

DIPLOMARBEIT Master Thesis

Rheologisches Verhalten von Zementleimen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. DDr. Elemer Bölcskey

und

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Heinrich Bruckner

E 206

Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Stefan Ratzinger

0525934

Maria Jeutendorf 57
3140 Pottenbrunn

Wien, am

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	4
Abstract	4
Danksagung	4
1 Einleitung	5
2 Grundlagen	6
2.1 Zement	6
2.1.1 Herstellung	6
2.1.2 Zemente nach EN 197-1	7
2.1.3 Zemente in Österreich	11
2.1.4 Wärmeentwicklungsklassen	13
2.1.5 Sonderzemente:	13
2.1.6 Auswahlkriterien für Zemente	14
2.2 Wasser	14
2.3 Fließmittel	14
2.3.1 Wirkungsweise von Fließmittel	15
2.3.2 Entflockung und starke Dispergierung	15
2.3.3 Reduzierung der Oberflächenspannung	17
2.4 Arten von Fließmittel	18
2.5 Zementleim	20
3 Rheologie	21
3.1 Modelle	21
3.1.1 <i>Newton</i> -Modell und Anwendung im Bauwesen	22
3.1.2 <i>Bingham</i> -Modell und Anwendung im Bauwesen	22
3.2 Prüfmethoden	24
3.2.1 Setzversuch	24
3.2.2 <i>Vicat</i> -Versuch	24
3.2.3 Auslaufversuch	25
3.2.4 Rheometrie	26
3.2.5 Verhalten des Zementleimes unter Scherbeanspruchung	27
4 Messeinrichtungen und Vorversuche	29
4.1 Viskomat NT	29
4.2 Vorversuche	30
4.2.1 Mischzeit	30
4.2.2 Fahrweise	31
4.2.3 W/Z-Wert	34
4.2.4 Genauigkeit der Versuche	34
4.2.5 Verhalten von verschiedenen Zementarten	35
4.2.6 Fließmittel	37
4.2.7 Versuchsprogramm	39
4.3 Kalibrierung des Gerätes	40
4.4 Versuchsreihen	44
4.4.1 Versuchsreihe A1 (C_3A – Gehalt)	46
4.4.2 Versuchsreihe A2 (Kristallstruktur)	46
4.4.3 Versuchsreihe A3 (Alkaligehalt)	47
4.4.4 Versuchsreihe B (Einfluss der Sulfatträger)	47
4.4.5 Versuchsreihe C1 (ohne Zusatzstoffe)	48
4.4.6 Versuchsreihe C2 (Gehalt an Hüttensand)	48

4.4.7	Versuchsreihe C3 (Gehalt an Kalkstein) und Versuchsreihe C4.....	49
4.4.8	Versuchsreihe D (Feinheit der Zemente).....	49
4.4.9	Fließmittel.....	50
5	Hauptversuche	51
5.1	Hauptversuche ohne Fließmittel.....	51
5.1.1	Versuchsreihe A1	51
5.1.2	Versuchsreihe A2	53
5.1.3	Versuchsreihe A3	55
5.1.4	Versuchsreihe B.....	57
5.1.5	Versuchsreihe C1.....	59
5.1.6	Versuchsreihe C2.....	61
5.1.7	Versuchsreihe C3.....	63
5.1.8	Versuchsreihe C4.....	65
5.1.9	Versuchsreihe D	67
5.1.10	Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuchsreihen.....	70
5.2	Hauptversuch mit Fließmittel	70
5.2.1	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	78
6	Fließzeitversuch	81
6.1	Durchführung von Fließzeitversuch	82
6.2	Erweiterte Versuche mit CEM I 42,5 R	83
6.2.1	Variante A: Veränderungen des Fließmittelgehaltes bei Zementleimen	83
6.2.2	Variante B: W/Z Variationen mit gleichen Setzmaß.....	86
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	90
Quellen		92
Abbildungsverzeichnis		94
Tabellenverzeichnis.....		96
Anhang		98

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Thema Rheologie von Zementleimen und ist in zwei Teilen aufgebaut. Der erste Teil beschäftigt sich mit den verwendeten Materialien (Zement, Wasser und Fließmittel auf PCE Basis) und den theoretischen Grundlagen der Rheologie. Der zweite Teil umfasst den experimentellen Teil mit dem Rheometer Viskomat NT. Dieser Teil unterteilt sich in Vorversuche, Hauptversuche ohne Fließmittel und Hauptversuche mit Fließmittel. Prinzipiell handelt es sich um ein gut reproduzierbares Prüfverfahren mit dem Rheometer. Die Genauigkeit ist vom Probenmaterial, Wassergehalt, Fließmittelgehalt und der menschlichen Komponente abhängig.

Abstract

This thesis is about rheology from cement paste and dives in two parts. The first part engaged in used materials like cement, water and superplasticisers (PCE) and the basics of rheology. The second part of this thesis includes the laboratory experiments with the rheometer Viskomat NT. This part sub-divide in pretest and main test (cement paste exclusive superplasticisers and cement paste with superplasticisers). As a matter of principle the testing system is reproduceable. The precision depends on sample material, water content, superplasticisers content and the human factor.

Danksagung

Das Studium ist zu Ende und nun bedanke ich mich bei meinen Eltern (Franz und Anna), meinen Bruder Franz die mich immer unterstützt haben in allen Lebenslagen. Ohne diese Unterstützung wäre ich nie soweit gekommen und mein Leben hätte sicherlich eine andere Wendung genommen.

Ich bedanke mich bei den Professoren und Lektoren der TU-Wien die mir ein notwendiges theoretisches Rüstzeug mit auf dem Weg gegeben haben. Die TU-Wien speziell das Hochbauinstitut Schwerpunkt Werkstoffe hat sehr viel Erfahrung mit diversen Baustoffen und viele bemühte Vortragende und Professoren, sodass man viel für sich erlernen kann.

Bei Ao.Univ.Prof. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. DDr. Elemer Bölcskey und Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Heinrich Bruckner bedanke ich mich für die gute Betreuung.

Eine Organisation die nicht unerwähnt bleiben sollte ist die Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ). Dieser Verein stellte mir die Proben, Labor, und die Gerätschaft zur Betätigung der Versuche zur Verfügung. Ich bedanke mich bei Frau Dr. Schneider und Herrn Dr. Rechberger, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind. Bei Frau Ing. Schafhauser, Herrn Pamperer und Herrn Gombocz bedanke ich mich für die praktischen Tipps und Tricks, die den experimentellen Teil bereichert haben. Ich möchte mich auch noch bei Herrn Dr. Steigenberger bedanken.

1 Einleitung

Das Themengebiet der Rheologie befasst sich mit der Beschreibung von Flüssigkeit. Das rheologische Verhalten von Stoffen findet zwischen zwei Extrema statt, das Fließen von Flüssigkeiten und das Deformationsverhalten von Festkörpern. Diese Extrema können sogar in kurzen Abständen aufeinander folgen z.B. Bodenverflüssigung bei einem Erdbeben. Bei Stoffen mit Fließgrenzen (Beton, Zementleim etc.) muss eine gewisse Spannung überschritten werden und diese Stoffe beginnen zu fließen.

Im Bauwesen kommt dem Werkstoff Beton und dem Bindemittel Zement eine große Bedeutung zu. Diese Werkstoffe werden in quasi-flüssiger Form verarbeitet. Die Konsistenz wird mittels Ausbreitmaß festgestellt und mittels visueller Begutachtung beurteilt. Die Beschreibung ist subjektiv wie zum Beispiel erdfeucht, standfest, cremig usw. Diese traditionell baustellenerprobten Methoden sind sehr einfach und werden für die Zukunft sicherlich weiter bestehen bleiben.

Für die Weiterentwicklung von Baustoffen z.B. SCC, UHPC, Qualitätssicherung und der Beschreibung der Wirkung von Fließmittel auf Zementleimen (Sättigungspunkt) werden diese beiden Methoden nicht genügen, daher müssen andere Beschreibungsmöglichkeiten geschaffen werden, um ein genaueres Erfassen der Fließeigenschaften zu ermöglichen. Beim Ausbreitmaß handelt es sich um einen punktuellen Versuch, mit dem Rheometer können längere Zeiträume erfasst werden. Es können sogar Bauabfolgen mit dem Rheometer simuliert werden. Bei der Verwendung eines Rheometers können Unterschiede, die durch visuelle Methoden nicht erfassbar sind, durch physikalische Größen quantifiziert werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine quantitative Beschreibung vom rheologischen Verhalten von Zementleimen (mit und ohne Fließmittel) mit Hilfe eines Rheometer durchzuführen und zu beschreiben.

Im Vorfeld werden Vorversuche durchgeführt, um festzulegen mit welchem Wassergehalt, welcher Mischzeit und Versuchsdauer die Versuche durchgeführt werden sollen. Im Rahmen der Vorversuche sollen unterschiedliche Zementarten untersucht werden um Klarheit zu bekommen, ob sich bei diesem Verfahren Unterschiede ergeben können.

Ein wichtiger Punkt ist der Einsatz von Fließmittel. Die Fließmittelmengen sind sehr gering, daher sollen die Fließmittel nicht dem Anmachwasser beigegeben werden (aufgrund der schlechten Reproduzierbarkeit). Das Fließmittel soll erst im Rheometer mittels Pipette hinzugefügt werden.

Die untersuchten Zemente werden in Versuchsgruppen eingeteilt. Die Gruppeneinteilung umfasst folgende Themen:

- C_3A -Gehalt im Zement
- Kristallgefüge des Zementes (Verhältnis kubisch raumzentriert zu orthorombisch)
- Alkaligehalt im Zement
- Einfluss der Sulfatträger im Zement
- Einfluss zwischen CEM I 42,5 N und CEM I 42,5 R
- unterschiedlicher Gehalt an Hüttensand im Zement
- unterschiedlicher Gehalt an Kalkstein im Zement und Nachmahlung des verwendeten Zementes
- Feinheit des Zementes

2 Grundlagen

2.1 Zement

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Herstellung und die technischen Eigenschaften der Zemente nach EN 197-1 und den davon in Österreich erhältlichen Zementen gegeben. Der Zement ist ein hydraulisches Bindemittel das bedeutet, dass die Erhärtung (Hydratation) sowohl in der Luft als auch unter Wasser erfolgt und dabei wasser- und raumbeständiger Zementstein gebildet wird. Die Ursprünge der Entwicklung gehen zurück zu den Römern (Opus Caementitium) und wurden in England im 18. Jahrhundert wiederentdeckt und immer weiterentwickelt zu dem heute industriell gefertigten und standardisierten Produkt.

2.1.1 Herstellung¹

Die Herstellung vom Zement erfolgt meist im Trockenverfahren (Abb. 2-1).

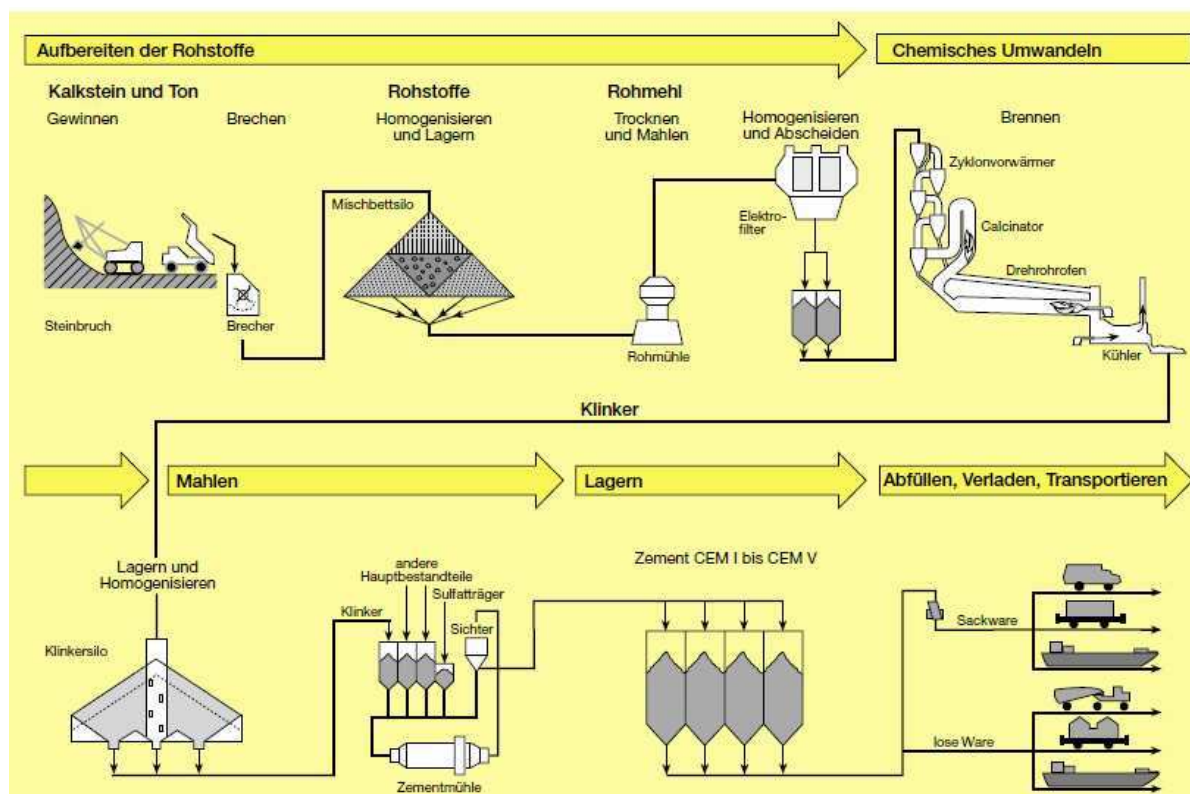


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Zementproduktion

Als erster Schritt für die Herstellung von Portlandzementklinker werden Kalkstein und Ton oder Kalksteinmergel gewonnen, im Brecher gebrochen und das Material als Rohmaterial

¹ <http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Zementmerkblaetter/B1.pdf> (/1/, letzter Zugriff 23.09.2012)

homogenisiert. Gleichbleibende Güte im Rohmaterial ist für die Qualität und Gleichmäßigkeit des Endproduktes erforderlich.

Im zweiten Schritt wird das Rohmaterial in einem Vorwärmer erwärmt, danach werden überschüssiger Kalk- und Kohlensäure dem Rohmaterial entzogen und anschließend in einem Drehrohrofen gebrannt (ca. 1450 °C). Hier entsteht der Zementklinker. Nach dem Brennvorgang wird das Gemisch in einem Kühler auf 100 °C bis 300 °C abgekühlt.

Durch den Mahlvorgang wird aus dem Zementklinker ein reaktionsfähiges Produkt. Zwecks der besseren Steuerung der Korngrößenverteilung werden die einzelnen Komponenten des Portlandzementes (Klinker und Zuzahlstoffe) getrennt gemahlen und anschließend gemischt. Gips als „Sulfatträger“ wird in geringfügigen Mengen dem ganzen Gemenge zur Abbindesteuerung beigemischt. Die geringfügigen Mengen des Sulfatträgers sind notwendig da es sonst zu Treiberscheinungen im Festbeton kommen kann.

Der Lagerung kommt große Bedeutung zu, da Zement hygroskopisch ist und schnell Feuchtigkeit aufnimmt. Der Zement wird daher in Silos trocken gelagert und kommt von dort zur Verladung.

2.1.2 Zemente nach EN 197-1²

Die EN 197-1 regelt und unterteilt die Zementarten, Zusammensetzungen und Bestandteile von Normalzementen, sowie Festigkeitsklassen.

In der folgenden Tabelle 2-1 sieht man Normalzemente und deren Zusammensetzen nach EN 197 -1.

² <http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Zementmerkblaetter/B1.pdf> (/1/, letzter Zugriff 23.09.2012)

Tabelle 2-1: Darstellung der Zemente nach EN 197-1

Zementart			Hauptbestandteil neben Portlandzementklinker	
Hauptart	Benennung		Art	Anteil [M.-%]
CEM I	Portlandzement	CEM I	-	0
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	Hüttensand (S)	6...20
		CEM II/B-S		21...35
	Portlandsilicastaubzement	CEM II/A-D	Silicastaub (D)	6...10
	Portlandpuzzolanzement	CEM II/A-P	natürliches	6...20
		CEM II/B-P	Puzzolan (P)	21...35
		CEM II/A-Q	künstliches	6...20
		CEM II/B-Q	Puzzolan (Q)	21...35
	Portlandflugaschezement	CEM II/A-V	kieselsäurereiche	6...20
		CEM II/B-V	Flugasche (V)	21...35
		CEM II/A-W	kalkreiche	6...20
		CEM II/B-W	Flugasche (V)	21...35
	Portlandschieferzement	CEM II/A-T	gebrannter	6...20
		CEM II/B-T	Schiefer (T)	21...35
	Portlandkalksteinzement	CEM II/A-L	Kalkstein (L)	6...20
		CEM II/B-L		21...35
		CEM II/A-LL	Kalkstein (LL)	6...20
		CEM II/B-LL		21...35
	Portlandkompositzement	CEM II/A-M	alle Hauptbestandteile sind möglich (S, D, P, Q, V, W, T, L, LL)	6...20
		CEM II/B-M		21...35
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	Hüttensand (S)	36...65
		CEM III/B		66...80
		CEM III/C		81...95
CEM IV	Puzzolanzement	CEM IV/A	Puzzolane (D, P, Q, V)	11...35
		CEM IV/B		36...55
CEM V	Kompositzement	CEM IV/A	Hüttensand (S) Puzzolane (P, Q, V)	11...35
		CEM IV/B		36...55

Hauptzementarten

Nach EN-197-1 gibt es eine Unterteilung in fünf Hauptzementarten:

CEM I	Portlandzement
CEM II	Portlandkompositzemente
CEM III	Hochofenzement
CEM IV	Puzzolanzement
CEM V	Kompositzemente

Der Anteil der Zumahlstoffe wird mit dem Buchstaben A, B, C nach der Hauptzementart geregelt.

Prinzipiell kann man sagen, dass Zemente mit dem Buchstaben A eine geringere Zumahlmenge aufweisen, Zemente mit dem Buchstaben B eine mittlere Zumahlmenge und Zemente mit dem Buchstaben C hohe Zumahlmenge besitzen.

Hauptbestandteile

- *Portlandzementklinker (K)* wird durch das Brennen von Kalk und Ton hergestellt. Der Name Portland kommt von der südenglischen Halbinsel, wo der Klinker das erste Mal in einer größeren Menge hergestellt wurde.
- *Hüttensand (S)* ist ein Abfallprodukt aus der Stahlproduktion und fällt bei der Verhüttung von Eisenerz an (Hochofenschlacke). Die Hochofenschlacke wird mit Wasser rasch abgekühlt und es entsteht ein latent hydraulischer Stoff. Dieser latent hydraulische Stoff entwickelt durch Mahlung und entsprechende Anregung durch Portlandzementklinker (Calciumhydroxid) hydraulische Eigenschaften.
- *Puzzolane (P,Q)* enthalten kieselsäurehaltige Bestandteile und unter Umständen tonerdhaltige Stoffe. Diverse Vorkommen sind vulkanischen Ursprungs und werden aus Tone, Schiefer und Sedimentgesteinen gewonnen. Puzzolane werden durch Calciumhydroxid angeregt und entwickeln erst durch diese Anregung die entsprechende Festigkeitsbildung.
- *Flugaschen (V, W)* sind staubartige Partikel die Kieselsäure- und Kalkbestandteile beinhalten. Diese Partikel entstehen durch Rauchgase und werden durch Abscheideanlagen herausgefiltert. Bei Flugaschen unterscheidet man zwischen kieselsäurereiche Flugasche (V) und kalkreiche Flugasche (W). Kieselsäurereiche Flugasche entsteht im speziellen bei der Verfeuerung von Steinkohle und kalkreiche Flugasche entsteht bei der Verfeuerung von Braunkohle. Flugaschen dürfen nur von Kohlekraftwerken verwendet werden.
- *Gebrannter Schiefer (T)* wird bei 800°C aus natürlichen Schiefervorkommen hergestellt. Der Schiefer wird fein gemahlen und hat hydraulische und puzzolanische (chemische Reaktion) Eigenschaften.
- *Kalkstein (L, LL)* Gemahlener Kalkstein verbessert unter Umständen die Korngrößenverteilung.
- *Silikastaub (D)* besteht aus kugeligen Partikel und einem hohen Gehalt an Silikiumdioxid. Silikastaub entsteht bei der Herstellung von Silikium.
- *Komposit (M)* alle Hauptbestandteile sind möglich (S,D,P,Q,V,W,T,L,LL).

Nebenbestandteile

Zemente können bis zu 5 Masseprozent fein zerkleinerte anorganische, mineralische Stoffe enthalten. Man verbessert dadurch die Verarbeitbarkeit und das Rückhalteverhalten von Wasser (Bluten). Nebenbestandteile können entweder inert oder puzzolanische Eigenschaften oder schwach hydraulische Eigenschaften aufweisen.

