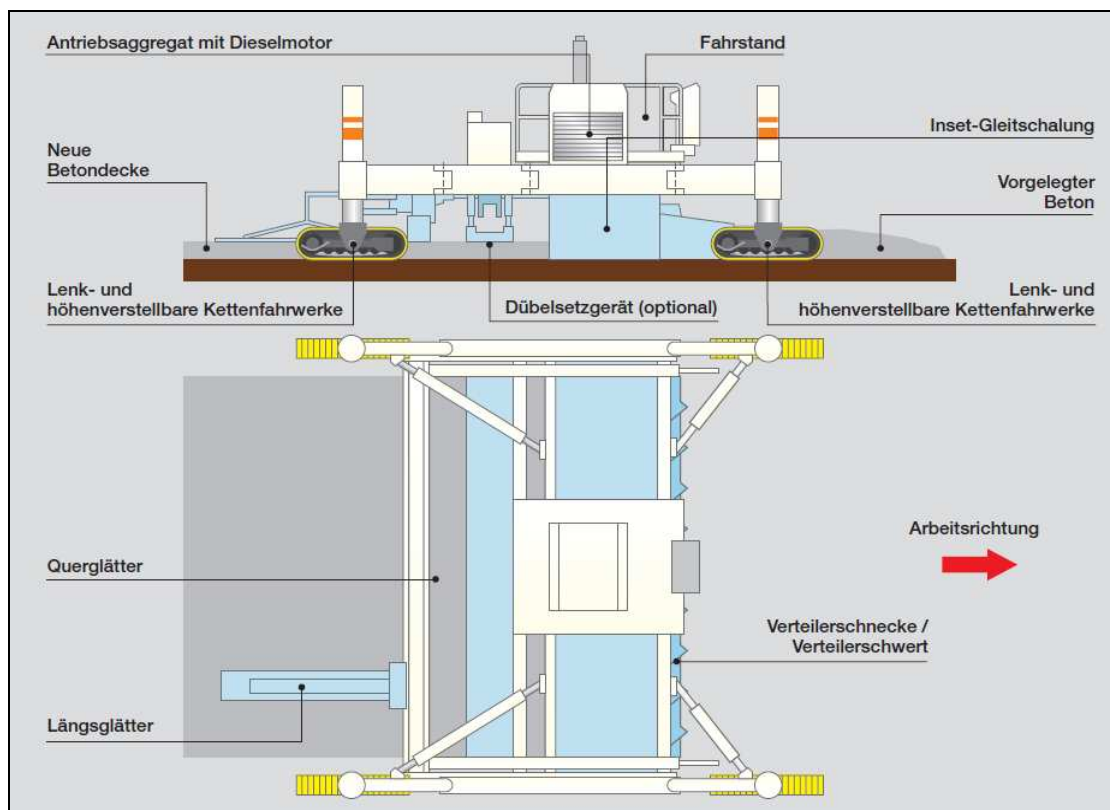


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses von Fahrbahndecken aus Beton [151]



Abbildung 2: Aufnahme und Verteilung von Beton [151]



Abbildung 3: Verdichtete und gefertigte Fahrbahnplatte [151]

Durch den Einsatz von SVB soll der Bauprozess wesentlich verbessert werden. Folgende Vorteile werden dabei erwartet:

- Wegfall der Verdichtungsarbeit. Hervorragende Betonqualität über den gesamten Querschnitt aufgrund fehlenden Bedarfs an externer Verdichtungsenergie (es entstehen keine Rüttelgassen) [145]
- Verbesserung der Festbetoneigenschaften sowie der Dauerhaftigkeit der Fahrbahndecken als Ergebnis einer verbesserten Verbundes zwischen der Gesteinskörnungen und dem erhärteten Zementleim [N 32]
- Erleichterung der Betonierarbeiten [129]
- Verbesserung des Lärmschutzes und des Gesundheitsschutzes auf Baustellen [139]

Um SVB mit dem Gleitschalungsfertiger einbauen zu können, muss er aufgrund der heutigen konstruktiven Prozesse während der Herstellung der Fahrbahndecken vom flüssigen in den plastischen Zustand übergehen. Der selbstverdichtende Beton muss vor dem Gleitschalungsfertiger in fließfähigem Zustand eingebracht werden, damit er aufgrund seiner hohen Fließfähigkeit entlüftet, jedoch muss er nach Verlassen des Gleitschalungsfertigers eine ausreichend hohe Grünstandfestigkeit aufweisen, damit die Fahrbahndecke im frischen Zustand unterstützungsfrei bzw. ohne Hilfe einer Schalung ihre Form beibehält. Dieser maßgebende Übergang muss während des Herstellungsprozesses der Fahrbahnplatte stattfinden und schließt eine rasche Entwicklung der inneren Reibung bzw. einer hohen Fließgrenze des Betons ein. Daher ergibt sich die Forderung, dass diese Betone innerhalb von wenigen Minuten vom fließenden zum plastischen Zustand bzw. grünen Beton übergehen müssen (Abbildung 4 und Abbildung 5).

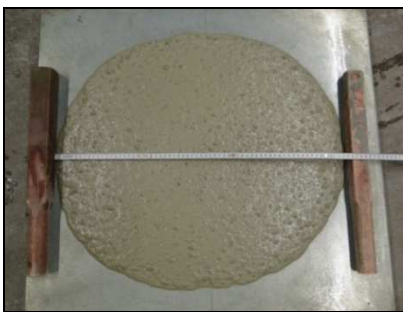


Abbildung 4: Fließender Zustand, Fließgrenze τ_0 nahezu gleich null



Abbildung 5: Plastischer Zustand, Höhe Fließgrenze

Die für die hohe Grünstandfestigkeit notwendige hohe Fließgrenze, die der SVB entwickeln muss, widerspricht der anfänglich geringen Fließgrenze, die für seine Selbstverdichtung erforderlich ist. Aus diesem Grund müssen diese zwei einander entgegenlaufenden Eigenschaften über eine ausgeprägte Thixotropie im Beton kombiniert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Grünstandfestigkeit des Frischbetons ausschließlich durch physikalische Effekte (insbesondere Kapillarkräfte und Oberflächenspannungen) definiert.

Die Hydratation des Zements spielt in diesem Stadium noch keine Rolle. Im Laufe der Zeit wird dann die Zementhydratation fortschreiten und mit zunehmendem Erstarren und Erhärten geht der „grüne“ Beton in den „jungen“ Beton über. Die Eingrenzung zwischen „grüner“ und „junger“ Phase lässt sich nicht genau bestimmen [35].

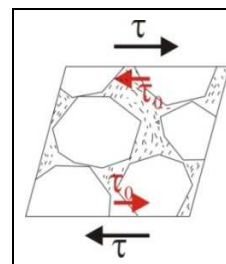
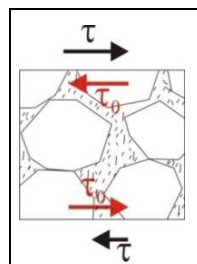
Wenn das Profil der Fahrbahndecke während des Überfahrens mit dem Gleitschalungsfertigers geformt wird, befindet sich der verdichtete freistehende Betonkörper unter Beanspruchung von äußeren Reibungskräften. Die Reibungskräfte entstehen an der Seiten zwischen der Gleitschalung und den Seiten des geraden betonierten Betonkörpers sowie an der oberen Betonoberfläche, wenn die Quer- und Längsglätter der Fahrbahndecke die endgültige Oberflächenbeschaffenheit herstellen (Abbildung 6).



Abbildung 6: Reibungskräfte zwischen betonierten Fahrbahnplatte und Gleitschalungsfertiger [151]

Damit die Fahrbahndecke die gewünschte Form unterstützungsfrei beibehalten kann, sollte die äußere Beanspruchung (Reibung zwischen Beton und Gleitschalungsfertiger sowie Beton und Quer- und Längsglätter) die Fließgrenze τ_0 des Frischbetonkörpers (bzw. die Summe aller innere Reibung) unterschreiten (Abbildung 7). Im Gegensatz dazu beginnt ein Körper, welcher von einer Spannung (äußere Reibung) $\tau > \tau_0$ beansprucht wird, mit einer gewissen Geschwindigkeit unter der Einwirkung der Differenz $\Delta\tau = \tau - \tau_0$ (worin τ_0 die Fließgrenze ist) zu fließen (Abbildung 8) [76].

**Abbildung 7: $\tau < \tau_0$,
die Form wird
gehalten**



**Abbildung 8: $\tau > \tau_0$,
der Körper fließt
unter $\Delta\tau = \tau - \tau_0$**

2.2 Technologie des selbstverdichtenden Betons

2.2.1 Allgemeines

Selbstverdichtender Beton (SVB) ist ein Hochleistungsbeton, bei dem sich das besondere Leistungsvermögen auf die Frischbetoneigenschaft „Selbstverdichtung“ bezieht. Ein SVB fließt allein unter dem Einfluss seines Eigengewichtes über weite Strecken, ohne dabei zu entmischen und ohne an Bewehrungshindernissen zu blockieren, nahezu bis zum Niveaueausgleich. Dabei entlüftet er sich selbstständig und füllt alle Zwischenräume vollständig aus [N 1].

Die erforderliche Konsistenz, die für die Selbstentlüftung des SVB notwendig ist, schließt auch die Entmischungsgefahr ein, da sich aufgrund der Gravitation grobe Gesteinskörnungen schneller absetzen als feine. Aus diesem Grund soll die Viskosität η , verglichen mit der Viskosität konventioneller Betone, hoch sein, damit die Gefügestabilität sichergestellt ist (Abbildung 9) [54][75][149].

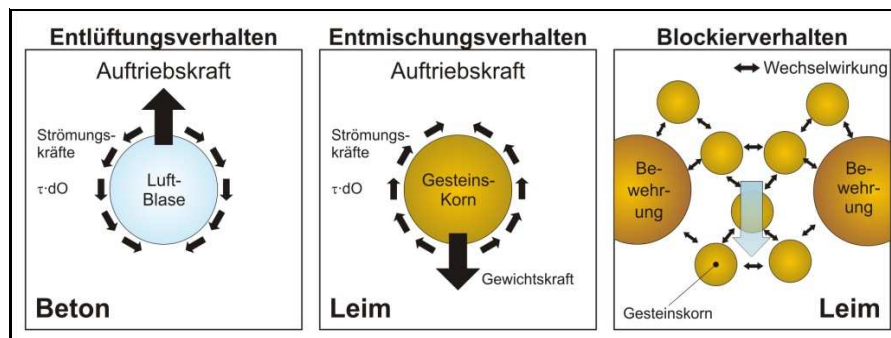


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Mechanismen bei der Entlüftung und Entmischung von Betonen sowie beim Blockieren der Gesteinskörnungen an Hindernissen [54]

Der grundlegende Unterschied zwischen einem selbstverdichtenden Beton und einem herkömmlichen Rüttelbeton liegt in der Philosophie ihrer Rezepturentwicklung.

Die Rezepturentwicklung eines SVB erfolgt nach dem Kriterium eines erhöhten Volumenanteils des Bindemittelleims ($> 260 \text{ l/m}^3$) im Stoffraum, zwecks Verringerung des Scherwiderstandes im Beton. Das Wasser bildet zusammen mit dem Fließmittel und dem Mehlkorn (Zement, Zusatzmittel und Zusatzstoffe mit einem Korndurchmesser $d < 0,125 \text{ mm}$) das Suspensionsmittel (Bindemittelleim), in dem die groben Gesteinskörner „schwimmen“ und transportiert werden [35]. Im Gegensatz dazu vermögen die groben Gesteinskörnungen im Rüttelbeton wegen ihrer Trägheit den Hin- und Herbewegungen, die mit den Innenrüttlern eingebracht werden, nicht zu folgen. Daher wird der feine Mörtel als schwingungsübertragendes Element in die Hohlräume zwischen groben Gesteinskörnungen

eindringen, wobei eingeschlossene Luft in Form von Luftblasen an der Oberfläche des Rüttelbetons entweicht [1].

Anhand von Abbildung 10 kann das rheologische Verhalten eines selbstverdichtenden Betons erklärt werden. Die wesentlichen Kennwerte zur Steuerung der Konsistenz eines Betons sind die stoffliche Zusammensetzung des Bindemittelleims, der Kornaufbau der Gesteinskörnung sowie der Volumenanteil von Bindemittelleim und Gesteinskörnung im Stoffraum. Ein bestimmtes Korngemisch im Beton erhält seine Beweglichkeit durch den Bindemittelleim, dessen Verarbeitbarkeit von der Kornform, der Korngröße, der Oberflächenladung in der Suspension sowie von der chemischen Reaktivität des Mehlkorns abhängig ist. [35]

Die qualitative und quantitative Beschreibung der Verarbeitbarkeit eines selbstverdichtenden Betons kann anhand der rheologischen Kennwerte (Fließgrenze und dynamische Viskosität) beschrieben werden. Selbstverdichtende Betone zeichnen sich durch eine geringe, gegen Null konvergierende Fließgrenze τ_0 und eine hohe dynamische Viskosität η' aus. Die Fließgrenze τ_0 und die dynamische Viskosität η' hängen im Wesentlichen von dem Wasser/Feststoff-Verhältnis der Suspension ab, die Fließgrenze τ_0 zusätzlich von den Oberflächenladungen der Feststoffpartikel [35].

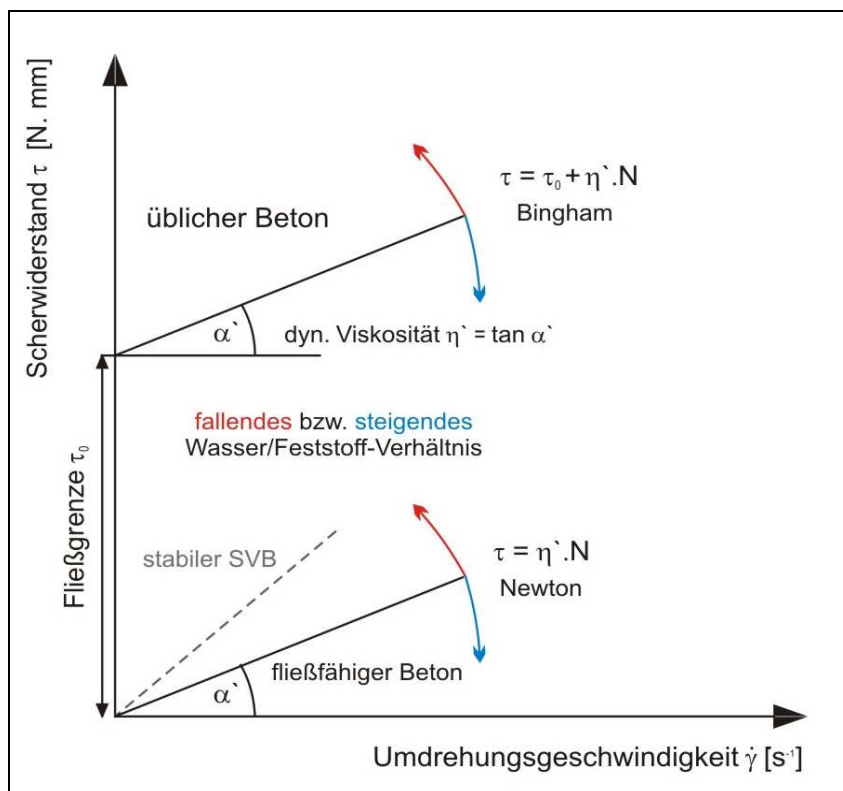


Abbildung 10:
Rheometrisches Verhalten von Betonen; übliche Betone (Bingham-Körper), selbstverdichtende Betone (Newton-Flüssigkeit) [35]

2.2.2 Konzept für die Herstellung eines SVBs: Okamura-Verfahren

Die Rezepturentwicklung eines neuen SVBs erfolgt anhand einer Reihe von Leim-, Mörtel- und Betonuntersuchungen (Setzfließmaß und Ausfließtests). Ausgehend von den Ergebnissen dieser Untersuchungen ist die optimale Verflüssigung der ausgewählten Feinstoffe und Gesteinskörnungen mittels Wasser und Fließmittel zu bestimmen [35].

Hinsichtlich ihrer Mischungszusammensetzung lassen sich die SVBs in drei unterschiedliche Typen, den Mehlkorntyp, den Stabilisierertyp und den Kombinationstyp unterteilen [139].

Tabelle 1: Typen von selbstverdichtenden Betonen

SVB-Typ	Mehlkorngehalt [kg/m ³]
Mehlkorntyp	550-650
Stabilisierertyp	350-500
Kombinationstyp	Abhängig von der Stabilisiererzugabe

Der Mehlkorntyp ist charakterisiert durch einen erhöhten Mehlkorngehalt. Infolge des verringerten Wasser-Mehlkorn-Verhältnisses steigen zunächst die Fließgrenze und die dynamische Viskosität des Betons an. Durch die Wirkung von Fließmitteln auf Polycarboxylat-Basis wird infolge von elektrosterischer Dispergierung die Agglomeration der Zementpartikel behindert und die daraus resultierenden Fließgrenze des Frischbetons stark abgesenkt, wobei die plastische Viskosität annähernd konstant bleibt [12].

Der Stabilisierertyp wird durch die Zugabe geeigneter stabilisierender Zusätze ohne wesentliche Erhöhung des Mehlkorngehaltes gegenüber normalen Rüttelbetonen charakterisiert, da bei diesen Betonen zur Sicherstellung der Fließfähigkeit der Gesamtmischung eine Erhöhung des Wassergehaltes und damit des Wasser-Mehlkorn-Verhältnisses erforderlich ist. Dies führt zur einer Reduzierung der Fließgrenze sowie einer Verringerung der Viskosität des Leims und damit des Betons. Um das Entmischungsrisiko des Stoffsystems zu verringern, müssen Stabilisierer zugegeben werden.

Der Kombinationstyp vereint die Zugabe stabilisierender Zusätze und die Erhöhung des Mehlkorngehaltes. Neben der Reduzierung des Mehlkorngehaltes gegenüber dem Mehlkorntyp weist dieser Beton eine reduzierte Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen der Mischungskomponenten auf [109][129][N 32].

Das erste und bekannteste Mischungskonzept wurde von Okamura entwickelt. Es ist im Wesentlichen ein empirischer Vorgang, der mit einem erheblichen experimentellen Aufwand verbunden ist. [73][109][129].

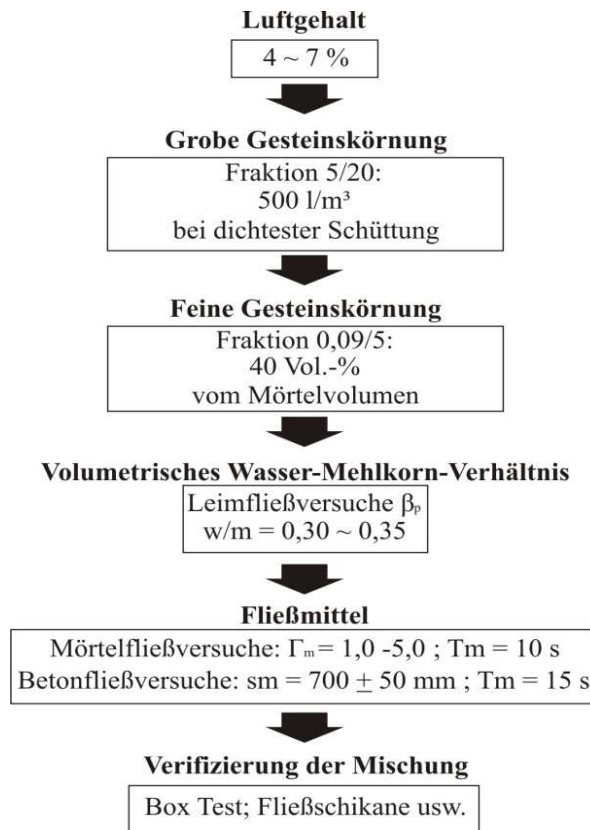


Abbildung 11: Mischungsentwurf nach Okamura [73]

Die Entwicklung des selbstverdichtenden Betons erfolgt anhand folgender Schritte:

a. Festlegung des Luftgehaltes

Ein Luftporengehalt von 4 bis 7 Vol.-% ist besonders geeignet, um den Frost-Tau-Widerstand, sowie die Oberflächengüte von Fahrbahndecken zu verbessern. Ein Luftgehalt von weniger als 4 Vol.-% löst Schädigungsprozesse aus, die insbesondere aufgrund der Eisexpansion und der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Bestandteile in der Betonmatrix entstehen.

b. Festlegung des Gehalts an feiner (Sandgehalt) und grober Gesteinskörnung

Selbstverdichtende Betone bestehen zu 50 bis 60 Vol.-% aus Mörtel bzw. zu 50 bis 40 Vol.-% aus grober Gesteinskörnung. Der Mörtel wiederum enthält rund 60 Vol.-% Leim bzw. 40 Vol.-% Sand.

c. Leimversuche: Bestimmung des β_p -Wertes

Zur Bestimmung der Zusammensetzung des Leims ist ein iteratives Vorgehen notwendig, da sich die tatsächlichen Volumenanteile des Mehlkorns erst bei bekanntem Wassergehalt

bestimmen lassen. Der sogenannte β_p -Wert dient bei der Rezepturentwicklung für selbstverdichtenden Beton nach der Methode Okamura zur Bestimmung des Mindestwassergehaltes eines Mehlkorngemisches. Zur Ermittlung des β_p -Wertes werden Setzfließmaßversuche mit verschiedenen Wasser-Mehlkorn-Volumenverhältnissen $(V_w/V_p)_i$ durchgeführt. Dabei bleiben die Mehlkornzusammensetzung und das Volumen der Leimmischung konstant. In einem Diagramm wird, wie in Abbildung 12 dargestellt, das jeweilige Wasser-Mehlkorn-Volumenverhältnis (V_w/V_p) über die ermittelte relative Setzfließfläche Γ_i aufgetragen. Die Verbindungsgerade der einzelnen Werte liefert das Wasserrückhaltemaß β_p (Schnittpunkt mit der Ordinate) und den Deformationsfaktor E_p . Dabei ist β_p das Wasser-Mehlkorn-Volumenverhältnis, bei dem die Verformung des Leims Null ist und alle Hohlräume des Mehlkornhaufwerks mit Wasser gefüllt sind. Zur Auswertung und zur Bestimmung des β_p -Wertes sollten nur relative Setzfließflächen Γ_i herangezogen werden, die Werte größer 1 und kleiner 5 aufweisen. Insgesamt ist zu beachten, dass der β_p -Wert durch lineare Extrapolation gewonnen wird. Das wirkliche Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis für Hohlraumfüllung liegt jedoch unterhalb des β_p -Wertes, da die Kurve nicht linear verläuft. Daher kann das Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis für Sättigung um bis zu 30 % vom β_p -Wert abweichen.

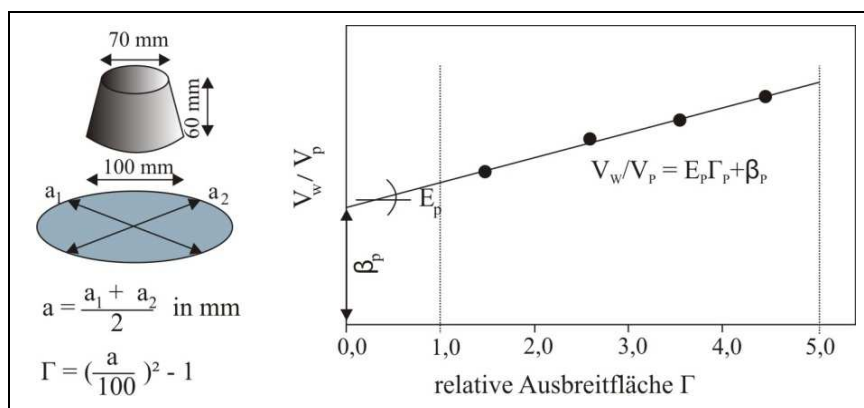


Abbildung 12: Bestimmung des β_p -Wertes (an Bindemittelleimen) nach Okamura [73]

d. Mörtelversuche: Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Mörtelviskosität

Bei der herkömmlichen Rezepturentwicklung selbstverdichtender Betone wird ein bestimmtes Fließverhalten des Mörtels angestrebt. Bei bekanntem β_p -Wert kann nun der optimale Startwassergehalt für die Entwicklung des Mörtels bestimmt werden. Da der β_p -Wert durch lineare Regression ermittelt wurde, liegt das wirkliche Wasser-Mehlkorn-Volumenverhältnis (V_w/V_p) für eine vollständige Hohlraumfüllung 10 bis 30% unter dem an Bindemittelleimen ermittelten β_p -Wert. Daher kann das Wasser-Mehlkorn-Volumenverhältnis (V_w/V_p) des Mörtels zu $0,7$ bis $0,9 \cdot \beta_p$ -Wert berechnet werden. Um die Eignung des Mörtels

für die Verwendung in einem selbstverdichtenden Beton zu überprüfen, ist nach Okamura die Trichterauslaufzeit am Mörtel mit einem relativen Setzfließmaß von $\Gamma_i = 5$, was einem Setzfließmaß von $sm = 245 \text{ mm}$ entspricht, zu bestimmen (Abbildung 13). Die Trichterauslaufzeit T_m des Mörtels für SVB mit einem Setzfließmaß von 245 mm soll 10 s betragen.

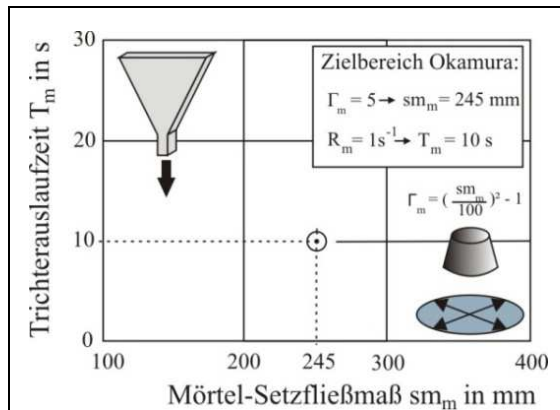


Abbildung 13: Zielbereich der Mörteloptimierung für SVB nach Okamura [73]

e. Betonversuche: Bestimmung des optimalen Fließmittelgehalts

Wenn durch Variation der Wasser- und Fließmittelzugabe das nötige Mörtel-Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit erreicht sind, werden in Betonversuchen die Wasser- und Fließmittelgehalte angepasst, d. h. ebenfalls auf einen bestimmten Startwert eingestellt. Erst wenn der Beton ein bestimmtes „Setzfließmaß“ in Verbindung mit einer bestimmten relativen „Trichterauslaufgeschwindigkeit“ aufweist, ist der richtige Beton gefunden.

Nach Kordts [73] führen die von Okamura angegebenen Verarbeitbarkeitseigenschaften der entwickelten Mörtel zur Verwendung in einem SVB zu einem Setzfließmaß des Betons von rund 700 mm und einer Trichterauslaufzeit von rund 15 s.

Gemäß Kordts [77] hängt die genaue Lage und die Größe des jeweiligen Verarbeitbarkeitsfensters jedoch stark von den verwendeten Ausgangsstoffen und ihrer Kombination ab. Hervorzuheben sind z. B. die Verarbeitbarkeitsfenster für SVB 3 und für SVB 4 (Abbildung 14). SVB 3 zeigt optimale selbstverdichtende Eigenschaften bei Setzfließmaßen zwischen 600 und 750 mm in Kombination mit Trichterauslaufzeiten von 10 bis 20 Sekunden. SVB 4 dagegen, zeigt optimale selbstverdichtende Eigenschaften bei Setzfließmaßen zwischen 700 und 820 mm sowie Trichterauslaufzeiten von 12 bis 22 Sekunden.

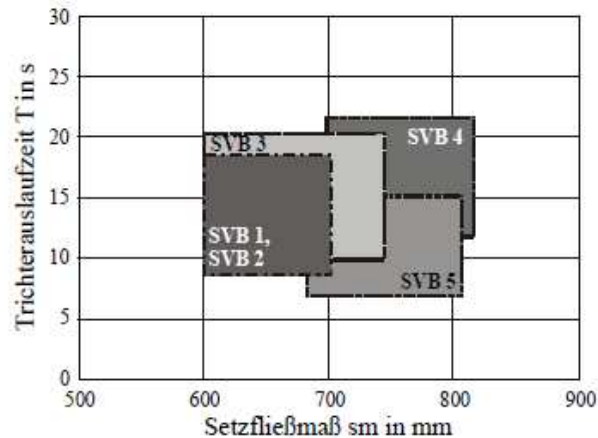


Abbildung 14: Setzfließmaße und Trichterauslaufzeiten für optimale selbstverdichtende Eigenschaften [73]

2.2.3 Frischbetoneigenschaften von selbstverdichtendem Beton

Verarbeitbarkeit: Die Verarbeitbarkeit eines Frischbetons ist keine direkt messbare physikalisch definierte Größe, sondern ein integrativer Wert, bei dem unter anderem verschiedene physikalische Größen, wie die rheologischen Eigenschaften des Betons (Viskosität und Fließgrenze) sowie innere Reibung erfasst sind. Diese physikalischen Größen beeinflussen das Verhalten des Frischbetons beim Mischen, Fördern, Einbringen und Verdichten.

Die Verarbeitbarkeit ist eine maßgebende Betoneigenschaft, die in Zusammenhang mit den Anforderungen des Einsatzbereiches abgestimmt werden muss und mittels des Begriffes Konsistenz quantitativ beurteilt werden kann. Die Konsistenz ist kein Maßstab für andere Betoneigenschaften, jedoch können Konsistenzänderungen Hinweise auf unplanmäßige Änderungen der Mischungszusammensetzung geben [25][35][50][35].

Die Frischbetonkonsistenz kann gemäß des Ausbreitversuches bestimmt werden. Das Ausbreitmaß eignet sich besonders für Betone mit Ausbreitmaßen bis zu 630 mm bzw. für Betone mit weicher bis fließfähiger Konsistenz. Bei Ausbreitmaßen über 700 mm ist die DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ sowie die Norm DIN-EN 206-9 zu beachten [N 1] [N 28].

Entsprechend der an ihn gestellten Anforderungen kann der SVB in verschiedene Anforderungsklassen eingeteilt werden [N 28]. Die Einteilung erfolgt nach dem benötigten Setzfließmaß und je nach Einsatzbereich. Nachfolgend sind die 3 typischen Setzfließmaßklassen für verschiedene Anwendungen angegeben [N 32]:

SF1 (550-650 mm) ist geeignet für:

- Nicht bewehrte oder leicht bewehrte Bauteile, bei denen die Betoneinbringung von oben erfolgt, der Beton kann sich von der Befüllungsstelle ungehindert ausbreiten (z. B. Wandplatten, Fahrbahndecken).
- Betoneinbringung mittels Pumpen (z. B. Tunnelauskleidungen).
- Schlanke Bauteile, die kein langes horizontales Fließen erfordern (z. B. Pfähle und tiefe Gründungen).

SF2 (660-750 mm) ist für normale Anwendungen geeignet (z. B. Wände, Säulen).

SF3 (760-850 mm) wird für vertikale Bauteile mit sehr dichter Bewehrung, für Bauteile mit komplexen und komplizierten Formen oder für Bauteile mit oben liegender Schalung verwendet.

Bei Anwendung von SVB der Fließmaßklasse SF3 (760-850 mm) ist eine bessere Oberflächenqualität erreichbar als mit SF2, jedoch ist die Gefahr einer Entmischung größer. Setzfließmaße über 850 mm können in Spezialfällen festgelegt werden, jedoch ist die Entmischungsgefahr deutlich höher als bei SF3, und das Größtkorn sollte 12 mm nicht überschreiten.

Selbstnivellierung: Die Selbstnivellierung ist eine der herausragenden Eigenschaften eines SVBs. Nach [28] ergab sich, dass bei gleichem Setzfließmaß zweier SVBs der niederviskosere (schnell fließender SVB bzw. Stabilisierertyp) erwartungsgemäß besser ausnivelliert als die höher viskoserer (langsam fließender SVB bzw. Mehlkorntyp). Dieses ist auf die höheren Fließgeschwindigkeiten der niederviskoseren SVBs, bedingt durch die niedrigere Viskosität sowie der geringeren Reibung zwischen Beton und Schalung, und die üblicherweise geringeren Fließgrenzen dieser Betone zurückzuführen.

Entlüftungsverhalten: Die Selbstentlüftung ist das entscheidende Merkmal eines SVB. Nach [N 12] ist es möglich, die theoretische Frischbetondichte bei bekannter Mischungszusammensetzung aus der Rohdichte der Ausgangsstoffe zu bestimmen, wodurch die Verdichtung bzw. der Luftgehalt im Beton kontrolliert werden kann [54][56][139].

Beim Mischen sowie bei der Fließbewegung bis zur endgültigen Position des Betons in der Schalung nimmt der selbstverdichtende Beton abhängig von seiner Konsistenz ein Luftvolumen zwischen 5 und 20 M.-% auf. Um die gewünschten Luftgehalte im Frischbeton im eingebauten Zustand zu erreichen, muss der Beton in der Lage sein in der Schalung ausreichend selbständig zu entlüften [48].

Nach [154] verläuft der Entlüftungsvorgang im Frischbeton ähnlich der Sedimentation der Gesteinskörnungen ab. Die Dichteunterschiede der Medien Luft und Beton führen zu einem Auftrieb der Luftblasen (Abbildung 15). Nach Proske [109] ist anzumerken, dass die Dichteunterschiede zwischen Luft und Bindemittelleim mit $\Delta\rho$ Luft-Leim = 2,0 normalerweise höher als zwischen Bindemittelleim und Gesteinskörnung ($\Delta\rho$ Leim-GK = 0,8) sind.



Abbildung 15: Auftrieb der Luftblase [56]

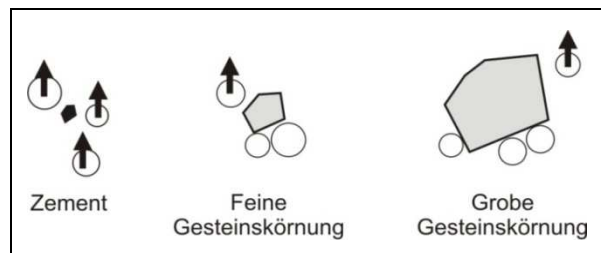


Abbildung 16: Behinderung der Luftbläschen beim Aufsteigen durch die Feststoffe [34]

Die Aufwärtsbewegung der Luftblasen in einer Suspension ist von ihrer Größe sowie von den rheologischen Kenngrößen der umgebenden Suspension abhängig. Größere Luftblasen werden schneller aufsteigen als kleinere. Auf gleiche Weise werden Luftblasen schneller in Betonen mit niedriger Fließgrenze und plastischer Viskosität aufsteigen als in solchen mit hoher Fließgrenze und Viskosität. Die benötigte hohe dynamische Viskosität des SVBs, die zu einer Hemmung des Entmischens führt, ist gleichzeitig ein maßgebendes Kriterium des Entlüftungsvorgangs. Sie muss gleichzeitig einen geringen Strömungswiderstand aufweisen, um den Auftrieb einer Luftblase nicht zu verhindern.

Ein weiterer Einflussfaktor bei der Selbstentlüftung ist die Präsenz der Gesteinskörnungen im Beton (Abbildung 16). Beim Steigvorgang kann die Luftblase nicht nur mit einem Gesteinskorn kollidieren und daher abgebremst werden, sondern kann auch an der Oberfläche des Gesteinskorns anhaften und dort festgehalten werden [34]. Die Länge des Weges, die eine Luftblase bis zu der Oberfläche des betonierten Bauteils zurücklegen muss, spielt ebenso eine wesentliche Rolle im Selbstentlüftungsvorgang. Je länger der Weg ist, umso unwahrscheinlicher ist es, dass eine Luftblase aufsteigt.

Abschließend ist es auch von Bedeutung, dass die Thixotropie der Betone beim Selbstentlüftungsvorgang maßgebend ist. Je ausgeprägter die Thixotropie einer Betonrezeptur ist, desto geringer ist die Fähigkeit zur Nachentlüftung im Ruhezustand. Bei unzureichender Entlüftungsfähigkeit erfolgt im Frischbeton oftmals ein Zusammenschluss vieler kleiner Luftporen zu größeren Poren insbesondere an der Schalungswand (sogenannte Bubble-Holes).

Sicherheit gegen Entmischen: Der frische SVB kann sich beim Transport, während des Einbaus sowie in der daran anschließenden Zeit bis zum Erstarrungsbeginn entmischen. Die Entmischung nach dem Einbau ist bei großen Elementen äußerst nachteilig, ebenso kann es aber auch zu Oberflächenfehlern wie z. B. Rissbildung auf Fahrbahndecken kommen. Dadurch verändern sich die Festbetoneigenschaften (z.B. Druck-, Biegezugfestigkeit und Frost-Tausalz-Widerstand) des SVB [139][N 32].

Mögliche Sedimentationserscheinungen sind:

- Absetzen: Das Absinken von Partikeln mit hoher Dichte
- Sedimentieren: Das Absinken der groben Gesteinskörnungen infolge Schwerkraft
- Bluten: Die Bildung einer Wasser- oder Zementleimschicht an der Betonoberfläche
- Aufschwimmen: Das Aufschwimmen von Partikeln aufgrund ihrer geringeren Dichte
- Absondern: Phasentrennung, z.B. Abfluss von Bindemittelleim oder Mörtel

Die Gefügestabilität eines Frischbetons wird vor allem durch die richtige Wahl der Gesteinskörnung und durch einen ausreichenden Zement- und Mehlkorngesamtgehalt sichergestellt [29]. Das Absondern von Wasser an der Betonoberfläche (Bluten) wird durch die unterschiedliche Dichte von Zement und Gesteinskörnung einerseits und Wasser andererseits ausgelöst. Wenn Zusatzmittel wie Fließmittel oberhalb des Sättigungspunktes zugegeben werden, sind alle Partikel in der Suspension dispergiert, wodurch die Neigung zu Entmischen und Bluten vergrößert wird. Der Sättigungspunkt definiert dabei die Fließmitteldosierung, ab der keine weitere Verflüssigung erzielt wird. Das „Bluten“ wirkt sich insbesondere auf die Dauerhaftigkeit von horizontalen Betonoberflächen (Fahrbahndecken) aus. Dieses „Bluten“ sorgt für eine Erhöhung des w/z-Wertes in der Randzone und somit für eine geringere Dichtigkeit des Porengefüges im Vergleich zur Mitte eines Betonbauteils. Zur Verringerung des Blutens eignen sich u.a. eine Reduktion des Wassergehaltes, ein ausreichender Mehlkorngesamtgehalt, die Verwendung feinkörniger Betonzusatzstoffe bzw. fein gemahlener Zemente und der Einsatz von Stabilisierern als Betonzusatzmittel [42].

Blockierverhalten: Die Bestimmung der Blockierneigung ist ein wesentliches Merkmal für die ausreichende Konsistenz des SVB, um zu gewährleisten, dass er an Bewehrungsgittern nicht blockiert. Der Blockiervorgang lässt sich mittels Abbildung 17 beschreiben [35] [N 1].

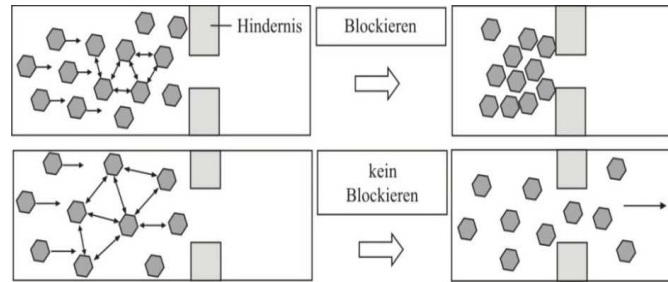


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Blockiervorgangs an einem Hindernis [109]

Das Blockieren von SVB ist ein dynamischer Entmischungsvorgang, bei dem es zu einer Anhäufung von grober Gesteinskörnung vor Hindernissen kommen kann. Wenn der frische Beton ein Hindernis überwinden muss, wie z. B. Fließen durch eng begrenzte Bereiche und schmale Öffnungen, wie ein dicht bewehrtes Bauteil, ändert sich die Anordnung der bewegte Partikel bzw. Gesteinskörnung in der Nähe des Hindernisses und abschließend nimmt die Anzahl der Zusammenstöße zwischen den Partikeln zu. Um das Hindernis zu durchströmen, müssen sich die Partikel neu ausrichten, ohne dass dabei Entmischung, Verlust der Gleichmäßigkeit bzw. Verstopfung auftreten [21] [148][N 32].

Die Blockierneigung eines Betons kann anhand des Betrachtens der Geometrie und Anordnung der Bewehrung, der Fließfähigkeit des Betons, der Korngrößenverteilung und des Größtkorns in Zusammenhang mit den Abständen der Bewehrungsstäbe verringert werden [34]. Zusätzlich hat Proske [108] festgestellt, dass Betone mit einer höheren plastischen Viskosität eine deutliche niedrigere Neigung zum Blockieren aufweisen.

Robustheit: Die Robustheit ist die Eigenschaft von Beton, seine Frischbetoneigenschaften beizubehalten, wenn kleine Änderungen der Eigenschaften oder der Menge der Bestandteile auftreten. Bei ausgewogenen Betonrezepturen können geringe Abweichungen der Bestandteile toleriert werden. Diese Toleranz bezeichnet man als „Robustheit“ [61][N 32].

Selbstverdichtender Beton reagiert in der Regel sehr sensibel auf Änderungen in der Mischungszusammensetzung und der Eigenschaften der Ausgangsstoffe [30][73]. Veränderungen in den Bestandteilen der Mischungszusammensetzung ergeben sich aus Änderungen im Feuchtigkeitsgehalt der Ausgangsstoffe oder aus Änderungen der Sieblinie bzw. spezifischen Oberfläche. Unerwünschte Schwankungen in den Frisch- und Festbetoneigenschaften können teilweise durch den Einsatz möglichst gleichmäßiger Ausgangsstoffe sowie durch regelmäßige Messungen der Feuchtigkeit der Gesteinskörnungen vermieden werden [22][30]. Geringe Abweichungen in der Gleichmäßigkeit der Ausgangsstoffe und der damit verbundenen Konsistenzänderung können anhand einer Anpassung der Fließmitteldosierung korrigiert werden [82].

2.2.4 Festbetoneigenschaften: SVB gegenüber konventionellem Beton

Die benötigte extrem hohe Fließfähigkeit und Viskosität ergeben einen Beton, der im Vergleich zu herkömmlichem Beton die folgenden Kennzeichen aufweist [139]:

- Einen geringeren Gehalt an grober Gesteinskörnung,
- einen erhöhten Zementleimgehalt,
- ein geringes Wasser-Feinteil-Verhältnis,
- einen erhöhten Fließmittelgehalt und
- bei Bedarf ein viskositätsbeeinflussendes Zusatzmittel

Der daraus resultierende SVB weist im Vergleich zu konventionellem Beton die folgenden Unterschiede in seinen Eigenschaften auf [129][N 32]:

Dauerhaftigkeit: Verglichen mit Rüttelbeton ist die Dauerhaftigkeit eines SVBs höher. Der Rüttelbeton wird durch Innenrütteln verdichtet. Auch bei richtiger Ausführung erhält der Beton innerhalb des Einflussbereichs des Innenrüttlers nicht die gleiche Verdichtungsenergie. Das Ergebnis von diesem Verfahren ist ein Beton mit unterschiedlicher Dichtigkeit, was ein selektives Eindringen von aggressiven Substanzen in oberflächennahen Randzonen erleichtert. Ein richtig zusammengesetzter SVB ist frei von diesen Mängeln und deshalb liegt seine Permeabilität und die resultierende Dauerhaftigkeit im Bereich von hochfesten Normalbetonen.

Druckfestigkeit: Bei einem ähnlichen w/z-Wert weist der SVB eine leicht höhere Druckfestigkeit auf. Der Grund hierfür ist das Entfallen des Vibrierens des Betons während der Verdichtung, was zu einer verbesserten Verbindung zwischen der Gesteinskörnung und dem erhärteten Bindemittelleim führt.

Spaltzugfestigkeit: Das Verhältnis Spaltzugfestigkeit zu Druckfestigkeit fällt bei SVB höher aus als bei vergleichbaren Rüttelbetonen. Als Ursache wird eine weniger gestörte Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Matrix angegeben. In [N 32] wird jedoch von vergleichbaren Spaltzugfestigkeiten wie bei Normalbeton berichtet.

Elastizitätsmodul: Da ein SVB einen höheren Bindemittelleimgehalt als konventioneller Beton hat, liegt der Elastizitätsmodul von SVB bei vergleichbarer Druckfestigkeit unterhalb der Werte von Rüttelbeton.

Kriechverformung: Infolge des hohen Anteils an des Bindemittelleims und dem vergleichsweise geringen Grobgesteinskörnungsgehaltes ist bei SVB mit erhöhten Kriechverformungen zu rechnen.

Schwinden: In gleicher Weise führt das erhöhte Bindemittelleimvolumen des SVBs zu einer Erhöhung des Schwindens gegenüber vergleichbaren Rüttelbetonen. Die Verringerung des Grobgesteinskörnungsgehaltes, zusammen mit der entsprechenden Erhöhung des Bindemittelleimgehaltes im Stoffraum, verursacht infolge erhöhten Schwindens größere Zugspannungen im SVB. Eine Verringerung des Größtkorns führt ebenso zu einem höheren Zementleimvolumen. Daher ergibt sich ein ausgeprägtes autogenes Schwinden infolge einer Volumenverringerung wegen der Hydratisierung der Zementpartikel und ein erhöhtes Schwinden beim Trocknen (Volumenverringerung wegen Abgabe von Wasser aus dem Beton in die Atmosphäre) im Vergleich zu Rüttelbetonen.

Haftung: Durch mangelndes Umschließen der Bewehrung durch den Beton verschlechtert sich der Verbund. Im Gegensatz dazu führen das extrem gute Fließverhalten und die intensivere Haftung des SVBs zu einer Verbesserung des Verbunds zwischen Beton und Bewehrungsstäben [N 27][N 33].

Wärmedehnzahl: Die Wärmedehnzahl des Betons variiert mit der Zusammensetzung, dem Alter und dem Feuchtigkeitsgehalt. Die Verwendung einer Gesteinskörnung mit geringer Wärmedehnzahl reduziert die Wärmedehnzahl des daraus resultierenden Betons, was zu einer Verringerung der Mindestbewehrung zur Rissbreitenbeschränkung führt.

2.3 Rheologie

2.3.1 Allgemeines

Die Rheologie beschreibt das Verformungsverhalten von Festkörpern und Fluiden unter Einwirkung von äußeren Kräften [119]. Eine einwirkende Kraft ist dabei immer mit einer Deformation des Körpers verbunden. Der Zusammenhang zwischen der äußeren Beanspruchung und dem Verformungsverhalten ist durch Stoff- und Fließgesetze beschreibbar. Das Deformationsverhalten bei Festkörpern sowie das Fließverhalten von Flüssigkeiten kann anhand eines Zwei-Platten-Modells beschrieben werden. Unter Annahme einer laminaren Schichtenströmung wird bei Bewegung der obersten Schicht eines Körpers die darunter liegende Schicht aufgrund der Kohäsionskräfte ebenfalls in Kraftrichtung bewegt und dabei der Körper gesichert (Abbildung 18) [25][45].

Weiterhin lassen sich die zwei charakteristischen rheologischen Kenngrößen (Schubspannung τ und Viskosität η) mittels des Zwei-Parallel-Platten-Modells definieren.

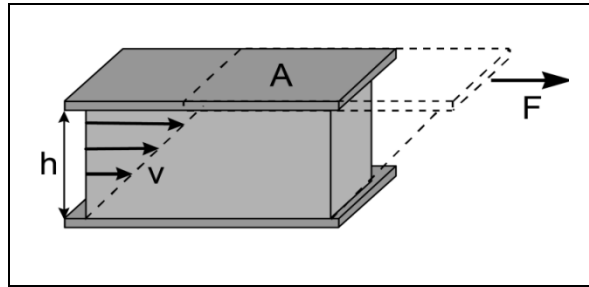


Abbildung 18: Zwei-Parallel-Platten-Modell zur Definition rheologischer Größen [25]

Der Scherwiderstand, den eine Substanz einer Bewegung entgegensetzt, wird durch die Schubspannung τ dargestellt:

$$\tau = \frac{F}{A} \left[\text{kN} / \text{m}^2 \right] \quad \text{Mit } F = \text{Scherkraft}; A = \text{Scherfläche} \quad \text{Gleichung 1}$$

Die Scherrate $\dot{\gamma}$ bezeichnet das Geschwindigkeitsgefälle innerhalb des Körpers:

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \left[\text{s}^{-1} \right] \quad \text{Mit } v = \text{Geschwindigkeit}; h = \text{Plattenabstand} \quad \text{Gleichung 2}$$

Die relative Viskosität η beschreibt die Zähigkeit eines Körpers, d. h. die mit zunehmender Scherrate ebenfalls zunehmende Schubspannung [50]. Sie wird durch das Verhältnis von Schubspannung zur Scherrate abgebildet:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \left[\frac{\text{kN} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right] \quad \text{Mit } \tau = \text{Schubspannung}; \dot{\gamma} = \text{Scherrate} \quad \text{Gleichung 3}$$

Aus Gleichung 3 ergibt sich dann das Fließgesetz einer Flüssigkeit:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \left[\text{kN} / \text{m}^2 \right] \quad \text{Gleichung 4}$$

2.3.2 Lineares Fließverhalten

Die grafische Darstellung der Gleichung 4 ergibt die Fließkurve einer Flüssigkeit. Steigt die Schubspannung τ linear mit der Scherrate $\dot{\gamma}$ an, ist das Fließverhalten der Flüssigkeit linear. Die Fließkurve solcher Flüssigkeiten kann mittels mathematischer Modelle beschrieben werden. Die einfachsten Modelle sind die Newton'sche und Bingham'sche Modelle.

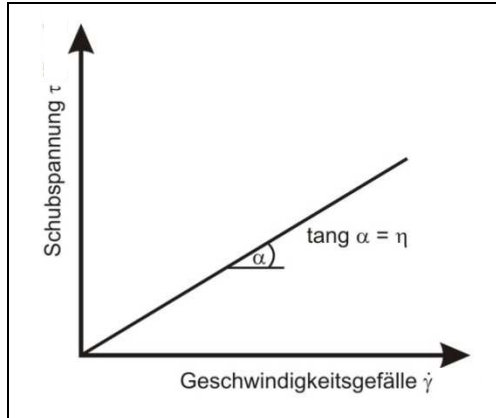


Abbildung 19: Newton'sche Flüssigkeiten [34]

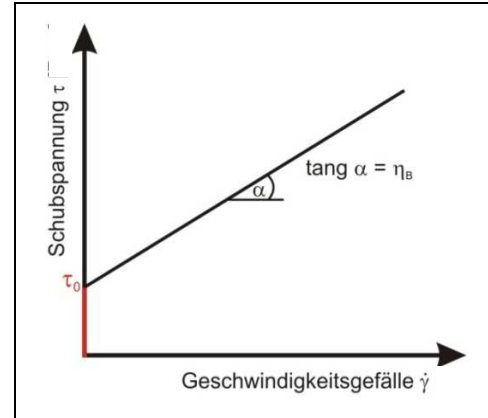


Abbildung 20: Bingham'sche Flüssigkeiten [34]

Nach [N 3] ist eine Newton'sche Flüssigkeit eine inkompressible, isotrope und rein viskose Flüssigkeit, deren Schubspannung τ und Scherrate $\dot{\gamma}$ direkt proportional sind (Abbildung 19). Bei idealviskosen Newton'schen Flüssigkeiten (z. B. Wasser, Öl) entspricht die Fließkurve einer Ursprungsgeraden mit $\tau = \eta \times \dot{\gamma}$. Dabei ist die Viskosität η (Steigung der Geraden) eine stoffbezogene Konstante, die von der Scherrate unabhängig ist. Die Scherspannung steigt dementsprechend linear mit der Scherrate an [28].

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad [\text{kN} / \text{m}^2]$$

Gleichung 5

Mit: τ = Schubspannung (kN/m^2); η = Viskosität ($\text{kN}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$); $\dot{\gamma}$ = Schergeschwindigkeit (s^{-1})

Flüssigkeiten, bei denen die τ - $\dot{\gamma}$ -Beziehung nicht durch den Ursprungspunkt verläuft, weisen eine Fließgrenze τ_0 auf. Dieser Grenzwert ist eine Schubspannung τ , unterhalb der sich das Material wie ein Festkörper verhält. Nach dem Überschreiten der Fließgrenze verhält sich das Material wie eine Flüssigkeit bzw. beginnt zu fließen. Diese Materialien können als plastischen Substanzen bezeichnet werden und vereinen sowohl Festkörper- als auch Flüssigkeitseigenschaften (Abbildung 20).

$$\tau = \tau_0 + \eta_B \cdot \dot{\gamma} \quad [\text{kN} / \text{m}^2]$$

Gleichung 6

Mit: τ = Schubspannung (kN/m^2); τ_0 = Bingham–Fließgrenze (kN/m^2); η_B = plastische Viskosität ($\text{kN/m}^2 \cdot \text{s}$); $\dot{\gamma}$ = Schergeschwindigkeit (s^{-1})

2.3.3 Nichtlineares Fließverhalten

2.3.3.1 Geschwindigkeitsabhängige Erscheinungsformen

Viele Flüssigkeiten zeigen keine direkte Proportionalität zwischen Scherrate $\dot{\gamma}$ und Schubspannung τ . Die Fließkurven dieser Substanzen weisen keinen linearen Verlauf auf. Dies ist an den Veränderungen der im Rheometer ermittelbaren Drehmomente bei gleichzeitiger Änderung der Scherrate sichtbar. Zwei verschiedene rheologische Erscheinungsformen können auftreten: Geschwindigkeitsabhängige und Zeitabhängige Erscheinungsformen.

Je nach Variation der Viskosität bei Änderung der Scherrate weisen die Flüssigkeiten entweder ein strukturviskoses (pseudo-plastisches) oder ein dilatantes Verhalten auf. Für diese Flüssigkeiten kann eine Viskosität als physikalische Stoffkonstante im Newton'schen Sinne nicht definiert werden. Aus diesem Grund wurde die Größe einer dynamischen Viskosität $\eta' = \tan \alpha'$ eingeführt, deren Größe vom Geschwindigkeitsgefälle abhängt.

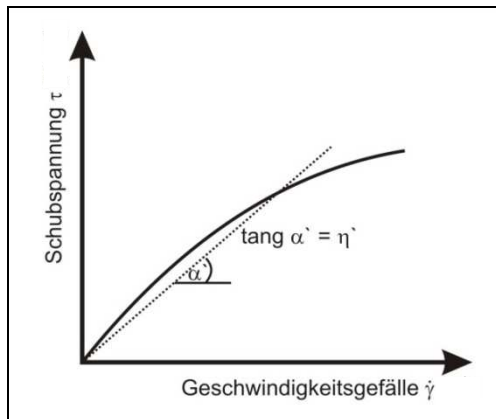


Abbildung 21: Strukturviskose Flüssigkeiten [34]

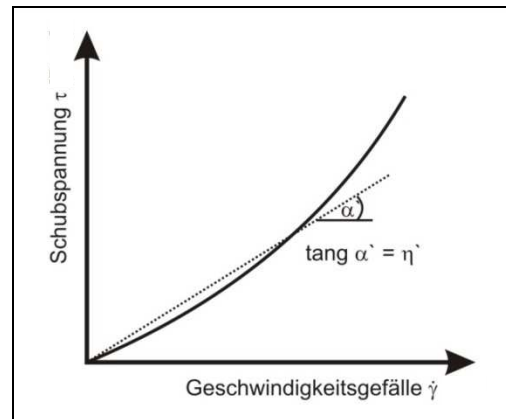


Abbildung 22: Dilatante Flüssigkeiten [34]

$$\tau = \eta' \cdot \dot{\gamma} \quad [\text{kN} / \text{m}^2]$$

Gleichung 7

Mit: τ = Schubspannung (kN/m^2); η = dynamische Viskosität ($\text{kN/m}^2 \cdot \text{s}$); $\dot{\gamma}$ = Schergeschwindigkeit (s^{-1})

Bei der Strukturviskosität nimmt die Viskosität η mit steigender Scherrate $\dot{\gamma}$ ab. Dies bedeutet, dass mit steigender Beanspruchung die Substanz dünnflüssiger wird.

Bei kleinen Schergeschwindigkeiten $\dot{\gamma}$ verhält sich ein pseudo-plastisches Fluid wie ein Newton'sches Fluid. Ab einer bestimmten (kritischen) Scherrate nimmt die Viskosität ab und es besteht kein linearer Zusammenhang zwischen Schergeschwindigkeit und Viskosität (Abbildung 21). Ursache für strukturviskoses (pseudo-plastisches) Verhalten ist ein anfängliches Verhaken der Partikel oder Verschlaufen von Makromolekülen, das mit zunehmender Scherrate abnimmt. Auch die Auflösung von Agglomeraten durch die Scherbelastung, die eine ellipsoide Verformung von kugelförmigen Tropfen verursacht, oder die Orientierung anisotroper oder nadelförmiger Partikel in Fließrichtung kann pseudoplastisches Verhalten hervorrufen. Diese Vorgänge bewirken eine Abnahme der Wechselwirkung zwischen den Teilchen, wodurch der Fließwiderstand sinkt [13][45][70].

Die Dilatanz beschreibt die Zunahme der Viskosität η bzw. der Scherspannung τ bei Erhöhung der Scherrate $\dot{\gamma}$ (Abbildung 22). Mit steigender Beanspruchung wird die Substanz dickflüssiger bzw. wird der innere Widerstand größer [13][45].

Die Zunahme der Viskosität entsteht durch eine Strukturänderung im Fluid, die verursacht, dass die einzelnen Fluid-Partikel stärker miteinander wechselwirken, z. B. sich verhaken und nicht aneinander gleiten können. Dies führt zur gegenseitigen Blockierung und Verkantung von Partikeln in der Suspension, wodurch der Fließwiderstand steigt [13]. Bei Suspensionen tritt mit steigender Scherbelastung ein zunehmender Zerfall von Partikeln auf. Durch die Entstehung mehrerer kleiner Partikel nimmt die spezifische Oberfläche zu und es wird mehr von der flüssigen Phase an die Partikel gebunden, wodurch die Beweglichkeit der Partikel abnimmt und die Viskosität steigt. Je höher die Scherbelastung ist, desto mehr Partikel zerfallen. Die Scherspannung steigt überproportional mit der Scherrate an [25].

2.3.3.2 Zeitabhängige Erscheinungsformen

Zahlreiche flüssige Systeme wie Lösungen, Emulsionen und Suspensionen zeigen Abweichungen vom Newton'schen Fließverhalten. Die Viskosität η ist bei konstanter Temperatur, konstantem Druck und konstanter Zusammensetzung keine Konstante, sondern abhängig von der Zeit. Nach vom Berg [17] sind sowohl reversible als auch irreversible Änderungen der Fließeigenschaften möglich. Zwei unterschiedliche Verhalten sind zu erkennen: Rheopexes und thixotropes Verhalten, deren zeitlicher Verlauf ihres Fließwiderstandes in Abbildung 23 dargestellt.

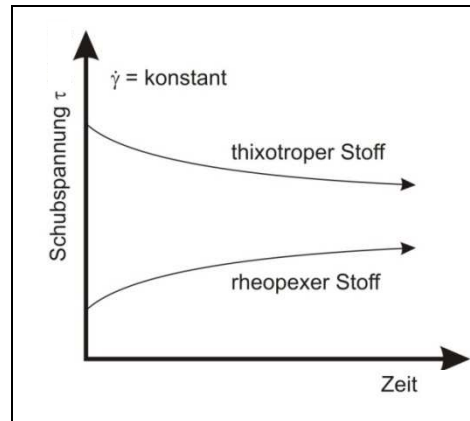


Abbildung 23: Thixotrope bzw. rheopexe Flüssigkeiten [17][109]

Wie aus Abbildung 23 ersichtlich ist, ist die Rheopexie die inverse Erscheinung zur Thixotropie. Die Rheopexie beschreibt die Zunahme der Scherspannung τ während einer anhaltender Scherbelastung gegen einen asymptotischen Grenzwert und die Wiederabnahme bis auf den Ausgangswert nach der Entlastung [25][70].

Nach DIN 1342-1 [N 3] wird die Thixotropie als ein zeitabhängiges Fließverhalten definiert, „bei dem die Viskosität infolge andauernder mechanischer Beanspruchung von einem Wert im Ruhezustand gegen einen Endwert hin abnimmt und nach Ende der Beanspruchung wieder zunimmt“. Dementsprechend stellt die Thixotropie eine Eigenschaft eines Materials dar, sich unter Einwirkung kinetischer Energie zu verflüssigen und nach deren Beendigung wieder in einen viskoserer Zustand überzugehen [5][15][20][28][40][41][112].

Da die Thixotropie auch als die Fähigkeit einer Flüssigkeit, in einem begrenzten Zeitraum von einem strukturellen Zustand in einen anderen und wieder zurück zu gehen definiert werden kann, können grundsätzlich alle Flüssigkeiten, die eine Mikrostruktur besitzen, thixotrope Eigenschaften aufweisen. Als treibende Kraft hinter den mikrostrukturellen Änderungen kann das Resultat des Wettbewerbs zwischen dem Strukturbruch unter Scherbelastung und dem Strukturaufbau aufgrund des Koagulationsvorgangs infolge von chemischer und physikalischer Wechselwirkungen gesehen werden (Abschnitt 2.4.2.2). Die Zeit, die für den Wiederaufbau der Mikrostruktur notwendig ist, ist in der Regel länger als die für den Strukturbruch notwendige Zeit.

Der Begriff „Mikrostruktur“ wurde bisher durch Billberg [21] als ein mit Teilchen ausgeflocktes System definiert, jedoch könnte es sich auch um Fasern handeln, die sich günstig auf dem Gebiet der Strömung arrangieren; Tröpfchen in einer Emulsion, die ihre Geometrie verändern sowie Moleküle in einer Polymerlösung, die sich aus einer wirren Anordnung in ein günstiges System im Bereich der Strömung anordnen. Je nach den unterschiedlichen Formationen dieser strukturellen Systeme in den Strömungen werden die Viskosität sowie die Elastizität der Flüssigkeiten bestimmt. Die Maximal-Mikrostruktur für eine Emulsion wird durch die zufällige Verteilung von Tröpfchen geregelt, während die Minimal-Mikrostruktur zu

beobachtet ist, wenn sich eine Verteilung asymmetrisch bezüglich die Fließrichtung der Strömung einstellt. Die Maximal-Mikrostruktur liefert die höchste Viskosität der Flüssigkeit und umgekehrt.

Zur Charakterisierung des thixotropen Verhaltens einer Suspension können verschiedene Ansätze zu Anwendung kommen. Der am meisten verbreitete Ansatz ist die Reaktion der Suspension infolge der Variation der Schergefälle. Diese Reaktion kann anhand der Veränderungen der im Rotationsviskosimeter oder Betonrheometer ermittelbaren Drehmomente beurteilt werden. Dabei können verschiedene so genannte Schergeschwindigkeits-Zeit-Profile angewandt werden:

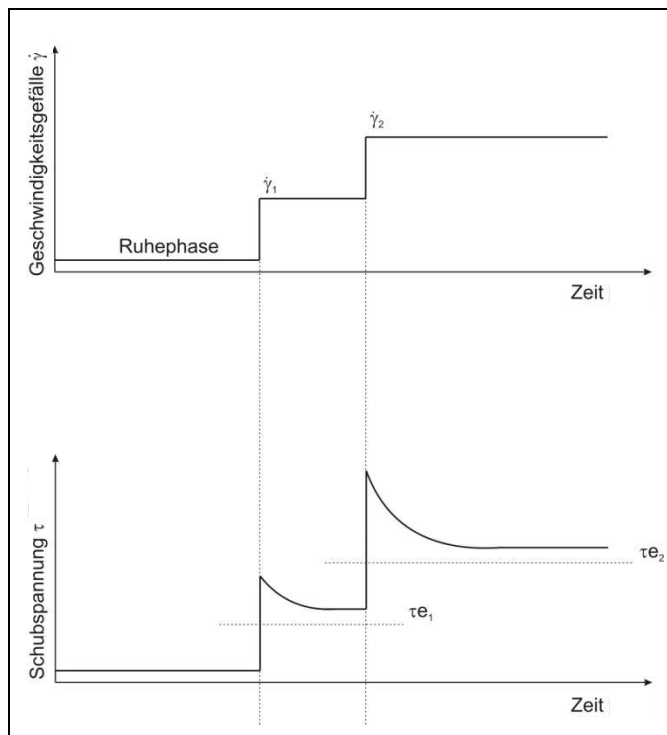


Abbildung 24: Stufenförmiges Messprofil [11]

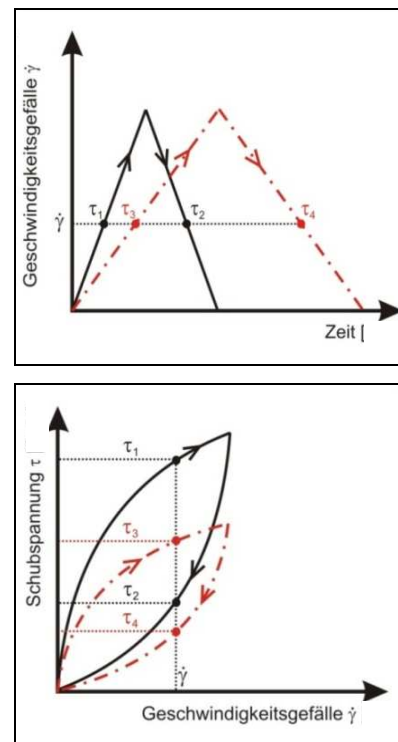


Abbildung 25: Dreieckförmiges Messprofil [11][20]

Abbildung 24 zeigt die schematische Darstellung des Schubspannungsverlaufes bei stufenförmigem Schergeschwindigkeits-Zeit-Profil. In diesem Messprofil steigt nach einigen Minuten die Schergeschwindigkeit auf $\dot{\gamma}_1$ an und ist daraufhin konstant. Die am Anfang ermittelten Schubspannungen sind hoch, aber mit der andauernden Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_1$ wird der innere Zusammenhalt der Suspension infolge Deagglomeration und Mikrostrukturabbruch sukzessive abgebaut und die daraus ermittelten Schubspannungen werden verringert. Nach einer erneuten Erhöhung der Drehgeschwindigkeit, von $\dot{\gamma}_1$ auf $\dot{\gamma}_2$, werden die Schubspannungen wieder zunehmen und bei konstanter Drehgeschwindigkeit nach einigen Minuten wieder absinken. Wenn die Zeit bei konstanter Schergeschwindigkeit ($\dot{\gamma}_1$ oder $\dot{\gamma}_2$) ausreichend lang ist, wird die Schubspannung in beiden Fällen die

Gleichgewichtswerte τ_{e1} bzw. τ_{e2} erreichen. In diesem Fall wird das typische thixotrope Verhalten mittels der Abnahme der Schubspannung bis zu einem Gleichgewichtswert bei konstanter Schergeschwindigkeit definiert.

Ein weiteres dreieckförmiges Schergeschwindigkeits-Zeit-Profil kann gewählt werden, um das thixotrope Verhalten der Suspension zu charakterisieren (Abbildung 25). Wenn die Schergeschwindigkeit kontinuierlich und konstant von Null bis zum einem bestimmten Wert erhöht und dann kontinuierlich und konstant wieder auf Null verringert wird, kann die Fläche F zwischen dem Aufwärts- und Abwärtskurvenast der gemessenen τ - $\dot{\gamma}$ -Kurve (Hysteresekurve) als „Energie“ bezogen auf das untersuchte Probenvolumen interpretiert werden, die erforderlich ist, während der Beanspruchungsdauer die innere Struktur zu zerstören und kann als Indikator bzw. Maß ihrer Thixotropie dienen [143][144][154].

Nach Khayat [71] kann die in der Hysteresekurve eingeschlossene Fläche wie folgt berechnet werden:

$$F = \tau \cdot \dot{\gamma} \quad [kN / m^2 \cdot s^{-1}] = [kN \cdot m / s \cdot 1 / m^3] \quad \text{Gleichung 8}$$

Wie aus Gleichung 8 ersichtlich ist, kann die Fläche F jedoch nicht als Materialparameter verstanden werden, da sie von der Schergeschichte abhängt bzw. vom aufgetragenen Schergeschwindigkeits-Zeit Profil [154].

Eine weitere Möglichkeit zur Charakterisierung des thixotropen Verhaltens ist die Fähigkeit der Suspension, ihr inneres Gefüge und damit auch ihren inneren Zusammenhalt wieder aufbauen zu können.

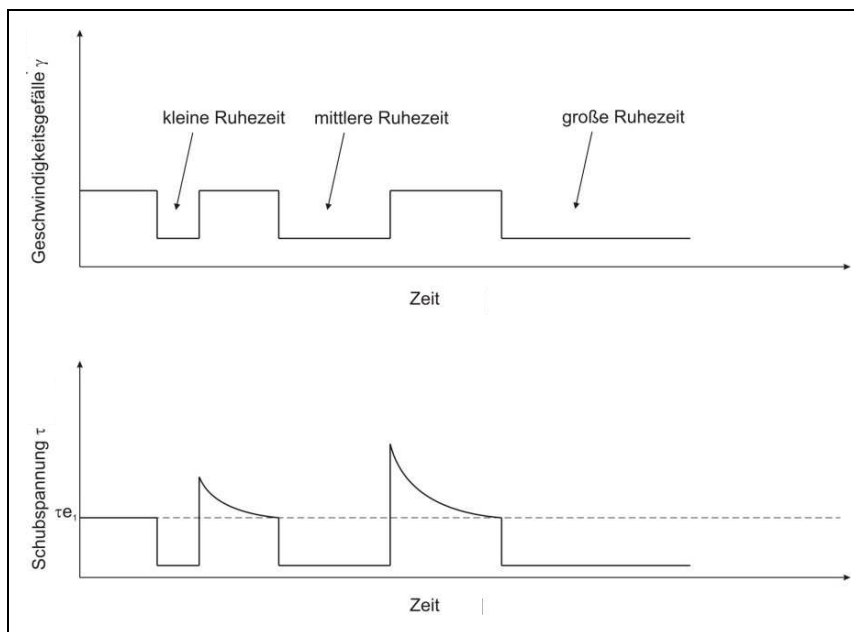


Abbildung 26:
Wiederaufbau
der Struktur

In Abbildung 26 ist zu erkennen, wie eine Suspension nach einer kurzen Ruhezeit (Schergeschwindigkeit rd. 0) der Schergeschwindigkeit γ_1 ausgesetzt ist und wie die gemessene Schubspannung den Spitzenwert τ_1 erreicht, welcher dann bis auf den Gleichgewichtswert τ_{e1} fällt. Wenn nun die Schergeschwindigkeit auf rd. 0 (Medium-Ruhezeit) reduziert wird, wird das innere Gefüge wieder aufgebaut. Nach einer erneuten Erhöhung der Schergeschwindigkeit auf γ_1 erreicht die Schubspannung einen höheren Spitzwert ($\tau_2 > \tau_1$) als zuvor und mit der Zeit bricht sie an τ_{e1} wieder. Wird der Suspension nach einer neuen längeren Ruhezeit wieder auf γ_1 geschert, erreicht die Schubspannung einen noch höheren Spitzenwert ($\tau_3 > \tau_2$) als zuvor. Mit anderen Worten: Der Grad des Mikrostrukturaufbaus wird höher, je größer ist die Ruhezeit ist, und die Suspension wird thixotroper, je kürzer die notwendige Ruhezeit ist, um das innere Gefüge wieder aufzubauen.

2.4 Fließverhalten von Bindemittelleimen bzw. Betonen

2.4.1 Allgemeines

Bindemittelleime bzw. Betone sind zementöse Suspensionen, in denen sich sowohl Festkörper- als auch Flüssigkeitseigenschaften vereinen [21]. Das Fließverhalten dieser Suspensionen kann anhand des Bingham-Modells erklärt werden: Unterhalb einer bestimmten Grenzscherspannung (Fließgrenze τ_0) verhält sich der Frischbeton elastisch wie ein Festkörper, darüber wie eine Flüssigkeit mit einer gewissen „plastischen“ Viskosität η_B . Unter Scherbeanspruchung wird das rheologische Verhalten des SVBs von dessen viskosen Eigenschaften dominiert. Im ruhenden Zustand und im Laufe der Zeit wandelt sich der flüssige Beton infolge der Thixotropie bzw. des Aufbaus des inneren Struktur in einen plastischen Körper bei dem die elastischen Eigenschaften überwiegen und an Bedeutung gewinnen [20]. Diese Effekte und deren zeitliche Veränderungen bestimmen die Fließfähigkeit (Scherfestigkeit und Viskosität in Kombination) von Betonen [77][126][131].

Selbstverdichtende Betone definieren sich im Wesentlichen durch ihre Fließfähigkeit bzw. ihre rheologischen Eigenschaften. Im Konkreten werden die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons von den rheologischen Eigenschaften des Bindemittelleims bestimmt. Daher spielt die Charakterisierung und Kontrolle der Rheologie eine entscheidende Rolle bei der gelungenen Herstellung eines SVBs.

Selbstverdichtende Betone müssen eine maßgebende Fließgrenze τ_0 von nahezu null aufweisen. Im Vergleich zum herkömmlichen Rüttelbetonen ist die Fließgrenze eines SVBs um bis das 16-fache (70 zu 800-1500 N/m²) geringer; gleichzeitig ist eine höhere Viskosität erforderlich, um die Sedimentation der groben Gesteinskörnungen zu verhindern [109][14] (Abschnitt 2.2).

2.4.2 Fließgrenze und Viskosität

Übertragen auf den Bindemittelleim und damit letztendlich auf den Frischbeton ist die Fließgrenze ein Maß für die Kraft (Fließwiderstand), die für eine erste Bewegung der Partikel erforderlich ist [132][147][148].

Die Fließgrenze τ_0 eines Frischbetons entsteht als Ergebnis von physikalischen und chemischen Widerständen infolge von Agglomeration aus den überwiegend anziehenden interpartikularen Kräften zwischen den Zementpartikeln (Van-der-Wals- und elektrostatische Kräfte, Abschnitt 2.4.2.2) und aus der intergranularen Reibung zwischen den Gesteinskörnungen [15][25]. Weitere Einflussfaktoren der Fließgrenze eines Frischbetons sind der Volumenanteil von Bindemittelleim und Gesteinskörnung im Stoffraum bzw. der Zementgehalt, der Wassergehalt, der Verdichtungsgrad (Packungsdichte) sowie die Kornform und Kornzusammensetzung des verwendeten Korngemisches [92][109][127].

In gleicher Weise erhöht das thixotrope Verhalten des Betons die Fließgrenze im Ruhezustand signifikant. Aus diesem Grund unterscheiden viele Autoren zwischen dynamischer Fließgrenze (τ_0 , unmittelbar nach Mischende) und statischer Fließgrenze (τ_{0R}). Die statische Fließgrenze τ_{0R} entwickelt sich als Resultat des Aufbaus der inneren Struktur im Beton nach Beenden der Scherbeanspruchung während des Mischens und Fließens zur endgültigen Position (Tabelle 2). Die statische Fließgrenze τ_{0R} ermöglicht, dass ein Betonkörper im frischen Zustand unterstützungsfrei seine Form beibehält, ohne zu fließen oder sich zu verformen (Entwicklung der Grünstandfestigkeit). Um ein erneutes Fließen oder Verformungen des Frischbetons hervorzurufen, muss die statische Fließgrenze τ_{0R} überwunden werden.

Hu und Larrard [62] stellten fest, dass die statische Fließgrenze τ_{0R} bis zum ca. 6-fachen höher als die dynamische Fließgrenze τ_0 sein kann.

	ohne Vibration		mit Vibration	
	$\tau_0(Pa)$	$\tau_{0R}(Pa)$	$\tau_{0v}(Pa)$	$\tau_{0Rv}(Pa)$
b46	361	1476	-	-
b49	309	1840	-	-
bxl	1500	2960	-	-
b45	-	-	200	181

Tabelle 2: Vergleich zwischen statischer und dynamischer Fließgrenze [20][62]

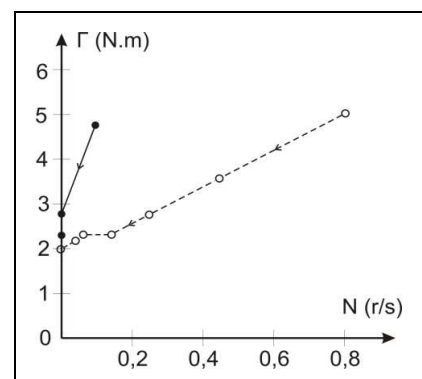


Abbildung 27: Statische (●) und dynamische (o) Fließgrenze [62]

Abbildung 27 stellt die Entwicklung der statischen Fließgrenze (τ_{0R} , volle Symbole) im Frischbeton anhand rheologischer Messungen am Betonrheometer dar. Die Differenz zwischen den ermittelten Drehmomenten, die der Entwicklung der statischen τ_{0R} und der dynamischen Fließgrenze τ_0 (leere Symbole) entsprechen, ist auf den thixotropen Strukturaufbau zurückzuführen.