Zementzusätze

Das Erstarrungsverhalten wird durch geringe Mengen von Calciumsulfat (Gips und/oder Anhydrit) beeinflusst.

Festigkeitsklassen

Bei Zementen unterscheidet man verschiedene Festigkeitsklassen 32,5; 42,5; und 52,5. Es wird weiters unterschieden nach der Anfangsfestigkeit und der Festigkeitsentwicklung:

- Niedrige Anfangsfestigkeit L (Hochofenzement)
- Normale übliche Anfangsfestigkeit N
- Hohe Anfangsfestigkeit R

In der folgenden Tabelle 2-2 werden die Festigkeitsklassen im Überblick dargestellt.

Tabelle 2-2: Darstellung der Festigkeitsklasse

Festigkeitsklasse	Norm	Druckfestigkeit [N/mm ²]			
		Anfangsfestigkeit		Normfestigkeit	
		2 Tage	7 Tage	28 Tage	
22,5	DIN EN 14216	-	-	≥ 22,5	≤ 42,5
32,5 L	DIN EN 197-4	-	≥ 12	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 N	DIN EN 197-1	-	≥ 16		
32,5 R		≥ 10	-		
42,5 L	DIN EN 197-4	-	≥ 16	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 N	DIN EN 197-1	≥ 10	-		
42,5 R		≥ 20	-		
52,5 L	DIN EN 197-4	≥ 10	≥ 16	≥ 52,5	
52,5 N	DIN EN 197-1	≥ 20	-		
52,5 R		≥ 30	-		

Technische Eigenschaften der Normalzemente

- *Dichte*: Die Rohdichte (~ Reindichte) von Zement ist von der Zementart und den Bestandteilen abhängig (Tabelle 2-3) ersichtlich.

Tabelle 2-3: Dichte von Zementen

Zementart	Reindichte [kg/dm ³]	Schüttdichte [kg/dm ³]	
		lose eingefüllt	engerüttelt
Portlandpuzzolanzement	~ 2,9	0,9 bis 1,2	1,6 bis 1,9
Portlandflugaschezement			
Hochofen-, Portlandhütten-, Portlandschiefer-, Portlandkalksteinzement	~ 3,0		
Portlandzement	~ 3,1		
Portlandzement - HS	~ 3,2		

- *Erstarren* Der Erstarrungsbeginn von Zementen ist von den Festigkeitsklassen abhängig und wird mit dem Nadelgerät von *Vicat* überprüft.
Folgende Werte dürfen nicht unterschritten werden:
 - Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 dürfen frühestens in 75 min erstarren.
 - Zemente der Festigkeitsklasse 42,5 dürfen frühestens in 60 min erstarren.
 - Zemente der Festigkeitsklasse 52,5 dürfen frühestens in 45 min erstarren.
- *Farbe* Die Farbe ist ein Erkennungs- aber kein Gütemerkmal. Die Farbe ist abhängig von den verwendeten Rohstoffen, Zementart, Mahlfineinheit und Herstellverfahren. Farbliche Schwankungen sind bei gleichartigen Zementarten unvermeidlich.

- *Wärmeentwicklung* Die Wärmeentwicklung wird in der ÖNORM B3328-1 geregelt. Zemente dürfen die Normwerte nicht überschreiten.

2.1.3 Zemente in Österreich³

Normalzemente:

In Abbildung 2-2 wird die Zementbezeichnung nach der ÖNORM EN 197-1 anschaulich dargestellt:

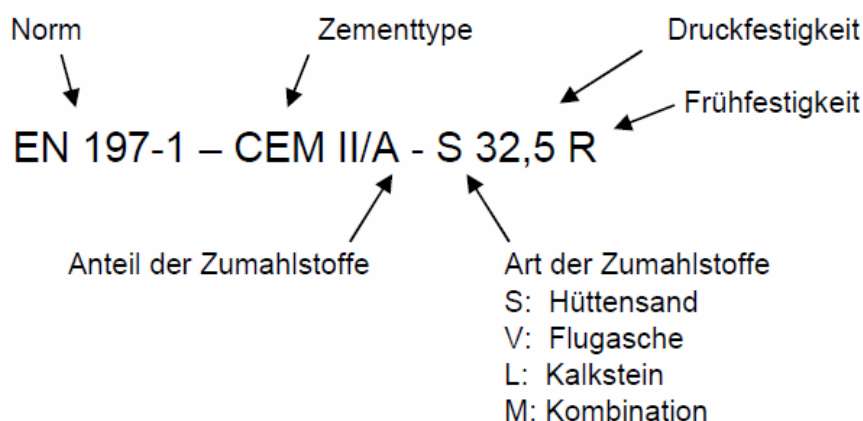


Abbildung 2-2: Darstellung einer Zementbezeichnung nach EN 197-1

Folgende Zementsorten werden in Österreich verwendet und in Tabelle 2-4 dargestellt:

Tabelle 2-4: Darstellung der verwendeten Zemente in Österreich

Haupt- zement- art	Zusammensetzung Massenanteil in Prozent					
	Benzeichnung	Kenn- zeichnung	Klinker K	Hütten- sand S	Flugasche kieselreich V	Kalk- stein L
I	Portlandzement	I	95-100	-	-	-
II	Portlandhütten- zement	II/A-S	80-94	6-20	-	-
		II/B-S	65-79	21-35	-	-
	Portlandflug- aschezement	II/A-V	80-94	-	6-20	-
		II/B-V	65-79	-	21-35	-
	Portlandkalkstein- zement	II/A-L	80-94	-	-	6-20
		II/B-L	65-79	-	-	21-35
	Portlandkomposit- zement	II/A-M	80-94	6-20		
		II/B-M	65-79	21-35		
III	Hochofenzement	III/A	35-64	36-65	-	-
		III/B	20-34	66-80	-	-

Es werden folgende Hauptzementarten in Österreich hergestellt:

CEM I Portlandzement

³ [http://www.zement.at/index.php/zement/zement/zementsorten-bezeichnungennormen \(/3/, letzter Zugriff 23.09.2012\)](http://www.zement.at/index.php/zement/zement/zementsorten-bezeichnungennormen (/3/, letzter Zugriff 23.09.2012))

CEM II	Portlandkompositzemente
CEM III	Hochofenzement

Die Anteile der Zumahlstoffe wird für CEM II folgendermaßen geregelt:

- A geringe Zumahlmenge ca. 6 - 20 %
- B mittlere Zumahlmenge ca. 21- 35 %

Die Anteile der Zumahlstoffe wird für CEM III folgendermaßen geregelt:

- A geringe Zumahlmenge ca. 36 - 65 %
- B mittlere Zumahlmenge ca. 68 - 80 %

In Österreich werden folgende Zumahlstoffe verwendet:

- S Hüttensand
- V kieselreiche Flugasche
- L gemahlener Kalkstein
- M Kombination aus allen Zumahlstoffen (S,V,L)

Zemente mit folgenden Festigkeitsklassen werden hergestellt:

- 32,5 Bei dieser Festigkeitsklasse sollen Druckfestigkeiten von mindesten 32,5 N/mm² und höchstens 52,5 N/mm² erzielt werden nach 28 Tagen Lagerung im Wasserbad.
- 42,5 Bei dieser Festigkeitsklasse sollen Druckfestigkeiten von mindesten 42,5 N/mm² und höchstens 62,5 N/mm² erzielt werden nach 28 Tagen Lagerung im Wasserbad.
- 52,5 Bei dieser Festigkeitsklasse sollen Druckfestigkeiten von mindesten 52,5 N/mm² und nach obenhin gibt es keinen Grenzwert. Die Prüfung findet nach 28 Tagen Lagerung im Wasserbad statt.

In der Abbildung 2-3 werden die Festigkeitsklassen erklärt:

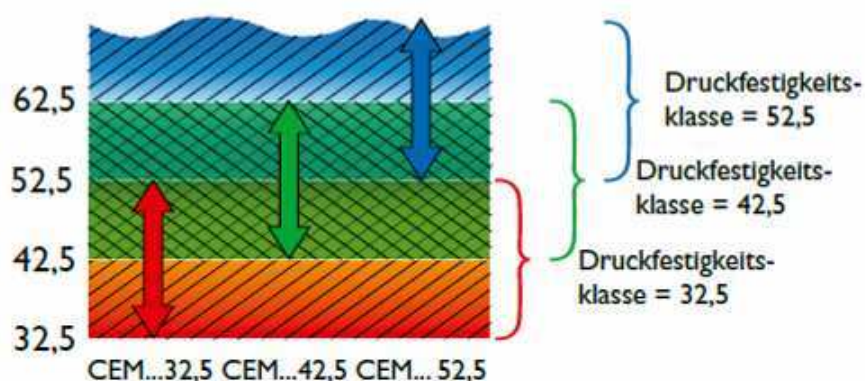


Abbildung 2-3: Darstellung einer Zementbezeichnung nach EN 197-1

Die Prüfung findet mit Mörtelprismen statt, die mit Normensand hergestellt wurden. Die befüllten Formen werden sofort mit einer Glasplatte abgedeckt und in einen Feuchteschrank bei 20° bei 90% Luftfeuchte gebracht. Ab dem nächsten Tag werden die Mörtelprismen 27 Tage

im Wasserbad gelagert und danach werden die Prismen der Druckfestigkeitsprüfung mittels hydraulischer Presse unterzogen.

Für Zemente die in Österreich hergestellt werden, gibt es 2 Frühfestigkeitsklassen:

N (Normal) Hier schreitet eine normale Frühfestigkeitsentwicklung voran.

R (Rapid) Hier schreitet eine schnelle Frühfestigkeitsentwicklung voran.

2.1.4 Wärmeentwicklungsklassen

Es kommt durch den Erhärtungsprozess zu einer chemischen Reaktion die Hydratation (chemische Verbindung mit H_2O) genannt wird, diese Wärmeentwicklung wird in J/g gemessen. Die Wärmeentwicklungsklassen werden in ÖNORM B 3327-1 geregelt. In der folgenden Tabelle 2-5 sind folgende Gruppen eingeteilt:

Tabelle 2-5: Darstellung der verwendeten Zemente in Österreich⁴

Anforderung	Bezeichnung						
	WT 27 C ₃ A - frei	WT 33 C ₃ A - frei	WT 38 C ₃ A - frei	WT 27	WT 33	WT 38	WT 42
J/g Zement nach 15 Stunden	210	260	290	210	260	290	310
C ₃ A	C ₃ A - frei	C ₃ A - frei	C ₃ A - frei				
Erstarrungsbeginn	EB 90	EB 90	EB 90	EB 90	EB 90	EB 90	EB 90
garantierte 28-Tage Biegezugfestigkeit							
garantierte 1-Tages Festigkeit	D ₁₆	D ₁₈	D ₁₁₁	D ₁₅	D ₁₆	D ₁₈	D ₁₁₁
begrenzte Schwankungsbreite Blaine	Blaine 5%	Blaine 5%	Blaine 5%	Blaine 5%	Blaine 5%	Blaine 5%	Blaine 5%
max. Blaine-Wert							
begrenzte Wasserabsonderung	WA 20	WA 20	WA 20	WA 20	WA 20	WA 15	WA 15
Zementtemperatur ab Werk [°C]	70	70	80	80	80	80	
Festigkeitsklassen im Allgemeinen	32,5 bis 42,5	32,5 bis 42,5	42,5	32,5 bis 42,5	32,5 bis 42,5	32,5 bis 42,5	42,5

Es ist anzumerken dass die Ziffern 27, 33, 38, und 42 aus der alten Norm stammen und es wurde die Wärmeentwicklung innerhalb von 24 Stunden gemessen. Der Zement durfte wenn er der Gruppe WT 27 entspricht, am nächsten Tag um 27 K durch den chemischen Prozess wärmer sein.

2.1.5 Sonderzemente:

In Österreich verwendete Sonderzemente sind:

- *C₃A-Freier Zement*: Für Sulfatangriffe (Gipswässer) wurde ein C₃A-Freier Zement entwickelt. Dieser Zement weist aufgrund des Fehlens von Trikalziumaluminat-

⁴ ÖNORM B 3327-1 Zemente gemäß ÖNORM EN 197-1 für besondere Verwendungen Teil 1: Zusätzliche Anforderung (Seite 10, /4/)

bestandteilen eine erhebliche Sulfatbeständigkeit auf. C₃A-Freier Zement weist geringere Wärmeentwicklung auf.

2.1.6 Auswahlkriterien für Zemente⁵

Die Anwendung von verschiedenen Zementen hängen von folgenden Faktoren ab:

- Bei heißer Temperatur soll Zement mit geringerer Wärmeentwicklung verwendet werden.
- Bei kühlen Temperaturen sollen Zemente mit hoher Wärmeentwicklung verwendet werden.
- Bei kurzen Ausschulfristen sollen Zemente mit rascher Festigkeitsentwicklung (R) verwendet werden.
- Bei kurzer Nachbehandlungsdauer sollen Zemente mit rascher Festigkeitsentwicklung (R) verwendet werden.
- Bei dicken Bauteilabmessungen sollen Zemente mit geringerer Festigkeitsentwicklung (L, N) verwendet werden.
- Wenn mit Sulfatangriff zu rechnen ist sollen C₃A-Freie Zemente verwendet werden.

2.2 Wasser⁶

Zugabewasser (Anforderung und Prüfung) für Beton wird in der ÖNORM EN 1008 geregelt. Ob ein Wasser prinzipiell geeignet erscheint, kann durch einfache Anhaltspunkte entschieden werden, wie z.B. Farbe, Geruch, Geschmack und das Verhalten beim Schütteln (Schaumentwicklung).

Es können daher folgende Arten von Wasser verwendet werden:

- **Trinkwasser:** Trinkwasser ist prinzipiell immer geeignet
- **Restwasser:** Restwasser darf prinzipiell verwendet werden, außer für XF4 Betone und es gibt Einschränkungen bei Sichtbeton. Es gibt noch eine weitere Einschränkung, wenn Restwasser Dichten von 1,10 kg/l – 1,20 kg/l aufweisen, dürfen diese nur max. 50% von der erforderlichen Wassermenge betragen. Wasser mit höheren Dichten dürfen nicht verwendet werden, oder mit Maßnahmen gereinigt werden.
- **Grundwasser:** Grundwasser kann in den meisten Fällen geeignet sein. Eine Prüfung über die Eignung des Grundwassers ist unbedingt erforderlich.

2.3 Fließmittel

Fließmittel wird als Betonzusatzmittel verwendet um den Wasseranspruch zu verringern. Betonzusatzmittel werden in der Stoffraumgleichung nicht berücksichtigt (Abb. 2-4), da die Menge meist sehr gering ist ≤ 50 g/kg Zement.

⁵ Betontechnologie 1 (BT1) Praxisorientierte Aus- und Weiterbildung in ganz Österreich (Seite 37, /5/)

⁶ Betontechnologie 1 (BT1) Praxisorientierte Aus- und Weiterbildung in ganz Österreich (Seite 41, /5/)

Zusatzmenge		
Betonzusatzmittel	< 50 g/kg Zement <	Betonzusatzstoffe
- Verflüssiger, Fließmittel - Verzögerer, Beschleuniger - Stabilisierer - Einpresshilfen - Luftporenbildner - Dichtungsmittel		- Puzzolane (z.B. Steinkohleflugaschen) - Silikastaub - Gesteinsmehl - Zementfarben - Kunststoffzusätze
Müssen in den Stoffraumrechnung nicht berücksichtigt werden		Müssen in den Stoffraumrechnung berücksichtigt werden

Abbildung 2-4: Übersicht über Betonzusatzmittel und Betonzusatzstoffe⁷

2.3.1 Wirkungsweise von Fließmittel

Die Wirkungsweise hängt von stofflichen und verarbeitungstechnischen Faktoren ab.

Folgende wesentliche Effekte können bei der Verwendung von Fließmittel auftreten:

- Entflockung und starke Dispergierung
- Reduzierung der Oberflächenspannung.

Der Sättigungspunkt ist jener Punkt, an dem das Fließmittel keine Auswirkung auf das Fließverhalten aufweist. Es können bei weiterer Zugabe sogar negative Effekte auftreten.

2.3.2 Entflockung und starke Dispergierung

Zementpartikel sind feine, unregelmäßige Körnchen. Die Oberfläche besteht aus einem Kristallgitter mit positiven und negativen Ladungen. Es richten sich die Einzelkörner zu Agglomeraten aus und dadurch wird Wasser eingeschlossen (Abb. 2-5).

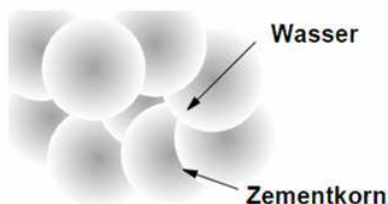


Abbildung 2-5: Darstellung der Zementkornagglomeration unter Einschluss von Wasser⁸

Fließmittel lagern sich an der Zementoberfläche ab und die agglomerierten Zementpartikel werden aufgetrennt und die Teilchen werden dispergiert. Das eingeschlossene Wasser wird frei und die Konsistenz so verfeinert (Abb. 2-6).

⁷ <http://www.unibw.de/bauv3/lehre/skripten/betonzusatzmittelbetonzusatzstoffefhm2008.pdf> (Kustermann S3, /6/, letzter Zugriff 23.09.2012)

⁸ http://www.basf-cc.at/de/Service/TechnischeDokumentation/Documents/Wirkung_von_Flie%C3%9Fmitteln_d.pdf (/7/, letzter Zugriff 23.09.2012)

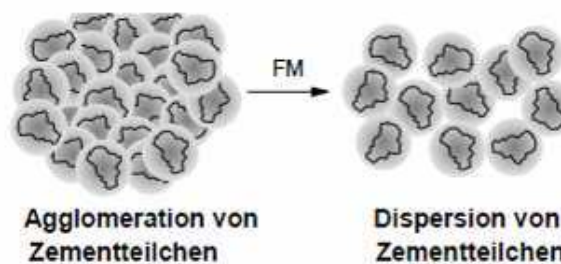


Abbildung 2-6: Darstellung der Zementkorndispersion unter frei werden von Wasser⁹

Durch die Dispergierung kann die Verarbeitung verbessert werden und der W/Z-Wert gesenkt werden.

Es gibt drei Arten von Dispergierungsvorgängen

- Elektrostatistische Dispergierung
- Sterische Dispergierung
- Elektrosterische Dispergierung.

Elektrostatistische Dispergierung

Zemente absorbieren Polymere mit negativen Seitengruppen, dadurch wird die Oberflächenladung negativ und die Partikel abgestoßen. Dieser Effekt tritt bei allen Fließmitteltypen auf. In Abbildung 2-7 ist dieser Vorgang schematisch dargestellt.

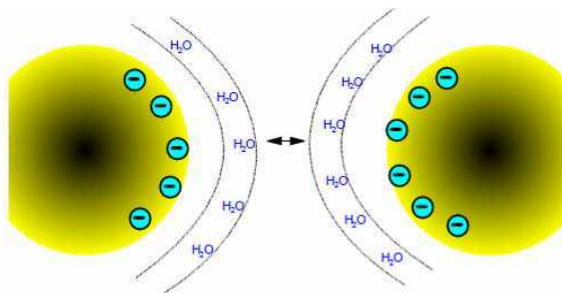


Abbildung 2-7: Elektrostatistische Dispergierung¹⁰

Sterische Dispergierung

Fließmittel umhüllen die Zementpartikel und bestehen aus elektrisch neutralen Seitenketten. Die Seitenketten sind beweglich und dadurch wird die Annäherung der Partikel verhindert. Dieser Effekt tritt bei allen Fließmitteltypen auf. In Abbildung 2-8 ist dieser Vorgang schematisch dargestellt.

⁹ http://www.basf-cc.at/de/Service/TechnischeDokumentation/Documents/Wirkung_von_Flie%C3%9Fmitteln_d.pdf (/7/, letzter Zugriff 23.09.2012)

¹⁰ http://www.basf-cc.at/de/Service/TechnischeDokumentation/Documents/Wirkung_von_Flie%C3%9Fmitteln_d.pdf (/7/, letzter Zugriff 23.09.2012)

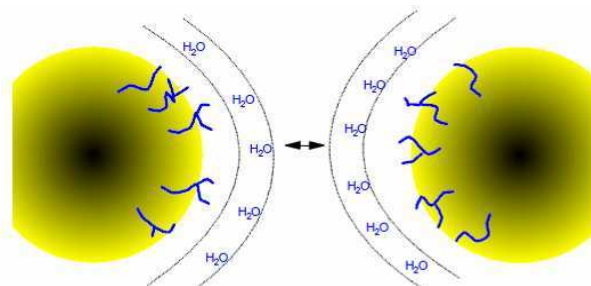


Abbildung 2-8: Sterische Dispergierung¹¹

Elektrosterische Dispergierung

Diese Art der Dispergierung ist eine Kombination von beiden Dispergierungsvorgängen (elektrostatischer und sterischer Dispergierung). Elektrosterische Dispergierung tritt nur bei Polycarboxylatether (PCE) auf und ist in Abbildung 2-9 schematisch dargestellt.

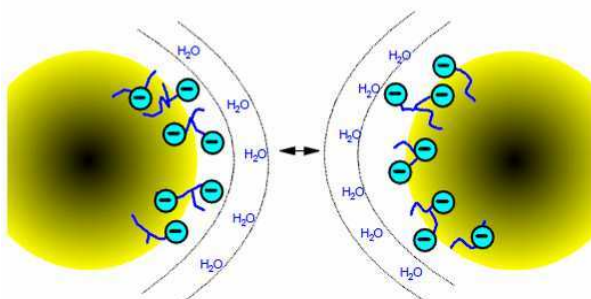


Abbildung 2-9: Elektrosterische Dispergierung¹²

2.3.3 Reduzierung der Oberflächenspannung

Grenzflächenaktive Stoffe verringern die Oberflächenspannung und die Benetzung von Bindemittel und Gesteinskörnung. Durch diesen Umstand kann der Wassergehalt reduziert werden.

In Abbildung 2-10 sind zwei Wassertropfen dargestellt. Der Wassertropfen auf der linken Seite weist weniger Adhäsion auf, als der Wassertropfen auf der rechten Seite und beschreibt die Wirkungsweise grenzflächenaktiver Stoffe.



Abbildung 2-10: Wirkungsweise grenzflächenaktiver Stoffe¹³

¹¹ http://www.basf-cc.at/de/Service/TechnischeDokumentation/Documents/Wirkung_von_Flie%C3%9Fmitteln_d.pdf (/5/, letzter Zugriff 23.09.2012)

¹² http://www.basf-cc.at/de/Service/TechnischeDokumentation/Documents/Wirkung_von_Flie%C3%9Fmitteln_d.pdf (/5/, letzter Zugriff 23.09.2012)

¹³ <http://www.unibw.de/bauv3/lehre/skripten/betonzusatzmittelbetonzusatzstoffefhm2008.pdf> (Kustermann, S5, /6/, letzter Zugriff 23.09.2012)

2.4 Arten von Fließmittel

Es gibt zahlreiche Materialien bzw. Stoffe, die als Fließmittel verwendet werden können. In der nachfolgenden Abbildung (Abb.2-11) sieht man die Wirkungsdauer von verschiedenen Fließmittel bei sofortiger Zugabe.

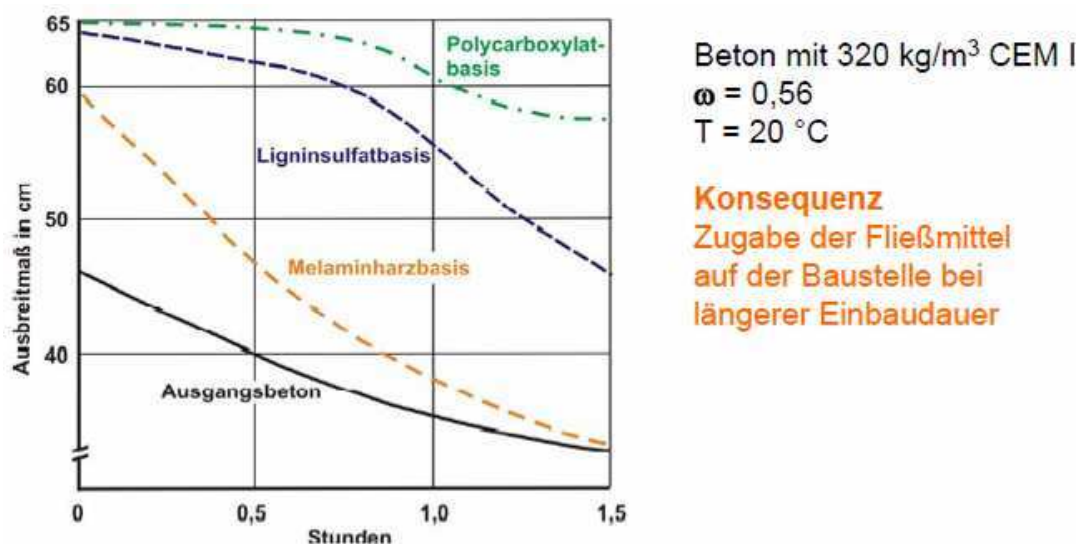


Abbildung 2-11: Wirkungsdauer von Fließmittel bei sofortiger Zugabe¹⁴

Wie wir erkennen ist die Wirkung von Fließmitteln zeitlich beschränkt, daher sollte die Zugabe erst auf der Baustelle erfolgen.

Fließmittel werden auf folgender Wirkstoffbasis hergestellt

- Ligninsulfonat
- Naphtalinsulfonat
- Melaminsulfonat
- Polycarboxylatether

Ligninsulfonat

Dieser Wirkstoff entsteht bei der Papierherstellung, die Verwendungsdauer ist unterschiedlich (ca. 15 – 30 Minuten). Es kann unter Umständen Beimischungen von anderen Fließmitteln enthalten.

Naphtalinsulfonat

Naphtalin wird durch Destillation von Steinkohleether gewonnen.

Melaminsulfonate

Melaminsulfonate sind Polymere von Melamin die durch Syntheseschritte großtechnisch hergestellt werden. Die durchschnittliche Verarbeitungsdauer ist ca. 30 min.

Polycarboxylatether

Dieses Fließmittel wird als Fließmittel der neuen Generation bezeichnet und besteht auf Basis von Polycarboxylatether.

¹⁴ <http://www.unibw.de/bauv3/lehre/skripten/betonzusatzmittelbetonzusatzstoffehm2008.pdf> (Kustermann, S7, /6/, letzter Zugriff 23.09.2012)

Polycarboxylatether besteht aus der Hauptkette des Polymers und einer angehängten Seitenkette. Die Hauptkette besteht aus einer Carboxylatgruppe, diese Gruppe besitzt elektrisch negativ geladene Moleküle.

Die angehängten Seitenketten bestehen aus Polyether. In der Abbildung 2-12 ist ein schematischer Aufbau eines Polycarboxylatethers abgebildet.

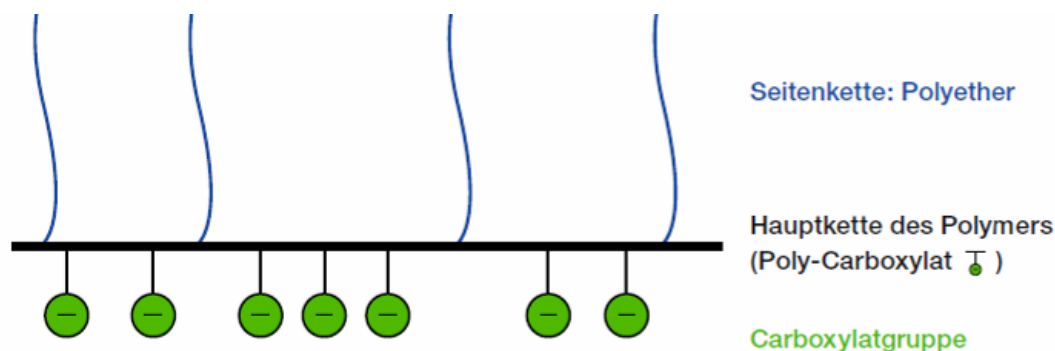


Abbildung 2-12: Schematischer Aufbau eines Polycarboxylatethers¹⁵

Es gibt hier zahlreiche Variationsmöglichkeiten, die speziell für den jeweiligen Zweck eingestellt werden können. Folgende Variationen sind möglich:

- Länge der Hauptkette
- Verhältnis der Carboxylatgruppen
- Länge der Polyetherketten

In der Tabelle 3-1 sind Zusammenhänge zwischen der Polymerstruktur und der Wirkung der PCE –Fließmittel im Beton.

Tabelle 2-6: Ausgewählte Eigenschaften von Fließmittel auf PCE - Basis¹⁶

Eigenschaft	Strukturmerkmal		
	Relative Länge der Hauptkette	Relative Länge der Seitenkette	Ladungsdichte
gute Wirksamkeit	mittel	kurz	hoch
lange Verarbeitbarkeit	sehr kurz	mittel	niedrig
gute Frühfestigkeit	kurz	lang	mittel

Die verflüssigende Wirkung ist umso höher, je mehr Carboxylatgruppen sich an den Hauptketten befinden und je kürzer die Seitenketten sind.

Die Verarbeitungsdauer steigt mit sehr kurzen Hauptketten und mittleren Seitenketten. Es müssen über den gesamten Zeitraum genügend freie absorbierbare Moleküle vorhanden sein. Aus diesem Grund ist eine höhere Dosierung erforderlich.

Eine gute Frühfestigkeit ist dann gegeben, wenn die Hauptketten kurz und die Seitenketten lang sind.

¹⁵ http://www.basf-admixtures.ch/de/publikationen/Documents/071206_ASNews_Nr1.pdf (Germann, S5, /8/, letzter Zugriff 23.09.2012)

¹⁶ http://www.basf-admixtures.ch/de/publikationen/Documents/071206_ASNews_Nr1.pdf (Germann, S5, /8/, letzter Zugriff 23.09.2012)

2.5 Zementleim¹⁷

Zementleim ist ein Gemisch aus Wasser und Zement, dessen Konsistenz stark vom Wasserzementwert (W/Z-Wert) abhängt. Der W/Z-Wert gibt das Verhältnis von Wasser zu Zement an. Die Aufgabe des Zementleimes ist die Verklebung der Gesteinskörnung.

Zementleime mit unterschiedlichen bzw. steigenden W/Z-Werten ergeben folgende Konsistenz:

- W/Z-Wert unter 0,20 ergibt eine krümelige Masse.
- W/Z-Wert von 0,20 ergibt eine erdfeuchte Masse.
- W/Z-Wert zwischen 0,20 – 0,30 ergeben einen steifplastischen Brei.
- W/Z-Wert zwischen 0,30 – 0,40 ergeben einen zähflüssigen Brei.
- W/Z-Wert zwischen 0,40 – 0,70 ergeben einen flüssigen Brei (für technische Anwendung für die Betontechnologie geeignet).
- Bei höheren W/Z-Werten nimmt der Zementleim den Charakter einer Suspension an (Injektionen zur Verfestigung von Baugrund).

Der Wasserbedarf eines Zementes hängt von der chemischen Reaktivität (Zusammensetzung) und von der Mahlfeinheit ab. Zementleim neigt aufgrund, der dreimal größeren Dichte vom Zement im Vergleich zu Wasser zum Sedimentieren. Dieser Effekt tritt bei grob gemahlenem Zement stärker auf, da die benetzbare Oberfläche geringer ist, als bei fein gemahlenem Zement.

Zementleim erhärtet zu Zementstein, dieser chemische Vorgang erfolgt exotherm und wird Hydratation genannt. Abbildung 2.13 zeigt die Erhärtung von Zementen bei verschiedenen W/Z-Werten.

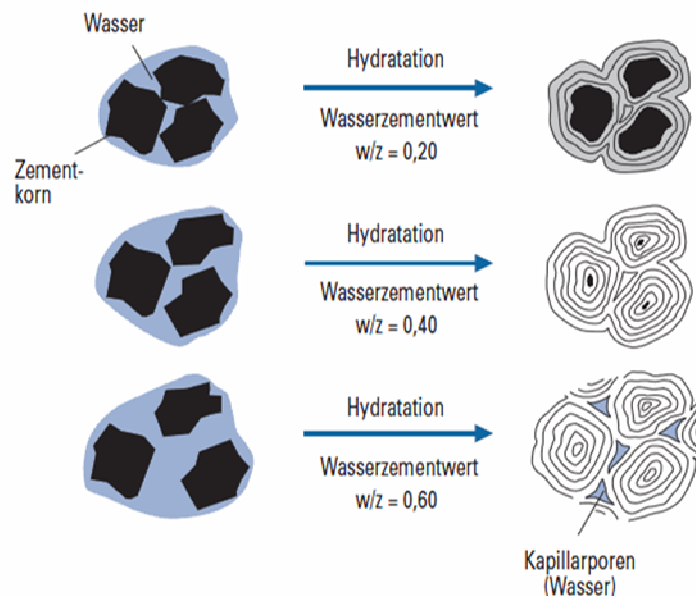


Abbildung 2-13: Schematische Darstellung der Erhärtung von Zementen bei unterschiedlichen W/Z-Werten¹⁸

¹⁷ http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/KompendiumZementBeton/1-4_Hydratation.pdf (S17, /9/, letzter Zugriff 23.09.2012)

¹⁸ http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/KompendiumZementBeton/1-4_Hydratation.pdf (S21, /9/, letzter Zugriff 23.09.2012)

Eine vollständige Hydratation wird bei einem W/Z-Wert von 0,40 erzielt, wenn weniger Wasser vorhanden ist, dann hydratisiert der Zement nicht vollständig. Bei einem größeren W/Z-Wert werden Kapillarporen gebildet, die folgende Auswirkungen haben:

- Geringere Festigkeit
- Geringere Dichtheit
- Geringere Beständigkeit
- Geringerer Korrosionsschutz.

3 Rheologie¹⁹

Unter Rheologie versteht man die Lehre vom (zeitabhängigen) Deformations- und Fließverhalten von Stoffen und Flüssigkeiten unter Scherbeanspruchung.

3.1 Modelle²⁰

Es gibt verschiedene Modelle zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens von Flüssigkeiten:

- *Newton-Modell*
- *Bingham-Modell*
- *Herschel-Bulkley-Modell*.

In der Abbildung 3-1 ist ein qualitativer Verlauf von häufigen Fließfunktionen dargestellt.

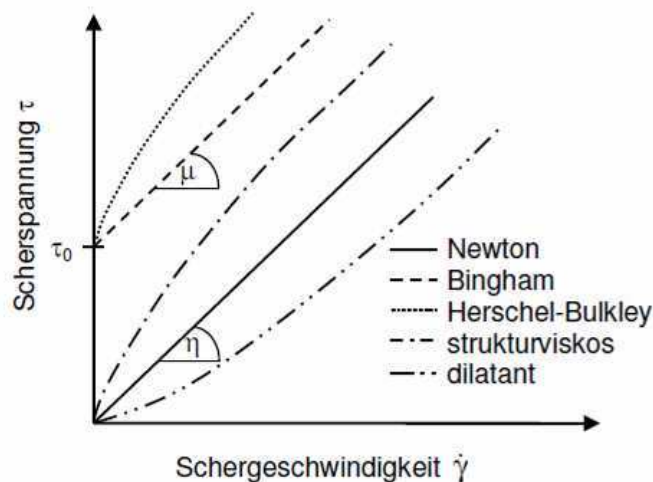


Abbildung 3-1: Qualitativer Verlauf von Fließfunktionen²¹

Das *Newton-Modell* (ideal-viskos) und das *Bingham-Modell* (ideal-plastisch) bestehen durch ihre Einfachheit in der Anwendung und in der mathematischen Beschreibung. Für die Zwecke der Diplomarbeit sind diese ausreichend. Zementleime mit höheren Fließmittelgehalten neigen

¹⁹ Skriptum Sonderbetone (Schneider, S2, /10/)

²⁰ Skriptum Sonderbetone (Schneider, S21ff, /10/)

Zur Rheologie und physikalischen Wechselwirkung bei Zementsuspensionen (Haist, S33 ff, /11/)

²¹ digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/1535187 (Frischbetondruck unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften (Beitzel, S10, /12/, letzter Zugriff 23.09.2012))

zu dilatanten Verhalten, dies wurde auch in den Versuchen festgestellt (siehe Abschnitte Vorversuche und Hauptversuche).

3.1.1 *Newton-Modell und Anwendung im Bauwesen*

Beim *Newton-Modell* benötigt man zur Beschreibung des Modells eine einzige Eingangsgröße die Viskosität η .

Die mathematische Formulierung ist in Formel 1 ersichtlich:

$$\tau = \eta \times \gamma \quad (1)^{22}$$

τ = Scherspannung [Pa]

η = Scherviskosität [Pas]

γ = Schergeschwindigkeit [s^{-1}]

In Abbildung 3-2 ist eine qualitative Darstellung der Fließfunktion nach *Newton* dargestellt.

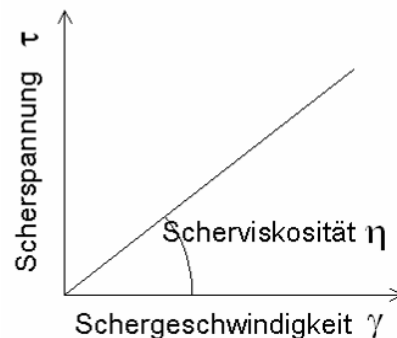


Abbildung 3-2: Qualitativer Verlauf von der Fließfunktion nach *Newton*²³

Im Bauwesen wird das *Newton-Modell* im Grundbau bei „schmutzigen Wässern“ angewendet. Schmutzige Wässer sind Suspension mit einem W/Z-Wert von 2. Für die Herstellung von SCC (Self compacting concrete) wird auch gefordert, dass der Zementleim (Zement und Wasser) keine Fließgrenze aufweist. Hoch viskose Öle gehören auch zu dem *Newton'schen* Flüssigkeiten und werden z.B. zum Kalibrieren des Rheometers verwendet.

Man spricht hier von ideal-viskosen Fließverhalten.

3.1.2 *Bingham-Modell und Anwendung im Bauwesen*

Beim *Bingham-Modell* benötigt man zur Beschreibung des Modells zwei Kenngrößen, die Viskosität η und die Fließgrenze τ_0 .

Die Fließgrenze einer Suspension gibt an, welche Mindestscherspannung überschritten werden muss, dass eine Flüssigkeit zu fließen beginnt. Bei Scherbeanspruchungen unterhalb der Fließgrenze verhält sich die Flüssigkeit wie ein Festkörper und es sind die Regeln der Mechanik anzuwenden.

Die mathematische Formulierung ist in Formel 2 ersichtlich:

²² Skriptum Sonderbetone (Schneider, S21, /10/)

²³ Skriptum Sonderbetone (Schneider, S21, /10/)

$$\tau = \eta \times \gamma + \tau_0 \quad (2)^{24}$$

τ = Scherspannung [Pa]
 τ_0 = Fließgrenze [Pa]
 η = Scherviskosität [Pas]
 γ = Schergeschwindigkeit [s^{-1}]

In Abbildung 3-3 ist eine qualitative Darstellung der Fließfunktion nach *Bingham* dargestellt.



Abbildung 3-3: Qualitativer Verlauf von der Fließfunktion nach Bingham²⁵

Im Bauwesen sind einige Suspensionen wie Zementleim, Putz, Mörtel und Beton *Bingham'sche* Flüssigkeiten. Beispiele finden sich in Abbildung 3-4. Sie besitzen eine ausgeprägte Fließgrenze, die Steigung der Geraden gilt als Maß für die dynamische Viskosität. Man spricht hier von einem ideal-plastischen Fließverhalten.

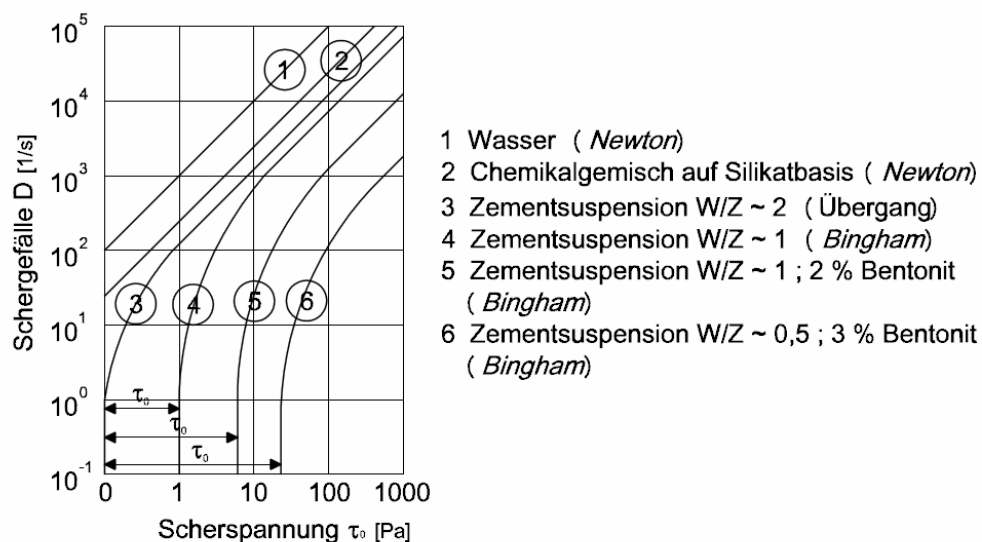


Abbildung 3-4: Verlauf von Suspensionen im Bauwesen²⁶

²⁴ Skriptum Sonderbetone (Schneider, S21, /10/)

²⁵ Skriptum Sonderbetone (Schneider, S21, /10/)

²⁶ Skriptum Baugrund und Injektionen (Breit, /13/)

3.2 Prüfmethoden

Folgende Prüfmethoden stehen für die Beschreibung des Zementleims zur Verfügung:

- Setzversuch
- *Vicat*
- Auslaufversuch
- Rheometer.