Ovarlez et al. [98] legten einen linearen Zusammenhang zwischen der statischen Fließgrenze τ_{0R} von selbstverdichtenden Beton und der Ruhezeit t_r fest:

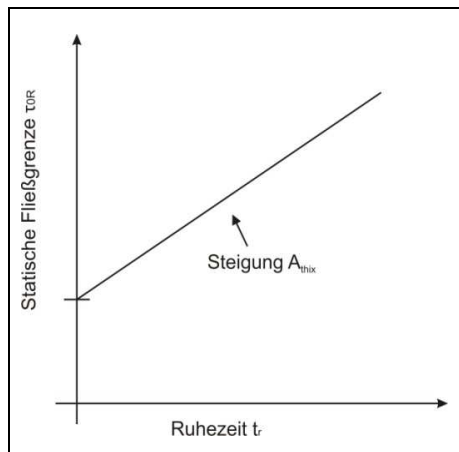


Abbildung 28: Zeitliche Entwicklung der statischen Fließgrenze [16]

$$\tau_{0R}(t_r) = \tau_0 + A_{thix} \cdot t_r \quad [kN / m^2]$$

Gleichung 9

Mit: τ_{0R} = statische Fließgrenze $[kN/m^2]$, τ_0 = dynamische Fließgrenze $[kN/m^2]$, A_{thix} = Flockungskoeffizient $[kN/(m^2 \cdot s)]$ und t_r = Ruhezeit $[s]$

Der Flockungskoeffizient A_{thix} ist die Steigung des in Gleichung 9 beschriebenen Zusammenhanges und kann anhand zweier τ_{0R} -Ermittlungen zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt werden. Nach Beitzel [16] ist A_{thix} ein Maß für die zeitliche Fließgrenzenentwicklung und damit für die Thixotropie bzw. Strukturaufbau eines Betons.

Untersuchungen, die von [98] durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass sich der Wertebereich des Thixotropiekoeffizienten A_{thix} für selbstverdichtenden Beton zwischen 0,1 $N/(m^2 \cdot s)$ und 0,2 $N/(m^2 \cdot s)$ befand, während sich bei normalen Betonen der Konsistenzklasse S1 Thixotropiekoeffizienten A_{thix} zwischen 0,04 bis 0,07 $N/(m^2 \cdot s)$ bzw. eine deutliche niedrigere Thixotropie ergaben [16].

Zur mathematischen Beschreibung der dynamischen Fließgrenze τ_0 von Zementsuspensionen finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben.

Proske [108] stellte fest, dass der Fließwiderstand im Frischbeton anhand der Materialparameter Kohäsion c und Reibungswinkel φ quantifiziert werden kann. Diese Kenngrößen sind beim Triaxialversuch und durch den Einsatz eines Rheometers bestimmbar [157][N 6]. Anhand des Mohr'schen Kreises (Triaxialversuch) können die ermittelten Ergebnisse in einem τ - σ -Diagramm dargestellt werden:

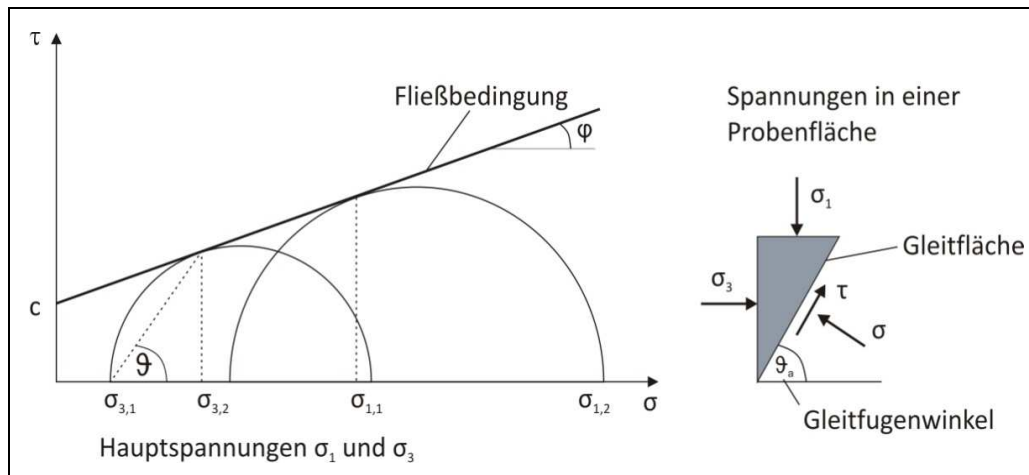


Abbildung 29: Schergerade und Mohr'sche Spannungskreise im τ - σ -Diagramm [110]

Eine Gerade liefert in der Bodenmechanik die Bruchbedingung. Damit ergibt sich die Mohr-Coulomb'sche Bruchbedingung zu:

$$\tau = \sigma \cdot \tan \varphi + c \quad [\text{kN} / \text{m}^2]$$

Gleichung 10

Mit: τ = Scherspannung $[\text{kN}/\text{m}^2]$, σ = Normalspannung $[\text{kN}/\text{m}^2]$, φ = Innerer Reibungswinkel $[\text{°}]$ und c = Kohäsion bzw. τ_0 = dynamische Fließgrenze $[\text{kN}/\text{m}^2]$.

Nach Zhuguo [156] ist die dynamische Fließgrenze τ_0 eines selbstverdichtenden Betons neben den Adhäsionskräften im betrachteten Medium vor allem von den Druckspannungen σ_n senkrecht zur Scherfläche abhängig und kann wie folgt beschrieben werden:

$$\tau_0 = (\sigma + nF_w) \cdot \tan \varphi_m \quad [\text{kN} / \text{m}^2]$$

Gleichung 11

Mit: σ_n = Druckspannung normal zur betrachteten Ebene, φ_m = der mittlere Winkel der inneren Reibung und $n \cdot F_w$ = Anteil der Adhäsionskräfte bei n Partikeln je Scherfläche (resultierend aus den interpartikularen Kräften und den Kapillarkräften des Wassers). Bei hohen Druckspannungen kann letzterer Anteil vernachlässigt werden.

Wie aus Abbildung 30 und Abbildung 31 ersichtlich ist, haben Untersuchungen eine Abhängigkeit zwischen der Konsistenzklasse der Betone (links) und steigenden Normalspannungen σ (rechts) und der dynamischen Fließgrenze gezeigt [48][110]:

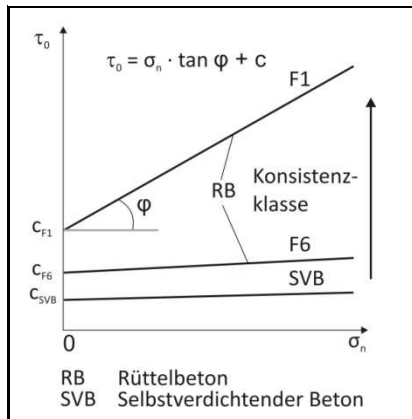


Abbildung 30: Einfluss der Normalspannungen auf die Fließgrenze unterschiedlicher Konsistenzklassen [156]

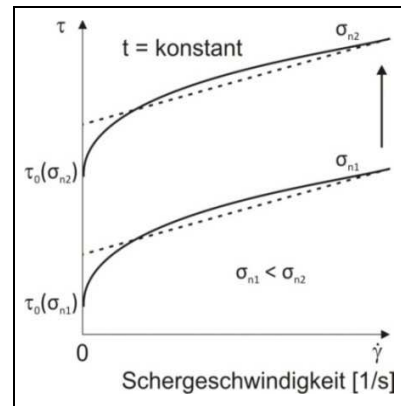


Abbildung 31: Einfluss der Normalspannungen auf die Fließgrenze von selbstverdichtenden Mörteln [110]

Ferraris et al. [44] stellen die dynamische Fließgrenze τ_0 des Betons als eine Funktion der relativen Feststoffkonzentration dar, da mit zunehmender Feststoffkonzentration die intergranulare Reibung an Bedeutung gewinnt:

$$\tau_0 = f\left(\frac{\phi}{\phi_{\max}}\right) \quad [\text{kN} / \text{m}^2]$$

Gleichung 12

Mit: τ_0 = dynamische Fließgrenze $[\text{kN}/\text{m}^2]$, ϕ = Feststoffkonzentration und $\phi_{\max}$ = maximale Feststoffkonzentration

Zusammen mit seinem Setzfließmaß ist die Viskosität der zweite Parameter zur Charakterisierung eines SVBs. Die Viskosität η einer Suspension kann auch als Funktion des Feststoffanteils ϕ und der Viskosität η_F der flüssigen Phase beschrieben werden [154]:

$$\eta_r = \left(\frac{\eta}{\eta_F}\right) \quad [-]$$

Gleichung 13

Mit: η_r = relative Viskosität $[-]$, η = Viskosität der Suspension $[\text{kN.s}/(\text{m}^2)]$, η_F = Viskosität der flüssigen Phase $[\text{kN.s}/(\text{m}^2)]$

Zugleich spielen die Form der Partikel, die Feststoffkonzentration sowie die Korngrößenverteilung eine entscheidende Rolle für die Viskosität und das daraus resultierende Fließverhalten der Suspension. Abbildung 33 zeigt, dass, je mehr die Partikel

von einer idealen Kugelform abweichen und je größer die Feststoffkonzentration ist, die Suspension umso hochviskoser wird [11].

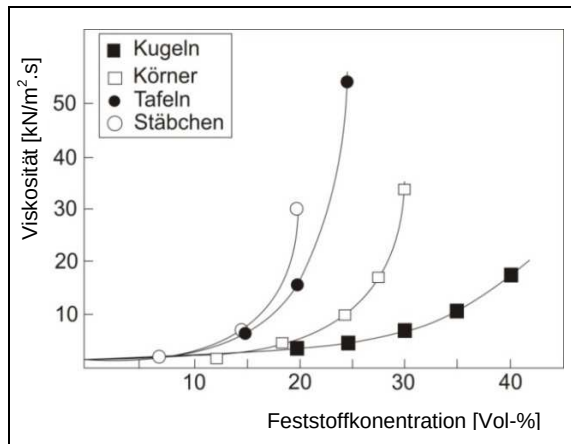


Abbildung 33: Einfluss der Kornform auf die Viskosität von Suspensionen bei einer Schergeschwindigkeit von 300 s^{-1} [11]

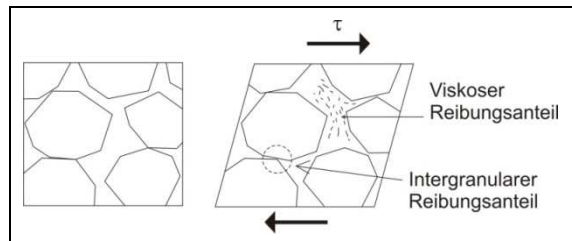


Abbildung 32: Fließwiderstand bzw. Fließgrenze τ_0 eines Betons, links: Ruhezustand, rechts: Verhalten unter Schubbeanspruchung [34]

Zusammenfassend kann das Fließverhalten des Betons anhand Abbildung 32 erläutert werden. Der Reibungswiderstand bzw. die Fließgrenze unter Scherbeanspruchung setzt sich aus einem intergranularen und einem viskosen Reibungsanteil zusammen [44]. Zur Initiierung des Fließens des Betons muss zusätzlich zur intergranularen Reibung auch noch die Fließgrenze der flüssigen Phase (viskosen Reibung) überwunden werden.

Letztendlich muss betont werden, dass keine direkte Beziehung zwischen Fließgrenze und plastischer Viskosität vorhanden ist. Wie aus Abbildung 34 und Abbildung 35 ersichtlich ist, können zwei verschiedene Frischbetone die gleiche Fließgrenze aber unterschiedliche Viskositäten aufzeigen und umgekehrt, daher ergibt sich die Notwendigkeit der Bestimmung der zwei charakteristischen rheologischen Parametern für jeden Beton [72].

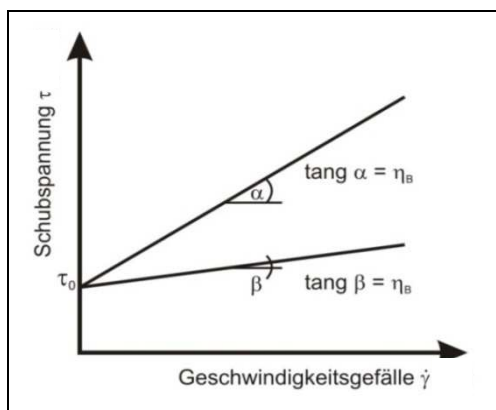


Abbildung 34: Gleiche Fließgrenze, verschiedene plastische Viskositäten [43]

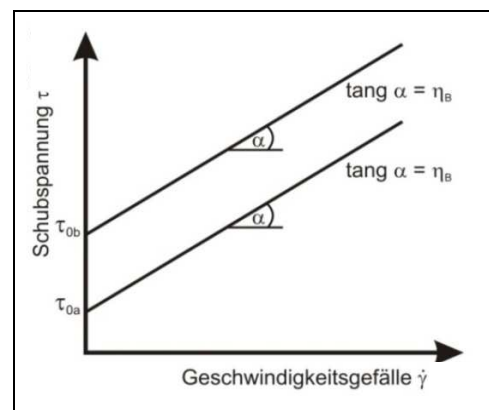


Abbildung 35: Verschiedene Fließgrenzen, gleiche plastische Viskosität [43]

2.4.2.1 Thixotropie in zementösen Suspensionen

Das thixotrope Verhalten von Betonen wirkt auf die Entmischungsstabilität und den Schalungsdruck günstig, jedoch kann die Fähigkeit zur Selbstentlüftung des SVB im Ruhezustand ver- oder behindert werden [20]. Die „reine“ Thixotropie beschreibt ein reversibles Verhalten, aber in Zementsuspensionen muss dieses Verhalten aufgrund reversibler (interpartikulare Wechselwirkungen, Abschnitt 2.4.2.2) und irreversibler Strukturveränderungen im Laufe der Zeit („Strukturbruch“ und Hydratation des Zementes, Abbildung 37 und Abbildung 38) als teilweise reversibel bezeichnet werden [10].

Bindemittelleime, Mörtel und Betone zeigen im Gegensatz zu Newton'schen Flüssigkeiten ein Fließverhalten, welches durch den zeitabhängigen Aufbau- bzw. Abbauprozess ihres inneren Gefüges unter Scherbelastung bzw. Thixotropie gekennzeichnet ist (Abbildung 36) [54] [109][142][154].

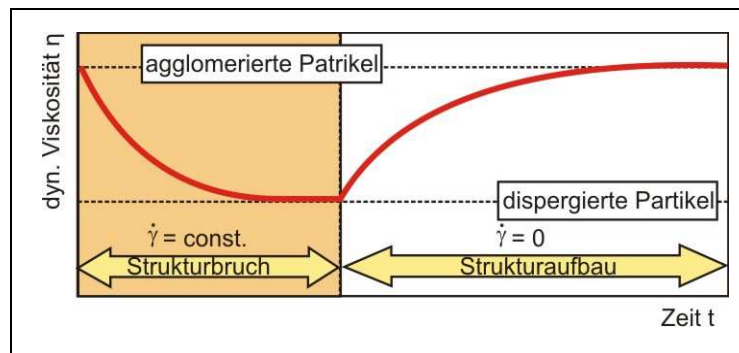


Abbildung 36: Thixotropes Materialverhalten einer Zementsuspension [56]

Um die partielle Irreversibilität des thixotropen Verhaltens der Zementsuspensionen verstehen zu können, muss das Verflochten der Zementpartikel in einer Wassersuspension erklärt werden [70].

Unmittelbar nach dem ersten Kontakt mit Wasser fangen die Zementteilchen an zu reagieren. Die ersten chemischen Reaktionen führen zur Entstehung von Ettringit (Trisulfat) bzw. zu positiv geladenen Ettringitteilchen, die mit positiv oder negativ geladenen Zementpartikeln oder weiteren Hydratationsprodukten eine elektrostatische Wechselwirkung eingehen können. Die Zementpartikel sowie die ersten Reaktionsprodukte Calciumhydroxid und Ettringit weisen in der wässrigen Suspension aufgrund überwiegend physikalischer Wechselwirkungen ein starkes Bestreben zur Agglomeration auf. Aufgrund dieser Agglomerationen bildet sich eine Flockenstruktur, in der das eingeschlossene Wasser nur wenig zur Fließfähigkeit der Suspension beiträgt, was dem Zementleim teilweise elastische Eigenschaften verleiht [4][20][25].

Wenn die Mischung nicht gesichert wird, baut sich der innere Zusammenhalt auf. Dieser Aufbau der Struktur ist von der Dauer des Ruhezustands abhängig. Die aufgebaute Struktur kann auch noch Anteile von trockenen, verklumpten Zementpartikeln enthalten. Durch das Aneinanderstoßen der Partikel wird die gegenseitige Beweglichkeit herabgesetzt und es bilden sich große Hohlräume, die mit nicht-physikalisch gebundenem Wasser ausgefüllt sind. Die Stabilität dieser Flockenstruktur hängt von der Anzahl der Kontaktpunkte ab.

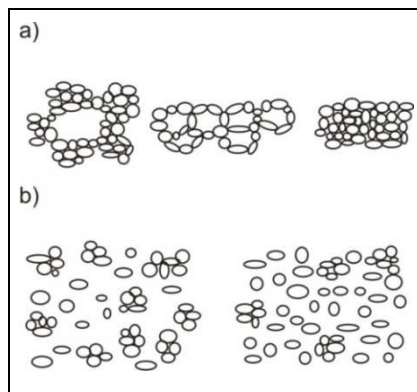


Abbildung 37:

a) Mögliche zusammenhängende Flockenstrukturen

b) Mögliche nicht zusammenhängende Partikel-Agglomerat-Verteilungen [70]

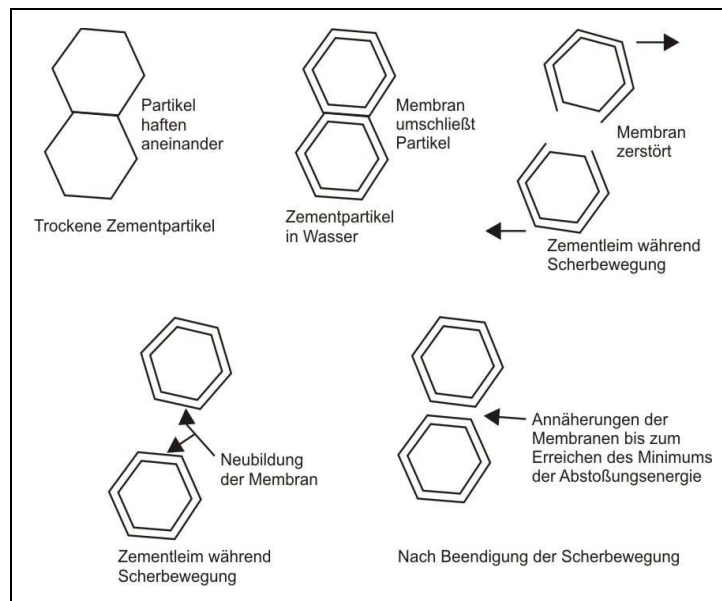


Abbildung 38: Schematische Darstellung des Strukturbruchs von Zement in Wasser [132]

Unter Scherbeanspruchung und abhängig von der Mischintensität und -dauer lässt sich die so gebildete Flockstruktur zu einem gewissen Grad elastisch verformen. Bei steigenden Beanspruchungen zerbricht sie in einzelne Flocken und das freigesetzte Wasser wird verdrängt. Die elastische Verformung sowie der Strukturbruch (Freiwerden von Wasser) führen zu einer Verflüssigung und damit zu einer Abnahme des Scherwiderstands. Sukzessiv werden die Flocken zunehmend kleiner und der daraus resultierende Scherwiderstand ebenfalls geringer. Unter einer noch intensiveren Scherbeanspruchung werden die verbleibenden agglomerierten Zementpartikel in der Suspension getrennt und der Begriff „irreversibler Strukturbruch“ gewinnt an Bedeutung beim Beschreiben der Thixotropie und des daraus resultierenden Fließverhaltens von Bindemittelleimen. Die Zerstörung der Flockenstruktur wird auch als Strukturbruch bezeichnet, darf aber nicht mit dem von [9] eingeführten „irreversiblen Strukturbruch“ verwechselt werden.

Direkt nach Kontakt mit Wasser bildet sich infolge von Hydratation um die Zementkörner eine gelartige Schicht aus den ersten Reaktionsprodukten, die mehrere Zementkörner umschließen kann. Dies ist möglich, weil die Zementteilchen am Anfang des Prozesses im

trockenen Zustand sind und daher durch geringe Anziehungskräfte aneinander haften können (Abbildung 38). Die daraus resultierende Zusammenhaltekraft zwischen den eingeschlossenen Teilchen hängt dabei von der Schichtdicke der Membran ab. Wenn der Bindemittelleim mit ausreichend großen Scherkräften belastet ist, wird die ursprüngliche Membran gebrochen (Strukturbruch) und es bildet sich eine neue Membran auf der freien Oberfläche. Dies verhindert nach Beendigung der Scherbeanspruchung die Wiedervereinigung infolge Van-der-Waals-Kräften der nun zwei Teilchen zum einzelnen ursprünglichen Partikel, was durch irreversiblen Strukturbruch zur Entstehung von neuen anziehenden und abstoßenden interpartikulären Kräften führt [132]. Die daraus resultierende neue Struktur ist schwächer als die ursprüngliche. Es entsteht ein neues System aus einzelnen, nicht miteinander verbundenen Agglomeraten und Partikeln (Abbildung 37). Dieses Phänomen („irreversibler Strukturbruch“) verursacht die charakteristische Diskrepanz zwischen dem Aufwärts- und Abwärtskurvenast der τ - $\dot{\gamma}$ -Hysteresekurve beim Einsatz eines dreiecksförmigen Schergeschwindigkeits-Zeit-Messprofils in rheologischen Untersuchungen. Die Diskrepanz ergibt sich als Resultat der Unfähigkeit der Mischung, die unter zunehmender Schergeschwindigkeit abgebaute Struktur wieder während abnehmender Schergeschwindigkeit aufzubauen [154]. Die resultierende schwächere Struktur (Abwärtskurvenast) sollte als eine scher-induzierte Reduktion der Fließspannung nach einem erneuten Mischzyklus betrachtet werden und ist der Grund dafür, dass ein Bindemittelleim ein teilweise thixotropes Verhalten aufweist (Abbildung 25) [20] [21].

2.4.2.2 Interpartikuläre Wechselwirkungen im Frischbeton

Viele Mechanismen hinter der Thixotropie der Partikelsuspensionen können ausgehend von Kolloidsuspensionen (Submikron-Partikel) erklärt werden [21]. Ein Kolloid ist ein System, bei dem eine Phase in einer anderen Phase dispergiert ist. Zum Beispiel zwischen Materialien auf verschiedenen Aggregatzuständen: Flüssig/Fest, Gas/Feststoff, usw. In diesem Submikronbereich sind die anziehenden Van-der-Waals-Kräfte, die abstoßenden elektrostatischen Doppelschichtkräfte und natürlich die dispergierenden Mechanismen des PCE-Fließmittel-Moleküles die dominierenden Kräfte.

Der Bindemittelleim eines SVBs kann als eine Kolloidsuspension betrachtet werden, bei der zwischen den Partikeln der Suspension verschiedene anziehende oder abstoßende Kräfte zusammen mit Gravitation wirken, welche gemeinsam die innere Reibung bestimmen. Je nach Größe und Art der Kräfte bildet sich eine mehr oder weniger feste Struktur aus, die maßgeblich das rheologische Verhalten der Suspension beeinflusst [54][56][131][147].

Fast alle Substanzen erhalten eine Oberflächenladung wenn sie mit einem polaren Medium in Berührung gebracht werden (z. B. mit Wasser). Diese elektrische Ladung bewirkt eine gerichtete Anordnung der im benachbarten Medium befindlichen Ionen.

Abstoßende und anziehende Kräfte sind eine Funktion des Abstands von der Partikeloberfläche. Wenn anziehende Kräfte überwiegen, wie Van-der-Waals-Kräfte, welche Zementteilchen untereinander anziehen, wird die Suspension zur Agglomeration bzw. Ausflockung der Zementteilchen in Form gelartiger und fraktaler Struktur geführt. Im Gegenteil dazu wird die Suspensionsstruktur nach [66] als dispergiert bezeichnet, wenn die abstoßenden Kräfte dominieren.

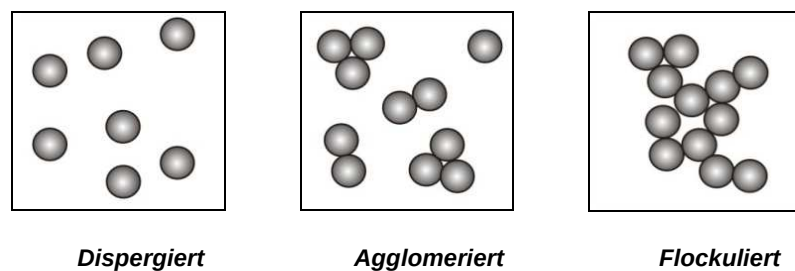


Abbildung 39: Schematische Darstellung von Suspensionsstrukturen [73]

Diese Wechselwirkungen lassen sich für kolloidale Systeme durch die DLVO-Theorie (**D**erjagun-**L**andau-**V**erwey-**O**verbeek-Theorie) beschreiben. Die DLVO-Theorie bestimmt die Überlagerung der elektrostatischen Abstoßungs- und der Van-der-Waals'schen Anziehungsenergie nach Vorzeichen und Größe der Wechselwirkungsenergie und daher die resultierende Stabilität disperser Systeme.

Die Energie zwischen zwei Partikeln resultiert danach aus der repulsiven elektrostatischen Energie (E_R) und der Energie, die durch die anziehenden Van-der-Waals-Kräften (E_A) hervorgerufen wird, wenn die Partikel sich annähern. Die Interaktionsenergie E_{tot} kann wie folgt berechnet werden:

$$E_{tot} = E_R + E_A \qquad \text{Gleichung 14}$$

Die Van-der-Waals-Kräfte sind sehr schwache, stets anziehende Kräfte zwischen Teilchen. Die Ursache der Van-der-Waals-Kräfte liegt in der ungleichen Verteilung von Ladungen in der Elektronenhülle von Molekülen, z. B. zwischen zwei Molekülen mit permanenten Dipolen, oder zwei nicht polaren Molekülen infolge kurzfristiger Unterschiede in der Elektronendichte. Da die Verteilung der Elektronen in Molekülen und Atomen zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedlich ist, bilden Atome und Moleküle Dipole aus, die nicht von langer Dauer sind. Kommen Atome einander nahe, so erfolgt eine Ladungsverschiebung. Erfolgt diese

Ladungsverschiebung in beiden Atomen in die gleiche Richtung und unterschreiten die Atome einen bestimmten Abstand, dann wirken Anziehungskräfte (Abbildung 40).

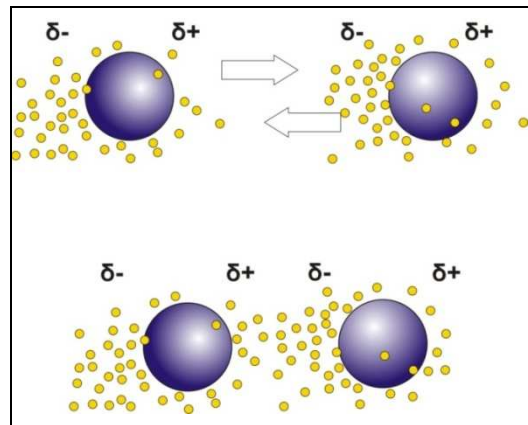


Abbildung 40: Schematische Darstellung der Van-der-Waals-Kräfte

Der anziehende Anteil der Gesamtenergie E_A resultiert aus den Van-der-Waals-Kräften zwischen den Molekülen der Partikel und kann nach Hamaker [57] folgend berechnet werden:

$$E_A = -\frac{H}{6} \cdot \left(\frac{2}{S^2 - 4} + \frac{2}{S^2} + \ln \frac{S^2 - 4}{S^2} \right) \quad [J] \quad S = 2 + \frac{D}{a_0} \quad \text{Gleichung 15}$$

Mit: H = Hamaker-Konstante; D = Abstand zwischen den Partikeloberflächen; a_0 = Partikelradius

Entgegengesetzt geladene Ionen werden von der Partikeloberfläche angezogen und gleichartig geladene Teilchen abgestoßen. Dies führt zur Ausbildung einer elektrischen Doppelschicht und damit zu elektrostatisch abstoßenden Kräften zwischen den Partikeloberflächen [73][80][81][107][108][154].

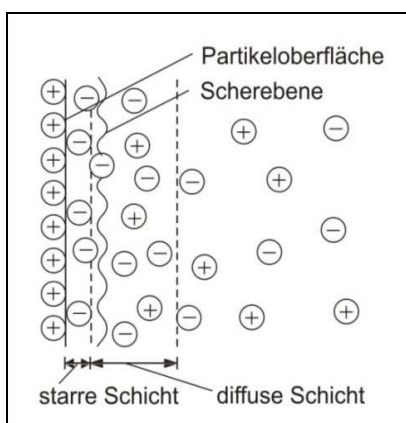


Abbildung 41: Elektrische Doppelschicht an der Partikeloberfläche [109]

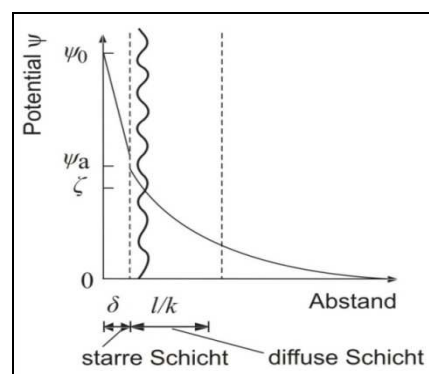


Abbildung 42: Potentialverlauf im Bereich der Stern- und diffusen Schicht [109]

Die Doppelschicht lässt sich in zwei Bereiche zerlegen. Einerseits in eine Festladungsschicht bzw. starre Schicht (Stern-Schicht), die der Ladung des Zentralteilchens entspricht, und andererseits in eine diffuse Schicht, die von den zum großen Teil entgegengesetzt geladenen Teilchen der Umgebung gebildet wird (Abbildung 41). Die Ladung des Zentralteilchens kann als konstant betrachtet werden. Der Begriff Gleichgewichtszustand bezieht sich daher nur auf die Teilchen- und Ladungsverteilung in der diffusen Schicht. Aufgrund thermischer Fluktuationen ist der Zustand der diffusen Schicht nicht starr. Nach dem Poisson-Boltzmann-Ansatz nimmt in der diffusen Schicht, mit der effektiven Dicke $1/\kappa$, die Anzahl entgegengesetzt geladener Teilchen mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche exponentiell ab. Aus Abbildung 42 ist abzulesen, dass das Energiepotential ψ von der Partikeloberfläche ψ_0 über die Stern-Schicht ψ_d zur diffusen Schicht $\psi = 0$ hin abnimmt. Das Oberflächenpotential wird wesentlich von dem pH-Wert und der Ionenkonzentration der Lösung beeinflusst. Wie durch das Coulomb'sche Gesetz bereits bekannt ist, stoßen sich gleichartig geladene Partikel ab. Dieser physikalische Sachverhalt kann auf disperse Partikel nicht direkt übertragen werden. Zu einer Wechselwirkung im Sinne einer Coulomb'schen Abstoßung kommt es erst, wenn zwei Partikel so angenähert werden, dass sich ihre Doppelschichten durchdringen.

Für die Beschreibung des repulsiven Potentials zwei gleicher Partikel mit dem Radius a_0 und bei Annahme eines konstanten Oberflächenpotentials als Funktion des Partikelabstandes D , kann diese Abstoßungsenergie wie folgt beschrieben werden [125][126][130]:

$$E_R = 2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_R \cdot a_0 \cdot \psi_0^2 \cdot \ln[1 + e^{-\kappa \cdot D}] \quad [J] \quad \text{Gleichung 16}$$

Mit: ϵ_0, ϵ_R = Permittivität, a_0 = Partikelradius, ψ_0 = Oberflächenpotential, D = Abstand zwischen den Partikeloberflächen

Die Abstoßung der Partikel wird demnach umso größer, je stärker sich die Doppelschichten durchdringen.

Die Summe aus der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen attraktiven Van-der-Waals-Kräften und abstoßenden elektrostatischen Kräften bzw. die gesamte Wechselwirkungsenergie (Gleichung 14) kann als Funktion der Distanz D für zwei sich nähernde kolloidale Partikeln betrachtet werden.

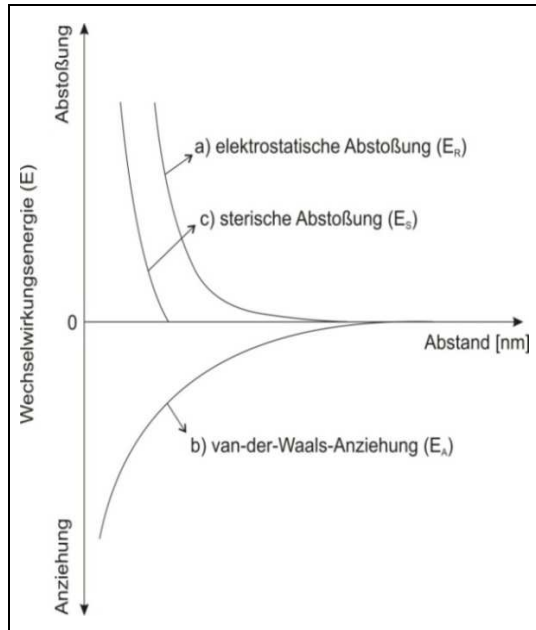


Abbildung 43: Energiekurven der wirkenden intermolekularen Kräfte [132]

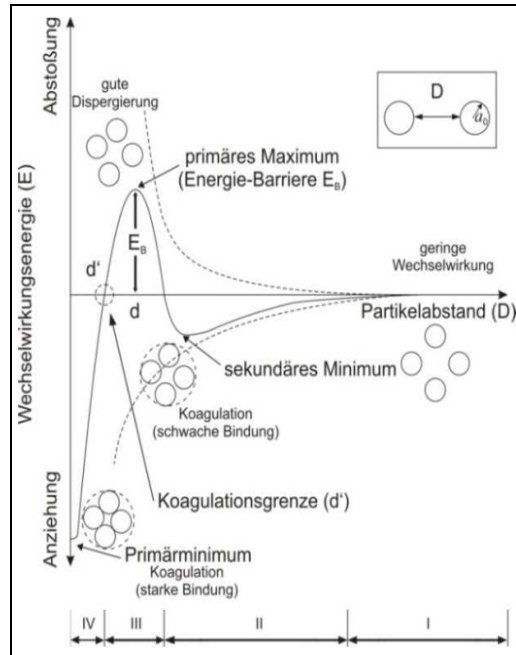


Abbildung 44: Energiepotentialkurve für Partikel in einer kolloiden Suspension mit sterischer Wirkung [130]

Bei einem großen Partikelabstand ($> 100 \text{ nm}$) tendiert die Interaktionsenergie gegen null (Bereich I). Infolge des unterschiedlichen Verlaufes der Energiekurven von Van-der-Waals- und elektrostatischer Kraft können je nach Abstand der Partikel entweder die anziehenden oder die abstoßenden Kräfte dominieren. Die Energie E_A nimmt bei einem Abstand von ca. 60 nm schneller zu als die Energie E_R , so dass es zu einer überwiegenden Bildung von anziehenden Kräften kommt. Dies verursacht ein Sekundärminimum (Bereich II), bei dem die Teilchen trotz ihres relativ großen Abstandes koagulieren können. Wenn dieses sekundäre Minimum tief ist, können die Teilchen starke Flocken bilden (Abbildung 44). In Gegensatz dazu können bei einem flachen sekundären Minimum die Teilchen durch eine Scherströmung ausgeflockt werden. Diese Erscheinung gilt häufig als Grundlage für thixotrope Strukturen, da sich hierbei Partikelsuspensionen in Ruhe aufbauen können.

Bei Abständen von ca. 20 nm wirkt zwischen den Partikeln die Energie E_R stärker als die Energie E_A , während die Gesamtenergie E_{tot} bei einem mittleren Abstand d ein Maximum E_B erreicht (Bereich III). Dieses Maximum wird als Energiebarriere bezeichnet und charakterisiert nach [23] den idealen Zustand für eine stabile Suspension. Bei weiterer Verkleinerung des Abstandes zwischen Partikeln sinkt die Gesamtenergie ab. Beispielsweise wird bei Abstand von 10 nm die Koagulationsgrenze d' erreicht. Bei dieser Grenze sind die Energien, die aus Van-der-Waals-Kräften und elektrostatischen Kräften resultieren, gleich groß.

Bei Abständen kleiner als d^* überwiegen die Van-der-Waals-Kräfte die elektrostatischen, abstoßenden Kräfte, bis schließlich die Partikel in einem Primärminimum koagulieren. Die resultierende Agglomeration ist so stark, dass die Koagulation der Partikel kaum umkehrbar ist. Damit Partikel in einer stabilen kolloiden Suspension nicht verflocken, müssen sie auf Abstand gehalten werden. Eine Suspension ist umso stabiler, je größer die zu überwindende Energie-Barriere (E_B) ist. Günstig dafür ist eine hohe Oberflächenladung der Partikel. Durch die sterische Wirkung kann die Stabilität einer Suspension erhöht werden. Dazu können Makromoleküle mit langen Seitenketten, wie z. B. bei Zugabe von Fließmittel auf Polycarboxylatbasis, an die Partikeloberfläche angelagert werden [80].

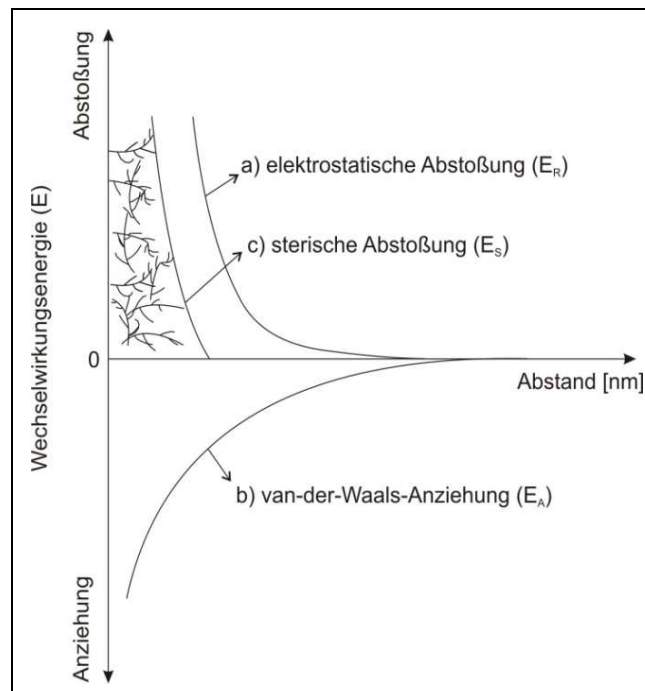


Abbildung 45: Stabilisierung einer Suspension durch sterische Wirkung [80]

Diese verhindern eine räumliche Annäherung der Partikel durch einen mechanischen Widerstand, welcher aus der Verformungsbehinderung hervorgerufen wird. Wie aus Abbildung 45 ersichtlich, wird durch die sterische Wirkung verhindert, dass die Partikel in die Energie-Barriere übergehen und verflocken. Obwohl eine allgemeine Beschreibung der Wechselwirkungsenergie für die sterische Abstoßung bis heute noch nicht gelungen ist, kann der sterische Widerstand in der DLVO-Theorie nach Gleichung 17 über die additive Größe (E_S) berücksichtigt werden.

$$E_{tot} = E_A + E_R + E_S$$

Gleichung 17

2.4.3 Modelle für die Beschreibung des Fließverhaltens von Beton

Mehrere mathematische Modelle ermöglichen die Darstellung des Fließverhaltens der Frischbetone. Eine Übersicht enthält Tabelle 3:

Tabelle 3: Modelle zur Darstellung des Fließverhaltens von Zementsuspensionen [44][154]

Bezeichnung	Gleichung	Anwendung
Allgemeine Potenzfunktion	$\tau = a \cdot \dot{\gamma}^n$	(18) Für Newton'sche ($b = 1$), strukturviskose bzw. pseudo plastische ($b < 1$), dilatante ($b > 1$) Flüssigkeiten
Bingham	$\tau = \tau_o + \eta_B \cdot \dot{\gamma}$	(19) Viskoplastische Flüssigkeiten
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_o + k \cdot \dot{\gamma}^n$	(20) Viskoplastische Flüssigkeiten, für $n = 1$ wie Bingham
Carreau-Yasuda	$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{(b-1)/a}$	(21) Pseudoplastisches Fließverhalten mit asymptotischen Viskositäten η_0 für $\dot{\gamma} = 0$ und η_∞ für $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$
Cross	$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^b}$	(22) Pseudoplastisches Fließen mit asymptotischer Viskosität η_0 für $\dot{\gamma} = 0$ und η_∞ für $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$
Ellis	$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda / \lambda_2)^{\alpha-1}}$	(23) Pseudoplastisches Fließen. λ_2 kann grob als die Schubspannung identifiziert werden, bei der η ungefähr auf die Hälfte des asymptotischen Werts η_0 gefallen ist

Die Herschel-Bulkley-Beziehung und der Bingham-Ansatz sind die am häufigsten verwendeten theoretischen Modelle.

Umfangreiche Untersuchungen an selbstverdichtenden Mörteln und Betonen haben gezeigt, dass der Einsatz des Herschel-Bulkley-Modells die genaueste Beschreibung des Fließverhaltens bietet (Abbildung 46). Dies lehnt sich an die Tatsache an, dass alle zementösen Suspensionen ein strukturviskoses Fließverhalten aufweisen [155] [156]. Herschel-Bulkley stellt nichtlineare Ansätze unter Verwendung von drei Modellparametern (τ_o , k und n) dar, die wiederum empirisch ermittelt werden müssen und somit eine physikalische Interpretation ermöglichen.

Oftmals wird jedoch das einfachere Bingham-Modell genutzt, wobei eine Reduzierung der Modellparameter von 3 auf 2 erfolgt. Diese Näherung ist im Allgemeinen akzeptabel, wenn der Bereich niedriger Schergeschwindigkeiten durch eine entsprechende Fließgrenze τ_o wirklichkeitsnah abgebildet wird [109][156][157].

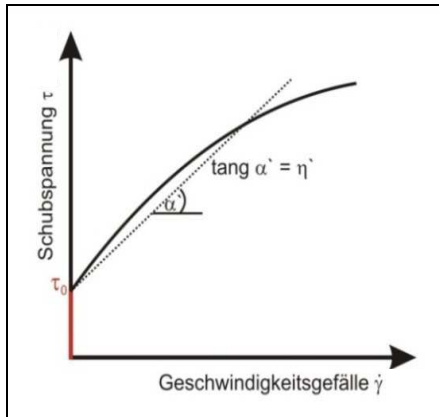


Abbildung 46: Modell nach Herschel-Bulkley

$$\tau = \tau_o + k \cdot \dot{\gamma}^n \quad [\text{kN} / \text{m}^2]$$

τ = Schubspannung (kN/m^2)

τ_o = Herschel-Bulkley – Fließgrenze (kN/m^2)

k = Fließkoeffizient

n = Hochzahl $n < 1$ struktursviskoses
(pseudo-plastisches) Verhalten

n' = dynamische Viskosität ($\text{kN/m}^2 \text{ s}$)

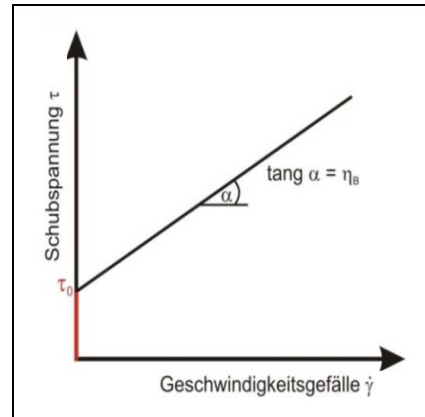


Abbildung 47: Modell nach Bingham

$$\tau = \tau_o + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad [\text{kN} / \text{m}^2]$$

τ = Schubspannung (kN/m^2)

τ_o = Bingham – Fließgrenze (kN/m^2)

η_B = plastische Viskosität ($\text{kN/m}^2 \text{ s}$)

γ = Schergeschwindigkeit (s^{-1})

Mit Hilfe des Bingham-Modells lässt sich das Fließverhalten von plastischen Substanzen mathematisch beschreiben und in Form einer Fließkurve wie in Abbildung 47 vereinfacht als lineare Gerade darstellen. Wenn das Fließverhalten des Frischbetons dem Bingham-Modell entspricht, wird die Viskosität η als plastische Viskosität η_B bezeichnet und beschreibt die Verformung des Frischbetons oberhalb der Fließgrenze τ_o [114].

Vergleichsweise ist das Modell nach Bingham ein Sonderfall der Herschel-Bulkley-Beziehung. Da die plastische Viskosität η definitionsgemäß der Steigung der Geraden im τ - γ -Diagramm entspricht, ist der Faktor n für $b=1$ gerade mit der plastischen Viskosität η (Bingham) identisch. Insbesondere bei SVB schließt das Bingham-Modell die Gefahr negativer Fließgrenzen ein, die physikalisch nicht möglich sind. Durch die Anwendung des mathematischen Modells nach Herschel-Bulkley kann dies zwar vermieden werden, jedoch existiert die Schwierigkeit, dass die Parameter k und n physikalisch nicht erklärbar sind. Daher ergibt sich, dass trotz der höheren Genauigkeit des Herschel-Bulkley Modells aufgrund der größeren Schlichtheit das Bingham Modell die am häufigsten gebrauchte Darstellung zur mathematischen Beschreibung der Fließkurve der Zementsuspensionen ist [77].

2.5 Packungsdichte

Nach [34] ist die Packungsdichte eines Korngemisches von 3 Parametern abhängig: dem Größtkorn, der Form der Körner und dem Packungsverfahren. Eine größtmögliche Packungsdichte liefert den geringsten Hohlraumgehalt des Kornaufwerks. Aus diesem Grund reicht hierbei ein minimaler Zementleimbedarf um die Gesteinskörnung einzuhüllen und eine optimale Verarbeitbarkeit des Frischbetons zu erzielen [53]. Nebenbei trägt nach Bornemann [26] eine höhere Packungsdichte zur Entwicklung der Grünstand- und Druckfestigkeit sowie zu einer Senkung der Porosität des Betongefüges bei, was zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit eines Betonbauteils führt (Abbildung 48).

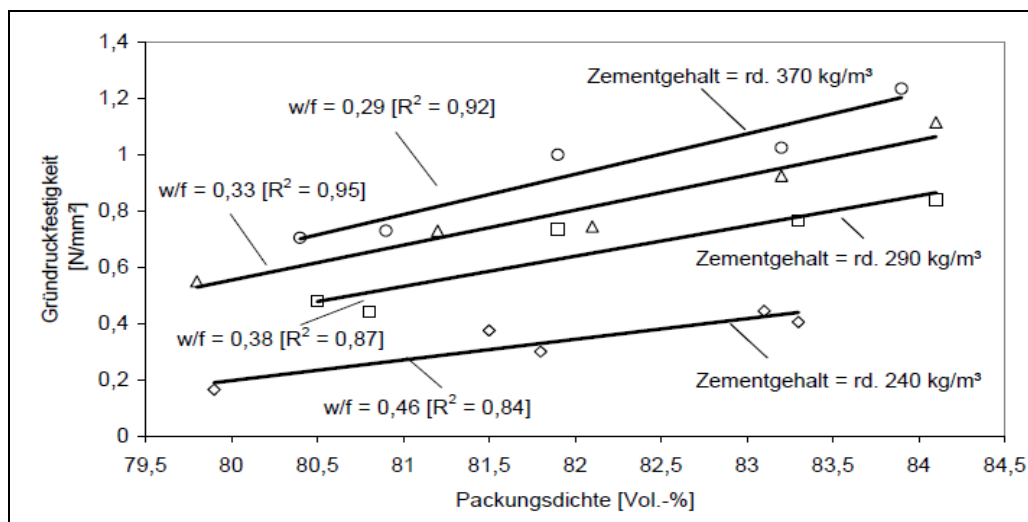


Abbildung 48: Zusammenhang zwischen Packungsdichte, Wasser-Feinstoffwert und Grünstandfestigkeit [26]

In Verdichtungsversuchen ergab sich ein enger Zusammenhang zwischen Sieblinienvverlauf und Packungsdichte der Gesteinskörnungen. Zugleich zeigte sich, dass Sieblinien mit gebrochenem Material einen größeren Anteil feineren Korns benötigten, um die höchstmögliche Packungsdichte zu erzielen [26]. Aus diesem Grund ist es notwendig, eine Idealsieblinie zu entwickeln, die unter Beachtung der spezifischen Anforderungen an die Frisch- und Festbetoneigenschaften, insbesondere der Verarbeitbarkeit, die optimale Packungsdichte liefern kann.

Abschließend ist es wichtig anzumerken, dass die maximale Packungsdichte der Korngemische zu einer minimalen Wasser- bzw. Leimvolumenfüllung des Hohlraumes führt. Daraus resultiert ein Frischbeton, der eine extrem hohe Fließgrenze aufweist und demnach nicht verarbeitbar ist. Um ein Fließen des Betons, wie beim SVB erwünscht, zu ermöglichen, müssen die Feststoffe lockerer gepackt sein. Das entsprechend größere Lückenvolumen wird mit Bindemittelleim ausgefüllt, der eine schmierende Schicht um die Feststoffpartikel bildet. Durch die Vergrößerung der Schichtdicke wird das Gemisch bzw. der Beton besser verarbeitbar.

2.6 Grünstandfestigkeit

In der Praxis gewinnt die Grünstandfestigkeit vor allem bei der Herstellung von früh zu entformenden Betonwaren bzw. früh zu entschalenden Betonfertigteilen an Bedeutung. Hierbei muss der Beton sofort nach dem Verdichten so standfest sein, dass es zu keiner Gestaltänderung nach Entfernung der Schalungen kommt. Der Einbau von Fahrbahndecken aus selbstverdichtendem Beton mit Gleitschalungsfertigern ist ein Beispiel dafür. Der Beton wird in diesem Stadium, vor Beginn eines merklichen Erstarrens als grüner Beton bezeichnet.

Die statische Fließgrenze τ_{0R} , die Adhäsionskräfte zwischen dem Wasser und den festen Bestandteilen, die Packungsdichte sowie die Kornverzahnung der Gesteinskörnungen sind zusammen für die Entwicklung der Grünstandfestigkeit eines Betons verantwortlich [26][35].

Grübl et al. [53] untersuchten die Grünstandfestigkeit eines Betons anhand seiner Gründruckfestigkeit. Wie aus Abbildung 49 ersichtlich ist, führt ein Beton mit plastischer oder weicher Konsistenz (erhöhter Wassergehalt und daher mit einer niedrigen dynamischen Fließgrenze) zu praktisch keiner Grünstandfestigkeit. Mit einem abnehmenden Wassergehalt wird die Konsistenz steifer und die Grünstandfestigkeit nimmt bis auf ein Maximum zu. Eine weitere Absenkung des Wassergehaltes führt zu einer Verringerung der Gründruckfestigkeit, da der Beton so steif und schwer verdichtbar ist, dass kein geschlossenes Gefüge mehr erlangt wird.

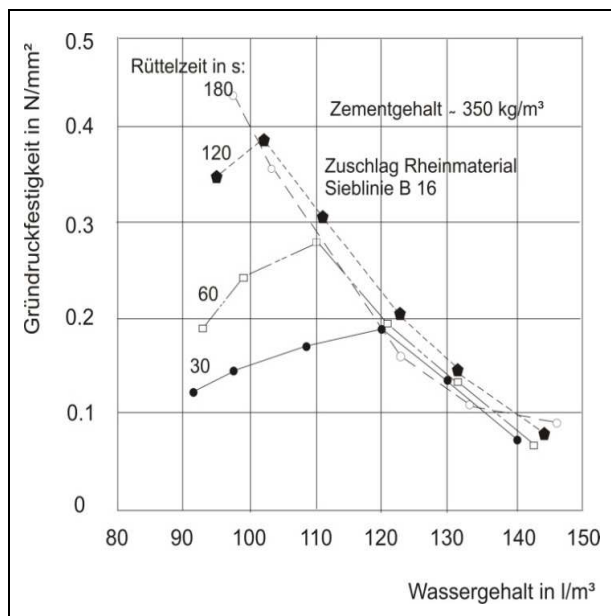


Abbildung 49: Gründruckfestigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Rüttelzeit und dem Wassergehalt [53]

Der Einfluss der Verdichtung kann auch aus Abbildung 49 nachvollzogen werden. Je intensiver diese ist, desto trockenere und steifere Mischungen lassen sich verarbeiten [146].

Das Gründruckfestigkeitsmaximum verschiebt sich bei intensiverer Verdichtung in den Bereich niedrigerer Wassergehalte und steigt mit an. Trotzdem besteht die Gefahr, dass beim Verarbeiten von zu trockenen Mischungen die Sichtflächen unbefriedigend ausfallen und dass auch im Inneren kein geschlossenes Gefüge entsteht. Dies führt dann zu einem Beton, der, obwohl eine hohe Gründruckstandfestigkeit erreicht wird, trotzdem einen extrem niedrigen w/z-Wert und eine reduzierte 28-Tage-Druckfestigkeit aufweist [53].

Eine erhöhte Grünstandfestigkeit kann durch die Verwendung von Korngemischen mit geringem Feinanteil und kantiger Kornform infolge einer erhöhten inneren Reibung erzielt werden. In gleicher Weise wirkt sich ein höherer Zementgehalt günstig auf die Grünstandfestigkeit aus.

Die Grünstandfestigkeit liegt bei steifen Rüttelbetonen, wie z. B. denjenigen, die bei der Herstellung von Fahrbahndecken aus Beton mit Gleitschalungsfertigern eingesetzt werden, im Allgemeinen zwischen 0,1 und 0,3 N/mm². Bei hohem Zementgehalt, niedrigem Wassergehalt und intensiver Verdichtungszeit (über 60 s) können 0,4 bis 0,5 N/mm² erreicht werden. Es ist wichtig zu erwähnen, dass ein erhöhter Zementgehalt auch die Haftung des Betons an der Schalung erhöht. Dies kann z. B. das Entschalen der Teile erschweren.

2.7 Hydratation

2.7.1 Ablauf der Hydratation

Die chemisch-physikalische Reaktion von Zement mit Wasser wird Hydratation genannt. Die Hydratation beginnt an der Oberfläche der Zementkörner und dringt zum Kern hin vor, solange das für die Reaktion erforderliche Wasser vorhanden ist. Zur vollständigen Hydratation von Zement ist Wasser in einer Menge von etwa 40 % des Zementgewichts erforderlich. Eine Wassermenge von 25 % des Zementgewichts wird chemisch, die verbleibende Menge (etwa 15 % des Zementgewichts) physikalisch, gasförmig gebunden. Der Portlandzementklinker ist der wichtigste hydraulisch reagierende Hauptbestandteil eines Zements [35][109].

Nach der Wasserzugabe beginnen die Hydratationsreaktionen, die ein anfangs geringes, nach einiger Zeit verstärktes Ansteifen zur Folge haben. Aus der Reaktion entstehen wasserhaltige Verbindungen (Hydratphasen), die das Ansteifen, Erstarren und Erhärten des Zementleims zum Zementstein bewirken. Das Erstarren und Erhärten beruht vor allem auf der Bildung kristallwasserhaltiger Verbindungen, die als Hydratphasen (CSH-Phasen) bezeichnet werden.

Der gesamte Hydratationsablauf lässt sich in vier Hydratationsstadien einteilen.

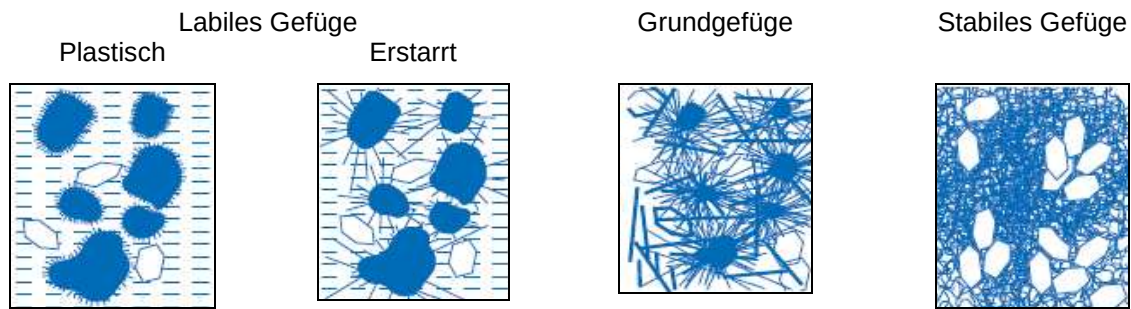


Abbildung 50: Schematische Darstellung der Bildung der Hydratphasen und der Gefügeentwicklung bei der Hydratation des Zements [35]

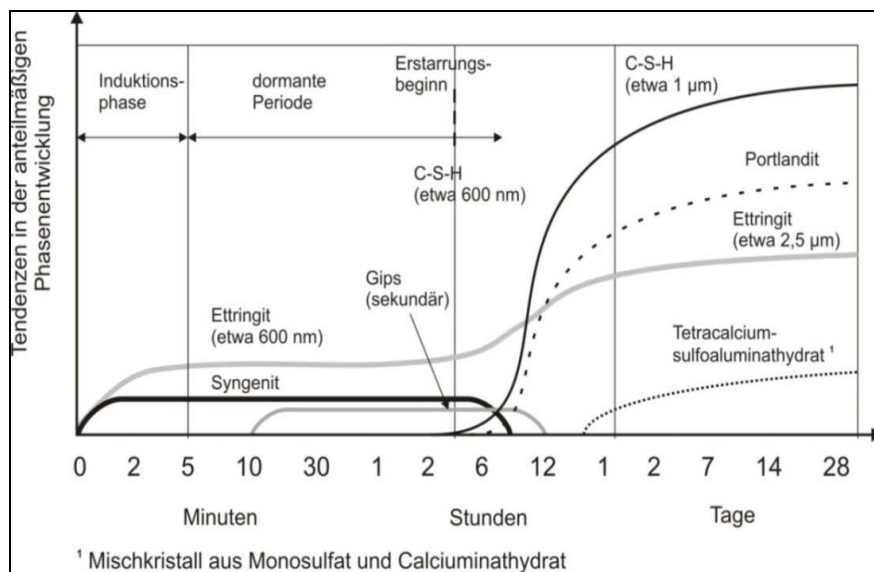


Abbildung 51: Schematische Darstellung der Hydratation des Portlandzements [128]

I Phase: Unmittelbar nach dem Kontakt mit Wasser setzt eine kurze, aber intensive Hydratation ein. Calciumsulfate gehen teilweise und Alkalisulfate nahezu vollständig in Lösung. Aus der Reaktion von Calcium- und Sulfationen mit Tricalciumaluminat bilden sich auf den Oberflächen der Klinkerpartikel kurze, hexagonal säulenförmige Ettringitkristalle und Syngenit (Induktionsphase). Daneben kommt es, ausgehend vom Tricalciumsilicat, zur Bildung von ersten Calciumsilicathydraten in kolloidaler Form.

II Phase: Durch die Bildung einer dünnen Lage von Hydratationsprodukten auf den Klinkerpartikeln verebbt diese erste Hydratationsperiode, und die Ruheperiode oder Dormanteperiode, während der praktisch keine weitere Hydratation stattfindet, beginnt. Die ersten Hydratationsprodukte sind noch zu klein, um den Raum zwischen den Zementpartikeln zu überbrücken und ein festes Gefüge aufzubauen. Damit bleiben die Zementpartikel noch gegeneinander beweglich, d. h. die Konsistenz des Zementleims ist nur wenig steifer geworden. Das Erstarren des Zementleims beginnt nach etwa ein bis drei Stunden, wenn sich erste, noch sehr feine Calciumsilicathydratkristalle, erkennbar anhand

ihrer spitznadelig faserförmigen Morphologie, auf den Klinkerpartikeln bilden. Die Morphologie des bereits vorhandenen Ettringits ändert sich zu diesem Zeitpunkt wenig.

III Phase: Nach Abschluss der Ruheperiode setzt erneut eine intensive Hydratation der Klinkerphasen ein. Diese dritte Periode, Beschleunigungsperiode genannt, beginnt nach etwa 4 Stunden und endet nach 12 bis 24 Stunden. Dabei baut sich ein Grundgefüge auf, bestehend aus CSH-Faserbüscheln bzw. CSH-Blattstrukturen, plattigem Calciumhydroxid und in die Länge wachsenden Ettringitkristallen. Durch die größeren Kristalle werden die Räume zwischen den Zementpartikeln überbrückt.

IV Phase: Die fortschreitende Verfestigung des Gefüges wird als Erhärten des Zements bezeichnet. Das Gefüge verdichtet sich, die Poren werden immer stärker ausgefüllt. Neben Calciumsilicathydraten besteht das Zementsteingefüge aus Aluminathydraten, Aluminatsulfathydraten und Calciumhydroxid [35].

2.7.2 Thixotropie infolge Hydratation

Ish-Shalom und Greenberg [64] untersuchten anhand eines Rotationsviskosimeters die thixotropen Eigenschaften von Bindemittelleimen, die mit Zementen mit unterschiedlichen C₃A-Gehalt hergestellt wurden. Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Zemente sind Tabelle 4 zu entnehmen. Der w/z-Wert der Bindemittelleime wurde bei 0,5 konstant gehalten.

Tabelle 4: Untersuchte Zemente [64]

Zusammensetzung,		A 15366 (C 2.2.7) Typ I normal (Klinker)	B 15367 (C 16.2.2) kein Gips	C 15698 (C 12.2.3) Typ I normal	D 15669 (C 14.2.2) Typ IV niedrige Temp.	E 15622 A (C 13.2.3) Typ II mittlere Temp.	F 19648 (C 15.2.2) kein C ₃ A
C ₃ S	[%]	44,8	45,4	45,3	33	49,2	66
C ₂ S	[%]	26,9	28,5	28,6	54,2	28,5	14,7
C ₃ S/C ₂ S	[%]	1,67	1,59	1,58	0,61	1,73	4,5
C ₄ AF	[%]	6,7	6,8	7,6	5,8	12,8	10,15 (3,16% C ₂ F)
C ₈ A	[%]	13,6	14,3	9,8	2,3	4,4	0
C ₈ SO ₄	[%]	3,3	0,7	3	3,1	2,7	4,3
MgO	[%]	2,5	2,63	3,4	1,72	1,44	0,6
freies CaO	[%]	0,93	0,98	0,08	0,15	0,49	0,58
gesamter Alkalianteil (Na ₂ O + K ₂ O)	[%]	0,33	0,33	1,57	0,27	0,22	0,12
Oberfläche, cm ² /g (Wagner Turbidimeter)		2,260	1,500	2,250	2,280	2,200	2,640

Für die Bearbeitung und Auswertung der Messwerte wurde ein dreieckförmiges Schergeschwindigkeits-Zeit-Profil angewandt und die eingeschlossene Fläche zwischen dem

Aufwärts- und Abwärtskurvenast der gemessenen τ - γ -Hysteresekurve berechnet (Abbildung 25).

Nach Ish-Shalom und Greenberg [64] zeigen die ermittelten Ergebnisse im Laufe der Zeit einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem C_3A -Gehalt der Zemente und den thixotropen Eigenschaften der hergestellten Bindemittelleime. Es ist sinnvoll, darauf hinzuweisen, dass in den ersten 45 Minuten die gemessene eingeschlossene Fläche der Hysteresekurve Werte von nahezu Null aufwies. Erst 2 Stunden nach Mischende zeigten die Messwerte eine starke Zunahme. Dies ist auf die Bildung der Hydratationsprodukte aus den C_3A -Klinkerpartikeln bzw. auf die wachsenden Ettringitkristalle zurückzuführen. In gleicher Weise ist die Abhängigkeit zwischen der Entwicklung der gemessenen Fläche und dem C_3A -Gehalt der Zemente deutlich in Abbildung 52 dargestellt. Dies bedeutet, dass die Hydratation des Zementes kein Einfluss auf den Aufbau des inneren Gefüges bzw. auf die thixotropen Eigenschaften des Betons hat, da die gemessene eingeschlossene Fläche der Hysteresekurve erst nach 2 Stunden zunahm.

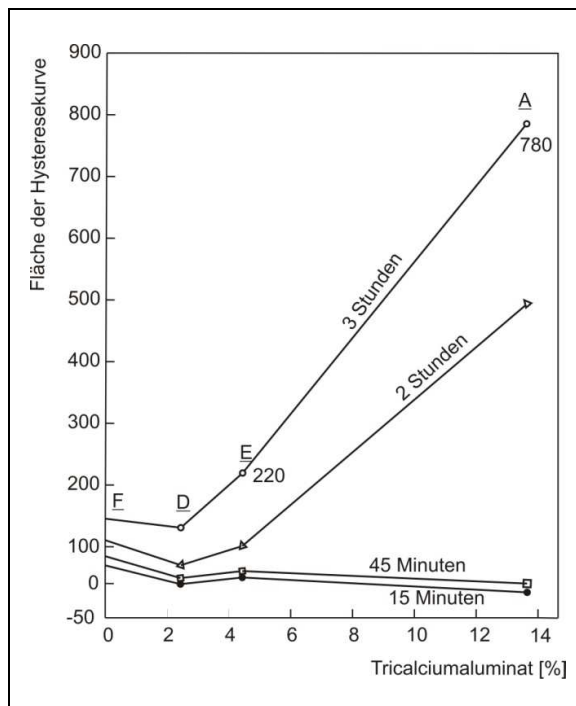


Abbildung 52: Thixotrope Eigenschaften in Abhängigkeit von dem C_3A -Gehalt und der Zeit nach Mischende [64]

2.8 Beanspruchung des grünstandfesten Betons beim Betonstraßenbau

2.8.1 Allgemeines

Zwischen zwei sich berührenden und gegeneinander bewegend Grenzflächen von Festkörpern tritt dabei ein Widerstand auf, der als Reibung bezeichnet wird. Diese kann durch Modifikation der Grenzflächen, z. B. durch Schmierung, vermindert werden [85][150].

Die Reibung lässt sich zwischen äußerer (z. B. Reibung zwischen Festkörpern) und innerer Reibung (z. B. bei der Verformung von Flüssigkeiten und Festkörpern) unterscheiden [N 10].

2.8.2 Äußere Reibung: Haft- und Bewegungsreibung

Die äußere Reibung tritt zwischen den sich berührenden Grenzflächen von Festkörpern auf. Dieser Reibungstyp wird als Festkörperreibung bezeichnet, weil sie zwischen den Kontaktflächen von sich berührenden Festkörpern auftritt.

Äußere Reibung lässt sich nochmals in verschiedene Reibungsarten unterteilen. Die zwei Grundarten der äußereren Reibung sind Haft- und Bewegungsreibung. Diese Reibungsformen treten immer strikt voneinander getrennt auf.

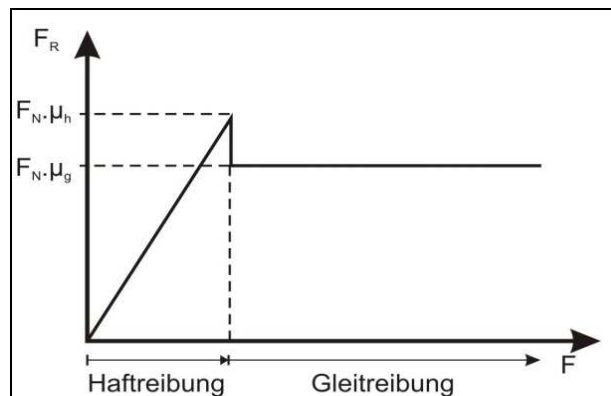


Abbildung 53: Schematische Darstellung des Verhältnisses zwischen Haft- und Gleitreibung

Haftreibung: Bewegen sich zwei berührende Körper nicht relativ zueinander, so wird von Haftreibung gesprochen. Das heißt, die auftretenden äußeren Kräfte bzw. Momente können die Haftreibung nicht überwinden.

Bewegungsreibung: Liegt vor, wenn ein Körper auf einem anderen gleitet, sich also beide Körper gegeneinander bewegen. Die Bewegungsreibung lässt sich nochmals in verschiedene Reibungsarten unterteilen.

1. Bei einer rein geradlinigen, fortschreitenden Bewegung der Körper tritt Gleitreibung auf. Die Gleitreibungskraft ist immer geringer als die Haftreibungskraft bei gleicher Normalkraft, da der Haftreibungskoeffizient μ_h größer als der Gleitreibungskoeffizient μ_g ist (Abbildung 53).
2. Wenn Körper aufeinander abrollen und dabei nicht gleiten, spricht man von Rollreibung. Der Rollreibungskoeffizient μ_r ist in der Regel kleiner als der Gleitreibungskoeffizient μ_g .

3. Treten Gleit- und Rollreibung gleichzeitig auf, wird dies als Wälzreibung bezeichnet. Hier kommt es zu keinem reinen Abrollen der Körper. Die Bewegung wird von einer kleinen Gleitreibung (Schlupf) überlagert.
4. Die Bohrreibung entsteht am Auflagerpunkt einer sich um die vertikale Achse drehenden Kugel auf einer horizontalen Ebene.

2.8.3 Innere Reibung

Die innere Reibung bewirkt die Zähigkeit von Materialien und Fluiden und hat Einfluss auf Verformungen bzw. Strömungen. Rheologisch kann von innerer Reibung gesprochen werden, wenn das Fluid gesichert wird. Die Viskosität ist das Maß für die aktivierte innere Reibung in einer Substanz mit einer aufgetragenen Belastung. Die benötigte höhere Viskosität eines SVBs bewirkt eine größere Scherspannung, da eine größere innere Reibung vorliegt [37][114]. Je kleiner die vorhandenen inneren Reibungskräfte sind, desto kleiner ist die Viskosität η und desto schneller fließt eine Flüssigkeit, z. B. der Beton beim Ausbreitvorgang.

2.8.4 Interaktion Beton-Schalung

Die Fließeigenschaften eines SVBs in der Schalung werden von den rheologischen Eigenschaften des SVBs sowie von der Entwicklung der Reibung zwischen SVB und Gleitschalung bestimmt: dem so genannten Interaktion-Fluid-Struktur [28].

Mehrere Parameter beeinflussen die Entwicklung der Reibungsspannungen τ zwischen Beton und Schalung. Diese Parameter schließen die Oberflächenrauheit der Platten, die relative Gleitgeschwindigkeit beim Fließen zwischen frischem Beton und Schalungsplatte, die Normalspannung und die Natur des an der Beton/Schalung-Grenzfläche verwendeten Entformungsmittels mit ein.

Der Beton ist ein grobdisperses System, das aus einer Feststoffphase (Gesteinskörnungen) und einer Flüssigphase (Bindemittelleim) besteht. Aus diesem Grund ist das Verhalten des frischen Betons an der Grenzfläche Beton/Schalungswand schwer zu charakterisieren. Mittels tribologischen Untersuchungen an mit Tonmineralen hergestellten Suspensionen wurde festgestellt, dass die Rauheit der Schalungswand einen signifikanten Einfluss auf die Entstehung der Reibungsspannung während eines Extrusionsvorgangs hat [36]. Nach Djelal [37], Onfield [96] und Vié [141] führen die Reibung τ zwischen Beton/Schalung zusammen mit der Thixotropie des Betons zu einem Rückgang des hydrostatischen Drucks von rund 30%, beispielsweise am Boden der Wand-Systemschalung.

Es wurde auch festgestellt, dass sich die Reibungsspannung erhöht, wenn die Rauheit der Schalungswand von der mittleren Partikelgröße der Tonteilchen abweicht (Abbildung 54).

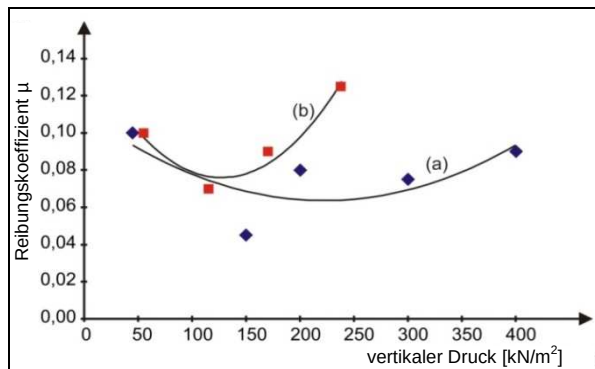


Abbildung 54: Entwicklung des Reibungskoeffizients bei veränderlichem vertikalen Druck P zweier Oberflächen mit einer Rauheit von : a) $Ra = 0,3 \mu\text{m}$; b) $Ra = 1,6 \mu\text{m}$, ohne Trennmittel und mit einer Gleitgeschwindigkeit von $2,5 \text{ mm/s}$ [38]

Zum Zweck der Charakterisierung der Reibungsvorgänge zwischen selbstverdichtendem Beton und einer Metalloberfläche, wie einer Schalungswand, wurden Untersuchungen mit steigenden Normalspannungen, Gleitgeschwindigkeiten und verschiedenen Trennmitteln durchgeführt. In Abbildung 55 und Abbildung 56 sind die ermittelten Reibungsspannungen dargestellt.

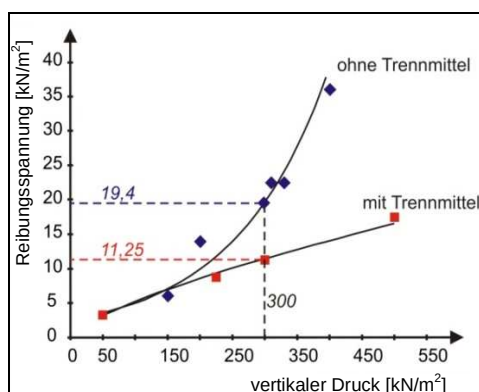


Abbildung 55: Entwicklung der Reibungsspannung bei veränderlichem vertikalen Druck P [37]

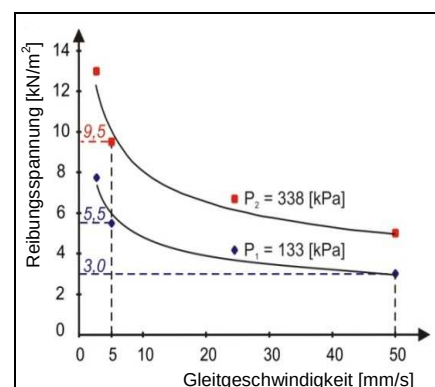


Abbildung 56: Entwicklung der Reibungsspannung bei veränderlicher Gleitgeschwindigkeit für zwei unterschiedliche vertikale Drücke (P_1 und P_2) [37]

Es wurde von [141] festgestellt, dass sich bei Anwendung eines Trennmittels mit einer Viskosität von $22.000 \text{ kN/m}^2 \cdot \text{s}$ und einem vertikalen Druck P von 300 kN/m^2 die Reibungsspannung von ca. 194 kN/m^2 bei $v_r = 2,5 \text{ mm/s}$ auf 113 kN/m^2 verringerte (Abbildung 55). Des Weiteren ließ sich ein signifikanter Einfluss der Gleitgeschwindigkeit und der Normalspannungen auf den Reibungswiderstand feststellen. Beispielsweise zeigte sich bei einem Druck P von 133 kN/m^2 und einer Geschwindigkeit von 50 mm/s eine Reibungsspannung von $0,003 \text{ kN/m}^2$, welche 45% geringer als die entsprechende Reibungsspannung bei einer Geschwindigkeit von 5 mm/s ist. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass eine Erhöhung in der Normalspannung P bei gleicher Gleitgeschwindigkeit und

Rauheit der Schalungswand eine deutliche Steigerung der Reibungsspannung mit sich bringt (Abbildung 56).

3. Übersicht über das Versuchsprogramm

3.1 Allgemeines

In den durchzuführenden Untersuchungen sollte überprüft werden, ob bzw. inwieweit sich ein selbstverdichtender Beton durch Zugabe verschiedener Betonzusatzmittel (Fließmittel, Luftporenbildner, thixotropierende Zusätze, Thixotropiermittel) so einstellen lässt, dass dieser baupraktisch als Straßenbeton für Gleitschalungsfertigung einsetzbar ist und seine Grünstandfestigkeit nach dem Verlassen der Gleitschalung, d.h. nach wenigen Minuten so groß ist, dass die Höhengenaugigkeit, Ebenheit, Oberflächentextur usw. sichergestellt werden können und keine Sedimentation stattfindet.

3.2 Methodik

Im ersten Schritt wurden Basisuntersuchungen durchgeführt, wo der Wasseranspruch (WA) der jeweiligen Bindemittel auf Basis des Wasseranspruchs (Normsteife) nach DIN EN 196-3 [N 25] bestimmt wurde. Die Wassermenge, die über den Wasseranspruch (WA) hinausgehend einem Leim zugegeben wird, beeinflusst rheologische Parameter wie die rel. Fließgrenze und die rel. Viskosität maßgeblich und gewährleistet eine ausreichende Fließfähigkeit, die für die Entwicklung eines selbstverdichtenden Betons notwendig ist [N 27][50][51]. Ziel der Erhöhung des Wasseranspruches ist es, zu untersuchen, ob neben den selbstverdichtenden Eigenschaften (Setzfließmaß > 200 mm) eines Bindemittelleims auch die Forderung einer entsprechend raschen (innerhalb von 5 bis 10 Minuten) Entwicklung der Grünstandfestigkeit möglich ist. Gleichzeitig wurde das rheologische Verhalten (relative Fließgrenze und Viskosität) aller Bindemittelleime mit einem Rotationviskosimeter charakterisiert.