3.2.1 Setzversuch

Der Setzversuch ist ein punktueller Versuch, der das Verhalten einer Flüssigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreibt. Es wird der Beton oder Zementleim in eine Form (Abb. 3-5) eingefüllt und danach der Trichter gezogen und das Setzmaß gemessen.

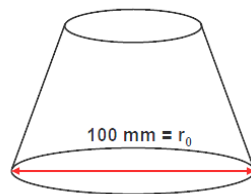


Abbildung 3-5: Hägermann-Trichter²⁷

3.2.2 Vicat-Versuch

Der Versuch wird mit einer Nadel durchgeführt, die in die Zementleimprobe eintaucht (Abbildung 3-6). Der Versuch ist nach EN 196 geregelt.



Abbildung 3-6: Vicat-Nadelgerät²⁸

Beim *Vicat*-Versuch wird folgendes gemessen:

- Normensteife V_0
- Erreichen der Viskosität V_A (Erstarrungsbeginn)
- Erreichen der Viskosität V_E (Erstarrungsende).

²⁷ http://www.basf-cc.at/de/Service/TechnischeDokumentation/Documents/SCC_pannenfrei.pdf (Strobel, S18, /14/, letzter Zugriff 23.09.2012)

²⁸ http://www.testing.de/prospekte/vicat_nadelgeraete.pdf (/15/, letzter Zugriff 23.09.2012)

Die Viskositätsänderung zwischen V_0 und der Zeit V_A (kurze Zeit vor dem Erstarrungsbeginn) wird als Ansteifen bezeichnet. Zwischen V_A und V_E wird die Viskositätsänderung Erstarren genannt und die Viskositätsänderung die über V_E hinausgeht wird als Erhärten bezeichnet (siehe Abb. 3-7).

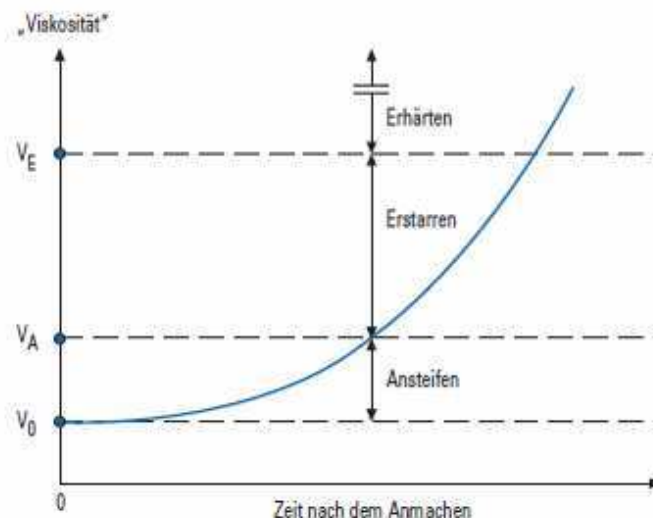


Abbildung 3-7: Definition von Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zement²⁹

3.2.3 Auslaufversuch³⁰

Mit Hilfe des Auslaufversuchs wird angestrebt die Viskosität des Mörtels einzustellen. Hierbei wird die Zeit gemessen die ein Mörtel benötigt, um den Strang des Trichters zu durchlaufen. In Abbildung 3-8 ist der Auslauftrichter dargestellt.

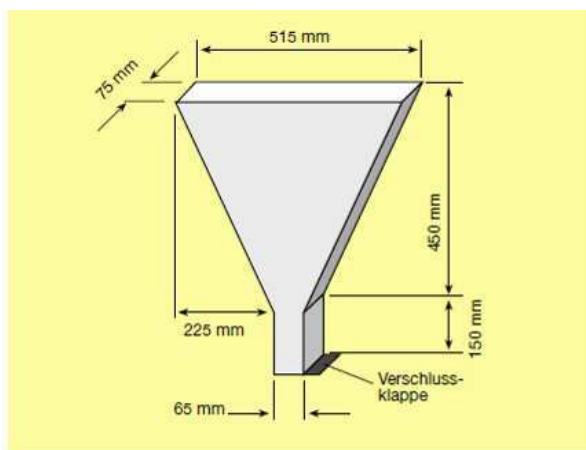


Abbildung 3-8: Auslauftrichter

²⁹ http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/KompodiumZementBeton/1-5_Bautechn_Eigensch.pdf (S21, /16/, letzter Zugriff 23.09.2012)

³⁰ Skriptum Sonderbetone (Schneider, S70, /10/)

3.2.4 Rheometrie³¹

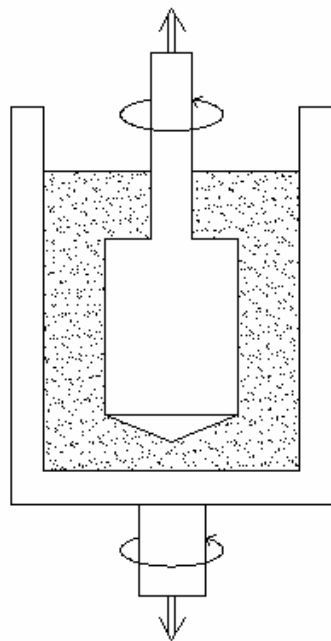
Bei einem Rheometer (rotierend wie bei den Rotationsviskosimetern) wird entweder die Winkelgeschwindigkeit oder das Drehmoment vorgegeben.

Es gibt 3 verschiedenen Messsysteme für Rotationsrheometer (siehe Abbildung 3-9).

- Koaxiale Messsysteme mit engem Spalt können für Substanzen angewendet werden, die in diesen Spalt fließen können. Die Homogenität der Probe muss gleichartig sein.
- Kegel-Platte Messsysteme sind geeignet für hochviskose Substanzen, es werden bei diesen Systemen sehr geringe Prüfmengen verwendet
- Platte-Platte Messsysteme können pastöse Substanzen messen.

Koaxiale Zylinder

Drehmoment-Messung
Meßantrieb (Searl-System)



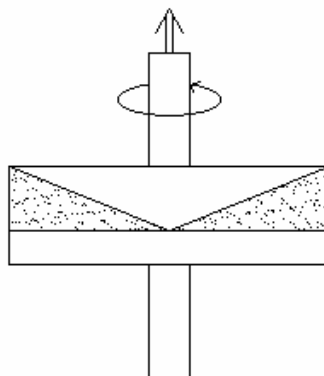
Meßantrieb (Couette-System)



Prüfgut

Kegel-Platte Rheometer

Drehmoment-Messung
Meßantrieb



Platte-Platte Rheometer

Drehmoment-Messung
Meßantrieb

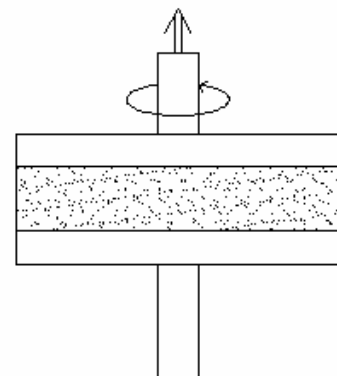


Abbildung 3-9: Messsysteme von Rotationsrheometer³²

Das Gerät welches bei den Versuchen verwendet wurde, war ein Roationsrheometer mit ko-axialem Zylinder-Messsystem, daher wird dieser Typ genauer beschrieben.

³¹ Optimierung der gerätetechnischen Messparameter zur systematischen Bestimmung der Verarbeitungseigenschaften von Zementmörtel mittel Viskomat NT (Falter, S 34, /17/)

³² [http://rheologie.homepage.t-online.de/mess.html#m1d \(/18/, letzter Zugriff 23.09.2012\)](http://rheologie.homepage.t-online.de/mess.html#m1d (/18/, letzter Zugriff 23.09.2012))

Bei der Drehmomenterfassung gibt es zwei verschiedenen Möglichkeiten:

- *Couette*-System: Der innere Zylinder wird festgehalten, der äußere Zylinder rotiert.
- *Searle*-System: Der innere Zylinder rotiert, der äußere Zylinder wird festgehalten.

***Couette*-System³³**

Der innere Zylinder wird mit der Probensubstanz befüllt, danach wird die Probe in den äußeren Zylinder eingesetzt und mit steuerbarer Umdrehungsgeschwindigkeit in Bewegung gebracht. Der Rührer ist stationär angebracht, durch die Geometrie des Rührers wird eine komplexe Strömung in die Probensubstanz eingebracht. Der Geschwindigkeitsgradient nimmt von außen nach innen ab. Der Widerstand wird als Moment in der Rührerachse abgenommen. Rührer und Messtopf befinden sich in einer Achse, daher spricht man von koaxialem Messsystem.

***Searle*-System³⁴**

Bei diesem System rotiert der Rührer und der äußere Zylinder wird festgehalten. Der Geschwindigkeitsgradient nimmt von innen nach außen ab. Bei geringen Umdrehungsgeschwindigkeiten entsteht eine laminare Strömung, wenn die Geschwindigkeit erhöht wird entstehen Wirbel aufgrund der Zentrifugalkräfte. Diese Wirbel werden *Taylor*-Wirbel genannt und sollten kompensiert werden, um eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen.

Durch die Komplexität der Strömung können nur relative Größen beschrieben werden und keine absoluten physikalischen Größen. Die Fließkurve eines *Bingham*-Körpers wird mathematisch in Formel 3 beschrieben:

$$T = h \times N + g \quad (3)^{35}$$

T = Drehmoment [Nm]

g = relative Fließgrenze [Nm]

h = relative Viskosität [Nms]

N = Drehzahl[s⁻¹]

Bei einem *Newton'schen* Körper erfolgt die Berechnung mathematisch analog wie bei einem *Bingham'schen* Körper nur die relative Fließgrenze wird weggelassen und die Gerade verläuft durch den Ursprung (siehe Abb.6-2 und Abb.6-3).

3.2.5 Verhalten des Zementleimes unter Scherbeanspruchung³⁶

Prinzipiell tritt bei einem System das oberhalb der Fließgrenze belastet wird ein Strukturbruch auf. Wenn sich ein System in Ruhe befindet (kurz nach dem Einbau) tritt ein hoher Anfangswiderstand auf. Durch die Zerstörung des Gefüges (Agglomerate) fällt der Scherwiderstand bei konstanter Scherbeanspruchung (Bereich 1) exponentiell auf einen bestimmten Wert herab und verbleibt einige Zeit konstant auf diesen Wert (Bereich 2). In Folge der chemischen Pro-

³³ Optimierung der gerätetechnischen Messparameter zur systematischen Bestimmung der Verarbeitungseigenschaften von Zementmörtel mittel Viskomat NT (Falter, S 40, /17/)

³⁴ http://www.psl-systemtechnik.de/viscometry_site_knowledge.html (/19/, letzter Zugriff 23.09.2012)

³⁵ Optimierung der gerätetechnischen Messparameter zur systematischen Bestimmung der Verarbeitungseigenschaften von Zementmörtel mittel Viskomat NT (Falter, S 40, /17/)

³⁶ Optimierung der gerätetechnischen Messparameter zur systematischen Bestimmung der Verarbeitungseigenschaften von Zementmörtel mittel Viskomat NT (Falter, S 19, /17/)

zesse im Zementleim (Hydratation) kommt es im Bereich 3 zu einem Anstieg. Das Verhalten ist in Abb. 3-10 ersichtlich.

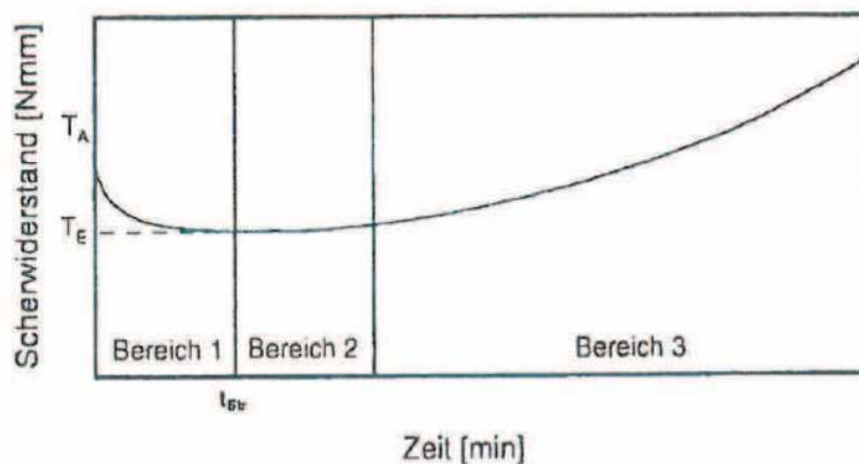


Abbildung 3-10: Scherwiderstand infolge konstanter Belastung³⁷

Für hohe W/Z-Werte geht die Fließgrenze gegen Null und die dynamische Viskosität nimmt ab und nähert sich der von Wasser an (Neigung der Geraden wird flacher).

Für niedrige W/Z-Werte steigt die Fließgrenze und die dynamische Viskosität (Neigung der Geraden wird steiler).

Mit Hilfe der Fließmitteldosierung kann man die Fließgrenze steuern. Je höher der Fließmittelgehalt desto geringer wird die Fließgrenze (siehe Abb. 3-11).

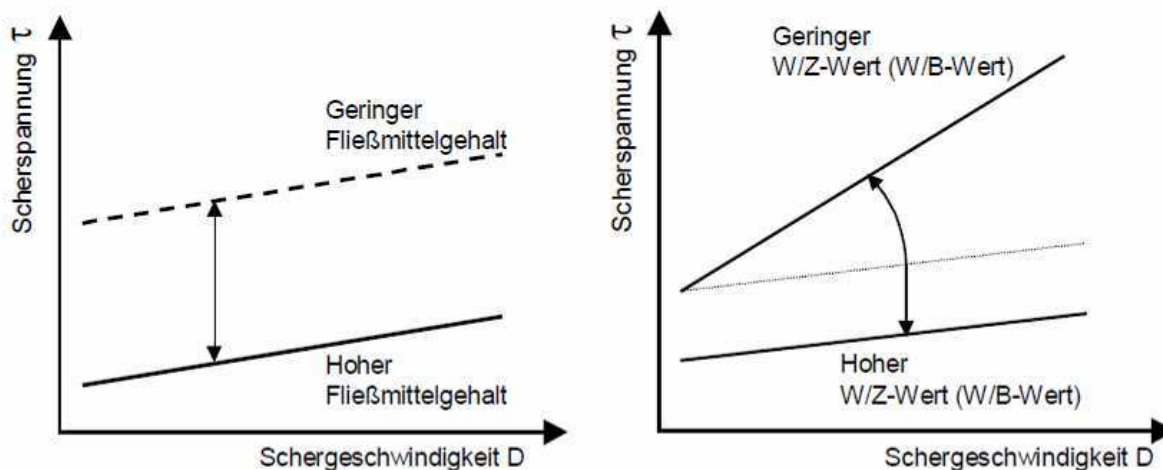


Abbildung 3-11: Fließkurven unterschiedlicher Zusammensetzung³⁸

³⁷ Optimierung der gerätetechnischen Messparameter zur systematischen Bestimmung der Verarbeitungseigenschaften von Zementmörtel mittel Viskomat NT, (Falter, S 20, /17/)

³⁸ Skriptum Sonderbetone (Schneider, S26, /10/)

4 Messeinrichtungen und Vorversuche

Folgende Utensilien wurden bei der Herstellung der Versuche verwendet:

- Messbecher
- Waage
- Mörtelmischer
- Viskomat NT

4.1 Viskomat NT³⁹

Der Viskomat NT besteht aus einem mechanischen Teil und einem elektronischen Teil.

Mechanischer Teil

Der mechanische Teil besteht aus einem Aluminiumsockel. Am hinteren Ende des Sockels befindet sich ein Stab, der als Linearführung dient. An der Linearführung ist der Messkopf befestigt. Im Messkopf ist der Drehmomentsensor angeordnet und das Paddel eingespannt. Der mechanische Teil kann nur über einen PC angesteuert werden. In Abbildung 4-1 ist der Viskomat NT mit Ausstattung zu sehen



Abbildung 4-1: Viskomat NT – Rheometer für Mörtel und Leim

Es gibt verschiedene Arten von Paddel. In dieser Arbeit wurde ein Zementleimpaddel verwendet (Abb. 4-2).



Abbildung 4-2: Zementleimpaddel (links) und Mörtelpaddel (rechts)

³⁹ http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Rheologie:Viskomat_NT_-_Rheometer_f._M%F6rtel_und_Leim/20/ (letzter Zugriff 23.09.2012)

Elektronischer Teil

Das Drehmoment, das sich im Versuch (abhängig vom Prüfgut und der Geschwindigkeit [U/min]) einstellt wird von einem Drehmomentsensor elektronisch gemessen. Zusätzlich ist im Paddel auch ein Temperatursensor integriert. Die Messergebnisse werden im Gerät lokal gespeichert und nach dem Versuch zum PC übertragen. Ein Versuch kann während der Messung grafisch dargestellt und mitverfolgt werden. Die Messgrößen die gemessen werden, sind Temperatur, Drehmoment, Drehzahl und Zeit.

4.2 Vorversuche

Bei den Vorversuchen wurden folgende Themen behandelt:

- Mischzeit
- Fahrweise
- W/Z-Wert
- Genauigkeit der Versuche
- Verhalten von unterschiedlichen Zementen
- Verhalten von Fließmittel auf den Zementleim

4.2.1 Mischzeit

Bei den Versuchen wurde die Mischzeit mit dem Mörtelmischer zwischen 90 sec, 120 sec, 150 sec und 180 sec variiert. Es stellte sich bei der augenscheinlichen Begutachtung heraus, dass die beste Durchmischung bei 90 sec gegeben war. Die Mischzeit hat auf das Ergebnis kaum Auswirkung (siehe Abbildung 4-3). Die hergestellten Zementleime haben eine W/Z-Wert von 0,4.

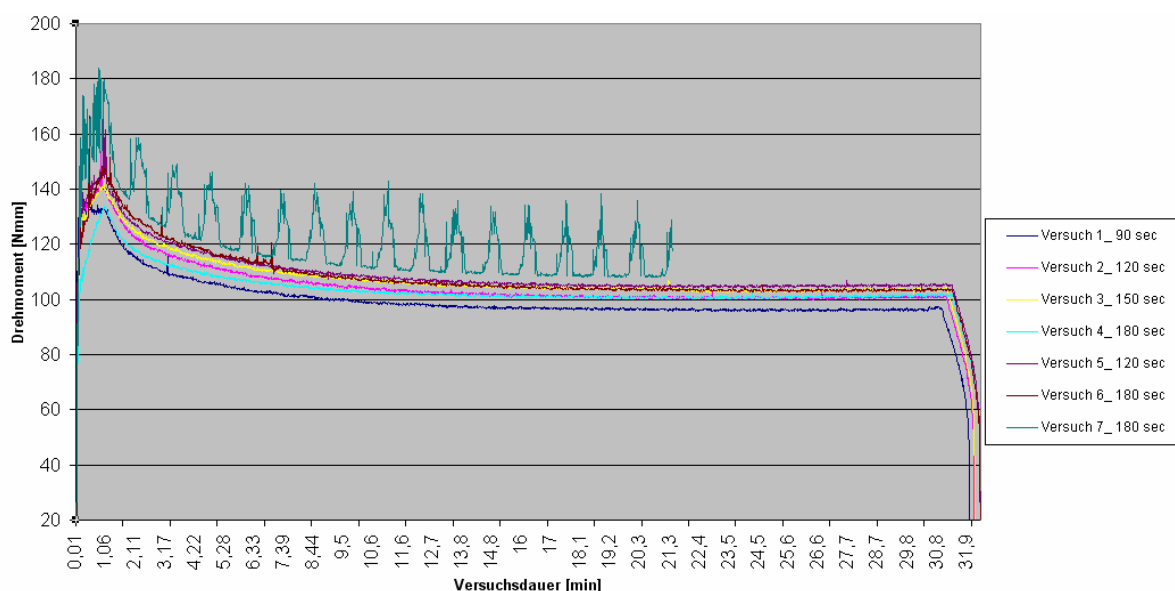


Abbildung 4-3: Versuche mit unterschiedlicher Mischzeit

Beim Versuch 7 sind zyklische Zacken, die durch ein inhomogenes Materialgefüge beim Mischen und /oder beim Befüllen des Behälters mit Zementleim entstanden sind.