In einem zweiten Schritt wurde Okamuras Mischungskonzept für die Entwicklung von selbstverdichtenden Betonen gefolgt, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Basisuntersuchungen zu prüfen. In Anlehnung an Okamuras Verfahren wurde zuerst die Betonmatrix mittels Untersuchungen an Mörteln entwickelt. Bezüglich der Konsistenz und der entsprechenden Grünstandfestigkeit, die die Mörtel aufweisen müssen, wurden zwei Anforderungen gestellt: Zum einen sollten die Setzfließmaße ≥ 200 mm sein, zum anderen sollten die untersuchten Mörtel nach 5 Minuten eine Grünstandfestigkeit entsprechend eines Formstabilitätskoeffizienten von $K \geq 0,90$ aufweisen. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse sollten in einem dritten Schritt, immer in Anlehnung an Okamuras-Verfahren, dann zur Herstellung von selbstverdichtenden Betonen mit ausgeprägten thixotropen Eigenschaften herangezogen werden.

Das Setzfließmaß der thixotrop eingestellten Betone wurde bestimmt und mit den nach Norm DIN EN 206-9 [N 28] hergestellten, herkömmlichen selbstverdichtenden Betonen der

Setzfließmaßklasse SF1 (550 bis 650 mm) verglichen. Hinsichtlich der Grünstandfestigkeit mussten die Betone einen Formstabilitätskoeffizienten $K \geq 0,90$ innerhalb von 3 bis 10 Minuten aufweisen. Abschließend wurden diejenigen Betonmischungen identifiziert, die den besten Kompromiss zwischen hoher Fließfähigkeit und erhöhter Grünstandfestigkeit gezeigt haben. Mit diesen Mischungen wurden die Anforderungen an selbstverdichtende Betone im Straßenbau unter Laborbedingungen mittels eines Mini-Pavers reproduziert, um die Fähigkeit, ihre Form unter realitätsnahen Bedingungen beizubehalten, zu überprüfen.

Eine Übersicht über das gesamte Versuchsprogramm zu den Laboruntersuchungen enthält Tabelle 5.

Tabelle 5: Übersicht über das Versuchsprogramm

Phase	Beschreibung
1. Ausgangsstoffe	
a	Bestimmung des Wasseranspruchs von Zementen nach DIN EN 196-3 [N 25]
2. Basisuntersuchungen an Bindemittelleimen	
a	Auswirkung einzelner Zusätze innerhalb 5 bis 10 Minuten in Hinblick auf den Kompromiss zwischen höherer Fließfähigkeit (Setzfließmaß ≥ 200 mm) und erhöhter Formstabilität (Formstabilitätskoeffizient $K_L \geq 0,9$). Setzfließversuch nach DIN EN 12350-8 [N 15]. Zur Beurteilung der Formstabilität wurde die Verformung eines freistehenden Leimkörpers anhand eines definierten Formstabilitätskoeffizienten K_L bestimmt.
b	Auswirkungen von Kombinationen zweckmäßiger Zusätze. Untersuchung des Einflusses der Zugabe von verschiedenen Zusätzen über die rheologischen Kenngrößen einer Referenzmischung mit einem Rotationsviskosimeter. Untersuchung der thixotropen Eigenschaften der entsprechenden Bindemittelleime und des daraus resultierenden Kompromisses zwischen höherer Fließfähigkeit (Setzfließmaß ≥ 200 mm) und höherer Formstabilität (Formstabilitätskoeffizient $K_L \geq 0,9$). Identifizierung von Schlüsselmaterialien bezüglich der Entwicklung der Grünstandfestigkeit innerhalb 5 bis 10 Minuten.
3. Untersuchungen an thixotrop eingestelltem SVB	
a	Entwicklung der Matrix (Mörtel) für thixotrop eingestellten SVB in Anlehnung an Okamuras Verfahren. Untersuchung der Übertragbarkeit der bisher an Bindemittelleimen (Basisuntersuchungen) ermittelten Ergebnisse hinsichtlich des Kompromisses zwischen höherer Fließfähigkeit und Formstabilität sowie Entwicklung der Grünstandfestigkeit.

b	Erste Versuche an thixotrop eingestellten SVBs, ausschließlich Fließfähigkeit (Setzfließmaß ≥ 500 mm) und Grünstandfestigkeit (Formstabilitätskoeffizient $K_w \geq 0,9$).
c	Optimierung des thixotrop eingestellten SVBs für den Einsatz in Gleitschalungsfertigern im Straßenbau. Simulation der Straßenbau-Verfahren in Laborbedingungen mittels eines Modells (Mini-Paver). Untersuchung der Frisch- und Festbetoneigenschaften einschließlich der Entwicklung der Grünstandfestigkeit.

3.3 Charakterisierung der verwendeten Ausgangsstoffe

3.3.1 Allgemeines

Für die durchgeführten Untersuchungen werden die verwendeten Ausgangsstoffe in so großer Menge bestellt, dass alle Versuche hiermit bewältigt werden konnten. Dies schließt Änderungen infolge verschiedener Chargen wie z. B. bei der Zementproduktion aus. Geringe Abweichungen in der Gleichmäßigkeit und der damit verbundenen Frisch- und Festbetoneigenschaften können nach Billberg [22] mittels Anpassung des Fließmittelgehalts korrigiert werden. Nach Literaturrecherche wurden die folgenden Ausgangsstoffe gewählt, um den gewünschten Beton zu entwickeln. Die technischen Daten der verwendeten Ausgangsstoffe sind im Anhang C dokumentiert.

3.3.2 Zement

Für die Durchführung der Untersuchungen wurden zwei handelsübliche Zemente eingesetzt, die gegenwärtig auch im Betonstraßenbau verwendet werden:

- CEM I 42,5 R, (Portlandzement, mit hoher Anfangsfestigkeit)
- CEM III/A 42,5 N, (Hochofenzement, Hüttensand 50 M.-% mit normaler Anfangsfestigkeit)

Diese Zemente erfüllen sowohl alle Anforderungen der DIN EN 197-1 hinsichtlich der Konformität und Leistungseigenschaften als auch die speziellen Anforderungen für die Anwendung im Betonfahrbahndeckenbau gemäß TL Beton – StB 07 [N 26][N 31].

Weitere Informationen zu den Zementen sind dem Anhang C beigelegt.

3.3.3 Betonzusatzstoffe

Die in die Untersuchungen mit einbezogenen Betonzusatzstoffe sind:

- Kalksteinmehl ip 330, inaktive Zusatzstoffe (Typ I), Pulver, geeigneter Füller für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen, gemäß DIN EN 13043:2002-12/TL Gestein-StB 2004.
Chemische Hauptbestandteile: Calciumcarbonat (CaCO_3) 94 M-% und Siliziumdioxid (SiO_2) 1,3 M-%. Körnung: 79% < 0,063 mm.
- Quarzmehl M4, inaktive Zusatzstoffe (Typ I), Pulver, gemäß ISO 3262-13 Typ A.
Chemischer Hauptbestandteil: kristallines Siliciumdioxid (SiO_2) 99,63 M-%. Körnung: 0,001 - 0,25 mm, mittlere Korngröße: 0,054 mm.
- Metakaolin, aktive Zusatzstoffe (Typ II), Pulver gemäß DIN EN ISO 9001/DIN EN 934-2/6. Chemische Hauptbestandteile: Aluminiumoxid (Al_2O_3) 40 M-% und Siliciumdioxid (SiO_2) 55 M-%. Körnung: 0,001 - 0,25 mm, mittlere Korngröße: 0,054 mm.

Weitere Informationen der Betonzusatzstoffe sind dem Anhang C beigelegt.

3.3.4 Betonzusatzmittel

Die in die Untersuchungen mit einbezogenen Betonzusatzmittel sind:

- Fließmittel (FM 1), Hochkonzentriertes Fließmittel, flüssig, auf Naphthalinsulfonat-Basis, geeignet für die Herstellung von Betonen der Konsistenzklasse F6, gemäß EN 934-2: T 2. Empfohlene Dosierung: 0,2 – 4,0 M.-% v.Z. Dichte (20°C): 1,2 kg/dm³, pH-Wert (20°C): 5,8 – 7,8.
- Fließmittel (FM 2), Hochleistungsfließmittel (letzte Generation), flüssig, auf synthetischer Polycarboxylatether-Basis (PCE-Basis), geeignet für die Herstellung von selbstverdichtendem Beton, gemäß EN 934-2:T 3.1/3.2. Empfohlene Dosierung: 0,2 – 5,0 M.-% v.Z. Dichte (20°C): 1,05 kg/dm³. Feststoff-Gehalt: 63 M.-%. Chloridgehalt < 0,10%. Alkaligehalt (Na_2O -Äquiv.) < 1,0 %.
- Luftporenbildner (LP), flüssig, auf modifizierter Wurzelharz-Basis, zur Herstellung von Beton mit hohem Frost-/Frosttaumittelwiderstand, geeignet für Straßenbau, gemäß EN 934-2 T5. Empfohlene Dosierung: 0,2-0,8 M.-% v.Z. Dichte (20°C): 1,01 kg/dm³, pH-Wert: ca. 12,5. Chloridgehalt < 0,10%. Alkaligehalt (Na_2O -Äquiv.) < 1,0 %.

- Thixotropierende Zusätze. Untersucht wurden die Auswirkungen von vier verschiedenen Schichtsilikaten (SK), die auf Montmorillonit und Kaolinit basieren und ein Stabilisierer (ST) auf Stärkebasis. Diese wurden in der Literatur als Auslöser für das thixotrope Verhalten der zementgebundenen Suspensionen aufgelistet. Eine Übersicht dieser Zusatzmittel ist in Tabelle 6 gegeben.

Tabelle 6: Verwendete thixotropierende Zusätze

Produkt	Basis	Empfohlene Dosierung (lt. Hersteller)	Form
Schichtsilikate (SK1)	Mineralgemisch aus Kaolinit, Illit und Quarz	3-8 kg/m ³ Frischbeton	Pulver
Schichtsilikate (SK2)	Montmorillonit	0,2 - 2,0 M.-% v. Z.	Pulver
Schichtsilikate (SK3)	Alkalisch aktivierter Bentonit (Montmorillonit)	5 bis 15 M.-% v. Z.	Pulver
Schichtsilikate (SK4)	Natürlicher Ca-Bentonit (Montmorillonit)	3 bis 8 M.-% v. Z.	Pulver
Stärke (ST)	Modifizierte Stärke	1 bis 5 M.-% v. Z.	Flocken

Schichtsilikate SK1, Pulver, Mineralgemisch aus Kaolinit, Illit und Quarz mit Einfluss auf Fließgrenze und Viskosität, geeignet für zementgebundene Systeme mit w/z-Wert < 0,4. Gemäß DIN EN 12620 und DIN EN 13139. Empfohlene Dosierung: 3 - 8 kg/m³ Frischbeton. Dichte (20°C): 2,7 kg/dm³, Wasserlöslicher Chloridgehalt 0,004 M.-% Cl, Säurelösliches Sulfat: 0,01 M.-% SO₃, Trockenschwinden: 0,048%. Körnung: 97% < 0,063 µm.

Schichtsilikate SK2, Pulver, auf Montmorillonit-Basis, geeignet für Verdicken, Wirkung auf die rheologische Eigenschaften des Frischbetons nach intensivem Einmischen (> 1000 rpm für mindestens 10 Minuten), gemäß Verordnung (EG) N° 1907/2006. Chemischer Hauptbestandteil: Magnesium-Aluminium-Hydrosilikat in 99 M.-%. Empfohlene Dosierung: 0,2 – 2 M.-% v. Z. Dichte (20°C): 2,62 kg/dm³, pH-Wert: 9,0.

Schichtsilikate SK3, Pulver, auf aktivierter Calciumbentonit-Basis (Montmorillonit: 70 M.-%). Geeignet bei Technologien für die Steigerung der Grünstandfestigkeit und wo die Bindefähigkeit eines Aktivbentonits erforderlich ist. Gemäß EN 374, EN 388 und EN 420. Chemische Hauptbestandteile: Siliciumdioxid (SiO₂) 53,5 M.-% und Aluminiumoxid (Al₂O₃) 16,8 M.-%. Hauptbegleitminerale: Quarz: 10 M.-%, Feldspat: 10 M.-%. Empfohlene Dosierung: 5 – 15 M.-% v. Z. Dichte (20°C): 2,6 kg/dm³. Siebrückstand: max. 30% (63 µm), pH-Wert: 10.

Schichtsilikate SK4, Pulver, auf natürlicher Calciumbentonit-Basis (Montmorillonit). Geeignet für die Steigerung der Grünstandfestigkeit. Gemäß EN 374, EN 388 und EN 420. Chemische Hauptbestandteile: Siliciumdioxid (SiO_2) 60 M-% und Aluminiumoxid (Al_2O_3) 20 M-%. Hauptbegleitminerale: Quarz: 9 M-%, Feldspat: 10 M-%. Empfohlene Dosierung: 3 – 8 M-% v. Z. Dichte (20°C): 2,6 kg/dm^3 . Siebrückstand: max. 30% (63 μm), pH-Wert: 8.

Stärke ST, Pulver, auf modifizierter Kartoffelstärke-Basis. Geeignet für die Stabilisierung und Erhöhung der thixotropen Eigenschaften des selbstverdichtenden Betons. Gemäß ISO 697 und ISO 1666. Empfohlene Dosierung: 1 – 5 M-% v. Z. Dichte (20°C): 2,6 kg/dm^3 , pH-Wert: 12.

- Thixotropiermittel. Als Thixotropiermittel kamen drei verschiedene Zusätze zum Einsatz, die im Handel als Thixotropiermittel deklariert sind. Diese Mittel basieren auf verschiedenen Polymeren. Eine Übersicht ist in Tabelle 7 gegeben.

Tabelle 7: Verwendete Thixotropiermittel

Produkt	Basis	Empfohlene Dosierung (lt. Hersteller)	Form
Thixotropiermittel (T1)	Organische Polymere	Anfangsdosierung ca. 2 M-% (bezogen auf Wassergehalt)	flüssig
Thixotropiermittel (T2)	Modifizierte organische Polymere	1 - 6 M-% v. Z.	flüssig
Thixotropiermittel (T3)	Tetrasaccharide	0,03 - 0,1 M-% v. Z.	Pulver

Thixotropiermittel T1, flüssig, auf Tetrasaccharid-Basis. Empfohlene Dosierung: 0,1 bis 2,0 M-% v. Wassergehalt. Das Produkt ist in der Entwicklungsphase. Es wurden keine weiteren detaillierten Angaben vom Hersteller bekannt gegeben.

Thixotropiermittel T2, flüssig, auf Basis modifizierter organischer Polymere. Geeignet für zementöse Injektionsmörtel und Injektionssuspensionen, bei denen ein starkes Ansteifen erforderlich ist. Chemische Hauptbestandteile: Natriumsalz (natürliche Fettsäuren und Harze). Empfohlene Dosierung: 1,0 – 6,0 M-% v. Z. Dichte (20°C): 1,1 kg/dm^3 . Viskosität (20°C): 40 mPa.s, pH-Wert: 5

Thixotropiermittel T3, Pulver, auf nichtionischer Polysaccharide-Basis (Biopolymere). Geeignet für die Erhöhung der thixotropen Eigenschaften des zementösen Systems. Hauptwirkstoff: Welan Gum. Empfohlene Dosierung: 0,03 - 0,1 M-% v. Z. Dichte (20°C): 0,8 kg/dm^3 , pH-Wert: 7

Weitere Informationen der Betonzusatzmittel sind dem Anhang C beigelegt.

3.3.5 Gesteinskörnung

Für die Untersuchungen an Betonen kamen als Gesteinskörnung gewaschener und getrockneter, quarzitischer Rheinsand und Rheinkies nach DIN EN 12620 [N 24] zum Einsatz.

Nach DIN EN 206-9 [N 28] ist für selbstverdichtenden Beton ein Körnungsgemisch geeignet, dessen Korngrößenverteilung der Regelsieblinie A/B 16 entspricht, so dass das Sedimentierungsrisiko reduziert wird. Die verwendeten Gesteinskörnungen lagen in den Korngruppen 0/2 mm, 2/8 mm, 8/16 mm und 16/32 mm vor.

Darüber hinaus wurden als Gesteinskörnung Brechsand und Splitt, der in den Korngruppen 2/8 mm, 8/16 mm und 16/22 mm vorlag, eingesetzt. Die in den Betonen verwendeten Korngemische sind im Anhang A (Abbildung A-2 bis Abbildung A-5) dargestellt.

4. Basisuntersuchungen an Bindemittelleimen

4.1 Bestimmung des Wasseranspruchs der Bindemittelleime

Da die Eigenschaften von SVB im Wesentlichen vom rheologischen Verhalten des Bindemittelleims bestimmt werden, werden zunächst die maßgebenden rheologischen Parameter an Leimen untersucht.

Zur Untersuchung von Bindemittelleimen im Rotationsviskosimeter ist eine ausreichende Fließfähigkeit der Leime einzustellen. Um sicherzustellen, dass jedem Leim eine definierte Menge an rheologisch wirksamem Wasser zur Verfügung stand, wurde die Zugabewassermenge des jeweiligen Bindemittels auf Basis des Wasseranspruchs (Normsteife) nach DIN EN 196-3 [N 25] festgelegt. In den Untersuchungen wurden die Bindemittelleime mit einer Wassermenge entsprechend dem 1,2 bis 1,4-fachen Wasseranspruch des Bindemittels (1,2.WA bzw. 1,4.WA) hergestellt. Für die Messungen im Rotationsviskosimeter lag damit eine ausreichende Fließfähigkeit vor.

4.2 Kombinierte Fließ- und thixotrope Eigenschaften der Bindemittelleime

Die Fließfähigkeit der Bindemittelleime (Scherfestigkeit und Viskosität in Kombination) wurde anhand eines Setzfließmaßes und die thixotropen Eigenschaften ansatzweise anhand der Formstabilität bzw. der „Grünstandfestigkeit“ eines freistehenden Leimkörpers beurteilt.

Bezüglich der Konsistenz und damit des Wasserzementwertes und des Fließmittelgehaltes sowie einer erhöhten „Grünstandfestigkeit“ wurden an die untersuchten Bindemittelleime zwei Anforderungen gestellt: Zum einen sollen die Setzfließmaße der Bindemittelleime unmittelbar nach Mischende ≥ 200 mm sein, zum anderen sollen die untersuchten Bindemittelleime eine „Grünstandfestigkeit“ nach 5 bzw. 10 Minuten entsprechend eines eigenen definierten Formkoeffizienten $K_L \geq 0,90$ aufweisen.

Das rheologische Verhalten von Bindemittelleimen wird durch Veränderungen im Mischregime (Mischzeit, Mischintensität, Zeitpunkt von Zugaben) sowie durch den Zeitpunkt der Messung stark beeinflusst [50][115]. Reproduzierbare Ergebnisse können daher nur erzielt werden, wenn der Misch- und der Versuchsablauf stets gleich sind. Im Hinblick auf die angestrebten Einsatzbereiche dieser Bindemittelleime bzw. Betone, bei denen diese u.U. mehrfach Erschütterungen ausgesetzt sind, wurde für die rheologischen Untersuchungen der in Abbildung 57 dargestellte Versuchsablauf festgelegt und bei allem Leimuntersuchungen eingehalten.

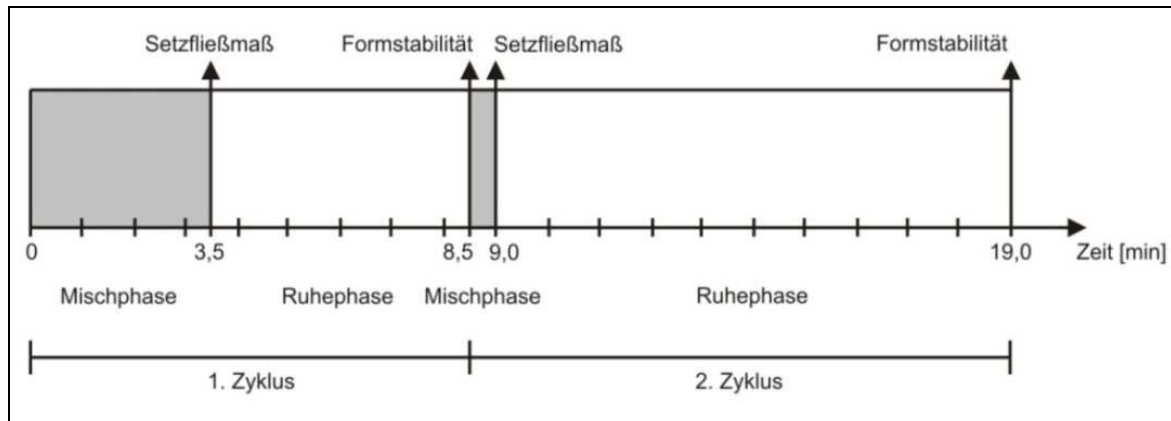


Abbildung 57: Zeitlicher Ablauf zur Bestimmung des Setzfließmaßes und der Formstabilität an Bindemittelleimen

Der zu untersuchende Bindemittelleim wurde in Anlehnung an DIN EN 196-3 [N 25] zunächst für 3,5 Minuten gemischt. Der Leim wurde anschließend einlagig in eine Kegelstumpfform (Setztrichter) mit einer Höhe von 60 mm, einem Basisdurchmesser von 100 mm und einem oberen Durchmesser von 70 mm, der üblicherweise für die Konsistenzprüfung von Mörtel nach DIN EN 1015 [N 11] verwendet wird, eingebracht. Entsprechend der angestrebten Selbstverdichtung erfolgte hier keine externe Verdichtung. Das Setzfließmaß wurde in Anlehnung an DIN EN 1015 - 3 [N 11] bestimmt. Beim Ziehen des Setztrichters begann der Leim ohne weitere Schock- oder Klopfenwirkung allein unter der Schwerkraft zu fließen. Nach Beendigung des Fließvorgangs wurde der Durchmesser des Setzfließmaßes als Kennwert für die Fließfähigkeit bestimmt.

Die Formstabilität wurde nach einer entsprechenden Wartezeit von 5 bzw. 10 Minuten nach den jeweiligen Mischphasen bestimmt, indem der Setztrichter erst nach dieser Wartezeit gezogen und anschließend das Setzmaß, d.h. das Absinken der Oberfläche der mittlerweile angesteiften Leimprobe sowie der untere und obere Durchmesser gemessen wurden (Abbildung 58).

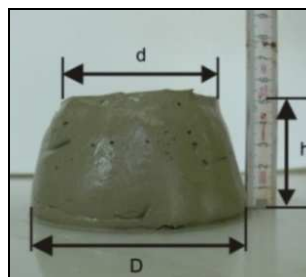


Abbildung 58: Bestimmung der Abmessungen (Basisdurchmesser D , Höhe h und oberer Durchmesser d) des freistehenden Probekörpers

Zur Beurteilung der Grünstandfestigkeit bzw. Formstabilität wurde unter Berücksichtigung der Abmessungen (oberer Durchmesser, unterer Durchmesser und Höhe) des freistehenden Probekörpers ein Formstabilitätskoeffizient K_L definiert (Gleichung 24). Der Formstabilitätskoeffizient K_L wurde empirisch nach einer systematischen Datenerhebung von

mehreren Untersuchungen an Bindemittelleimen und letztendlich anhand eines linearen Gleichungssystems ermittelt.

$$K_L = \frac{11}{(D + d - h)}$$

Gleichung 24

Mit: D = Basisdurchmesser
 d = oberer Durchmesser
 h = Höhe

Im Formstabilitätskoeffizient K_L wurden die drei Parameter der Formstabilität (oberer Durchmesser „d“, unterer Durchmesser „D“ und Höhe „h“) in einen einzigen Wert erfasst. Mittels der Einführung des Formkoeffizienten K_L war es möglich die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen zu vergleichen. Um einen Leim mit hoher Grünstandfestigkeit zu erzielen, ist ein Formstabilitätskoeffizient K_L möglichst nahe 1 anzustreben.

4.3 Rheologische Untersuchungen im Rotationsviskosimeter

Die charakteristischen rheologischen Kenngrößen der jeweiligen Bindemittelleime wurden mit einem Viskomat NT bestimmt [73][120]. Dabei taucht ein spezieller Scherkörper (Messpaddel) in die rotierende Probe ein, wobei kontinuierlich das Widerstands-Drehmoment gemessen wird, das in Abhängigkeit der Umdrehungsgeschwindigkeit und dem Fließverhalten der Probe auf das Messpaddel übertragen wird.

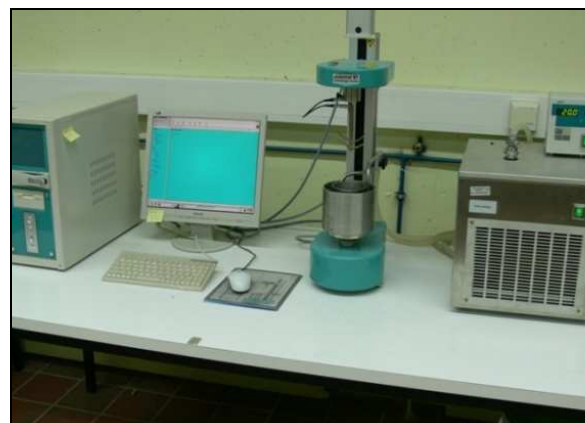
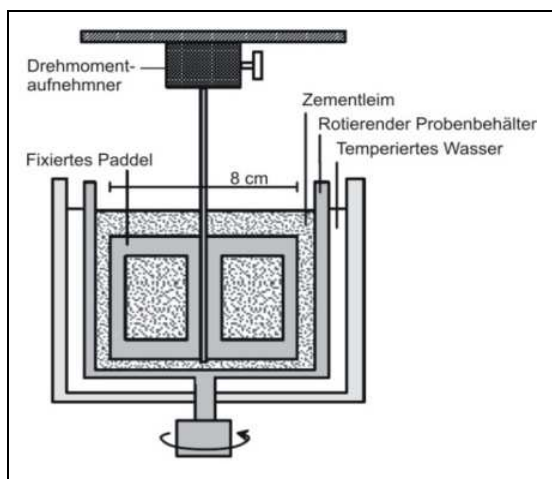


Abbildung 59: Rotationsviskosimeter Viskomat NT

Nachteil des Viskomats NT ist, dass sich – im Gegensatz zu koaxialen Messsystemen – mit dem darin integrierten flachen Paddel kein definierter Spalt einstellt und damit sich auch das

Schergefälle nicht wissenschaftlich exakt bestimmen lässt. Folglich lassen sich mit dem Viskomat NT für das Fließverhalten nur relative Kenngrößen bestimmen, was für vergleichende Untersuchungen wie den hier vorliegenden jedoch keine Einflüsse auf die Ergebnisse hat. Wesentlicher Vorteil dieses Viskomat NT ist, dass der gesamte Bindemittelleim/Mörtel in Bewegung gehalten wird und damit eine mögliche Sedimentation weitgehend ausgeschaltet wird.

Nach Banfill [7], [8] und Schleibinger [116] ergeben sich folgende Korrelationen:

- Scherspannung τ [Pa] $\approx$ Dreh- bzw. Schermoment [N.mm]
- Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] $\approx$ Rotations- bzw. Schergeschwindigkeit [U/min]
- Viskosität η [Pa·s] $\approx$ Steigung der Fließkurve (= rel. Viskosität) [N.mm.min]
- Fließgrenze τ_0 [Pa] $\approx$ Achsabschnitt der Fließkurve (= rel. Fließgrenze) [N.mm]

Anhand des folgenden Messprofils wurden die rheologischen und thixotropen Eigenschaften der Bindemittelleime untersucht:

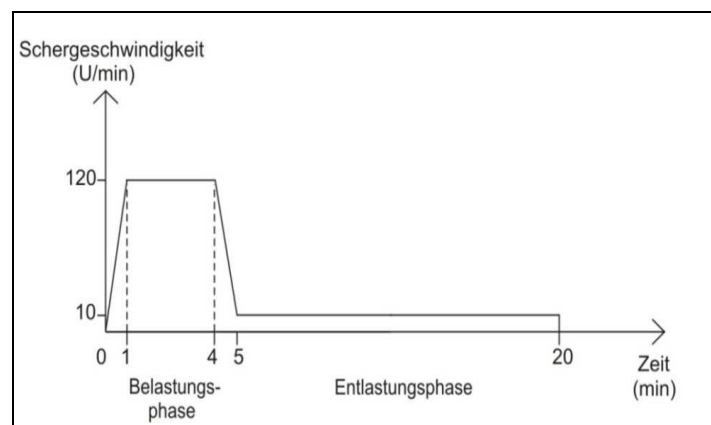


Abbildung 60: Im Rheometer angewandtes Messprofil [120]

Das Messprofil der rheologischen Untersuchungen wurde in Anlehnung an rheologische Untersuchungen, die Schreiber [120] an zementbasiertem Injektionsmaterial durchführte, gewählt. In diesem Messprofil nahm die Schergeschwindigkeit zunächst innerhalb der ersten Minute von 0 bis 120 Umdrehungen pro Minute zu. In der anschließenden Belastungsphase, wurde der innere Zusammenhalt des Leims innerhalb von 3 Minuten sukzessive abgebaut, wohingegen in der folgenden Entlastungsphase, nach einer Reduzierung der Schergeschwindigkeit auf 10 Umdrehungen pro Minute, das innere Gefüge und damit auch der innere Zusammenhalt, zumindest teilweise, wieder aufgebaut wurde.

Darüber hinaus kann das typische thixotrope Verhalten der Bindemittelleime aus den Veränderungen der im Rheometer ermittelbaren Drehmomente vergleichend beurteilt werden (Abbildung 61). Das Verhältnis zwischen dem Strukturabbau während der Belastungsphase und dem Strukturaufbau in der anschließenden Entlastungsphase, quantitativ bewertbar anhand der Teilflächen B_i/A_i innerhalb der ermittelten Messwertkurve, ergibt nach [120] die Thixotropiezahl T_i , mit der das thixotrope Verhalten verschiedener Bindemittelleime miteinander verglichen werden kann.

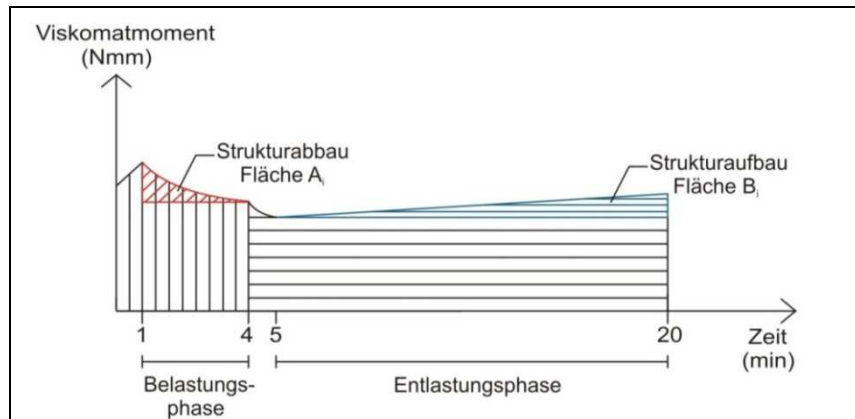


Abbildung 61: Beurteilung der Thixotropie [120]

$$T_i = \frac{B_i}{A_i}$$

Gleichung 25

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Thixotropiezahlen nicht als physikalische Messgröße zur Beurteilung der thixotropen Eigenschaften herangezogen werden können, sondern nur für Vergleiche verschiedener Bindemittelleime geeignet sind. Die Thixotropiezahlen T_i sind immer im Zusammenhang mit dem Maß des Strukturaufbaus und Strukturabbaus zu betrachten. Ein geringer Strukturabbau (kleine Flächen A_i) und ein hoher Strukturaufbau (große Fläche B_i) führen zu entsprechend hohen Thixotropiezahlen. Eine Beurteilung der thixotropen Eigenschaften anhand der Thixotropiezahl sollte nur unter Berücksichtigung der Flächenwerte erfolgen.

5. Ergebnisse der Basisuntersuchungen an den Bindemittelleimen

5.1 Auswirkungen einzelner Zusätze

5.1.1 Bestimmung des Wasseranspruchs

Im ersten Schritt wurde der Wasseranspruch (WA) der beiden verwendeten Zemente bestimmt. Dieser wurde für den Portlandzement CEM I 42,5 R zu 26,5 M.-% v. Z. und für den Hochofenzement CEM III/A 42,5 N zu 30,5 M.-% v. Z. bestimmt.

5.1.2 Wassergehalt

Der Anteil des rheologisch wirksamen Wassers kann nur in engem Rahmen über den Wasseranspruch hinaus variiert werden, um neben der selbstverdichtenden Eigenschaft auch die Forderung an eine erhöhte rasche Formstabilität bzw. Grünstandfestigkeit innerhalb wenigen Minuten erfüllen zu können. Daher wurde der Gesamtwassergehalt in den Bindemittelleimen lediglich zwischen dem rd. 1,13-fachen und dem rd. 1,22-fachen des jeweils für die Zementsorte ermittelten Wasseranspruchs (1,13.WA bis 1,22.WA) variiert und deren Fließ- und thixotropen Eigenschaften durch Bestimmung des Setzfließmaßes und der Formstabilität nur im 1. Zyklus untersucht.

Als Zement wurde ein Hochofenzement CEM III/A 42,5 N und einem thixotropen Zusatz SK1 (0,25 M.-% v. Z.) eingesetzt. Als Zusatzstoffe wurden hier jeweils Quarzmehl (5,0 M.-% v. Z.) und Metakaolin (1,0 M.-% v. Z.) verwendet. Als Fließmittel wurde ein Produkt auf Basis von Polycarboxylatether (FM 2) mit einem Gehalt von 0,3 M.-% bezogen auf den Zementgehalt eingesetzt.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 62 dargestellt. In der Grafik ist auf der X-Achse die Fließfähigkeit (Setzfließmaß in mm) der untersuchten Bindemittelleime dargestellt, die unmittelbar nach Mischende bestimmt wurde. Auf der Y-Achse wird der entsprechende ermittelte Formstabilitätskoeffizient K_L jedes Bindemittelleims nach einer Wartezeit von 5 bzw. 10 Minuten dem Setzfließmaß gegenübergestellt. Die angestrebten Zielbereich (rotes Kästchen) ist mittels einem Setzfließmaß > 200 mm und einem Formstabilitätskoeffizient $K_L \geq 0,90$ eingegrenzt.

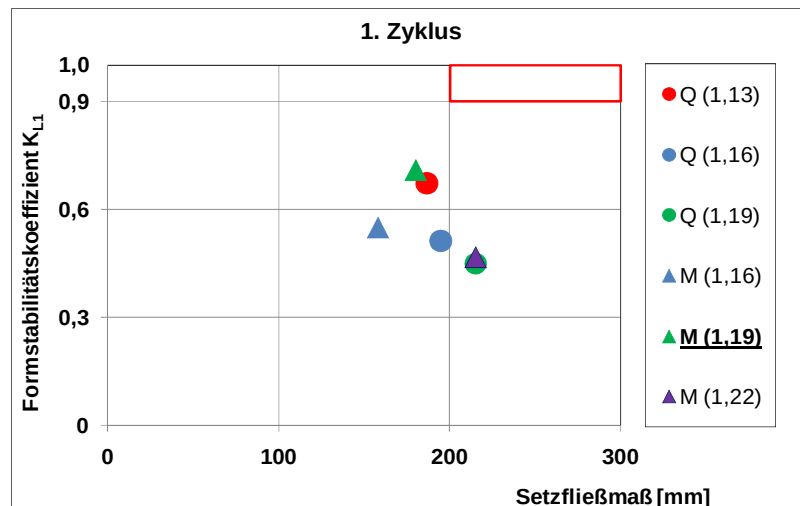


Abbildung 62: Zusammenhang zwischen dem Setzfließmaß und dem Formstabilitätskoeffizient im 1. Zyklus für Bindemittelleime mit Quarzmehl und Metakaolin mit unterschiedlichen Wassergehalten

Die angestrebten Zielgrößen (Setzfließmaß ≥ 200 mm und Formstabilitätskoeffizient $K_L \geq 0,90$), die im Abschnitt 4.2 definiert wurden, konnten bei keinem dieser Bindemittelleime vollständig erreicht werden. Erwartungsgemäß erhöhte sich das Setzfließmaß der untersuchten Bindemittelleime um bis zu 36%, wenn der Wassergehalt von 1,16 auf 1,19.WA erhöht wurde. Dieser Effekt kann auf das höhere Wasser/Feststoff-Verhältnis und dem daraus resultierenden höheren Abstand der Partikel untereinander zurückgeführt werden [35]. Mit der Erhöhung des Wassergehaltes wurde gleichzeitig eine Verringerung der Formstabilität beobachtet, was besonders deutlich bei den Bindemittelleimen mit Quarzmehl zu erkennen war. Eine Erhöhung des Wassergehaltes von 1,13.WA auf 1,19.WA führte zu einer Reduzierung des Formstabilitätskoeffizienten K_{L1} von 0,67 auf 0,45, d.h. um rd. 33 % geringeren Formstabilitätskoeffizient. Die Erhöhung der Wasserzugabemengen von 1,16 auf 1,19.WA führte bei den Bindemittelleimen mit Metakaolin zunächst zu einem Anstieg des Formstabilitätskoeffizienten K_{L1} von 0,55 auf 0,71. Eine weitere Erhöhung der Wasserzugabe auf 1,22.WA führte letztendlich zu einem Abfall des Formstabilitätskoeffizienten auf 0,47.

5.1.3 Fließmittel

Im Folgenden wurde der Einfluss von zwei verschiedenen Fließmitteln auf die Fließ- und thixotropen Eigenschaften von Bindemittelleimen untersucht. Als Fließmittel wurden zwei Produkte auf Basis von Naphthalinsulfonat (FM 1) und Polycarboxylatether (FM 2) mit einem Gehalt von 0,3 bis 0,5 M.-% bezogen auf den Zementgehalt eingesetzt. Da Bindemittelleim M (1,19) im Abschnitt 5.1.2 den besten Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und Formstabilität gezeigt hat, wurde er als Ausgangsmischung gewählt.

Die Ausgangsmischung M (1,19), ab hier als M*1,19 (FM 2 – 0,3%) genannt, besteht aus Zement CEM III/A 42,5 N, thixotropen Zusatz SK1 (0,25 M.-% v. Z.), Metakaolin

(1,0 M.-% v. Z.) sowie Fließmittel FM2 auf PCE-Basis (0,3 M.-% v. Z.). Die zugegebene Menge an Wasser betrug 1,19.WA.

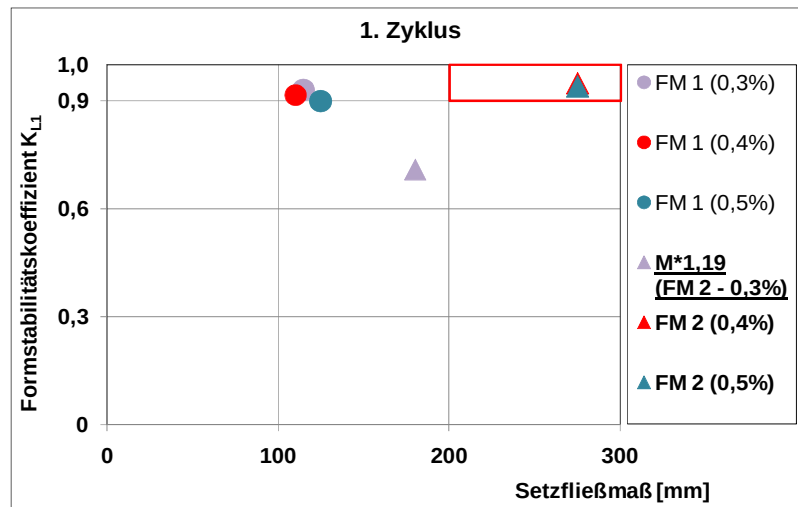
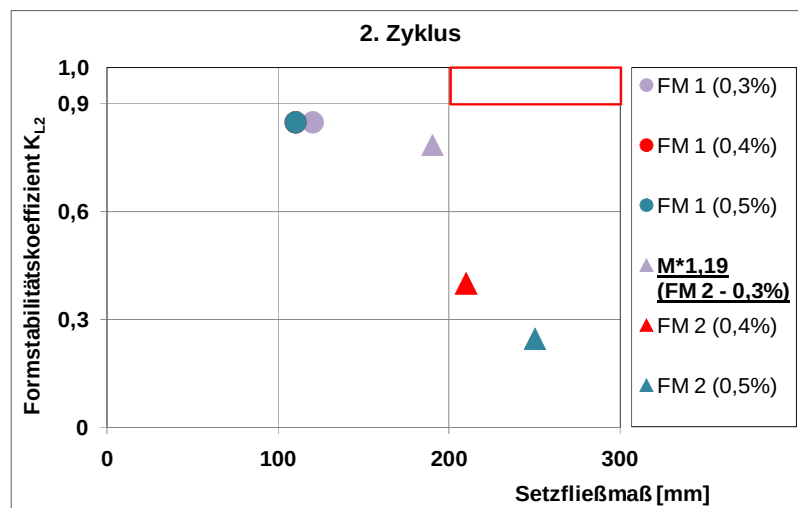


Abbildung 63: Zusammenhang zwischen dem Setzfließmaß und dem Formstabilitätskoeffizient für Bindemittelleime mit unterschiedlichen Fließmittel; a) im 1. Zyklus



b) im 2. Zyklus

Die angestrebten Zielgrößen für das Setzfließmaß (≥ 200 mm) und für die Formstabilität ($K_L \geq 0,90$) konnten bei den Bindemittelleimen mit Fließmittel FM 2 (Polycarboxylatether-Basis) im 1. Zyklus vollständig erreicht werden (Abbildung 63 a). Die Setzfließmaße der Bindemittelleime mit einem FM 2-Gehalt von 0,4 und 0,5 M.-% betrugen hierbei nahezu unabhängig von der Dosiermenge im untersuchten Bereich durchschnittlich rd. 270 mm und lagen damit um das rd. 2,5-fache höher als das der entsprechenden Bindemittelleime mit FM 1 (Naphthalinsulfonat-Basis). Die höheren Setzfließmaße der Bindemittelleime mit FM2 sind auf die deutlich höhere Wirksamkeit des Hochleistungsfließmittels auf PCE-Basis infolge der elektrosterischen Dispergierung zurückzuführen [12]. Fließmittelgehalte höher als 0,5 M.-% v. Z. des Fließmittels FM 2 führten zur Segregation der Feststoffe von der flüssigen Phase.

Mit Ausnahme des Bindemittelleims FM 2 (0,4%) hat sich im 2. Zyklus keine deutliche Verringerung der Setzfließmaße aller Bindemittelleime gezeigt (Abbildung 63 b).

Die Ergebnisse zur Formstabilität der untersuchten Bindemittelleime zeigen, dass trotz des deutlichen Einflusses der Fließmittelart im Setzfließversuch im 1. Zyklus nahezu unabhängig von der Fließmittelart annähernd gleiche und hohe Formstabilitäten der Bindemittelleime mit Formkoeffizienten im Bereich von $K_{L1} = 0,90$ bis $0,96$ ermittelt wurden (Abbildung 63 a). Im 2. Zyklus reduzierten sich die Formstabilitätskoeffizienten der Bindemittelleime mit FM 1 nur geringfügig auf $0,85$. Dagegen fielen die entsprechenden Formstabilitätskoeffizienten der Bindemittelleime mit FM 2 im Vergleich zum 1. Zyklus um 30 bis 73 % ab, wobei mit höheren Fließmittelgehalten geringere Formstabilitätskoeffizienten ermittelt wurden.

Im Vergleich zu dem 1. Zyklus gibt es im 2. Zyklus zwei mögliche Ursachen für die deutliche Reduzierung der Formstabilitätskoeffizienten der Bindemittelleime mit FM 2. Einerseits ist nach Banfill [7] und Wüstholtz [154] das rheologische Verhalten eines zementösen Systems von seiner Schergeschichte abhängig. Die resultierende innere Struktur eines Bindemittelleims nach dem 2. Mischzyklus ist infolge einer größeren Deagglomeration und Strukturbruch der Agglomerate der Partikeln schwächer gegenüber der entsprechenden Struktur eines Leims nach dem 1. Zyklus. Andererseits verhindert die elektrosterische Dispergierung aufgrund der Struktur der PCE-Moleküle des Fließmittels FM 2 die räumliche Annäherung der Bindemittelpartikel, wenn die Scherbeanspruchung beendet wurde [12]. Diese Art von Dispergierung verhindert, dass die Partikel in die Energie-Barriere E_b übergehen und verflocken, was den vollständigen Wiederaufbau der ursprünglichen Struktur nach einem 2. Zyklus verhindert und wiederum zu einer schwächeren Struktur bzw. niedrigerem Formstabilitätskoeffizienten führt (Abschnitt 2.4.2.2).

5.1.4 Zementart

Zur Bestimmung des Einflusses der Zementart auf die thixotropen Eigenschaften wurden im folgenden Bindemittelleime mit den beiden, bereits aufgeführten Zementarten CEM I 42,5 R bzw. CEM III/A 42,5 N unter Zugabe jeweils eines Betonzusatzstoffes (Kalksteinmehl K, Quarzmehl Q oder Metakaolin M) und Fließmittels auf PCE-Basis (FM 2) hergestellt. Die Zugabemengen der Betonzusatzstoffe variierten zwischen 1,0 und 5,0 M.-% wobei die Fließmitteldosierung auf 0,3 M.-% bezogen auf den Zementgehalt konstant blieb. Die Menge an zugegebenen Wasser betrug 1,19.WA. Die Ergebnisse für den 1. und 2. Zyklus sind den folgenden Abbildungen zu entnehmen.

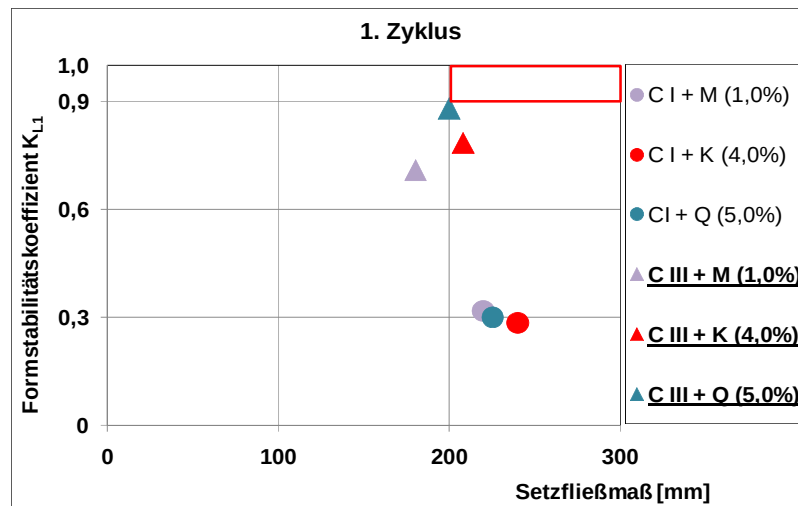
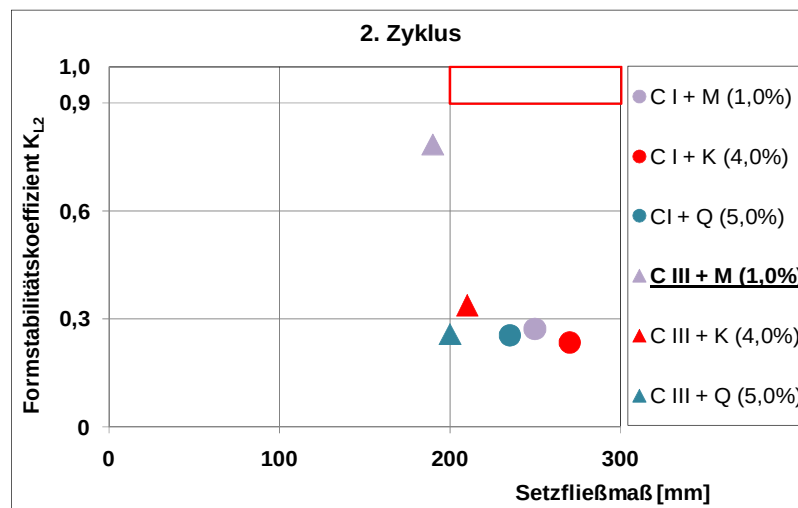


Abbildung 64: Zusammenhang zwischen dem Setzfließmaß und dem Formstabilitätskoeffizient der Bindemittelleime mit CEM I 42,5 R bzw. CEM III/A 42,5 N und jeweils unterschiedlichen Zusatzstoffen; a) im 1. Zyklus



b) im 2. Zyklus

Während das angestrebte Setzfließmaß (≥ 200 mm) erreicht werden konnte, wurde die gewünschte Mindest-Formstabilität ($K_L \geq 0,90$) bei keinem dieser Bindemittelleime erreicht.

Die photometrische Bestimmung von Aluminiumoxid und Eisenoxid in den Zementen ergab, dass der Zement CEM III/A 42,5 N aufgrund eines höheren Gehalts von Aluminiumoxid ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 8,08\%$) einen 2,5-fach höheren Anteil von Tricalciumaluminat (C_3A) aufweist als Zement CEM I 42,5 R (Anhang A, Tabelle A-8).

Nach Plank [106], Jacobs [67] und Uchikawa [137] führt ein höherer Anteil von C_3A zu einer höheren Fließmitteladsorption infolge eines größeren Einbaus der anionischen Polyelektrolyte des Fließmittels durch Ladungsausgleich mit den positiven Calciumaluminathydratschichten. Dies sollte zu einer höheren Fließfähigkeit der Bindemittelleime mit CEM III/A 42,5 N führen. Im Widerspruch dazu wiesen die Leime mit CEM III/A 42,5 N sowohl im 1. als auch im 2. Zyklus um bis zu rd. 30 % niedrigere Setzfließmaße auf als die entsprechenden Bindemittelleime mit CEM I 42,5 R. Dieser

Widerspruch kann auf die vorhandenen thixotropierenden Zusätze (Schichtsilikate) in den Leimen zurückgeführt werden. Die zugegebenen Schichtsilikate SK1 (auf Basis von Kaolinit, Illit und Quartz) lösen infolge elektrostatischer Wechselwirkungen aufgrund ihrer oberflächigen Ladungen die Bildung von Aggregaten (Kartenhausstruktur) aus [39][78]. Nach Griesser [51] modifiziert die Bildung von Aggregaten die rheologischen Eigenschaften der Bindemittelleime und erhöht die Fließgrenze, deren Konsequenz die Verringerung des Setzfließmaßes des Leims ist. Die Bildung von Aggregaten bzw. der Aufbau der inneren Struktur in Leimen spiegelte sich an der bis zu rd. 3-fach höheren Formstabilität wieder. Dieses ging mit der ausgeprägten Verringerung der Setzfließmaße der Leime mit CEM III/A 42,5 N einher.

Bezüglich der zugehörigen Formstabilitätskoeffizienten K_L unterschieden sich die untersuchten Bindemittelleime im 1. Zyklus hinsichtlich der verwendeten Zementart noch sehr deutlich. Während für die Bindemittelleime mit CEM III/A 42,5 N Werte zwischen 0,71 und 0,88 ermittelt wurden, lagen die Koeffizienten K_{L1} bei den CEM I-Leimen bei nur 0,29 bis 0,32. Im 2. Zyklus betrugen die Formstabilitätskoeffizienten K_{L2} der Bindemittelleime mit CEM III/A 42,5 N und Kalksteinmehl sowie mit Quarzmehl nur noch 0,26 bis 0,34, was einem Rückgang von etwa 70 % gegenüber dem 1. Zyklus entspricht. Nur der Bindemittelleim mit Metakaolin (CIII + M (1,0%)) wies im Vergleich zum 1. Zyklus eine Verbesserung des Formstabilitätskoeffizient um etwa 11% auf. Im Gegensatz dazu zeigten die Leime mit CEM I 42,5 R im 2. Zyklus ein quasi konstantes Verhalten mit Formstabilitätskoeffizienten K_{L2} von 0,23 bis 0,27.

5.1.5 Betonzusatzstoffe

Aus den in Abschnitten 5.1.2, 5.1.3 und 5.1.4 gewonnen Ergebnissen wurden in der folgenden Untersuchungsreihe der Einfluss verschiedener Betonzusatzstoffe (Metakaolin, Quarzmehl und Kalksteinmehl) auf die Fließ- und thixotropen Eigenschaften von Bindemittelleimen untersucht. Die Dosiermengen der Betonzusatzstoffe variierten zwischen 1,0 und 5,0 M.-% bezogen auf den Zementgehalt. Als Zement wurde ein Hochofenzement CEM III/A 42,5 N und ein thixotroper Zusatz SK1 (0,25 M.-% v. Z.) eingesetzt. Als Fließmittel wurde ein Produkt auf Basis von Polycarboxylatether (FM 2) mit einem Gehalt von 0,3 M.-% bezogen auf den Zementgehalt eingesetzt. Die Menge an zugegebenen Wasser betrug 1,19.WA (WA = Wasseranspruch des Zementes CEM III/A 42,5 N).

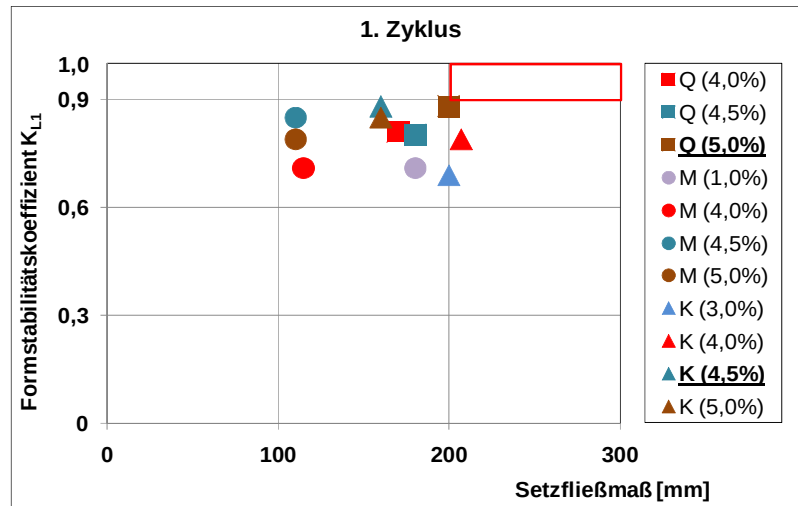
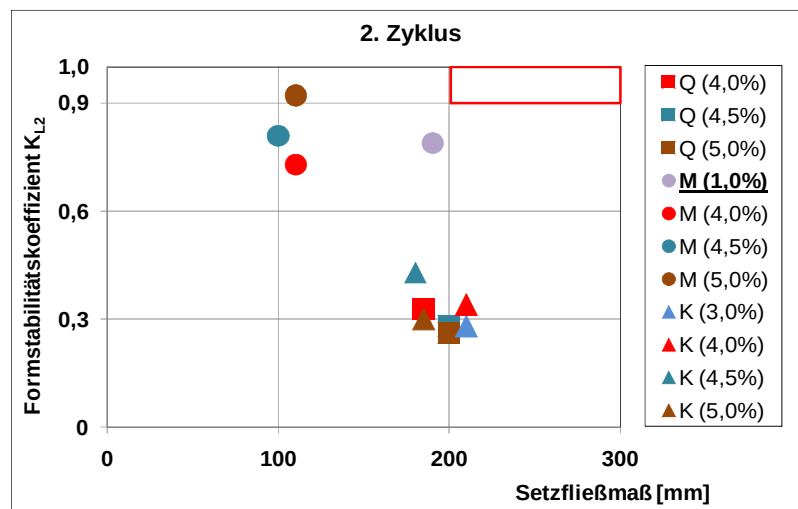


Abbildung 65: Zusammenhang zwischen dem Setzfließmaß und dem Formstabilitätskoeffizient von Bindemittelleimen mit CEM III/A 42,5 N und verschiedenen Zusatzstoffen; a) im 1. Zyklus



b) im 2. Zyklus

Die Zielgrößen hinsichtlich der Fließfähigkeit (Setzfließmaß ≥ 200 mm) und der Formstabilität ($K_L \geq 0,90$) wurden bei keinem dieser Bindemittelleime vollständig erreicht. Mit steigenden Zugabemengen von Kalksteinmehl (K; von 3,0 auf 5,0 M.-% v. Z.) und Metakaolin (M; von 1,0 auf 5,0 M.-% v. Z.) konnte eine Verringerung von rd. 20 bzw. 40% der Setzfließmaße im 1. Zyklus beobachtet werden (Abbildung 65 a). Lediglich Bindemittelleime mit Quarzmehl zeigten bei einer Erhöhung der Zugabemenge von 4,0 auf 5,0 M.-% v. Z. einen Anstieg des Setzfließmaßes von 170 auf 200 mm. Im 2. Zyklus zeigten Bindemittelleime mit Kalksteinmehl bei Gehalten von 4,5 und 5,0 M.-% v. Z. rd. 13 % höhere Setzfließmaße gegenüber dem 1. Zyklus.

Die höchsten Formstabilitätskoeffizienten ($K_{L,1} = 0,88$) wurden im 1. Zyklus für Bindemittelleime mit Kalksteinmehl bzw. Quarzmehl bei Zusatzstoffgehalten von 4,5 bzw. 5,0 M.-% v. Z. ermittelt. Im 2. Zyklus waren die ermittelten Formstabilitätskoeffizienten für Bindemittelleime mit Quarzmehl und Kalksteinmehl um 50 bis 70 % geringer als im 1. Zyklus

(Abbildung 65 b). Dies ist auf den Strukturbruch während des 2. Mischzyklus des Bindemittelleims, welcher die Morphologie der Partikelformationen (Agglomerate) verändert, zurückzuführen [154] (Abschnitt 2.4.2.1).

Dagegen wiesen Bindemittelleime mit Metakaolin auch im 2. Zyklus mit Werten zwischen $K_{L2} = 0,73$ bis $0,92$ noch relativ hohe Formstabilitäten auf. Im Unterschied zu Quarz- und Kalksteinmehl ist Metakaolin ein schichtförmiges Tonmineral, dessen äußere Oberflächen negative Ladungen haben und durch anziehende Van-der-Waals-Kräfte zwischen den Teilchen eine Art Kartenhausstruktur bilden. Dies bewirkt eine hohe Viskosität und das Auftreten von Fließgrenzen sowie thixotropen Eigenschaften in Tonmineraldispersionen [39][78]. Insbesondere zeigte der Bindemittelleim M (1,0%) im 2. Zyklus entgegen der sonstigen Tendenz zwischen 1. und 2. Zyklus zusammen mit einer Erhöhung des Setzfließmaßes (von 180 auf 190 mm) z.T. eine Erhöhung der Formstabilität (von $K_{L2} = 0,71$ auf $0,79$),

5.1.6 Thixotropierende Zusätze

In der folgenden Untersuchungsreihe wurde der Einfluss thixotropierender Zusätze auf die thixotropen Eigenschaften von Bindemittelleimen untersucht. Dazu wurden 5 Zusätze (SK1 - ST) unterschiedlicher Basis in Zugabemengen von 0,25 bis 1,0 M.-% eingesetzt. Als Zement wurde ein Hochofenzement CEM III/A 42,5 N eingesetzt. Die Menge an zugegebenen Wasser betrug 1,19.WA (WA = Wasseranspruch des Zementes CEM III/A 42,5 N). Der Fließmittelgehalt blieb mit 0,3 M.-% unverändert. Die Ergebnisse der Setzfließmaße in Zusammenhang mit den ermittelten Formstabilitätskoeffizienten sind in Abbildung 66 dargestellt.

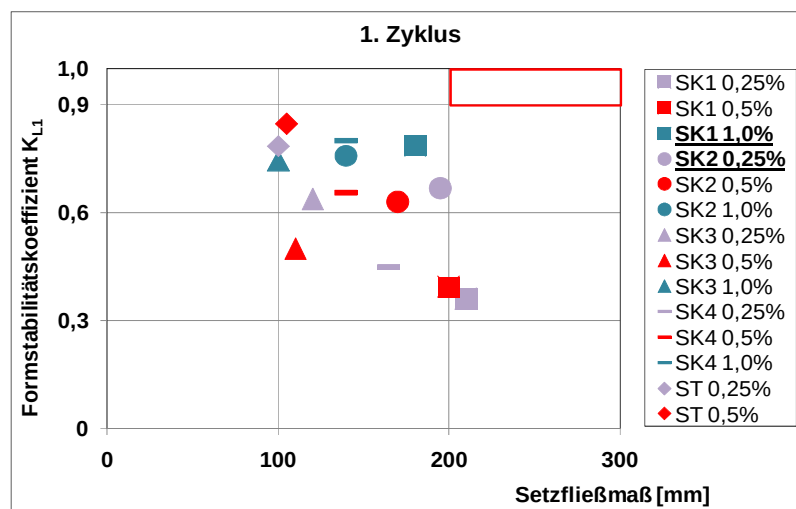
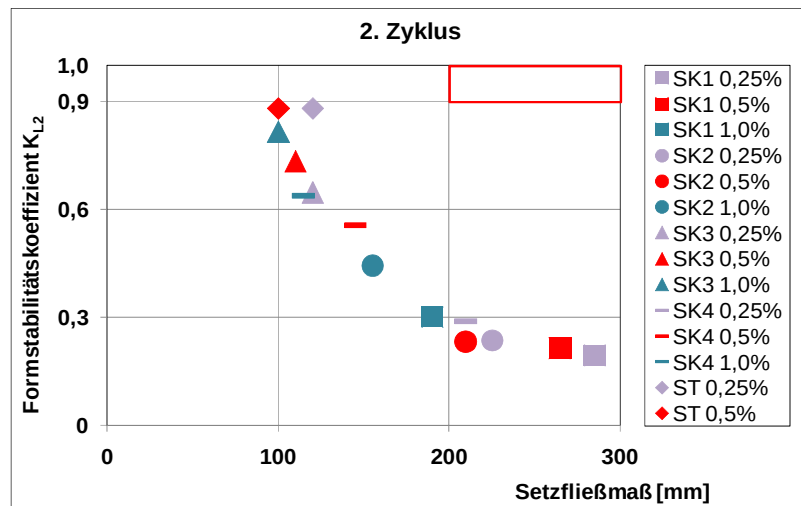


Abbildung 66: Zusammenhang zwischen dem Setzfließmaß und dem Formstabilitätskoeffizient in der Bindemittelleime mit thixotropierenden Zusätzen; a) im 1. Zyklus



b) im 2. Zyklus

Die ermittelten Setzfließmaße und Formstabilitätskoeffizienten aller Mischungen lagen außerhalb des angestrebten Zielbereichs bzgl. Setzfließmaß ≥ 200 mm und Formstabilität $K_L \geq 0,90$. Grundsätzlich verringerte sich das Setzfließmaß der Bindemittelleime mit steigender Zugabemenge der thixotropierenden Zusätze, was auf eine Erhöhung des Feststoffgehalts und einer Agglomeration von Partikeln als Resultat interpartikulärer Wechselwirkungen im Bindemittelleim zurückzuführen war [35]. Es zeigte sich, dass die Bindemittelleime mit SK1 (Gemisch aus Kaolinit, Illit und Quartz) die höchsten Setzfließmaße im 1. und 2. Zyklus (210 und 280 mm) aufwiesen.

Bezüglich der Formstabilität im 1. Zyklus wiesen die Bindemittelleime mit Setzfließmaßen größer als 180 mm auch nur vergleichsweise geringe Formstabilitätskoeffizienten K_{L1} auf (Abbildung 66 a). Dies wurde vor allem für sehr fließfähige Bindemittelleime (SK1 0,25 und SK1 0,5) deutlich. Hier lagen die Formstabilitätskoeffizienten nur bei $K_{L1} = 0,36$ bzw. $0,39$, was im Gesamtvergleich auf die geringste Formstabilität hindeutet. Eine Ausnahme stellte der Bindemittelleim, der mit SK1 in einem Anteil von 1,0 M.-% v. Z. (Setzfließmaß = 180 mm) hergestellt wurde, dar, bei welchem der Formstabilitätskoeffizient bei $K_{L1} = 0,79$ lag. Die Mischungen ST (Stärke) wiesen dagegen aufgrund der geringeren Setzfließmaße erwartungsgemäß hohe Formstabilitätskoeffizienten ($K_{L1} = 0,79$ bzw. $K_{L2} = 0,88$) auf.

Im 2. Zyklus ließ sich ein allgemeiner Trend identifizieren: Erwartungsgemäß, und im Gegensatz zum 1. Zyklus, verringerte sich die Formstabilität der entsprechenden Bindemittelleime exponentiell mit steigenden Setzfließmaßen (Abbildung 66 b). Ausführlicher beschrieben, wiesen einerseits Bindemittelleime, die Setzfließmaße geringer als 140 mm im 1. Zyklus zeigten, Erhöhungen ihres Formstabilitätskoeffizienten K_{L2} von bis zu 45% im 2. Zyklus auf. So z. B. wurden bei Bindemittelleimen mit SK3 (auf alkalisch aktivierter Bentonit-Basis) und ST (auf Kartoffelstärke-Basis) im 2. Zyklus stets höhere Formstabilitätskoeffizienten als im 1. Zyklus ermittelt. Andererseits wiesen die Bindemittelleime, deren Setzfließmaße im 1. Zyklus gleich oder größer als 140 mm waren,

im 2. Zyklus eine Verringerung ihrer zugehörigen Formstabilitätskoeffizienten K_{L2} von maximal 64 % auf. Dieses Verhalten zeigte sich in dieser Untersuchungsreihe i. Allg. für die Bindemittelleime mit SK1, SK2 und SK4.

5.1.7 Thixotropiermittel

In einer weiteren Untersuchungsreihe wurde die Wirkungsweise von drei im Handel als Thixotropiermittel deklarierten Produkten auf einen Referenz-Bindemittelleim untersucht. Der Referenz-Bindemittelleim (REF T 0%) enthielt kein Thixotropiermittel. Die Zugabemengen der Thixotropiermittel betrugen 0,125; 0,25 und 0,5 M.-% und die des Fließmittels 0,3 M.-%, jeweils bezogen auf den Zementgehalt. Als Zement wurde ein Hochofenzement CEM III/A 42,5 N eingesetzt. Die Menge zugegebenen Wassers betrug 1,19.WA (WA = Wasseranspruch des Zementes CEM III/A 42,5 N). Die Ergebnisse der Setzfließversuche und der Formstabilität sind in Abbildung 67 dargestellt.

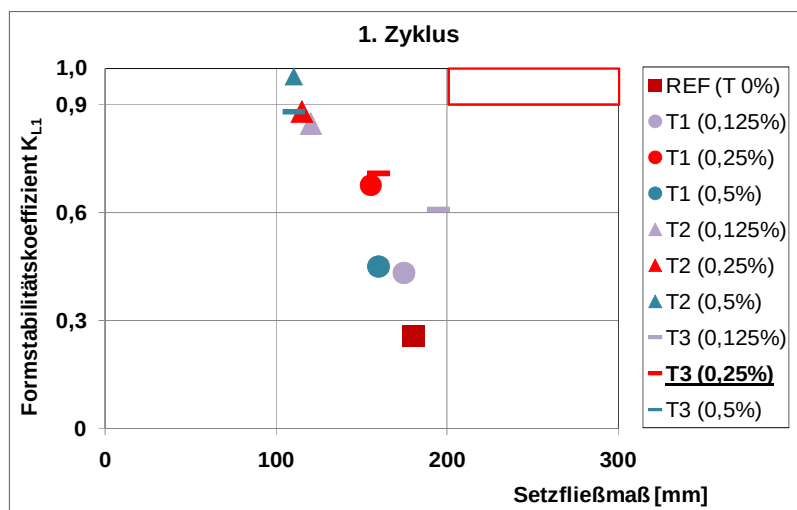
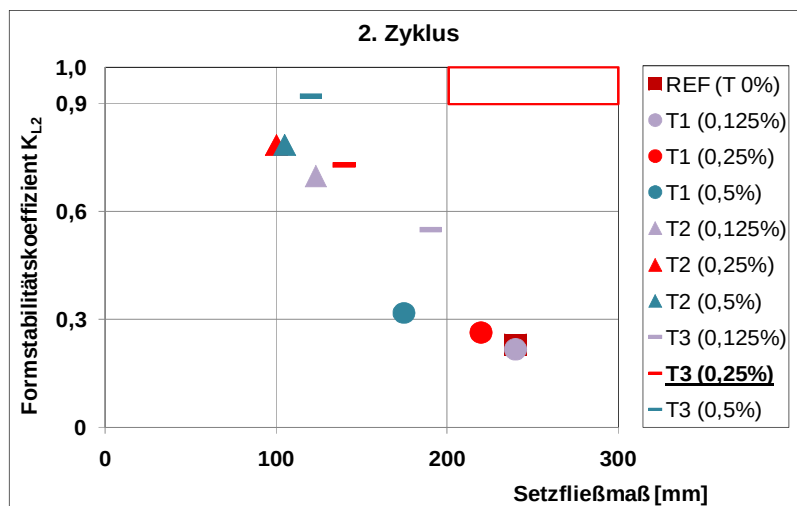


Abbildung 67: Zusammenhang zwischen dem Setzfließmaß und dem Formstabilitätskoeffizient in der Bindemittelleime mit drei verschiedenen Thixotropiermittel; a) im 1. Zyklus



b) im 2. Zyklus

Während im 2. Zyklus zumindest alle Bindemittelleime Setzfließmaße größer als 200 mm aufwiesen, konnten keiner der Bindemittelleime die angestrebten Zielgrößen (Setzfließmaß ≥ 200 mm und Formstabilität $K_L \geq 0,90$) im 1. Zyklus vollständig erreichen.

Generell führte die Zugabe der Thixotropiermittel im Vergleich zum Leim REF (T 0%), mit einem Thixotropiermittel-Gehalt = 0 M.-%, unabhängig von deren Basis sowohl im 1. als auch im 2. Zyklus zu einer Abnahme des ursprünglichen Setzfließmaßes. Die Verminderung des Setzfließmaßes war bei den Bindemittelleimen mit Thixotropiermittel T2 (auf Basis modifizierter organischer Polymere) besonders ausgeprägt. Im Vergleich zu REF (T 0%) fiel das Setzfließmaß von Leimen mit T2 mit zunehmendem Thixotropiermittel-Gehalt um ca. 40%, von 180 auf 110 mm ab, weiterhin verfügten sie ab einer Zugabemenge von 0,25 M.-% v. Z. des Thixotropiermittels T2 kaum noch über ein Setzfließmaß (110 mm). Im Gegensatz zu Mischungen mit Thixotropiermittel T2 bewirkte in beiden Zyklen die Zugabe von Thixotropiermittel T1 zum Leim REF (T 0%) keine signifikante Reduktion (-14 %) des Setzfließmaßes.

Bei den Untersuchungen mit dem dritten Thixotropiermittel auf Basis von Tetrasacchariden (T3) musste die Zugabewassermenge von 1,19 auf 1,6 WA angehoben werden. Die Setzfließmaße der Bindemittelleime mit Thixotropiermittel T3 unterschieden sich im 1. und 2. Zyklus nur unwesentlich voneinander. Bei einer Dosiermenge von 0,125 M.-% v. Z. wies der Bindemittelleim T3 (0,25%) ein Setzfließmaß auf, das im 1. Zyklus (160 mm) um bis 39% höher ist als die entsprechenden Setzfließmaße der Bindemittelleime, die mit den Thixotropiermitteln T1 und T2 hergestellt wurden. Im 2. Zyklus lag das Setzfließmaß (140 mm) zwischen den Werten der zwei anderen Thixotropiermittel (T1 = 220 mm und T2 = 100 mm).

Zugleich erhöhte sich die Formstabilität des Bindemittelleims mit Thixotropiermittel T3 gegenüber der Mischung mit Thixotropiermittel T1 in beiden Zyklen (im 1. Zyklus um ca. 4,5% und im 2. Zyklus um 180%). Eine Erhöhung der Zugabemengen von T3 führte zu steiferen Leimen mit erwartungsgemäß höheren Formstabilitäten. So bewirkte die Steigerung der Dosierung von 0,125 M.-% auf 0,5 M.-% v. Z. einen Anstieg der Formstabilitätskoeffizienten um rd. 44 %. Signifikante Unterschiede zwischen beiden Zyklen konnten nicht beobachtet werden. Bindemittelleime mit Thixotropiermittel T2 wiesen in beiden Zyklen mit $K_{L1} = 0,85$ bis $0,98$ bzw. $K_{L2} = 0,70$ bis $0,79$ vergleichsweise höhere Formstabilitätskoeffizienten zusammen mit geringeren Setzfließmaßen auf als die Bindemittelleime, die mit Thixotropiermittel T1 hergestellt wurden. Wie bereits in Abschnitt 5.1.6 erwähnt wurde, kann ein Zusammenhang zwischen dem Setzfließmaß und der Formstabilität der untersuchten Bindemittelleime festgestellt werden. Erwartungsgemäß zeigten die Leimmischungen mit geringerem Setzfließmaß (< 160 mm) eine höhere Formstabilität ($K_L \geq 0,70$).

5.1.8 Gesamtbetrachtung und Diskussion

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Formstabilitätskoeffizienten und Setzfließmaße von Bindemittelleimen aufgeführt, die unter Zugabe einzelner Zusätze hergestellt wurden.

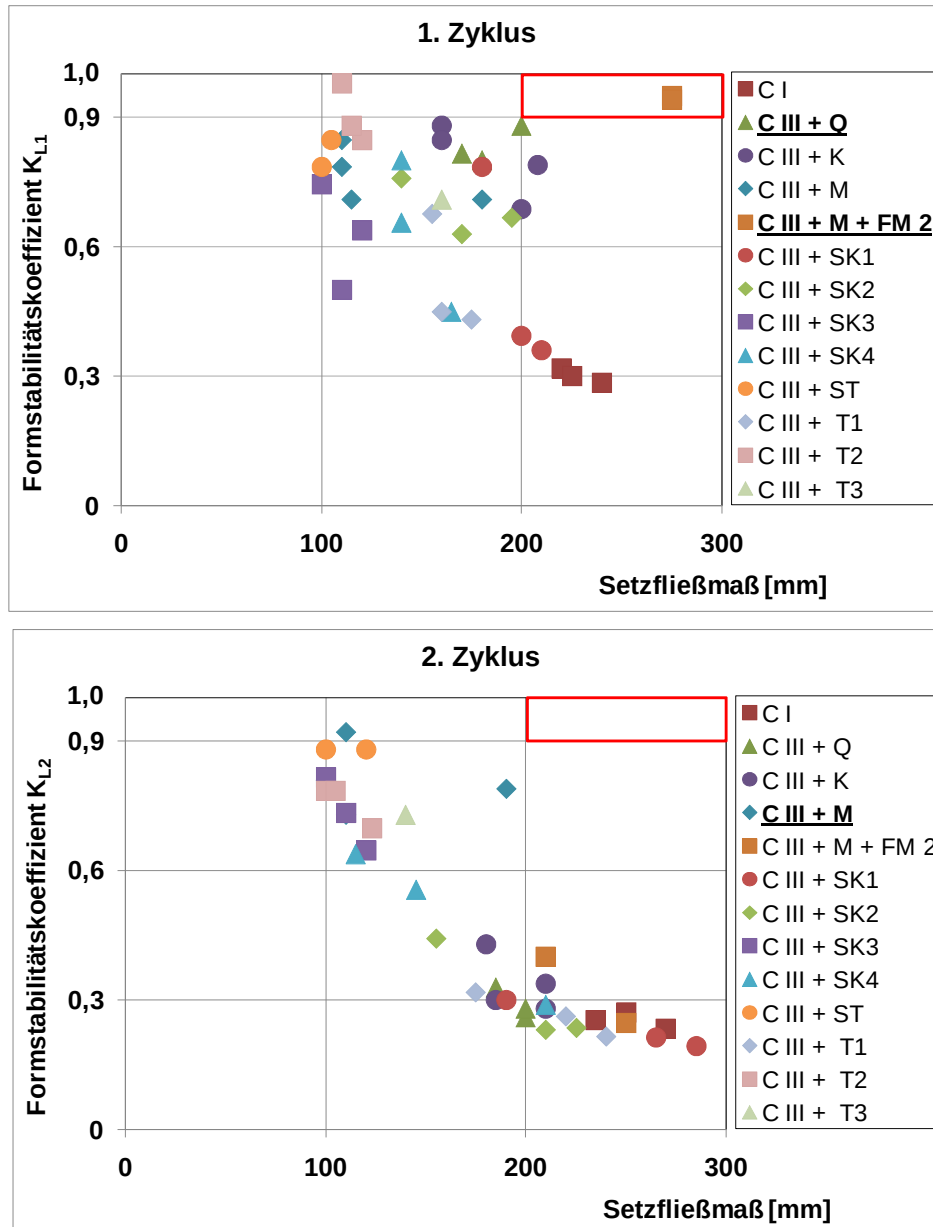


Abbildung 68: Zusammenfassung der ermittelten Ergebnissen nach Untersuchung der Auswirkungen einzelnen Zusätze

Aus den Untersuchungen an den Bindemittelleimen bezüglich des Einflusses der Ausgangsstoffe und Zusätze auf die thixotropen Eigenschaften für die Entwicklung von SVB mit hoher Grünstandfestigkeit für den Einsatz in Gleitschalungsfertigern im Straßenbau lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Der Zielgrößenbereich, der durch ein Setzfließmaß ≥ 200 mm und einen Formstabilitätskoeffizienten $K_L \geq 0,9$ definiert ist, konnte nur von Bindemittelleimen mit

Zement CEM III/A 42,5 N, Metakaolin und Fließmittel FM 2 (Polycarboxylatether-Basis), und auch nur im 1. Zyklus vollständig erreicht werden (Abschnitt 5.1.3).

- Die Darstellung der Setzfließmaße und Formstabilitätskoeffizienten, die im 1. Zyklus ermittelt wurden, zeigen eine ausgebreitete Verteilung der Ergebnisse. Im 1. Zyklus lässt sich keine Tendenz identifizieren. Im Gegensatz dazu weist die Darstellung der im 2. Zyklus bestimmten Setzfließmaße und Formstabilitätskoeffizienten einen sehr definierten Trend auf: Zum einem nehmen die Formstabilitätskoeffizienten exponentiell mit einer Verringerung der Setzfließmaße zu. Zum anderen weisen die Bindemittelleime, die in 1. Zyklus Setzfließmaße größer als 140 mm zeigten, eine starke Verflüssigung und daher niedrigere Formstabilitätskoeffizienten in 2. Zyklus auf (Abbildung 67). Der Unterschied zwischen beiden Zyklen ist auf den Strukturbruch und die Schergeschichte des Bindemittelleims zurückzuführen, welche die Morphologie der Partikelformationen (Agglomerate) im Bindemittelleim, und von daher ihr rheologisches Verhalten, bestimmen [154].
- Bindemittelleime, die unter Zugabe von Metakaolin sowie von Schichtsilikaten SK1 (Mineralgemisch aus Kaolinit, Illit und Quarz) hergestellt wurden, wiesen ausgeprägte thixotrope Eigenschaften bzw. hohe Formstabilitätskoeffizienten K_L in beiden Zyklen auf. Die zugrundeliegende Ursache hierfür ist, dass die Kaolinit-Teilchen eine Kartenhausstruktur bilden können [39][78]. Die Kartenhausstruktur bildet sich aufgrund der oberflächigen Ladungen der Teilchen über Kante/Fläche-Koagulation und führt zum Auftreten der Fließgrenze. Beim Auftreten der Fließgrenze wird das Verhalten des Leims als plastisch bezeichnet. Um das plastische System (Leim) wieder zum Fließen zu bringen, ist eine Kraft erforderlich, die die gebildete Kartenhausstruktur zerstört bzw. die Fließgrenze übertrifft [144]. Diese Kraft wurde durch die Scherbeanspruchung im 2. Mischzyklus repräsentiert. Nach dem 2. Mischzyklus wiesen die Bindemittelleime mit Metakaolin und SK1 Setzfließmaße von 180 bis 275 mm auf, was die Zerstörung der im 1. Zyklus gebildeten Struktur bestätigt. In gleicher Weise zeigten die im 2. Zyklus bestimmten Formstabilitätskoeffizienten K_{L2} mit einem Wert von 0,71, dass die innere Struktur dieser Bindemittelleime wieder in einer 2. Ruhephase aufgebaut wurde. Daher kann festgestellt werden, dass sich die Zugabe von Metakaolin und Schichtsilikaten SK1 positiv auf die Entwicklung der thixotropen Eigenschaften der Bindemittelleime auswirkt.
- Obwohl sich die Zugabe von Metakaolin und Schichtsilikate auf Kaolinit- und Montmorillonit-Basis positiv auf die Entwicklung der thixotropen Struktur der Bindemittelleime auswirkt, wiesen diese Leime gegenüber den Bindemittelleimen mit Quarzmehl bzw. Kalksteinmehl z.T. um bis zu 70% geringere Setzfließmaße auf (z. B. Bindemittelleime CEM III + M, Abbildung 68).

Im Gegensatz zu Gesteinsmehlen (Quarzmehl und Kalksteinmehl) sind Metakaolin und Schichtsilikate reaktionsfähige Zusatzstoffe [35]. Spezifisch sind die Metakaoline und Schichtsilikate SK1 hoch aktive natürliche Puzzolane (Tonminerale) auf Basis von Alumosilikat (Al_2O_3 in 40 M.-%) und Siliziumdioxid (SiO_2 in 50 M.-%), die aus gemahlenen, wärmeaufbereiteten geschlämmten Kaolin entstehen. Mineralogisch ist das Montmorillonit ein feinkristallines Aluminiumhydrosilikat mit einer plättchenförmigen Schichtstruktur (Dreischichtsilikat). Der Montmorillonitkristall ist aus vielen Schichtpaketen zusammengesetzt, in die Wassermoleküle eingelagert werden können. Bei dieser innerkristallinen Quellung wird innerhalb der Schichtpakete eine negative Überschussladung aufgebaut, die durch Anlagerung austauschfähiger Kationen (Ca^{++} , Mg^{++} oder Na^+) kompensiert wird. Dieses Phänomen der innerkristallinen Quellung ist in hohem Maße eigenschaftsbestimmend für das Tonmineral Montmorillonit.

Wenn sich ein Ton- (Kaolinit bzw. Montmorillonit)-Wasser-Gemisch im Ruhezustand befindet, bewirken die elektrostatischen Aufladungen der Oberflächen von Tonkomponenten ein Erstarren der Suspension in Form eines Gels. Dieser Zustand wird als thixotroper Zustand bezeichnet [59]. Von daher wird das Fließverhalten der Dispersion durch die Bildung diesen Aggregaten bestimmt. Die Aggregationsmöglichkeiten, die die rheologische Eigenschaften der Bindemittelleime bestimmen, sind Bänder- (Montmorilloniten) und Kartenhausstrukturen (Kaolinit). Diese erhöhen die Fließgrenze sowie die Viskosität der Suspensionen. Nach Griesser [51] kann die Verringerung der Setzfließmaße der Bindemittelleime mit Metakaolin und Schichtsilikate auf die indirekte Proportionalität zwischen Fließgrenze und Fließfähigkeit zurückgeführt werden: Mit steigenden Fließwiderständen (Fließgrenzen) sinken die Setzfließmaße der Bindemittelleime.

- Verglichen mit den Bindemittelleimen mit Zugabe von Metakaolin und Schichtsilikaten SK1 führte die Zugabe von schichtförmigen Zusätzen SK2 bis SK4 auf Montmorillonit-Basis zu einem Abfall des Setzfließmaßes von bis zu rd. 70 % bei kleinen Formstabilitätskoeffizienten bzw. schwachen thixotropen Eigenschaften. Dies kann auf die Koagulationsweise der Montmorillonit-Teilchen zurückgeführt werden.

Die hier verwendeten Schichtsilikate SK2 bis SK4 basieren auf Ca-Bentonit. Diese wurden nach Herstellerangabe durch eine technische Behandlung mit Soda in einen Na-Bentonit überführt. Durch dieses Verfahren wurden die Calcium-Ionen durch Natrium-Ionen substituiert und die Dispersion wurde hinreichend alkalisch. Dies verursachte die Dispergierung der Montmorillonit-Teilchen. Im Gegensatz zu Kaolinit ist die Dispergierung mit einer für Montmorillonite typischen Reaktion verbunden: Die Montmorillonitkriställchen zerfallen in die einzelnen Silicatschichten oder in dünne Lamellen aus zwei oder drei

Schichten. Die hier verwendeten Schichtsilikate (SK2 bis SK4) wurden im leicht alkalischen Bereich hergestellt (pH 8,0 bis 10,0), so koagulieren sie über Kante/Fläche-Kontakte bzw. Kartenhausstruktur sowie über Fläche/Fläche-Kontakte bzw. Bänderstruktur [78].

Die Ladungen der Flächen sowie die Kantenladungen der Kaolinit- und Montmorillonit-Teilchen sind Teilchengrößen und –form abhängig. Die Ladungen der Teilchen bestimmen die Koagulationsweise und –stärke der Flocken. Der Durchmesser der Kaolinit-Flocken beträgt im Durchschnitt 54 μm . Die hier verwendeten Schichtsilikate weisen infolge von Dispergierung Lamellen auf, deren Äquivalentdurchmesser zu 70% kleiner als 63 μm ist. Diese Lamellen können eine minimale Breite von 0,1 μm und eine minimale Dicke von 1 nm haben. Aufgrund der dünneren Dicke sowie der kleineren Größe der dispergierten Montmorillonit-Teilchen (einzelne Schichtsilikatschichten) ist die Fläche gegen Fläche–Koagulation (Bänderstruktur) der Montmorillonite gegenüber der Fläche/Fläche-Koagulation (Bänderstruktur) der Kaolinitdispersionen schwächer. Von daher ist die resultierende thixotrope Struktur eines Bindemittelleimes mit Kaolinit-Teilchen infolge der erheblichen Kante/Fläche- und Fläche/Fläche-Koagulation bzw. Bänder- und Kartenhausstruktur stärker.

- Thixotropiermittel T3 (Welan Gum-Basis: Tetrasaccharideinheiten) und Zusatz ST (Stärke-Basis) erwiesen sich als die wirksamsten thixotropierenden Zusatzmittel aller untersuchten Ausgangsstoffe.

Bindemittelleime, die unter Zugabe dieser Zusatzmittel hergestellt wurden, wiesen im Vergleich zu den entsprechenden Nullmischungen (Zement, Wasser und PCE-Fließmittel) geringere Fließfähigkeiten und eine signifikante Erhöhung der Formstabilitätskoeffizienten in beiden Zyklen bzw. ausgeprägte thixotrope Eigenschaften auf.

Stärke und Welan Gum sind Polysaccharide bzw. Biopolymere, die aus einer großen Anzahl Monosacchariden über eine glycosidische Bindung miteinander verknüpft sind.

Die hier verwendete Stärke bestehen aus 80% Amylopektin und 20% Amylose. Der Hauptbestandteil der Stärke (Amylopektin) besitzt stark verzweigte Haupt- und Seitenketten, die aus α -Glukoseresten aufgebaut sind. Die Hauptkette ist durch eine 1,4 Bindung verknüpft. An diese ist die Seitenkette durch eine 1,6-Bindung gebunden. Diese setzen sich aus 1000 bis 6000 Glukoseeinheiten zusammen, wodurch eine baumartige Verzweigung entsteht [84]. Aufgrund dieses Unterschiedes in der Struktur bildet Amylopektin auf molekularer Ebene Knäuel-, bzw. verzweigte Strukturen aus. Amylose formt hingegen lineare Ketten. Nach Tepstra [134] entstehen zwischen Amylopektin (Stärke-Moleküle) und Zement-Teilchen bzw. Quarzmehl-Teilchen Wechselwirkungen. Diese führen zum Einbau einer Mikrostruktur bzw. thixotropen Struktur in der Dispersion,

wenn die Zement- und Quarzmehl-Teilchen durch die Polymere (Amylopektin) verbrückt sind.

Welan Gum sind mikrobielle, anionische erzeugte Polysaccharide, die maßgebend Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften von zementösen Suspensionen haben [104]. Das Welan Gum-Molekül besteht aus sich wiederholenden Tetrasaccharideinheiten. Jede Einheit besitzt eine Seitenkette (entweder L-Mannose oder L-Rhamnose). Die Flockung, und von daher die Bildung der thixotropen Struktur, erfolgt hauptsächlich durch Ladungsneutralisation zwischen den entgegengesetzten Ladungen der Polymere und der Zement-Teilchen [78].

5.2 Auswirkungen von Kombinationen zweckmäßiger Zusätze

5.2.1 Gruppe T2 und Gruppe T3

Mit den in Abschnitt 5.1 gewonnenen Erkenntnissen wurde die Auswirkung von Kombinationen zweckmäßiger Zusätze auf die rheologischen und thixotropen Eigenschaften von Bindemittelleimen für thixotrop eingestellte Betone an insgesamt 30 Leimmischungen, die sich im Wesentlichen nach Art des verwendeten Thixotropiermittels in zwei Gruppen einteilen lassen, untersucht (Tabelle 8 und Tabelle 9) .

Dabei wurde in beiden untersuchten Gruppen durchweg ein Hochofenzement CEM III/A 42,5 N eingesetzt (Abschnitt 5.1.4). Je Gruppe wurden vier verschiedene Schichtsilikate (SK) auf Kaolinit- und Montmorillonit-Basis sowie ein Stabilisierer (ST) auf modifizierter Stärke-Basis mit einbezogen (Abschnitt 3.3). Da durch die TL Beton-StB 07 [N 31] für Betone der Expositionsklasse XF4 für Fahrbahndecken ein künstliche erzeugter Mindestluftgehalt gefordert wird, wurde zu allen Bindemittelleimen Luftporenbildner auf modifizierter Wurzelharz-Basis zugegeben.

In den Untersuchungen wurden die Bindemittelleime mit einer Wassermenge entsprechend dem 0,7- (Gruppe T2) und 1,6-fachen (Gruppe T3) Wasseranspruchs (Normsteife) des Bindemittels hergestellt. Die Anforderung bezüglich der Konsistenz und der erhöhten Grünstandfestigkeit wurden an die untersuchten Bindemittelleime der Gruppe T2 und T3 wie im Abschnitt 4.2 festgelegt: ein Setzfließmaß unmittelbar nach Mischende ≥ 200 mm und ein Formkoeffizienten $K_L \geq 0,90$. Logischerweise führt die geringere Wassermenge der Bindemittelleime der Gruppe T2 zur niedrigeren Fließfähigkeiten gegenüber den Bindemittelleimen der Gruppe T3. Dieser Unterschied wurde mit einem höheren Anteil an Fließmittel auf PCE-Basis in den Bindemittelleimen der Gruppe T2 ausgeglichen. Bindemittelleime, die als Nullmischungen (Null Q/M) in den 2 untersuchten Gruppen bezeichnet werden, enthielten kein Thixotropiermittel und einen entsprechenden Fließmittelgehalt bei ansonsten gleicher Zusammensetzung.

Die untersuchten Bindemittelleime der Gruppe T2 sind der Tabelle 8 zu entnehmen. In der Gruppe T2 wurde das Thixotropiermittel T2 auf Basis modifizierter organischer Polymere mit einer Zugabemenge von 0,5 M.-% zugegeben. Diese Gruppe wurde in drei Serien unterteilt: Serie T2_Q, Serie T2_K und Serie T2_M. Der Wassergehalt der daraus hergestellten Leime wurde einheitlich zu 17,4 M.-% festgelegt.

Tabelle 8: Variationen der untersuchten Leime in Gruppe T2

Bezeichnung	Gruppe T2														
	T2_Q							T2_K	T2_M						
	Null (Q)	REF (Q)	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	K2	Null (M)	REF (M)	M1	M2	M3	M4	M5
Art und Zugabemenge der Zusatzstoffe	Quarzmehl 3,0							Kalksteinmehl 3,0	Metakaolin 1,0						
Fließmittel FM2	4,3							4,3	4,3						
Thixo T2	--	0,5							0,5	--	0,5				
Thixotropierende Zusätze	SK1	--	*							--	*				
	SK2			*				*				*			
	SK3				*								*		
	SK4					*								*	
	ST						*								*
Wassergehalt	17,4 (0,7.WA)														

* Zugabemenge der thixotropierenden Zusätze: 0,25 M.-% v. Z., Alle Angaben beziehen sich auf den Zementgehalt

Die untersuchten Bindemittelleime der Gruppe T3 sind der Tabelle 9 zu entnehmen. Die Gruppe T3 enthielt das pulverförmige Thixotropiermittel T3 auf Basis von Tetrasacchariden (mikrobiell anionisch erzeugte Polysaccharide), welches in den einzelnen Bindemittelleimen mit einer Menge von 0,25 M.-% eingesetzt wurde. Analog zu Gruppe T2 wurde Gruppe T3 ebenfalls in drei Serien unterteilt: Serie T3_Q, Serie T3_K und Serie T3_M.

Tabelle 9: Variation der untersuchten Leime in Gruppe T3

Bezeichnung		Gruppe T3															
		T3_Q							T3_K	T3_M							
		Null (Q)	REF (Q)	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	K2	Null (M)	REF (M)	M1	M2	M3	M4	M5	
Art und Zugabemenge der Zusatzstoffe		Quarzmehl 3,0							Kalkstein- mehl 3,0	Metakaolin 1,0							
Fließmittel FM2		0,3	4,3							4,3	0,3	4,3					
Thixo T3		--	0,25								--	0,25					
Thixotro- pierende Zusätze	SK1		--	*							--	*					
	SK2				*				*				*				
	SK3					*								*			
	SK4						*								*		
	ST							*								*	
Wassergehalt		44,1 (1,6.WA)															

* Zugabemenge der thixotropierenden Zusätze: 0,25 M.-% v. Z., Alle Angaben beziehen sich auf den Zementgehalt.

5.2.2 Gruppe T2

5.2.2.1 Untersuchung der rheologischen Parameter im Viskosimeter

Die Bindemittelleime der Gruppe T2 mit Thixotropiermittel T2 auf Basis modifizierter organischer Polymere ließen sich aufgrund ihrer hohen Viskosität nicht im Rotationsviskosimeter untersuchen. Daher war eine Bestimmung der rheologischen Parameter sowie ein Vergleich der thixotropen Eigenschaften dieser Bindemittelleime anhand des Viskosimeters nicht möglich.

5.2.2.2 Untersuchung der Fließfähigkeit

In der Abbildung 69 sind die Setzfließmaße dargestellt, die an den Bindemittelleimen mit Thixotropiermittel T2 (pulverförmig, auf Basis von modifizierten organischen Polymeren) und Quarzmehl (Serie T2_Q) bzw. Kalksteinmehl (Serie T2_K) unter Variation der thixotropierenden Zusätze (Schichtsilikate und modifizierte Stärke) in den beiden Zyklen ermittelt wurden.

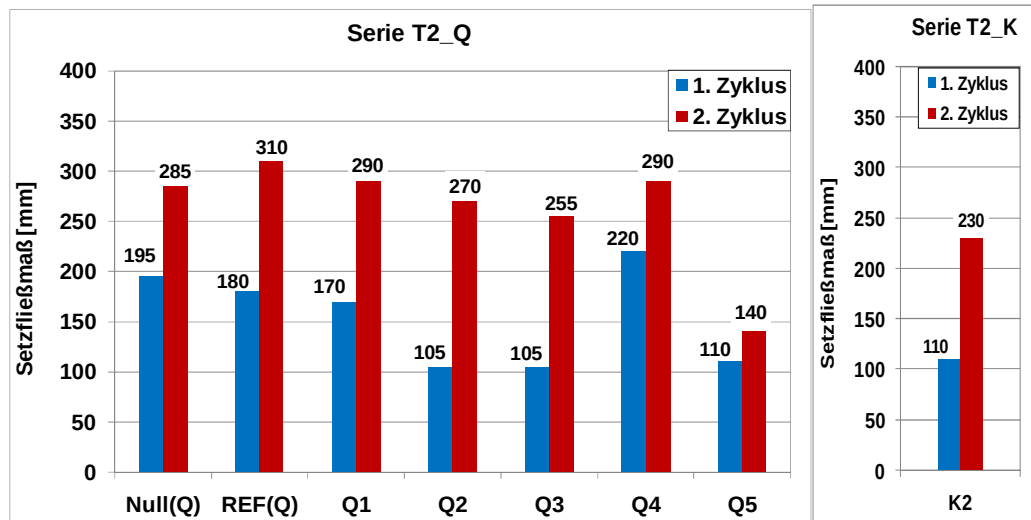


Abbildung 69: Setzfließmaße, Links: Serie T2_Q, Rechts: Serie T2_K

Bei den Mischungen der Serie T2_Q (mit Thixotropiermittel T2 und Quarzmehl) verursachte die Zugabe von Thixotropiermittel T2 zur Nullmischung Q (Zement, Quarzmehl, Fließmittel, Luftporenbildner und Wasser) eine Verminderung des Setzfließmaßes auf 92% des ursprünglichen Wertes im 1. Zyklus (von Null (Q) = 190 mm auf REF (Q) = 180 mm); während sich im 2. Zyklus eine Erhöhung um 8% des Setzfließmaßes zeigte (von Null (Q) = 285 mm auf REF (Q) = 310 mm).

Die Zugabe von Schichtsilikaten auf Kaolinit- und Montmorillonit-Basis sowie einem Stabilisierer (ST) auf modifizierte Stärke-Basis zur Referenzmischung REF (Q) bewirkte mit Ausnahme des Bindemittelleims Q4 generell eine Reduzierung des Setzfließmaßes sowohl im 1. als auch im 2. Zyklus. Dieser Rückgang war vor allem bei Verwendung der Schichtsilikate SK2 (Basis: Montmorillonit, Bindemittelleim Q2) und SK3 (Basis: aktivierter Bentonit, Bindemittelleim Q3), sowie der modifizierten Stärke ST (Bindemittelleim Q5) im 1. Zyklus mit ca. 40% sehr ausgeprägt. Im 2. Zyklus verringerte sich die Reduzierung des Setzfließmaßes bei Einsatz von Schichtsilikaten in den Bindemittelleimen Q1 bis Q4 auf nur noch 18% gegenüber der Referenzmischung REF (Q), wohingegen der Rückgang bei Verwendung des thixotropierenden Zusatzes ST in Bindemittelleim Q5 bei ca. 45% lag.

Ein Austausch von Quarzmehl durch Kalksteinmehl in Mischung Q2 (Serie T2_K) lieferte die in Abbildung 69, rechts dargestellten Ergebnisse. Verglichen mit der Serie T2_Q wurden keine signifikanten Änderungen des Setzfließmaßes im 1. Zyklus beobachtet. Im 2. Zyklus betrug das Setzfließmaß 230 mm und war gegenüber dem der Mischung Q2 aus der Serie T2_Q um rd. 14 % geringer.

In der Abbildung 70 sind die Setzfließmaße, die an den Leimen mit Thixotropiermittel T2 (pulverförmig, Basis modifizierte organische Polymere) und Metakaolin (Serie T2_M) unter

Variation der thixotropierenden Zusätze (Schichtsilikate SK1-SK4 und modifizierte Stärke ST) in den beiden Zyklen jeweils bestimmt wurden, dargestellt.

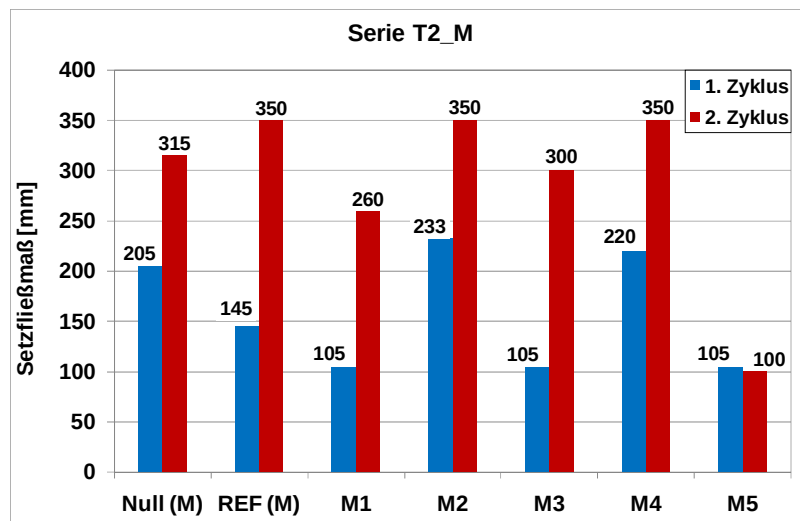


Abbildung 70: Setzfließmaße der Serie T2_M mit Metakaolin

Wie aus Abbildung 70 ersichtlich, zeigt sich bei der Zugabe von Thixotropiermittel zur Nullmischung (M) eine Absenkung des Setzfließmaßes im 1. Zyklus um 30% (von 205 mm in Null (M) auf 145 mm in REF (M)), im Gegensatz dazu wurde im 2. Zyklus eine Erhöhung des Setzfließmaßes um 11% (von 315 mm in Null (M) auf 350 mm in REF (M)) nachgewiesen.

Im 1. Zyklus führten Schichtsilikate SK1 (Basis: Gemisch aus Kaolinit, Illit und Quarz, Bindemittelleim M1), SK3 (Basis: aktivierter Bentonit, Bindemittelleim M3) und ST (Basis: Stärke, Bindemittelleim M5) zu einem Rückgang des Setzfließmaßes um ca. 30% von 145 mm auf 105 mm, während SK2 (Basis: Montmorillonit, Bindemittelleim M2) und SK4 (Basis: Natürlicher Calciumbentonit, Bindemittelleim M4) eine Erhöhung von 145 mm auf 233 mm bzw. 220 mm, d.h. um 60% bzw. 50% gegenüber der REF (M) bewirkten. Die höchsten Setzfließmaße im 1. Zyklus wurden für die Mischung M2 mit 233 mm und die Mischung M4 mit 220 mm ermittelt.

Im Vergleich zum 1. Zyklus erhöhte sich das Setzfließmaß im 2. Zyklus mit Ausnahme des Bindemittelleims M5 um 50% (M2) bis 185% (M3). Bei M5 (mit Stärke) wurden hingegen um ca. 28% (1. Zyklus) bzw. ca. 70% (2. Zyklus) geringere Setzfließmaße gegenüber REF (M) beobachtet. Mit Werten von 105 mm (1. Zyklus) und 100 mm (2. Zyklus) konnte des Weiteren keine Erhöhung des Setzfließmaßes im 2. Zyklus festgestellt werden.

5.2.2.3 Untersuchung der thixotropen Eigenschaften anhand der Formstabilität

In Abbildung 71 und Abbildung 72 sind die ermittelten Formstabilitätskoeffizienten K_L der Bindemittelleime dargestellt, die mit dem flüssigen Thixotropiermittel T2 auf Basis modifizierter organischer Polymere hergestellt wurden.

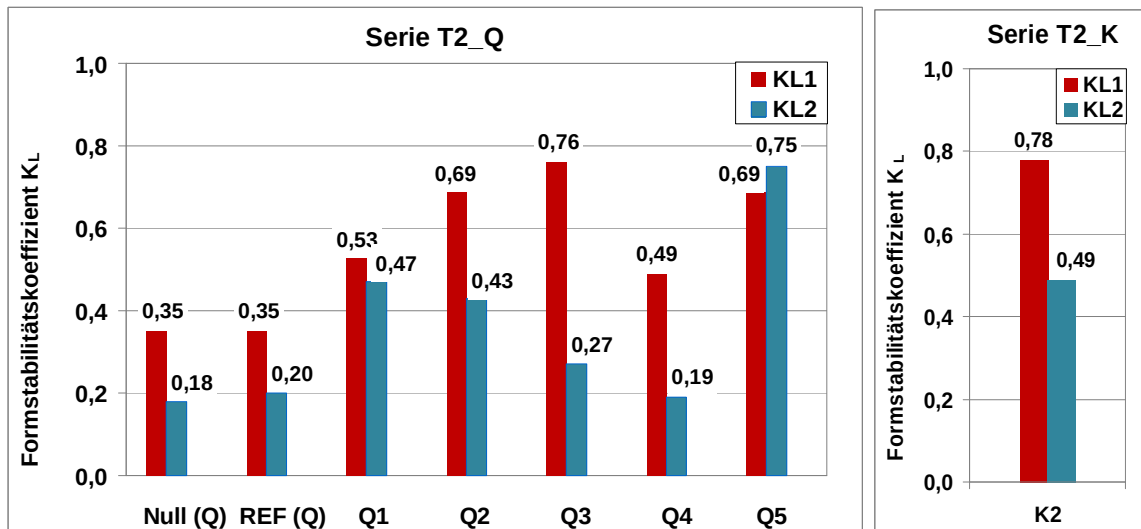


Abbildung 71: Formstabilitätskoeffizienten, Links: Gruppe T2_Q; Rechts: Gruppe T2_K

Die Zugabe von Thixotropiermittel T2 zum Bindemittelleim Null (Q) führte in beiden Zyklen zu keiner Erhöhung der Formstabilitätskoeffizienten des Bindemittelleims REF (Q). Die Zugabe von Schichtsilikaten zu REF (Q) hat eine Erhöhung der Formstabilitätskoeffizienten von 40 bis 117% (bei Bindemittelleim Q3, mit SK3 auf aktivierter Calciumbentonit-Basis) im 1. Zyklus und bis 135% (bei Q1) im 2. Zyklus zur Folge, mit Ausnahme von Bindemittelleim Q4 (mit SK4), dessen Formstabilitätskoeffizient sich gegenüber der Formstabilität der REF (Q) im 2. Zyklus nicht erhöhte.

Die Zugabe von modifizierter Stärke zu REF (Q) führte zu einer Erhöhung der Formstabilitätskoeffizienten von ca. 100% (im 1. Zyklus) bis 275% (im 2. Zyklus).

Durch Austausch von Quarzmehl durch Kalksteinmehl in der Mischung K2 erhöhte sich der Formstabilitätskoeffizient im 1. Zyklus von 0,69 auf 0,78 und im 2. Zyklus von 0,43 auf 0,49.

In Abbildung 72 sind die Formstabilitätskoeffizienten K_L der Bindemittelleime mit Metakaolin (Serie T2_M) dargestellt.

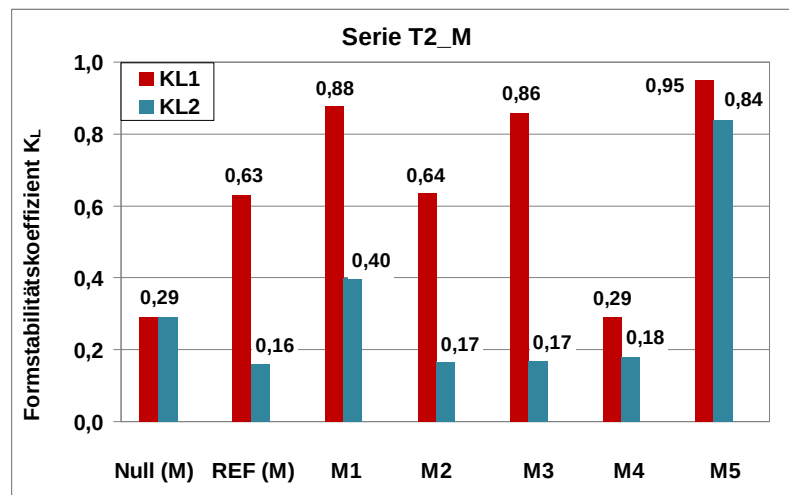


Abbildung 72: Formstabilitätskoeffizienten der Serie T2_M mit Metakaolin

Bei der Zugabe von Thixotropiermittel T2 zum Bindemittelleim Null (M) zeigte sich für den Bindemittelleim REF (M) eine Erhöhung um ca. 117% der Formstabilität in 1. Zyklus, wohingegen es im 2. Zyklus zu einer Absenkung von 45% der Formstabilität kam.

Die Zugabe von Schichtsilikaten (M1 bis M4) und modifizierter Stärke (M5) in REF (M) hatte eine Erhöhung des Formstabilitätskoeffizienten des 1. Zyklus zwischen 36,5 und 50% zur Folge, mit Ausnahme der Bindemittelleime M2 und M4, bei welchem die Zugabe von SK2 und SK4 (Basis: Montmorillonit bzw. natürlicher Calciumbentonit) keine Erhöhung der Formstabilität verursachte. Im 2. Zyklus führte der Einsatz von SK1 (Basis: Gemisch aus Kaolinit, Illit und Quarz) und modifizierter Stärke in REF (M) zu einer Erhöhung von 150% (Bindemittelleim M1) bis 425% (Bindemittelleim M5) des Formstabilitätskoeffizienten. Die Zugabe der Schichtsilikate SK2, SK3 und SK4 zeigte im 2. Zyklus keine Auswirkung auf die Formstabilitätskoeffizienten (Abbildung 72).

5.2.2.4 Gesamtbetrachtung und Diskussion - Bindemittelleime der Gruppe T2

In Abbildung 73 sind die Setzfließmaße der Bindemittelleime der Gruppe T2 (mit Thixotropiermittel T2, flüssig, auf modifizierter Polymerbasis) mit den zugehörigen Formstabilitätskoeffizienten für den 1. und 2. Prüfzyklus gegenübergestellt.

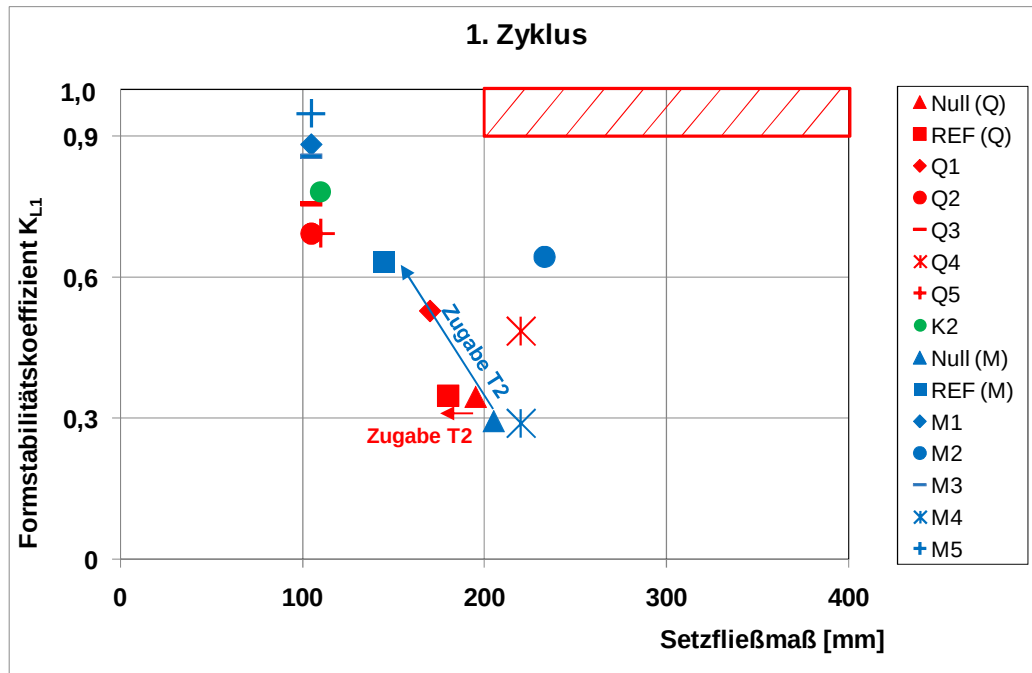
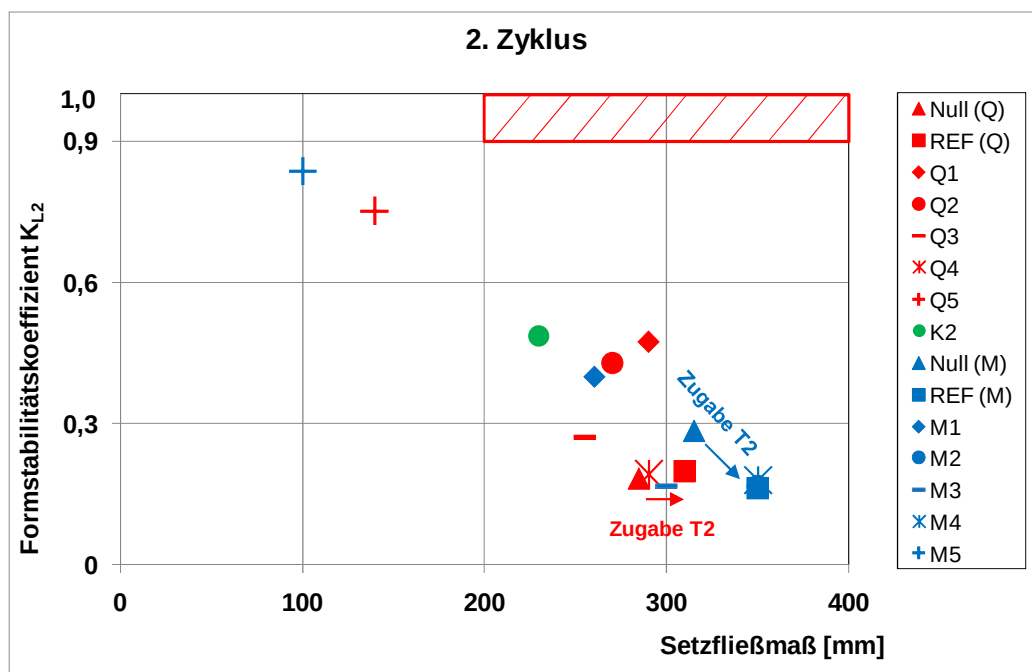


Abbildung 73: Zusammenhang zwischen dem Setzfließmaß und dem Formstabilitätskoeffizient K_L ;
a) 1. Zyklus



b) 2. Zyklus

Die Untersuchungen der Kombinationen von zweckmäßigen Zusätzen an den Bindemittelleimen der Gruppe T2 haben die im Abschnitt 5.1.7 (Auswirkungen einzelner Zusätze, Bindemittelleime mit Thixotropiermittel T2) ermittelten Ergebnisse bestätigt. Die angestrebten Zielgrößen (Setzfließmaß ≥ 200 mm und Formstabilitätskoeffizient $K_L \geq 0,90$) wurden bei diesen Bindemittelleimen weder im 1. noch im 2. Zyklus erreicht. Zwischen

1. und 2. Zyklus nahm das Setzfließmaß in den meisten Fällen zu, was dann aber mit einer Verminderung der Formstabilität einherging.

Die Verringerung der Formstabilität der Bindemittelleime im 2. Zyklus kann nach Billberg [20] als Resultat des zeitabhängigen strukturellen Aufbaus der zementösen Suspensionen interpretiert werden. Der Wiederaufbau der inneren Struktur eines Bindemittelleims nach einem erneuten Mischzyklus erfolgt anhand einer reversiblen thixotropen Struktur infolge elektrostatischer Wechselwirkungen sowie eines irreversiblen Strukturbruchs. Die neue resultierende Struktur ergibt sich aus einem Wettbewerb zwischen beiden Strukturen. Dies bedeutet, dass die innere Struktur der Bindemittelleime nach einem 2. Mischprozess im Vergleich zum 1. Zyklus nur teilweise wieder aufgebaut werden konnte. Dies spiegelte sich in den geringeren Formstabilitätskoeffizienten K_L des 2. Zyklus wieder (Abbildung 73 a und b).

Die Erhöhung der Setzfließmaße im 2. Zyklus gegenüber dem 1. Zyklus können nach Tattersall [132] auf das neu entstandene System infolge einer großen Scherbeanspruchung zurückgeführt werden. Nach einem 2. Mischzyklus sind die Zementteilchen, die am Ende des 1. Mischzyklus noch im trockenen Zustand durch geringe Anziehungskräfte aneinander hafteten, zu einzelnen, nicht miteinander verbundenen Agglomeraten und Partikeln zerfallen. Es bildet sich eine neue Membran auf der freien und somit noch unhydratisierten Oberfläche der Partikel. Dies verhindert nach Beenden der Scherbeanspruchung die Wiedervereinigung der nun zwei Teilchen infolge der Van-der-Waals-Kräfte zum einzelnen ursprünglichen Partikel. Dieser irreversible Strukturbruch führt zur Entstehung von neuen anziehenden bzw. abstoßenden interpartikulären Kräften, die zu einer Erhöhung der Fließfähigkeit beitragen.

In gleicher Weise wie bei den Untersuchungen an einzelnen Zusätzen (Abschnitt 5.1) zeigte die Zugabe von Schichtsilikaten in die Referenzmischungen REF (Q) und REF (M) eine starke Neigung zur Agglomeration. Das Fließverhalten der Bindemittelleime wird durch die Bildung von Aggregaten infolge von elektrostatischen Wechselwirkungen bestimmt [4][20][25]. Dies zeigte sich bei den Bindemittelleimen mit Schichtsilikaten SK1 – SK4 durch einen Rückgang des Setzfließmaßes um rd. 40%. Wenn die plättchenförmigen Schichtsilikate hydratisiert sind, werden die leicht positiv geladenen Plättchenseiten durch die negativ geladenen Plättchenoberflächen angezogen und bilden je nach chemischer Zusammensetzung der eingesetzten Schichtsilikate eine dreidimensionale Kartenhausstruktur, in der Wasser eingeschlossen ist. Da nach Blask [25] und Keck [70] das eingeschlossene Wasser nur wenig zur Fließfähigkeit der Suspension beiträgt, ist der Rückgang der Setzfließmaße der Bindemittelleime mit Schichtsilikaten auf das in der Kartenhausstruktur eingeschlossene Wasser zurückzuführen. Die Bildung von einer Kartenhausstruktur infolge von Agglomeration der Silikat-Teilchen führt zu einer Erhöhung der Fließgrenze, welche nach Griesser [50][51] und Noor [93] eine direkte Korrelation mit

einer niedrigeren Fließfähigkeit (Setzfließmaß) der zementösen Suspensionen aufweist [138].

Im Vergleich zu den Schichtsilikaten SK2 bis SK4 führte die Zugabe von Schichtsilikate SK1 (Mineralgemisch aus Kaolinit, Illit und Quartz) in Bindemittelleime mit Quarzmehl und Metakaolin zu dem besten Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und hoher Formstabilität (Abbildung 73 a und b). Dies ist auf die chemische Zusammensetzung der Schichtsilikate SK1 zurückzuführen. Im Gegensatz zu den Schichtsilikaten SK2 bis SK4 auf Montmorillonit-Basis basiert SK1 auf Kaolinit. Die Teilchen der Schichtsilikate SK2 bis SK4 generieren aufgrund der geringeren Dicke der delaminierten Teilchen schwächere Bänder- und Kartenhausstrukturen als die von den Kaolinit-Teilchen der SK1 generierte Kartenhausstruktur. Dies wurde in beiden Zyklen durch die niedrigeren Formstabilitätskoeffizienten K_L aller Bindemittelleime mit Schichtsilikaten SK2 – SK4 im Vergleich zum Koeffizienten der Leime mit SK1 nachgewiesen.

Im Gegensatz zu allen Bindemittelleimen der Gruppe T2 zeigten die Bindemittelleime mit Stabilisierer ST auf modifizierter Stärkebasis mit Werten von 0,69 bis 0,95 in beiden Zyklen die höchsten Formstabilitätskoeffizienten K_L . Zugleich wurde keine Verflüssigung nach einem 2. Mischzyklus beobachtet. Dieses Verhalten wurde schon in den Ergebnissen des Abschnittes 5.1.6 (Untersuchungen an einzelnen Zusätze, thixotropierende Zusätze) erläutert und ist nach Tepstra [134] auf die Wechselwirkungen zwischen Amylopektin (Hauptbestandteile der Stärke-Moleküle) und Zement-Teilchen zurückzuführen. Der Wiederaufbau der innere Struktur, z. B. bei dem Leim Q5, wird durch den Einbau der inneren Mikrostruktur bzw. thixotropen Struktur verursacht, wenn die Zement-Teilchen durch die Biopolymere verbrückt sind.

Letztendlich lieferte der Austausch von Quarzmehl durch Kalksteinmehl in Mischung Q2 (Serie T2_K) keine signifikanten Änderungen des Setzfließmaßes und der Formstabilität im 1. und im 2. Zyklus.

5.2.3 Gruppe T3

5.2.3.1 Untersuchung der rheologischen Parameter im Viskosimeter

Die charakteristischen Fließkurven der Bindemittelleime wurden während der Geschwindigkeitsreduzierung aus den zwischen der 4. und 5. Minute im Messprofil gemessenen Schermomente ermittelt (Abbildung 60)[116].

In Abbildung 74 sind die an den einzelnen Leimen der Serie T3_Q (mit Quarzmehl) gemessenen Fließkurven dargestellt. In Tabelle 10 sind die aus diesen Fließkurven ermittelten rel. Fließgrenze τ_0 und rel. Viskosität η aufgeführt.

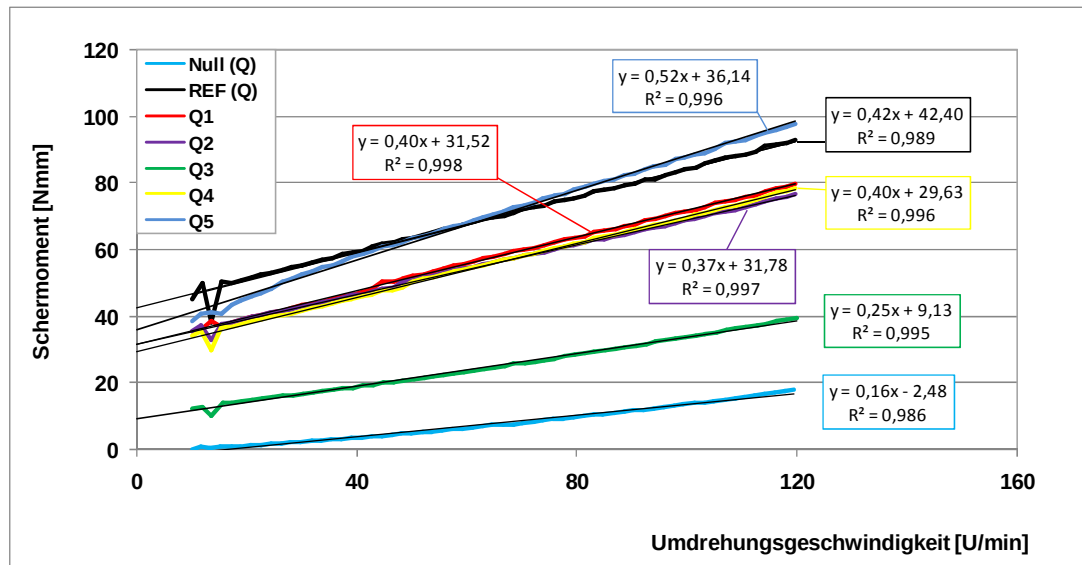


Abbildung 74: Fließkurven der Serie T3_Q

Tabelle 10: Rel. Fließgrenze τ_0 und rel. Viskosität η der Serie T3_Q

Parameter		Null (Q)	REF (Q)	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
rel. τ_0	[N.mm]	$(-2,48) \approx 1,0$	42,4	31,5	31,0	9,1	29,6	36,1
rel. η	[N.mm.min]	0,16	0,42	0,40	0,37	0,25	0,40	0,52
R^2		0,986	0,989	0,998	0,997	0,995	0,996	0,996

Bei einem annähernd linearen Verlauf der Fließkurve kann das Bingham-Modell zur Bestimmung rheologischer Kenngrößen angewandt werden (Abschnitt 3.3.5). Das Schermoment am Schnittpunkt der extrapolierten Regressionsgeraden mit der y-Achse wird als relative Fließgrenze τ_0 definiert. Die relative Viskosität η wird durch die Steigung der Geraden beschrieben [25].

Wie aus Abbildung 74 und Tabelle 10 ersichtlich ist, lassen sich alle Fließkurven durch lineare Regressionen jeweils mit einem Bestimmtheitsmaß von über 98,5% annähern. Dieses hohe Bestimmtheitsmaß bestätigt die Anwendbarkeit des Bingham-Modells für die Auswertung der Fließkurven. Auf aufwändigere Methoden zur noch genaueren Bestimmung der rel. Fließgrenze τ_0 und rel. Viskosität η , wie sie in den Untersuchungen von Blask [25] vorgestellt werden, kann an dieser Stelle verzichtet werden [51].

Aufgrund der sehr hohen Fließfähigkeit ließ sich für die thixotropiermittelfreie Nullmischung (Null Q) eine negative rel. Fließgrenze bestimmen. Dies ist ein Risiko für fließfähige Suspensionen bei Anwendung des Bingham-Modells (Tabelle 10). Da dies physikalisch unmöglich ist, wurde für die relative Fließgrenze des Bindemittelleims Null (Q) ein

einheitlicher Wert (rel. $\tau_0 \approx 1$ N.mm) festgesetzt. Auch die relative Viskosität (rel. η) war mit 0,16 N.mm·min nur sehr gering.

Durch Zugabe des Thixotropiemittels T3 stiegen beim Bindemittelleim REF (Q) sowohl die rel. Fließgrenze auf rd. 42,4 N.mm als auch die rel. Viskosität auf 0,42 N.mm.min um 42,4-fache bzw. 2,6-fache an. Das zugegebene Thixotropiermittel T3 basiert auf einem mikrobiell anionisch erzeugten Polysaccharid. Nach Schmidt [117] ist die rasche Entwicklung der Fließgrenze sowie die Erhöhung der Viskosität auf die Ladungsneutralisation zwischen den entgegengesetzten Ladungen der Polymere und Zement-Teilchen zurückzuführen, die sich nach Zugabe von anionischen Polysaccharide in zementösen Suspensionen entwickelt.

Verglichen mit dem Bindemittelleim REF (Q) weisen die Bindemittelleime Q1, Q2 und Q4 mit Zugabe von Schichtsilikaten (SK1, SK2 und SK4) eine um rd. 30 % verringerte rel. Fließgrenze auf. Ein noch größerer Rückgang um rd. 80% der rel. Fließgrenze auf einen Wert von rd. 9,1 N.mm zeichnete sich beim Leim Q3 mit SK3 ab, dies ist auf Schwankungen während der Durchführung der Untersuchungen zurückzuführen. Hinsichtlich der relativen Viskositäten wiesen die Leime mit Schichtsilikaten SK1-SK4 eine um 4,8 bis rd. 40 % geringere Viskosität in Bezug auf die rel. Viskosität des Bindemittelleim REF (Q) auf. Allerdings wies der Bindemittelleim mit Schichtsilikaten SK1 auf Kaolinit-Basis eine leicht höhere rel. Fließgrenze (um rd. 6 %) und höhere rel. Viskosität (um rd. 8 %) gegenüber den Bindemittelleimen auf, die mit Schichtsilikaten auf Montmorillonit-Basis (SK2-SK4) hergestellt wurden. Die Ursache der Erhöhungen der rheologischen Kenngrößen (rel. Viskosität und rel. Fließgrenze) ist auf die stärkere gebildete Struktur der Kaolinit-Teilchen infolge von Fläche-Kante-Koagulation zurückzuführen [78].

Lediglich bei Zugabe von Zusatz ST auf Stärke-Basis in Q5 war eine Steigerung der rel. Viskosität um rd. 24 % gegenüber dem Leim REF (Q) festzustellen. Zugleich wies Q5 im Vergleich zu Leimen mit Schichtsilikaten (Q1-Q4) eine um rd. 13,5 % höhere rel. Fließgrenze auf. Dieses unterschiedliche Verhalten des Bindemittelleims mit Zusatz von Stabilisierer ST kann anhand der Wirkungsweise der Stärke-Teilchen in zementösen Suspensionen erklärt werden [118]. Der stabilisierende Mechanismus der modifizierten Stärke-Teilchen in zementösen Suspensionen basiert nicht nur auf eine Viskositätsmodifikation, sondern auch auf eine Erhöhung der Fließgrenze infolge Aufbau eine Mikrostruktur durch Verbrückung zwischen Zement- und Füller-Teilchen, die zur Entstehung einer thixotropen Struktur führt, welche letztendlich das rheologische Verhalten der Suspension beeinflusst.

Die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen an dem Bindemittelleim K2 mit Kalksteinmehl der Serie T3_K haben gezeigt, dass im Vergleich zu dem Leim Q2 mit Quarzmehl die entsprechende Mischung mit Kalksteinmehl eine niedrigere relative

Fließgrenze τ_0 (30,4 N.mm) aufwies. Die relative Viskosität η war bei dem Bindemittelleim K2 um rd. 21,5 % höher gegenüber dem Leim mit Quarzmehl (Q2).

Die Fließkurven der Leime mit Metakaolin (Serie T3_M) sind in Abbildung 75 dargestellt. Die aus diesen Fließkurven ermittelten relativen Fließgrenzen τ_0 und relativen Viskositäten η sind in Tabelle 11 aufgeführt.

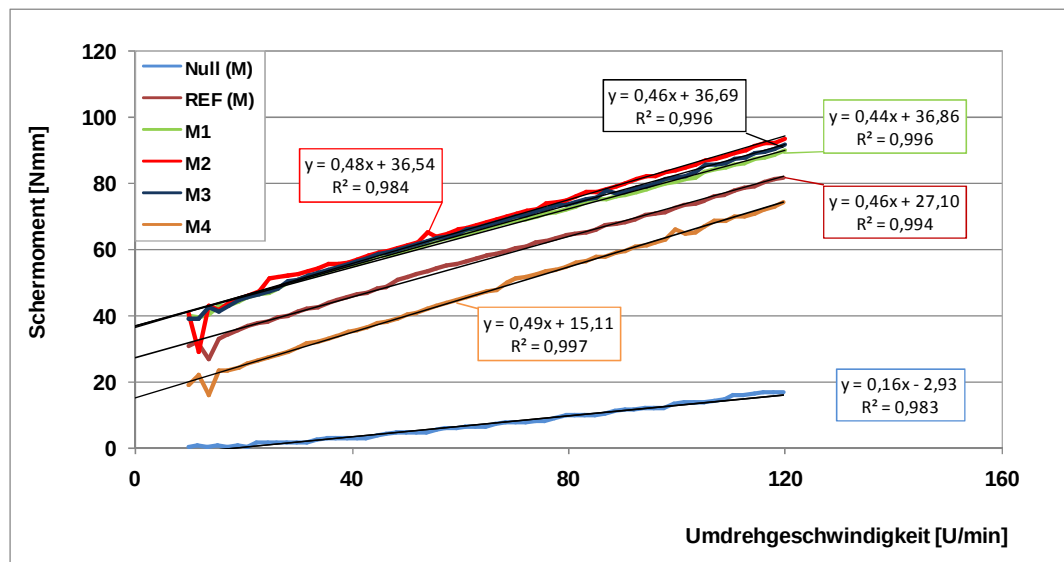


Abbildung 75: Fließkurven der Serie T3_M

Tabelle 11: Fließmoment und Momentengradient der Serie T3_M

Parameter		Null (M)	REF (M)	M1	M2	M3	M4	M5
rel. τ_0	[N.mm]	(-2,93) $\approx$ 1,0	27,1	36,9	36,5	36,7	15,1	*
rel. η	[N.mm.min]	0,16	0,46	0,44	0,48	0,46	0,49	*
R^2		0,983	0,994	0,996	0,984	0,996	0,997	*

* aufgrund klebriger Konsistenz nicht bestimmbar

Im Hinblick auf das angewandte Bingham-Modell für die Charakterisierung des rheologischen Verhaltens der untersuchten Bindemittelleime lassen sich alle Fließkurven durch lineare Regressionen jeweils mit einem Bestimmtheitsmaß von über 98,3% annähern.

Wiederum ließ sich für den sehr fließfähigen Bindemittelleim Null (M) eine negativ rel. Fließgrenze bestimmen. Ähnlich wie bei dem Leim Null (Q) der Serie T3_Q wird die rel. Fließgrenze τ_0 des Bindemittelleims Null (M) auf einen einheitlichen Wert festgesetzt. Die relative Viskosität η von 0,16 N.mm.min deutet auf eine nur geringe Viskosität hin.

Bei Zugabe des Thixotropiermittels T3 nahm die Steifigkeit des Leims zu, was bei dem Bindemittelleim REF (M) sowohl zu einer erhöhten rel. Fließgrenze (27,1 N.mm) als auch zu

einer nennenswerten rel. Viskosität (0,46 N.mm.min) führte. Die Zugabe von Thixotropiermittel zu Null (Q) bewirkte den Aufbau des inneren Gefüge des Leims und infolgedessen eine Erhöhung der Viskosität und das Auftreten von Fließgrenzen [39]. Gegenüber dieser Referenzmischung waren die Bindemittelleime mit Zugabe von Schichtsilikaten SK1 bis SK3 mit rel. Fließgrenzen in der Größenordnung von 37 N.mm steifer (Abschnitt 5.1.6).

Zugleich führte die Zugabe der thixotropierenden Zusätzen SK1 bis SK4 in REF (M) zu unwesentlichen (rd. ± 5 %) Änderungen der entsprechenden rel. Viskositäten. Die Bindemittelleime M2 und M4 wiesen mit 0,48 bzw. 0,49 N.mm.min die höchsten rel. Viskositäten auf, jedoch erreichte M4 nur eine rel. Fließgrenze von rd. 15,1 N.mm. Der Bindemittelleim M5 mit Stärke (ST) ließ sich aufgrund seiner hohen Viskosität (Klebrigkeit) im Rotationsviskosimeter nicht untersuchen. Daher war auch eine Beurteilung der rheologischen Kenngrößen hierbei nicht möglich.

5.2.3.2 Untersuchung der thixotropen Eigenschaften im Viskosimeter

Abbildung 76 stellt die an den Bindemittelleimen der Serie T3_Q (mit Quarzmehl) gemessenen Schermomente über die Zeit dar. Aus den zeitlichen Verläufen wurden im Bereich des Strukturaufbaus und –abbaus die Flächen unterhalb der Messkurven berechnet und die Thixotropiezahl ermittelt. Die Ergebnisse hierzu sind Tabelle 12 zu entnehmen.

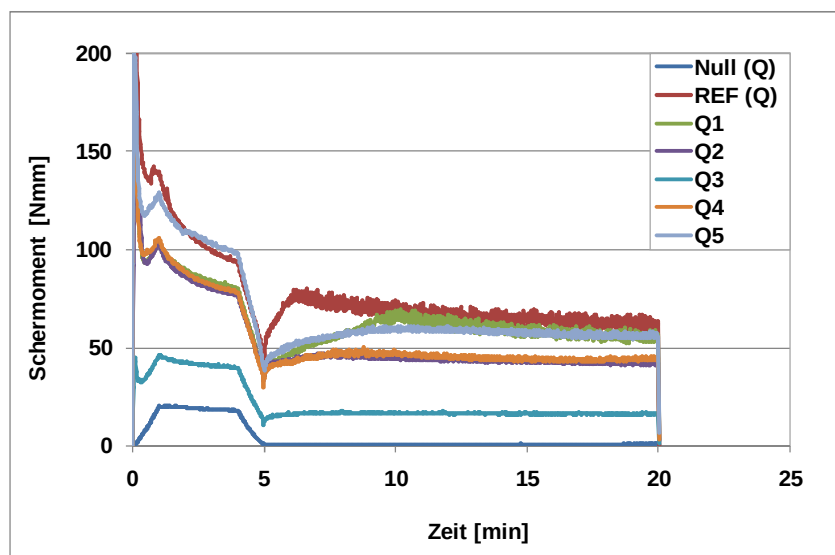


Abbildung 76: Schermoment/Zeit-Diagramm der Leime in Serie T3_Q

Tabelle 12: Flächenwerte und Thixotropiezahlen der Serie T3_Q

Parameter	Null (Q)	REF (Q)	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Abbaufläche (A _i)	3,0	40,6	22,6	23,4	6,9	25,1	27,9
Aufbaufläche (B _i)	3,7	319,7	329,6	116,7	56,2	157,5	270,2
Thixotropiezahl (T_i)	1,2	7,9	14,6	5,0	8,2	6,3	9,7

Die durch die Untersuchungen im Viskomat ermittelten Thixotropiezahlen T_i zeigten bei Zugabe von Thixotropiermittel T3 (Basis Tetrasaccharide) in dem Bindemittelleim Null (Q) und bei Hinzufügen von SK1 (Basis: Gemisch aus Kaolinit, Illit und Quarz) in REF (Q) die deutlichsten Erhöhungen. Die Zugabe von Thixotropiermittel T3 in Null (Q) bewirkte eine Erhöhung der Thixotropiezahl um das 7,9-fache; jedoch erhöhte sich durch die Zugabe von SK1 in REF (Q) die Thixotropiezahl des Bindemittelleims Q1 um 85% auf 14,6, was gleichzeitig die höchste Thixotropiezahl dieser Serie ergab. Dabei ist aber großen Wert darauf zu legen, dass dieser Bindemittelleim (Q1) im Abschnitt 5.2.3.1 die höchste rel. Viskosität und Fließgrenze der Mischungen mit Schichtsilikaten (Q1 – Q4) aufwies.

Der hohe Wert der Thixotropiezahl des Bindemittelleims Q1 war auf einen schwächeren Strukturabbau (kleinere Abbaufläche) und einen intensiveren Strukturaufbau (große Aufbaufläche) in der Messkurve zurückzuführen. Bezüglich der Zugabe von Schichtsilikaten SK3 (auf aktivierter Calciumbentonit-Basis) in Q3 konnte die Thixotropiezahl ausgehend von der des Referenzleims um rd. 4 % erhöht werden. In gleicher Weise konnte durch Zugabe von Stabilisierer (ST) auf Stärke-Basis in Q5 eine Erhöhung der Thixotropiezahl ausgehend von der des Referenzleims um rd. 23 % erzielt werden.

Im Vergleich zum Referenzleim REF (Q) wiesen die Bindemittelleime Q2 und Q4, beide mit Schichtsilikaten auf Montmorillonit-Basis, 37 % bzw. 20 % kleinere Thixotropiezahlen auf. Diese Bindemittelleime zeigten nur etwa halb so große Aufbauflächen. Die niedrigeren ermittelten Werte der Aufbauflächen deuteten nach Schreiber [120] auf eine Verringerung der Thixotropie dieser Leime in Bezug zur Referenzmischung REF (Q) hin.

Durch den Austausch von Quarzmehl durch Kalksteinmehl in Bindemittelleim K2 der Serie T3_K blieb die Abbau- und Aufbaufläche mit rd. 25 bzw. rd. 117 nahezu unverändert. Infolgedessen ergab sich wie beim Bindemittelleim Q2 (mit Quarzmehl) eine Thixotropiezahl von 5,0 für den Leim mit Kalksteinmehl K2 (Tabelle 12).

Die zeitlichen Schermomentverläufe, die an den Leimen der Serien T3_M (mit Metakaolin) mit Hilfe des Rotationsviskosimeters gemessen wurden, sind in Abbildung 77 dargestellt. Die Auswertung dieser Kurven hinsichtlich der thixotropen Eigenschaften der Leime ist in Tabelle 13 enthalten.

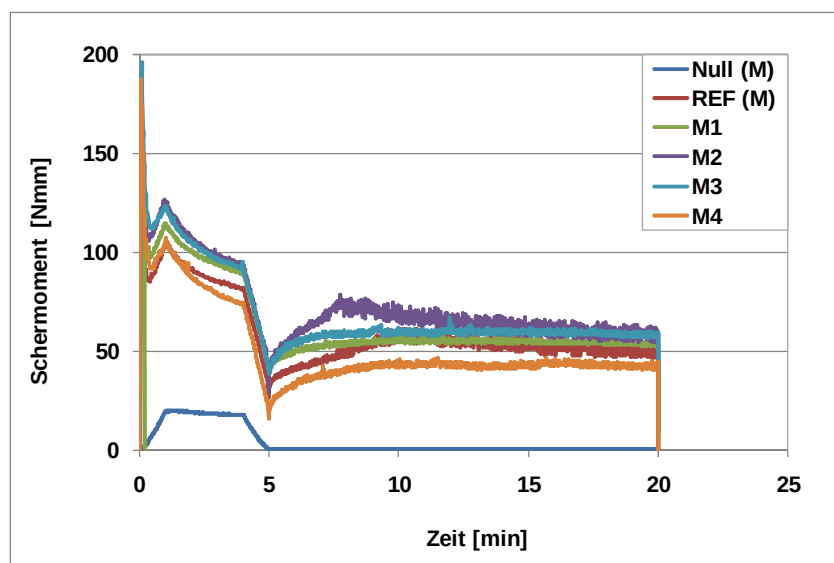


Abbildung 77 : Schermoment/Zeit-Diagramm: Serie T3_M

Tabelle 13: Flächenwerte und Thixotropiezahlen der Serie T3_M

Parameter	Null (M)	REF (M)	M1	M2	M3	M4	M5
Abbaufäche (A_i)	3,1	22,9	25,1	32,3	24,8	32,5	*
Aufbaufäche (B_i)	3,5	313,1	213,3	337,9	293,0	333,2	*
Thixotropiezahl (T_i)	1,1	13,7	8,5	10,5	11,8	10,3	*

* aufgrund klebriger Konsistenz nicht bestimmbar

Die im Viskomat ermittelten Thixotropiezahlen T_i verdeutlichen die bisherigen ermittelten Ergebnisse über die höhere Wirksamkeit des Thixotropiermittels T3 auf die Thixotropie der Bindemittelleime. Wie in der vorangegangenen Versuchsserie bewirkte der Einsatz des Thixotropiermittels T3 eine massive Erhöhung der Abbaufäche (auf rd. 23) und insbesondere der Aufbaufäche (auf rd. 313), was gleichzeitig die Thixotropiezahl um ein Vielfaches auf 13,7 erhöhte. Die Erhöhung der Thixotropiezahl durch die Zugabe von Thixotropiermittel T3 ist in Einklang mit den signifikanten Erhöhungen der rel. Viskosität und rel. Fließgrenze des Bindemittelleims REF (M) (Abschnitt 5.2.3.1).

Ausgehend von den Werten der Referenzmischung REF (M) konnte bei den Bindemittelleimen M2 und M4 durch den zusätzlichen Einsatz von Schichtsilikaten SK2 und SK4 (auf Montmorillonit-Basis) die Ab- und Aufbaufäche zwar geringfügig um rd. 10% gesteigert werden, die Thixotropiezahl verringerte sich allerdings um rd. 20 %. Bei den Leimen M1 (mit SK1 auf Kaolinit-Basis) und M3 (mit SK3 auf Montmorillonit-Basis) zeichnete sich keine Steigerung der Aufbaufäche gegenüber der Referenzmischung ab, wohingegen sich die Aufbaufäche um bis zu rd. 32% verminderte, was zusammen mit einer unwesentlich geänderten Abbaufäche zu einer Absenkung der Thixotropiezahl um bis zu rd. 38% (M1) führte.

5.2.3.3 Untersuchung der Fließfähigkeit

Abbildung 78 stellt die Ergebnisse der Setzfließversuche an den Bindemittelleimen mit Thixotropiermittel T3 (Basis: Tetrasaccharide) und Quarzmehl (Serie T3_Q) bzw. Kalksteinmehl (Serie T3_K) unter Variation der thixotropierenden Zusätze (Schichtsilikate und Stärke) in den beiden jeweiligen Zyklen dar. Weiterhin sind auch die Ergebnisse für die Nullmischungen (ohne Thixotropiermittel und thixotropierende Zusätze) dargestellt.

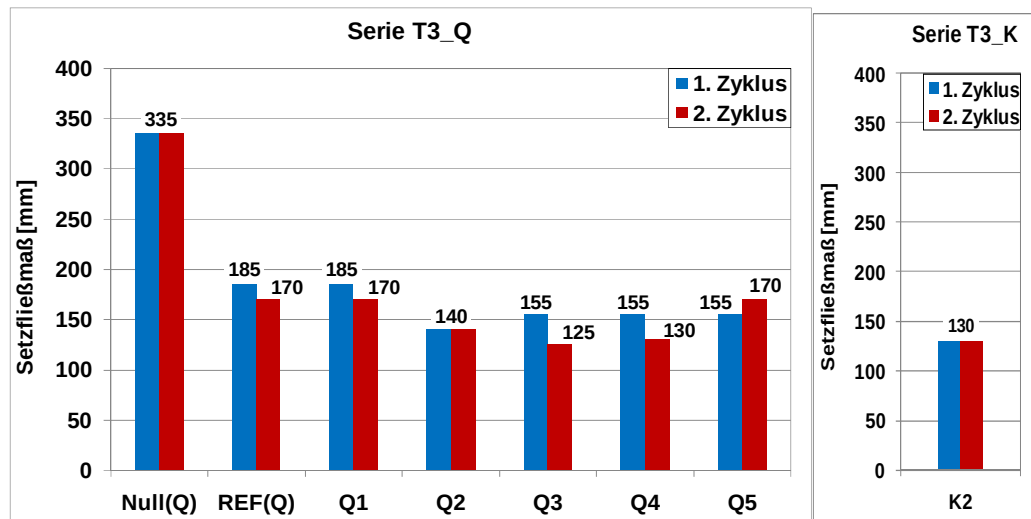


Abbildung 78: Setzfließmaße, Links: Serie T3_Q; Rechts: Serie T3_K

Wie aus Abbildung 78, links ersichtlich ist, reduzierte sich das Setzfließmaß der Nullmischung (Q) durch die Zugabe von Thixotropiermittel in die Mischung REF (Q) sowohl im 1. als auch im 2. Zyklus von 335 mm bis auf 185 bzw. 170 mm (ca. 55%). Die Verringerung der Fließfähigkeit, die sich nach Zugabe von Thixotropiermittel im Leim Null (Q) zeigte, ist nach Isler [65] auf den Wasserrückhalt der typischerweise organischen Polymere wie Welan Gum, zurückzuführen.

Im 1. Zyklus wurde durch das Hinzufügen von Schichtsilikaten SK2 bis SK4 (Q2 - Q4) sowie von Stärke (Q5) in die Referenzmischung REF (Q) eine Verminderung des Setzfließmaßes um 17% bis 25% nachgewiesen. Dies kann auf die Erhöhung der Feststoffkonzentration und auf die daraus resultierenden zunehmenden elektrostatischen Wechselwirkungen zwischen die Teilchen der Suspension zurückgeführt werden. Allerdings korrelieren die niedrigeren ermittelten Setzfließmaße nicht mit den im Abschnitt 5.2.3.2 abnehmenden Fließgrenzen nach Zugabe des entsprechenden Zusätze (Schichtsilikate und Stärke). Dies widerspricht der Schlussfolgerungen von Griesser [51] hinsichtlich abnehmender Fließfähigkeit mit entsprechender zunehmender Fließgrenze. Dieser Widerspruch konnte infolge der Komplexität der Wechselwirkungen zwischen Zement-, PCE-Fließmitteln-, und Schichtsilikate- bzw. Stärke-Teilchen erklärt werden. Möglicherweise sind die Unterschiede zwischen der ermittelten Fließgrenze zu gering, um eine Auswirkung auf die Setzfließmaße

haben zu können. Im Gegensatz dazu zeigte die Mischung Q1 (mit SK1, Basis: Gemisch aus Kaolinit, Illit und Quarz) gegenüber der REF (Q) keine Änderung im Setzfließmaß.

Im 2. Zyklus zeigten alle Bindemittelleime der Serie T3_Q gegenüber dem 1. Zyklus ähnliche Setzfließmaße (Abbildung 78, links). Dies deutet nach Tattersall [132] darauf hin, dass die im 1. Mischzyklus die eingesetzte Energie ausreichend war, um die Flockenstruktur im Bindemittelleim zu zerstören. Dieses Verhalten war damit konträr zu dem der Leime in der Serie T2_Q (mit Thixotropiermittel T2 auf modifizierte Polymerbasis).

Der Austausch von Quarzmehl durch Kalksteinmehl in der Mischung K2 der Serie T3_K führte zu einem vernachlässigbaren Rückgang des Setzfließmaßes in beiden Zyklen um 10 mm auf 130 mm (Abbildung 78, rechts).

In Abbildung 79 sind die Setzfließmaße der Bindemittelleime mit dem Thixotropiermittel T3 (pulverförmig, Basis Tetrasaccharide) und Metakaolin (Serie T3_M) unter Variation der thixotropierenden Zusätze (Schichtsilikate und Stärke) für beide Zyklen dargestellt. Wiederum sind zum Vergleich die Ergebnisse der Nullmischungen bzw. ohne Thixotropiermittel und Schichtsilikate bzw. Stärke mit aufgeführt.

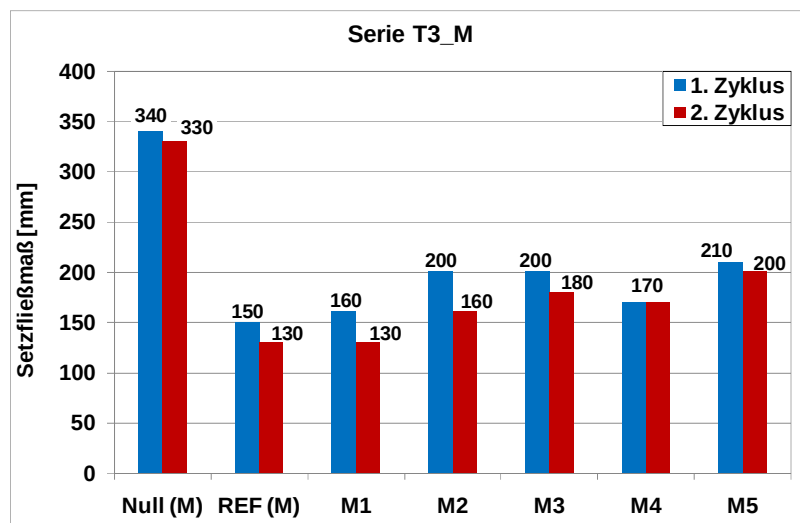


Abbildung 79: Setzfließmaße der Serie T3_M mit Metakaolin

Im Hinblick auf die Setzfließmaße der Bindemittelleime im 1. Zyklus, minderte die Zugabe von Thixotropiermittel zum Bindemittelleim Null (M) das Setzfließmaß auf 44% (von 340 auf 150 mm) des ursprünglichen Wertes ab. Dies ist auf die im vorherigen Abschnitt 5.1.8 erwähnte Ladungsneutralisation durch elektrostatische Wechselwirkungen zwischen den entgegengesetzten Ladungen der Polymer-Teilchen des Thixotropiermittel T3 und der Zement-Teilchen, die zum Verlust der Verarbeitbarkeit in zementösen Suspensionen infolge Ausflocken führen, zurückzuführen.

Gegenüber der Referenzmischung führte die Zugabe von Schichtsilikaten und Stärke durchweg zu einer Erhöhung der Fließfähigkeit von 150 mm (REF (M)) auf 160 mm (M1) bis zu 210 mm (M5, mit Stärke). Wie bei den Mischungen der Serie T3_Q zeigte die Zugabe des Schichtsilikats SK1 (Basis: Gemisch aus Kaolinit, Illit und Quarz, Bindemittelleim M1) in REF (M) die geringste Auswirkung auf das Setzfließmaß (Erhöhung lediglich um rd. 7% gegenüber der Referenzmischung, Abbildung 79).

Im 2. Zyklus verringerte sich das Setzfließmaß für alle Mischungen der Serie T3_M um maximal 20 %. Dieses Verhalten war damit konträr zu dem der Bindemittelleime in der Serie T2_M (mit Thixotropiermittel T2 auf modifizierte Polymerbasis). Der Widerspruch zwischen den Bindemittelleimen der Serie T3_M (Gruppe T3) und denen der Serie T2_M (Gruppe T2) ist auf die unterschiedlichen Wassergehalte der Bindemittelleime zurückzuführen. Im Gegensatz zu Mischungen der Gruppe T2 wurden Bindemittelleime der Gruppe T3 mit einem Wassergehalt entsprechend 1,6-fachen Wasseranspruch (1,6.WA) hergestellt. Ein höheres Wasser-Mehlkorn-Verhältnis benötigt weniger Mischungsenergie, um die Flockenstruktur im Bindemittelleim zu zerstören. Dies spiegelte sich in den ähnlichen Setzfließmaßen zwischen den Zyklen wieder. Abgesehen von der Nullmischung wurde das höchste Setzfließmaß im 2. Zyklus mit 200 mm von der Mischung M5 mit Stärke erzielt. Der Bindemittelleim M5 (mit Stärke) wies mit 210 bzw. 200 mm ähnliche Setzfließmaße in beiden Zyklen auf. Der Unterschied betrug rd. 5% und kann somit vernachlässigt werden. Die übrigen Mischungen mit thixotropierenden Zusätzen erreichten nur Werte zwischen 130 und 180 mm.

5.2.3.4 Untersuchung der thixotropen Eigenschaften anhand der Formstabilität

Die Formstabilitätskoeffizienten der einzelnen Bindemittelleime der Serien T3_Q und T3_K sind in Abbildung 80 dargestellt.

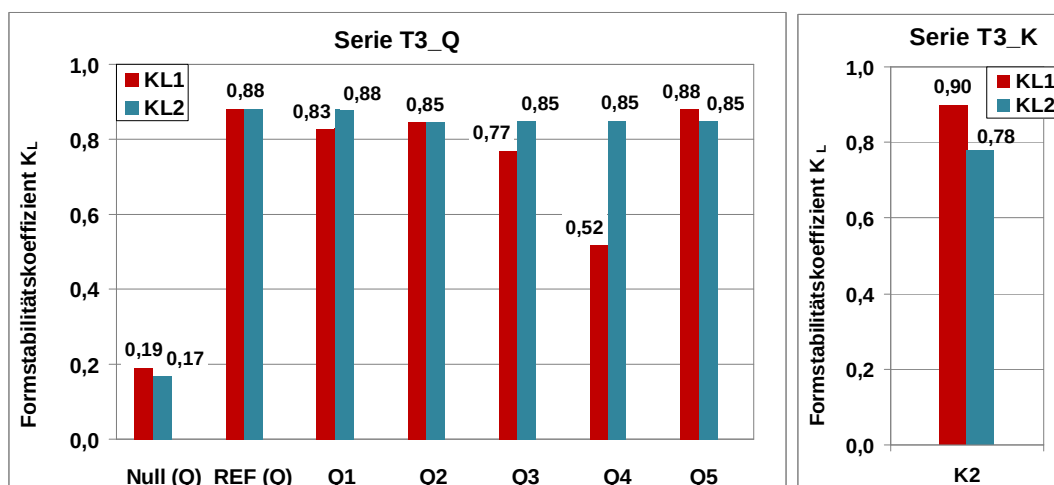


Abbildung 80: Formstabilitätskoeffizienten, Links: Gruppe T3_Q; Rechts: Gruppe T3_K

Wie aus Abbildung 80, links zu entnehmen ist, war die Formstabilitätskoeffizienten des Bindemittelleimes Null (Q) mit Werten von 0,19 (im 1. Zyklus) und 0,17 (im 2. Zyklus) auffällig gering. Dagegen erreichte die Referenzmischung mit Thixotropiermittel REF (Q) ebenso wie die Mischung Q5 (mit Stärke) im 1. Zyklus die höchste Formstabilität mit einem Koeffizienten von $K_{L1} = 0,88$. Die Leime Q1 und Q2 lagen mit Werten von 0,83 und 0,85 nur geringfügig darunter. Deutlich niedriger waren die Koeffizienten bei den Leimen Q3 ($K_{L1} = 0,77$) und insbesondere Q4 ($K_{L1} = 0,52$). Mit Ausnahme des Bindemittelleims Null (Q) wiesen im 2. Zyklus alle untersuchten Bindemittelleime der Serie T3_Q Formstabilitätskoeffizienten K_{L2} zwischen 0,85 und 0,88 auf.