4.2.2 Fahrweise

Versuchsdauer 120 min

Bei der Fahrweise wurde zu Beginn ein Versuch mit 120 min durchgeführt um überhaupt einen Anhaltspunkt zu bekommen, wie die Probe reagiert bzw. ob die in der Literatur beschriebenen drei Bereiche wirklich in dieser Form vorhanden sind. Das Ergebnis ist in Abbildung 4-4 dargestellt. Für den W/Z-Wert wurde 0,4 gewählt, die Fahrweise des Versuches war stufenweise:

- 1 min Beschleunigen auf 120 U/min
- 120 min Geschwindigkeit auf 120 U/min konstant lassen
- 1 min Abfahren auf 0 U/min

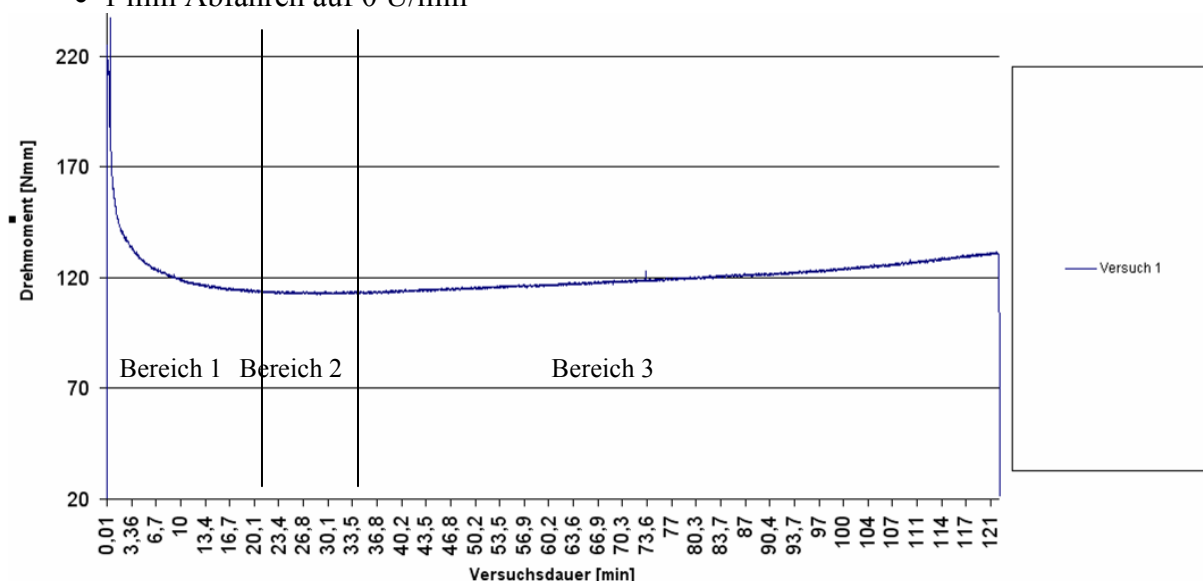


Abbildung 4-4: Versuch mit einer Versuchsdauer von 120 min

Die in der Literatur beschriebenen drei Bereiche treten deutlich beim Versuch (Abb. 3-10 und Abb. 4-4) auf. Aus diesem Grund kann die Versuchsdauer auf 20 bis 30 min verkürzt werden, dies spiegelt den konstanten Bereich wieder.

Aus auswertungstechnischen Gründen wurde der Rampenfahrweise der Vorzug gegeben.

Versuchsdauer 30 min

Bei diesem Versuch wurde eine Rampenfahrweise gewählt:

- 1 min Beschleunigen auf 120 U/min
- 30 min Geschwindigkeit auf 120 U/min konstant lassen
- 1 min Abfahren auf 0 U/min

Bei diesem Versuch konnte man erkennen dass, eine Versuchsdauer zwischen 15 und 20 min ausreichend ist (Abbildung 4-5). Bei den weiteren Vorversuchen wurde 15 min gewählt und bei den Hauptversuchen 20 min.

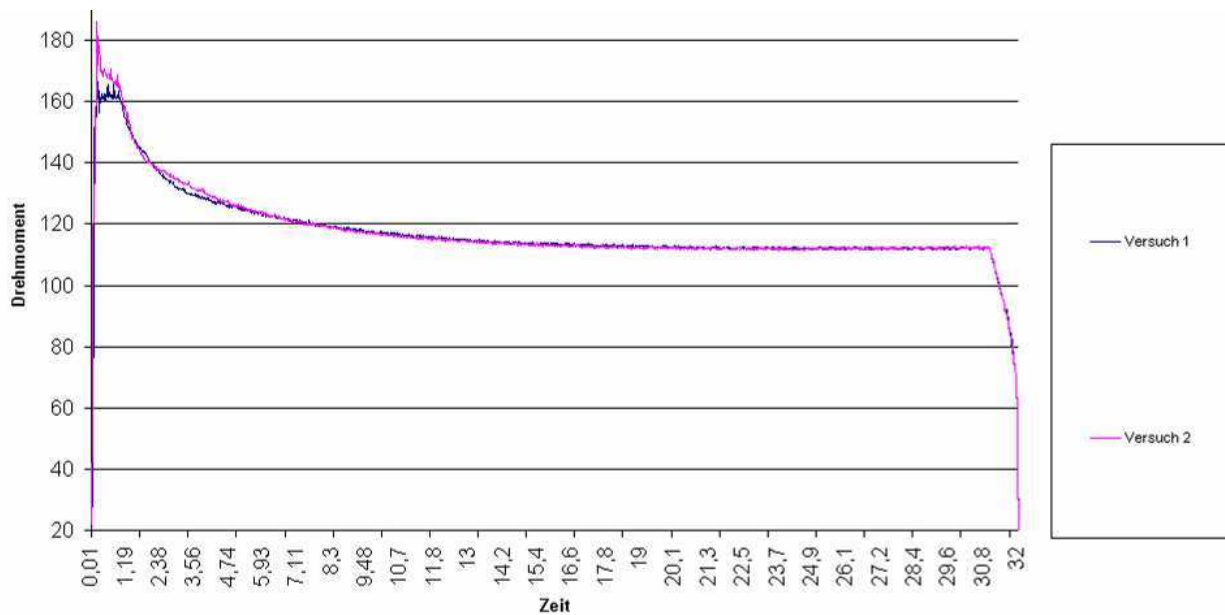


Abbildung 4-5: Versuche mit einer Versuchsdauer von 30 min, W/Z-Wert = 0,4

Versuchsdauer 20 min mit 2 Variation

Fahrweise A und Fahrweise B sind in Abbildung 4-6 ersichtlich. Bei beiden Versuchen wurde eine Rampenfahrweise gewählt. Die hergestellten Zementleime haben eine W/Z-Wert von 0,4.

Die Fahrweise bei Variante A ist folgende:

- 1 min Beschleunigen auf 120 U/min
- 10 min Geschwindigkeit auf 120 U/min konstant lassen
- 1 min Abfahren auf 0 U/min und 1 min Pause
- 1 min Beschleunigen auf 120 U/min
- 2 min Geschwindigkeit auf 120 U/min konstant lassen
- 1 min Abfahren auf 0 U/min und 1 min Pause
- 1 min Beschleunigen auf 120 U/min
- 2 min Geschwindigkeit auf 120 U/min konstant lassen
- 1 min Abfahren auf 0 U/min

Die Fahrweise bei Variante B ist folgende:

- 1 min Beschleunigen auf 120 U/min
- 21 min Geschwindigkeit auf 120 U/min konstant lassen
- 1 min Abfahren auf 0 U/min

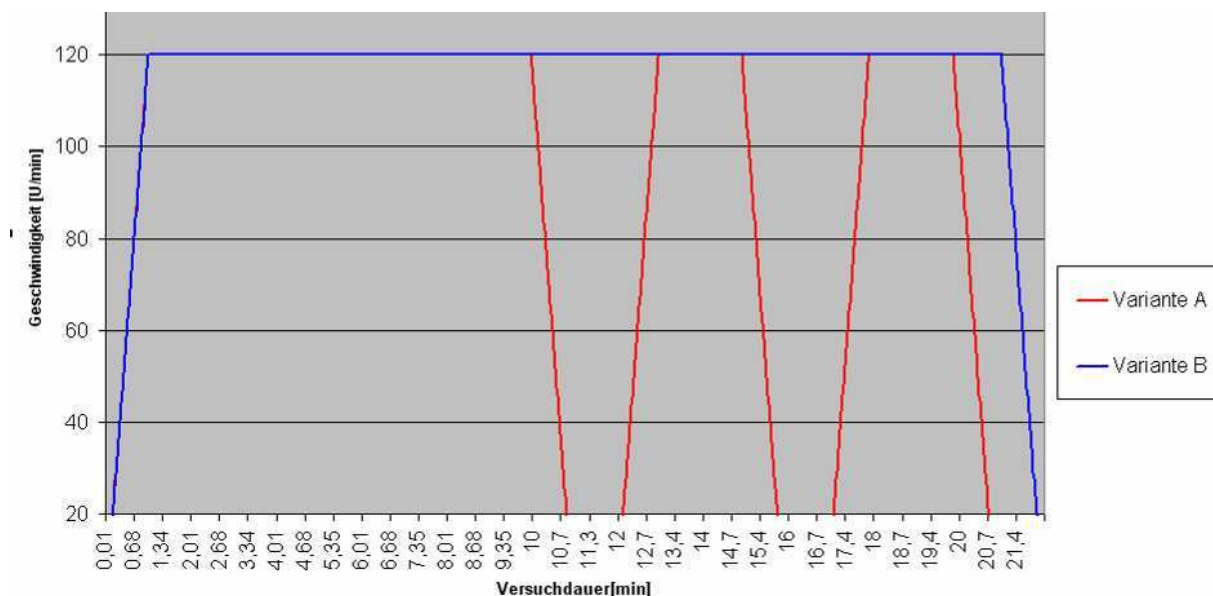


Abbildung 4-6: Fahrweise A und B und die Versuchsdauer

In Abbildung 4-7 ist das Ergebnis von Fahrweise A und Fahrweise B ersichtlich.

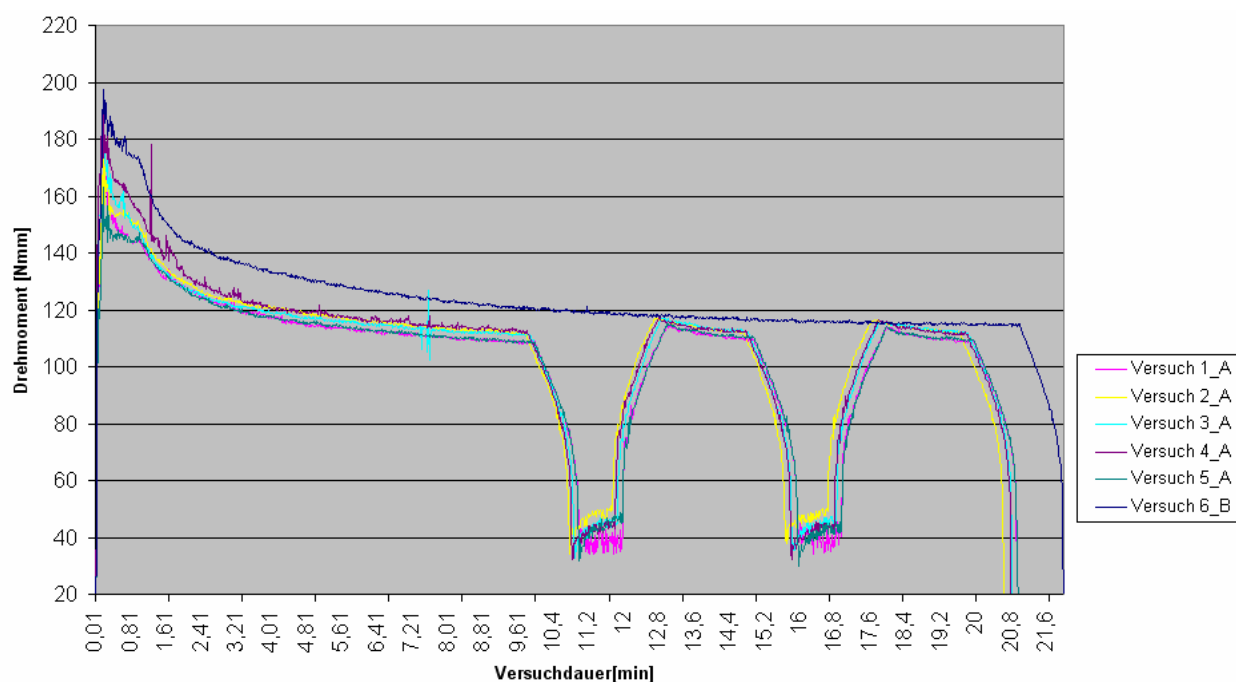


Abbildung 4-7: Versuchsergebnisse mit Fahrweise A und B

Man kann erkennen, dass die Fahrweise eine untergeordnete Rolle spielt (Abb. 4-7). Es kommt vielmehr auf die Randbedingungen an, wie Homogenisierungsgrad des Zementleimes im Mörtelmischer, realer Wassergehalt (Restwasser im Messbecher), Homogenisierung des Zementes.

Für die Hauptversuche wurde Fahrweise A verwendet, damit man einen konstanten Verlauf über den Versuchszeitraum betrachten kann und aus Gründen der Vergleichbarkeit.

4.2.3 W/Z-Wert⁴⁰

Der Wasserzementwert ist für die Durchführung der Versuche von zentraler Bedeutung. Aus der Literatur (z.B. Banfill 1990) ist bekannt dass höhere W/Z-Werte geringere Drehmomente und geringere W/Z-Werte höhere Drehmomente verursachen. Diese Feststellung ist in Abbildung 4-8 ersichtlich. Es zeigte sich, dass der optimale Homogenisierungsgrad der Zementleime mit einem W/Z-Wert von 0,4 erzielt wird.

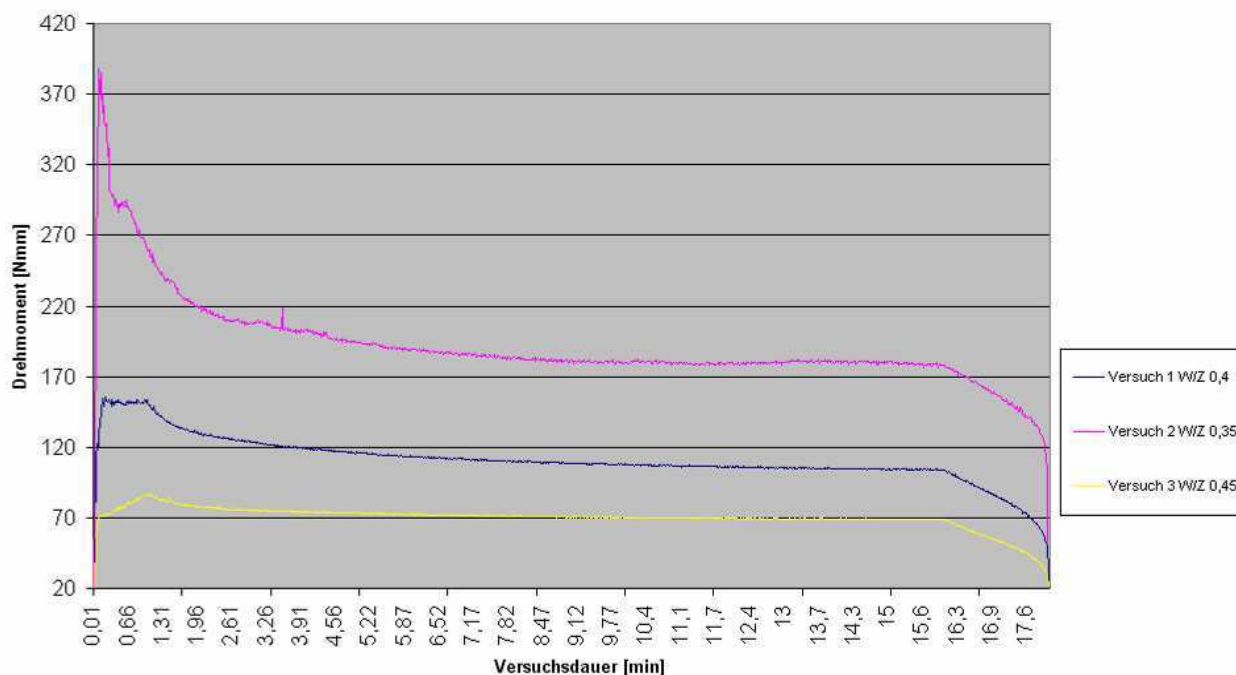


Abbildung 4-8: Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen W/Z – Werten

Man kann deutlich erkennen, dass bei einem W/Z-Wert von 0,35 am Anfang ein sehr hohes Drehmoment auftritt und dies lässt auf eine Einregelung des Gefüges schließen.

4.2.4 Genauigkeit der Versuche

Die Reproduzierbarkeit der Versuche und welche Genauigkeit erreicht wird, wurde mit Hilfe einer mehrmaligen Wiederholung der Versuche untersucht. Es wurden 16 Versuche durchgeführt und beim letzten Wert, bei 120 U/min ausgewertet (roter Kreis). In Abbildung 4-9 sieht man, dass Zementleime bei gleicher Zementart, Mischzeit, W/Z-Wert und Versuchsfahrprogramm ein nahezu identes Materialverhalten aufweist. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-1 ersichtlich:

⁴⁰ Rheology of Fresh cement and Concrete, (Banfill, S11, /21/)

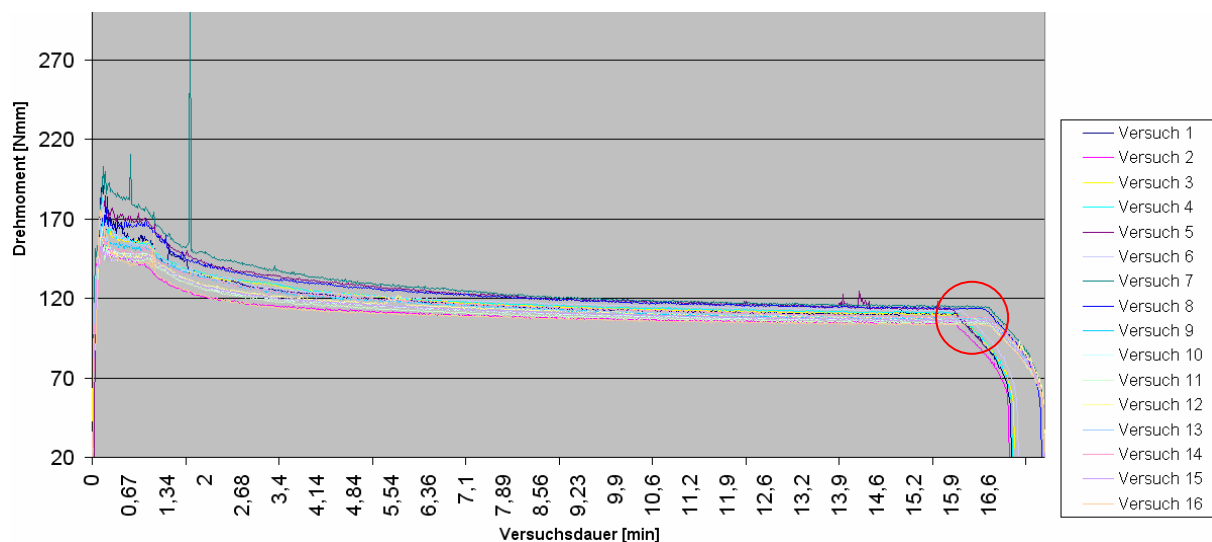


Abbildung 4-9: Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen W/Z – Werten

Tabelle 4-1: Darstellung der Einzelergebnisse mit Mittelwert und Varianz

Versuche	Drehmoment bei der letzten gemessenen Umdrehungszahl von 120 U/min	Mittelwert	Varianz
1	114,62 Nmm	108,67 Nmm	3,46
2	113,02 Nmm		
3	110,48 Nmm		
4	105,03 Nmm		
5	110,14 Nmm		
6	110,77 Nmm		
7	112,86 Nmm		
8	112,36 Nmm		
9	107,39 Nmm		
10	105,69 Nmm		
11	104,57 Nmm		
12	107,68 Nmm		
13	107,49 Nmm		
14	107,84 Nmm		
15	105,72 Nmm		
16	102,99 Nmm		

Man kann erkennen (siehe Tabelle 4-1), dass es sich um ein gut reproduzierbares Verfahren handelt da die Varianz bei 3,46 % liegt (bei 16 Wiederholungen).