Durch Austausch von Quarzmehl durch Kalksteinmehl in der Mischung K2 erhöhte sich der Formstabilitätskoeffizient im 1. Zyklus von 0,85 auf 0,90. Jedoch sank der Formstabilitätskoeffizient im 2. Zyklus deutlich auf 0,78 ab und lag damit um 8,0 % geringer gegenüber der Mischung Q2 (Abbildung 80, rechts).

In Abbildung 81 sind die Formstabilitätskoeffizienten der Bindemittelleime mit Metakaolin (Serie T3_M) dargestellt.

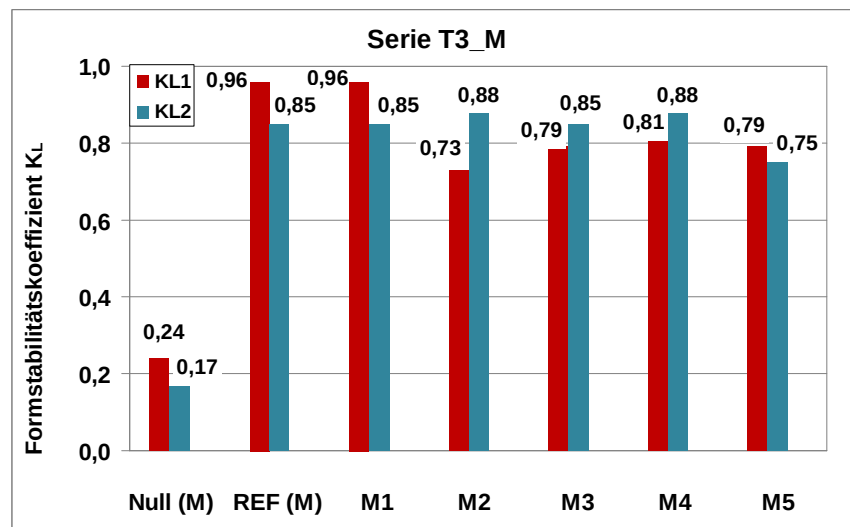


Abbildung 81: Formstabilitätskoeffizienten der Serie T3_M mit Metakaolin

Die Zugabe von Thixotropiermittel T3 zum Bindemittelleim Null (M) führte zu einer durchschnittlichen Erhöhung der Formstabilität um das 4,5-fache bei beiden Zyklen. Die Zugabe von thixotropierenden Zusätzen (Schichtsilikate und Stärke) in den Bindemittelleim REF (M) hatte keine Verbesserung des Formstabilitätskoeffizienten zur Folge. Insbesondere wurden gleiche Formstabilitätskoeffizienten für den Bindemittelleim M1 ermittelt, der darüber hinaus den Schichtsilikaten SK1 (Mineralgemisch aus Kaolinit, Illit und Quartz) enthielt. Im Gegensatz dazu wiesen die Bindemittelleime M2 bis M5 eine Verringerung von 15 bis 25% des Formstabilitätskoeffizienten in 1. Zyklus gegenüber Referenzleim REF (M) auf.

In 2. Zyklus wiesen alle untersuchten Bindemittelleime Formstabilitätskoeffizienten K_{L2} von 0,75 bis 0,88 auf. Diese Formstabilitätskoeffizienten liegen um rd. 12% unter dem Koeffizienten des 1. Zyklus der entsprechenden Bindemittelleime. Dies zeigt, dass die innere Struktur der Bindemittelleime zumindest teilweise wieder aufgebaut werden konnte. Besonders wirksam erwies sich das Hinzufügen von SK2 (Basis: Montmorillonit) in den Bindemittelleim M2. Dies führte zu einer Verbesserung des Formstabilitätskoeffizienten um rd. 20% (von $K_{L2} = 0,73$ auf $K_{L2} = 0,88$).

5.2.3.5 Gesamtbetrachtung und Diskussion. Bindemittelleime der Gruppe T3

In Abbildung 82 sind die Setzfließmaße der Bindemittelleime der Leimgruppe T3 (mit Thixotropiermittel T3, pulverförmig, Basis: Tetrasaccharide) den dazugehörigen Formstabilitätskoeffizienten für den 1. und 2. Prüfzyklus gegenübergestellt.

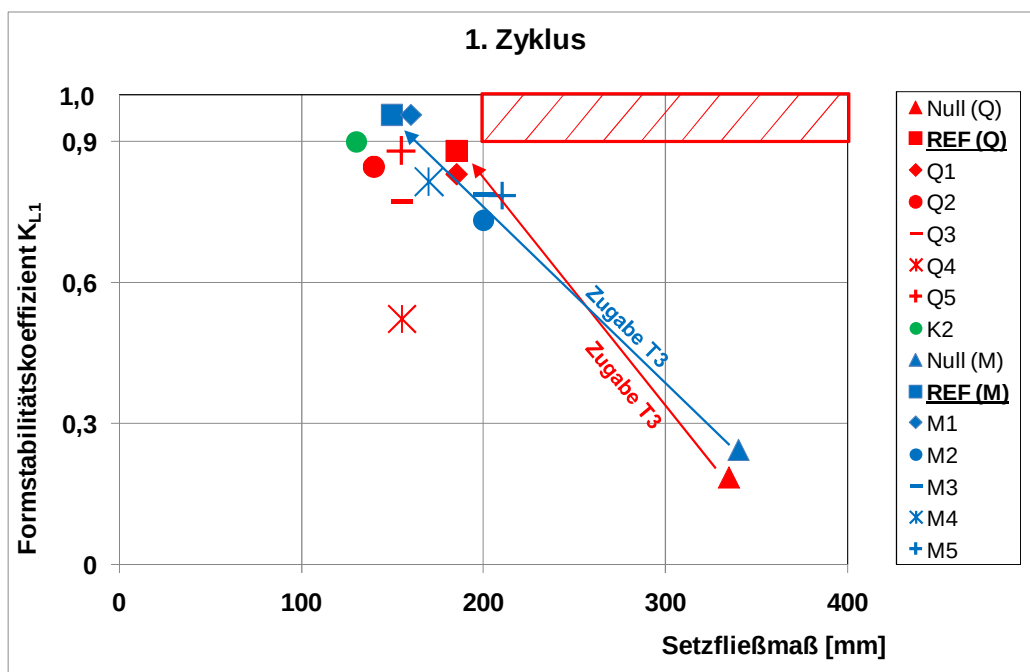
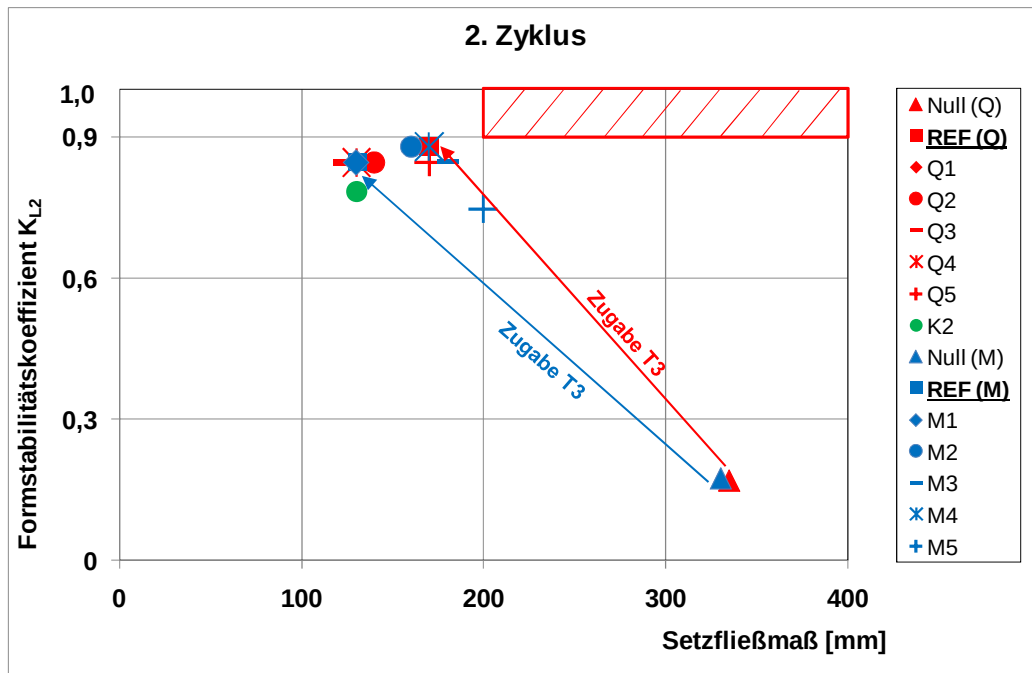


Abbildung 82: Zusammenhang zwischen dem Setzfließmaß und dem Formstabilitätskoeffizient;
a) 1. Zyklus



b) 2. Zyklus

Die angestrebten Zielgrößen für das Setzfließmaß (≥ 200 mm) und für die Formstabilität ($K_{L,2} \geq 0,90$) konnten bei keinem dieser Bindemittelleime vollständig erreicht werden. Allerdings wurde durch die Zugabe des Thixotropiermittels T3 in den thixotropiermittelfreien Bindemittelleimen (Null Q / M) insbesondere die Formstabilität der beiden Bindemittelleime mit Quarzmehl REF (Q) bzw. mit Metakaolin REF (M) in beiden Zyklen um das bis zu 5-fache erhöht. Mit Formstabilitätskoeffizienten im Bereich von 0,85 bis 0,96 lagen diese schon in der angestrebten Größenordnung für erhöhte Grünstandfestigkeit nach 5 bzw. 10 Minuten. Gleichzeitig bewirkte die Zugabe des Thixotropiermittels T3 zu den Nullmischungen allerdings auch eine Reduzierung des Setzfließmaßes um rd. 50%. Dieses Verhalten kann anhand des Mechanismus des eingesetzten Thixotropiermittels erklärt werden. Das verwendete Thixotropiermittel ist ein mit D-Glucuronsäure mikrobiell hergestelltes Welan, welches die im Leim kolloidal suspendierten Teilchen zu Flocken aggregiert. Das Ausflocken erfolgt durch elektrostatische Wechselwirkungen über die in den Seitenketten abgebaute L-Mannose oder L-Rhamnoseeinheiten zwischen den entgegengesetzten Ladungen der Polymer- und Zement-Teilchen [74][24]. Dieses Ausflocken führt nach Schmidt [117] und Lagaly [78] zur Entwicklung einer thixotropen Struktur, wobei die Wasser-Moleküle in Flocken und auf die Polymere-Moleküle eingeschlossen bzw. adsorbiert sind. Als Resultat ergibt sich eine Verringerung der Fließfähigkeit der Bindemittelleime, die durch Erhöhung der thixotropen Eigenschaften der Leime, die sich in den höheren Formstabilitätskoeffizienten widerspiegelt, zur Entwicklung einer thixotropen Struktur in den Suspensionen führt.

Aus den Abbildung 82 a) und b) ist zu erkennen, dass bei allen untersuchten Bindemittelleimen ein thixotropes Verhalten festgestellt werden konnte. Die ermittelten

Formstabilitätskoeffizienten im 1. Zyklus deuten darauf hin, dass während der 5-minütigen Wartezeit die innere Struktur der Leime aufgebaut wurde. Da im Vergleich zum 1. Zyklus ein Unterschied von 15 bzw. 20 mm zu den Setzfließmaßen des 2. Zyklus gemessen wurde, ergibt sich daraus, dass die im 2. Zyklus eingesetzte Energie ausreichend war, um die während der 5-minütigen Wartezeit (1. Zyklus) gebildete Struktur zu zerstören. Nach einer erneuten 10-minütigen Wartezeit (2. Zyklus) wurden die Formstabilitätskoeffizienten für die Serie T3_Q bestimmt, deren Werte im Durchschnitt um rd. 9% die Koeffizienten des 1. Zyklus übertrafen. Es ist auch zu erkennen, dass die Leime der Serie T3_M in beiden Zyklen denselben durchschnittlichen Formstabilitätskoeffizient: $K_{L1} = K_{L2} = 0,84$ aufwiesen.

Bei einer engeren Betrachtung zeigten dabei die Bindemittelleime Q1 (mit Quarzmehl und Schichtsilikate SK1 auf Kaolinit-Basis) und M5 (mit Metakaolin und Stärke) den besten Kompromiss aus hoher Fließfähigkeit und ausgeprägter Grünstandfestigkeit bzw. Formstabilität. Dies zeigte sich bei Q1 mit Setzfließmaßen von 185 mm (1. Zyklus) bzw. 170 mm (2. Zyklus) und entsprechenden Formstabilitätskoeffizienten von 0,83 bzw. 0,88 in beiden Zyklen. In gleicher Weise wies M5 Setzfließmaße von 210 (1. Zyklus) bzw. 200 mm (2. Zyklus) und Formstabilitätskoeffizienten von 0,79 (1. Zyklus) und 0,75 (2. Zyklus) auf.

Zusatzstoffe, die auf Kaolinit basieren, beispielsweise Metakaolin im Bindemittelleim M5 und Schichtsilikaten SK1 im Bindemittelleim Q1, tragen zur Entwicklung der thixotropen Struktur bei. Wie im vorherigen Abschnitt schon erwähnt wurde, bilden Kaolinit-Plättchen infolge von anziehenden Wechselwirkungen zwischen positiven Kanten und negativen Flächen eine Kartenhausstruktur, die nach einer Scherbeanspruchung wieder abgebaut werden kann. Die ausgeprägten thixotropen Eigenschaften des Bindemittelleims M5 kann auf die Tendenz der Stärke-Moleküle, Aggregate bzw. Flocken zu bilden, zurückgeführt werden. Dies ist nach Blaschek [24] auf das Amylopektin-Molekül (Hauptbestandteil des Stärke-Moleküles) zurückzuführen. Das Amylopektin-Molekül besteht aus einer Vielzahl relativ kurzer linearer glykosidisch gebundener Glucanketten (15–25 Glucoseeinheiten), die durch glykosidische Bindungen miteinander verknüpft und in Clustern angeordnet sind. Die Cluster sind wiederum durch etwas längere Ketten miteinander verbunden. Bei ausreichender Länge können auch die Amylopektinketten als Doppelhelices vorliegen, die durch intra- und intermolekulare Wechselwirkungen thixotrope Strukturen bilden können, wenn die Zement-Teilchen durch diese Biopolymere verbrückt sind [78][117].

Der Austausch von Quarzmehl durch Kalksteinmehl in der Mischung K2 der Serie T3_K führte in beiden Zyklen zu keiner Verbesserung des Kompromisses aus höher Setzfließmaß und Formstabilität.

5.3 Zusammenfassung

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse konnte allgemein festgestellt werden, dass die Fließfähigkeit und die thixotropen Eigenschaften der untersuchten Bindemittelleime primär von dem jeweiligen Thixotropiermittel abhängen. Die Zugabe unterschiedlicher thixotropierender Zusätze führte weiterhin zu deutlich variierenden Setzfließmaßen und thixotropen Eigenschaften, insbesondere bei der Verwendung von Thixotropiermittel auf Basis von modifizierten organischen Polymeren (T2).

Die für den Kompromiss zwischen hoher Fließfähigkeit und Grünstandfestigkeit innerhalb kürzester Zeit (5 bzw. 10 Minuten nach dem Einbau) maßgebenden Eigenschaften wurde an den Bindemittelleimen über das Setzfließmaß, den Formstabilitätskoeffizienten K_L (ermittelt an einem freistehenden Leimkörper) und die rheologischen Kennwerte (relative) Fließgrenze/Viskosität (ermittelt in Viskosimeter-Untersuchungen) bewertet. Um den beiden einander entgegenlaufenden Anforderungen (hohes Setzfließmaß und hohe Formstabilität) halbwegs gerecht werden zu können, wurden vorab hinsichtlich der Fließfähigkeit ein Setzfließmaß von ≥ 200 mm und ein Formstabilitätskoeffizient $K_L \geq 0,90$ definiert.

Anhand der Versuchsergebnisse ergab sich:

- Die Bindemittelleime der Gruppe T3 (mit Thixotropiermittel T3, Basis: Tetrasaccharide) wiesen im 1. sowie im 2. Zyklus ähnliche Setzfließmaße und Formstabilitätskoeffizienten K_L auf, was darauf hindeutet, dass das innere Gefüge in beiden Zyklen zumindest teilweise wieder aufgebaut werden konnte. In Gegensatz zu Bindemittelleimen der Gruppe T2 zeigten die Leime der Gruppe T3 keine Verflüssigung bzw. Erhöhung der Setzfließmaße und Verringerung der Formstabilitätskoeffizienten im 2. Zyklus.
- Die Zugabe von Thixotropiermittel T3 zu den Nullbindemittelleimen (Null Q und Null M) der Gruppe T3 bewirkte eine signifikante Erhöhung des Formstabilitätskoeffizienten K_L . Die Formstabilitätskoeffizienten der Bindemittelleime (REF Q und REF M) konnten um das rd. 4- bis 5-fache auf ca. 0,90 angehoben werden. Gleichzeitig ging dies allerdings mit einer Verringerung der Setzfließmaße des Bindemittelleims REF Q und REF M auf 50% des ursprünglichen Wertes (Leime Null Q und Null M) einher. Dennoch konnte man sich mit diesen Kombinationen den angestrebten kombinierten Eigenschaften (Setzfließmaß und Formstabilität) tendenziell bereits eindeutig nähern.
- Das Hinzufügen von Thixotropiermittel T3 in die Bindemittelleime Null (Q) und Null (M) führte zu einer signifikanten Erhöhung der rel. Fließgrenze τ_0 (auf 42 bzw. 24,5 Nmm) und zu einer 2,6- bzw. 2,9-fachen Erhöhung der rel. Viskosität η . Erwartungsgemäß spiegelten

sich diese Erhöhungen der rel. Fließgrenze und Viskosität in den erhöhten Formstabilitätskoeffizienten sowie in den verringerten Setzfließmaßen der Bindemittelleime REF (Q) und REF (M) der Gruppe T3 wieder.

- Die Zugabe weiterer thixotropierender Zusätze zu diesen mit Thixotropiermittel T3 bereits versetzten Referenzbindemittelleimen (REF Q und REF M) führte, trotz einer Verringerung der rel. Fließgrenze τ_0 der Bindemittelleime der Serie T3_Q i. Allg. um rd. 30 %, zu einem Abfall der Setzfließmaße um bis zu rd. 70 % bei nahezu unveränderter Formstabilität. Der Rückgang des Setzfließmaßes ist auf die Erhöhung des Wasser-Feststoff-Verhältnisses und die Zunahme der interpartikulären Wechselwirkungen, die nach Hinzufügen des thixotropierenden Zusatzes entstanden sind, zurückzuführen.
- Bindemittelleime der Serie T3_M (mit Metakaolin) wiesen im Vergleich zu Leimen der Serie T3_Q (mit Quarzmehl) höhere rel. Fließgrenzen und Viskositäten auf. Diese spiegeln sich (bei ähnlichen Setzfließmaßen) in höheren Thixotropiezahlen und letztendlich höheren Formstabilitätskoeffizienten wieder.
- Die alleinige Zugabe des Thixotropiermittels T2 (flüssig, Basis: modifizierte organische Polymere) führte im Gegensatz zum Thixotropiermittel T3 zu keiner signifikanten Verbesserung der Formstabilität. Wurden diesen Leimen jedoch weitere thixotropierende Zusätze (Schichtsilikate SK1: Mineralgemisch aus Kaolinit, Illit und Quarz sowie Stärke ST) zugegeben, so konnte insbesondere der Formstabilitätskoeffizient K_L weiter gesteigert (teilweise bis an den angestrebten Mindestwert heranreichend), allerdings wiederum auf Kosten der Fließfähigkeit.
- Die Bindemittelleime der Gruppe T3 REF (Q), Q1 (mit SK1, Basis: Gemisch aus Kaolinit, Illit und Quarz), M3 (mit SK3, Basis: aktivierter Bentonit) und M5 (mit ST, Basis: Stärke) wiesen den besten Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und Formstabilität der untersuchten Bindemittelleime auf. Daher können diese Leime durchaus als Basis für weitere Studien im Hinblick auf die Entwicklung thixotrop eingestellter Betone herangezogen werden.

6. Untersuchungen an thixotrop eingestellten SVB

6.1 Allgemeines

In diesen Untersuchungen sollte insbesondere die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den Bindemitteluntersuchungen (Abschnitt 5.) auf das Betonverhalten überprüft werden. Die entwickelten Betone wurden in Anlehnung an Okamuras Verfahren (Abschnitt 2.2.2) im Baustofflabor in einem 120 l Zwangsmischer hergestellt, wobei zunächst die trockenen Komponenten, wie z.B. Zement, Gesteinskörnung und Betonzusatzstoffe im Mischer für 60 Sekunden trocken gemischt wurden. Anschließend wurde das Zugabewasser zusammen mit den flüssigen Zusatzmitteln zugegeben. Die Mischzeit nach Wasserzugabe betrug 10 Minuten.

6.2 Entwicklung der Matrix (Mörtel) für einen SVB

6.2.1 Setzfließmaß und Formstabilität

Nach Okamura sind Mörtelsysteme als Matrix für SVB geeignet, wenn sie ein Setzfließmaß von 245 mm und Trichterauslaufzeit von rund 10 s aufweisen [73]. Es ist sinnvoll darauf hinzuweisen, dass die Verarbeitbarkeitseigenschaften der entwickelten Mörtel für Selbstverdichtung ein Setzfließmaß des Betons von 700 ± 50 mm und eine Trichterauslaufzeit von rd. 15 s zur Folge haben. Nach DIN EN 206-9 [N 28] sind Betone mit Setzfließmaßen von 700 ± 50 mm in der Setzfließmaßklasse SF2 (660-750 mm) einzuordnen.

Hinsichtlich des Einsatzbereichs des zu entwickelnden SVBs, d. h. „Fahrbahndecken aus Beton bzw. nicht oder leicht bewehrte Bauteile“ bei denen der Beton ungehindert ausbreiten kann, entspricht nach den europäischen Richtlinien für SVB [N 32] die Setzfließmaßklasse SF1 (550 bis 650 mm). Aufgrund der gewünschten erhöhten Grünstandfestigkeit des zu entwickelnden SVBs, sollen die untersuchten Mörtel einen Formstabilitätskoeffizienten $K_M \geq 0,90$ aufweisen, der analog zu Abschnitt 4.2, Gleichung 24, zu bestimmen ist. Um den beiden einander entgegenlaufenden Anforderungen (Setzfließmaß und Formstabilität) halbwegs gerecht werden zu können und im Hinblick auf den Einsatzbereich des SVBs (Straßenbau, Setzfließmaßklasse SF1), wurde für die zu entwickelnden Mörtel statt eines Setzfließmaßes von 245 mm (Mörtel für SVB der Setzfließmaßklasse SF2/SF3), vorab ein Setzfließmaß ≥ 200 mm definiert.

6.2.2 Grünstandfestigkeit

Im Abschnitt 5.2 (Auswirkung von Kombinationen zweckmäßiger Zusätze) wurde festgestellt, dass zwei Bindemittelleime mit zwei verschiedenen Setzfließmaßen den gleichen

Formstabilitätskoeffizient aufweisen können. Die Formstabilität eines Leims ergibt sich als Resultat der Entwicklung der Grünstandfestigkeit einer Mischung, welche auf die thixotropen Eigenschaften des Mörtels zurückzuführen ist.

Für die Entwicklung der thixotropen Eigenschaften bzw. der Grünstandfestigkeit eines Mörtels sind die rheologischen Eigenschaften (dyn. Fließgrenze und dyn. Viskosität) sowie die Entwicklung der statischen Fließgrenze einer zementösen Suspension zusammen verantwortlich [16][29]. Da die rheologischen Eigenschaften (dyn. Fließgrenze und dyn. Viskosität) zweier Leime mit verschiedenen Setzfließmaßen selbstverständlich unterschiedlich sind, ist die Entwicklung der Thixotropie bzw. der Aufbau der inneren Struktur und die resultierende Grünstandfestigkeit beider Bindemittelleime unterschiedlich [71][16]. Dies deutet darauf hin, dass obwohl 2 Mischungen den gleichen Formstabilitätskoeffizient K aufweisen, eine unterschiedliche im Inneren aufgebaute Struktur besitzen können. Aus diesem Grund ist es nachvollziehbar, dass die Bestimmung der Formstabilität einer Mischung mittels eines Formstabilitätskoeffizienten K nicht ausreichend ist, um den Aufbaugrad der inneren Struktur zu charakterisieren. Um die Eignung einer entwickelten Mischung für den Einsatz in Großversuchen oder im Straßenbau zu bestimmen, muss die entwickelte Grünstandfestigkeit mit einer größeren Genauigkeit, und nicht nur ausgehend eines Formstabilitätskoeffizienten K, ermittelt werden.

Die Bestimmung der Grünstandfestigkeit des freistehenden Mörtelkörpers wurde unmittelbar nach dem Entschalen bestimmt. Der entsprechende freistehende Probekörper wurde in Richtung der vertikalen Achse in einer eigens entwickelten Hebelmaschine eingebracht und zentriert. Anschließend wurde über den Hebel die Belastung auf die Körper graduell aufgebracht. Um die Belastung zu erhöhen, wurde am Ende des Hebels Sand mit einer konstanten Geschwindigkeit in ein Gefäß gefüllt. Die Höchstnormalspannung, d.h. die Spannung bei Normalkraftbeanspruchung, bei der ein Absinken der Probenoberfläche um 10 mm erreicht wurde, war zu ermitteln (Abbildung 83).



Abbildung 83: Bestimmung der Grünstandfestigkeit

6.3 Entwicklung eines SVBs

6.3.1 Basisuntersuchungen am SVB

Im Wesentlichen beschränken sich die Basisuntersuchungen an SVBs auf die Fließeigenschaften und die Formstabilität eines freistehenden frischen Betonkörpers, der auf Basis der im Abschnitt 6.2 entwickelten Mörtel, hergestellt wird.

Das minimale angestrebte Setzfließmaß der thixotrop eingestellte Betone wurde auf 500 mm festgelegt. Dieser Wert ergab sich aus einer Verringerung um 50 mm (zulässige Abweichung für einzelne Prüfergebnisse) des minimalen erforderlichen Setzfließmaßes eines herkömmlichen SVBs der Setzfließmaßklasse SF1 (550 mm, DIN EN 206-9 [N 28]).

Hinsichtlich der Grünstandfestigkeit müssen die Betone einen Formstabilitätskoeffizient $K_W \geq 0,90$ aufweisen. Für alle untersuchten Betone wurde der in Abbildung 84 dargestellte Versuchsablauf eingehalten.

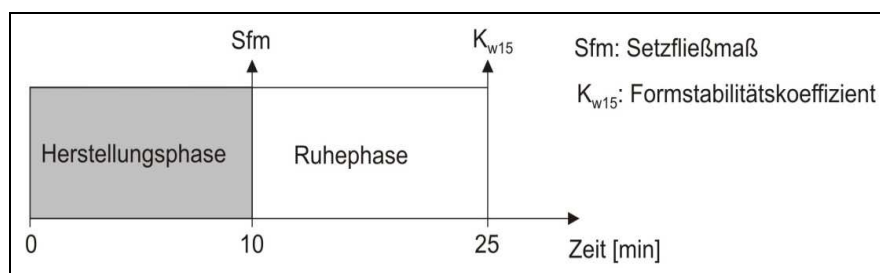


Abbildung 84:
zeitlicher
Versuchsablauf
zur Bestimmung
des
Setzfließmaßes
und
Formstabilität

Hierzu wurde an den Frischbetonen das jeweilige Setzfließmaß unmittelbar nach der Betonherstellung ermittelt [N 1]. Zur Bestimmung der Formstabilität wurde eine Würfelschalung mit einer Kantenlänge von 150 mm einlagig und ohne externe Verdichtung mit Beton befüllt. Nach 15 Minuten wurde der Probekörper entschalt und die entsprechende Breite (B), Länge (L) und Höhe (H) des freistehenden Betonkörpers gemessen. Daraus wurde anschließend der Formstabilitätskoeffizient nach folgender Gleichung bestimmt:

$$K_{W15} = \frac{15}{(B + L - H)}$$

Gleichung 26

Der Formstabilitätskoeffizient K_{W15} wurde empirisch nach einer systematischen Datenerhebung von mehreren Untersuchungen an Betonen und letztendlich anhand eines linearen Gleichungssystems ermittelt. Im Formstabilitätskoeffizient K_{W15} wurden die drei Parameter der Formstabilität (Breite „B“, Länge „L“ und Höhe „H“) in einem einzigen Wert erfasst. Mittels der Einführung des Formstabilitätskoeffizienten K_{W15} war es möglich, die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen zu vergleichen.

Je näher dieser Formstabilitätskoeffizient bei 1 liegt, umso genauer entspricht die Form freistehenden Betonkörpers dem des Würfels (150 mm Kantenlänge) und umso höher ist somit die Formstabilität der jeweiligen Betonmischung zu bewerten.

6.3.2 Hauptuntersuchungen

6.3.2.1 Allgemeines

Während in den in Abschnitt 6.1 beschriebenen Basisuntersuchungen ausschließlich die Fließfähigkeit und Formstabilität von selbstverdichtenden Betonen allgemein untersucht wurden, sind in dieser Versuchsserie speziell Straßenbetone mit einbezogen, für die auch die weiteren anwendungsrelevanten Eigenschaften mit erfasst wurden. Der Frischbeton sollte dabei möglichst den Anforderungen eines selbstverdichtenden Betons genügen, gleichzeitig eine hohe Grünstandfestigkeit aufweisen, und der Festbeton die sonstigen Anforderungen an einen Straßenbeton erfüllen.

Analog zum Abschnitt 6.1 wurde für die entwickelten Betone der in Abbildung 85 gezeigte zyklische Versuchsablauf eingehalten.

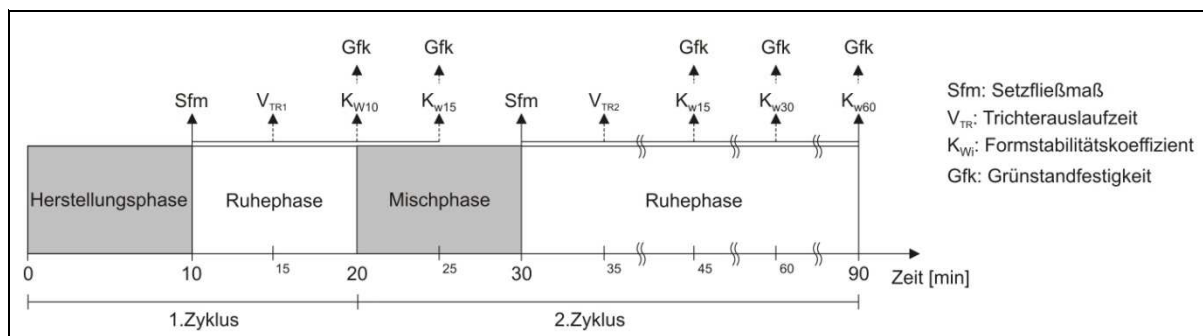


Abbildung 85: zeitlicher Versuchsablauf

6.3.2.2 Frischbetonuntersuchungen

6.3.2.2.1 Setzfließmaß und Formstabilität

Die Anforderungen bezüglich der Konsistenz sowie der Formstabilität des zu entwickelnden SVBs mit ausgeprägten thixotropen Eigenschaften wurden wie im Abschnitt 6.3.1 festgelegt.

Die Betone müssen unmittelbar nach Mischende ein minimales Setzfließmaß von 500 mm aufweisen. Die Konsistenz des Frischbetons wurde durch Ermittlung des Setzfließmaßes nach DIN EN 12350-8 [N 15] bestimmt.

Die zu entwickelnden Betone müssen einen Formstabilitätskoeffizient $K_{wi} \geq 0,90$ aufweisen (Gleichung 26). Im Gegensatz zu den Basisuntersuchungen wurde in den Hauptuntersuchungen die Wartezeit des Entschalens der Probekörper im 1. Zyklus um 5 Minuten, von 15 auf 10 Minuten, verringert. Dieses geschah um den Anspruch aus der Praxis zu simulieren.

6.3.2.2.2 Trichterauslaufzeit

Zur Bewertung der Viskosität des zu untersuchenden Betons wurde ein V-förmiger Auslaufrichter gefüllt. Der Trichter wurde bis zum Rand gefüllt und anschließend nach dem Öffnen der Verschlussklappe die Zeit T_v nach DIN EN 12350-9 [N 16] in Sekunden ermittelt, die der Beton benötigte, um aus dem Trichter auszulaufen. Je schneller der Beton aus dem Trichter ausläuft, desto geringer ist seine Viskosität.

6.3.2.2.3 Frischbetonrohddichte und Luftgehalt

Innerhalb von 10 Minuten nach Betonherstellung wurde die Frischbetonrohddichte in Anlehnung an DIN EN 12350-6 [N 13] und der Luftgehalt mit einem LP-Topf in Anlehnung an DIN EN 12350-7 [N 14] (Druckausgleichsverfahren) bestimmt. Mit Ausnahme der Referenzmischung M-1 erfolgten die Prüfungen aller untersuchten Betone ohne Verdichtung im LP-Topf.

6.3.2.2.4 Grünstandfestigkeit

Die Bestimmung der Grünstandfestigkeit des freistehenden Betonkörpers stellt einen wesentlichen Parameter zur Bestimmung der Eignung der entwickelten Mischungen dar, um diese mit dem Mini-Paver untersuchen zu können, und damit die Beurteilung der Eignung einer Mischung für den nächsten Entwicklungsschritt, nämlich dem Einsatz in Großversuchen (large-scale test) [144][145]. Die Grünstandfestigkeit der Betone wurde analog zu den Mörtel-Untersuchungen ermittelt (Abschnitt 6.2.2).

6.3.2.2.5 Beurteilung der Formstabilität anhand eines Mini-Pavers

Der Mini-Paver wurde von Wang [145] entwickelt und lehnt sich an dem L-Box-Versuch an. Mittels dieses Mini-Pavers konnten die Anforderungen an den selbstverdichtenden Beton im Straßenbau unter Laborbedingungen reproduziert werden. Dabei wurde der fließfähige Beton auf die obere Platte gegossen bis der vertikale Schenkel mit Beton gefüllt war. Anschließend wurde der Mini-Paver mit einem Motorantrieb nach vorne gezogen, so dass der Beton in den horizontalen Schenkel fließen konnte und extrudiert wird. Nach Verlassen des horizontalen Schenkels des Mini-Pavers muss der extrudierte Betonkörper unterstützungsfrei bzw. ohne Hilfe einer Schalung seine Form behalten (Abbildung 86).

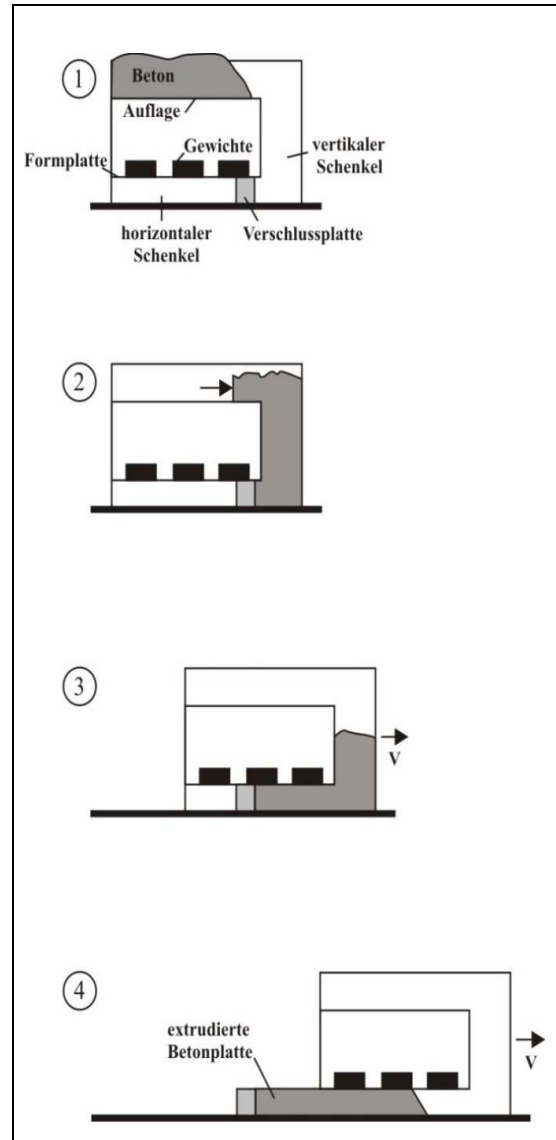
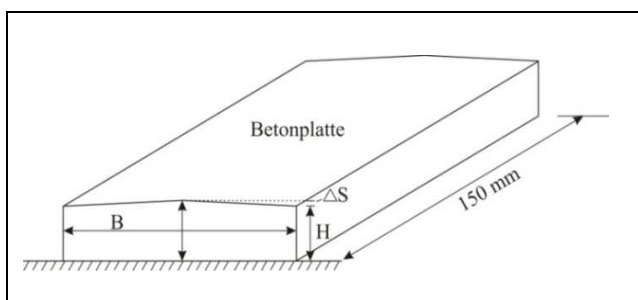


Abbildung 86: Links: verwendetes maßstäbliches Modell, Rechts: schematische Darstellung der Versuche

Analog zu der Bestimmung der Formstabilität im Abschnitt 6.1 wurde auch hier das Absinken der Probenoberfläche im Kantenbereich gemessen und anhand des hierfür definierten Formstabilitätskoeffizienten K_{MP} beurteilt.



$$K_{MP} = \frac{15}{(B + L - 15)}$$

Gleichung 27

6.3.2.3 Festbetonuntersuchungen

6.3.2.3.1 Druckfestigkeit

Die Betondruckfestigkeit der einzelnen Betone wurde im Betonalter von 7 und 28 Tagen an jeweils 3 Proben nach DIN EN 12390-3 [N 22] bestimmt. Die Herstellung und Lagerung der Probekörper zur Bestimmung der Druckfestigkeit erfolgte in Anlehnung an DIN EN 12390-2 [N 21] nationaler Anhang NA. Abweichend von der Norm wurden die Probekörper der untersuchten Betone ohne jegliche externe Verdichtung hergestellt, d.h. der Beton wurde über die Seiten der Würfelschalung eingefüllt. Lediglich die Probekörper der Mischung M-1 (Referenzmischung) wurden auf einem Rütteltisch nach DIN EN 12390 - 2 [N 21] verdichtet.

6.3.2.3.2 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit der einzelnen Betone wurde in einem 4-Punkt Biegezugversuch nach DIN EN 12390-5 [N 23] bestimmt. Analog zu den Würfeln für die Druckfestigkeitsprüfung wurden nur die Balken der Mischung M-1 mittels eines Rütteltisches nach DIN EN 12390 - 2 [N 21] verdichtet.

6.3.2.3.3 Frost-Taumittel Widerstand (CDF-Test)

Um die Dauerhaftigkeit von Betonen im Hinblick auf den Frost-Tausalz-Widerstand beurteilen zu können, wurde der von Setzer und Auberg entwickelte CDF-Test (**C**apillary **S**uction, **D**e-icing agent and **F**reeze-thaw Test) herangezogen. Zur Prüfung des Frost-Taumittel-Widerstands der Betone wurde der CDF-Test nach RILEM Recommendation [N 30] durchgeführt. Je Betonzusammensetzung wurden fünf Probekörper in 150 mm-Würfelformen nach DIN EN 12390-1 [N 20] hergestellt, wobei die Probekörper der thixotrop eingestellten Betone ohne externe Verdichtung hergestellt wurden. Die Oberflächenabwitterung, die Feuchtaufnahme sowie die Gefügeschädigung jedes Probekörpers wurden nach 14 und nach 28 Frost-Tau-Wechseln (FTW) bestimmt.

7. Ergebnisse der Untersuchungen an thixotrop eingestellten SVBs

7.1 Ermittlung des Mindestwassergehaltes β_p

Der erste Schritt zur Entwicklung der Matrix (Mörtel) eines SVBs ist die Ermittlung des Mindestwassergehaltes β_p (Wasserrückhaltemaß) seines Mehlkorngemisches anhand von Untersuchungen an Bindemittelleimen (Abschnitt 2.2.2). Das Wasserrückhaltemaß β_p wurde für eine Bindemittelleimzusammensetzung mit einem Zement-Quarzmehl-Volumenverhältnis von 65/35 ermittelt. Das Wasser-Mehlkorn-Volumenverhältnis (V_w/V_p) der untersuchten Bindemittelleime variierte von 1,1 bis 1,25. Dabei blieben die Mehlkornzusammensetzung und das Volumen der Leimmischung mit 550 cm³ konstant. In Tabelle 14 sind Bindemittelleimzusammensetzungen sowie die Ergebnisse des rel. Setzfließmaßes Γ_i für die entsprechende Wasser-Mehlkorn-Volumenverhältnisse (V_w/V_p) aufgelistet. Darin ist zu erkennen, dass keine Zusatzmittel (Fließmittel, Schichtsilikate, Stabilisierer und Luftporenbildner) in die Bindemittelleime eingemischt wurden.

Tabelle 14: Ermittlung der β_p -Wertes

Volumen der Leimmischung	[cm ³]	550			
Zement-Quarzmehl-Volumenverhältnis	[-]	65/35			
V_w / V_p	[-]	1,1	1,15	1,2	1,25
Wasser	[g]	288,1	294,2	300,0	305,6
Zement	[g]	527,7	515,5	503,8	492,6
Quarzmehl	[g]	238,3	232,8	227,5	222,4
Setzfließmaß	[mm]	180	200	215	245
Rel. Setzfließmaß	[Γ_i]	2,24	3,0	3,58	5,0

In Abbildung 87 sind die ermittelten rel. Setzfließmaße Γ_i und den β_p -Wert dargestellt.

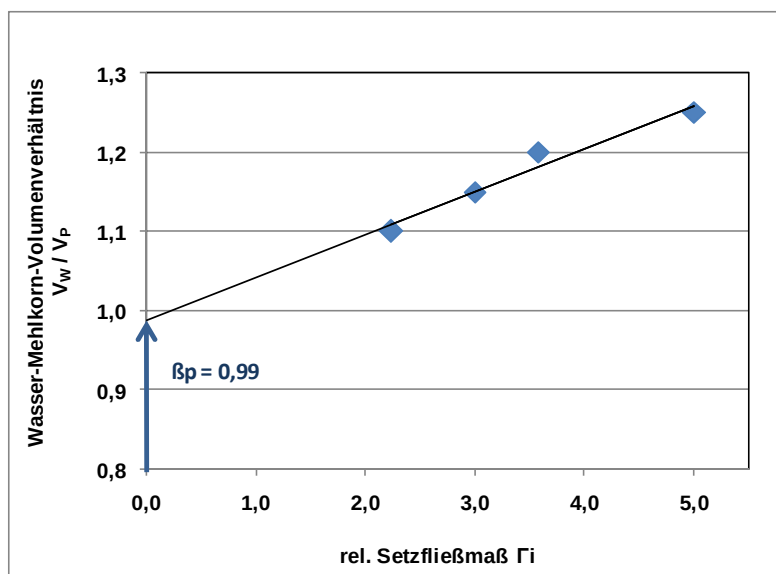


Abbildung 87: Bestimmung des Mindestwassergehaltes β_p

Der in den Bindemittelleimuntersuchungen ermittelte Mindestwassergehalt β_p betrug 0,995. Wie im Abschnitt 2.2.2 erläutert, stellt β_p den Ausgangswert für die empirische Rezepturentwicklung des Mörtels für einen SVB dar [73] [32].

7.2 Entwicklung der Matrix (Mörtel) für einen SVB

7.2.1 Ausgangsuntersuchungen

Im Hinblick auf den angestrebten Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und hoher Formstabilität wurden, ausgehend von dem gewohnten β_p , zwei verschiedene Mörtelgruppen entwickelt, die sich nach Art des verwendeten Thixotropiermittels unterschieden. In dieser Versuchsreihe wurden diejenigen Thixotropiermittel eingesetzt, die im Abschnitt 5.2 die besten Ergebnisse erzielt hatten.

Die untersuchten Mörtelzusammensetzungen sind aus Tabelle 15 und Tabelle 16 zu entnehmen. In beiden Gruppen wurde der Einfluss der Thixotropiermittel auf die rheologischen und thixotropen Eigenschaften der Mörtel unter Variation des Fließmittelgehaltes FM 2 (auf PCE-Basis) untersucht. Die Mörtelmischungen der Gruppe A (Tabelle 15) wurden mit Thixotropiermittel T2 auf Basis von modifizierten organischen Polymeren hergestellt. Die Mörtel der Gruppe B enthielten Thixotropiermittel T3 auf Basis von nichtionischen Polysacchariden. Für die Herstellung der Mörtel kam ein getrockneter, quarzitischer Rheinsand nach DIN EN 12620 [N 24] zum Einsatz. Die verwendete Sieblinie ist im Anhang A, Abbildung A-1 dargestellt.

Mörtel, der als Nullmischung (Null Q) in den 2 untersuchten Gruppen bezeichnet ist, enthielt kein Thixotropiermittel und einen Fließmittelgehalt von 0,75 M.-% v. Z. bei ansonsten gleicher Zusammensetzung.

Tabelle 15: Mörtelmischungen der Gruppe A, mit Thixotropiermittel T2 (0,5 M.-% v. Z.)

		Gruppe A					
Ausgangsstoffe		Null (Q)	Q11	Q12	Q13	Q14	Einheit
Quarzmehl		0,45					[M.-% v. Z.]
Zusatzmittel	LP	0,1					[M.-% v. Z.]
	Thixo T2	0	0,5				[M.-% v. Z.]
	FM 2	0,75	0,75	1,25	1,5	1,75	[M.-% v. Z.]
w/z-Wert		0,51					[-]

Tabelle 16: Mörtelmischungen der Gruppe B, mit Thixotropiermittel T3 (0,5 M.-% v. Z.)

		Gruppe B					
Ausgangsstoffe		Null (Q)	B1	B2	B3	B4	Einheit
Quarzmehl		0,45					[M.-% v. Z.]
Zusatz- mittel	LP	0,1					[M.-% v. Z.]
	Thixo T3	0	0,5				[M.-% v. Z.]
	FM 2	0,75	0,75	1,25	1,5	1,75	[M.-% v. Z.]
w/z-Wert		0,51					[-]

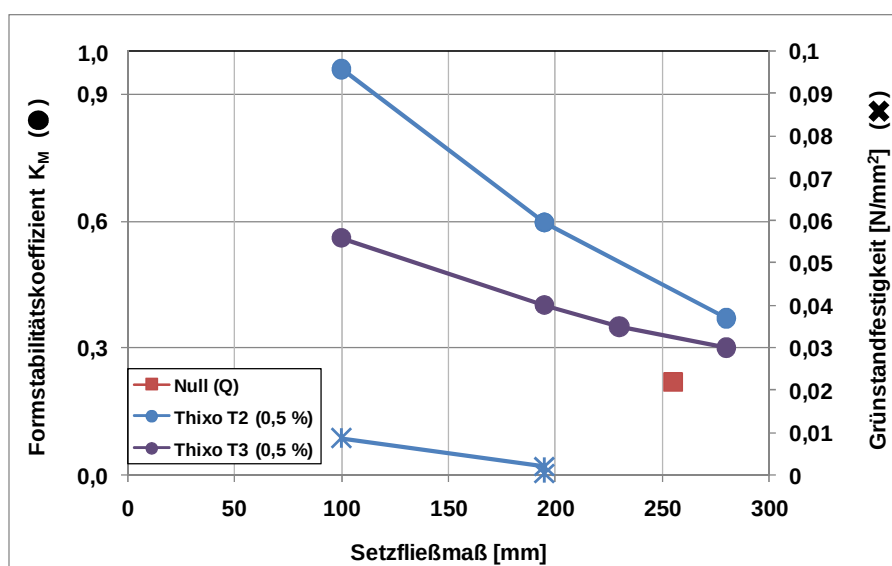


Abbildung 88: Zusammenhang zwischen: - Setzfließmaß und Formstabilitätskoeffizient K_M (●)
 - Setzfließmaß und Grünstandfestigkeit (X)

von Mörtelmischungen mit Thixotropiermittel T2 und mit Thixotropiermittel T3

Die angestrebten Zielgrößen (Setzfließmaß ≥ 200 mm und Formstabilitätskoeffizient $K_M \geq 0,90$) wurden weder bei den Mörteln der Gruppe A (mit Thixotropiermittel T2) noch der Gruppe B (mit Thixotropiermittel T3) erreicht. Allerdings wiesen die Mörtel mit Thixotropiermittel T2 (auf Basis von modifizierten organischen Polymeren) einen besseren Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und hoher Formstabilität gegenüber den Mörtelmischungen der Gruppe T3 auf.

Die Zugabe von Thixotropiermittel T2 und T3 zum Mörtel Null (Q) führte in beiden Gruppen zu einem Rückgang des Setzfließmaßes um rd. 60 %, von 255 auf 100 mm. Mit dem Rückgang der Setzfließmaße des Nullbindemittels Null (Q) ist auch eine Erhöhung bis um das 4,4-fache der Formstabilitätskoeffizienten K_M zu erkennen. Besonders wirksam zeigte sich das Thixotropiermittel T2 auf Basis von modifizierten organischen Polymeren. Wie aus Abbildung 88 ersichtlich ist, waren die Formstabilitätskoeffizienten der Mörtel mit Thixotropiermittel T2 im Vergleich zu denjenigen, die mit Thixotropiermittel T3 hergestellt

wurden, für ähnliche Setzfließmaße mit Werten von 0,37 bis 0,96 um bis zu rd. 70% höher. Aufgrund der reduzierten Formstabilitätskoeffizienten, die die Mörtel mit Thixotropiermittel T3 aufwiesen, war die Grünstandfestigkeit dieser Mörtelmischungen nicht bestimmbar. Im Gegensatz dazu wurden in Mörteln mit Thixotropiermittel T2 Grünstandfestigkeiten von 0,0008 bis 0,0087 N/mm² bestimmt. Dies bedeutet, dass mit einer Erhöhung des Setzfließmaßes um rd. 95% die Grünstandfestigkeit um fast das 9-fache verringert wurde. Dies bestätigt die im Abschnitt 5.1.8 diskutierten Ergebnisse einer exponentiellen Verringerung der Grünstandfestigkeit und der daraus resultierenden Formstabilität mit zunehmender Fließfähigkeit der Mischungen.

7.2.2 Optimierung der Matrix

Ausgehend von Mörtelmischungen der Gruppe A mit Thixotropiermittel T2 auf Basis von modifizierten organischen Polymeren, die einen besseren Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und hoher Formstabilität gegenüber Mörtelmischungen der Gruppe T3 zeigten, wurden zwei weitere Mörtelgruppen (Gruppe A1 und A2) entwickelt. Das Ziel war es, die angestrebten Zielgrößen (Setzfließmaß ≥ 200 mm und Formstabilitätskoeffizient $K_M \geq 0,90$) zu erreichen. Die untersuchten Mörtelzusammensetzungen sind aus Tabelle 17 und Tabelle 18 zu entnehmen.

Bei den Mörtelmischungen der Gruppe A1 wurde der Anteil des Thixotropiermittel T2 verdoppelt, von 0,5 auf 1,0 M.-% v. Z., um der Einfluss von Thixotropiermittel auf die rheologischen und thixotropen Eigenschaften der Mörtel unter Variation des Fließmittelgehaltes (FM 2 auf PCE-Basis) zu untersuchen. Als Referenzmischung dieser Gruppe diene Mörtel Q14 der Gruppe A.

Ausgehend vom Mörtel Q17 der Gruppe A1 wurde der Anteil an Thixotropiermittel T2 wiederum um 0,5 % in Mörteln der Gruppe A2 erhöht, von 1,0 auf 1,5 M.-% v. Z. Wie bei Gruppe A1 wurde der Einfluss der Variation von Thixotropier- und Fließmittelgehalt in den Mörtelmischungen der Gruppe A2 untersucht.

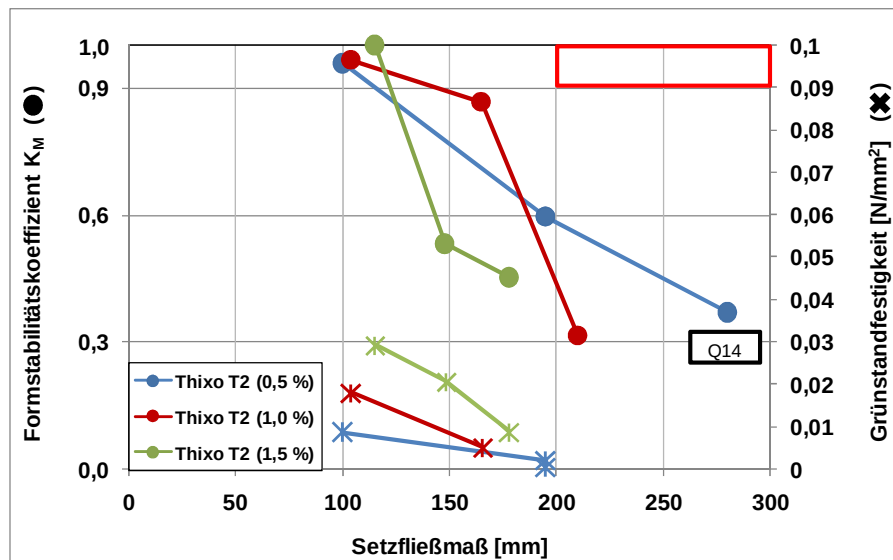
Tabelle 17: Mörtelmischungen der Gruppe A1. Erhöhung des Thixotropiermittelgehalt auf 1,0 M.-% v. Z.

		Gruppe A1				
Ausgangsstoffe		REF (Q14)	Q15	Q16	Q17	Einheit
Quarzmehl		0,45				[M.-% v. Z.]
Zusatz- mittel	LP	0,1				[M.-% v. Z.]
	Thixo T2	0,5	1,0			[M.-% v. Z.]
	FM 2	1,75	1,75	2,75	3,25	[M.-% v. Z.]
w/z-Wert		0,51				[-]

Tabelle 18: Mörtelmischungen der Gruppe A2. Erhöhung des Thixotropiermittelgehalt auf 1,5 M.-% v. Z.

		Gruppe A2				
Ausgangsstoffe		REF (Q17)	Q18	Q19	Q20	Einheit
Quarzmehl		0,45				[M.-% v. Z.]
Zusatz- mittel	LP	0,1				[M.-% v. Z.]
	Thixo T2	1,0	1,5			[M.-% v. Z.]
	FM 2	3,25	3,25	4,25	5,25	[M.-% v. Z.]
w/z-Wert		0,51				[-]

Die Ergebnisse des Zusammenhanges zwischen Setzfließmaß und Formstabilitätskoeffizient K_M (●) sowie Setzfließmaß und Grünstandfestigkeit (x) der Mörtelmischungen aus den Gruppen A1 und A2 sind in Abbildung 89 aufgeführt.

**Abbildung 89: Zusammenhang zwischen: - Setzfließmaß und Formstabilitätskoeffizient K_M (●)**

- Setzfließmaß und Grünstandfestigkeit (x)

von Mörtelmischungen mit Thixotropiermittel T2 und zunehmenden Fließmittelgehalt

Anhand der Ergebnisse, die in Abbildung 89 dargestellt sind, zeigte sich, dass keiner der Mörtel den angestrebten Zielbereich (Setzfließmaß ≥ 200 mm und Formstabilitätskoeffizient $K_M \geq 0,9$) erreichte. Allerdings wurden die im Abschnitt 5.2.2.4 (Basisuntersuchungen an Bindemittelleimen) ermittelten Ergebnisse bezüglich der positiven Auswirkung des Thixotropiermittels auf die Entwicklung der Grünstandfestigkeit bestätigt. Durch die Erhöhung des Thixotropiermittelgehalts von 0,5 auf 1,0 M.-% v. Z. wurden die Grünstandfestigkeiten der Mörtelmischungen bei gleichen Setzfließmaßen maximal um das 2,3-fache erhöht.

Es ist auch zu erkennen, dass Mörtel mit einem Thixotropiermittelgehalt von 0,5 (Gruppe A, Tabelle 15) und 1,0 M.-% v. Z. (Gruppe A1, Tabelle 17) einen guten Kompromiss zwischen Setzfließmaß und Formstabilität bis zu Setzfließmaßwerten von 165 mm aufwiesen. Im

Widerspruch hierzu zeigten Mörtel der Gruppe A2 (Tabelle 18), die die höchsten Grünstandfestigkeiten aufwiesen, die niedrigsten Formstabilitätskoeffizienten K_M . Der Mörtel Q14 wies mit 280 mm das höchste Setzfließmaß aller entwickelten Mörtelmischungen auf. Zugleich zeigte Mörtel Q14 einen Formstabilitätskoeffizient K_M von rd. 0,4 auf, der allerdings weit entfernt von dem gewünschten $K_M \geq 0,9$ liegt. Mit diesen Ergebnissen ist Mörtel Q14 die einzige Mischung, die zumindest eine der gewünschten festgelegten Anforderungen (Setzfließmaß ≥ 200 mm) des zu entwickelnden SVBs erfüllt.

Eine Verbesserung des Kompromisses zwischen hohem Setzfließmaß und Grünstandfestigkeit des Mörtels Q14 könnte anhand der in Abschnitt 5 untersuchten thixotropierenden Zusätze (Schichtsilikate und Stärke) und Zusatzstoffe (Metakaolin) erzielt werden. Dafür wurden 2 weitere Mörtelgruppen (Gruppe A3 und A4) mit Zugabe von Metakaolin und thixotropierenden Zusätzen hergestellt. Ziel war es die Formstabilität des Mörtels Q 14 zu erhöhen zusammen mit einer möglichst niedrigen Verringerung seines Setzfließmaßes (280 mm).

Die zwei weiteren Mörtelgruppen, die mit verschiedenen w/z-Werten hergestellt wurden, sind in den folgenden Tabellen aufgeführt.

Tabelle 19: Mörtelmischungen der Gruppe A3

Gruppe A3										
Ausgangsstoffe		REF (Q14)	Q21	Q22	Q23	Q24	Q25	Q26	Einheit	
Quarzmehl		0,45							[M.-% v. Z.]	
Zusatzmittel	LP		0,1							[M.-% v. Z.]
	FM 2		1,75							[M.-% v. Z.]
	Thixo T2		0,50							[M.-% v. Z.]
	Metakaolin		0	0,5					[M.-% v. Z.]	
	Schichtsilikate	SK1			0,5				[M.-% v. Z.]	
		SK2				0,5			[M.-% v. Z.]	
		SK3					0,5		[M.-% v. Z.]	
		SK4						0,5	[M.-% v. Z.]	
ST							0,5	[M.-% v. Z.]		
w/z-Wert		0,51							[-]	
β _P		0,995							[-]	

Da das wirkliche Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis für die Hohlraumfüllung jedoch unterhalb des extrapolierten β_P -Wertes liegen kann, kann das Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis für Sättigung um bis zu 30 % vom ermittelten β_P -Wert abweichen [73]. Daher wurde für die Gruppe A4, im Gegensatz zu den Mörteln der Gruppen A3, der w/z-Wert

um 0,16 verringert, um so das Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis (V_W/V_P) für Sättigung um rd. 30 % zu senken.

Tabelle 20: Mörtelmischungen der Gruppe A4

Gruppe A4										
Ausgangsstoffe		REF (Q27)	Q28	Q29	Q30	Q31	Q32	Q33	Einheit	
Quarzmehl		0,45							[M.-% v. Z.]	
Zusatzmittel	LP		0,1							[M.-% v. Z.]
	FM 2		4,0							[M.-% v. Z.]
	Thixo T2		0,5							[M.-% v. Z.]
	Metakaolin		0	0,5					[M.-% v. Z.]	
	Schichtsilikate	SK1			0,5				[M.-% v. Z.]	
		SK2				0,5			[M.-% v. Z.]	
		SK3					0,5		[M.-% v. Z.]	
		SK4						0,5	[M.-% v. Z.]	
		ST							0,5	[M.-% v. Z.]
w/z-Wert		0,35							[-]	
β _P		0,704							[-]	

Abbildung 90 veranschaulicht die besten Ergebnisse des Zusammenhanges zwischen Setzfließmaß und Formstabilitätskoeffizient K_M (●) sowie Setzfließmaß und Grünstandfestigkeit (□) für die Mischungen der Gruppe A3 und A4. Alle ermittelten Ergebnisse sind im Anhang A (Abbildung A-6) dokumentiert.

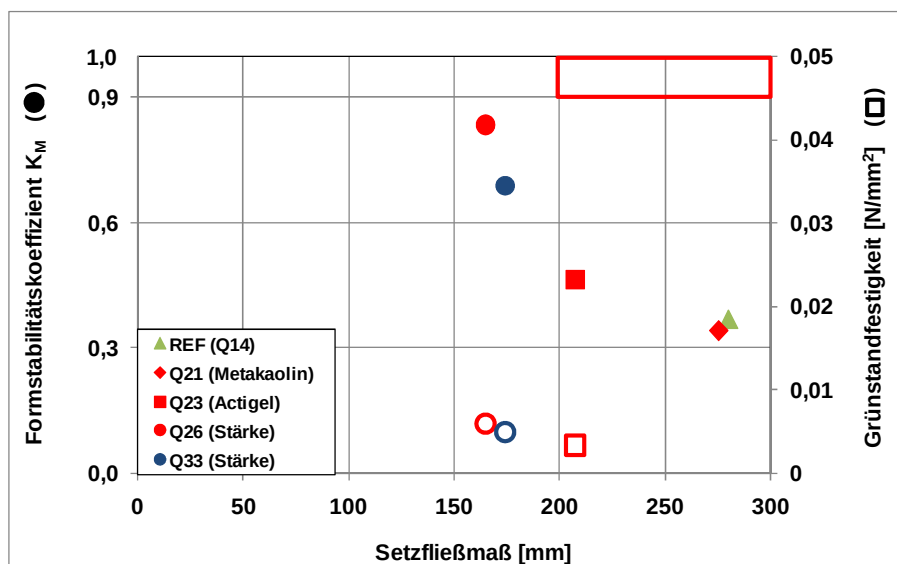


Abbildung 90: Beste Ergebnisse der Gruppe A3 und A4; Zusammenhang zwischen:
- Setzfließmaß und Formstabilitätskoeffizient K_M (●) und
- Setzfließmaß und Grünstandfestigkeit (□)

Wie aus Abbildung 90 ersichtlich ist, wiesen die Mörtel Q23 (mit Schichtsilikaten SK3, Basis: aktivierter Bentonit) und Q26 (mit Stärke) der Gruppe A3 sowie der Mörtel Q33 (mit Stärke) der Gruppe A4 den besten Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und hoher Formstabilität auf.

Durch die Zugabe von Schichtsilikaten SK3 in Mörtel Q23 reduzierte sich das Setzfließmaß des Referenzleims REF (Q14) um rd. 25%, von 280 auf 207 mm. Dies ging mit einer Erhöhung des Formstabilitätskoeffizienten K_M um rd. 25% von 0,37 auf 0,46 einher.

Ebenso und in Übereinstimmung mit den Ergebnissen, die an Bindemittelleimuntersuchungen in Abschnitt 5 durchgeführt wurden, hatte die Zugabe von Zusatz ST auf Stärke-Basis eine positive Auswirkung auf den angestrebten Kompromiss zwischen hoher Fließfähigkeit und hoher Formstabilität. Die Grünstandfestigkeit der Mörtel Q26 und Q36 erhöhte sich auf 0,0059 bzw. 0,0049 N/mm² gegenüber der Referenzmörtel REF (Q14), ihre Grünstandfestigkeit war aufgrund seines niedrigen Formstabilitätskoeffizienten ($K_M = 0,37$) nicht bestimmbar. Die Erhöhungen der Grünstandfestigkeiten spiegelten sich in einer Verbesserung der Formstabilitätskoeffizienten K_M der Mörtel Q26 und Q36 um 125% bzw. 86% gegenüber dem Mörtel REF (Q14) wieder. Dies ging allerdings mit einer Verringerung des Setzfließmaßes der Mörtel von rd. 40% einher.

Wiederum zeigte sich, dass der Mörtel Q26, sich den angestrebten kombinierten Eigenschaften (Setzfließmaß ≥ 200 mm und Formstabilität $K_M \geq 0,9$) am meisten näherte (Abbildung 90). Für Mörtel mit Setzfließmaßen über 160 mm verringerten sich die entsprechenden Grünstandfestigkeiten, und die daraus resultierenden Formstabilitätskoeffizienten nahmen exponentiell ab.

Um zu überprüfen, inwieweit das von Mörtel Q33 (mit Stärke und w/z-Wert = 0,35) erreichte Setzfließmaß und die Formstabilität noch optimiert werden können, wurden in 3 weiteren Gruppen 11 Mörtel untersucht. In diesen Gruppen wurde der Einfluss von Metakaolin und Stärke auf die rheologischen und thixotropen Eigenschaften der Mörtel untersucht.

Die Mörtelmischungen der Gruppe A5 und A6 wurden mit einem Anteil an Stärke (ST) bzw. Metakaolin von 0,5 M.-% v. Z. und zunehmenden Fließmittelgehalt hergestellt. Als Letztes wurde bei den Mörtelmischungen der Gruppe A7 der simultane Einfluss von Stärke (ST) und Metakaolin untersucht. Die Zusammensetzungen dieser Mörtelmischungen sind in Tabelle 21 bis Tabelle 23 aufgeführt.

Tabelle 21: Mörtelmischungen der Gruppe A5, mit Zusatz auf Stärke-Basis (ST)

		Gruppe A5 (mit Stärke ST)				
Ausgangsstoffe		REF (Q33)	Q34	Q35	Q36	Einheit
Quarzmehl		0,45				[M.-% v. Z.]
Zusatzmittel	LP	0,1				[M.-% v. Z.]
	Thixo T2	0,5				[M.-% v. Z.]
	FM 2	4,0	5,5	6,0	7,0	[M.-% v. Z.]
	ST	0,5				[M.-% v. Z.]
	Metakaolin	0				[M.-% v. Z.]
w/z-Wert		0,35				[-]

Tabelle 22: Mörtelmischungen der Gruppe A6, mit Metakaolin

		Gruppe A6 (mit Metakaolin)				
Ausgangsstoffe		Q37	Q38	Q39	Q40	Einheit
Quarzmehl		0,45				[M.-% v. Z.]
Zusatzmittel	LP	0,1				[M.-% v. Z.]
	Thixo T2	0,5				[M.-% v. Z.]
	FM 2	3,0	3,3	3,5	4,0	[M.-% v. Z.]
	ST	0				[M.-% v. Z.]
	Metakaolin	0,5				[M.-% v. Z.]
w/z-Wert		0,35				[-]

Tabelle 23: Mörtelmischungen der Gruppe A7, mit Zusatz auf Stärke-Basis und Metakaolin

		Gruppe A7 (mit Stärke ST und Metakaolin)							
Ausgangsstoffe		REF (Q40)	Q41	Q42	Q43	Q44	Q45	Einheit	
Quarzmehl		0,45							[M.-% v. Z.]
Zusatzmittel	LP	0,1							[M.-% v. Z.]
	Thixo T2	0,5							[M.-% v. Z.]
	FM 2	3,5	3,7	4,5	5,0	6,0	7,0	[M.-% v. Z.]	
	Metakaolin	0,5							[M.-% v. Z.]
	ST	0	0,5					[M.-% v. Z.]	
w/z-Wert		0,35							[-]

Die Ergebnisse des Zusammenhanges zwischen Setzfließmaßen und Formstabilitätskoeffizienten K_M (●) sowie Setzfließmaßen und Grünstandfestigkeiten (x) von Mörtelmischungen aus Gruppe A5 bis A7 sind in Abbildung 91 aufgeführt.

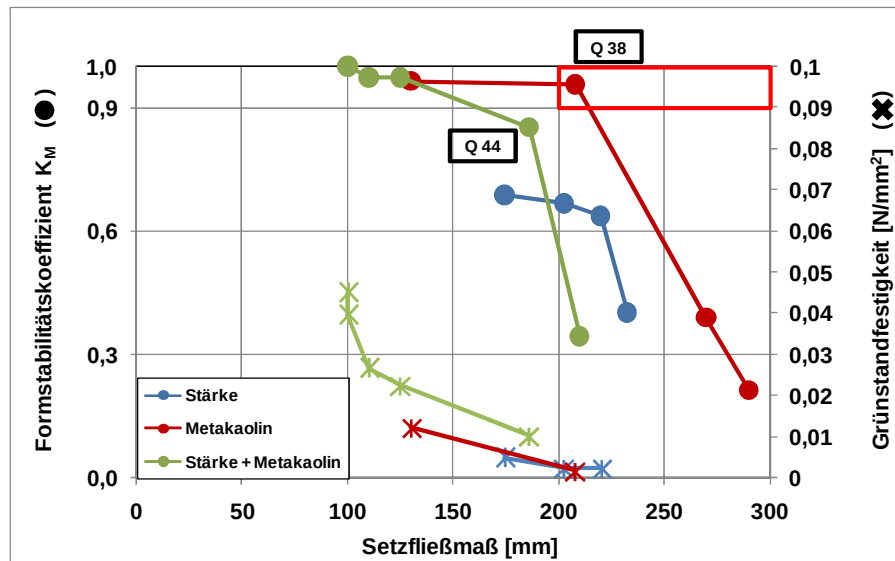


Abbildung 91: Zusammenhang zwischen:

- Setzfließmaß und Formstabilitätskoeffizient (●)

- Setzfließmaß und Grünstandfestigkeit (x)

Der Mörtel Q38 der Gruppe A6 (mit Metakaolin) erreichte mit einem Setzfließmaß von 208 mm und einen Formstabilitätskoeffizient $K_M = 0,96$ den angestrebten Zielgrößenbereich. Darüber hinaus wies der Mörtel Q44 der Gruppe A7 (mit Stärke und Metakaolin) mit einem Setzfließmaß von 186 mm und einem Formstabilitätskoeffizient $K_M = 0,85$ eine eindeutige Annäherung an den angestrebten Zielbereich auf.

Durch die Zugabe von Stärke wurde die Grünstandfestigkeit der Mörtel in Gruppe A7 im Vergleich zu den Mörteln der Gruppe A6 (mit Metakaolin) erhöht. Beispielsweise wies Mörtel Q44 (Gruppe A7, mit Stärke und Metakaolin) ein Setzfließmaß von 186 mm auf. Ein vergleichbarer Mörtel der Gruppe A6 (mit Metakaolin) mit dem gleichen Setzfließmaß (186 mm) zeigt einen um rd. 13% höheren Formstabilitätskoeffizienten, aber eine um rd. 60% niedrigere Grünstandfestigkeit. Diese Erhöhung der Grünstandfestigkeit durch die Zugabe von Zusatzmittel auf Stärke-Basis (ST) wirkt sich positiv für den angestrebten Einsatzbereich (Straßenbetonen) der zu entwickelnden SVB aus.

Die Ergebnisse aus Setzfließversuchen und Formstabilitätskoeffizienten der untersuchten Mörtel führen zu dem Schluss, dass es mit den benutzten Ausgangsstoffen nicht möglich ist, einen Mörtel zu erhalten, der ein Setzfließmaß für einen SVB der Konsistenzklasse SF2 (Setzfließmaß von 245 mm) und einem Formstabilitätskoeffizienten $K_M \geq 0,9$ nach einer Wartezeit von 5 Minuten aufweist. Es ist jedoch möglich, Mörtel mit Setzfließmaßen um rd. 200 mm und Formstabilitätskoeffizienten $K_M \geq 0,9$ herzustellen.

7.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das Betonverhalten

7.3.1 Basisuntersuchungen

7.3.1.1 Wasserzementwert

Für die Untersuchungen bzgl. des Einflusses des w/z-Wertes auf die Fließfähigkeit und Formstabilität der Betone wurden die in Tabelle 24 dargelegten Ausgangsmischungen herangezogen.

Die Zusammensetzungen der Ausgangsmischungen wurden nach Okamuras Verfahren und auf Grundlage der Ergebnisse aus den Untersuchungen an Mörtel konzipiert (Abschnitt 7.2). Daher wurden zwei Betone mit verschiedenem Wasser-Mehlkorn-Volumenverhältnis V_w/V_p entwickelt. Der Wassergehalt des ersten Betons entspricht dem im Abschnitt 7.2 bestimmten β_p (0,995). Da dieser Wert durch lineare Extrapolation gewonnen wurde, wurde anschließend, und in Anlehnung an Okamuras Verfahren, ein zweiter Beton mit einem um 3% niedrigeren β_p (0,96) hergestellt.

Beide Betone enthielten Thixotropiermittel T2 auf Basis von modifizierten organischen Polymeren und einen Fließmittelgehalt von 1,0 M.-% v. Z. sowie einen Luftporenbildnergehalt von 0,2 M.-% v. Z. Das ermittelte Zement-Füller-Volumenverhältnis liegt, wie im Abschnitt 7.2, bei 65/35. Als Gesteinskörnung kam eine Korngrößenverteilung der Regelsieblinie A/B 16 zum Einsatz. Die Kornzusammensetzung ist im Anhang A, Abbildung A-2 dargestellt.

Tabelle 24: Ausgangsmischung, Zement-Füller-Volumenverhältnis: 65/35

Parameter	Menge		Einheit
β_p (V_w/V_p)	0,995	0,96	[-]
w/z-Wert	0,49	0,47	[-]
Zement CEM III/A 42,5 N	383		[kg/m ³]
Quarzmehl	173		[kg/m ³]
Sieblinie A/B 16	1.575		[kg/m ³]
Luftporenbildner	0,2		[M.-% v. Z.]
Thixotropiermittel T2	1,0		[M.-% v. Z.]
Fließmittel (FM 2)	1,0		[M.-% v. Z.]

Während der Durchführung der Untersuchungen zeigte sich, dass die gegebenen β_p -Werte zu einem nicht ausreichenden Wassergehalt führten, mit dem weder die Konsistenz (Setzfließmaß) geprüft werden konnte, noch ein verarbeitbarer Beton vorlag.

Zwecks Herstellung verarbeitbarer Betone, deren Konsistenz bestimmbar war, wurde das Zement-Füller-Volumenverhältnis von 65/35 auf rd. 60/40 angepasst. Im Vergleich mit den vorherigen Mischungen lieferte diese Verringerung vom Zementgehalt der Mischung beim

unveränderten β_p von 0,99 einen w/z-Wert von 0,54. Dies führte zu einer Erhöhung des w/z-Wertes um 0,05, von 0,49 auf 0,54, der zusammen mit der resultierenden Verringerung des Zementgehaltes (rd. 8,5 %) sowie der einhergehenden Erhöhung des Quarzmehlanteils (rd. 15,5 %) zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons dienen sollte [140]. Zusätzlich empfiehlt Okamura [94] bei der Verwendung von Gesteinsmehl (Quarzmehl) als Füller den β_p -Wert um 10 bis 20 % zu vermindern. In Anlehnung hieran wurden verschiedene Betone mit niedrigeren β_p -Werten hergestellt. Die Zusammensetzungen der entwickelten Betone sind Tabelle 25 zu entnehmen.

Tabelle 25: Ausgangsmischung, Zement-Füller-Volumenverhältnis: 60/40

Parameter	Menge				Einheit
$\beta_p (V_w/V_p)$	0,995	0,96	0,91	0,83	[-]
w/z-Wert	0,54	0,52	0,49	0,45	[-]
Zement CEM III/A 42,5 N	350				[kg/m ³]
Quarzmehl	200				[M.-% v. Z.]
Sieblinie A/B 16	1.575				[kg/m ³]
Luftporenbildner	0,2				[M.-% v. Z.]
Thixotropiermittel T2	1,0				[M.-% v. Z.]
Fließmittel (FM 2)	1,0				[M.-% v. Z.]

Die dabei ermittelten Setzfließmaße und Formstabilitätskoeffizienten sind in Abbildung 92 dargestellt.

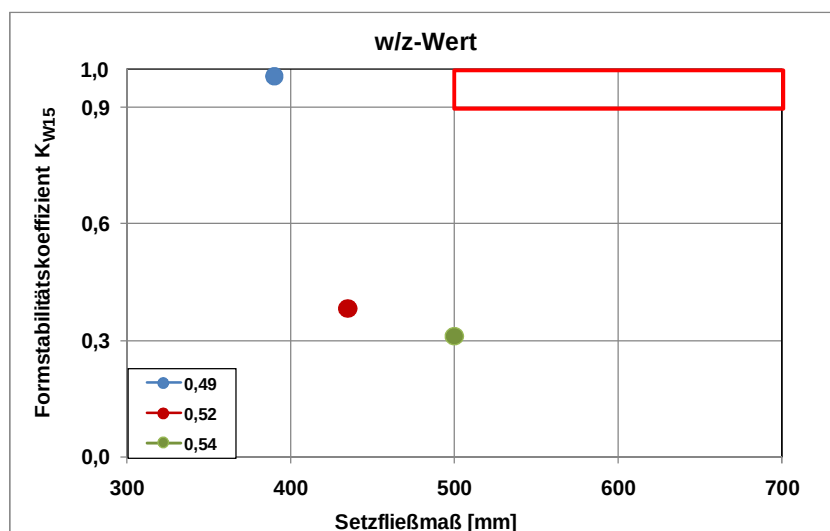


Abbildung 92:
Zusammenhang
zwischen
Setzfließmaß und
Formstabilitätskoeffi-
zient K_{W15} für
unterschiedliche w/z-
Werte

Erwartungsgemäß führte die Erhöhung des w/z-Wertes von 0,49 auf 0,54 zu einem Anstieg des Setzfließmaßes, in diesem Fall von 390 bis auf 500 mm. Andererseits fiel der Formstabilitätskoeffizient infolge der w/z-Wert-Erhöhung von $K_{W15} = 0,98$ auf 0,30, d.h. um rd. 70 % ab. Es ist aus der Abbildung 92 zu erkennen, dass eine Erhöhung des w/z-Wertes

um 0,03, von 0,49 auf 0,52, zu einer Verringerung des Formstabilitätskoeffizienten um rd. 60% führt. Daraus ist zu folgern, dass bereits eine nur geringfügig höhere Wasserzugabemenge die Formstabilität des Frischbetons signifikant beeinträchtigen kann.