4.2.5 Verhalten von verschiedenen Zementarten

Bei dieser Versuchsreihe wurden unterschiedliche Zemente mit dem Rheometer untersucht (siehe Abbildung 4-10):

- CEM I 32,5 R
- CEM I 42,5 R
- CEM I 52,5 R
- CEM III B 32,5 R

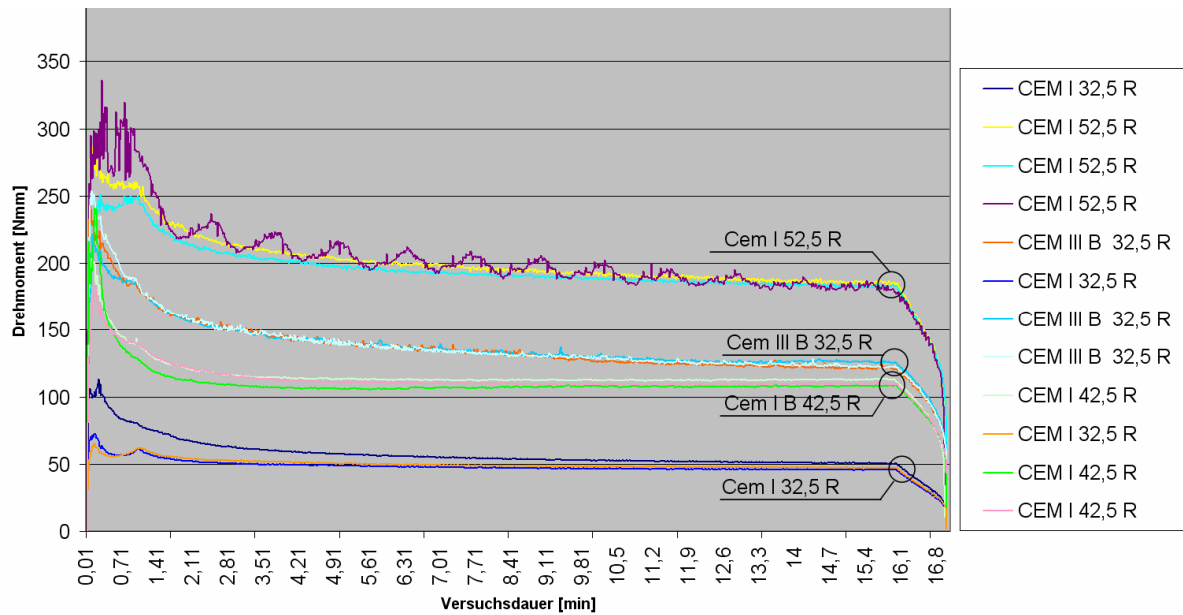


Abbildung 4-10: Versuchsergebnisse (Drehmoment) mit unterschiedlichen Zementarten

In diesem Zusammenhang ist auch das Temperaturverhalten der Zemente von Interesse. (siehe Abbildung 4-11).

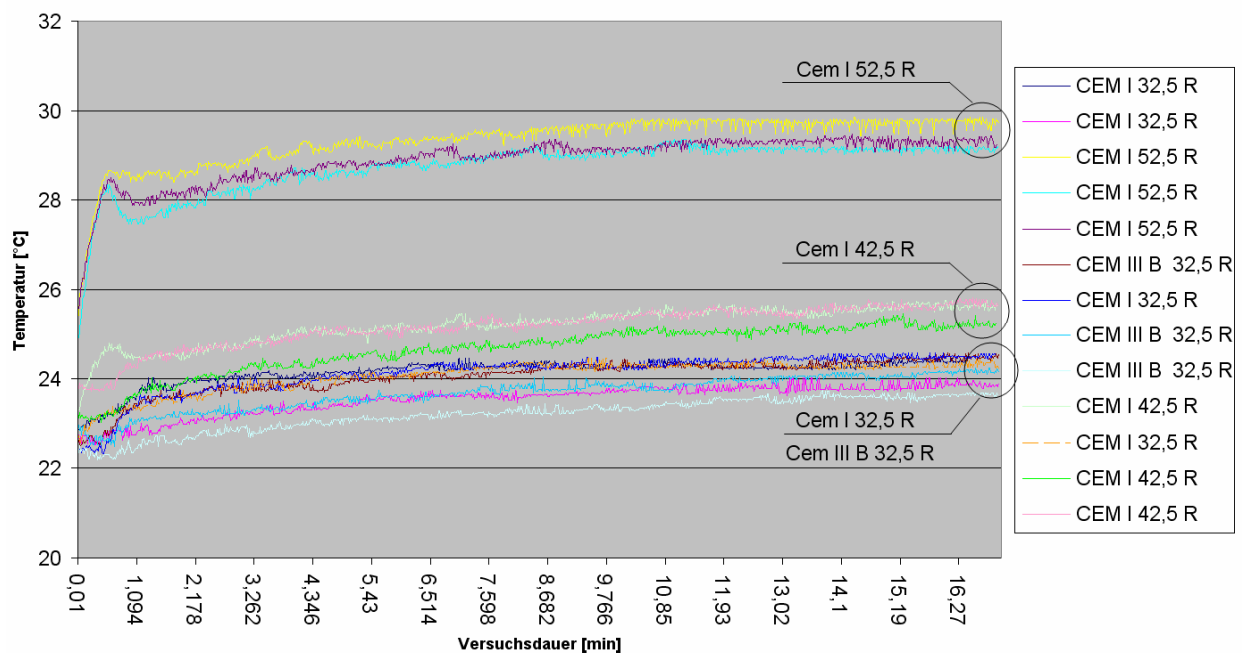


Abbildung 4-11: Versuchsergebnisse (Temperatur) mit unterschiedlichen Zementarten

Man kann folgende Schlüsse aus den Abbildungen 4-10 und 4-11 ziehen:

- CEM I 52,5 R hat das steifste Materialgefüge (größte Drehmoment) mit der höchsten Wärmeentwicklung.
- CEM I 42,5 R liegt bei allen Eigenschaften (Drehmoment und Temperatur) im mittleren Bereich.

- CEM I 32,5 R liegt im unteren Bereich bei den Drehmomenten und Temperatur.
- CEM III B 32,5 R weist höhere Drehmomente auf wie CEM I 42,5 R und liegt bei der Temperaturentwicklung bei CEM I 32,5 R.

4.2.6 Fließmittel

Die Fließmittelanwendung ist im Rahmen dieser Arbeit ein zentrales Thema. Es wurden dazu bei den vorliegenden Vorversuchen einige Varianten probiert. Die erste Variante war, dass man Fließmittel dem Anmachwasser hinzufügt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Abbildung 4-12 ersichtlich. Die Fließmittelgehalte beziehen sich auf die verwendete Zementmenge z.B. bei 0,1 % Fließmittelgehalt entspricht dass bei einer Zementmenge von 600 g Zement 0,6 g Fließmittel. Dies ist in Tabelle 4-2 ersichtlich.

Tabelle 4-2 : Verwendete Fließmittelmengen

Fließmittelgehalt [%]	Zementmenge [g]	verwendetes Fließmittel [g]
0,1	600	0,6
0,15	600	0,9
0,21	600	1,26

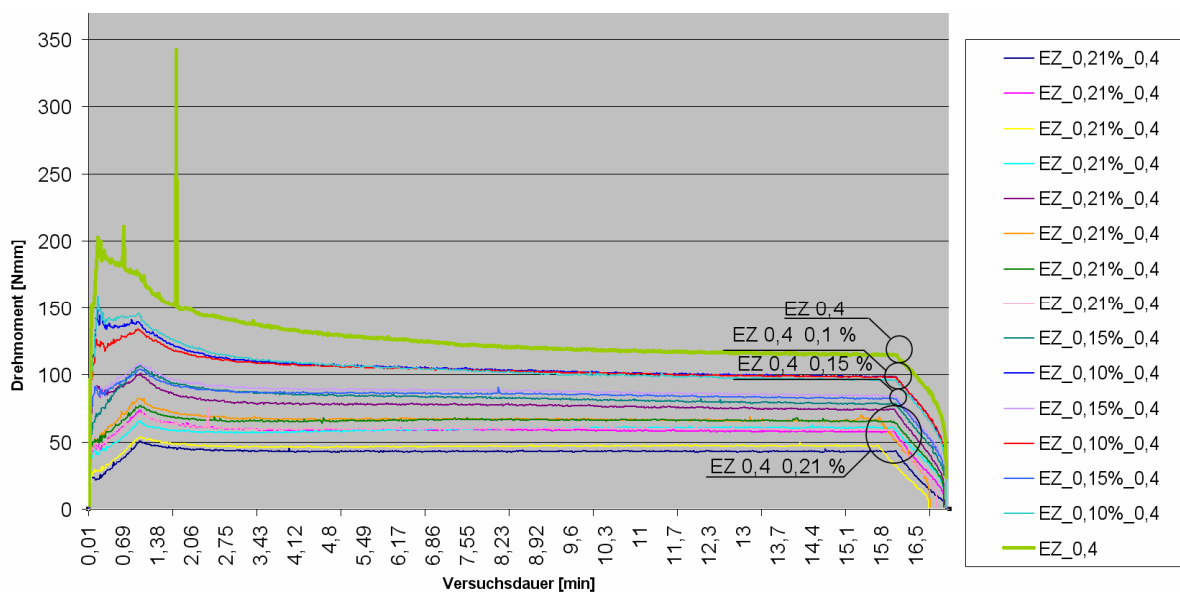


Abbildung 4-12: Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Fließmittelgehalten bei W/Z-Wert 0,4

Man kann erkennen, dass bei Zementleimen mit einem Fließmittelgehalt von 0,1 % und 0,15 % wenig Unterschied zum Zementleim ohne Fließmittel vorhanden ist. Es sind große Streuungen bei Zementleimen mit einem Fließmittelgehalt von 0,21 % vorhanden. Diese Streuung lässt sich mit der geringen Menge des Fließmittels erklären.

Es wurde folgende Fahrweise aufgrund der großen Streuungen entworfen (Abb. 4-13). Als erster Schritt wird der Zementleim mit 0,4 hergestellt und anschließend wird die jeweilige Menge Fließmittel als Tropfen mit einer Einwegpipette hinzugefügt.

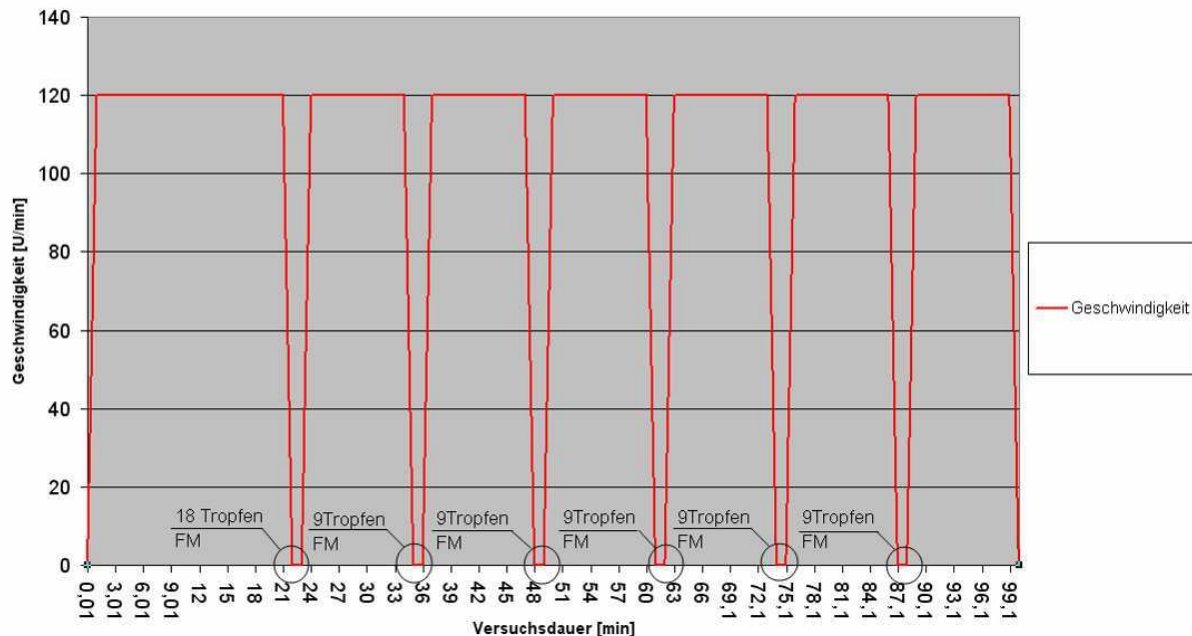


Abbildung 4-13: Fahrweise für die Versuche mit Fließmittel

Es wurden folgende Fließmittelgehalte verwendet: 0,1 %; 0,15 %; 0,20 %; 0,25 %; 0,30 %; 0,35 %. 9 Tropfen haben mit einer Einwegpipette im Mittel ein Gewicht von 0,3 g und entsprechen einem Gehalt von 0,05 % Fließmittel. In der Abbildung 4-14 ist der Versuch mit Fließmittel 1, 2 und 3 dargestellt.

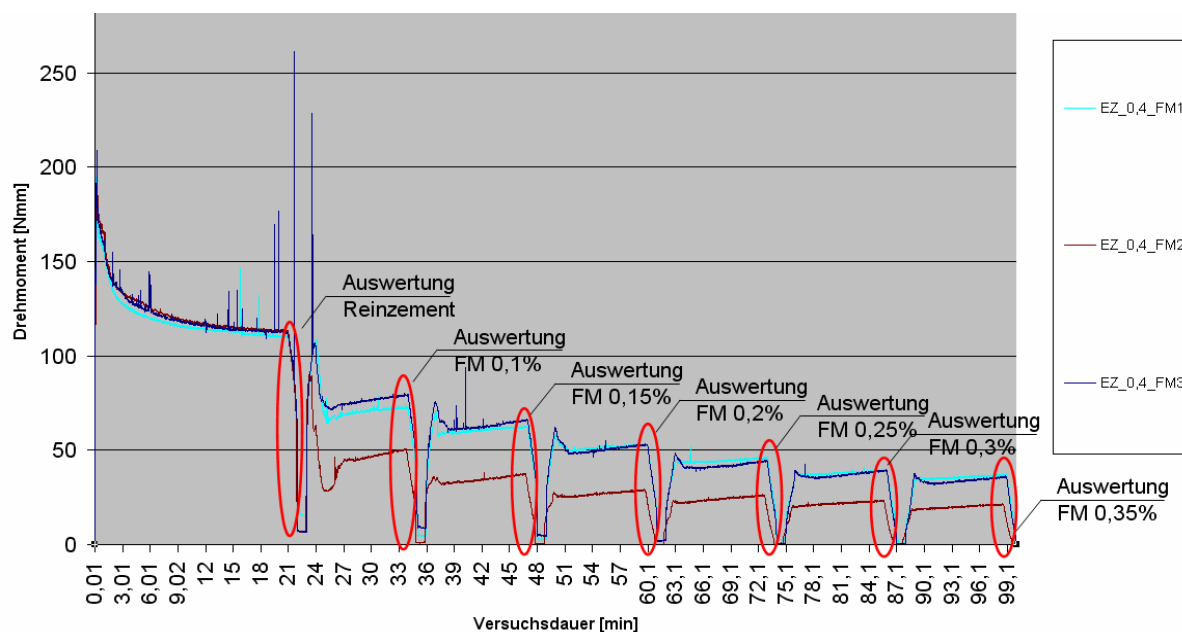


Abbildung 4-14: Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Fließmittelgehalten bei W/Z-Wert 0,4

Man kann die eindeutige Wirksamkeit des Fließmittels auf PCE-Basis erkennen. Die beste Wirkung wurde mit Fließmittel 2 erzielt. Das Drehmoment konnte jedoch bei jedem Fließmittel auf mindestens 2/3 gesenkt werden. Um das Materialverhalten von Einheitszement mit Fließmittel 2 zu bestimmen, wird die Geschwindigkeit (X-Achse) und das zugehörige Drehmoment (Y-Achse) aufgetragen. Danach werden die Interpolationsfunktionen ermittelt. Man betrachtet bei dieser Auswertung immer die absteigenden Äste der Geschwindigkeitsfunktion. (Abb. 4-15).

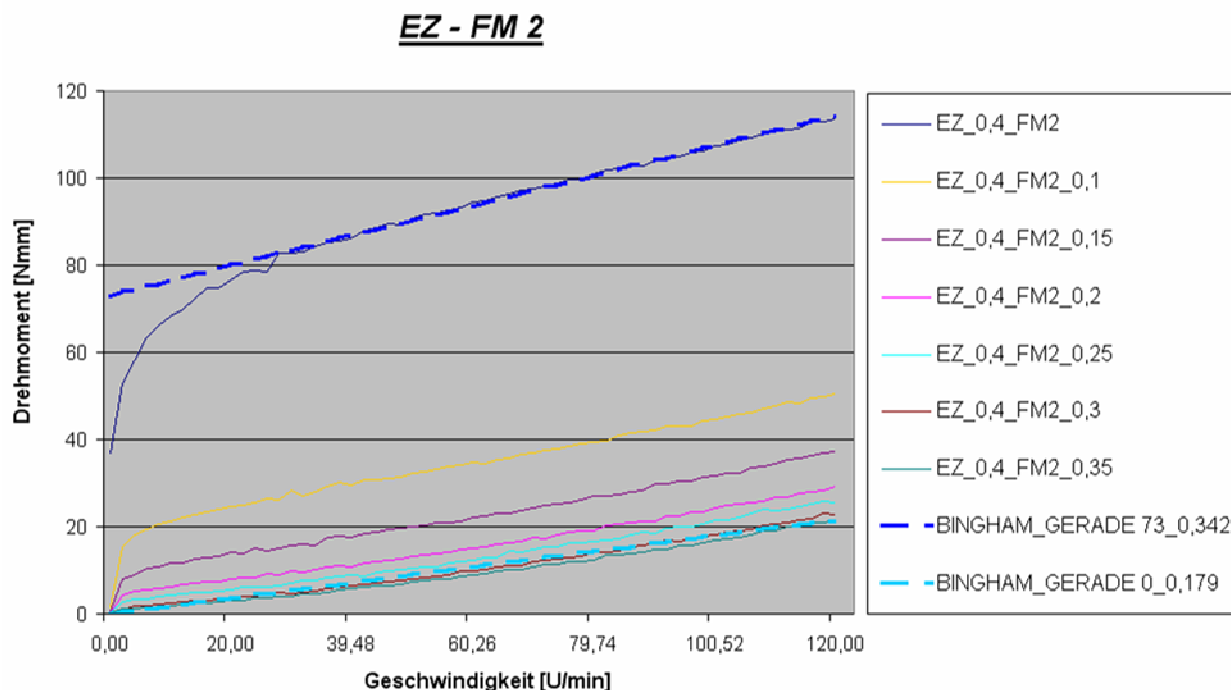


Abbildung 4-15: Materialverhalten bei Zementleim mit EZ und unterschiedlichen Fließmittelgehalten

Die erste Ausgleichsgerade wurde beim Einheitszement ohne Fließmittel gelegt. Es handelt es sich um ein *Bingham'sches* Materialverhalten. Die relative Fließgrenze beträgt 73 Nmm, die relative Viskosität 0,342.

Die zweite Ausgleichsgerade wurde bei Einheitszement und einem Fließmittelgehalt von 0,35 % angelegt. Bei diesen Materialverhalten kann man auf ein *Newton'sches* Medium schließen. Es gibt keine relative Fließgrenze und die relative Viskosität beträgt 0,179. Die Viskosität des Zementleimes nimmt deutlich bei zunehmendem Fließmittelgehalt ab.

4.2.7 Versuchsprogramm

Für die Versuche der Zementleime ohne Fließmittel wurde folgendes festgelegt:

- die Mischzeit beträgt 90 sec
- W/Z-Wert = 0,4.
- Die Fahrweise: 1 min (0-120 U/min); 20 min (120 U/min); 1 min (120-0U/min)
- Die Auswertung umfasst einen Überblick über die Versuche, das Temperaturverhalten und das Materialverhalten wird immer am absteigenden Ast ermittelt.

Für die Versuche mit Fließmittel wurde folgendes festgelegt:

- die Mischzeit beträgt 90 sec

- W/Z-Wert $l = 0,4$.
- Fließmittelgehalte: 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; und 0,35
- Die Fahrweise ist in Tabelle 4-3 ersichtlich.
- Die Auswertung umfasst Überblick über die Versuche, Temperatur und Materialverhalten wird immer am absteigenden Ast ermittelt.

Tabelle 4-3: Darstellung der Fahrweise Tabellarisch

Zeit[min]	U/min	
0	0	
1	120	
21	120	
22	0	Fließmittel zugabe
23	0	
24	120	
34	120	
35	0	Fließmittel zugabe
36	0	
37	120	
47	120	
48	0	Fließmittel zugabe
49	0	
50	120	
60	120	
61	0	Fließmittel zugabe
62	0	
63	120	
73	120	
74	0	Fließmittel zugabe
75	0	
76	120	
86	120	
87	0	Fließmittel zugabe
88	0	
89	120	
99	120	
100	0	

4.3 Kalibrierung des Gerätes

Kalibrierung nach Herstellerangaben

Das Gerät wurde nach den Vorversuchen und nach 2 Versuchsreihen mit Fließmittel kalibriert. Die Kalibrierung erfolgt mit einem Silikonöl.