7.3.1.2 Fließmittelgehalt

Da im Abschnitt 7.3.1.1 der Beton mit w/z-Wert von 0,49 und Zement-Füller-Volumenverhältnis von 60/40 der beste Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und hoher Formstabilität aufwies, diente er als Grundmischung für die weiteren Untersuchungen. Im Weiteren wurde an 4 Betonen die Dosiermenge des Fließmittels FM 2 (PCE-Basis) variiert. Der Fließmittelgehalt variierte zwischen 0,8 und 1,6 M.-% bezogen auf den Zementgehalt. Die untersuchte Betone sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 26: Ausgangsmischung

Parameter	Menge				Einheit
Zement CEM III/A 42,5 N	350				[kg/m ³]
w/z-Wert	0,49				[-]
Sieblinie A/B 16	1.575				[kg/m ³]
Quarzmehl	57				[M.-% v. Z.]
Luftporenbildner	0,2				[M.-% v. Z.]
Thixotropiermittel T2	1,0				[M.-% v. Z.]
Fließmittel (FM 2)	0,8	1,0	1,2	1,6	[M.-% v. Z.]

Die an den einzelnen Frischbetonen ermittelten Setzfließmaße und Formstabilitätskoeffizienten K_{W15} sind in Abbildung 93 dargestellt.

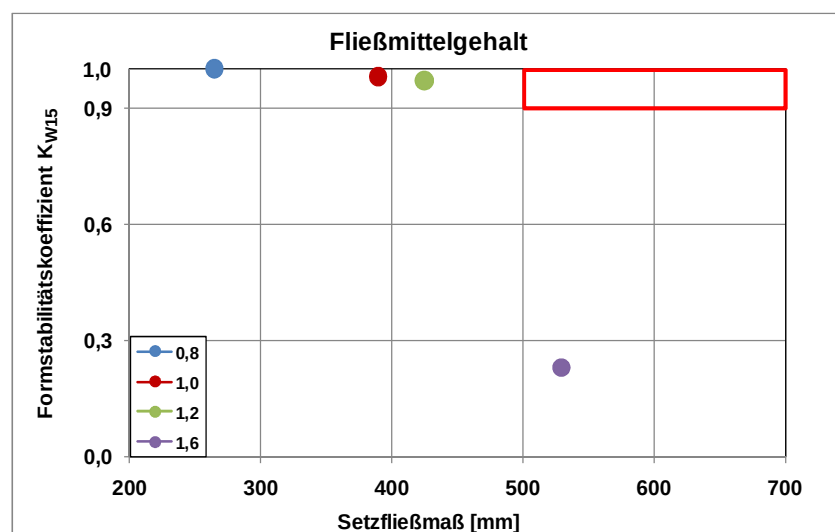


Abbildung 93:
Zusammenhang zwischen
Setzfließmaß und
Formstabilitätskoeffizient K_{W15}
der untersuchten Betone bei
unterschiedlichen
Fließmittelgehalten

Mit schrittweiser Erhöhung des Fließmittelgehalts von 0,8 auf 1,6 M.-% v. Z. steigerte sich das Setzfließmaß nahezu linear von 265 auf 530 mm. Gleichzeitig verringerten sich die

Formstabilitätskoeffizienten K_{W15} der Betone. Bis zu einer Fließmittelzugabe von 1,2 M.-% v. Z. waren Formstabilitätskoeffizienten $K_{W15} > 0,97$ festzustellen. Eine weitere Erhöhung des Fließmittelgehalts auf 1,6 M.-% v. Z. führte jedoch zu einem signifikanten Abfall der Formstabilität um rd. 76 % auf einen Formstabilitätskoeffizient von 0,23.

7.3.1.3 Thixotropierende Zusätze

Schichtsilikate SK1 hat in den vorherigen Untersuchungsphasen (Abschnitt 5) ausgeprägte thixotrope Eigenschaften aufgewiesen. In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss des thixotropierenden Zusatzes SK1 (Schichtsilikate, Mineralgemisch aus Kaolinit, Illit und Quarz) auf das Setzfließmaß und die Formstabilität der Betone untersucht. Dazu wurden als Referenzmischung (ohne SK1) die Mischung aus Abschnitt 7.3.1.2 mit einem Fließmittelgehalt von 1,2 M.-% v. Z. und eine Betonmischung mit 2,0 M.-% v. Z. des thixotropierenden Zusatzes SK1 hergestellt.

Tabelle 27: Referenzmischung

Parameter	Menge		Einheit
Zement CEM III/A 42,5 N	350		[kg/m³]
w/z-Wert	0,49		[-]
Sieblinie A/B 16	1.575		[kg/m³]
Quarzmehl	57		[M.-% v. Z.]
Fließmittel (FM 2)	1,2		[M.-% v. Z.]
Luftporenbildner	0,2		[M.-% v. Z.]
Thixotropiermittel T2	1,0		[M.-% v. Z.]
Schichtsilikate SK1	0	2,0	[M.-% v. Z.]

Die Ergebnisse zum Setzfließmaß und Formstabilitätskoeffizienten sind in Abbildung 94 dargestellt.

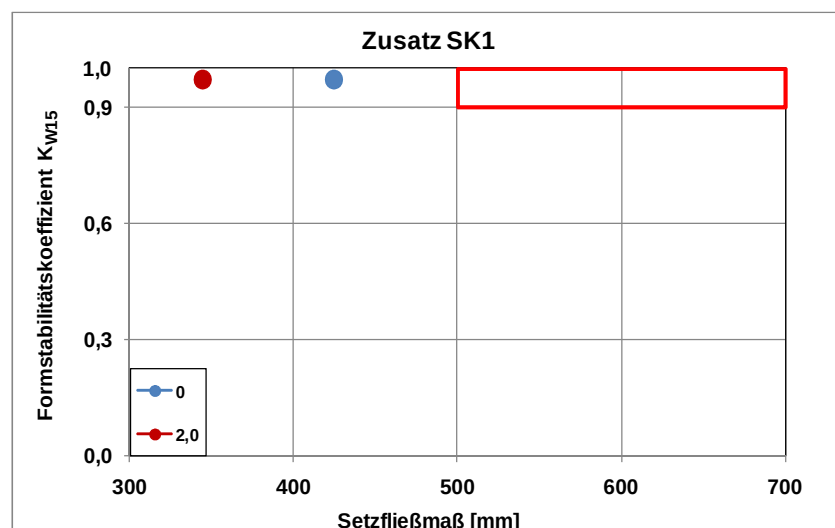


Abbildung 94:
Zusammenhang zwischen
Setzfließmaß und
Formstabilitätskoeffizient K_{W15}
des Betons ohne und mit SK1

Der Referenzbeton (ohne SK1) wies ein Setzfließmaß von 425 mm und einen Formstabilitätskoeffizienten von 0,97 auf. Die Zugabe des thixotropierenden Zusatzes SK1 verringerte das Setzfließmaß auf 345 mm, was im Wesentlichen auf den höheren Feststoffanteil und Agglomeration in Folge der größeren interpartikulären Wechselwirkungen (Bildung einer Kartenhausstruktur) gegenüber der Referenzmischung zurückzuführen war, da der Wasser- und Fließmittelgehalt unverändert blieben. Der Formstabilitätskoeffizient K_{W15} der Mischungen wurde durch die Zugabe des thixotropen Zusatzes nicht erhöht.

7.3.2 Hauptuntersuchungen: Auswirkungen von Kombinationen zweckmäßiger Zusätze

7.3.2.1 Ausgangsmischungen

Für die Hauptuntersuchungen an thixotrop eingestellten Betonen wurde ein üblicher Beton im Straßenbau in Anlehnung an TL Beton-StB 07 [N 31] als Referenzmischung (Mischung M-1) herangezogen. Abweichend von der Norm wurde in der Referenzmischung ein Hochofenzement CEM III/A 42,5 N (Hüttensand 50 M.-% mit normaler Anfangsfestigkeit) eingesetzt. Die Zusammensetzung der Referenzmischung ist in Tabelle 28 angegeben.

Tabelle 28: Betonzusammensetzung für Mischung M-1 (Referenzmischung)

Parameter	Menge	Einheit
Zement CEM III/A 42,5 N	350	[kg/m³]
w/z-Wert	0,42	[-]
Fließmittel (FM 2)	0,1	[M.-% v. Z.]
Luftporenbildner	0,43	[M.-% v. Z.]
Sieblinie A/B 22 (Splitt)	1.790	[kg/m³]

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den Untersuchungen an Bindemittelleimen, Mörteln sowie den Betonvorversuchen, wurden 5 modifizierte Betone (Mischungen M-2 bis M-6) konzipiert und hinsichtlich ihrer thixotropen Eigenschaften beurteilt. Für alle Mischungen wurde ein Setzfließmaß größer als 500 mm [N 28] angestrebt. Die Grundrezeptur und die Parametervariationen dieser Mischungen sind in Tabelle 29 bzw. Tabelle 30 aufgeführt.

Tabelle 29: Grundrezeptur der Mischungen M-2 bis M-6

Unveränderte Ausgangsstoffe	Menge	Einheit
Zement CEM III/A 42,5 N	350	[kg/m³]
w/z-Wert	0,45	[-]
Luftporenbildner	0,2	[M.-% v. Z.]
Sieblinie A/B 16	1.575	[kg/m³]

Tabelle 30: Varianten im Feinmörtel der untersuchten Betone M-2 bis M-6

Varierte Ausgangsstoffe		Mischungen					Einheit
		M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	
Quarzmehl		57,0	57,0	57,0			[M.-% v. Z.]
Kalksteinmehl					57,0		[M.-% v. Z.]
Metakaolin						25,0	[M.-% v. Z.]
Fließmittel (FM 2)		1,9	1,95	2,55	2,0	4,15	[M.-% v. Z.]
Thixotropiermittel (T2)		1,1	1,1	1,2	1,8	1,95	[M.-% v. Z.]
Thixotropierende Zusätze	SK 1		1,0				[M.-% v. Z.]
	ST			1,0			[M.-% v. Z.]

Wie Tabelle 29 und Tabelle 30 zu entnehmen ist, wurde der w/z-Wert aller Betone entsprechend den Anforderungen an Straßenbetone bei Decken der Bauklasse SV, I-III (Oberbeton, Expositionsklasse XF4) auf 0,45 abgesenkt. Dies entsprach gleichzeitig einer Verringerung des im Abschnitt 7.1 ermittelten β_p um rd. 17,5 % auf 0,83. Die Betone M-2 bis M-4 enthielten als Betonzusatzstoff Quarzmehl, wohingegen jeweils eine Mischung stattdessen mit Kalksteinmehl (M-5) bzw. Metakaolin (M-6) hergestellt wurde. Die Zugabemenge an Metakaolin wurde aufgrund des erhöhten Wasserbedarfs dieses Zusatzstoffes auf 25 M.-% v. Z. verringert. Trotz dieser Abminderung war für eine ausreichende Verarbeitbarkeit dieser Mischung ein entsprechend hoher Fließmittelgehalt von 4,15 M.-% v. Z. erforderlich.

Die übrigen Mischungen (M-2 bis M-5) wiesen dagegen nur Fließmittelgehalte von 1,9 M.-% v. Z. bis 2,55 M.-% v. Z. auf. Zu allen Betonen wurde das Thixotropiermittel T2 (Basis: Modifizierte Polymere) in unterschiedlichen bzw. der Betonrezeptur angepassten Mengen zugegeben. Die Betone M-3 und M-4 enthielten darüber hinaus die thixotropierenden Zusätze SK1 (Mineralgemisch aus Kaolinit, Illit und Quarz) bzw. SK5 (Basis modifizierte Stärke), die mit einem Anteil von 1,0 M.-% v. Z. zugegeben wurden.

7.3.2.2 Frischbetonrohddichte und Luftgehalt

Die ermittelten Rohdichten der Betone M-1 bis M-6 sind in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Rohdichten der Mischungen M-1 bis M-6

Mischung	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6
Rohdichte [kg/m³]	2.250	2.240	2.140	2.180	2.080	2.020

Die höchsten Rohdichten wiesen die Referenzmischung M-1 (2.250 kg/m³) und die Mischung M-2 (2.240 kg/m³) auf. Im Fall der Referenzmischung M-1 ist dies im Wesentlichen auf die

Verdichtung und auf den höheren Anteil an Gesteinskörnung pro m^3 zurückzuführen. Die geringsten Rohdichten wurden für die Mischung mit Kalksteinmehl (M-5) und mit Metakaolin (M-6) ermittelt. Sie lagen mit $\rho = 2.080 \text{ kg/m}^3$ und $\rho = 2.040 \text{ kg/m}^3$ im Vergleich zur Referenzmischung M-1 um 7,5 % bzw. 10,4 % niedriger.

Die gemessenen Luftporengehalte der untersuchten Betone lagen im Bereich von 5,0 Vol.-% bis 13,7 Vol.-% (Abbildung 95), wobei erwartungsgemäß eine Korrelation zwischen Luftporengehalt und Rohdichte festzustellen war. Betone mit geringen Rohdichten wiesen entsprechend hohe Luftporengehalte auf.

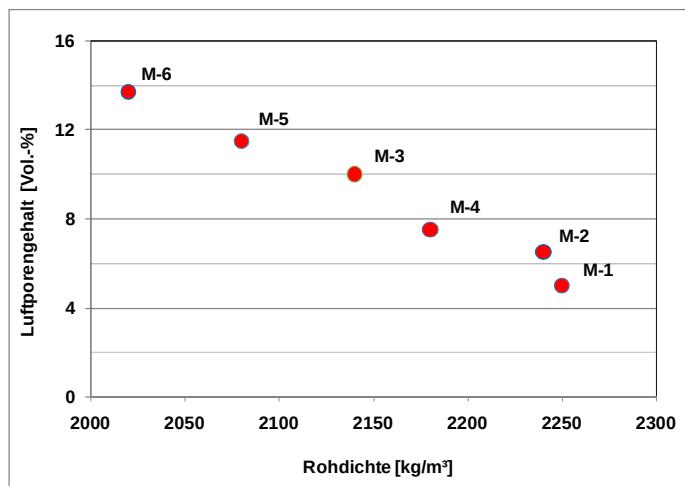


Abbildung 95: Luftporengehalt der Betone M-1 bis M-6

Nach TL Beton StB-07 [N 31] wird bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 16 mm ein mittlerer Luftporengehalt von mindestens 4,5 Vol.-% und bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 22 mm mindestens 4,0 Vol.-% gefordert. Bei Beton der Konsistenzklasse $\geq \text{F2}$ wird ein um 1,0 Vol.-% erhöhter Luftgehalt gefordert. Anhand der in Abbildung 95 dargestellte Luftporengehalte wird deutlich, dass alle Betone diese Anforderungen erfüllen. Es ist jedoch notwendig die Anforderungen bezüglich des Mikro-Luftporengehaltes (künstlich eingeführte Luftporen), die in erster Linie zur Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes dienen, am Festbeton zu überprüfen. Da im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit die Zusammenstellung zweier entgegenlaufenden Eigenschaften (hohe Fließfähigkeit und hohe Formstabilität innerhalb 3 bis 10 Minuten) steht, überschritt die Untersuchung des Porenraum- und Durchmessers im Festbeton die Grenzen dieser Arbeit. Dennoch wurden die Luftporenkennwerte (Mikro-Luftporengehalt $A_{300} \geq 1,8 \text{ Vol.-%}$ und Abstandsfaktor $L \leq 0,20 \text{ mm}$) am Beton M-2 im Abschnitt 7.3.2.7 zur Orientierung bestimmt und mit dem Frost-Tausalz-Widerstand korreliert.

Für einen selbstverdichtenden Beton ist nach DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ [N 1], DIN 1045-2 [N 2] bzw. DIN EN 206-9 [N 28] bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 16 mm ein Mindestluftporengehalt von 4,5 Vol.-% einzuhalten. Einzelwerte dürfen diese Anforderungen um höchstens 0,5 Vol.-% unterschreiten. Als oberer Grenzwert des

Luftgehaltes gilt nach DIN EN 206-1 [N 27] der Mindestluftgehalt plus 4 Vol.-% absolut. Diese Anforderungen wurden von den Mischungen M-2 und M-4 mit Luftgehalten von 6,5 und 7,5% erfüllt. Die Betone M-3, M-5 und M-6 wiesen hingegen mit 10,0 Vol.-% bis 13,7 Vol.-% nicht normkonforme Luftporengehalte auf. Die Ergebnisse dokumentieren somit zumindest für die Betone M-3, M-5 und M-6, dass sich diese nicht ausreichend selbst verdichten konnten.

7.3.2.3 Gesamtbetrachtung des Setzfließmaßes und der Formstabilität

Mischung M-1 entsprach einem herkömmlichen Rüttelbeton, so dass bei diesen Betonen auf eine Bestimmung des Setzfließmaßes verzichtet wurde. Die Ergebnisse der übrigen Mischungen M-2 bis M-6 sind Abbildung 96 zu entnehmen.

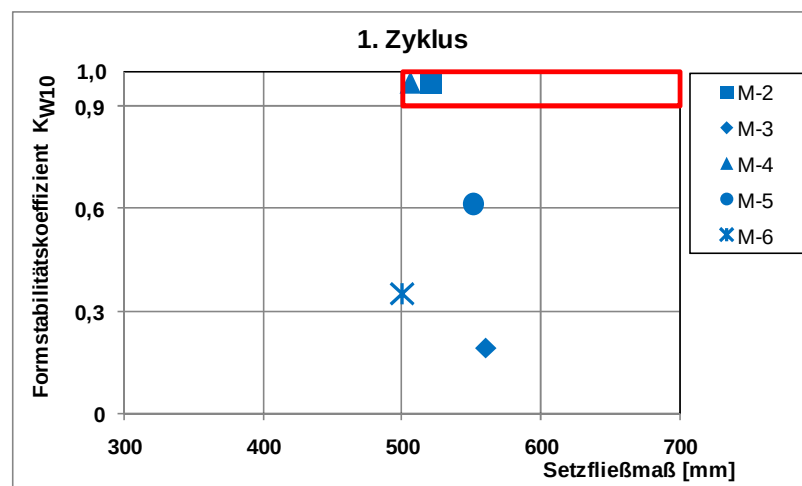
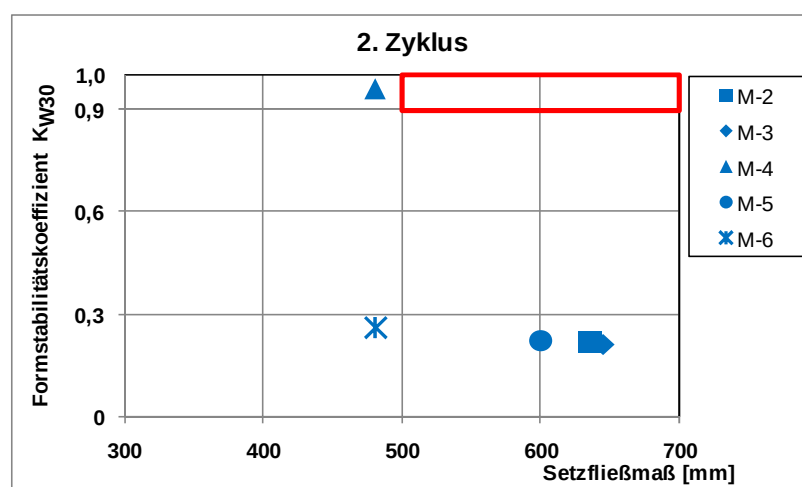


Abbildung 96: Zusammenhang zwischen dem Setzfließmaß und dem Formstabilitätskoeffizient K_W der untersuchten Mischungen; a) 1. Zyklus: nach 10 Minuten (K_{W10});



b) 2. Zyklus: Nach 30 Minuten (K_{W30})

Im 1. Zyklus unterscheiden sich die untersuchten Betone mit Setzfließmaßen zwischen 500 und 560 mm nur geringfügig. Tendenziell wurden für die Mischung mit Quarzmehl und SK1

(M-3) und für die Mischung mit Kalksteinmehl (M-5) die höchsten Setzfließmaße von 560 und 550 mm gemessen. Durch die Zugabe des thixotropen Zusatzes SK1 in der Mischung M-3 konnte keine wesentliche Veränderung des Setzfließmaßes beobachtet werden.

Trotz der höchsten Fließmittelzugabemenge von 4,15 M.-% v. Z. und eines Luftporengehaltes von 13,7 Vol.-% erreichte die Mischung mit Metakaolin (M-6, 500 mm) das geringste Setzfließmaß. Das steifere Verhalten dieses Betons war im Wesentlichen auf die auffällig hohe Klebrigkeit zurückzuführen, die durch die Zugabe von Metakaolin verursacht wurde.

Im 2. Zyklus wurde gegenüber dem 1. Zyklus tendenziell eine Zunahme des Setzfließmaßes beobachtet. Mit einer Erhöhung von rd. 22% wurde für die Mischung M-2 die größte Zunahme des Setzfließmaßes nachgewiesen. Lediglich die Mischungen M-4 (mit Stabilisierer auf Stärke-Basis) und M-6 (mit Metakaolin) wiesen praktisch keine Änderung des Setzfließmaßes im Vergleich zu dem entsprechenden Setzfließmaß des 1. Zyklus auf.

Die Formstabilität der freistehenden Betonkörper wurde jeweils im 1. und 2. Zyklus bestimmt. Im 1. Zyklus wurden die Formstabilitätskoeffizienten K_W nach entsprechenden Wartezeiten von 10 und 15 Minuten (K_{W10} bzw. K_{W15}) nach Betonherstellung beurteilt. Im 2. Zyklus, nach erneutem 10-minütigem Mischen, wurden die Formstabilitätskoeffizienten nach Wartezeiten von 15, 30 und 60 Minuten (K_{W15} , K_{W30} bzw. K_{W60}) bestimmt. Die zu diesem Zeitpunkt ermittelten Formstabilitätskoeffizienten sind in Tabelle 32 dargestellt.

Tabelle 32: Formstabilitätskoeffizienten K_W

Formstabilitätskoeffizient		M-2	M-3	M-4	M-5	M-6
1. Zyklus	K_{W10}	0,97	0,19	0,97	0,61	0,35
	K_{W15}	0,94	0,26	0,97	0,84	0,45
2. Zyklus	K_{W15}	*	*	0,96	*	*
	K_{W30}	0,22	0,21	0,96	0,23	0,26
	K_{W60}	0,23	0,29	0,97	0,23	0,37

Im 1. Zyklus wurden die höchsten Formstabilitätskoeffizienten für Mischung M-2 mit Quarzmehl ($K_{W10} = 0,97$ und $K_{W15} = 0,94$) und Mischung M-4 mit Quarzmehl und Stabilisierer auf Stärke-Basis (K_{W10} und $K_{W15} = 0,97$) ermittelt. Nach 15 Minuten wurde für Mischung M-2 jedoch ein verringerter Formstabilitätskoeffizient ermittelt. Dieser steht im Widerspruch zu einem verstärkten Strukturaufbau mit zunehmender Wartezeit, so dass dieser geringfügige Unterschied (rd. -3 %) mehr oder weniger auf Prüfstreuungen zurückzuführen ist.

Ausgehend von Mischung M-2 verringerte die Zugabe des thixotropen Zusatzes SK1 (M-3) die Formstabilität von $K_{W10} = 0,97$ auf $K_{W10} = 0,19$. Zwar erhöhte sich der

Formstabilitätskoeffizient 15 Minuten nach Betonherstellung auf $K_{W15} = 0,26$ doch lag dieser Wert noch rd. 72 % unter dem von Mischung M-2 ($K_{W15} = 0,94$).

Ein Austausch von Quarzmehl durch Kalksteinmehl in Mischung M-5 führte zu einer Verringerung der Formstabilitätskoeffizienten um rd. 37% bzw. rd. 11% nach 10 und 15 Minuten ($K_{W10} = 0,61$ - $K_{W15} = 0,84$) im Vergleich zur Mischung M-2 ($K_{W10} = 0,97$ - $K_{W15} = 0,94$).

Die Mischung mit Metakaolin (M-6) wies nach 10 Minuten einen Formstabilitätskoeffizient von $K_{W10} = 0,35$ auf. Nach 15 Minuten stieg der Formkoeffizient geringfügig auf $K_{W15} = 0,45$ an. Im Vergleich zu Mischungen M-2 und M-4, waren diese Formstabilitätskoeffizienten nach 10 Minuten jedoch noch immer um bis zu rd. 64 % und nach 15 Minuten um bis zu rd. 54 % niedriger.

Zwischen Zyklus 1 und Zyklus 2 nahmen hier die Formstabilitätskoeffizienten in den meisten Fällen ab, was dann aber mit einer Erhöhung der Setzfließmaße einherging (Abbildung 96). Im Gegensatz dazu zeigte die Mischung M-4 (mit Zusatz ST auf modifizierte Stärkebasis) während beider Zyklen ein quasi konstantes Verhalten. Mischung M-4 wies im Vergleich zum 1. Zyklus einen nur unwesentlich geringeren (rd. -1 %) Formstabilitätskoeffizienten nach 15 Minuten auf, während die anderen Mischungen sogar nach 60 Minuten keine ausgeprägte Formstabilität aufwiesen.



Abbildung 97: Freistehender Betonkörper von Mischung M-2 (Setzfließmaß 520 mm) nach 10 Minuten ($K_{W10} = 0,97$)

7.3.2.4 Trichterauslaufzeiten

Die Bestimmung der Trichterauslaufzeiten der Betone erfolgte in beiden Zyklen 5 Minuten nach Mischende. Die ermittelten Ergebnisse sind Tabelle 33 zu entnehmen.

Tabelle 33: Trichterauslaufzeiten nach Zyklus 1 bzw. Zyklus 2 für die Betone M-2 bis M-6

Trichterauslaufzeiten		M-2	M-3	M-4	M-5	M-6
1. Zyklus: T_{V1}	[s]	35	29	61	32	120
2. Zyklus: T_{V2}	[s]	5,5	6	48	9	133

Bereits im V-Trichter bzw. vor Beginn der Untersuchungen zeigten alle Frischbetone eine ausgeprägte Versteifung, die zu einem Verlust der Verarbeitbarkeit führte. Aus diesem Grund ist die Gültigkeit der in Tabelle 33 dargestellten Ergebnisse relativ.

Die im 1. Zyklus ermittelten Trichterauslaufzeiten aller Mischungen liegen über den empfohlenen Zielwerten, die durch Okamuras Verfahren (10 s) bzw. DIN EN 206-9 (9 + 3 s) [N 28] vorgegeben sind. Die Trichterauslaufzeiten dienen zur Bewertung der Viskosität der selbstverdichtenden Betone. Dies bedeutet, dass im Vergleich zum herkömmlichen SVB ($T_{V1} = 9$ bzw. $10 + 3s$) die in Tabelle 33 dargestellten höheren Trichterauslaufzeiten der untersuchten Betone höheren Viskositäten entsprechen, die die Sedimentationsstabilität gewährleisten. Jedoch verhindern höhere Viskositäten den Auftrieb der Luftblasen während des Entlüftungsvorgangs. Daher sollte überprüft werden, ob Betone M-2 und M-4, die normkonforme Luftgehalte von 6,5 bzw. 7,5% aufgewiesen haben, eine ausreichende Selbstverdichtung bzw. keine Lufteinschlüsse aufweisen. Zu diesem Zweck sollten die Luftporenkennwerte dieser Betone an Festbeton bestimmt werden (Abschnitt 6.3.2.3.3).

Mit Ausnahme der Mischung M-6 wurden im 2. Zyklus bzw. nach der 2. Mischphase die Trichterauslaufzeiten um rd. 85% verringert. Die Mischungen M-2, M-3 und M-5 weisen Auslaufzeiten auf, die einem herkömmlichen selbstverdichtenden Beton entsprechen [N 1]. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass die deutliche Verringerung der Trichterauslaufzeiten (und von daher der Viskosität) der entwickelten Betone sich in den höheren Setzfließmaßen des 2. Zyklus widerspiegelte. Dies kann nach Banfill [9] auf den Begriff „irreversiblen Strukturbruch“ bzw. auf die Zerstörung der Flockenstruktur von nicht im 1. Zyklus deagglomerierten Flocken zurückgeführt werden (Abschnitt 2.4.2.1). Während der Mischphase des 2. Zyklus wurden die Flocken sukzessiv zunehmend kleiner und das in der Flockenstruktur eingeschlossene Wasser freigesetzt. Dies führt zu einer Verflüssigung und damit zu einer Abnahme des inneren Scherwiderstands. Mit einem niedrigeren Scherwiderstand (Fließgrenze τ_0) erhöhen sich die Setzfließmaße und reduzieren sich die Viskositäten (geringere Trichterauslaufzeiten), die mit einer Verringerung der Formstabilitätskoeffizienten der Betone einhergehen (Abschnitt 7.3.2.3). Beton M-4 wies den kleinsten Unterschied zwischen den ermittelten Trichterauslaufzeiten auf (Tabelle 33). Dies entspricht den unveränderten Setzfließmaßen (rd. 500 mm) sowie Formstabilitätskoeffizienten ($K_{W10} = 0,97$ bzw. $K_{W15} = 0,96$), die die Mischung M-4 in beiden Zyklen aufgewiesen hat.

7.3.2.5 Grünstandfestigkeit

Die Grünstandfestigkeit am Würfel nach Abschnitt 6.3.2.2.4 wurde nur für diejenige Mischungen bestimmt, die einen Formstabilitätskoeffizient $K_{W10} \geq 0,9$ aufgewiesen haben.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 98 dargestellt.

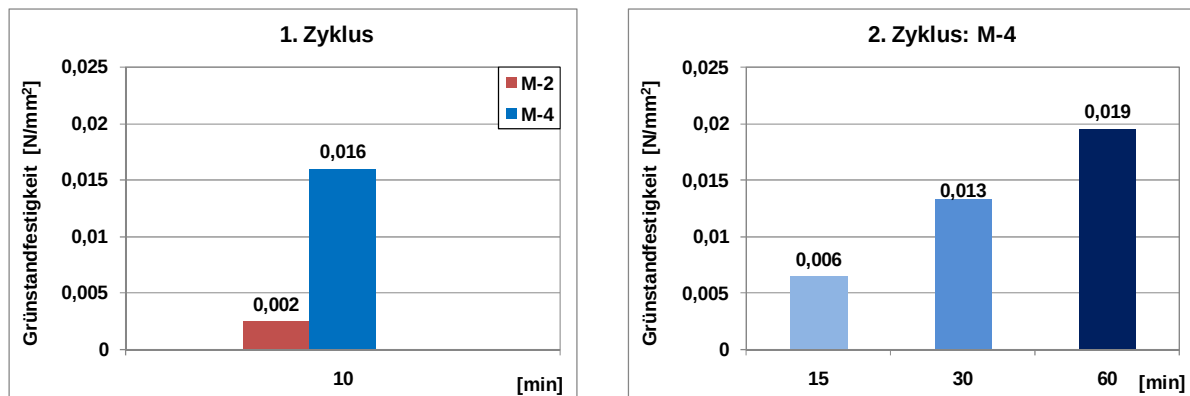


Abbildung 98: zeitliche Entwicklung der Grünstandfestigkeit, Links: 1. Zyklus, Rechts: 2. Zyklus von M-4

Im 1. Zyklus betrug die Grünstandfestigkeit der Mischung M-2 nach einer Wartezeit von 10 Minuten $0,002 \text{ N/mm}^2$. Unter Zugabe von Zusatz ST auf Stärkebasis in Mischung M-2 wurde die Grünstandfestigkeit der Mischung M-4 zum gleichen Zeitpunkt um das 8-fache erhöht. Dies hat sich bereits in den Mörteluntersuchungen tendenziell gezeigt (Abschnitt 7.2).

In Gegensatz zu Mischung M-2 wies Mischung M-4 im 2. Zyklus eine ausgeprägte Grünstandfestigkeit auf, welche sich in einem Formstabilitätskoeffizient $K_{W15} \geq 0,96$ widerspiegelte (Abschnitt 7.3.2.3). Dies deutet darauf hin, dass durch die Zugabe von Zusatz ST das innere Gefüge in beiden Zyklen bzw. nach einer erneuten Mischphase zumindest teilweise wieder aufgebaut werden konnte. Allerdings wies die Grünstandfestigkeit der Mischung M-4, verglichen mit 1. Zyklus, im 2. Zyklus nach 15 Minuten einen Rückgang um 62,5 %, von $0,016$ auf $0,006 \text{ N/mm}^2$ auf. Nach 30 Minuten steigerte sich die Grünstandfestigkeit bis auf rd. 81% des im 1. Zyklus ermittelten Werts. Letztendlich übertraf die Entwicklung der Grünstandfestigkeit im 2. Zyklus nach 60 Minuten die Grünstandfestigkeit des 1. Zyklus um rd. 19%. Die niedrigeren Werte der Grünstandfestigkeit im 2. Zyklus sind auf die teilweise Reversibilität der Thixotropie der Zementsuspensionen zurückzuführen. Erst nach 30 Minuten im 2. Zyklus wies der Beton M-4 eine mit dem 1. Zyklus (nach 10 Minuten) vergleichbare Grünstandfestigkeit auf. Dies ist auf die schwächere wiederaufgebaute Struktur zurückzuführen, die aus der Entstehung von neuen anziehenden und abstoßenden interpartikulären Kräften nach einer erneuten Scherbeanspruchung in zementöser Suspensionen resultiert [132] (Abschnitt 2.4.2.1).

7.3.2.6 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit der Mischungen M-1 bis M-6 wurde im Alter von 7 und 28 Tagen geprüft. Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen sind Abbildung 99 zu entnehmen. Bei den Ergebnissen handelt es sich um Mittelwerte aus jeweils 3 Einzelwerten.

Alle Einzelwerte sind im Anhang A (Tabelle A-1 und Tabelle A-2) dokumentiert.

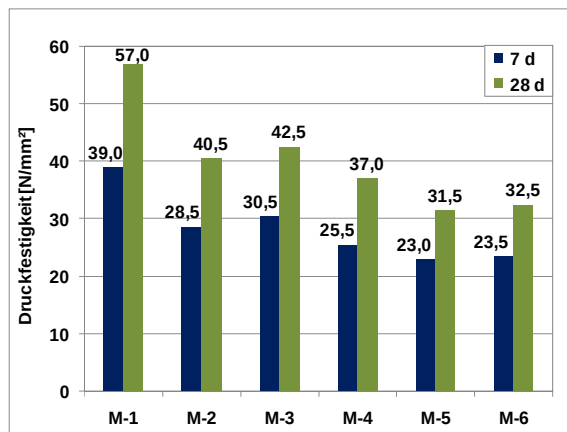


Abbildung 99: Mittlere Druckfestigkeiten der untersuchten Betone im Alter von 7 und 28 Tagen

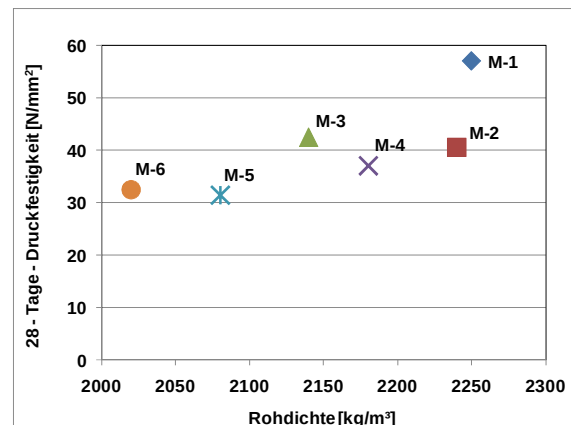


Abbildung 100: Verhältnis von Rohdichte und Druckfestigkeit der Mischungen M-1 bis M-6

Im Alter von 7 Tagen wies die Referenzmischung, die mit Ausnahme der verwendeten Zementart einen üblichen Beton im Straßenbau (C 30/37, XF4) darstellte, mit 39 N/mm² die höchste Festigkeit auf. Dies ist maßgeblich auf den vergleichsweise geringeren w/z-Wert, den höheren Anteil an Gesteinskörnung und der u.a. daraus resultierenden höheren Rohdichte dieser Mischung zurückzuführen. Tendenziell spiegelten sich die 7-Tage-Druckfestigkeiten auch in den Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen wieder. Demnach wies die Referenzmischung (M-1) mit 57,0 N/mm² die vergleichsweise höchste Druckfestigkeit nach 28 Tagen auf.

Die Mischungen M-2 bis M-6 lagen mit Druckfestigkeiten zwischen 31,5 und 42,5 N/mm² z.T. deutlich darunter. Dabei wies Mischung M-3, die Quarzmehl und den thixotropierenden Zusatz SK1 enthielt, mit 42,5 N/mm² die höchste Druckfestigkeit der thixotrop eingestellten Betone auf. Die Druckfestigkeit von Mischung M-2, der im Gegensatz zur Mischung M-3 keine thixotropierenden Zusätze zugegeben wurde, lag mit rd. 40,5 N/mm² nur unwesentlich niedriger. Mischungen M-5 (mit Kalksteinmehl) und M-6 (mit Metakaolin) erreichten mit max. 32,5 N/mm² die niedrigsten Druckfestigkeiten. Dies war bereits zu erwarten, da diese Mischungen mit $\rho = 2.080 \text{ kg/m}^3$ und $\rho = 2.020 \text{ kg/m}^3$ die geringsten Rohdichten und mit 11,5 Vol.-% und 13,7 Vol.-% die höchsten Luftporengehalte der hier untersuchten Mischungen aufwiesen (Abbildung 100). Mit Ausnahme der Referenzmischung (M-1), wies keine der untersuchten Mischungen die nach TL Beton [N 31] geforderte Druckfestigkeitsklasse C30/37 auf.

7.3.2.7 Biegezugfestigkeit

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfung an Balken der Mischungen M-1 bis M-6 im Alter von 28 Tagen sind in Abbildung 101 dargestellt. Die Einzelergebnisse sind dem Anhang A (Tabelle A-3) zu entnehmen.

Die Referenzmischung (M-1) wies mit $6,0 \text{ N/mm}^2$ die höchste Biegezugfestigkeit der untersuchten Betone auf. Diese Mischung zeigte bereits in der Druckfestigkeitsprüfung mit $57,0 \text{ N/mm}^2$ die höchste Festigkeit auf, was im Wesentlichen auf den höheren Anteil an Gesteinskörnung sowie das größere Größtkorn und der u.a. daraus resultierenden höheren Rohdichte im Frischbeton zurückzuführen war. Mischungen M-3 und M-4, die sich im Wesentlichen in der Art des eingesetzten thixotropierenden Zusatzes unterschieden, wiesen Biegezugfestigkeiten von $5,0 \text{ N/mm}^2$ und $5,5 \text{ N/mm}^2$ auf. Die niedrigste Biegezugfestigkeit wurde für die Mischung mit Kalksteinmehl (M-5) mit $4,5 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Die an Betonen der Expositionsklasse XF4 für Fahrbahndecken ermittelten Festigkeiten erfüllten allesamt die nach TL Beton [N 31] geforderte Biegezugfestigkeitsklasse F 4,5.

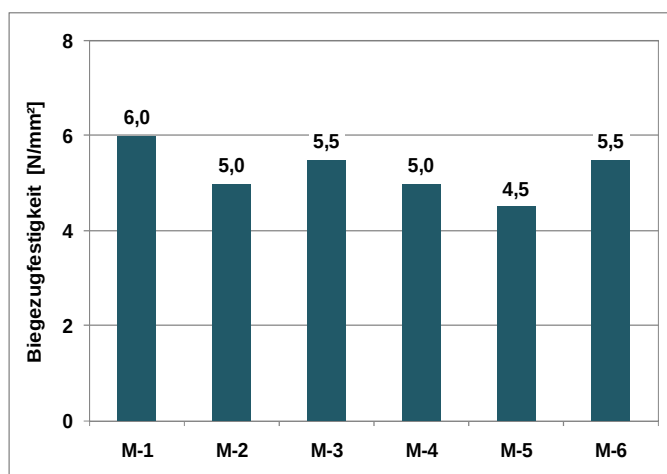


Abbildung 101:
Biegezugfestigkeit der untersuchten Betone nach 28 Tagen

7.3.2.8 Bestimmung des Frost-Taumittel-Widerstands (CDF-Test)

7.3.2.8.1 Abwitterung

Auf Grundlage der vorherigen Ergebnisse von Setzfließmaß und Formstabilitätskoeffizient K_{Wi} in Kombination, wurde der CDF-Test ausschließlich für die Referenzmischung M-1, sowie die Mischung mit Quarzmehl (M-2) und die Mischung mit Quarzmehl und Zusatz ST auf Stärkebasis (M-4) durchgeführt. Die Betone M-2 und M-4 wiesen Eigenschaften auf, die weitgehend den Anforderungen an einen ausgeprägten thixotropen und möglichst fließfähigen Beton entsprachen. Die Untersuchungen wurden nach jeweils 14 und 28 FTW durchgeführt.

In Abbildung 102 sind die prüfflächenbezogenen Abwitterungsmengen von Mischung M-1, M-2 und M-4 nach 14 und 28 FTW dargestellt.

Beton M-2 zeigte einen nahezu linearen Verlauf der Abwitterungsmenge auf. Nach 14 FTW wies diese einen Materialverlust von 502 g/m^2 auf. Nach 28 FTW stieg die Abwitterungsmenge auf 986 g/m^2 an. Die Abwitterungsmengen von Beton M-1

(Referenzmischung) waren demgegenüber mit 301 g/m² nach 14 FTW und 711 g/m² nach 28 FTW um rd. 30 % geringer. Beton M-4 wies mit 285 g/m² nach 14 FTW die gleiche Abwitterungsmenge wie die Referenzmischung (M-1) auf. Nach 28 FTW liegt die Abwitterungsmenge des Betons M-4 mit 414 g/m² rd. 40% unter der Oberflächenabwitterung der Referenzmischung M-1 bzw. und rd. 58% unter der entsprechenden Abwitterungsmenge des Betons M-2.

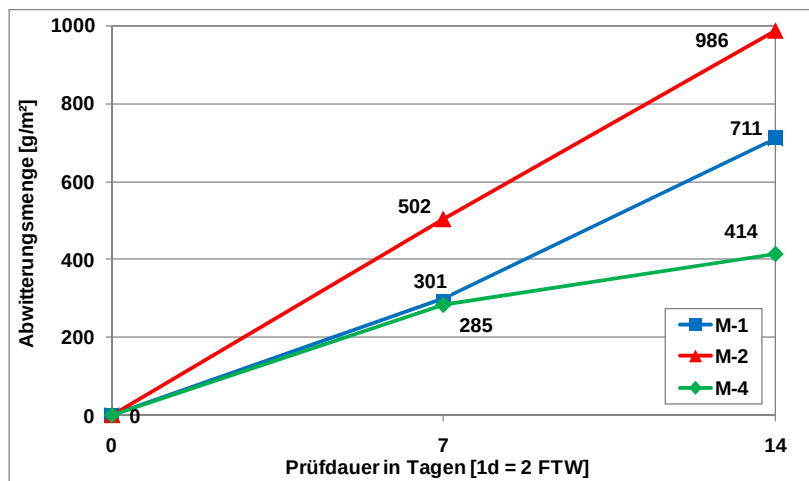


Abbildung 102: Bestimmung der Oberflächenabwitterung der Betone M-1 und M-2

Für die drei Mischungen lagen die Abwitterungsmengen nach 28 FTW unter 1.500 g/m², so dass nach RILEM Recommendation [N 30] ein ausreichend hoher Frost-Taumittel-Widerstand vorlag.

In sind exemplarisch jeweils ein Probekörper der Mischungen M-1 und M-2 vor Beginn der Frostprüfung (0 FTW) und nach 14 bzw. 28 FTW dargestellt.

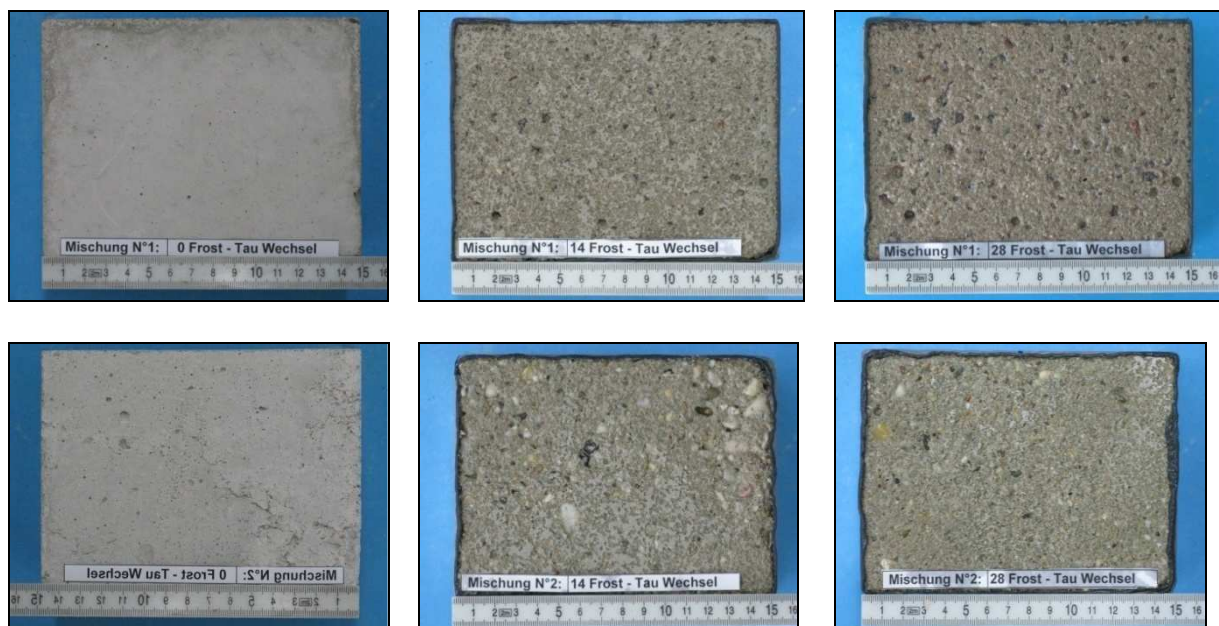


Abbildung 103: Abgewitterte Oberflächen eines Probekörpers der Mischungen M-1 (oben) und M-2 (unten) nach 0 FTW (links), 14 FTW (Mitte) und 28 FTW (rechts)

7.3.2.8.2 Relative Feuchtaufnahme und relativer dynamischer E-Modul

In Abbildung 104 sind die Ergebnisse der Feuchtaufnahme der Betone M-1 (Referenzmischung), M2 (mit Quarzmehl) und M-4 (mit Quarzmehl und Zusatz ST) dargestellt.

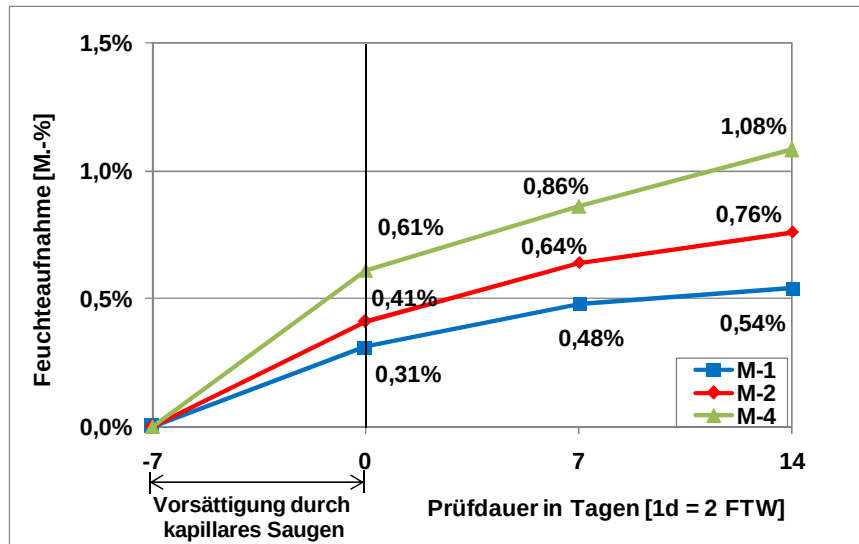


Abbildung 104:
Feuchtaufnahme der
Betonmischungen M-1,
M-2 und M-4

Die Verläufe zeigen eine höhere Feuchtaufnahme des Betons M-4 im gesamten Untersuchungszeitraum. Die Feuchtaufnahme des Betons M-4 entsprach der doppelten entsprechenden Feuchtaufnahme des Betons M-1. Vor der eigentlichen Frostprüfung (0 FTW) betrug sie für Beton M-1 (Referenzmischung) 0,31 M.-% und für Mischung M-4 0,61 M.-%. Diese Anteile sind auf das kapillare Saugen in der Vorsättigungsphase zurückzuführen.

Nach 14 FTW lag die Feuchtaufnahme der Referenzmischung bei 0,48 M.-% und die der Mischung M-4 bei 0,86 M.-%. Nach 28 FTW betrug die Feuchtaufnahme der Referenzmischung 0,54 M.-% und die der Mischung M-4 1,08 M.-%. Die Feuchtaufnahme des Betons M-2 wies Werte zwischen denen der Mischungen M-1 und M-4 auf.

Abbildung 105 stellt die Ergebnisse des rel. dyn. E-Moduls der untersuchten Mischungen M-1, M-2 und M-4 dar.

Der Beton M-4 wies nach 28 FTW eine lineare Verringerung des rel. dyn. E-Moduls auf. Verglichen mit Mischung M-1 und M-2 betrug die Verringerung des E-Moduls um 4 bzw. 3 %. Dies war aufgrund der um 100 bzw. 42 % höheren Feuchtaufnahme der Mischung M-4 im Vergleich zu Mischung M-1 und M-2 (Abbildung 104) zu erwarten.

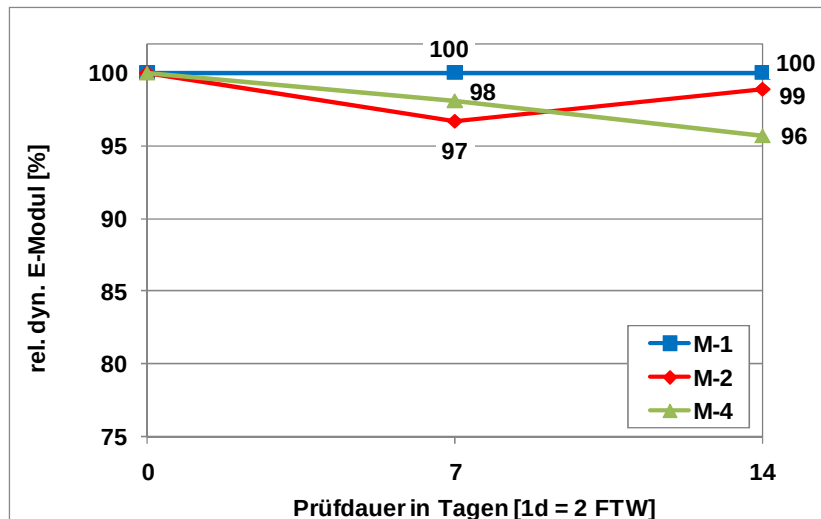


Abbildung 105: Rel. dyn. E-Modul der Betonmischungen M-1, M-2 und M-4

Die aufgenommene Wassermenge während der Frost-Tau-Prüfung ist nach Setzer [123] der dominierende Faktor, der letztlich zu einer inneren Schädigung infolge einer Mikroislinsenpumpe im Festbeton führt. Da für das Frostsaugen Frosttauwechsel (FTW) und externes Wasser erforderlich sind, ist die höhere Schädigung (bzw. der niedrigere E-Modul) nach 28 FTW auf die höhere Feuchtaufnahme der Mischung M-4 zurückzuführen.

Der rel. dyn. E-Modul von Mischung M-2 sank geringfügig auf Werte bis 97 % ab, doch sind die Unterschiede zwischen den Mischungen M-1 und M-2 vor dem Hintergrund der Messwertschwankungen als unwesentlich zu bezeichnen.

Die Abnahmekriterien nach RILEM Recommendation [N 30] umfassen neben der Abwitterungsmenge auch die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls (innere Schädigung) nach 28 Frost-Tau-Wechseln. Dabei gilt ein Beton als geschädigt, wenn ein relativer dynamischer E-Modul $R_{u,n} = 75 \%$ unterschritten wird. Dieses Abnahmekriterium wurde von den drei Mischungen erfüllt, so dass keine nennenswerte Schädigung der Probekörper der Mischungen M-1, M-2 und M-4 im Rahmen der 28 FTW zu erkennen war. Die erzielte Frostwiderstand der untersuchte Betone (M-1, M-2 und M-4) ist auf den Einfluss von Luftporenbildner zurückzuführen [100]. Durch die Zugabe vom Luftporenbildner werden im Frischbeton kleine Luftporen mit einem Durchmesser von $300 \mu\text{m}$ erzeugt, die im erhärteten Beton als Ausweichraum zum Abbau des beim Gefrieren der Porenflüssigkeit entstehenden Drucks dienen. Die so künstlich eingeführten Luftporen bilden ein Netz, das die Mikroislinsenpumpe während der Befrostung unterbricht. Beispielsweise weist Beton M-2 einen normkonformen Mikro-Luftporengehalt A_{300} von 3,13 Vol.-% und einen Abstandsfaktor L von 0,21 mm auf (Anhang B).

7.4 Optimierung der thixotrop eingestellten Betone

7.4.1 Optimierung der Eigenschaften des Betons M-2

Kernpunkt der Anwendung des Mini-Pavers ist die Ermittlung der minimalen Grünstandfestigkeit, die ein selbstverdichtender Beton entwickeln muss, damit ein frisch hergestellter Betonkörper seine Form (unter Laborbedingungen) unterstützungsfrei halten kann. Ausgehend von der Mischung M-2 und von den bisherigen, an Mörteln und Betonen ermittelten Ergebnissen, wurde der Einfluss des w/z-Wertes, der Zugabe von Metakaolin sowie des Zusatzes ST (Stärkebasis) auf die entwickelten, thixotrop eingestellten Betone mittels des Mini-Pavers untersucht.

Die Durchführung der Untersuchungen anhand des Mini-Pavers wurde im Abschnitt 6.3.2.2.5 beschrieben. Die Geschwindigkeit, mit welcher der Mini-Paver nach vorne gezogen wurde, wurde so justiert, dass der anhand des Mini-Pavers ermittelte Formstabilitätskoeffizient (K_{MP10} , Gleichung 27) mit demjenigen Koeffizient (K_{W10}), der am Würfel für den selben Beton bestimmt wurde, vergleichbar ist. Auf diese Weise wurde die Fließzeit des frischen Betons durch den horizontalen Schenkel bis zu dem Punkt, wo der Betonkörper aus dem Mini-Paver austrat, auf 10 Minuten festgelegt. Diese Zeit entspricht der Wartezeit in den Untersuchungen der Formstabilität mittels Würfelschalung (K_{W10}) (Abbildung 86). Die Zusammensetzungen der mit dem Mini-Paver untersuchten Betone sind Tabelle 34 bzw.

Tabelle 35 zu entnehmen.

Tabelle 34: Grundrezeptur der Betone M-2 (REF) und M-7 bis M10

Unveränderte Ausgangsstoffe	Menge	Einheit
Zement CEM III/A 42,5 N	350	[kg/m ³]
Quarzmehl	57	[M.-% v. Z.]
Luftporenbildner	0,2	[M.-% v. Z.]
Thixotropiermittel (T2)	1,1	[M.-% v. Z.]
Sieblinie A/B 16	1.575	[kg/m ³]

Tabelle 35: Varianten im Feinmörtel der untersuchten Betone M-2 (REF) und M-7 bis M-10

Variierte Ausgangsstoffe		Mischungen					Einheit
		M-2 (REF)	M-7	M-8	M-9	M-10	
w/z-Wert		0,45	0,30	0,34	0,34	0,34	[-]
Fließmittel (FM 2)		1,9	4,0	8,0	8,0	8,0	[M.-% v. Z.]
Thixotropierende Zusätze	Metakaolin				1,5	1,5	[M.-% v. Z.]
	Stärke ST					0,2	[M.-% v. Z.]

Die unter Anwendung des Mini-Pavers ermittelten Formstabilitätskoeffizienten K_{MP10} ($\blacktriangle$) werden in Abbildung 106 mit den an der Würfelschalung K_{W10} ($\bullet$) ermittelten Formstabilitätskoeffizienten verglichen. Die festgelegten Zielgrößen sind ein Setzfließmaß ≥ 500 mm und ein Formstabilitätskoeffizient $K_{MP10} \geq 0,9$ im Mini-Paver.

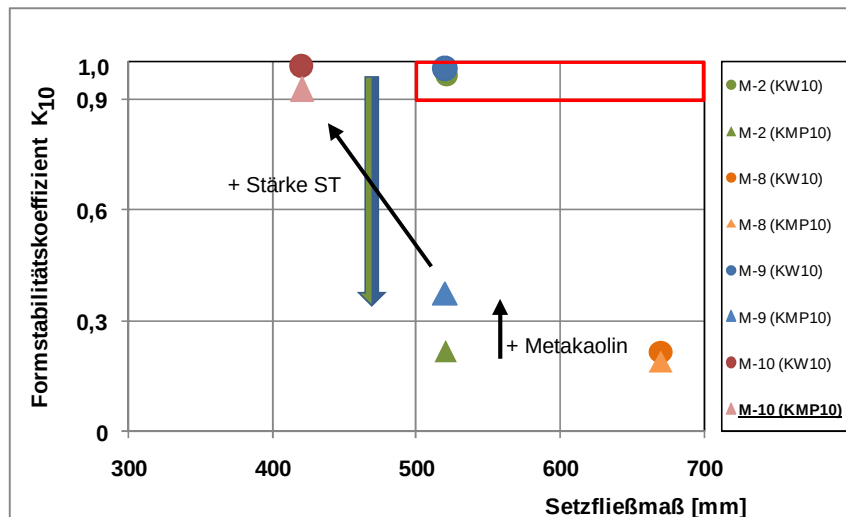


Abbildung 106:
Gegenüberstellung von
 K_{MP10} ($\blacktriangle$) und K_{W10} ($\bullet$)

Wie aus Abbildung 106 ersichtlich ist, wiesen die Mischungen M-2 (mit Quarzmehl) und M-9 (mit Quarzmehl und Metakaolin) Formstabilitätskoeffizienten K_{W10} von 0,97 bzw. 0,98 in der Würfelschalung auf. Während der Untersuchungen mit dem Mini-Paver, zeigten diese Betone eine Verringerung ihrer Formstabilitätskoeffizienten K_{MP10} um bis zu rd. 77%, auf 0,22 bzw. 0,38.

Die eindeutige Verringerung der anhand des Mini-Pavers ermittelten Formstabilitätskoeffizienten ist auf den Unterschied in der Durchführung der Untersuchungen zurückzuführen. Zur Bestimmung der Formstabilität anhand der Würfelschalung wurde der Frischbeton nach Befüllung bis zum Entschalen bzw. bis zur 10. Minute im Ruhezustand gelassen. Im Gegensatz dazu befand sich der Frischbeton beim Einsatz des Mini-Pavers nicht im Ruhezustand. Während des Einsatzes des Mini-Pavers floss der Frischbeton durch den vertikalen und abschließend durch den horizontalen Schenkel des Mini-Pavers, während dieser mit einer konstanten Geschwindigkeit nach vorne gezogen wurde. Als Resultat der kontinuierlichen Bewegung des Mini-Pavers und des Fließens des Frischbetons bis zum Verlasspunkt befand sich der Frischbeton nicht im Ruhezustand. Außerdem, und im Gegensatz zur Würfelschalung, entstehen Gleitreibungskräfte als Resultat der relativen Bewegung zwischen Mini-Paver und Frischbeton.

Wie im Abschnitt 2.4.2.1 erwähnt wurde, entwickelt sich die thixotrope Struktur eines Frischbetons, und damit seine statische Fließgrenze, nur im Ruhezustand. Wenn der Ruhezustand gestört ist, bildet sich keine bzw. nur eine schwächere Struktur infolge

elektrostatischer Wechselwirkungen, die sich in einem niedrigeren resultierenden Formstabilitätskoeffizient K_{MP10} widerspiegelte.

Der Beitrag von Metakaolin und des Zusatzes ST zur Erhöhung der Grünstandfestigkeit und der daraus resultierenden erhöhten Formstabilität, die im Abschnitt 7.2 an Mörteluntersuchungen bestimmt wurde, wurde hier durch die unter Einsatz des Mini-Pavers ermittelten Formstabilitätskoeffizienten K_{MP10} bestätigt. Im Vergleich mit Beton M-2 wurde durch die Zugabe von Metakaolin in Beton M-9 der Formstabilitätskoeffizient K_{MP10} beim Mini-Paver um 100% erhöht, von 0,19 auf 0,38. In gleicher Weise führte die Zugabe von 0,2 M.-% v. Z. des Zusatz ST in Beton M-10 zu einer 4-fachen Erhöhung des Formstabilitätskoeffizienten K_{MP10} , von 0,22 auf 0,93. Dies bedeutet, dass durch die Zugabe von Metakaolin in Beton M-9 und des Zusatzes ST in Beton M-10 die Differenz zwischen den Formstabilitätskoeffizienten K_{W10} (Würfelschalung) und K_{MP10} (Mini-Paver) auf rd. 62 % und abschließend auf 6 % verringert werden konnte. Erwartungsgemäß führte die Zugabe von Metakaolin und des Zusatzes ST zu einer signifikanten Verringerung des Setzfließmaßes, von 670 auf 420 mm.

7.4.2 Optimierung der Eigenschaften des Betons M-10

Zum Erreichen der Zielsetzung (Setzfließmaß ≥ 500 mm und Formstabilitätskoeffizient $K_{MP10} \geq 0,9$) ist eine weitere Optimierung des Betons M-10 (Setzfließmaß = 420 mm und $K_{MP10} = 0,93$) unabdingbar. Die rheologischen Eigenschaften von Frischbetonen, insbesondere die Konsistenz und die Thixotropie, werden nachhaltig von den rheologischen Eigenschaften des Bindemittelleims sowie des Anteils von Bindemittelleim und Gesteinskörnung im Stoffraum bestimmt [35].

Die Optimierung der erzielten Eigenschaften wurde in Einklang mit der Philosophie der Rezepturentwicklung eines SVBs durchgeführt. Dies führte zu einer Erhöhung des Bindemittelleimmenge im Stoffraum, wobei die groben Gesteinskörner „schwimmen“ und bewegt werden. Ziel war es, die Fließfähigkeit des Betons M-10 ohne signifikante Verringerung der Formstabilitätskoeffizienten $K_{MP10} = 0,93$ zu erhöhen.

Bedingt durch die Erhöhung des Gehalts an Bindemittelleim im Stoffraum wurde der Anteil an gröberem Zuschlag verringert. Da nach Breitenbücher [30] selbstverdichtende Betone eine vergleichsweise hohe Sensibilität gegenüber Schwankungen in der Betonzusammensetzung zeigen, wurde der gesamte Anteil der Gesteinskörnung in den Betonen M-11 bis M-13 erstmals um rd. 3 M.-% verringert, von 1.575 auf 1.528 kg/m³. Abschließend wurde im Beton M-14 der gesamte Anteil der Gesteinskörnung um rd. 6 M.-% von 1575 auf 1480 kg/m³ reduziert.

Die Betonzusammensetzungen mit den entsprechenden Variationen im Gesteinskörnungsgehalt bzw. Bindemittelleim-Gesteinskörnung-Verhältnis sind Tabelle 36 und Tabelle 37 zu entnehmen. Die verwendeten Sieblinien sind im Anhang A (Abbildung A 3) dargestellt.

Tabelle 36: Grundrezeptur der Betone M-10 (REF) und M-11 bis M-14

Unveränderte Ausgangsstoffe		Menge	Einheit
Zement CEM III/A 42,5 N		350	[kg/m ³]
Quarzmehl		57	[M.-% v. Z.]
w/z-Wert		0,34	[M.-% v. Z.]
Fließmittel (FM 2)		8,0	[M.-% v. Z.]
Luftporenbildner		0,2	[M.-% v. Z.]
Thixotropiermittel (T2)		1,1	[M.-% v. Z.]
Thixotropierende Zusätze	Metakaolin	1,5	[M.-% v. Z.]
	Stärke ST	0,2	[M.-% v. Z.]

Tabelle 37: Varianten in Gesteinskörnung bzw. Bindemittelleim-Gesteinskörnung-Verhältnis

Variierte Ausgangsstoffe		Mischungen					Einheit
		M-10 (REF)	M-11	M-12	M-13	M-14	
Gesteinskörnungsgehalt		1575	1528			1480	[kg/m ³]
Korngruppe	Δ (2/8)		- 10		- 5	- 10	[%]
	Δ (8/16)			- 10	- 5	- 10	[%]
Bindemittelleim-Gesteinskörnung-Verhältnis		35/65	35,7/64,3			36,5/63,5	[%]

In Abbildung 107 sind die Formstabilitätskoeffizienten K_{W10} (Würfelschalung, ●) und K_{MP10} (Mini-Paver, ▲) zusammen mit den entsprechenden Setzfließmaßen der Betone dargestellt.

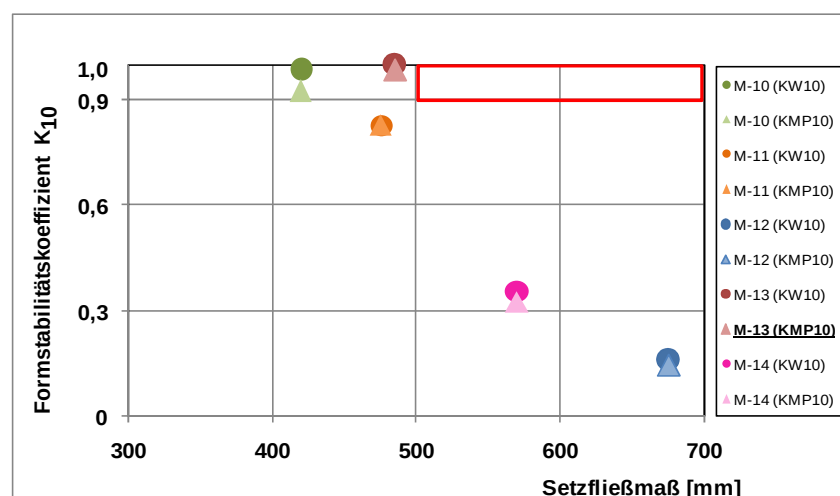


Abbildung 107:
Gegenüberstellung von K_{MP10} (▲) und K_{W10} (●)

Aus Abbildung 107 ist zu erkennen, dass die Formstabilitätskoeffizienten der untersuchten Betone, die anhand der Würfelschalung (K_{W10} , ●) und des Mini-Pavers (K_{MP10} , ▲) ermittelt wurden, sich maximal um 10% voneinander unterscheiden. Dies bekräftigt die positive Auswirkung auf die Entwicklung der thixotropen Struktur bzw. die Grünstandfestigkeit, und der daraus resultierender Formstabilität, im Frischbeton mit dem Zusatz ST auf Stärke-Basis in einem Anteil von 0,2 M.-% v. Z., die bereits in den Abschnitten 5.2.3.5, 7.2.2, und 7.3.2.5 festgestellt wurde.

Die Erhöhung des Bindemittelleimvolumens in den Betonen M-11 bis M-14 führte zu einer Zunahme der Setzfließmaße um bis zu 60%, von 420 mm (M-10 REF) auf 675 mm (M-12), was dann aber mit einer Verringerung um bis zu rd. 85 % der Formstabilitätskoeffizienten einherging. Beton M-13 zeigte mit einem Bindemittelleim-Gesteinskörnung-Volumenverhältnis von 36,5/63,5 (Verringerung um 5% in Korngruppen 2/8 und 8/16 mm) ein Setzfließmaß von 485 mm mit einem gleichzeitigen Formstabilitätskoeffizient von $K_{MP10} = 0,99$ (Abbildung 108).

Trotz der Tatsache, dass das angestrebte minimale Setzfließmaß (500 mm) nicht erreicht werden konnte, wies M-13 einen Luftporengehalt von 5,0 Vol.-% auf, welcher um 0,5 Vol.-% den erforderlichen Mindestluftporengehalt für einen Beton mit 16 mm-Größtkorn gemäß TL Beton StB-07 unterschritt. Am Festbeton wurden ein normkonformer Mikro-Luftporengehalt A_{300} von 3,13 Vol.-% und ein Abstandfaktor L von 0,18 mm bestimmt (Anhang B). Die ermittelte Rohdichte lag bei $\rho = 2.280 \text{ kg/m}^3$. Im Alter von 28 Tagen wies M-13 mit 64 N/mm^2 eine Druckfestigkeit auf, die der Festigkeitsklasse C 50/60 entspricht, womit M-13 die nach TL Beton geforderte Druckfestigkeitsklasse C30/37 erreichte. Bei der ermittelten Druckfestigkeit des Betons M-13 (64 N/mm^2) handelt es sich um Mittelwerte aus 3 Einzelwerten. Alle Einzelwerte sind im Anhang A (Tabelle A-6) dokumentiert.



Abbildung 108: Setzfließmaß (485 mm) und Formstabilitätskoeffizient ($K_{MP10} = 0,99$) der Mischung M-13

Die oben dargelegten Frisch- und Festbetoneigenschaften deuten darauf hin, dass Beton M-13 eine ausreichende Selbstverdichtung aufwies.

7.4.3 Übertragbarkeit auf Betone mit Zement CEM I 42,5 R

7.4.3.1 Setzfließmaß und Formstabilität

Die bisherigen Ergebnisse bezüglich Setzfließmaß und Formstabilität wurden mit Mischungen erzielt, die mit Zement CEM III/A 42,5 N hergestellt wurden. Um die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf Betone, die mit Portlandzement hergestellt sind, überprüfen zu können, wurde ausgehend von Beton M-13 eine Variation mit CEM I 42,5 R (Beton M-15) entwickelt. Beton M-15 enthielt CEM I 42,5 R bei ansonsten gleicher Zusammensetzung wie Beton M-13. In beiden Betone wurde eine Sieblinie A/B 16 verwendet (Anhang A, Abbildung A-4). Die untersuchte Zusammensetzung ist der Tabelle 38 zu entnehmen.

Tabelle 38: Variationen der untersuchten Betone

Unveränderte Ausgangsstoffe		Mischungen		
		M-13	M-15	Einheit
Zement CEM III/A 42,5 N		350		[kg/m³]
Zement CEM I 42,5 R			350	[kg/m³]
w/z-Wert		0,34		[-]
Quarzmehl		57		[M.-% v. Z.]
Luftporenbildner		0,2		[M.-% v. Z.]
Thixotropiermittel (T2)		1,1		[M.-% v. Z.]
Thixotropierende Zusätze	Metakaolin	1,5		[M.-% v. Z.]
	Stärke ST	0,2		[M.-% v. Z.]
Fließmittel (FM 2)		8,0		[M.-% v. Z.]
Gesteinskörnungsgehalt		1.528		[kg/m³]
Leim-Gesteinskörnung-Verhältnis		35,7/64,3		[%]

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 109 dargestellt.

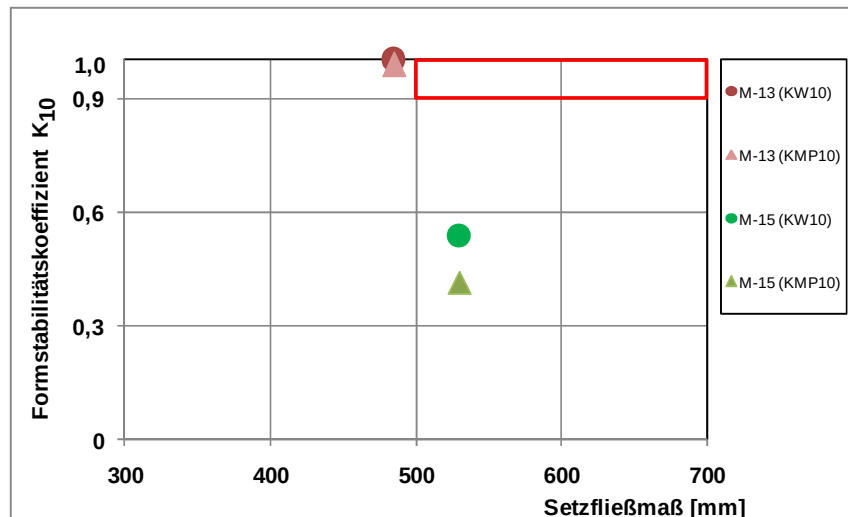


Abbildung 109: Gegenüberstellung von K_{MP10} (▲) und K_{W10} (●)

Wie aus Abbildung 109 ersichtlich ist, führte der Austausch von CEM III/A 42,5 N durch CEM I 42,5 R im Beton M-15 zu einer Abnahme der Formstabilität um rd. 60%, welche mit einer Erhöhung des Setzfließmaßes um rd. 9% einherging. Dieses Ergebnis korreliert mit denjenigen, die im Abschnitt 5.1.4 (Basisuntersuchungen an Bindemittelleimen) ermittelt wurden.

Ausgehend von Beton M-15 wurden zwei weitere Variationen entwickelt, um den angestrebten Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und hoher Formstabilität zu erzielen. Nach Graubner [48] hat eine gröbere Kornzusammensetzung einen höheren Gehalt an zusammenhängenden Hohlräumen zur Folge. Beispielsweise stellte Hummel [63] fest, dass die Sieblinie A 16 gegenüber der Sieblinie B 16 einen um 3 Vol.-% höheren Hohlraumgehalt aufweist. Wie im Abschnitt 2.5 beschrieben wurde, liefert eine größtmögliche Packungsdichte den geringsten Hohlraumgehalt des Kornhaufwerks. Folglich führt eine höhere Packungsdichte bei konstanten Wassergehalt zu einer besseren Verarbeitbarkeit [87], da ein minimaler Zementleimbedarf benötigt wird, um die Gesteinskörnungen einzuhüllen [53]. Nach Wang [145] führt eine um rd. 3% höhere Schüttdichte der Gesteinskörnungen und somit eine höhere Packungsdichte des daraus resultierenden Betons, zu besseren selbstverdichtenden Eigenschaften. Nebenbei zeichnet sich nach Bornemann [26] eine direkte Korrelation zwischen der Packungsdichte der Betone und ihrer Grünstandfestigkeit ab. Mit einer höheren Packungsdichte kann somit eine höhere Grünstandfestigkeit erzielt werden (Abschnitt 2.6).

Um den Einfluss der Packungsdichte der Gesteinskörnungen im Beton M-16 zu untersuchen, wurde ausgehend von Mischung M-15 im Beton M-16 eine feinere Sieblinie verwendet. Das Größtkorn wurde im Beton M-16 auf 8 mm (A/B 8) reduziert. Der Kornaufbau der verwendeten Sieblinien sowie die ermittelten Schüttdichten nach DIN 4226 [N 8] und

DIN EN 12620 [N 24] sind in Tabelle 39 dargestellt. Bei den Ergebnissen der Schüttdichten handelt es sich um Mittelwerte aus jeweils 3 Einzelwerten. Alle Einzelwerte sowie die eingesetzten Sieblinien sind im Anhang A (Tabelle A-4, Abbildung A-4 und Abbildung A-5) dokumentiert.

Tabelle 39: Korngemische und entsprechende Schüttdichten

Unveränderte Ausgangsstoffe		Mischungen		
		M-15	M-16	Einheit
Gesteinskörnungsgehalt		1.528		[kg/m ³]
Korngruppe	0/2	41,0	41,0	[%]
	2/8	29,5	59,0	[%]
	8/16	29,5	0	[%]
Schüttdichte		1.530	1.560	[kg/m ³]

Bei konstantem Gesteinskörnungsgehalt (1.528 kg/m³) bieten die Gesteinskörnungen der Sieblinie A/B 8 eine höhere spezifische Oberfläche im Vergleich mit Sieblinie A/B 16. Eine höhere spezifische Oberfläche weist einen höheren Bindemittelleimbedarf auf. Die Erhöhung der spezifischen Oberfläche der Gesteinskörnung führt beim unveränderten Bindemittelleimvolumen zu einer Verringerung der Verarbeitbarkeit (Setzfließmaß) des Betons. Diese Verringerung wurde im Beton M-17 durch eine Erhöhung des Fließmittelgehaltes um 0,5%, von 8,0 auf 8,5 M.-% v. Z., eine Erhöhung des Leim-Gesteinskörnung-Verhältnisses auf 40/60, sowie mittels einer Erhöhung des Zementgehaltes von 350 auf 420 kg/m³ versucht, auszugleichen. Die Erhöhung des Bindemittelleimanteils pro m³ Beton trägt zur Verringerung der inneren Reibung zwischen den Gesteinskörnern bei, was sich auf das „Schwimmen“ der groben Gesteinskörnung im Leim positiv auswirkt und zur erhöhten Fließfähigkeit des SVB führt [139][N 32]. Im Beton M-17 wurde die gleiche Sieblinie A/B 8 wie im Beton M-16 eingesetzt (Anhang A, Abbildung A-5). Die entsprechenden Zusammensetzungen der entwickelten Betone sind Tabelle 40 zu entnehmen.

Tabelle 40: Variationen der untersuchten Betone

Unveränderte Ausgangsstoffe		Mischungen			
		M-15	M-16	M-17	Einheit
Zement CEM I 42,5 R		350		420	[kg/m ³]
w/z-Wert		0,34			[-]
Quarzmehl		57			[M.-% v. Z.]
Luftporenbildner		0,2			[M.-% v. Z.]
Thixotropiermittel (T2)		1,1			[M.-% v. Z.]
Thixotropierende Zusätze	Metakaolin	1,5			[M.-% v. Z.]
	Stärke ST	0,2			[M.-% v. Z.]

Fließmittel (FM 2)		8,0	8,5	[M.-% v. Z.]
Gesteinskörnungsgehalt		1.528		[kg/m ³]
Korngruppe	0/2	41,0	41,0	[%]
	2/8	29,5	59,0	[%]
	8/16	29,5	0	[%]
Leim-Gesteinskörnung-Verhältnis		35,7/64,3		40/60 [%]

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 110 dargestellt.

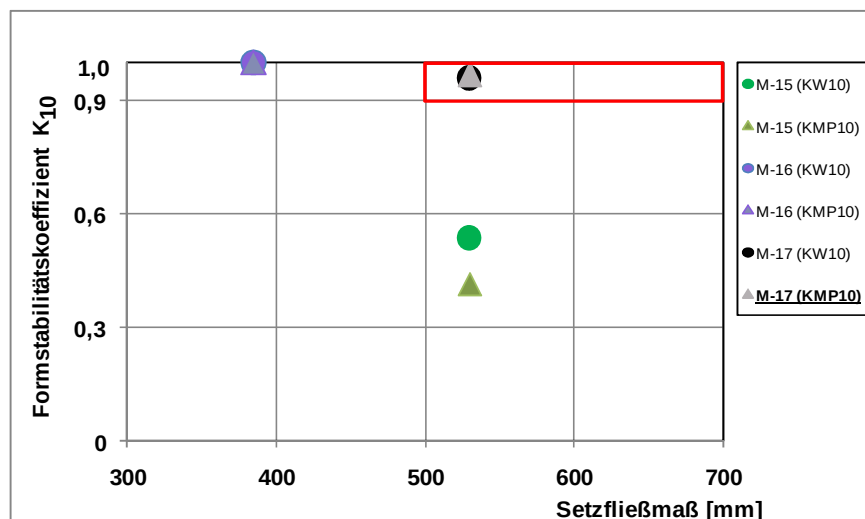


Abbildung 110: Gegenüberstellung von K_{MP10} und K_{W10}

Wie aus Tabelle 39 ersichtlich ist, zeigte die Sieblinie A/B 8 eine um rd. 2% höhere Schüttdichte im Vergleich zur Sieblinie A/B 16. Dies führt nach Wang [145] zu einer Verbesserung der selbstverdichtenden Eigenschaften der Frischbetone. Im Gegensatz dazu weist Beton M-16 im Vergleich zu Beton M-15 einen Rückgang seines Setzfließmaßes um rd. 28% auf, von 530 auf 385 mm. Selbstverständlich zeigt ein Beton mit einem Setzfließmaß von 385 mm keine selbstverdichtenden Eigenschaften. Da nach Wesche [146] der Wasser- bzw. Bindemittelleimbedarf, der für eine gewünschte Konsistenz erforderlich ist, in erster Linie von Kornzusammensetzung und Größtkorn der Gesteinskörnungen bestimmt wird, ist die Verminderung des Setzfließmaßes im Beton M-16 auf die höhere spezifische Oberfläche des eingesetzten Korngemisches AB/8 zurückzuführen. Sieblinie A/B 16 und A/B 8 zeigen verschiedene k-Werte. Die hier verwendete Sieblinie A/B 16 wies einen k-Wert von 4,03 auf, währenddessen A/B 8 einen k-Wert von 3,26. Folglich weisen beide Sieblinien verschiedene Wasseransprüche für die gleiche Konsistenz eines Frischbetons auf.

Mischung M-17 übertraf mit 530 mm das im Abschnitt 6.3.2.2 angestrebte minimale Setzfließmaß (500 mm) ebenso wie den am Anfang dieses Forschungsvorhaben als Ziel festgesetzten Formstabilitätskoeffizienten ($K_{MP10} \geq 0,90$). Die Erhöhung des Zementgehalts

um 20% bzw. um 4,3% des Volumenanteils vom Bindemittelleim im Stoffraum, zusammen mit einem Größtkorn von 8 mm wirkte sich positiv auf den angestrebten Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und hoher Formstabilität aus. Das Setzfließmaß konnte um rd. 38% auf 530 mm erhöht werden, einhergehend mit einem unwesentlichen Verlust (-3%) der Formstabilität, was einem Formstabilitätskoeffizient von $K_{MP10} = 0,97$ entspricht.

7.4.3.2 Entwicklung der Grünstandfestigkeit

Weiterhin wurde die Entwicklung der Grünstandfestigkeit und der daraus resultierenden Formstabilität der Mischung M-17 nach 3, 5 und 10 Minuten untersucht.

Zur Ermittlung der Grünstandfestigkeit wurden drei Würfelschalungen mit einer Kantenlänge von 150 mm einlagig und ohne externe Verdichtung mit Beton befüllt. Nach den entsprechenden Wartezeit (3, 5 bzw. 15 Minuten) wurde der jeweilige Probekörper entschalt und seine Grünstandfestigkeit wie im Abschnitt 6.3.2.2.4 bestimmt.

Für die Bestimmung der Formstabilität anhand des Mini-Pavers wurde die Ziehgeschwindigkeit des Motorantriebs so geregelt, dass die Fließzeit des frischen Betons durch den horizontalen Schenkel des Mini-Pavers Wartezeiten von 3, 5 und 10 Minuten (K_{MP3} , K_{MP5} und K_{MP10}) entspricht.

Die ermittelten Ergebnisse und der Vergleich mit den 10-minütigen Messungen sind in Abbildung 111 und Abbildung 112 dargestellt.

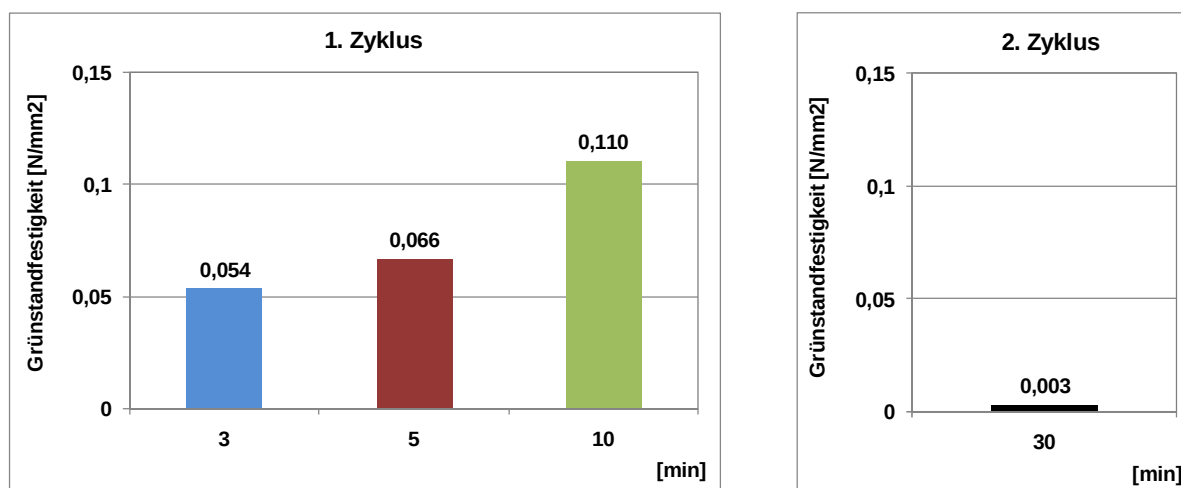


Abbildung 111: Zeitliche Entwicklung der Grünstandfestigkeit der Mischung M-17, Links: 1. Zyklus; Rechts: 2. Zyklus

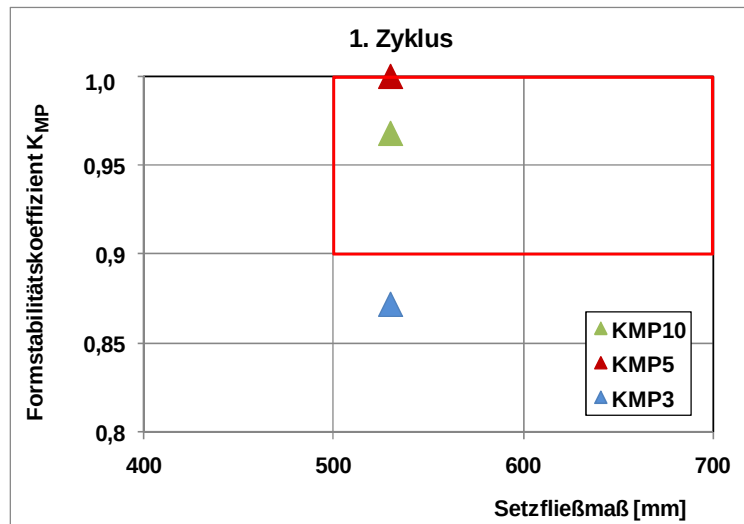


Abbildung 112: Gegenüberstellung von K_{MP} nach 3, 5 und 10 Minuten

Abbildung 111 stellt die zeitliche Entwicklung der Grünstandfestigkeit der Mischung M-17 dar. Wie ersichtlich ist, stieg sie im 1. Zyklus um rd. 100%, von $0,054 \text{ N/mm}^2$ nach 3 Minuten auf $0,11 \text{ N/mm}^2$ nach 10 Minuten bzw. innerhalb von 7 Minuten an. Dies ist auf den höheren Grad des Mikrostrukturaufbaus (innere Gefüge) zurückzuführen, der je größer die Ruhezeit ist, umso höher wird (Abschnitt 2.3.3.2). Erwartungsgemäß spiegelten sich die Erhöhungen der Grünstandfestigkeiten in den Formstabilitätskoeffizienten K_{MP} wieder, die mit dem Mini-Paver nach 5 und 10 Minuten bestimmt wurden (K_{MP5} bzw. K_{MP10}). Aus Abbildung 112 lässt sich schlussfolgern, dass im 1. Zyklus der Formstabilitätskoeffizient der Mischung M-17 nach 5 Minuten (K_{MP5}) mit einem Wert von 1,0 im angestrebten Zielbereich liegt. Die dafür minimal benötigte Grünstandfestigkeit betrug $0,066 \text{ N/mm}^2$. Nach 10 Minuten wurde für diese Mischung jedoch ein Formstabilitätskoeffizient $K_{MP10} = 0,97$ ermittelt, diese Verringerung im Vergleich zu K_{MP5} ist jedoch auf Prüfstreuungen zurückzuführen.

Darüber hinaus zeichnete M-17 nach nur 3 Minuten im Unterschied zu den Formstabilitätskoeffizienten K_{MP5} und K_{MP10} einen Formstabilitätskoeffizient K_{MP3} von 0,87 aus. Obwohl der Koeffizient K_{MP3} kleiner als 0,9 ist und somit außerhalb des Zielbereiches liegt, ist es aus Abbildung 113 deutlich zu erkennen, dass der Beton M-17 nach 3 Minuten eine ausgeprägte Formstabilität aufwies.

Verglichen mit der nach 3 Minuten entwickelte Grünstandfestigkeit im 1. Zyklus, weist die Grünstandfestigkeit der Mischung M-17 im 2. Zyklus nach 30 Minuten einen Rückgang von rd. 95 % auf, von $0,054$ auf $0,003 \text{ N/mm}^2$. Dieser Rückgang ist auf die teilweise Reversibilität der Thixotropie der Zementsuspensionen nach einem erneuten Mischzyklus zurückzuführen, die im Abschnitt 2.4.2.1 beschrieben wurde und schon an den Ergebnissen an Bindemittelleimen (Abschnitt 5.2.2.4) und Betonen (Abschnitt 7.3.2.5) gezeigt wurden. Die im

2. Zyklus entwickelte Grünstandfestigkeit ($0,003 \text{ N/mm}^2$) reichte nicht aus, um die Formstabilität bei Anwendung des Mini-Pavers aufzuweisen.



Abbildung 113: Setzfließmaß (530 mm) und Formstabilitätskoeffizient ($K_{MP3} = 0,87$) der Mischung M-17

7.4.3.3 Anforderungen an SVBs und Betone für Fahrbahndecken

Die Anforderungen nach DIN EN 206-9 [N 28] bezüglich Viskosität, Blockierneigung und Entmischungswiderstand, die einen Beton für die Eignung als selbstverdichtenden Beton erfüllen muss, wurden von Beton M-17 erfüllt.

Bezüglich der Viskosität wurde für M-17 eine Trichterauslaufzeit von 117 s ermittelt, die eindeutig den gegebenen Grenzwert von $9 \pm 3 \text{ s}$ überschritt. Diese höhere ermittelte Auslaufzeit deutet nach DIN EN 206-9 [N 28] auf eine hohe Viskosität hin. Eine hohe Viskosität gewährleistet die Stabilität der Mischung M-17, wohingegen jedoch die Erzielung einer guten Oberflächenbeschaffenheit sowie die Selbstentlüftung erschwert werden. Untersuchungen am Frischbeton, die mit dem Mini-Paver durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass bei dieser Viskosität die Oberflächenqualität, die von einem selbstverdichtenden Beton zu erwarten ist, bei Mischung M-17 ohne weitere Behandlung nach dem Einbau erreicht wurde (Abbildung 113). In gleicher Weise zeigte sich nach den Untersuchungen mit dem Prüfgerät für das Druckausgleichsverfahren zur Bestimmung des Luftporengehaltes nach DIN EN 12350-7 [N 14], dass der gemessene Luftporengehalt des Betons M-17 6,5 Vol.-% betrug, womit die Anforderungen nach TL Beton StB-07 [N 31] (Fahrbahndecken aus Beton) und nach DIN EN 206-9 [N 28] (selbstverdichtender Beton) mit einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 8 mm (6,5 Vol.-%) erfüllt werden. Dieser

Luftporengehalt korreliert mit einer Frischbetonrohddichte von $\rho = 2.260 \text{ kg/m}^3$. Bezüglich der Blockierneigung stellen die Europäische Richtlinien für SCC [N 32] und DIN EN 206-9 fest, dass bei geringer oder nicht dichter Bewehrung, wie bei Fahrbahndecken, die entsprechende Anforderung nicht berücksichtigt werden muss.

Im Hinblick auf die Festbetoneigenschaften wies M-17 eine mittlere Druckfestigkeit von 64 N/mm^2 im Alter von 28 Tagen (Festigkeitsklasse C 50/60) auf. Alle Einzelwerte sind im Anhang A (Tabelle A-7) dokumentiert.

Die Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands (CDF-Test) ergab, dass M-17 einen erhöhten Widerstand sowohl gegen Oberflächenschädigung als auch gegen eine Zerstörung der Betonmatrix aufwies.

Die Abwitterungsmenge des Betons M-17 lag nach 28 FTW von 350 g/m^2 deutlich unter 1500 g/m^2 bzw. dem Grenzwert der RILEM Recommendation [N 30]. Bezüglich der inneren Schädigung sank der rel. dyn. E-Modul geringfügig um 0,5% auf 99,5% ab. Diese unwesentliche Verringerung des rel. dyn. E-Modul ist auf die geringe aufgenommene Wassermenge (0,5 % nach 28 FTW) während der Frost-Tausalz-Prüfung zurückzuführen. Diese niedrige Feuchtaufnahme ist auf das künstlich eingeführte Luftporennetz, das die Mikroislinsenpumpe während der Befrostung unterbricht, zurückzuführen. Die Bestimmung der Luftporenkennwerte im Beton M-17 ergab einen Mikro-Luftporengehalt A_{300} von 1,73 Vol.-% und einen Abstandfaktor L von 0,28 mm (Anhang B). Diese Luftporenkennwerte näherten sich stark den nach TL Beton-StB 07 [N 31] angeforderten Kennwerten ($A_{300} \geq 1,8 \text{ Vol.-%}$ und $L \leq 0,20$) an.

8. Zusammenführende Diskussion

Das Ziel des Forschungsvorhabens „Selbstverdichtender Beton mit hoher Grünstandfestigkeit für den Einsatz in Gleitschalungsfertigern im Betonstraßenbau“ war es, abzuschätzen, inwieweit für den Fahrbahndeckenbau ein selbstverdichtender Beton entwickelt werden kann, der für Straßenbeton, der in Gleitschalungsfertigern eingebaut wird, geeignet ist.

Dieses Ziel kann mit Betonen erreicht werden, die ein ausgeprägtes thixotropes Verhalten aufweisen. Daher wurden schwerpunktmäßig rheologische Untersuchungen an Bindemittelleimen, Mörteln und Betonen durchgeführt, wobei im wesentlichen die Auswirkungen von unterschiedlichen Zusatzstoffen und Zusatzmitteln, wie z.B. Quarzmehl, Metakaolin, Thixotropiermitteln und thixotropierenden Zusätzen (Schichtsilikate und Kartoffelstärke) auf die rheologischen und thixotropen Eigenschaften erfasst werden sollten.

Die im Abschnitt 5.1 erzielten Ergebnisse (Basisuntersuchungen an Bindemittelleimen: Auswirkungen einzelner Zusätze) haben gezeigt, dass das innere Gefüge von Bindemittelleimen nach zwei sukzessiven Mischzyklen nur teilweise wieder aufgebaut werden konnte. Dies spiegelte sich im 2. Zyklus an einem geringeren Formstabilitätskoeffizienten K_L wieder. Hierbei zeichnete sich eine exponentielle Abnahme des Formstabilitätskoeffizienten verbunden mit einer Zunahme der Fließfähigkeit ab. Insbesondere konnte festgestellt werden, dass Bindemittelleime, die nach dem 1. Zyklus Setzfließmaße größer als 140 mm zeigten, eine ausgeprägte Verflüssigung und daher niedrigere Formstabilitätskoeffizienten im 2. Zyklus aufwiesen (Abbildung 68). Nach Tattersall et al. [132] ist die Verringerung der Koeffizienten auf die teilweise Reversibilität der Thixotropie zementöser Suspensionen zurückführbar. Nach Banfill [7] und Wüstholtz [154] ist das rheologische Verhalten des zementösen Systems von seiner Schergeschichte abhängig. Nach einem erneuten Mischzyklus entsteht eine neue innere Struktur infolge einer größeren Deagglomeration und eines Strukturbruchs der Flocken. Das neue System besteht aus neuen nicht miteinander verbundenen Agglomeraten und Partikeln. Als Resultat ergeben sich neue anziehende und abstoßende Kräfte, die die Wiedervereinigung infolge von Van-der-Waals-Kräften zwischen den entstandenen beiden Teilchen zum ursprünglichen einzelnen Partikel nach Beenden der Scherbeanspruchung verhindern und folglich das rheologische Verhalten der Bindemittelleime im 2. Zyklus bestimmen.

Die Zugabe von Zusatzmitteln auf Kaolinit- als auch auf Biopolymer-Basis führten zu thixotropen Eigenschaften der Bindemittelleime. Die Zugabe von Metakaolin sowie von Schichtsilikaten auf Kaolinit-Basis (SK1) zeigte eine positive Auswirkung auf die Entwicklung der thixotropen Eigenschaften in beiden Zyklen. Die zugrundeliegende Ursache hierfür ist,

dass die Kaolinit-Teilchen eine Kartenhausstruktur bilden können [39][78]. Die Kartenhausstruktur bildet sich aufgrund der oberflächigen Ladungen der Teilchen über Kante/Fläche-Koagulation und führt zum Auftreten einer Fließgrenze. Beim Auftreten der Fließgrenze wird das Verhalten des Leims als plastisch bezeichnet. Das plastische Verhalten der Leime wurde anhand von freistehenden Leimkörpern nach einer 5-minütigen Wartezeit im 1. Zyklus mittels des Formstabilitätskoeffizienten K_{L1} charakterisiert. Das thixotrope Verhalten dieser Bindemittleime (mit Zusätzen auf Kaolinit-Basis) war nach der erneuten Scherbeanspruchung im 2. Mischzyklus deutlich zu erkennen. Nach dem 2. Mischzyklus wiesen die Bindemittleime mit Metakaolin und SK1 Setzfließmaße von 180 bis 275 mm auf. Dies deutet darauf hin, dass die Leime zum Fließen gebracht wurden und folglich die im 1. Zyklus gebildete innere Struktur (mit Formstabilitätskoeffizienten $K_{L1} > 0,8$) zerstört wurde. Nach einer zweiten Wartezeit von 10 Minuten wiesen die im 2. Zyklus bestimmten Formstabilitätskoeffizienten K_{L2} Werte von 0,71 auf, was zeigte, dass die innere Struktur dieser Bindemittleime in einer 2. Ruhephase wieder aufgebaut wurde. Daher kann festgestellt werden, dass sich die Zugabe von Metakaolin und Schichtsilikaten SK1 positiv auf die Entwicklung der thixotropen Eigenschaften der Bindemittleime auswirkt.

Die Thixotropiermittel T2 und T3 auf Basis von modifizierten organischen Biopolymeren erwiesen sich als die wirksamsten Thixotropiermittel (Abbildung 67). Zusatzmittel auf Biopolymer-Basis wie Welan Gum (T3) sind Polysaccharide, die aufgrund ihrer stark verzweigten Haupt- und Seitenketten (baumartige Verzweigung) zum Einbau einer Mikrostruktur bzw. thixotropen Struktur in die Dispersion führen, wenn die Zement- und Quarzmehl-Teilchen durch die Polymere (Amylopektin) verbrückt sind. Hinsichtlich Thixotropiermittel T2 wurde von dem Hersteller keine weitere Spezifizierung über seine chemische Zusammensetzung bekannt gegeben.

Im Abschnitt 5.2 wurden die zuvor identifizierten Zusatzmittel (thixotropierende Zusätze sowie Thixotropiermittel), die eine positive Auswirkung auf die Entwicklung der thixotropen Eigenschaften aufwiesen, weiter untersucht. Ziel war es, den im Abschnitt 5.1 erzielten Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und hoher Formstabilität in beiden Zyklen zu optimieren. Zu diesem Zweck wurden Bindemittleime hergestellt, die sich im Wesentlichen nach Art des verwendeten Thixotropiermittels und im Wassergehalt unterschieden. Dazu wurden u.a. Untersuchungen im Rotationsviskosimeter durchgeführt, um die rheologischen Parameter Fließgrenze und Viskosität abschätzen zu können. Die thixotropen Eigenschaften der entwickelten Bindemittleime wurden anhand einer Thixotropiezahl T_i , die durch das Verhältnis des Strukturabbaus zum Strukturaufbau der gemessenen Schermomente bestimmt wurde, ermittelt. Zusätzlich wurde zur Beurteilung der thixotropen Eigenschaften

von Bindemittelleimen die Formstabilität anhand des Formstabilitätskoeffizienten K_L herangezogen.

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse konnte allgemein festgestellt werden, dass die Fließfähigkeit und die thixotropen Eigenschaften der untersuchten Bindemittelleime primär von dem jeweiligen Thixotropiermittel abhängen. Besonders wirksam zeigte sich das Thixotropiermittel T3 auf Basis von Tetrasacchariden. Die Zugabe von Thixotropiermittel T3 zu den Nullbindemittelleimen (ohne Thixotropiermittel) bewirkte eine signifikante Erhöhung des Formstabilitätskoeffizienten K_{L1} und K_{L2} (Abbildung 82). Die Formstabilitätskoeffizienten der Bindemittelleime REF Q und REF M konnten um das rd. 4- bis 5-fache auf ca. 0,90 gesteigert werden. Dies ging allerdings mit einer Verringerung der Setzfließmaße der Bindemittelleime REF Q und REF M auf 50% des ursprünglichen Wertes (Leime Null Q und Null M) einher. Dennoch konnten die angestrebten Eigenschaften (Setzfließmaß ≥ 200 mm und Formstabilität $K_L \geq 0,90$) bereits eindeutig angenähert werden. Erwartungsgemäß wiesen die Leime REF Q und REF M (mit Thixotropiermittel T3) eine Erhöhung der rel. Fließgrenze auf 42 N.mm (REF Q) bzw. 24,5 N.mm (REF M) und eine 2,6- (REF Q) bzw. 2,9-fache (REF M) Erhöhung der rel. Viskosität auf. Nach Schmidt [117] ist die Entwicklung der Fließgrenze sowie die Erhöhung der Viskosität auf die Ladungsneutralisation zwischen den entgegengesetzten Ladungen der Polymere und der Zement-Teilchen zurückzuführen, die sich nach Zugabe von Thixotropiermittel bzw. anionischen Polysacchariden in zementösen Suspensionen entwickelt. Die resultierende Verringerung der Setzfließmaße der Leime ist nach Griesser [50][51] und Noor [93] auf die Erhöhung der Fließgrenze und die Verbesserung der thixotropen Eigenschaften, die zur Entwicklung der inneren Mikrostruktur in der Suspension führen, zurückzuführen.

Verglichen miteinander wiesen Bindemittelleime der Serie T3_M (mit Metakaolin) gegenüber Leimen der Serie T3_Q (mit Quarzmehl) höhere rel. Fließgrenzen und Viskositäten auf. Diese spiegelten sich (bei ähnlichen Setzfließmaßen) in höheren Thixotropiezahlen und letztendlich höheren Formstabilitätskoeffizienten in beiden Zyklen wieder (Abbildung 82 a und b). Dies kann auf die Reaktionsfähigkeit des Metakaolin zurückgeführt werden. Wenn sich ein Kaolinit- bzw. Montmorillonit-Wasser-Gemisch im Ruhezustand befindet, bewirken die elektrostatischen Aufladungen der Oberflächen von Tonkomponenten ein Erstarren der Suspension in Form eines Gels. Dieser Zustand wird als thixotroper Zustand bezeichnet [59]. Aus diesem Grund wird das Fließverhalten der Dispersion durch die Bildung dieser Aggregate bestimmt. Die Aggregationsmöglichkeiten, die die rheologischen Eigenschaften der Bindemittelleime bestimmen, erfolgen über Bänder- (Montmorilloniten) und Kartenhausstrukturen (Kaolinit). Diese erhöhen die Fließgrenze sowie die Viskosität der Suspensionen [144]. Es wurde auch beobachtet, dass unabhängig des verwendeten Thixotropiermittels (T2 bzw. T3) die mit Zusatz ST auf Stärke-Basis hergestellten

Bindemittelleime einen erhöhten Formstabilitätskoeffizient K_{L1} und K_{L2} in beiden Zyklen aufwiesen. Im Gegensatz zu allen anderen Bindemittelleimen zeigten sie keine Verflüssigung nach einem zweiten Mischzyklus (Abbildung 73 sowie Abbildung 82 a und b). Dieses Verhalten wurde schon in den Ergebnissen des Abschnittes 5.1.6 (Untersuchungen an einzelnen Zusätzen, thixotropierende Zusätze) erläutert und ist nach Tepstra [134] auf die Wechselwirkungen zwischen Amylopektin (Hauptbestandteile der Stärke-Moleküle) und den Zement-Teilchen zurückzuführen. Der Wiederaufbau der inneren Struktur erfolgt über die Verbrückung der Zement-Teilchen durch die Biopolymere.

In einer zweiten Untersuchungsphase wurden auf Grundlage der Ergebnisse aus den Basisuntersuchungen an Bindemittelleimen Betonzusammensetzungen in Anlehnung an Okamuras Verfahren konzipiert. Die entwickelte Betone wurden im Nachhinein so modifiziert, dass sie sowohl den Anforderungen an die Verarbeitbarkeit und die Entlüftung eines selbstverdichtenden Betons als auch den Anforderungen an eine ausreichend hohe Formstabilität beim Verlassen der Gleitschalung genügen. Das Ziel war die Übertragbarkeit der bisher ermittelten Ergebnisse aus den Basisuntersuchungen an Bindemittelleimen zu überprüfen. Bei der Entwicklung des Mörtels (Matrix) für einen thixotrop eingestellten SVB wurden diejenigen Thixotropiermittel und thixotropierenden Zusätze eingesetzt, die im Abschnitt 5 (Ergebnisse der Basisuntersuchungen an den Bindemittelleimen) die besten Ergebnisse erzielten.

Die Untersuchungen an thixotrop eingestellten Mörteln haben die an Bindemittelleimen ermittelten Ergebnisse bestätigt. Die Verwendung von Zusatzmitteln auf Basis modifizierter organischer Polymere (Polysaccharide und -derivate), wie Thixotropiermittel T2 und des Zusatzes ST auf modifizierte Stärke-Basis, führten zu einer Erhöhung um das bis zu 4,4-fache des Formstabilitätskoeffizienten K_M , verbunden mit einem Rückgang des Setzfließmaßes um bis zu rd. 60%. Dieses Verhalten ist auf die Tendenz der Polysaccharide zur Bildung von Aggregaten und Mikrostrukturen in Gegenwart von Wasser, die im Abschnitt 5.1.8 erläutert wurden, zurückzuführen. Bei Wasserzugabe bilden die zunächst als „random coil“ (ungeordnete Strukturen) vorliegenden Polysaccharidmoleküle durch Nebenvalenzkräfte eine zusammenhängende dreidimensionale Struktur, in die sich Wasser einlagert. Dadurch entstehen plastisch verformbare Systeme, die nach Scherbeanspruchung wieder aufgelöst werden können.

Eine Senkung um rd. 30% des ermittelten β_p (Wasserrückhaltemaß, Mindestwassergehaltes eines Mehlkorngemisches) in den Mörteln erwies sich als positiv für die Verbesserung des angestrebten Kompromisses zwischen hohem Setzfließmaß und hoher Formstabilität. Dies entsprach gleichzeitig der Empfehlung von Okamura [94], nach welcher das wirkliche Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis für Hohlraumfüllung bzw. der Mindestwassergehalt

eines Mehlkorngemisches mit Quarzmehl bis zu rd. 30% unterhalb des durch Extrapolieren gewonnenen β_P -Wertes liegt, da die reale Kurve nicht linear verläuft. Dazu wurde der w/z-Wert der Mörtel um 0,16 auf 0,35 verringert, so dass das Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis (V_W/V_P) für eine vollständige Sättigung um rd. 30 % gesenkt werden konnte.

Eine weitere Verbesserung des Kompromisses zwischen hohem Setzfließmaß und Grünstandfestigkeit der Mörtel konnte durch die Zugabe des Zusatzes ST auf Stärke-Basis und Metakaolin erzielt werden. Die Untersuchungen an thixotrop eingestellten Mörteln ergaben, dass durch die Zugabe von Stärke (ST) die Grünstandfestigkeit der Mörtel mit Metakaolin erhöht werden konnte. Beispielsweise wies der Mörtel Q44 der Gruppe 8 (mit Stärke und Metakaolin) ein Setzfließmaß von 186 mm auf. Ein vergleichbarer Mörtel der Gruppe 7 (mit Metakaolin) mit dem gleichen Setzfließmaß (186 mm) zeigte eine um rd. 60% niedrigere Grünstandfestigkeit (Abbildung 91). Die Ursache hierfür ist, dass die Polysaccharide zur Entwicklung der inneren Mikrostruktur der Suspensionen beitragen. Die Wirkung der Polysaccharide (Stärke) beruht auf Hydrokolloideigenschaften [24]. Die Hydrokolloide bilden mit Wasser halb feste, kolloiddisperse Systeme unterschiedlicher Viskosität bzw. Sole und Gele aus. Dies führt nach Tepstra [134] in zementöser Struktur zum Einbau einer thixotropen Struktur in der Dispersion, wenn die Zement- und Füllerteilchen durch die Polymere verbrückt sind.

Die Ergebnisse aus Setzfließversuchen und die Formstabilitätskoeffizienten der untersuchten Mörtel führen zu dem Schluss, dass es mit den benutzten Ausgangsstoffen nicht möglich ist, einen Mörtel zu erhalten, der ein Setzfließmaß für einen SVB der Konsistenzklasse SF2 (Setzfließmaß von 245 mm) kombiniert mit einem Formstabilitätskoeffizienten $K_M \geq 0,9$ nach einer Wartezeit von 5 Minuten aufweist. Es ist jedoch möglich, Mörtel mit Setzfließmaßen um rd. 200 mm und Formstabilitätskoeffizienten $K_M \geq 0,9$ herzustellen.

Ausgehend von den ermittelten Ergebnissen an Mörteln wurden verschiedene Betonrezepturen entwickelt und hinsichtlich ihrer thixotropen Eigenschaften beurteilt. Für alle Mischungen wurde ein Setzfließmaß größer 500 mm angestrebt. Hinsichtlich der Grünstandfestigkeit mussten die Betone einen Formstabilitätskoeffizienten $K_{Wi} \geq 0,90$ aufweisen. Die Untersuchungen zur Entwicklung der Betone mit ausgeprägten thixotropen Eigenschaften wurden in Basis- und Hauptuntersuchungen an Betonen unterteilt.

In den Basisuntersuchungen (Abschnitt 6.3.2) konnte in einer ersten Annäherung gezeigt werden, dass die an Leimen und Mörteln ermittelten Ergebnisse auf Betone übertragbar sind. In Betonen hatte sich eine Verringerung des Zement-Füller-Volumenverhältnis von 65/35 auf rd. 60/40 als vorteilhaft gezeigt, um die beiden einander entgegenlaufenden Anforderungen (Setzfließmaß und Formstabilität) erreichen zu können.

Die Verringerung des Zement-Füller-Volumenverhältnisses auf 60/40 führte zu einer Senkung des Zementgehaltes auf 350 kg/m^3 mit einer simultanen Erhöhung des Quarzmehlgehaltes auf 200 kg/m^3 (ca. +15,5 %). Beim unveränderten β_p von 0,99 brachte die Verringerung des Zementgehaltes (ca. -8,5 %) eine Erhöhung des w/z-Wertes im Beton auf 0,54 mit sich. Dies spiegelte sich in einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons wieder [140]. Allerdings erzielten Betone mit einem auf 0,91 reduzierten β_p bzw. einem w/z-Wert von 0,49 die besten Ergebnisse.

In den Hauptuntersuchungen wurde der w/z-Wert der Betone entsprechend den Anforderungen an Straßenbetone bei Fahrbahndecken der Bauklasse SV, I-III (Oberbeton, Expositionsklasse XF4) auf 0,45 abgesenkt. Dies führte beim unveränderten Zement- bzw. Quarzmehlgehalt zu einem um rd. 16,5 % geringeren β_p -Wert ($\beta_p = 0,83$) als im Abschnitt 7.1 ermittelt und folglich zu einem geringeren Wassergehalt. Der Verlust der Verarbeitbarkeit der Betone, resultierend aus der geringeren Menge an Anmachwasser wurde in Abstimmung an Okamuras Verfahren [94] mit einem höheren Anteil an Fließmittel kompensiert. Es hatte sich gezeigt, dass bei einem w/z-Wert von 0,45 und einem Fließmittelgehalt auf PCE-Basis von rd. 2,0 bis 2,5 M.-% v. Z. der angestrebte Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und hoher Grünstandfestigkeit in Betone mit Quarzmehl erreichbar ist. Die Verringerung des w/z-Wertes um 0,04 erforderte bei den angestrebten Eigenschaften eine Verdopplung des Fließmittelgehaltes.

In den Untersuchungen zur Bestimmung der Formstabilität bzw. der Grünstandfestigkeit in Betonen war es von Nöten, die Rolle der Schergeschichte in zementösen Suspensionen zu erkennen. Die Auswirkungen, die durch den Zusatz ST auf die Erhöhung der Grünstandfestigkeit in den Mörteluntersuchungen im Abschnitt 7.2.2 beobachtet wurden, konnten in den Hauptuntersuchungen an Betonen bestätigt werden. Wie aus Abbildung 96 ersichtlich ist, wiesen die Mischungen M-2 (mit Quarzmehl) und M-4 (mit Zusatz ST auf Stärkebasis) mit $K_{W10} = 0,97$ äußerst hohe Formstabilitäten auf. Zwischen 1. Zyklus und 2. Zyklus nahmen die Formstabilitätskoeffizienten K_{W15} in den meisten Fällen ab, was dann aber mit einer Erhöhung der Setzfließmaße einherging (Abschnitt 7.3.2.3). Im Gegensatz dazu zeigte Mischung M-4 (mit Zusatz ST auf Stärkebasis) im Vergleich zum 1. Zyklus einen nur um 1 % geringeren Formstabilitätskoeffizienten nach 15 Minuten, während Mischung M-2 sogar nach 60 Minuten keine ausgeprägte Formstabilität aufwies. Dies kann auf die Zugabe des Zusatzes ST zurückgeführt werden. Obwohl sich die Zusammensetzungen dieser beiden Betone nur vergleichsweise geringfügig voneinander unterscheiden, führte die Zugabe von Zusatz ST zu einer 8-fachen Erhöhung (von 0,002 auf $0,016 \text{ N/mm}^2$) der Grünstandfestigkeit innerhalb von 10 Minuten. Die Erhöhung der Grünstandfestigkeit spiegelte sich in einer erhöhten Formstabilität im 2. Zyklus wieder. Analog zu den Ergebnissen aus Untersuchungen an Bindemittelleimen sind die niedrigeren Werte der Grünstandfestigkeit

und der daraus resultierenden Formstabilitäten im 2. Zyklus auf die teilweise Reversibilität der Thixotropie infolge von Strukturbruch der Zementsuspensionen zurückzuführen. Die schwächere, neu aufgebaute Struktur ist das Resultat der Entstehung neuer anziehender und abstoßender interpartikulärer Kräfte nach der erneuten Scherbeanspruchung [132] (Abschnitt 2.4.2.1).

Der Mindestluftgehalt, der für einen selbstverdichtenden Beton nach DAfStb-Richtlinie einzuhalten ist, wurde im Frischbeton in erster Linie von den Mischungen M-2 (520 mm) und M-4 (505 mm) mit Luftgehalten von 6,5 bzw. 7,5 % erfüllt. Zur Orientierung wurden die Luftporenkennwerte A_{300} und L im Beton M-2 bestimmt. Beton M-2 wies einen Mikro-Luftporengehalt (A_{300}) von 3,13 Vol.-% und einen Abstandsfaktor L von 0,21 mm auf (Abschnitt 7.3.2.8). Dies deutet darauf hin, dass dieser thixotrop eingestellte Beton selbstentlüftende Eigenschaften zeigt.

Bei der Anwendung des Mini-Pavers konnten die Anforderungen an einen selbstverdichtenden Beton im Straßenbau unter Laborbedingungen reproduziert werden. Kernpunkt war die Ermittlung der minimalen Grünstandfestigkeit, die einen Beton entwickeln muss, damit ein frischer Betonkörper unterstützungsfrei seine Form halten kann.

Im Vergleich zu den mit der Würfelschalung ermittelten Formstabilitätskoeffizienten (K_{W10}) ergab die Untersuchung der Mischung M-2 (mit Quarzmehl, Setzfließmaß von 520 mm) mit dem Mini-Paver eine Verringerung des Formstabilitätskoeffizienten (K_{MP10}) um rd. 77% ($K_{W10} = 0,97$ auf $K_{MP10} = 0,22$). Diese eindeutige Verringerung ist auf den Unterschied in der Durchführung der Untersuchungen zurückzuführen. Bei Bestimmung der Formstabilität unter Verwendung der Würfelschalung befand sich der Frischbeton nach dem Befüllen 10 Minuten bis zum Entschalen im Ruhezustand. Im Gegensatz dazu befand sich der Frischbeton beim Einsatz des Mini-Pavers zu keinem Zeitpunkt im Ruhezustand. Beim Einsatz des Mini-Pavers fließt der Frischbeton durch seinen vertikalen und abschließend den horizontalen Schenkel (Abbildung 86), während er mit einer konstanten Geschwindigkeit nach vorne gezogen wird. Im Unterschied zur Bestimmung der Formstabilität unter Verwendung der Würfelschalung (K_{W10}) entstehen Gleitreibungskräfte als Resultat der relativen Bewegung zwischen Mini-Paver und Frischbeton. Wie im Abschnitt 2.4.2.1 erwähnt wurde, entwickelt sich die thixotrope Struktur eines Frischbetons und somit die statische Fließgrenze τ_{0R} des resultierenden plastischen Körpers im Ruhezustand. Wenn der Ruhezustand gestört ist, bildet sich keine bzw. eine schwächere Struktur infolge elektrostatischer Wechselwirkungen, die sich in einem niedrigeren resultierenden Formstabilitätskoeffizient K_{MP10} widerspiegelte.

Überschreitet die äußere Beanspruchungen τ die nach 10 Minuten entwickelte statische Fließgrenze τ_{0R} des Betonkörpers, beginnt er mit einer gewissen Geschwindigkeit unter der

Einwirkung der Differenz $\Delta\tau = \tau - \tau_{0R}$ zu fließen. Um seine Form bei zu behalten, muss die Grünstandfestigkeit des Betonkörpers erhöht werden.

Der Beitrag von Metakaolin zur Erhöhung der Grünstandfestigkeit und der daraus resultierenden erhöhten Formstabilität, der nach den Untersuchungen an Bindemittelleimen (Abschnitt 5.2) und Mörteln (Abschnitt 7.2.2) bestimmt wurde, spiegelte sich in den Untersuchungen unter Einsatz des Mini-Pavers wider. Die ursprüngliche Verringerung des Formstabilitätskoeffizienten K_{W10} um 77%, die bei Anwendung des Mini-Pavers mit Beton M-2 ermittelt wurde, konnte in Mischung M-9 durch Zugabe von Metakaolin auf ca. 60% verringert werden (Abbildung 106). Eine weitere Zugabe des Zusatzes ST auf Stärkebasis in Höhe von 0,2 M. % v. Z. zu der Mischung M-10 verringerte den Unterschied zwischen den ermittelten Formstabilitätskoeffizienten (K_{W10} und K_{MP10}) auf 10%. Erwartungsgemäß ging die Erhöhung der Formstabilität der Betone mittels der sukzessiven Zugabe von Metakaolin und des Zusatzes ST mit einer Verringerung des Setzfließmaßes um rd. 38% von 670 auf 420 mm einher. Die Verringerung der Setzfließmaße sowie die Erhöhung der Grünstandfestigkeit in den Betonen M-9 und M-10 ist auf die Tendenz des Metakaolins und des Zusatzes ST, Aggregate infolge von elektrostatischen Wechselwirkungen (und folglich eine thixotrope Struktur) zu bilden, zurückzuführen. Die hier stattfindende Bildung der thixotropen Struktur und die folgende Verringerung der Fließfähigkeit der zementösen Suspensionen wurde bereits im Abschnitt 5.1.8 beschrieben.

Zum Erreichen der Zielsetzung (Setzfließmaß ≥ 500 mm und Formstabilitätskoeffizient anhand des Mini-Pavers $K_{MP10} \geq 0,9$) war eine weitere Optimierung der Mischung M-10 (Setzfließmaß = 420 mm und $K_{MP10} = 0,93$) unabdingbar. Die Optimierung der erzielten Eigenschaften wurde in Einklang mit der Philosophie der Rezepturentwicklung eines SVBs durchgeführt. Dies führte zu einer Erhöhung des Bindemittelleimanteils im Stoffraum, wobei die groben Gesteinskörner im Bindemittelleim „schwimmen“ und dadurch bewegt werden. Die rheologischen Eigenschaften von Frischbetonen, insbesondere die Konsistenz und die Thixotropie, werden nachhaltig von den rheologischen Eigenschaften des Bindemittelleims sowie des Anteils von Bindemittelleim und Gesteinskörnung im Stoffraum bestimmt [35].

Da selbstverdichtende Betone eine hohe Sensibilität gegenüber Schwankungen in der Betonzusammensetzung im Vergleich zu Rüttelbetonen zeigen, wurde in den Betonen M-11 bis M-14 ausgehend vom Beton M-10 der gesamte Anteil der Gesteinskörnung nur geringfügig (3 bis 6 M.-%) verringert. Dies spiegelte sich in einer Erhöhung des Gehaltes an Bindemittelleim im Stoffraum um bis 1,5 Vol.-% wieder.

Wie aus Abbildung 107 ersichtlich ist, wies Beton M-13 ein Setzfließmaß von 485 mm und einem Formstabilitätskoeffizient $K_{MP10} = 0,99$ auf. Dies schloss eine Erhöhung der Fließfähigkeit um ca. 15 % sowie einen um ca. 6,5 % höheren Formstabilitätskoeffizient

gegenüber Beton M-10 ein. Im Beton M-13 wurde die Kombination der gewünschten einander entgegengerichteten Eigenschaften mittels eines erhöhten Leimgehaltes erreicht. Verglichen mit einem herkömmlichen SVB wies Beton M-13 mit 326 l/m^3 einen um rd. 25 % höheren Leimgehalt pro m^3 auf.

Trotz der Tatsache, dass das angestrebte minimale Setzfließmaß (500 mm) nicht erreicht werden konnte, wies M-13 einen Luftporengehalt von 5,0 Vol.-% auf, welcher um 0,5 Vol.-% den erforderlichen Mindestluftporengehalt gemäß TL Beton StB-07 [N 31] unterschritt. Die Bestimmung der Luftporenkennwerte, die für sehr fließfähige Straßenbetone (Konsistenzklasse F6) erforderlich ist, zeigte einen normkonformen Mikro-Luftporengehalt A_{300} von 3,13 Vol.-% und einen Abstandsfaktor L von 0,18 mm. Dabei lag die ermittelte Rohdichte bei $\rho = 2.280 \text{ kg/m}^3$. Im Alter von 28 Tagen wies M-13 mit $64,0 \text{ N/mm}^2$ eine Druckfestigkeit auf, die der Festigkeitsklasse C 50/60 entspricht und erfüllt damit die nach TL Beton StB-07 geforderte Druckfestigkeitsklasse C30/37. Die oben dargelegten Frisch- und Festbetoneigenschaften beweisen, dass Beton M-13 eine ausreichende Selbstverdichtung mit einem Setzfließmaß von 485 mm aufwies.

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse, die an Betonmischungen mit Zement CEM III/A 42,5 N erzielt wurden, überprüfen zu können, wurde eine Variation des Betons M-13 (M-15) mit CEM I 42,5 R entwickelt. In Übereinstimmung mit den im Abschnitt 5.1.4 (Basisuntersuchungen an Bindemittelleimen) erzielten Ergebnissen erreichte der Beton M-15 mit einem Setzfließmaß von 530 mm und einem Formstabilitätskoeffizient $K_{MP10} = 0,41$ den gewünschten Kompromiss zwischen beiden entgegenlaufenden Eigenschaften nicht.

Nach Angaben in der Literatur führt eine um rd. 3% höhere Schüttdichte zur Verbesserung der selbstverdichtenden Eigenschaften des SVBs [145]. Nebenbei zeichnet sich nach Bornemann [26] eine direkte Korrelation zwischen der Packungsdichte der herkömmlichen Rüttelbetone und ihrer Grünstandfestigkeit ab (Abschnitt 2.6).

Graubner [48] zeigte in seinen Untersuchungen, dass eine gröbere Kornzusammensetzung einen höheren Gehalt an zusammenhängenden Hohlräumen zur Folge hat bzw. eine niedrigere Schüttdichte aufweist. Im Vergleich zu Beton M-13 wurde in Beton M-17 eine feinere Sieblinie verwendet (Anhang A, Abbildung A-4 und Abbildung A-5). Ziel war es, den Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und hoher Formstabilität zu erreichen. Aus diesem Grund wurde das Größtkorn im Beton M-17 auf 8 mm reduziert.

Das im Beton M-17 eingesetzte Korngemisch (Sieblinie A/B 8) zeigte eine um rd. 2% höhere Schüttdichte bzw. Packungsdichte im Vergleich zu der im Beton M-13 eingesetzten Sieblinie A/B 16.

Da beim konstanten Gesteinskörnungsgehalt (1.528 kg/m^3) die Gesteinskörnung der Sieblinie A/B 8 (Beton M-17) eine höhere spezifische Oberfläche im Vergleich zu der der Sieblinie A/B 16 (Beton M-13) aufweist und eine höhere spezifische Oberfläche einen höheren Bindemittelleimbedarf nach sich zieht, wurde in mehreren Schritten der Fließmittelgehalt und das Leim-Gesteinskörnung-Verhältnis im Beton M-17 sukzessive erhöht. Beton M-17 übertraf mit einem Setzfließmaß von 530 mm und einen Formstabilitätskoeffizient $K_{MP10} = 0,97$ die am Anfang dieses Forschungsvorhabens als Ziel gesetzten Anforderungen bezüglich Setzfließmaß (500 mm) und Formstabilitätskoeffizient ($K_{MP10} \geq 0,90$). Hierbei wirkte sich die Erhöhung des Bindemittelleim-Gesteinskörnung-Volumenverhältnisses auf 40/60 positiv auf den angestrebten Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und erhöhter Grünstandfestigkeit aus. Im Vergleich zum Beton M-13 (mit CEM III/A 42,5N, $S_{fm} = 485 \text{ mm}$, $K_{MP10} = 0,99$) wies Beton M-17 einen um 20 Vol.-% höheren Bindemittelleimgehalt von 392 l/m^3 auf.

Darüber hinaus wurde die Entwicklung der Grünstandfestigkeit und die daraus resultierende Formstabilität der Mischung M-17 nach 3, 5 und 10 Minuten untersucht.

Wie in Abbildung 111 ersichtlich ist, stieg die Grünstandfestigkeit im ersten Zyklus um rd. 100%, nämlich von $0,054$ nach drei Minuten auf $0,11 \text{ N/mm}^2$ nach 10 Minuten an. Dies ist auf den höheren Grad des Mikrostrukturaufbaus (inneres Gefüge) zurückzuführen, der mit einer höheren Ruhezeit größer wird (Abschnitt 2.3.3.2). Erwartungsgemäß spiegelten sich die Erhöhungen der Grünstandfestigkeiten in den Formstabilitätskoeffizienten K_{MP} wider, die mit dem Mini-Paver nach 3, 5 und 10 Minuten (K_{MP3} , K_{MP5} , K_{MP10}) ermittelt wurden. Aus Abbildung 112 lässt sich schlussfolgern, dass im 1. Zyklus der Formstabilitätskoeffizient K_{MP5} der Mischung M-17 nach 5 Minuten mit einem Wert von 1,0 im angestrebten Zielbereich lag. Die dafür benötigte Grünstandfestigkeit betrug $0,066 \text{ N/mm}^2$. Nach 10 Minuten wurde für diese Mischung jedoch ein Formstabilitätskoeffizient $K_{MP10} = 0,97$ ermittelt, diese Verringerung im Vergleich zu K_{MP5} ist jedoch auf Prüfstreuungen zurückzuführen. Darüber hinaus zeichnete M-17 nach nur 3 Minuten im Unterschied zu den Formstabilitätskoeffizienten K_{MP5} und K_{MP10} ein Formkoeffizienten $K_{MP3} = 0,87$ aus. Obwohl dieser kleiner als 0,9 ist und somit außerhalb des Zielbereiches liegt, ist es aus Abbildung 113 deutlich zu erkennen, dass der Beton M-17 nach 3 Minuten eine ausgeprägte Formstabilität aufwies.

Im 2. Zyklus wies Beton M-17 nach 30 Minuten Ruhezeit eine Grünstandfestigkeit von $0,003 \text{ N/mm}^2$ auf. Verglichen mit dem Wert nach 3 Minuten aus dem 1. Zyklus Ruhezeit ($0,054 \text{ N/mm}^2$) entspricht dies einem Rückgang um 95 %. Diese Abnahme ist auf die teilweise Reversibilität der Thixotropie der Zementsuspensionen nach einem erneuten Mischzyklus zurückzuführen, die im Abschnitt 2.4.2.1 beschrieben wurde und schon sich in den Ergebnissen an Bindemittelleimen (Abschnitt 5.2.2.4) und Betonen (Abschnitt 7.3.2.5)

gezeigt hat. Die im 2. Zyklus entwickelte Grünstandfestigkeit ($0,003 \text{ N/mm}^2$) reichte nicht aus, um die Formstabilität bei Anwendung des Mini-Pavers zu untersuchen.

Die von DIN EN 206-9 [N 28] definierten Schlüsselanforderungen (nämlich Viskosität, Blockierneigung und Entmischungswiderstand) für SVB sowie die von TL Beton-Stb 07 angeforderten Frisch- und Festbetoneigenschaften für Fahrbahndecken aus Beton wurden von Mischung M-17 erfüllt.

9. Zusammenfassung

Bei der Herstellung von Fahrbahndecken aus Beton werden bislang Betone von steifer bis sehr steifer Konsistenz mit Gleitschalungsfertigern eingebaut. Dementsprechend ist es unumgänglich, den Beton mit am Fertiger fest angeordneten Innenrüttlern zu verdichten. Der verteilte Beton muss auf der gesamten Einbaubreite der zukünftigen Fahrbahndecke gleichmäßig und vollständig verdichtet werden. Durch eine nicht ausreichende Verdichtung erfolgt eine Verminderung der Festbetonrohichte. Eine 1%-ige Reduktion der Festbetonrohichte verkürzt die Lebensdauer der Fahrbahndecke um 10 bis 15 Jahre und führt gleichzeitig zu einer Verringerung der Druck- und Biegezugfestigkeit um ca. 5%. In gleicher Weise ist eine zu intensive Frischbetonverdichtung eine häufige Ursache von lokaler Entmischung des Betons infolge Überverdichtung. Beispielsweise sind die Druckfestigkeit sowie die Biegezugfestigkeit im oberen Teil der Betonschicht ca. 5 bis 10% geringer als in einem nicht überverdichteten Beton. Gleichzeitig ist dies mit einer Abnahme des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes verbunden. Diese Abnahme ist auf die Erhöhung der Wasserleitfähigkeit in der oberen überverdichteten Schicht zurückzuführen.

Selbstverdichtende Betone (SVB) bedürfen keiner externen Verdichtungsenergie und sind allein unter dem Einfluss der Schwerkraft in der Lage, sich vollständig selbst zu entlüften. Mit selbstverdichtendem Beton könnte beim Bau von Fahrbahndecken der Einbau technisch und wirtschaftlich verbessert und die oben als potentielle Schwachstellen dargelegten Rüttelgassen eliminiert werden. Damit die Anwendung von selbstverdichtenden Betonen im Straßenbau möglich ist, müssen 2 einander entgegenlaufende Eigenschaften in Einklang gebracht werden. Neben seiner hohen Fließfähigkeit und der Fähigkeit zur Selbstentlüftung muss der Beton nach Verlassen des Gleitschalungsfertigers, d.h. nach wenigen Minuten, eine erhöhte Grünstandfestigkeit aufweisen, damit die Fahrbahndecke auch im frischen Zustand ihre eingeprägte geometrische Kontur beibehält.

Ziel dieser Arbeit war es zu bestimmen, inwieweit für den Fahrbahndeckenbau ein Beton entwickelt werden kann, der die oben beschriebenen entgegenlaufenden Anforderungen erfüllt. Dieses Ziel kann mit selbstverdichtenden Betonen erreicht werden, die ein ausgeprägtes thixotropes Verhalten aufweisen. Aus diesem Grund wurden schwerpunktmäßig rheologische Untersuchungen an Bindemittelleimen, Mörteln und Betonen durchgeführt, wobei im Wesentlichen der Einfluss von unterschiedlichen Zusatzstoffen und Zusatzmitteln, wie z.B. Quarzmehl, Metakaolin, Thixotropiermitteln und thixotropierenden Zusätzen auf die rheologischen und thixotropen Eigenschaften erfasst wurde.

Bezüglich der Konsistenz sowie einer erhöhten Grünstandfestigkeit wurden an die thixotrop eingestellten Bindemittelleime 2 Anforderungen gestellt: Zum einen sollen sie

Setzfließmaße ≥ 200 mm erreichen, zum anderen sollen sie nach 5 bzw. 10 Minuten eine Grünstandfestigkeit entsprechend eines Formkoeffizienten $K_{Li} \geq 0,90$ aufweisen.

In einer 2. Untersuchungsphase wurden auf Grundlage der Ergebnisse aus den Basisuntersuchungen an Bindemittleimen Betonzusammensetzungen in Anlehnung an Okamuras Verfahren konzipiert. Um den beiden einander entgegenlaufenden Anforderungen (Setzfließmaß und Formstabilität) halbwegs gerecht werden zu können, wurde das Setzfließmaß der zu entwickelnden thixotrop eingestellten Betone auf ≥ 500 mm festgelegt. Hinsichtlich der Grünstandfestigkeit müssen die Betone einen Formstabilitätskoeffizienten $K_{MP} \geq 0,90$ innerhalb weniger (3 bis 10) Minuten aufweisen. Mit Blickrichtung auf die angestrebten Einsatzbereiche der Betonmischungen, bei denen diese u.U. mehrfachen Erschütterungen ausgesetzt sind, wurden mit allen Bindemittelleime und Betonmischungen ein Versuchsablauf mit 2 Zyklen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden wie folgt zusammengefasst:

- Die an thixotrop eingestellten Bindemittelleimen ermittelten Ergebnisse bezüglich des Kompromisses zwischen hohem Setzfließmaß und hoher Formstabilität sind auf Mörtel und letztendlich auf Betone übertragbar.
- Infolge einer zunehmenden Fließfähigkeit der untersuchten zementösen Suspensionen (Bindemittelleime, Mörtel und Betone) wurde eine exponentielle Verringerung der entwickelten Grünstandfestigkeit und der daraus resultierenden Formstabilität nachgewiesen. Dies war insbesondere nach einem erneuten Mischzyklus zu erkennen. Zwischen 1. und 2. Zyklus nahm das Setzfließmaß in den meisten Fällen zu, was dann aber mit einer Verminderung der Formstabilität einherging. Die Verringerung der Formstabilität der Bindemittelleime im 2. Zyklus kann nach Billberg [20] als Resultat des zeitabhängigen strukturellen Aufbaus der zementösen Suspensionen interpretiert werden. Der Wiederaufbau der inneren Struktur nach einem erneuten Mischzyklus erfolgt anhand einer reversiblen thixotropen Struktur infolge elektrostatischer Wechselwirkungen sowie eines irreversiblen Strukturbruchs. Die resultierende neue Struktur ergibt sich aus einem Wettbewerb zwischen beiden Strukturen.
- Das maximal erreichbare Setzfließmaß an Bindemittelleimen mit einem Formstabilitätskoeffizient $K_{Li} \geq 0,9$ betrug rd. 200 mm. Die Ergebnisse der Basisuntersuchungen an Bindemittelleimen (Abschnitt 5) haben gezeigt, dass die Zugabe von Thixotropiermittel zu den Nullbindemittelleimen (ohne Thixotropiermittel) eine rd. 4- bis 5-fache Erhöhung des Formstabilitätskoeffizienten K_{Li} bewirkte. Gleichzeitig ging dies allerdings mit einer Verringerung der Setzfließmaße des Bindemittelleims auf 50% des ursprünglichen Wertes einher.

Bindemittelleime mit Metakaolin wiesen im Vergleich zu Leimen mit Quarzmehl höhere rel. Fließgrenzen und rel. Viskositäten auf. Diese spiegelten sich in höheren Thixotropiezahlen T_i und letztendlich in höheren Formstabilitätskoeffizienten K_{Li} und niedrigeren Setzfließmaßen wider. Die Metakaolin-Teilchen bilden aufgrund ihrer oberflächigen Ladungen eine dreidimensionale Kartenhausstruktur, in der Wasser eingeschlossen ist. Rheologisch betrachtet führt die Bildung dieser Kartenhausstruktur zu einer Erhöhung der Fließgrenze des Bindemittelleims, welche nach Griesser [50][51] und Noor [93] eine direkte Korrelation mit einer niedrigeren Fließfähigkeit (Setzfließmaß) der zementösen Suspensionen aufweist [138].

Bindemittelleime mit Zugabe von Zusatz ST auf Stärke-Basis haben in beiden Zyklen ausgeprägte thixotrope Eigenschaften bzw. hohe Formstabilitätskoeffizienten K_{Li} gezeigt. Die Stärke-Moleküle tendieren dazu Aggregate bzw. Flocken zu bilden. Diese Aggregate bzw. Flocken bilden eine Mikro-Struktur, die das thixotrope Verhalten des Bindemittelleims charakterisiert. Bei ausreichender Länge können die Amylopektinketten (Hauptbestandteil des Stärke-Moleküles) auch als Doppelhelixes vorliegen, welche durch intra- und intermolekulare Wechselwirkungen thixotrope Strukturen bilden können, wenn die Zement-Teilchen durch die Biopolymere verbrückt sind.

- Die Ergebnisse aus Setzfließversuchen und Formstabilitätskoeffizienten K_M an thixotrop eingestellten Mörteln führen zu dem Schluss, dass es mit den benutzten Ausgangsstoffen nicht möglich ist, einen Mörtel zu erhalten, der ein Setzfließmaß für einen SVB der Konsistenzklasse SF2 (Setzfließmaß von 245 mm) mit einem Formstabilitätskoeffizient $K_M \geq 0,9$ nach einer Wartezeit von 5 Minuten aufweist. Es ist jedoch möglich, Mörtel mit Setzfließmaßen um rd. 200 mm und Formstabilitätskoeffizienten $K_M \geq 0,9$ herzustellen. Die positive Auswirkung der Zugabe von Metakaolin und Stärke, die in den vorherigen Untersuchungen an Bindemittelleimen beobachtet wurde, wurde an Mörteluntersuchungen bestätigt. Beispielsweise wies Mörtel Q44 (Gruppe A7, mit Stärke und Metakaolin) ein Setzfließmaß von 186 mm auf. Ein vergleichbarer Mörtel der Gruppe A6 (mit Metakaolin) mit dem gleichen Setzfließmaß (186 mm) zeigte eine um rd. 60% niedrigere Grünstandfestigkeit.
- Beton M-13 mit Zement CEM III/A 42,5 N wies ein Setzfließmaß von 485 mm und einen im Mini-Paver-Versuch ermittelten Formstabilitätskoeffizienten $K_{MP10} = 0,99$ nach 10 Minuten auf. Verglichen mit einem herkömmlichen SVB wies Beton M-13 mit einem Bindemittelleimgehalt von 326 l/m^3 einen um rd. 25 Vol.-% höheren Leimgehalt pro m^3 auf. Ein Zement-Füller-Volumenverhältnis von rd. 60/40 und ein Bindemittelleim-Gesteinskörnung-Volumenverhältnis von 36,5/63,5 haben sich ebenso als vorteilhaft

gezeigt, um den beiden einander entgegenlaufenden Anforderungen (Setzfließmaß und Formstabilität) im Beton M-13 halbwegs gerecht werden zu können.

Trotz der Tatsache, dass das angestrebte minimale Setzfließmaß (500 mm) nicht erreicht werden konnte, wies M-13 einen Luftporengehalt von 5,0 Vol.-% auf. Dies unterschritt den erforderlichen Mindestluftporengehalt um 0,5 Vol.-%. Diese Abweichung von Mindestluftporengehalt ist für Einzelwerte nach TL Beton StB-07 [N 31] zulässig. Die Bestimmung der Luftporenkennwerte, die für sehr fließfähige Straßenbetone (Konsistenzklasse F6) erforderlich ist, ergab einen normkonformen Mikro-Luftporengehalt A_{300} von 3,13 Vol.-% und einen Abstandsfaktor L von 0,18 mm. Die ermittelte Rohdichte lag bei $\rho = 2.280 \text{ kg/m}^3$. Im Alter von 28 Tagen wies M-13 mit $64,0 \text{ N/mm}^2$ eine Druckfestigkeit auf, die der Festigkeitsklasse C 50/60 entspricht, und damit ist die nach TL Beton geforderte Druckfestigkeitsklasse C30/37 erfüllt. Die oben dargelegten Frisch- und Festbetoneigenschaften beweisen, dass Beton M-13 eine ausreichende Selbstverdichtung bei einem Setzfließmaß von 485 mm aufwies.

- Mischung M-17 übertraf mit 530 mm das minimale angestrebte Setzfließmaß (500 mm), ebenso wie den am Anfang dieses Forschungsvorhabens als Ziel festgesetzten Formstabilitätskoeffizienten nach einer Wartezeit von 5 Minuten ($K_{MP5} \geq 0,90$). Dabei betrug die minimal benötigte Grünstandfestigkeit $0,066 \text{ N/mm}^2$.

Die Zugabe von ST auf Stärke-Basis und Metakaolin als Zusatzmittel erhöhte die Grünstandfestigkeit der Betone zum gleichen Zeitpunkt bis auf den 8-fachen Wert. Insbesondere wiesen Betone mit Zugabe von Zusatz ST (Stärke-Basis) eine ausgeprägte Grünstandfestigkeit bzw. Formstabilität im 2. Zyklus auf. Dies deutet darauf hin, dass durch die Zugabe von Zusatz ST das innere Gefüge in beiden Zyklen bzw. nach einer erneuten Mischphase zumindest teilweise wieder aufgebaut werden konnte. Dieser Beitrag zur Entwicklung der Grünstandfestigkeit und der resultierenden Formstabilität des Zusatzes ST (auf Stärke-Basis) sowie von Metakaolin wurde durch die Untersuchungen mit dem Mini-Paver bestätigt.

Eine höhere Schüttdichte des Betons infolge einer feineren Sieblinie (A/B 8) sowie die Erhöhung des Zementgehaltes um 20% von 350 auf 420 kg/m^3 wirkten sich positiv auf den angestrebten Kompromiss zwischen hohem Setzfließmaß und erhöhter Grünstandfestigkeit aus. Diese Änderungen gingen einher mit der Erhöhung des Bindemittelleim-Gesteinskörnung-Volumenverhältnisses auf 40/60 und mit einer entsprechenden Erhöhung des Fließmittelgehaltes auf 8,5 M. % v. Z.

Im Vergleich zum Beton M-13 (mit CEM III/A 42,5N, $S_{fm} = 485 \text{ mm}$, $K_{MP10} = 0,99$) wies Beton M-17 einen um 20 Vol.-% höheren Bindemittelleimgehalt von 392 l/m^3 auf.

Die Anforderungen nach DIN EN 206-9 [N 28] bezüglich Viskosität, Blockierneigung und Entmischungswiderstand, die ein Beton für die Eignung als selbstverdichtender Beton,

sowie diejenigen, die nach TL Beton StB-07 [N 31] ein Straßenbeton bezüglich der Festbetoneigenschaften erfüllen muss, wurden von Beton M-17 abgedeckt.

Abschließend kann aus den Untersuchungsergebnissen dieser Arbeit geschlossen werden, dass die Entwicklung eines selbstverdichtenden Betons, der sowohl den Anforderungen bezüglich eines hohen Setzfließmaßes als auch ausgeprägter thixotroper Eigenschaften genügt, möglich ist. Auf Basis der gewonnenen Kenntnisse im experimentellen Teil dieser Arbeit konnten Kennwerte bestimmt werden, die die Entwicklung von thixotrop eingestellten selbstverdichtenden Betonen ermöglichen. Als für die Praxis von relevanter Bedeutung ergab sich, dass sich in den Untersuchungen mit dem Mini-Paver eine Grünstandfestigkeit von $0,06 \text{ N/mm}^2$ als ausreichend erwies, um die erhöhte Formstabilität ($K_{MP} = 1,0$) eines Betons mit 530 mm Setzfließmaß innerhalb von 5 Minuten zu gewährleisten.

Um den Laboruntersuchungen eine höhere Praxisrelevanz zu geben, wäre es interessant, beim Einsatz eines Gleitschalungsfertigers zu bestimmen, welche Grünstandfestigkeit derselbe Beton (530 mm) innerhalb dieser 5 Minuten entwickeln muss, damit die frische freistehende Betonfahrbahndecke einen Formstabilitätskoeffizient $K_{MP5} = 1,0$ aufweist. Da die hier entwickelten Betone einen um rd. 50 Vol.-% höheren Bindemittelleimgehalt als herkömmliche SVB (260 l/m^3) aufweisen, wäre es auch von Bedeutung, die durch Schwinden verursachten Verformungen zu bestimmen. Nebenbei sollte die Robustheit sowie das rheologische Verhalten der thixotrop eingestellten Betone (Entwicklung der Grünstandfestigkeit und der daraus resultierender Formstabilität) unter wirklichkeitsnahen Bedingungen mit mehrfachen Erschütterungen (Mischzyklen) bestimmt werden. Die Durchführung von diesen weiteren Versuchen (mit Gleitschalungsfertigern) überschreitet jedoch den Umfang dieser Arbeit und sollte in einer kommenden Untersuchungsphase oder Arbeit untersucht werden.