In Tabelle 4-4 findet man die Produktdaten des Silikonöls.

Tabelle 4-4: Produktdaten vom Silikonöl zur Kalibrierung

	Norm	Bedingungen	Einheit	Wert
Grundöl				
Typ				Polydimethylsiloxan
Viskosität	DIN 51 562-1	+25°C	mm²/s	1.000
Pourpoint	DIN ISO 3016	3°C Schritt	°C	< -50
Flammpunkt	DIN ISO 2592	> 79	°C	> 280
Anwendungstechnische Daten				
Dichte	DIN EN ISO 3838	+20°C	g/ml	0,97
Farbe				hellfarben
Einsatztemperaturen				
Untere Einsatztemperatur			°C	-55
Obere Einsatztemperatur			°C	200
Freigaben/Spezifikationen				
Lebensmitteltechnik				NSF H1 Reg.-Nr. 135.921

Für die Kalibrierung stellt der Hersteller (Schleibinger Geräte) des Rheometers eine Anleitung zur Verfügung. Als erster Schritt wird im Messtopf das Kalibrieröl bis zur Füllmarke gefüllt. Beim Befüllen des Behälters entstehen Luftblasen, das Gerät darf erst in Betrieb genommen werden, wenn die Flüssigkeit entlüftet ist. Das Leimpaddel wird in das Gerät eingespannt und das Gerät 2 Minuten lang mit der Geschwindigkeit von 15 U/min betrieben.

Anschließend wird der Faktor mit Hilfe der folgenden Formel berechnet. Der Faktor C sollte zwischen 0,95 und 1,05 liegen. Die Formel wurde für ein Kalibrieröl von 12500 mPas und für eine Temperatur von 25°C entwickelt.

$$C = \frac{M_D \cdot \eta_{\text{Kalibrieröl}} \cdot v}{M_K} \quad 41$$

M_D = Werte für das Messpaddel, Leimpaddel $4,19 \cdot 10^{-4}$

η = Viskosität des Kalibrieröl in mPas

v = Schergeschwindigkeit [U/min]

M_K = Messwert des Drehmomentes in der Messung

Bei der Kalibrierung mit dem Silikonöl wurde folgender Scherwiderstand (Abb. 4-16) bzw. Temperaturverlauf (Abb. 4-17) gemessen.

⁴¹ Optimierung der gerätetechnischen Messparameter zur systematischen Bestimmung der Verarbeitungseigenschaften von Zementmörtel mittel Viskomat NT (Falter, S 97, /17/)

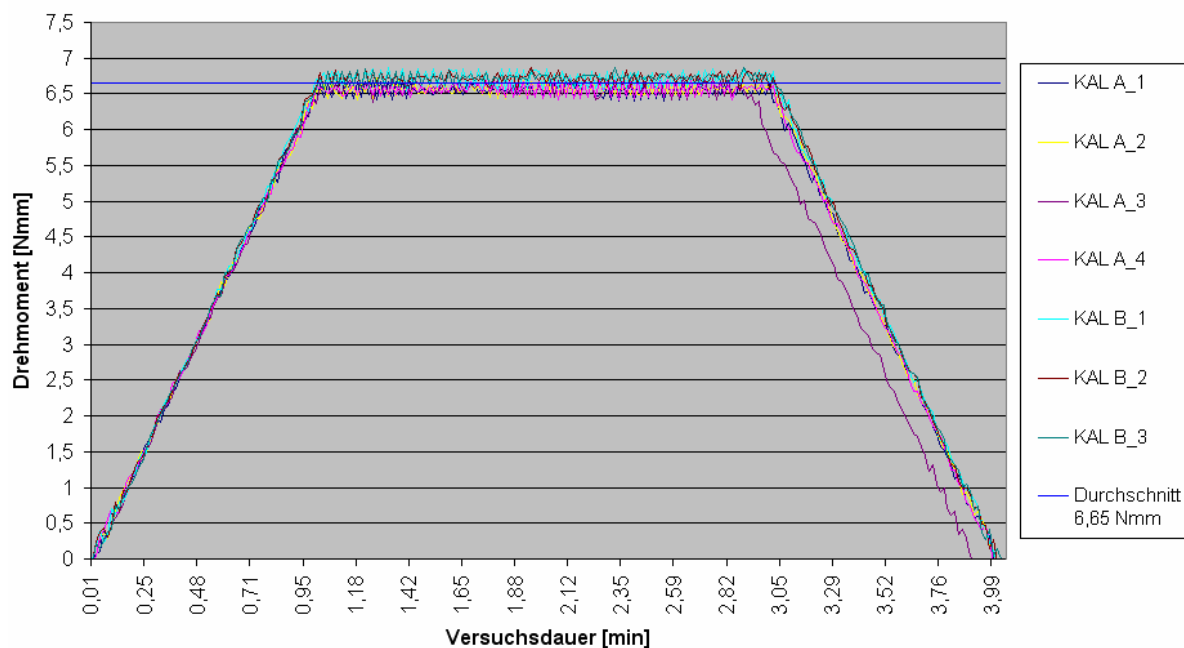


Abbildung 4-16: Messung des Scherwiderstandes von Kalibrieröl

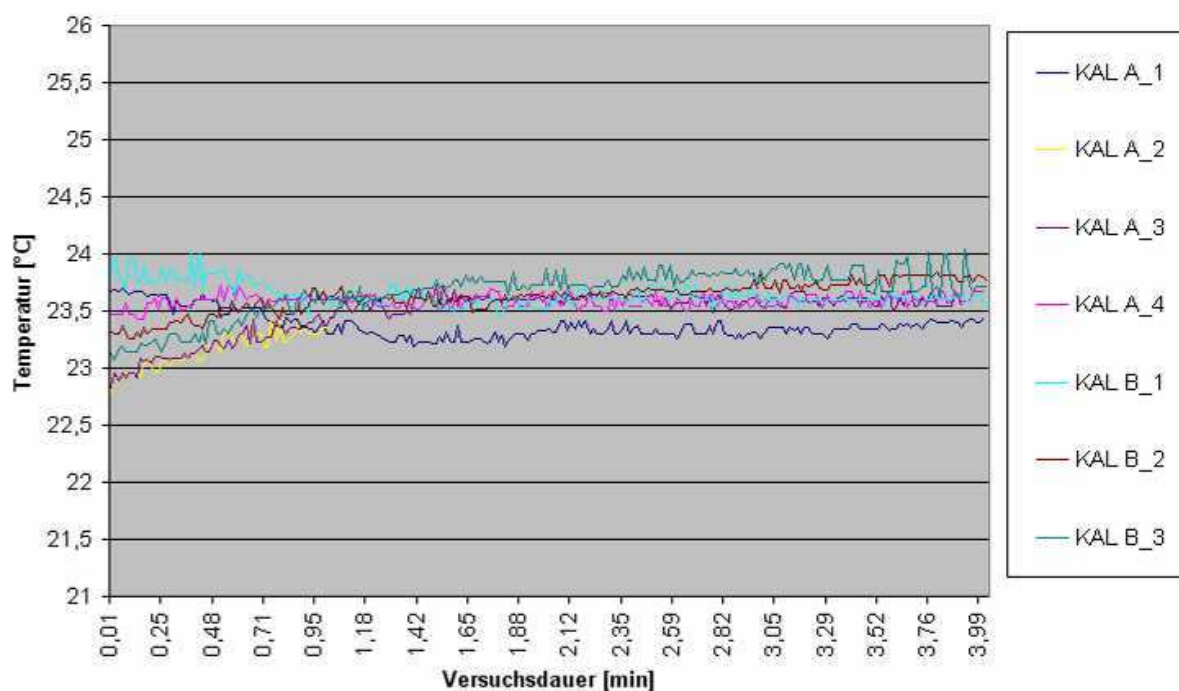


Abbildung 4-17: Messung der Temperatur

Die Versuche wurden ausgewertet, das Ergebnis ist in der nachfolgenden Tabelle 4-5 dargestellt.

Tabelle 4-5: Auswertung mit Viskomat NT

Formel	Parameter	Werte
$c = \frac{M_D \cdot \eta_{\text{Kalibrieröl}} \cdot v}{M_K}$	MD =	0,000419
	$\eta(\text{Kal}) =$	970 mPas
	v =	15 U/min
	MK =	6,65 Nmm
	c =	0,92

Der geforderte Wert von Faktor C konnte nicht erreicht werden aufgrund der geringeren Viskosität des Silikonöls (970 mPas statt der geforderten 12500 mPas) und der niedrigeren Temperatur (23,5°C statt der geforderten 25°C).

Absolute Kalibrierung

Wasser hat den Scherwiderstand 0 Nmm und kann zusätzlich zur Kalibrierung eingesetzt werden um Aufschluss über die Funktionstüchtigkeit des Gerätes zu geben.

Folgendes wurde bei der Messung mit Wasser gemessen (Abbildung 4-18):

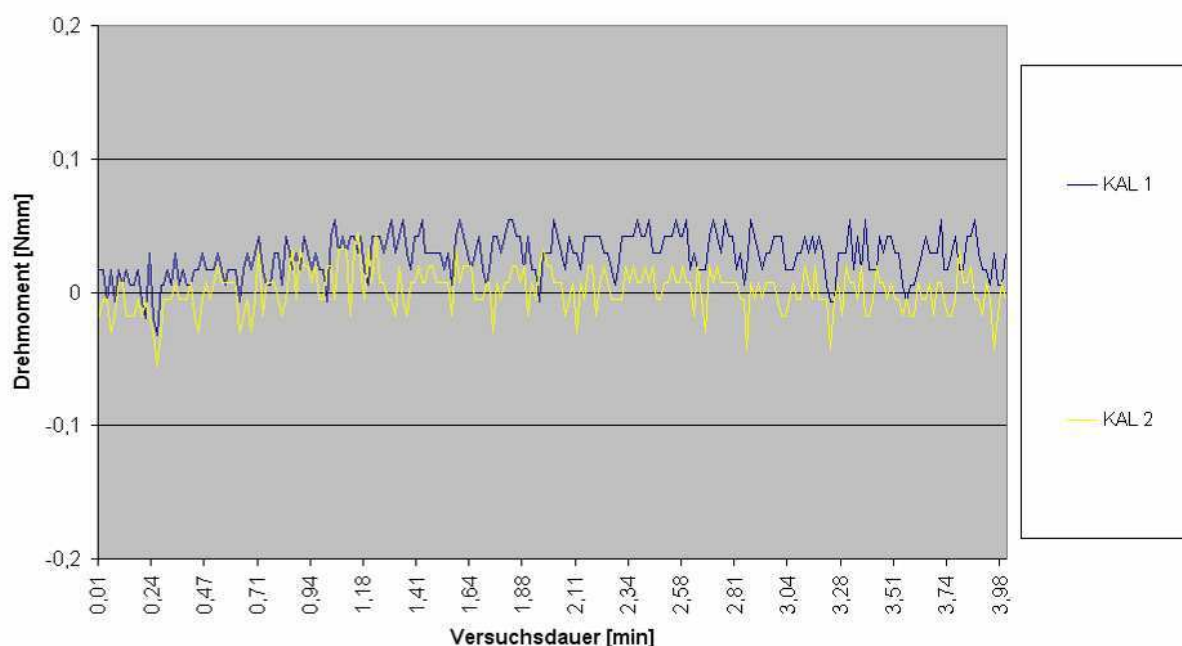


Abbildung 4-18: Messung des Scherwiderstandes von Wasser

Man kann erkennen, dass fast kein Scherwiderstand vorhanden ist, somit können größere Funktionsuntüchtigkeiten des Gerätes ausgeschlossen werden.

4.4 Versuchsreihen

Es wurde gemeinsam mit Frau A. Schneider (VÖZ) eine Versuchsmatrix entwickelt um folgende Einflüsse auf das rheologische Verhalten von Zementleimen zu untersuchen. (Tab. 4-6):

- Versuchsreihe A Einfluss des Klinkers: C_3A -Gehalt, Verhältnis cub/orth, Alkaligehalt
- Versuchsreihe B Einfluss der Sulfatträger
- Versuchsreihe C Einfluss von Zusätzen: ohne Zusätze, Hüttensand, Kalk, Nachmahlung
- Versuchsreihe D Feinheit der Zemente

Tabelle 4-6: Überblick über die Versuchsmatrix

Versuchsreihen		Analysedaten	
A1 - C3A Gehalt			
Zement	Variation	Blaine cm²/g	C3A %
CEM I 42,5 R/HS	Gehalt 1 (C3A frei)	4.750	0
CEM I 42,5 R	Gehalt 2	5.200	11,482
A2 - Verhältnis cub/orth			
Zement	Variation	Blaine cm²/g	cub/orth
CEM I 42,5 R	Verhältnis 1	4.840	4
CEM I 42,5 R	Verhältnis 2	4.800	0,95
CEM I 42,5 R	Verhältnis 3	4.570	0,38
A3 - Alkaligehalt			
Gehalt 1 CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33	Alkaliarm	4.560	
Gehalt 2 CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33	Alkalireich	4.730	
B - Einfluss der Sulfatträger			
CEM I 42,5 R	Dihydrat 0,25%, Halbhydrat 4.358%	5.200	A
CEM I 42,5 R	Dihydrat 1.639%, Halbhydrat 2.547 %, Anhydrit 1.223 %	5.370	B
C1 ohne Zusätze			
CEM I 42,5 N	3.240		
CEM I 42,5 R	4.520		
C2 - Gehalt an Hüttensand			
CEM II/A-S 32,5 R	6-20% S (10)	3.100	
CEM II/B-S 42,5 N	21-35% S (23)	3.490	
CEM III/A-S 32,5 N - LH	36-65% S (50)	3.930	
C3 - Gehalt an Kalk			
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33	12-20% L	4.510	
CEM II B-M (S-L) 42,5 N WT 33	21-35% L	4.560	
C4 - Nachmahlung eines Zementes			
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33	12-20% L	3770 / 4510	
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33	12-20% L	4.510	
D - Feinheit der Zemente			
Zement		Blaine cm²/g	
CEM I 42,5 R grob		3.380	
CEM I 42,5 R		5.200	

4.4.1 Versuchsreihe A1 (C₃A – Gehalt)

Bei der Versuchsreihe A1 (Tabelle 4-7) wurden folgende Zemente verwendet:

- CEM I 42,5 R/HS (C₃A frei)
- CEM I 42,5 R

Die verwendeten Zemente sind Portlandzementklinker (CEM I) mit einer schnellen Frühfestigkeitsentwicklung (R) und einer Festigkeitsklasse von 42,5 N/mm² (42,5). Beim CEM I 42,5 R/HS (C₃A frei) handelt es sich um einen Zement mit hohem Sulfatwiderstand.

Es soll untersucht werden ob sich CEM I 42,5 R/HS und CEM I 42,5 R unterschiedlich im Bezug auf Temperatur und Scherwiderstand verhalten.

Tabelle 4-7: Versuchsreihe A1

Versuchsreihe A1 - C ₃ A Gehalt			
Zement	Variation	Blaine cm ² /g	C ₃ A %
CEM I 42,5 R/HS	Gehalt 1 (C ₃ A frei)	4.750	0
CEM I 42,5 R	Gehalt 2	5.200	11,482

4.4.2 Versuchsreihe A2 (Kristallstruktur)

Bei der Versuchsreihe A2 sollen zwei unterschiedliche Kristallstrukturen beim Zement auf ihr rheologisches Verhalten im Zementleim untersucht werden. In Tabelle 4-8 sind die untersuchten Verhältnisse im Gefüge dargestellt.

Tabelle 4-8: Versuchsreihe A2

A2 - Verhältnis cub/orth			
Zement	Variation	cub/orth	Kristallgefüge
CEM I 42,5 R	Verhältnis 1	4	kubisch raumzentriert
CEM I 42,5 R	Verhältnis 2	0,95	kubisch raumzentriert ~ orthorhombisch
CEM I 42,5 R	Verhältnis 3	0,38	orthorhombisch

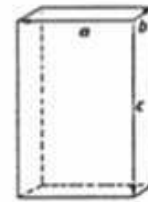
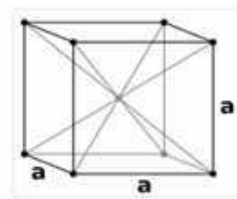
Die verwendeten Zementarten sind ähnlich der Versuchsgruppe A1 nur das Kristallgefüge ist unterschiedlich:

Kubisch raumzentriert Kristallgefüge

Unter einem kubisch raumzentrierten Kristallgefüge wird eine Kristallstruktur beschrieben, die aus acht Atomen an den Ecken sowie einem Atom in der Mitte besteht. Die Seiten des Kubus sind gleich lang und liegen orthogonal aufeinander siehe Abbildung 4-19 links.

Orthorhombisch

Das orthorhombische Kristallgefüge besteht aus einem Prisma aus jeweils unterschiedlich langen Seiten, die Seiten liegen orthogonal aufeinander siehe Abbildung 4-19 rechts.



$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Abbildung 4-19: Darstellung von Atom mit kubisch raumzentrierten Kristallgefüge⁴² (links) und Darstellung von einem Atom mit orthorhombischen Kristallgefüge⁴³ (rechts)

4.4.3 Versuchsreihe A3 (Alkaligehalt)

Bei der Versuchsreihe A3 wird ein CEM II/B-M(S-L)42,5 N WT 33 verwendet.

Der verwendete Zement ist ein Portlandkompositzement (CEM II-M) mit einer normalen Frühfestigkeitsentwicklung (N), einer Festigkeitsklasse von 42,5 N/mm² (42,5) und einer Wärmeentwicklungsklasse von WT 33 (260 J/g). Dieser Portlandkompositzement setzt sich zusammen aus 65-79 % Portlandzementklinker und 21 -35 % Hüttensand und Kalkstein.

Es werden hier der unterschiedlichen Alkaligehalte im Bezug auf die Rheologie in beiden Zementleimen untersucht (siehe Tabelle 4-9).

Tabelle 4-9: Versuchsreihe A3

A3 - Alkaligehalt		
Zement	Variation	Blaine cm ² /g
Gehalt 1 CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33	Alkaliarm	4.560
Gehalt 2 CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33	Alkalireich	4.730

4.4.4 Versuchsreihe B (Einfluss der Sulfatträger)

Bei der Versuchsreihe B wird ein CEM I 42,5 R (Erklärung siehe Versuchgruppe A1) verwendet. Es wird hier der Einfluss auf das rheologische Verhalten bei unterschiedlichen Sulfatträgern untersucht. Der Sulfatträger regelt die Verarbeitbarkeit des Zements (Verzögerung des Erstarrens). Es können als Sulfatträger folgende Materialien verwendet werden:

- **Dihydrat:** Aus Calciumsulfat Dihydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) ist das Mineral Gips aufgebaut. Dieser wird bei der Mahlung beigemischt und im Drehrohrföfen mitgebrannt.
- **Halbhydrat:** Beim Erhitzen gibt das Calciumsulfat Dihydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) teilweise Kristallwasser ab und es entsteht daraus Hemihydrat bzw. Halbhydrat.
- **Anhydrit:** Die völlig wasserfreie Form kommt in der Natur als Anhydrit (CaSO_4) vor.

⁴² [http://mobile.euro-inox.org/map/body_centred_cubic/DE_body_centred_cubic.php \(/22/, letzter Zugriff 23.09.2012\)](http://mobile.euro-inox.org/map/body_centred_cubic/DE_body_centred_cubic.php (/22/, letzter Zugriff 23.09.2012))

⁴³ [http://www.dlr.de/mp/Portaldata/22/Resources//2_Kristallstrukturen.pdf, \(Herlach, S9, /23/, letzter Zugriff 23.09.2012\)](http://www.dlr.de/mp/Portaldata/22/Resources//2_Kristallstrukturen.pdf, (Herlach, S9, /23/, letzter Zugriff 23.09.2012))

Tabelle 4-10 zeigt für die Versuchsreihe B die verwendeten Mischungen von Sulfatträgern.

Tabelle 4-10: Versuchsreihe B

Versuchsreihe B - Einfluss der Sulfatträger			
Zement	Variation	Blaine cm²/g	
CEM I 42,5 R	Dihydrat 0,25%, Halbhydrat 4.358%	5.200	A
CEM I 42,5 R	Dihydrat 1.639%, Halbhydrat 2.547 %, Anhydrit 1.223 %	5.370	B

4.4.5 Versuchsreihe C1 (ohne Zusatzstoffe)

Bei der Versuchsreihe C1 werden folgende Zemente verwendet (Tabelle 4-11):

- CEM I 42,5 N
- CEM I 42,5 R

Hier wird speziell die Frühfestigkeitsentwicklung (N, R) bei einem Portlandzementklinker untersucht.