10. Literaturverzeichnis

- [1] Aarebeton Aarau AG: Einbringen, Verdichten und Nachbehandeln von Beton, 2005
- [2] Agullo, L.; Toralles-Carbonari, B.; Gettu, R.; Aguado, A.: Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer- A study based on the Marsh cone test, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol. 32, 1999, pp 479-485
- [3] Aiad, I.: Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 2003, pp 1229–1234
- [4] Arnold, M.: Polymergesteuerte Kristallisation von Calciumhydroxid und Calciumsilicathydrat, Dissertation, Universität Siegen, 2004
- [5] Assaad, J.; Khayat, K. H.; Mesbah, H.: Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 100, 2003, pp 99-107
- [6] Bach, S.; Köhl, A.: Smektite (Bentonit, Montmorillonit) und Hormite (Palygorskit, Sepiolith), Oberseminar, 1999
- [7] Banfill, P.: Use of the ViscoCorder to study the rheology of fresh mortar, *Magazine of concrete research* 42 (1992), Heft 153, S. 213 – 221
- [8] Banfill, P.; Hornung, F.: Zweipunktmessung im ViscoCorder, *Beton* 42 (1992), H. 2, S. 84 – 88
- [9] Banfill, P.F.G.: The rheology of fresh cement and concrete – A review, Heriot-Watt University Edinburgh, Edinburgh, 2003
- [10] Barnes, H.: „Thixotropy – a review“, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 70, Elsevier science BV, S. 1-33.
- [11] Barnes, H.; Hutton, J.; Walters, K.: *An Introduction to Rheology*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1989
- [12] BASF Construction Polymers GmbH: Wirkung von Fließmitteln in zementgebundenen Baustoffe, Ausgabe 2006
- [13] Bauer, H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen, Aarau, 1971
- [14] Bäuml, M.: Steigerung der Dauerhaftigkeit selbstverdichtender Betone durch den Einsatz von Polymerfaserkurzschnitt, Dissertation, Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich, 2002
- [15] Bäuml, M.F.: Steigerung der Dauerhaftigkeit selbstverdichtender Betone durch den Einsatz von Polymerfaserkurzschnitt, Dissertation, ETH Zürich, Zürich, 2002
- [16] Beitzel, M.: Frischbetondruck unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften, Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 2009
- [17] Berg vom, W.: Fließverhalten von Zementsuspensionen, Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1982
- [18] Berg, J.W. v.d.: Zum Fließverhalten von Zementsuspensionen, Dissertation, RWTH Aachen, 1982

- [19] Bergmeister, K.: Beton-Kalender 2009: Digitalisierte Fassung, Verlag Ernst & Sohn, 2009
- [20] Billberg, P.: Form pressure generated by self-compacting concrete — Influence of thixotropy and structural behaviour at rest, Stockholm, 2006
- [21] Billberg, P.: Self-compacting concrete for civil engineering – the swedish experience, CBI Reports 2, 1999
- [22] Billberg, P.; Peterson, Ö.; Österberg, T.: Full scale casting of bridges with self-compacting concrete, 1999
- [23] Birdi, K.: Handbook of the surface and colloid chemistry, CRC Press, New York, 2003
- [24] Blaschek, S.: Kohlenhydrate II: Polysaccharide und Polysacchariddrogen, 2004
- [25] Blask, O.: Zur Rheologie von polymermodifizierten Bindemittelleimen und Mörtelsystemen, Dissertation, Universität Siegen, Siegen, 2002
- [26] Bornemann, R.: Untersuchungen zur Modellierung des Frisch- und Festbetonverhaltens erdfeuchter Betone, Dissertation, Universität Kassel, 2005
- [27] Böttcher, G.: Latent hydraulische Zusätze, Zemente, Ingenieurbüro Dipl.- Bau-Ing. Georg Böttcher
- [28] Brameshuber, W.; Uebaachs, S.: Entwicklung von selbstverdichtenden Betonen des Stabilisierertyps zum speziellen Einsatz im Wohnungsbau, Forschungsbericht F869, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen, 2008
- [29] Brameshuber, W.; Uebachs, S.: Sedimentationsstabilität von selbstverdichtenden Betonen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen, 2003
- [30] Breitenbücher, R.: Selbstverdichtender Beton in der Praxis, Philipp Holzmann Ingenieurgesellschaft für Bautechnik mbH, Neu-Isenburg
- [31] Chandra, S.; Björnström, J.: Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the fluidity of cement mortars—Part I, Cement and Concrete Research, Vol. 32, 2002, pp 1605–1611
- [32] Choi, J.; Kim, E.; Yoo, J.: Optimal Mixture Proportion for High Performance Concrete Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 17, N°3, S. 473-480, 2005
- [33] Cyr, M.; Legrand, C.; Mouret, M.: Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives, Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp 1477-1483
- [34] De Larrard, F.: Concrete mixture proportioning – A scientific approach, E & FN Spon, 1999
- [35] Deutsche Zementindustrie, Zement-Taschenbuch, 51 Ausgabe

- [36] Djelal, C.: Designing and perfecting a tribometer for the study of friction of a concentrated clay–water mixture against a metallic surface. *Mater. Struct.* 34, 2001, S. 51–58
- [37] Djelal, C.; Vanhove, Y.; De Caro, P.; Magnin, A.: Role of demoulding agents during self-compacting concrete casting in formwork. *Minerals and Structures - Vol. 35*, 2003, S. 470-476
- [38] Djelal, C.; Vanhove, Y.; Magnin, A.: Tribological behaviour of self compactig concrete, Université d'Artois, 2003
- [39] Donner, G.: Sol-Gel-Übergänge in Tonmineraldispersionen, Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2004
- [40] Dullaert, K., Mewis, J.: A structural kinetics model for thixotropy, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanichs*, Vol. 139, 2006, pp 21-30
- [41] Engelhardt, W.v.: Zur Theorie der Thixotropie, *Kolloid-Zeitschrift*, Ausgabe 102, 1943, S. 217-232
- [42] Ernst: 2009 Betonkalender, Konstruktiver Hochbau – Aktuelle Massivbaunormen, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co., 2009, S. 40
- [43] Ferraris, C.: Measurement of the rheological properties of cement paste: a new approach, National Institute of Standards and Technology (NIST), RILEM International Symposium – Conference Proceedings, pp. 333-342, 1999
- [44] Ferraris, C.; De Larrard, F.: Testing and modelling of fresh concrete rheology, National Institute of Standards and Technology, NIST-Report 6094, 1998
- [45] Freimann, T.: Einfluss von Steinkohleflugaschen auf das rheologische Verhalten von Zementleimen und –mörteln, Dissertation, Universität von Hannover, 2002
- [46] Görtges, S.; Stocké, R.: Bentonit – Natürliches Tonmineral zur effektiven Eiweißstabilisierung, ERBSLÖH Geisenheim AG,
- [47] Graubner, C.; Kaiser, H.; Proske, T.: Erstarrungsverhalten von SVB – Analyse von Prüfverfahren – Setting of Self-compacting concrete – Evaluation of test methods, Darmstadt Concrete 21, 2006
- [48] Graubner, C.; Proske, T.: Einfluss der Betoniergeschwindigkeit auf das Entlüftungsverhalten sowie den entstehenden Schalungsdruck bei Verwendung von selbstverdichtendem Beton – Abschlussbericht, Technische Universität Darmstadt, 2002
- [49] Greim M., Teubert, O.: Moderne Messmethoden zur zielgerichteten Entwicklung und Überprüfung der Verarbeitungseigenschaften von selbstverdichtenden Beton
- [50] Griesser, A.: Cement-superplasticizer interactions at ambient temperatures. Dissertation, ETH Zürich, 2002

- [51] Griesser, A.; Jacobs, F.; Hunkeler, F.: Rheologische Optimierungen von Beton, Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton, TFB, 2000
- [52] Grube, H.; Rickert, J.: Selbstverdichtender Beton – ein weiterer Entwicklungsschritt des 5-Stoff-Systems Beton, Beton, Ausgabe 49, 1999, S. 239-244
- [53] Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S.: Beton, Arten - Herstellung und Eigenschaften, 2. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, 2001
- [54] Haist, M.: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2010
- [55] Haist, M.; Mechtcherine, V.; Müller, H.: Selbstverdichtender Leichtbeton, Kolloquium „Rheologische Messungen an Baustoffen“, Regensburg, 2002
- [56] Haist, M.; Müller, H.: Selbstverdichtender Beton, 3.Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [57] Hamaker, H.: Physica, Vol. 4, 1937: 1058
- [58] Hauck, H.: Fließmittel der neuen Generation für die Transportindustrie, Darmstadt, Beton 3/2004, Beton-Verlag, Düsseldorf, 2004
- [59] Heim, D.: Tone und Tonminerale – Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1990
- [60] Höveling, H.: Frischbetontechnologie für SVB und andere Hochleistungsbetone, 45. Forschungskolloquium des DAfStb, Wien, 2005
- [61] Höveling, H.: Robustheit von selbstverdichtendem Beton (SVB), Dissertation, Universität Hannover, 2006
- [62] Hu, C.; de Larrard, F.: The rheology of fresh high-performance concrete, Cement and concrete research, Vol. 26, N°2, 1996
- [63] Hummel, A.: Schwerbeton und Leichtbeton. Ein Leitfaden für die zielsichere Herstellung und die wirksame Überwachung von Beton, Verlag Chemisches Laboratorium für Tonindustrie und Zeitung, 1939
- [64] Ish-Shalom, M.; Greenberg, S.: Rheology of fresh portland cement pastes, Proceedings, 4th International Symposium on Chemistry of Cement held, 1960
- [65] Isler, J.: Heat and Sound Impact Insulation Material with Low-Binder Content, SIKA Technology Center, 2004
- [66] Israelachvili, J.: Intermolecular and surface forces, Academic Press Inc.- San Diego, 1997
- [67] Jacobs, F.: Zusatzmittel im Betonbau, Chimia – Heft 52, S. 202-207, 1998
- [68] Jarny, S.; Roussel, N.; Le Roy, R.; Coussot, P.: Modelling thixotropic behavior of fresh cement pastes from MRI measurements, Cement and Concrete Research, Vol. 38, 2008, pp 616–623

- [69] Jossic, L.; Magnin, A.: Tainee et stabilite d'objet en fluide 'a seul. Les Cahiers de Rheologie, Vol. 18, N°1, 2001
- [70] Keck, H.-J.: Untersuchung des Fließverhaltens von Zementleim anhand rheologischer Messungen, Dissertation, Universität Essen, Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Band 5, 1999
- [71] Khayat, K. H.; Saric-Coric, M.; Liotta, F.: Influence of thixotropy on stability characteristics of cement grout and concrete, ACI Materials Journal, Vol. 99, 2002, pp 234-241
- [72] Koehler, E.; Fowler, D.: Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete – Research report Icar 105-3F, International center for Aggregates Research, Washington, 2004
- [73] Kordts, S.: Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone, Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2005
- [74] Krell, M.: Synthese β -verknüpfter Oligomere der (S)-Äpfel- und der (S)-Asparaginsäure sowie Bestimmung der Substratspezifität einer β -PMA-Hydrolase, Dissertation, Universität Bern, 2000
- [75] Krüger, M.: Prüfmethoden zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit von selbstverdichtenden Betonen, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2002
- [76] Kusnezow, W.: Innere Reibung und Fließgrenze für Blei, 1928
- [77] Lachemi, M.; Hossain, K.M.A.; Patel, R.; Shehata, M.; Bouzoubaa, N.: Influence of paste/mortar rheology on the flow characteristics of high-volume fly ash self-consolidating concrete, Ryerson University; Cera Tech Inc., CANMET/Natural Resources Canada, Magazine of Concrete Research, Vol. 59, 2007
- [78] Lagaly, G.; Schulz, O.; Zimehl, R.: Dispersionen und Emulsionen, eine Einführung in die Kolloidik feinverteilter Stoffe einschließlich der Tonminerale, Steinkopff-Darmstadt Verlag
- [79] Lange, D.A.: Self Consolidating Concrete, Center for Advanced Cement Based Materials, D.A. Lange, Editor, February, 2007
- [80] Lavrentyeva, O.: Entwicklung eines autarken Schäumungsverfahrens zur Herstellung offenzelliger keramischer Schäume, Dissertation, Universität Bremen, 2006
- [81] Leemann, A.; Hoffmann, C.; Olbrecht, H.-P.: Selbstverdichtender Beton, tec 21, Ausgabe 40, 2001, S. 7-12
- [82] Lemmer, C.: Ein aus experimentellen Untersuchungen abgeleitetes Produktionskonzept für selbstverdichtenden Beton, Dissertation, TU Darmstadt, 2003

- [83] Lichtmann, M.; Groß, A.: Praxisgerechte Bestimmung des optimalen Wassergehalts von selbstverdichtendem Beton, Verband Deutscher Betoningenieure e. V., Verlag Bau+Technik, 2005
- [84] Lösche, D.: Allgemeine Produkttechnologie pflanzlicher Lebensmittel – Identifizierung verschiedener Stärken, hpn Vers. 02/06, 2006
- [85] Ludger, D.; Fischer, A.; Santner, E.; Stolz, U.: Gesellschaft für Tribologie: GFT Arbeitsblatt 7, Verschleiß, Reibung, Definitionen, Begriffe, Prüfung
- [86] Lume, E.: Road Note n°63, Cement & Concrete Association of Australia, 2002
- [87] Macht, J.; Nischer, P.: Weiche Betone – kostengünstige Herstellung durch gute Mehlkornabstufung und gute Mischwirkung, Zement und Beton, 2006
- [88] Mahrer, M.; Thalmann, R.: Weg des Betons, Vertiefungsarbeit, Basel, 2008
- [89] Mezger, T.: Das Rheologie Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillationsrheometern, Hannover, 2006
- [90] Mikanovic, N.; Jolicoeur, C.: Influence of superplasticizers on the rheology and stability of limestone and cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol. 38, 2008, S. 907–919
- [91] Müller-Marburg, F.: Thixotrope Zustände bei hochmolekularen Substanzen, Kolloid-Zeitschrift Verlag, Band 112, 1949
- [92] Nehdi, M.; Rahman, M.-A.: Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction, Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004
- [93] Noor, M.; Uomoto, T.: Rheology of high flowing mortar and concrete. Materials and Structures, Vol. 37, S. 513-521, 2004
- [94] Okamura, H.; Ozawa, K.: Mix design for self-compacting concrete, Concrete Library of JSCE, No. 25, 1995, S. 107-120
- [95] Olbrecht, H.; Moser, K.: Entmischung von Beton durch Überverdichtung, Tec 21 – Fachzeitschrift für Architektur, Ingenieurwesen und Umwelt, 44/2004, S. 13-16, 2004
- [96] Onfield, J.: The technique of self compacting concrete validated. Chantiers Fr. 323, 1999, S. 36–37
- [97] Organische Chemie III, Makromolekulare Chemie und Organische Materialien – Grundpraktikum „Makromolekulare Chemie - Viskoelastizität“, Universität Ulm
- [98] Ovarlez, G.; Roussel, N.: A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork. Materials and Structures, Vol. 39, N° 2, 2006
- [99] Palecki, S.: Hochleistungsbeton unter Frost-Tau-Wechselbelastung–Schädigungs- und Transportmechanismen-, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2005

- [100] Palecki, S.; Setzer, M.: Einfluss von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln auf den Frostwiderstand, Beiträge zur 6. CDF/CIF Fachtagung: Prüfung des Frost- und Frost-Tausalzwidestandes von Beton, Universität Duisburg-Essen, 2006
- [101] Papo, A.: Rheological models for cement pastes, Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 21, 1988, pp 41-46
- [102] Pekmezci, B.Y.; Voigt, T.; Wang, K.; Shah, S.P.: Low compaction energy concrete for improved slipform casting of concrete pavements, ACI MATERIALS JOURNAL, Vol. 104, 2007, S. 251-258
- [103] Petit, J.-Y.; Wirquin, E.; Vanhove, Y.; Khayat, K.: Yield stress and viscosity equations for mortars and self-consolidating concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 37, 2007, pp 655–670
- [104] Phyfferoen, A. et al.: Evaluation of the Biopolymer, Diutan Gum For use in Self-Compacting Concrete, CP Kelco. 2004
- [105] Plank, J.: Einfluss der Phasenzusammensetzung von Portlandzementen auf die Physisorption und Fließwirkung von Polykondensat- und Polycarboxylatbasierten Betonfließmitteln, Technische Universität München
- [106] Plank, J.; Bassioni, G.; Dai, Z.; Keller, H.; Sachsenhauser, B.; Zouaoui, N.: Neues zur Wechselwirkung von Zementen und Fließmitteln, 16. Ibautil, Tagungsband I, S. 579-598, Universität Weimar, 2006
- [107] Preis, T.: Scherverhalten kolloidaler Lagenphasen in Rohrströmungen, Dissertation, Johannes Gutenberg-Universität, 2004
- [108] Proske, T.; Graubner, C.: Einfluss der Form und Größe der Gesteinskörnungen auf den erforderlichen Mehlkorngesamt und die Festbetoneigenschaften von selbstverdichtendem Beton, AiF-Forschungsvorhaben, Abschlussbericht, TU Darmstadt, 2004
- [109] Proske, T.: Frischbetondruck bei Verwendung von selbstverdichtendem Beton, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2007
- [110] Ritchie, A.: The triaxial testing of fresh concrete, Magazine of concrete research, Vol. 14, Nr. 40, S. 37-42, 1962
- [111] Roussel, N.: A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications, Cement and Concrete Research, Vol. 36, 2006, pp 1797–1806
- [112] Roussel, N.: Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp 1656–1664
- [113] Roussel, N.; Cussigh, F.: Distinct-layer casting of SCC: The mechanical consequences of thixotropy, Paris, 2007
- [114] Schießl, P.: Selbstverdichtender Beton, Skriptum zur Vertiefervorlesung Bauingenieurwesen, Technische Universität München, München, 2005

- [115] Schießl, P.: Skriptum zur Vertieferausbildung: Bestimmung der rheologischen Eigenschaften im Labor, Technische Universität München, München, 2004
- [116] Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH: Viskomat NT: Handbuch-Schleibinger Testing Systems, Buchbach, 2007
- [117] Schmidt, W.; Brouwers, H.; Kühne, H.; Meng, B.: Influence of environmental temperatures on the performance of polymeric stabilising agent in fresh cementitious materials, BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Germany, Key Engineering Materials, Vol. 466, S. 97-104
- [118] Schmidt, W.; Kühne, H.; Meng, B.: Temperature related Effects on Self-Consolidating Concrete due to Interactions between Superplasticizers, supplemental Admixtures and Additions, BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Germany
- [119] Schramm, G.: Einführung in Rheologie und Rheometrie, Karlsruhe, 1995
- [120] Schreiber, Jörg: Einsatz des Viskomat NT bei der Entwicklung eines zementbasierten Injektionsmaterials, aus der Vortragsreihe „Rheologische Messungen an mineralischen Baustoffen“, Fachhochschule Regensburg, 2006
- [121] Schrimpf, M.; Lietzmann, M.; Orgass, M.; Dehn, F.: Stabilisierende Wirkung von Mikrosilica auf SVB, Lacer No. 7, S. 85-96, 2002
- [122] Schroer, A.: Selbstverdichtender Beton – Änderung der Oberflächengüte von Mikrotunneltübungen durch Betonzusammensetzung und textile Schalungsauflagen, Diplomarbeit, Münster, 2001
- [123] Setzer, M.: CDF/ CIF-Test – Korrekte Simulation eines praxisgerechten Frostangriffes im Rahmen einer Laborprüfung, Beiträge zur 6. CDF/CIF Fachtagung – Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz widerstandes von Beton, Heft 10, S. 6-16, Universität Duisburg-Essen, 2006
- [124] Siebert, B.: Untersuchungen zur Gleichmäßigkeit von Zementen über längere Produktionszeiträume, insbesondere hinsichtlich ihrer Wechselwirkungen mit Betonzusatzmitteln, Lehrstuhl für Baustofftechnik – Ruhr Universität Bochum, 2006
- [125] Sonntag, H.: Lehrbuch der Kolloidwissenschaft, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1977
- [126] Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.: Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel, Beton, Ausgabe 45, 1995, S. 802–808
- [127] Spengler, A.: Technologie sandreicher Betone, Dissertation, Technische Universität München, München, 2005
- [128] Stark, J.; Möser, B.; Bellmann, F.: Ein neues Modell zur Zementhydratation, 15. Internationale Baustofftagung, Band I, 2003

- [129] Stegmaier, M.: Eigenschaften von wärmebehandeltem selbstverdichtenden Beton, Dissertation, Universität Stuttgart, 2005
- [130] Stoll, E.: Potentialunterstützte Herstellung von Faserverbundwerkstoffen, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2006
- [131] Sybertz, F.: Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff, DAfStb-Heft 434, Berlin, 1993
- [132] Tattersall, G.; Banfill, P.: The rheology of fresh concrete. Pitman Books, London, 1983
- [133] Tepstra, J.: Stabilizing low-viscous self-compacting concrete, 4th International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete: SCC 2005, Chicago, 2005
- [134] Tepstra, J.: Stabilizing self-levelling concrete with polysaccharide additives, 2005
- [135] Tepstra, J.: Thixotropy-enhancing agents for stabilisation of SCC and earth moist concrete, 5th International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete: SCC 2007, Ghent, 2007
- [136] Thienel, K.; Kustermann, A.: Sonderbetone - Selbstverdichtender Beton, der Bundeswehr Universität München, 2010
- [137] Uchikawa, H.: Hydration of cement and structure formation and properties of cement paste in the presence of organic admixtures, Proceedings of Research Chichibu Onoda Cement Corporation, S. 3-47, 1995
- [138] Vanderbilt, C.: Bericht über Magnesium Aluminium Silicate, Veegum and Van Gel, 2007
- [139] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Zement-Merkblatt B 29–7.2006, Betontechnik: Selbstverdichtender Beton – Eigenschaften und Prüfung, 2006
- [140] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Zement-Merkblatt B 3–9.2005, Betonzusätze – Zusatzmittel und Zusatzstoffe, 2005
- [141] Vié, D.; Djelal, C.; Vanhove, Y.; Magnin, A.: The pressure of self compacting concrete. Ann. Batim. Trav. Publics, Ed. RSKA 6, 2001, S. 5–13.
- [142] Wallevik, J.: Rheology of particle suspensions: fresh concrete, mortar and cement paste with various types of Lignosulfonates, Dissertation, Norwegian University of Science and Technology, 2003
- [143] Wallevik, J.: Thixotropic investigation on cement paste: Experimental and numerical approach, The Norwegian University of Science and Technology, 2005
- [144] Wang, K.; Shah, S.; White, D.; Gray, J.; Voigt, T.; Gang, L.; Hu, J.; Halverson, C.; Pekmezci, J.: Self-consolidating concrete – Applications for slip-form-paving: Phase I (Feasibility Study), Iowa State University, 2005
- [145] Wang, K.; Shah, S.P.; Voigt, T.: A novel self-consolidating concrete for slip-form application, Washington DC, 2006

- [146] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile: Bd.2. Beton – Mauerwerk (nichtmetallische-anorganische Stoffe): Herstellung, Eigenschaften, Verwendung und Dauerhaftigkeit, Bauverlag, 1993
- [147] Wesche, K.; Berg, W. vom: Rheologische Eigenschaften von Zementleim und Frischbeton. Beton 23, H.1 S. 21-27, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1973
- [148] Westerholm, M.: Rheology of the Mortar Phase of Concrete with Crushed Aggregate, Luleå University of Technology, Luleå, 2006
- [149] Winnefeld, F.: Rheologische Eigenschaften von Mörteln und Betonen, tec 21, Ausgabe 40, 2001, S. 14-18
- [150] Wintermantel, E.: Medizintechnik Life Science Engineering – Biofunktionalität, Part II, S. 97-104, 2008
- [151] Wirtgen GmbH, Maschinentypen – Das komplette Lieferprogramm, 2009.
- [152] Wirtgen GmbH, 57 starke Maschinentypen im Überblick – Das komplette Lieferprogramm, 2011.
- [153] Wong, S.G.; Michel, A.; Haskins, R.A.; Poole, T.S.; Malone, P.G.; Wakeley, L.: Portland-Cement Concrete Rheology and Workability: Final Report, McLean, 2000
- [154] Wüstholtz, T.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von selbstverdichtendem Beton, Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2005
- [155] Yahia, A.; Khayat, K.: Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grout, Cement and concrete research 31, 2001, S. 731-738
- [156] Zhuguo, L.: Investigation of shear flow of self-compacting concrete, Conference proceedings of "The Second International Symposium" of Self – Compacting – Concrete, COMS Engineering Corporation, Fukui, Japan, 2001, S. 69-78
- [157] Zhuguo, L.: State of workability design technology for fresh concrete in Japan, Cement and concrete research, Vol. 37, S. 1308-1320, 2007
- [158] Zilch, K.; Diederichs, C.; Katzenbach, R.: Handbuch für Bauingenieure, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001

11. Normative Verweise

- [N 1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) Richtlinie - Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Ausgabe November 2003, Beuth-Verlag
- [N 2] DIN 1045-2:2008 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- [N 3] DIN 1342-1 Viskosität – Teil 1: Rheologische Begriffe, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., November 2003
- [N 4] DIN 1342-2 Viskosität – Teil 2: Newtonsche Flüssigkeiten, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., November 2003
- [N 5] DIN 1342-3 Viskosität – Teil 3: Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., November 2003
- [N 6] DIN 18137: 1990, Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 2: Triaxialversuch, Deutsche Norm, Beuth, Berlin
- [N 7] DIN 1855: 1982 Prüfung von Mörtel mit mineralischen Bindemitteln
- [N 8] DIN 4226: 1971 Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel
- [N 9] DIN 50281: 1977, Reibung in Lagerungen: Begriffe, Arten, Zustände, physikalische Größen, Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln
- [N 10] DIN 50323: 1993, Tribologie, Reibung - Teil 3: Begriffe, Arten, Zustände, Kenngrößen, Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln
- [N 11] DIN EN 1015-3 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch)
- [N 12] DIN EN 12350-5: 2009, Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß, Deutsche Norm, Beuth, Berlin
- [N 13] DIN EN 12350-6:1999 Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohichte
- [N 14] DIN EN 12350-7:1999 Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren
- [N 15] DIN EN 12350-8: 2010 Prüfung von Frischbeton – Teil 8: Selbstverdichtender Beton – Setzfließversuch; Deutsche Fassung EN 12350-8: 2010
- [N 16] DIN EN 12350-9: 2010 Prüfung von Frischbeton – Teil 9: Selbstverdichtender Beton – Auslauftrichterversuch; Deutsche Fassung EN 12350-9: 2010
- [N 17] DIN EN 12350-10: 2010 Prüfung von Frischbeton – Teil 10: Selbstverdichtender Beton – L-Kasten-Versuch; Deutsche Fassung EN 12350-10: 2010
- [N 18] DIN EN 12350-11: 2010 Prüfung von Frischbeton – Teil 11: Selbstverdichtender Beton – Bestimmung der Sedimentationsstabilität im Siebversuch; Deutsche Fassung EN 12350-11: 2010

-
- [N 19] DIN EN 12350-12: 2010 Prüfung von Frischbeton – Teil 12: Selbstverdichtender Beton-Blockierring-Versuch; Deutsche Fassung EN 12350-12:2010
- [N 20] DIN EN 12390- 1:2000 Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen
- [N 21] DIN EN 12390- 2:2000 Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen
- [N 22] DIN EN 12390-3:2000 Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern
- [N 23] DIN EN 12390-5 Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern
- [N 24] DIN EN 12620:2008 Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008
- [N 25] DIN EN 196-3 Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit
- [N 26] DIN EN 197-1:2004 Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
- [N 27] DIN EN 206-1:2000 Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [N 28] DIN EN 206-9: 2010 Beton – Teil 9: Ergänzende Regeln für selbstverdichtenden Beton (SVB); Deutsche Fassung EN 206-9: 2010
- [N 29] ISO 5725/1 to 6 - 1990: Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. (Genauigkeit – Übereinstimmung und Präzision – von Messmethoden und Ergebnissen)
- [N 30] RILEM Recommendation TC117-FDC: CDF Test - Testmethode zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands von Beton – Prüfung mit einer Natriumchloridlösung (CDF). Freeze-thaw and de-icing resistance of concrete. Materials and Structures Vol. 29 (1996) 523-528.
- [N 31] TL Beton-StB 07 Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2007
- [N 32] Europäische Richtlinien für SCC: Festlegung, Produktion und Anwendung, Deutsche Übersetzung, 2006
- [N 33] EN 1992: Eurocode 2, Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau; Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln, Tragwerksbemessung für den Brandfall

Anhang A (Tabellen und Abbildungen)

Tabelle A-1: Druckfestigkeiten der Betonmischungen M-1 bis M-6 nach 7 Tagen

Mischung	Probe	Druckfestigkeit [N/mm ²]	mittl. Druckfestigkeit [N/mm ²]
M-1	1 -1	39,3	38,7
	1 -2	37,3	
	1 -3	39,6	
M-2	2 -1	29,5	28,5
	2 -2	28,2	
	2 -3	27,6	
M-3	3-1	29,2	30,3
	3 -2	31,0	
	3 -3	30,8	
M-4	4 -1	26,6	25,5
	4 -2	24,3	
	4 -3	25,5	
M-5	5 -1	23,2	23,2
	5 -2	23,8	
	5 -3	22,4	
M-6	6 -1	22,9	23,6
	6 -2	22,7	
	6 -3	25,1	

Tabelle A-2: Druckfestigkeiten der Betonmischungen M-1 bis M-6 nach 28 Tagen

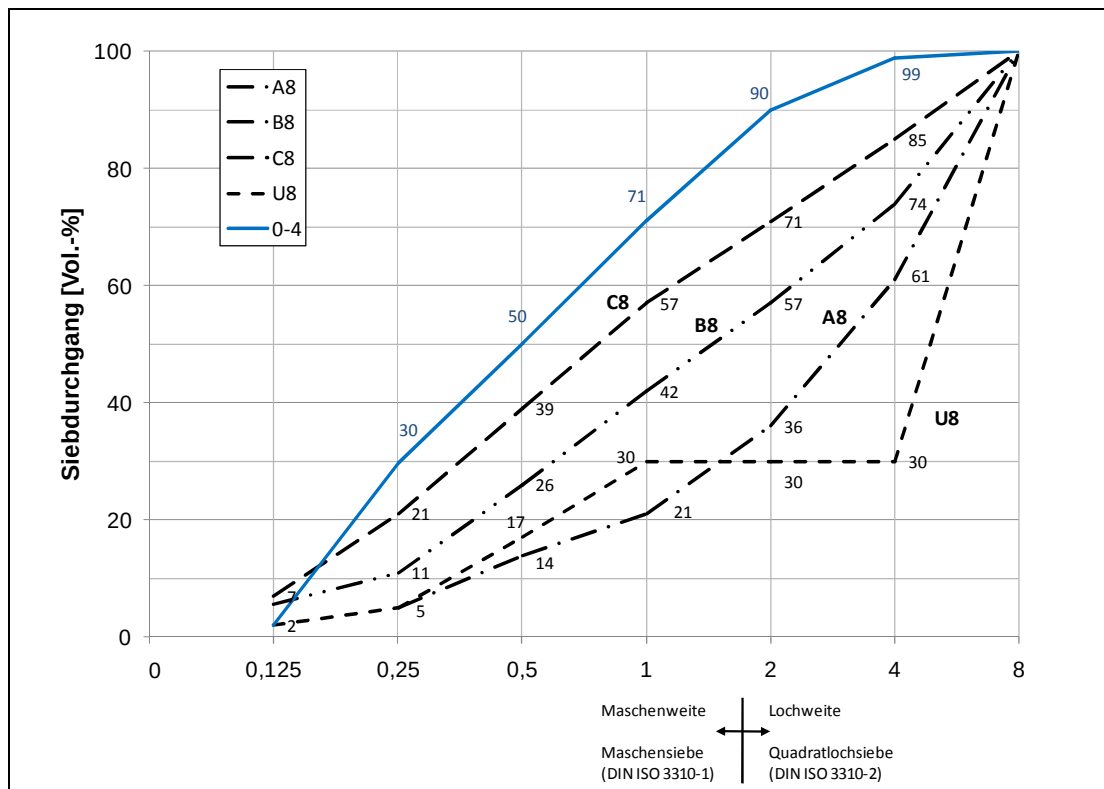
Mischung	Probe	Druckfestigkeit [N/mm ²]	mittl. Druckfestigkeit [N/mm ²]
M-1	1 -1	54,7	57,1
	1 -2	57,5	
	1 -3	59,0	
M-2	2 -1	44,0	40,3
	2 -2	37,6	
	2 -3	39,5	
M-3	3 -1	43,9	42,6
	3 -2	42,8	
	3 -3	41,2	

M-4	4 -1	38,2	37,1
	4 -2	35,9	
	4 -3	37,4	
M-5	5 -1	36,4	31,3
	5 -2	26,8	
	5 -3	30,7	
M-6	6 -1	32,2	32,5
	6 -2	33,0	
	6 -3	32,4	

Tabelle A-3: Biegezugfestigkeiten der Betonmischungen M-1 bis M-6 nach 28 Tagen

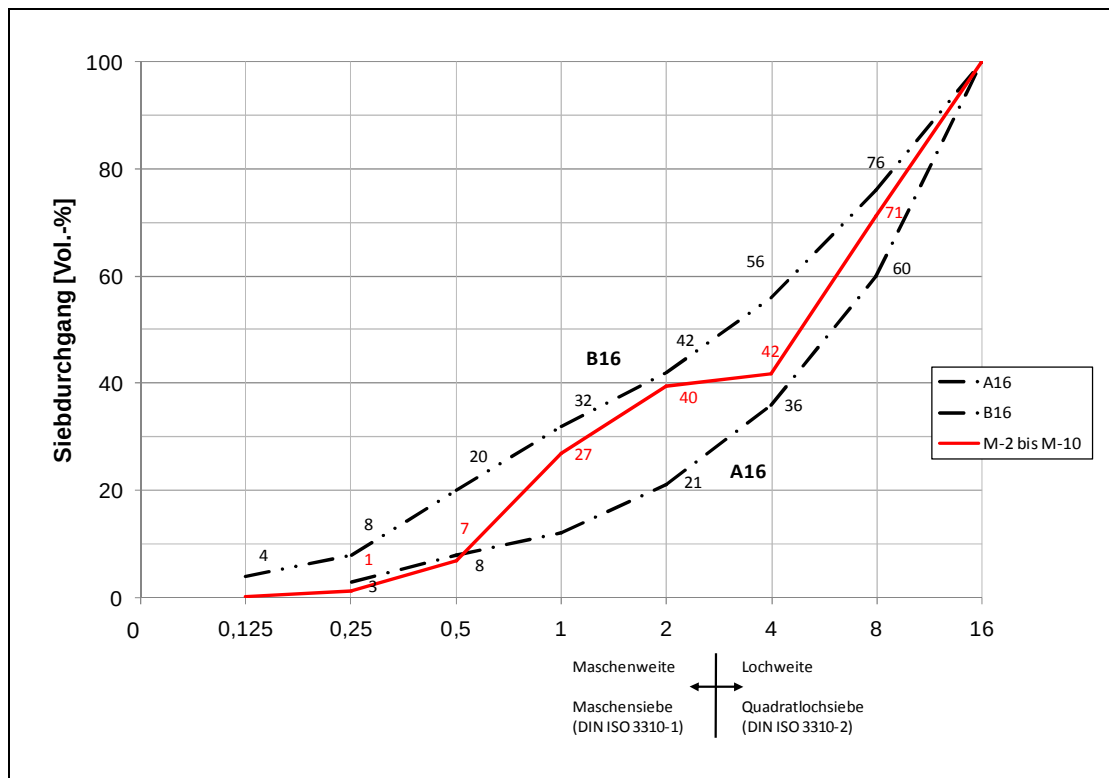
Mischung	Probe	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	mittl. Druckfestigkeit [N/mm ²]
M-1	1 -4	5,9	5,9
	1 -5	5,6	
	1 -6	6,3	
M-2	2 -4	4,7	5,0
	2 -5	5,1	
	2 -6	5,2	
M-3	3 -4	5,1	5,3
	3 -5	5,3	
	3 -6	5,5	
M-4	4 -4	5,1	5,1
	4 -5	5,1	
	4 -6	5,1	
M-5	5 -4	4,7	4,5
	5 -5	4,3	
	5 -6	4,6	
M-6	6 -4	6,3	5,6
	6 -5	5,2	
	6 -6	5,3	

Abbildung A- 1: Sieblinie der Mörtel(Korngruppe 0/4 mm)



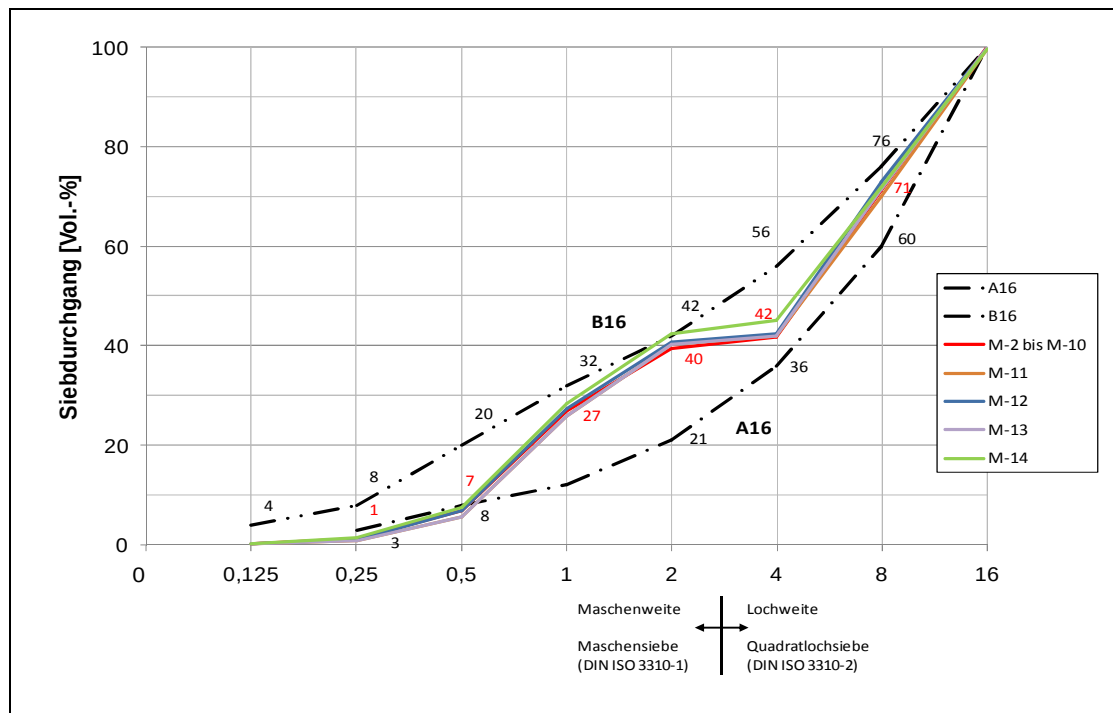
k-Wert	1,6
D-Summe	739
100.k +D	900

Abbildung A-2: Sieblinie der Betone M-2 bis M-10



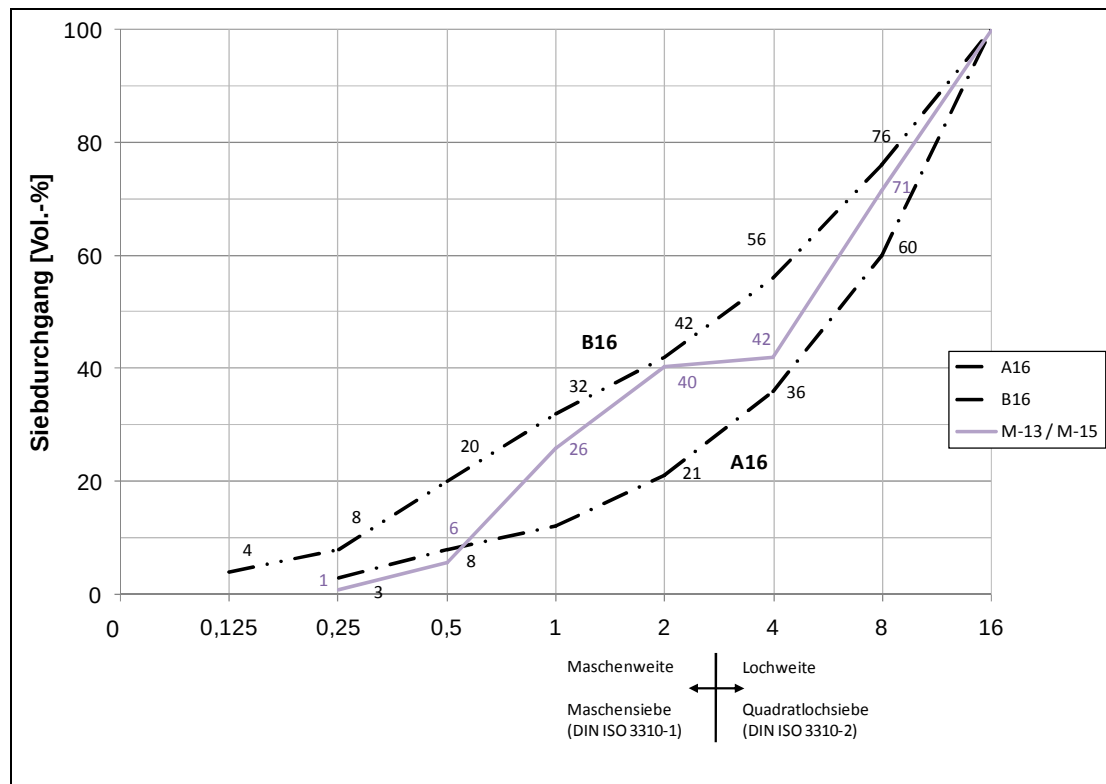
Korngruppe		M-2 bis M-10
0/2 mm	[%]	39,6
2/8 mm	[%]	30,2
8/16 mm	[%]	30,2
k-Wert		4,18
D-Summe		482
100.k +D		900

Abbildung A-3: Sieblinie der Betone M-2 bis M-10 und M-11 bis M-14



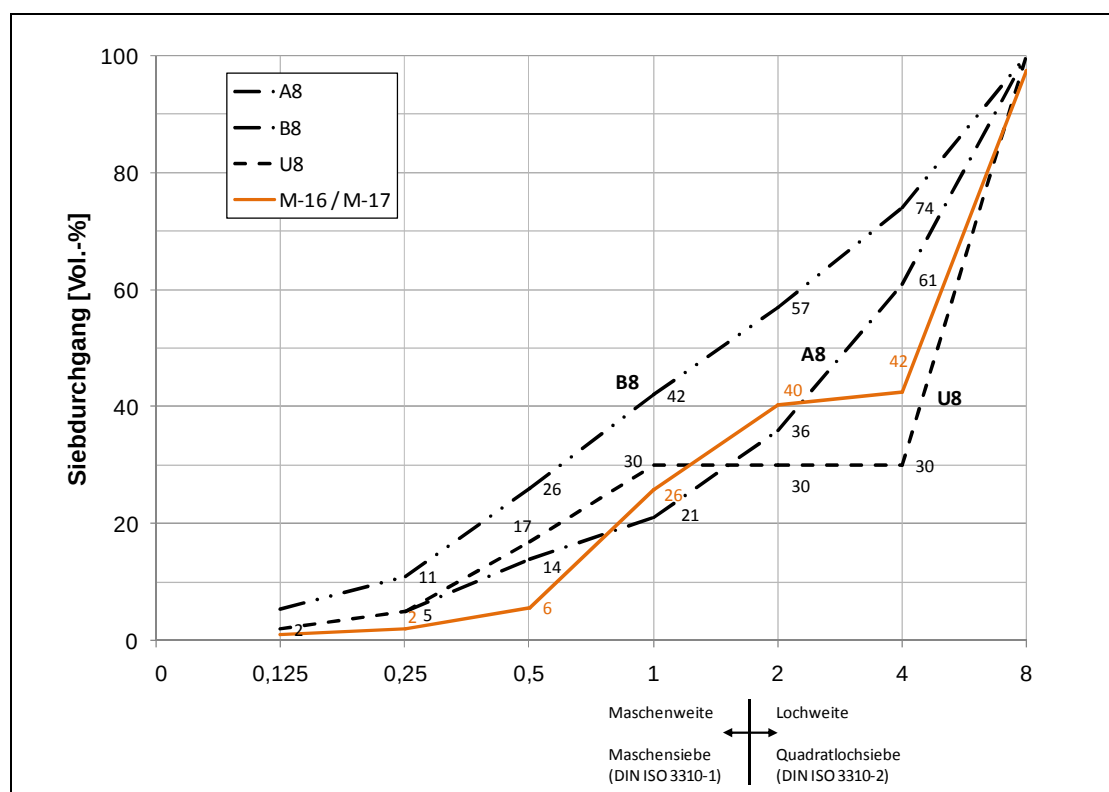
Korngruppe		M-2 bis M-10	M-11	M-12	M-13	M-14
0/2 mm	[%]	39,6	41,0	41,0	41,0	42,0
2/8 mm	[%]	30,2	28,0	31,0	29,5	29,0
8/16 mm	[%]	30,2	31,0	28,0	29,5	29,0
k-Wert		4,18	4,16	4,13	4,14	4,10
D-Summe		482	484	487	486	490
100.k +D		900	900	900	900	900

Abbildung A-4: Sieblinie der Betone M-13 und M-15



Korngruppe		M-13 / M-15
0/2 mm	[%]	41,0
2/8 mm	[%]	29,5
8/16 mm	[%]	29,5
k-Wert		4,14
D-Summe		486
100.k +D		900

Abbildung A-5: Sieblinie der Betone M-16 und M-17



Korngruppe		M-16 / M-17
0/2 mm	[%]	41,0
2/8 mm	[%]	59,0
k-Wert		3,88
D-Summe		512
100.k +D		900

Tabelle A-4: Schüttdichte der verwendeten Korngemische

	G1 [kg]	G2 [kg]	G3 [kg]	G (G _i /3) [kg]	Volumen [dm ³]	Schüttdichte [kg/m ³]
M-2 bis M-10	12,246	12,273	12,226	12,248	8,0	1.531
M-11	12,257	12,251	12,212	12,240		1.530
M-12	12,279	12,251	12,287	12,272		1.534
M-13 und M-15	12,231	12,262	12,275	12,256		1.530
M-14	12,228	12,259	12,304	12,264		1.533
M-16 und M-17	12,502	12,536	12,499	12,512		1.560

Tabelle A-5: Rütteldichte der verwendeten Korngemische

	G1 [kg]	G2 [kg]	G3 [kg]	G (G _i /3) [kg]	Volumen [dm ³]	Dichte [kg/m ³]
M-2 bis M-10	13,620	13,645	13,608	13,624	8,0	1.703
M-11	13,611	13,608	13,652	13,624		1.703
M-12	13,648	13,673	13,622	13,648		1.706
M-13 und M-15	13,651	13,659	13,611	13,640		1.705
M-14	13,667	13,624	13,652	13,648		1.706
M-16 und M-17	13,902	13,876	13,887	13,888		1.736

Tabelle A-6: Druckfestigkeiten der Betonmischung M-13 nach 28 Tagen

Mischung	Probe	Druckfestigkeit [N/mm ²]	mittl. Druckfestigkeit [N/mm ²]
M-13	1	74,0	74,5
	2	72,0	
	3	77,5	

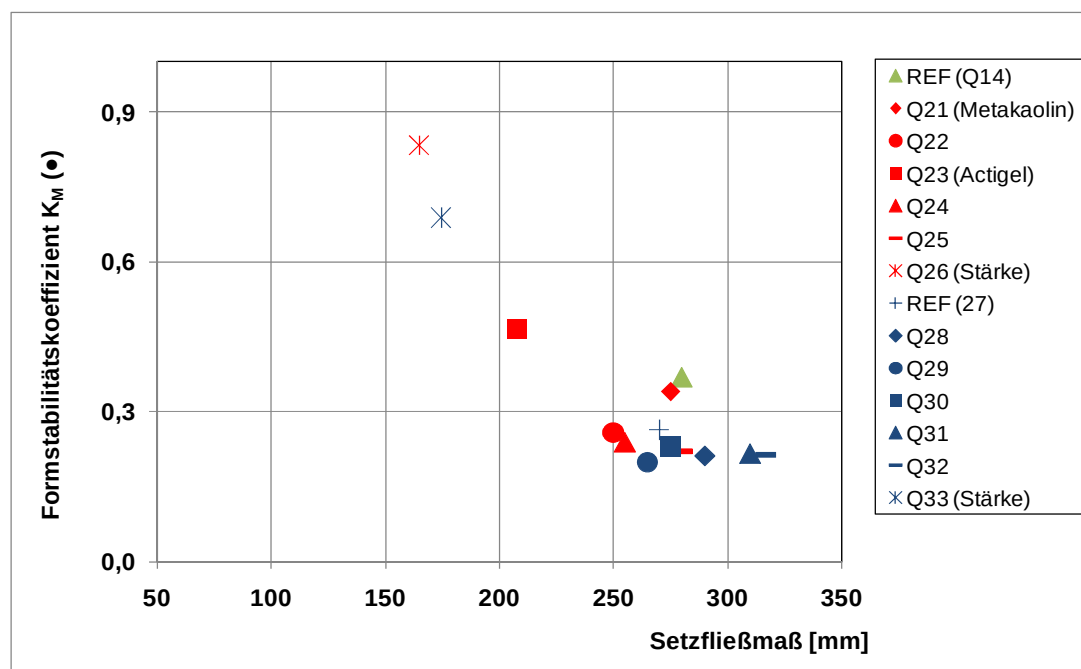
Tabelle A-7: Druckfestigkeiten der Betonmischung M-17 nach 28 Tagen

Mischung	Probe	Druckfestigkeit [N/mm ²]	mittl. Druckfestigkeit [N/mm ²]
M-17	1	62,5	72,0
	2	75,0	
	3	67,5	
	4	69,5	
	5	75,0	
	6	71,3	
	7	81,0	
	8	69,8	
	9	77,0	

Tabelle A-8: Photometrische Bestimmung von Al und Fe – Berechnung des Phasengehaltes eines Klinkers aus der chemischen Analyse

Photometrische Bestimmung		CEM I 42,5 R	CEM III/A 42,5 N
Al ₂ O ₃	[%]	4,65	8,08
Fe ₂ O ₃	[%]	2,85	1,29
Berechnung des C ₃ A-Gehaltes			
C ₃ A aus RFA	[%]	7,50	19,23

Abbildung A-6: Ergebnisse an Mörteluntersuchungen



Anhang B (Bestimmung von Luftporenkennwerten)

**Probenbezeichnung:** M-13

B-Nummer:

Bemerkung zur Sortierung: keine Sortierung.

Auftragsnummer: keine

Auftraggeber: kein

Prüf-Datum:

Uhrzeit:

Material / Stichwort:

Eingangs-Datum:

Sachbearbeiter:

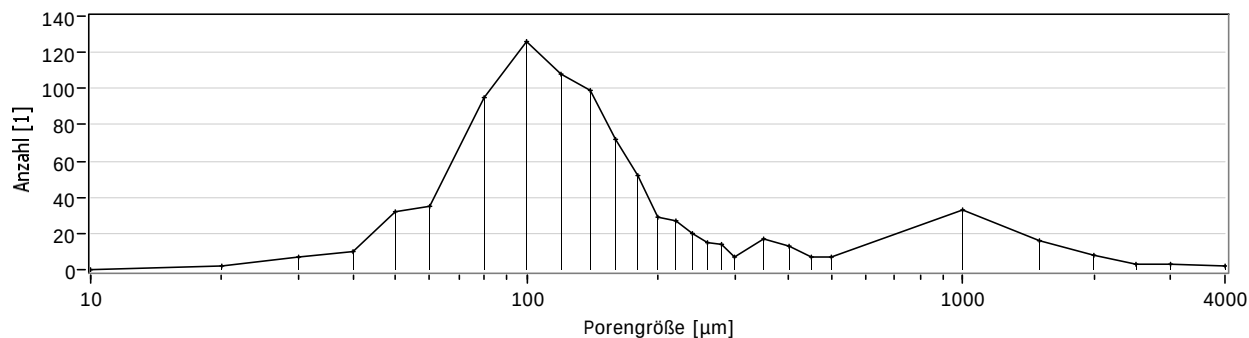
Prüfer:

Stoffraumrechnung

		Bezeichnung	Masse [kg/m ³]	Dichte [kg/dm ³]
Zement:		CEM III/A 42,5 N	350,00	3,00
Zugabewasser:		keine Angabe	119,00	1
Zusatzstoff 1:		keine Angabe	0	0
Zusatzstoff 2:		keine Angabe	0	0
Zusatzmittel 1 [M.-%] :		keines 0	0	
Zusatzmittel 2 [M.-%] :		keines 0	0,0	0
Suspension:		keine Angabe	0,0	0
Feststoffgehalt [%]		100	0,0	0
Wasseranteil [%]		0,0	0,0	0

Luftporenkennwerte

Luftgehalt A [Vol.-%]:		7,78	Gesamtzahl Proben:	2
Abstandsfaktor $\bar{L}$ [mm]:		0,18	Anzahl Messabschnitte / Probe:	3
Mikroluftporengehalt A300 [Vol.-%]:		3,13	Anzahl Messlinien / Messabschnitt:	5
Summe der Luftporensehnen, Ta [mm]:		200,703	Gesamtzahl der gemessenen Luftporensehnen:	862
Feststoffanteils der Messlinien, Ts [mm]:		2379,711	Bewertete Anzahl Proben:	2
Gesamtlänge der Messlinien Ttot [mm]:		2580,413	Bewertete Anzahl Messabschnitte:	6
			Bewertete Anzahl Messlinien:	26



**Probenbezeichnung:** M 17-b (2)

B-Nummer:

Bemerkung zur Sortierung: keine Sortierung.

Auftragsnummer: keine

Auftraggeber: kein

Prüf-Datum:

Uhrzeit:

Material / Stichwort:

Eingangs-Datum:

Sachbearbeiter:

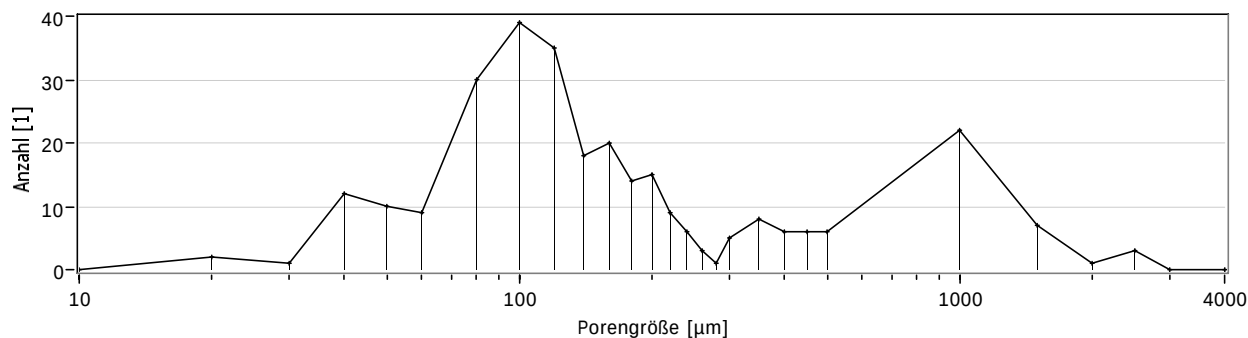
Prüfer:

Stoffraumrechnung

		Bezeichnung	Masse [kg/m ³]	Dichte [kg/dm ³]
Zement:	CEM I 42,5 R		420,00	3,10
Zugabewasser:	keine Angabe		125,00	1
Zusatzstoff 1:	keine Angabe		0	0
Zusatzstoff 2:	keine Angabe		0	0
Zusatzmittel 1 [M.-%] :	keines	0	0	
Zusatzmittel 2 [M.-%] :	keines	0	0,0	0
Suspension:	keine Angabe		0,0	0
	Feststoffgehalt [%]	100	0,0	0
	Wasseranteil [%]	0,0	0,0	0

Luftporenkennwerte

Luftgehalt A [Vol.-%]:	5,44	Gesamtzahl Proben:	2
Abstandsfaktor $\bar{L}$ [mm]:	0,28	Anzahl Messabschnitte / Probe:	2
Mikroluftporengehalt A300 [Vol.-%]:	1,73	Anzahl Messlinien / Messabschnitt:	5
		Gesamtzahl der gemessenen Luftporensehn:	288
Summe der Luftporensehn, Ta [mm]:	70,210	Bewertete Anzahl Proben:	1
Feststoffanteils der Messlinien, Ts [mm]:	1221,013	Bewertete Anzahl Messabschnitte:	2
Gesamtlänge der Messlinien Ttot [mm]:	1291,223	Bewertete Anzahl Messlinien:	10



Anhang C (Produkteigenschaften)

Charakteristische Kenngrößen der verwendeten Zemente

Portland Zement EN 197-1 – CEM I 42,5 R				
Physikalisch/mechanische Daten			Mittelwert	Anforderung aus EN 197-1 / DIN 1164-10
Wasseranspruch zur Normsteife		[%]	28,0	Keine
Druckfestigkeiten nach	2 Tagen	[MPa]	34,0	$\geq 20,0$
	28 Tagen	[MPa]	60,0	$\geq 42,5$
Erstarrungsbeginn		[min]	141,0	$\geq 60,0$
Raumbeständigkeit		[min]	1,3	≤ 10
Chemische Daten				
Glühverlust		[%]	2,4	≤ 5
Unlöslicher Rückstand		[%]	0,4	≤ 5
Sulfatgehalt		[%]	2,9	≤ 4

Hüttenzement EN 197-1 – CEM III / A 42,5 N			
Physikalisch/mechanische Daten			Mittelwert
Wasseranspruch zur Normsteife		[%]	30,0
Druckfestigkeiten nach	2 Tagen	[MPa]	20,0
	28 Tagen	[MPa]	48,0
Erstarrungsbeginn		[min]	200,0
Blaine		[cm²/g]	4550
Reindichte		[g/cm³]	3,0
Chemische Zusammensetzung			
MgO		[M.-%]	4,0
Al₂O₃		[M.-%]	8,9
SiO₂		[M.-%]	27,3
SO₃		[M.-%]	3,2
CaO		[M.-%]	52,2
Fe₂O₃		[M.-%]	1,3
TiO₂		[M.-%]	0,7
Cl		[M.-%]	< 0,1

Fließmittel: Technische Eigenschaften

Fließmittel FM 1 (Basis: Naphtalinsulfonat)			
Kenngroße	Einheit	Wert	Bemerkungen
Dichte	[kg/dm³]	1,20	
Empfohlener Dosierbereich	[g]	2-40	je kg Zement
Maximaler Chloridgehalt	[% MT]	< 0,10	
Maximaler Alkaligehalt	[% MT]	< 6,0	

Fließmittel FM 2 (Basis: PCE)			
Kenngroße	Einheit	Wert	Bemerkungen
Dichte	[kg/dm³]	1,05	
Empfohlener Dosierbereich	[g]	2-50	je kg Zement
Maximaler Chloridgehalt	[% MT]	< 0,10	
Maximaler Alkaligehalt	[% MT]	< 1,0	

Luftporenbildner: Technische Eigenschaften

LP (Basis: Modifiziertes Wurzelharz)			
Kenngroße	Einheit	Wert	Bemerkungen
Dichte	[kg/dm³]	1,01	
Empfohlener Dosierbereich	[g]	0,2-0,8	je kg Zement
Maximaler Chloridgehalt	[% MT]	< 0,10	
Maximaler Alkaligehalt	[% MT]	< 1,0	
pH-Wert	[-]	ca. 12,5	

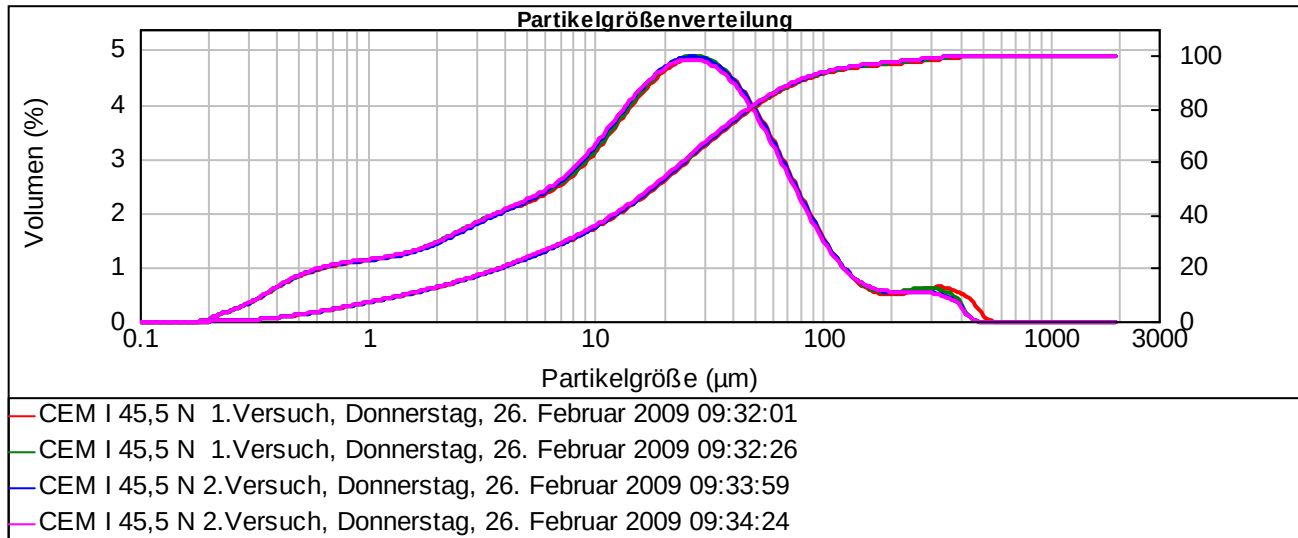
Analyse Report

Probenname: CEM I 45,5 N 2.Versuch **SOP Name:** Trocken_2,0b_50 **Gemessen:** Donnerstag, 26. Februar 2009 09:34:24
Probenherkunft: **Operator:** Labor **Berechnet:** Donnerstag, 26. Februar 2009 09:34:25
Probenreferenz: **Datenursprung:** Messung

Probenmaterial: Fraunhofer **Dispergierrmodul:** Scirocco 2000 (A) **Abschattung:** 4.04 %
Partikel RI: 0.000 **Absorption:** 0 **Analysemodell:** Universal
Dispergierrfluid: **Meßbereich:** 0.020 to 2000.000 um **Fit(gewichtet):** 0.153 %
Fluid RI: 1.000 **Emulation:** Aus

Konzentration: 0.0006 %Vol **Vol. Mittelwert D[4,3]:** 33.381 um **Spezifische Oberfläche:** 1.54 m²/g
Breite : 4.216 **Gleichförmigkeit:** 1.54 **D[3,2]:** 3.890 um
Verteilungsart: Volumen

d(0.1): 1.446 um **d(0.5):** 17.386 um **d(0.9):** 74.746 um



Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	1.06	11.482	3.37	120.226	0.82	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.10	13.183	3.65	138.038	0.64	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.16	15.136	3.91	158.489	0.54	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.23	17.378	4.12	181.970	0.50	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.01	1.905	1.33	19.953	4.27	208.930	0.49	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.12	2.188	1.43	22.909	4.35	239.883	0.50	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.19	2.512	1.55	26.303	4.35	275.423	0.48	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.29	2.884	1.66	30.200	4.27	316.228	0.41	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.41	3.311	1.77	34.674	4.10	363.078	0.31	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.55	3.802	1.87	39.811	3.85	416.869	0.05	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.68	4.365	1.97	45.709	3.53	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.78	5.012	2.08	52.481	3.14	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.87	5.754	2.20	60.256	2.71	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.93	6.607	2.36	69.183	2.27	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.97	7.586	2.56	79.433	1.82	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	1.01	8.710	2.80	91.201	1.42	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	1.03	10.000	3.08	104.713	1.08	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925	0.00		

Kommentar:

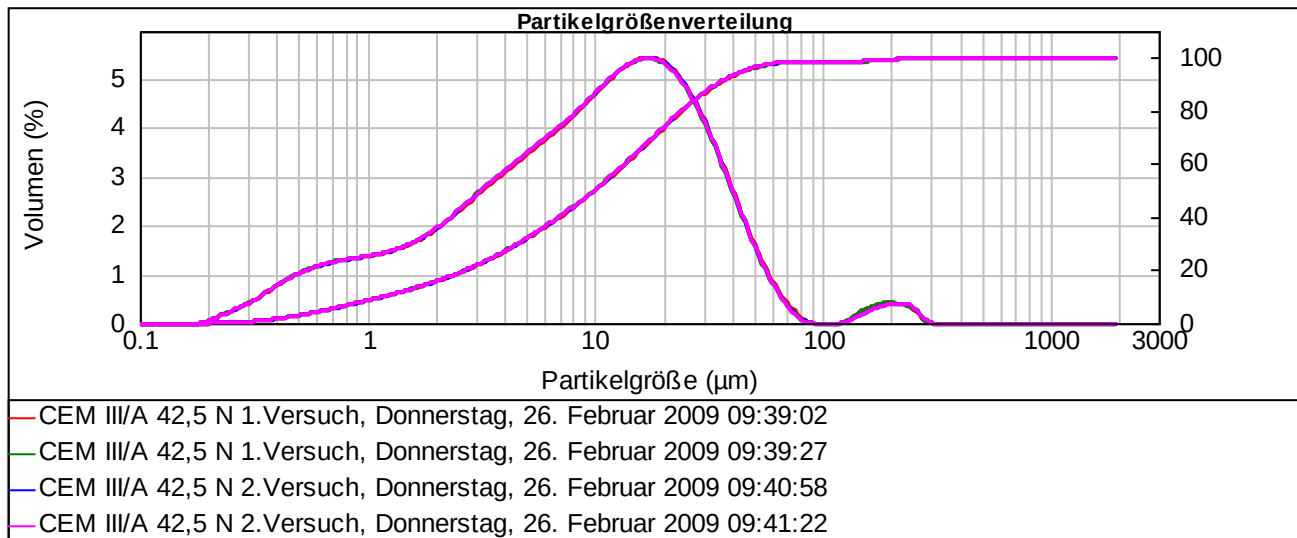
Analyse Report

Probenname: CEM III/A 42,5 N 2.Versuch **SOP Name:** Trocken_2,0b_50 **Gemessen:** Donnerstag, 26. Februar 2009 09:41:22
Probenherkunft: **Operator:** Labor **Berechnet:** Donnerstag, 26. Februar 2009 09:41:22
Probenreferenz: **Datenursprung:** Messung

Probenmaterial: Fraunhofer **Dispergierrmodul:** Scirocco 2000 (A) **Abschattung:** 4.48 %
Partikel RI: 0.000 **Absorption:** 0 **Analysemodell:** Universal
Dispergierrfluid: **Meßbereich:** 0.020 to 2000.000 um **Fit(gewichtet):** 0.142 %
Fluid RI: 1.000 **Emulation:** Aus

Konzentration: 0.0005 %Vol **Vol. Mittelwert D[4,3]:** 16.431 um **Spezifische Oberfläche:** 1.93 m²/g
Breite : 3.336 **Gleichförmigkeit:** 1.25 **D[3,2]:** 3.106 um
Verteilungsart: Volumen

d(0.1): 1.165 um **d(0.5):** 9.904 um **d(0.9):** 34.203 um



Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	1.30	11.482	4.60	120.226	0.03	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.37	13.183	4.78	138.038	0.16	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.37	15.136	4.78	158.489	0.27	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.47	17.378	4.85	181.970	0.34	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.02	1.905	1.77	19.953	4.70	208.930	0.35	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.14	2.188	1.97	22.909	4.41	239.883	0.26	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.24	2.512	2.19	26.303	3.99	275.423	0.01	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.35	2.884	2.41	30.200	3.45	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.49	3.311	2.64	34.674	2.83	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.66	3.802	2.84	39.811	2.18	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.82	4.365	3.04	45.709	1.55	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.94	5.012	3.23	52.481	0.98	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	1.04	5.754	3.43	60.256	0.52	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	1.11	6.607	3.63	69.183	0.19	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	1.17	7.586	3.86	79.433	0.02	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	1.21	8.710	4.11	91.201	0.00	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	1.25	10.000	4.37	104.713	0.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925			

Kommentar:

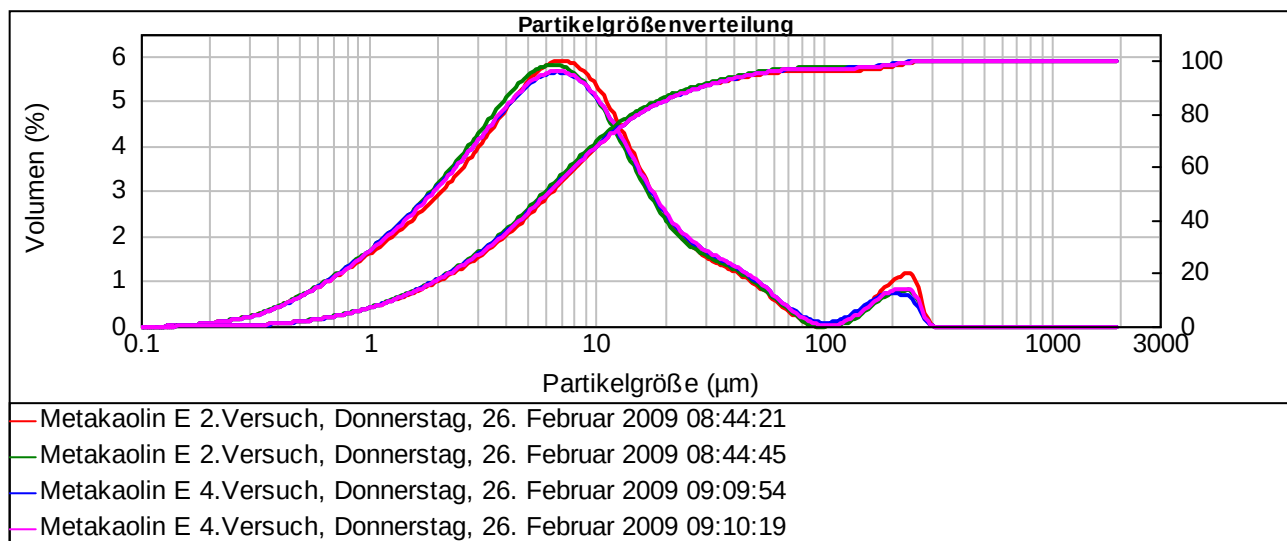
Analyse Report

Probenname: Metakaolin E 4.Versuch **SOP:** Trocken_2,0b_50 **Gemessen:** Donnerstag, 26. Februar 2009 09:10:19
Probenherkunft: **Operator:** Labor **Berechnet:** Donnerstag, 26. Februar 2009 09:10:19
Probenreferenz: **Datenursprung:** Messung

Probenmaterial: Fraunhofer **Dispergierrmodul:** Scirocco 2000 (A) **Abschattung:** 7.87 %
Partikel RI: 0.000 **Absorption:** 0 **Analysemodell:** Universal
Dispergierrfluid: **Meßbereich:** 0.020 to 2000.0... um **Fit(gewichtet):** 0.239 %
Fluid RI: 1.000 **Emulatio...** Aus

Konzentration: 0.0009 %Vol **Vol. Mittelwert D[4,3]:** 15.681 um **Spezifische Oberfläche:** 1.98 m²/g
Breite : 4.503 **Gleichförmigkeit:** 2.07 **D[3,2]:** 3.037 um
Verteilungsart: Volumen

d(0.1): 1.303 um **d(0.5):** 6.151 um **d(0.9):** 28.999 um



Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	1.74	11.482	3.97	120.226	0.13	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.98	13.183	3.48	138.038	0.29	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.01	1.445	2.23	15.136	2.98	158.489	0.51	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.03	1.660	2.51	17.378	2.52	181.970	0.69	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.06	1.905	2.80	19.953	2.13	208.930	0.75	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.09	2.188	3.11	22.909	1.83	239.883	0.58	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.13	2.512	3.43	26.303	1.61	275.423	0.02	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.18	2.884	3.77	30.200	1.45	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.25	3.311	4.11	34.674	1.31	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.35	3.802	4.43	39.811	1.15	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.48	4.365	4.72	45.709	0.97	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.61	5.012	4.95	52.481	0.75	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.76	5.754	5.08	60.256	0.51	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.93	6.607	5.11	69.183	0.28	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	1.11	7.586	5.00	79.433	0.12	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	1.30	8.710	4.77	91.201	0.02	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	1.51	10.000	4.41	104.713	0.02	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925	0.00		

Kommentar:

Analyse Report

Probenname: Quarzmehl 2.Versuch

SOP Name: Trocken_2,0b_50

Gemessen: Donnerstag, 26. Februar 2009 09:28:13

Probenherkunft:

Operator: Labor

Berechnet: Donnerstag, 26. Februar 2009 09:28:14

Probenreferenz:

Datenursprung: Messung

Probenmaterial: Fraunhofer

Dispergierrmodul: Scirocco 2000 (A)

Abschattung: 3.11 %

Partikel RI: 0.000 **Absorption:** 0

Analysemodell: Universal

Dispergierrfluid:

Meßbereich: 0.020 to 2000.000 um

Fit(gewichtet): 0.410 %

Fluid RI: 1.000

Emulation: Aus

Konzentration: 0.0022 %Vol

Vol. Mittelwert D[4,3]: 111.752 um

Spezifische Oberfläche: 0.289 m²/g

Breite : 2.774

Gleichförmigkeit: 0.877

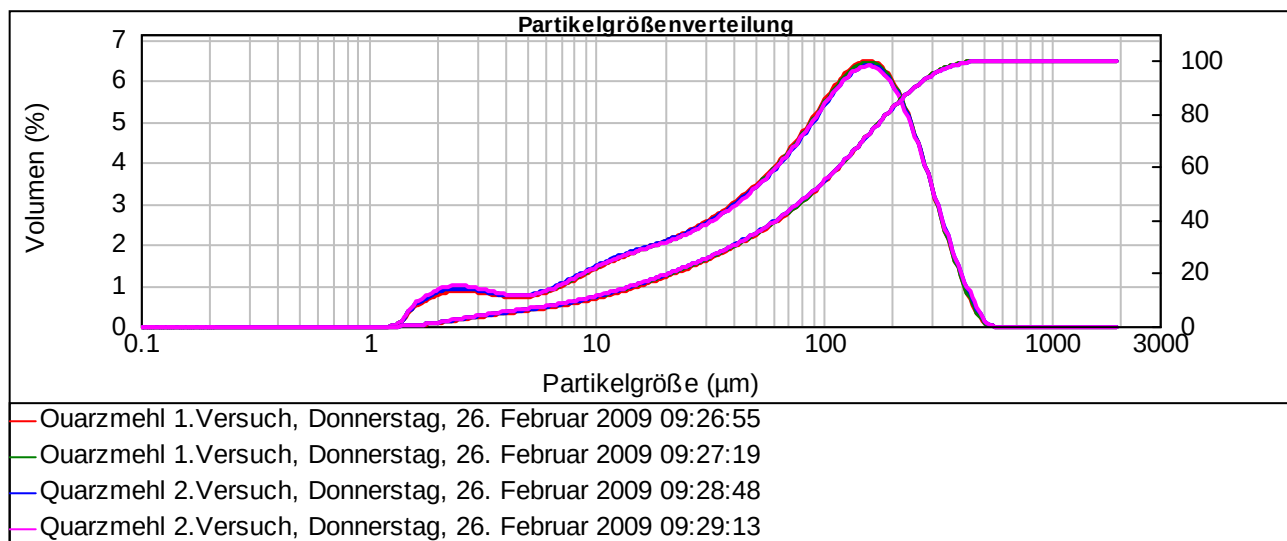
D[3,2]: 20.737 um

Verteilungsart: Volumen

d(0.1): 8.556 um

d(0.5): 87.887 um

d(0.9): 252.311 um



Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	1.50	120.226	5.52	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.03	13.183	1.61	138.038	5.72	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.43	15.136	1.70	158.489	5.70	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.65	17.378	1.79	181.970	5.41	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.82	19.953	1.89	208.930	4.86	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.89	22.909	2.01	239.883	4.08	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.89	26.303	2.15	275.423	3.16	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.83	30.200	2.32	316.228	2.21	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.75	34.674	2.52	363.078	1.34	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.69	39.811	2.75	416.869	0.69	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.67	45.709	3.00	478.630	0.11	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.70	52.481	3.29	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.79	60.256	3.61	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.92	69.183	3.97	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	1.07	79.433	4.37	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	1.23	91.201	4.78	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	1.37	104.713	5.19	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482		120.226		1258.925	0.00		

Kommentar:

Analyse Report

Probenname: Kalksteinmehl 2.Versuch

SOP Name: Trocken_2,0b_50

Gemessen: Donnerstag, 26. Februar 2009 09:15:17

Probenherkunft:

Operator: Labor

Berechnet: Donnerstag, 26. Februar 2009 09:15:16

Probenreferenz:

Datenursprung: Messung

Probenmaterial: Fraunhofer

Dispergierrmodul: Scirocco 2000 (A)

Abschattung: 4.68 %

Partikel RI: 0.000 **Absorption:** 0

Analysemodell: Universal

Dispergierrfluid:

Meßbereich: 0.020 to 2000.000 um

Fit(gewichtet): 0.250 %

Fluid RI: 1.000

Emulation: Aus

Konzentration: 0.0007 %Vol

Vol. Mittelwert D[4,3]: 51.274 um

Spezifische Oberfläche: 1.45 m²/g

Breite : 13.895

Gleichförmigkeit: 4.26

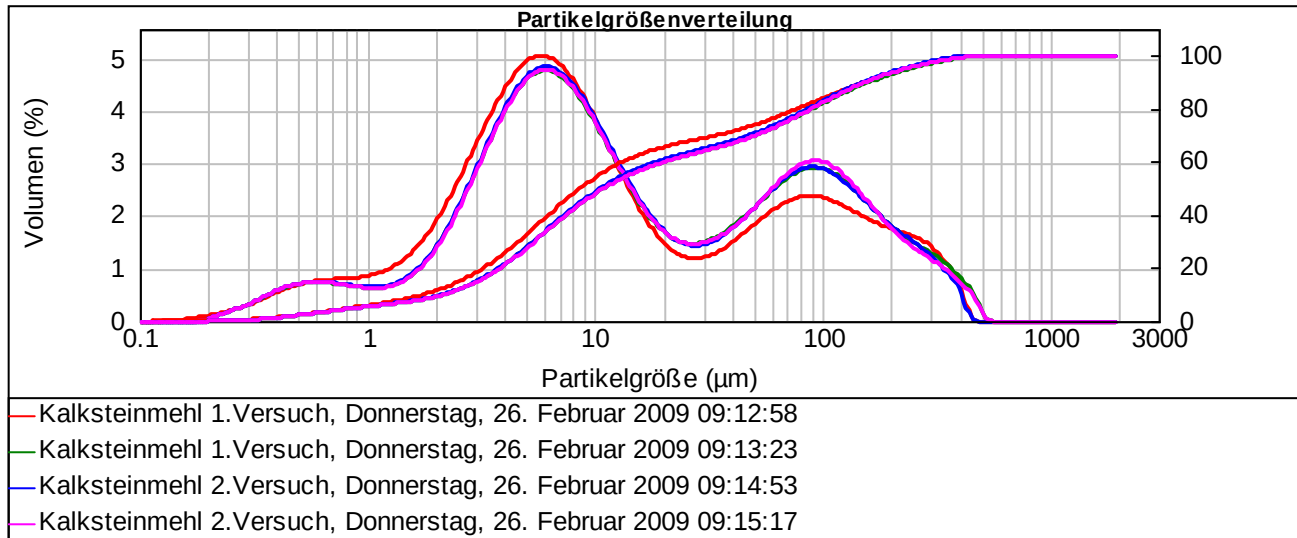
D[3,2]: 4.131 um

Verteilungsart: Volumen

d(0.1): 2.162 um

d(0.5): 10.905 um

d(0.9): 153.696 um



Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.58	11.482	2.77	120.226	2.45	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.63	13.183	2.34	138.038	2.19	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.76	15.136	1.96	158.489	1.91	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.98	17.378	1.66	181.970	1.65	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.03	1.905	1.29	19.953	1.46	208.930	1.42	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.12	2.188	1.69	22.909	1.35	239.883	1.24	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.19	2.512	2.16	26.303	1.33	275.423	1.08	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.28	2.884	2.68	30.200	1.39	316.228	0.92	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.39	3.311	3.20	34.674	1.51	363.078	0.71	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.51	3.802	3.66	39.811	1.69	416.869	0.51	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.60	4.365	4.02	45.709	1.91	478.630	0.10	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.65	5.012	4.25	52.481	2.16	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.67	5.754	4.32	60.256	2.41	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.66	6.607	4.22	69.183	2.61	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.63	7.586	3.98	79.433	2.74	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.60	8.710	3.63	91.201	2.75	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.57	10.000	3.21	104.713	2.65	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925	0.00		

Kommentar:

LEBENS LAUF

Name	Diego Sarmiento
Geburtstag / -ort	06.11.1981 in Cordoba - Argentinien
Familienstand	ledig

BILDUNG

09.2008 – heute	Doktorand / Wissenschaftlicher Mitarbeiter Ruhr Universität Bochum, Bochum, Deutschland Promotionsthema: „Selbstverdichtender Beton mit hoher Grünstandfestigkeit für den Einsatz in Gleitschalungsfertigern im Betonstraßenbau“ [Strukturierte Forschungspromotion]
03.2000 - 08.2007	Studium: Fachrichtung Bauingenieurwesen Universidad Tecnológica Nacional - Cordoba, Argentinien Thema Abschlussarbeit: Planung und Entwicklung einer Ringstraße Vertiefungsrichtung • Konstruktiver Ingenieurbau Spezialgebiete • Bauverfahrenstechnik, Verkehrswesen, Stahlbeton
03.1994 – 12.1999	Schulabschluss: Abitur (Schwerpunkte: Mathematik und Physik) Colegio Santo Tomás de Aquino. Córdoba - Argentinien.

BERUFSPRAXIS

09. 2008 – heute	Wissenschaftlicher Mitarbeiter Lehrstuhl für Baustofftechnik, Ruhr-Universität Bochum Aufgaben: Forschung, Abwicklung v. Industrieaufträgen
------------------	---

Zwei Veröffentlichungen:

1. Breitenbücher, R. ; Sarmiento, D. ; „Einfluss von Zusatzstoffen/ –mitteln auf die thixotropen Eigenschaften von Bindemittelleimen“, Professional journal « BFT INTERNATIONAL », October 2010, S. 56 – 71 (ISSN 0373-4331)
[Sprache : Englisch / Deutsch].

2. Sarmiento, D.; „Effect of admixtures on flowability and thixotropic properties of pastes and mortars“, Conference proceedings of “8th fib International PhD Symposium in Civil Engineering” at Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering , Juni 2010, S. 70 – 76 [Sprache: Englisch]

Sechs Vorträge auf internationalen Konferenzen:

1. 21.-22.04.2011: „Self Compacting Concrete with high green strength“, National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington DC – USA,
[Sprache: Englisch]

2. 19.-20.04.2011: „Self Compacting Concrete with high green strength“, Iowa State University, College for Engineering, Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Ames – USA,
[Sprache: Englisch]

3. 18.04.2011: „Self Compacting Concrete with high green strength“, National Concrete Pavement Technology Center – Center for Nanotechnology in Cementitious Systems, Ames – USA,
[Sprache: Englisch]

4. 01.-02.03.2011: „Development of self-compacting concretes for slip-form paving“, Hochschule Regensburg: Fakultät Bauingenieurwesen, „20. Tagung: Rheologische Messungen an mineralischen Baustoffen“, Regensburg – Deutschland, [Sprache: Englisch]

5. 10.-11.03.2010: „Einfluss von Zusatzstoffen/ -mitteln auf die thixotropen Eigenschaften von Leimen“, Hochschule Regensburg: Fakultät Bauingenieurwesen, „19. Tagung: Rheologische Messungen an mineralischen Baustoffen“, Regensburg - Deutschland, [Sprache: Deutsch]

6. 06.11.2009 : “Self-consolidating concrete for slip-form paving”, Ruhr University Bochum: Section Days 2009: “Natural Sciences and Engineering - Functional Materials” (6th November 2009), [Sprache: Deutsch]

11.2007 – 08.2008 Bauingenieur/ Bauleiter
HOLCIM GROUP - IMEXAR S.R.L., Argentinien

08. – 11. 2007 Bauingenieur/ Bauleiter
De La Costa S.A., Argentinien

AUSBILDUNGSBEGLEITENDE TÄTIGKEITEN

01. – 07. 2007 Technischer Assistent
De La Costa S.A., Argentinien

02. - 03 2006 Technischer Assistent
Bau Grund – Ingenieurgesellschaft mbH

05. – 07. 2005 Technischer Assistent
E.V.N. S.A., Argentinien

STIPENDIEN :

09. 2008 – heute Doktorand – strukturierte Forschungspromotion [Sprache: Deutsch]
Research School: Graduiertenschule, Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder zur Förderung von Wissenschaft und Forschung an deutschen Hochschulen
Ruhr Universität Bochum, Deutschland

08.2005 - 04.2006 Austauschstudent
DAAD – Deutscher Akademischer Austausch Dienst
Ruhr Universität Bochum, Deutschland
Studium: Bauingenieurwesen
Projekt: „Hochleistungsbetone mit erhöhtem Säurewiderstand“ [Sprache: Deutsch]

03. 2004 – 05. 2005 Forscher
Forschungszentrum für angewandte Informatik in Bauwesen
C.I.I.I - Centro de Investigación en Informática Aplicada a la Ingeniería
Universidad Tecnologica Nacional, Cordoba, Argentinien

03. 2002 – 12. 2003 Forscher
Forschungslabor der Universidad Tecnologica Nacional, Argentinien
Laboratorio de Ingeniería Civil – Universidad Tecnologica Nacional, Argentina