Tabelle 4-11: Versuchsreihe C1

C1 ohne Zusätze	
Zement	Blaine cm²/g
CEM I 42,5 N	3.240
CEM I 42,5 R	4.520

4.4.6 Versuchsreihe C2 (Gehalt an Hüttensand)

Bei der Versuchsreihe C2 werden folgende Zemente untersucht (Tabelle 4-12):

- CEM II/A-S 32,5 R
- CEM II/B-S 42,5 N
- CEM III/A-S 32,5 N-LH

Bei der ersten Zementsorte CEM II/A-S 32,5 R handelt es sich um einen Portlandhüttenzement (CEM II/A-S) mit einen Hüttensandanteil von 6-20 % und einem Klinkeranteil von 80-94 %. Dieser Zement hat eine schnelle Frühfestigkeitsentwicklung (R) und eine Festigkeitsklasse von 32,5 N/mm² (32,5).

Beim Zement CEM II/B-S 42,5 N handelt es sich um einen Portlandhüttenzement mit einem Hüttensandanteil von 21-35 % (CEM II/B-S) und einem Klinkeranteil von 65-79 %. Dieser Zement hat eine normale Frühfestigkeitsentwicklung (N) und eine Festigkeitsklasse von 42,5 N/mm² (42,5).

Der CEM III/A-S 32,5 N – LH ist ein Hochofenzement mit einem Hüttensandanteil von 36 – 65%, einem Klinkeranteil von 35 – 64 % (CEM III/A-S), einer normalen Frühfestigkeitsklasse (N), einer Festigkeitsklasse von 32,5 N/mm² (32,5) und einer niedrigen Hydratationswärmeentwicklung (LH)

Tabelle 4-12: Versuchsreihe C2

C2 - Gehalt an Hüttensand		
Zement	Variation	Blaine cm ² /g
CEM II/A-S 32,5 R	6-20% S (10)	3.100
CEM II/B-S 42,5 N	21-35% S (23)	3.490
CEM III/A-S 32,5 N - LH	36-65% S (50)	3.930

4.4.7 Versuchsreihe C3 (Gehalt an Kalkstein) und Versuchsreihe C4

Bei der Versuchsreihe C3 werden folgende Zemente untersucht (Tabelle 4-13):

- CEM II/A–M (S-L) 42,5 N WT33
- CEM II/B–M (S-L) 42,5 N WT 33

Beim CEM II/A–M (S-L) 42,5 N WT33 handelt es sich um einen Portlandkompositzement (CEM II-M) mit einer normalen Frühfestigkeitsentwicklung (N), einer Festigkeitsklasse von 42,5 N/mm² (42,5) und einer Wärmeentwicklungsklasse von WT 33 (260 J/g). Dieser Zement setzt sich aus 6-20 % Kalkstein und einem Klinkeranteil von 80 – 94 % zusammen.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde der CEM II/A–M (S-L) 42,5 N WT33 von einem Blaine-Wert von 3770 auf einen Blaine-Wert von 4510 gemahlen (Tabelle 4-14).

Beim CEM II/B–M (S-L) 42,5 N WT 33 handelt es sich um einen ähnlichen Zement. Die Bestandteile sind etwas anders und setzen sich aus einem Anteil von 21-35 % Kalkstein und einem Klinkeranteil von 65 – 79 % zusammen.

Tabelle 4-13: Versuchsreihe C3

C3 - Gehalt an Kalk		
Zement	Variation	Blaine cm ² /g
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33	12-20% L	4.510
CEM II B-M (S-L) 42,5 N WT 33	21-35% L	4.560

Tabelle 4-14: Versuchsreihe C4

C4 - Nachmahlung eines Zementes		
Zement	Variation	Blaine cm ² /g
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33	12-20% L	3.770
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33	12-20% L	4.510

4.4.8 Versuchsreihe D (Feinheit der Zemente)

Bei der Versuchsreihe D werden CEM I 42,5 R Zemente mit einer unterschiedlichen Mahlfineinheit untersucht. Der Zement 1 weist einen Blaine-Wert von 3380 auf und Zement 2 einen Blaine-Wert von 5200 (Tabelle 4-15)

Tabelle 4-15: Versuchsreihe D

Versuchsreihe D - Feinheit der Zemente	
Zement	Blaine cm ² /g
CEM I 42,5 R grob	3.380
CEM I 42,5 R	5.200

4.4.9 Fließmittel

Für die Versuche werden folgende Fließmittel verwendet (Tabelle 4-16):

Tabelle 4-16: verwendete Fließmittel

Fließmittel	Basis	Seitenkette	Ladungsdichte	Aktivgehalt	Anmerkung
1	PCE	kurz	hoch	30%	moderate Verflüssigung gute Konsistenzerhaltung
2	PCE	kurz	niedrig	30%	gute Verflüssigung moderate Konsistenzerhaltung
3	PCE	lang	niedrig	30%	sehr gute Verflüssigung geringe Konsistenzerhaltung

Die Fließmittel wurden mit dem Viskomat NT geprüft und in Abbildung 4-20 ist das rheologische Verhalten der Fließmittel dargestellt.

Man kann erkennen, dass die Fließmittel auch mit dem Viskomat NT prüffähig sind. Fließmittel 3 hat das höchste Drehmoment. Man erkennt, dass beim An- und Abfahren keine rheologische Änderungen auftreten.

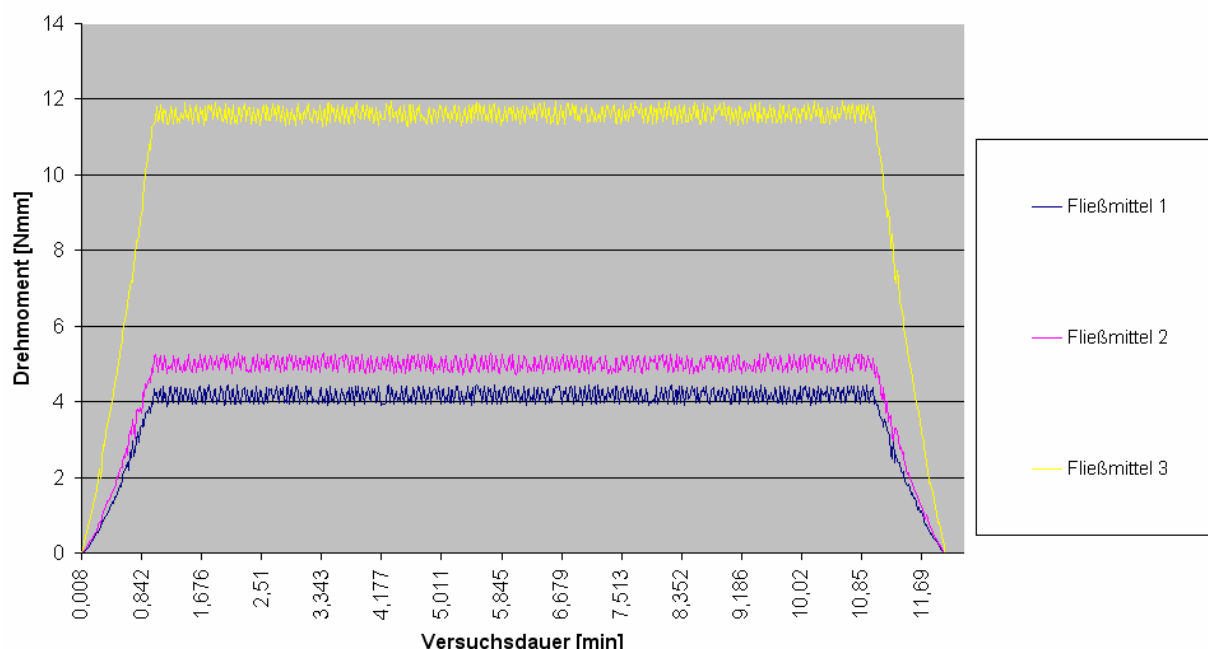


Abbildung 4-20: Messung des Scherwiderstandes von Fließmittel

Bei den Fließmitteln handelt es sich um *Newton'sche* Flüssigkeiten mit dilatanten Verhalten (Abb.4-21). Fließmittel 3 hat eine relative Viskosität von 0,0985. Fließmittel 1 und Fließmittel 2 sind rheologisch ähnlich.

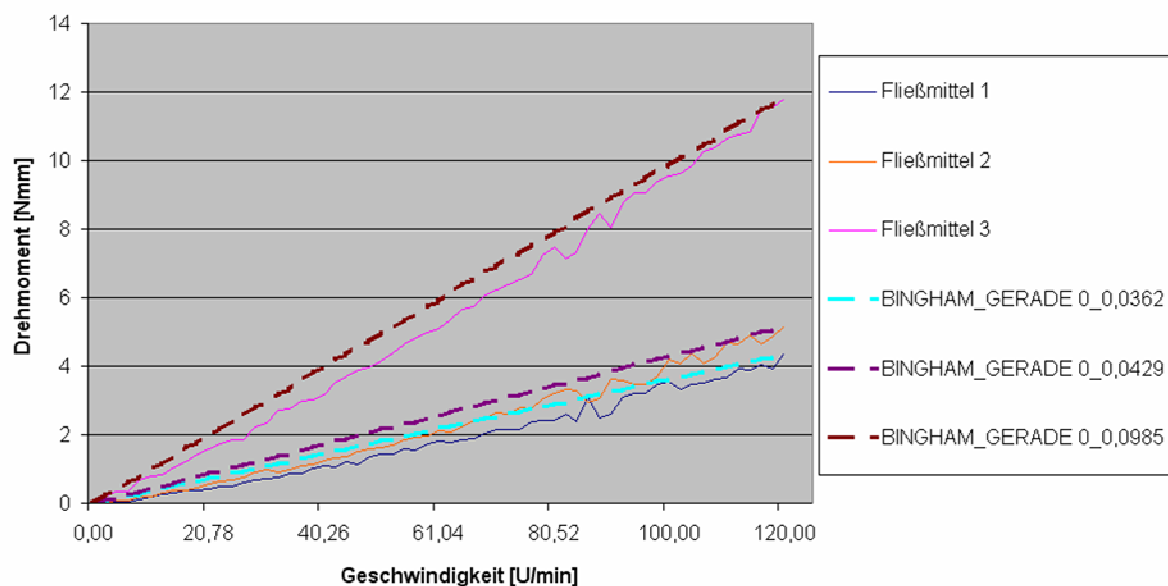


Abbildung 4-21: Materialverhalten von Fließmittel

5 Hauptversuche

5.1 Hauptversuche ohne Fließmittel

5.1.1 Versuchsreihe A1

In Tabelle 5-1 ist die Versuchsreihe A1 dargestellt:

Tabelle 5-1: Versuchsreihe A1

Versuchsreihe A1 - C3A Gehalt			
Zement	Variation	Blaine cm²/g	C3A %
CEM I 42,5 R/HS	Gehalt 1 (C3A frei)	4.750	0
CEM I 42,5 R	Gehalt 2	5.200	11,482

Überblick über die Versuchsergebnisse

Drehmoment

Abbildung 5-1 zeigt, dass am Anfang beide Zemente sich gleichartig verhalten und einen relativ großen exponentiellen Abfall des Drehmomentes aufweisen. Am Ende des Versuches ist eine stärkere Differenz zwischen beiden Zementtypen erkennbar. Der hoch sulfatbeständige C3A freie Zement weist eine um ca. 15% geringeres Drehmoment auf als der „normale“ CEM I 42,5 R. Das Ergebnis korreliert mit dem gemessenen Blaine-Werten.

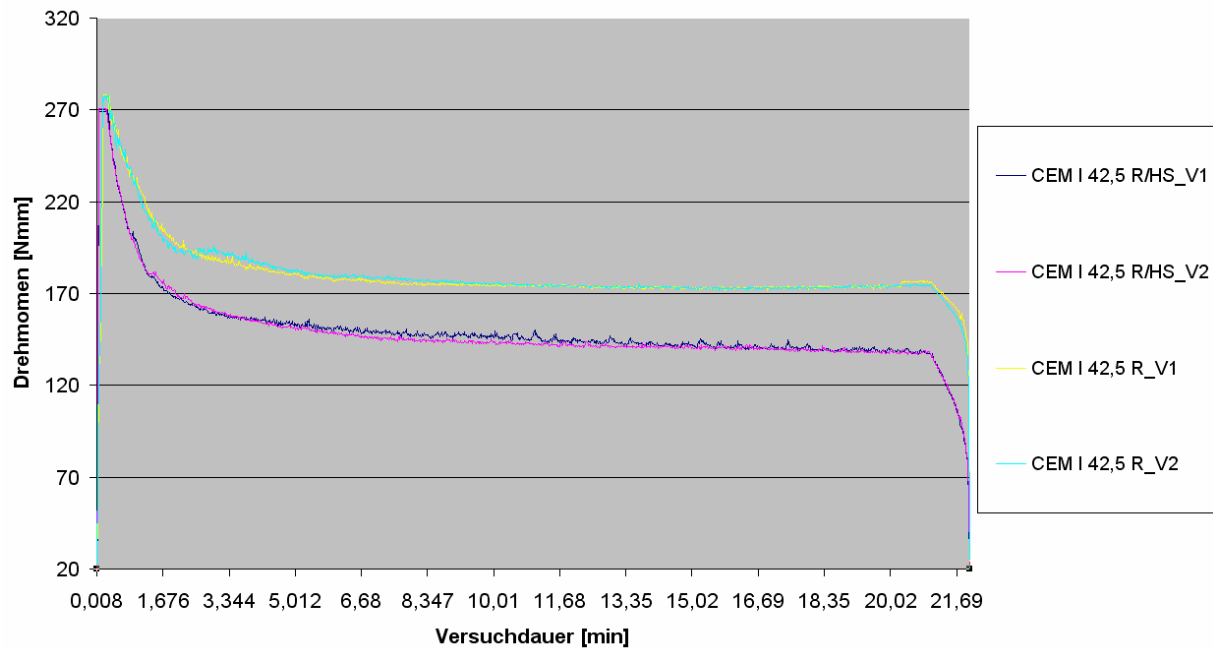


Abbildung 5-1: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe A1

Temperatur

Bei der Temperatur sieht man deutlich dass die Temperatur bei CEM 42,5 R höher ist als bei CEM 42,5 R/HS. Weiters kann man erkennen, dass beim CEM 42,5 R die Versuchstemperatur beim Versuchsbeginn höher ist als beim Versuchsende. Bei CEM 42,5 R/HS ist bei der Temperaturentwicklung genau der umgekehrte Effekt zu sehen (Abb. 5-2).

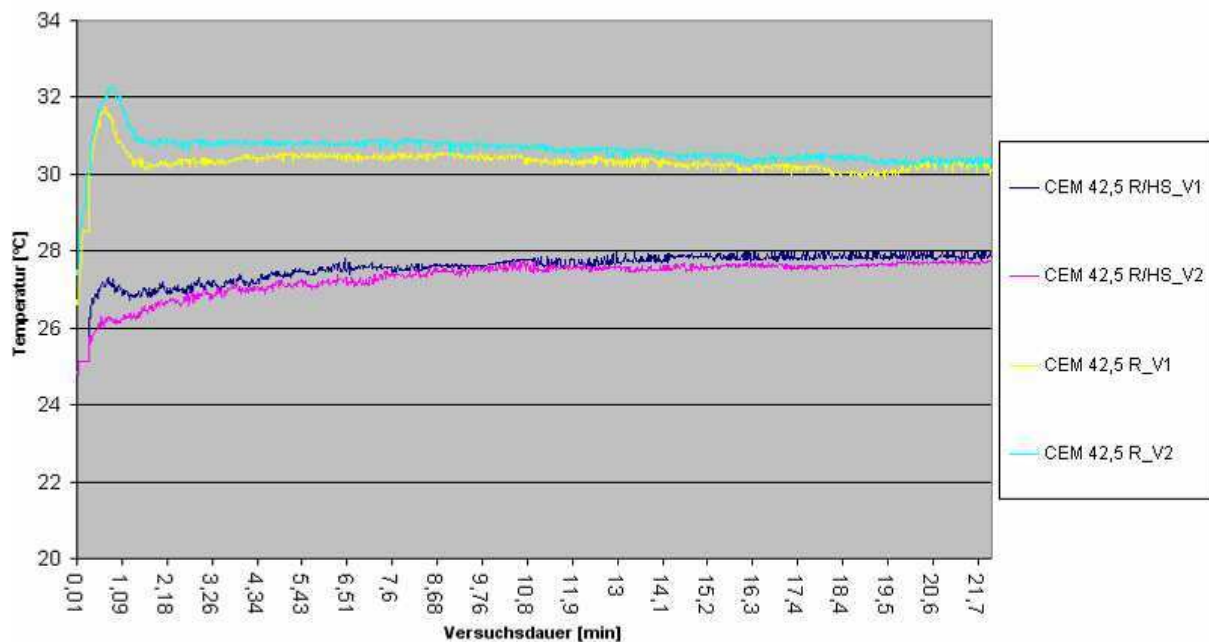


Abbildung 5-2: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe A1

Materialverhalten

Beim Materialverhalten kann man erkennen, dass der CEM I 42,R (147 Nmm) eine höher erelative Fließgrenze besitzt als CEM I 42,5 R/HS (95 Nmm). Bei der relativen Viskosität

(Steigung der Geraden) weist CEM I 42,5 R/HS (0,31) eine höhere Viskosität auf als CEM I 42,5 R (0,23) (Abb. 5-3).

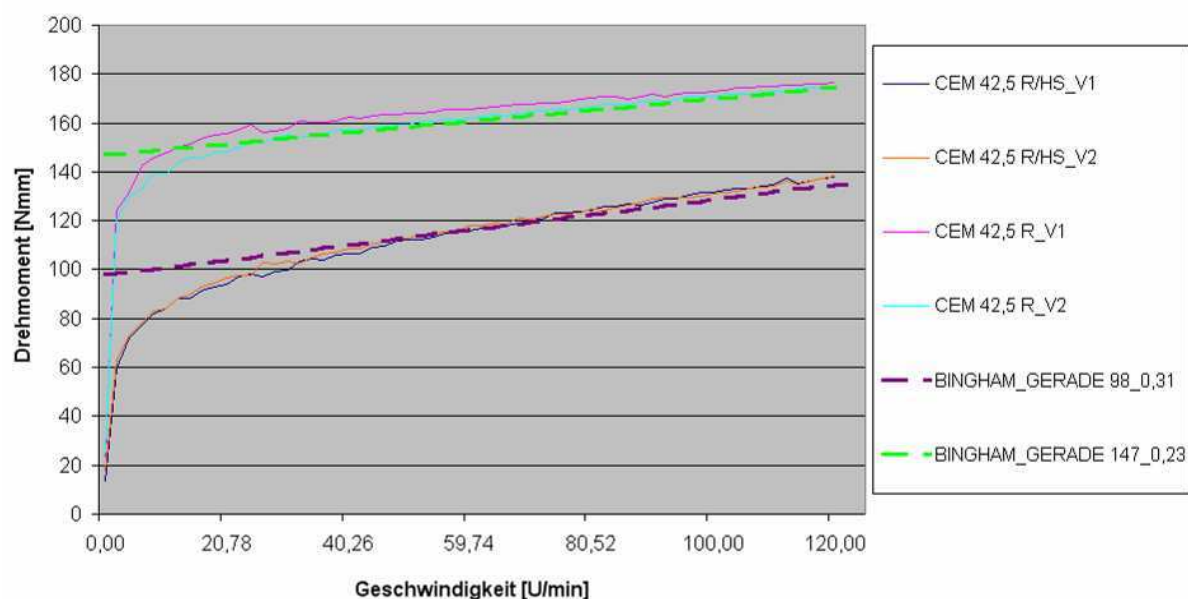


Abbildung 5-3: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe A1

5.1.2 Versuchsreihe A2

In Tabelle 5-2 ist die Versuchsreihe A2 dargestellt

Tabelle 5-2: Versuchsreihe A2

A2 - Verhältnis cub/orth			
Zement	Variation	cub/orth	Kristallgefüge
CEM I 42,5 R	Verhältnis 1	4	kubisch raumzentriert
CEM I 42,5 R	Verhältnis 2	0,95	kubisch raumzentriert ~ orthorhombisch
CEM I 42,5 R	Verhältnis 3	0,38	orthorhombisch

Überblick über die Versuchsergebnisse

Drehmoment

In Abbildung 5-4 sind die 3 Zementvariationen des CEM I zu sehen. Es ist zu erkennen, dass der Zement mit der kubisch raumzentrierten Kristallstruktur das höchste Drehmoment und der Zement mit der orthorhombischen Kristallstruktur das niedrigste Drehmoment aufweist. Weiters sieht man, dass es bei Verhältnis 1, ab der 10 Minute zu einem Anstieg des Drehmomentes kommt. Man kann den Schluss ziehen, dass bei einer kubisch raumzentrierten Kristallstruktur der Zementleim steifer ist, als bei einer orthorhombischen Kristallstruktur.

Die Ausreißer beim CEM 42,5 R Verhältnis 3 (orthorhombisch Kristallstruktur) weisen auf Materialverunreinigungen im Zement hin.

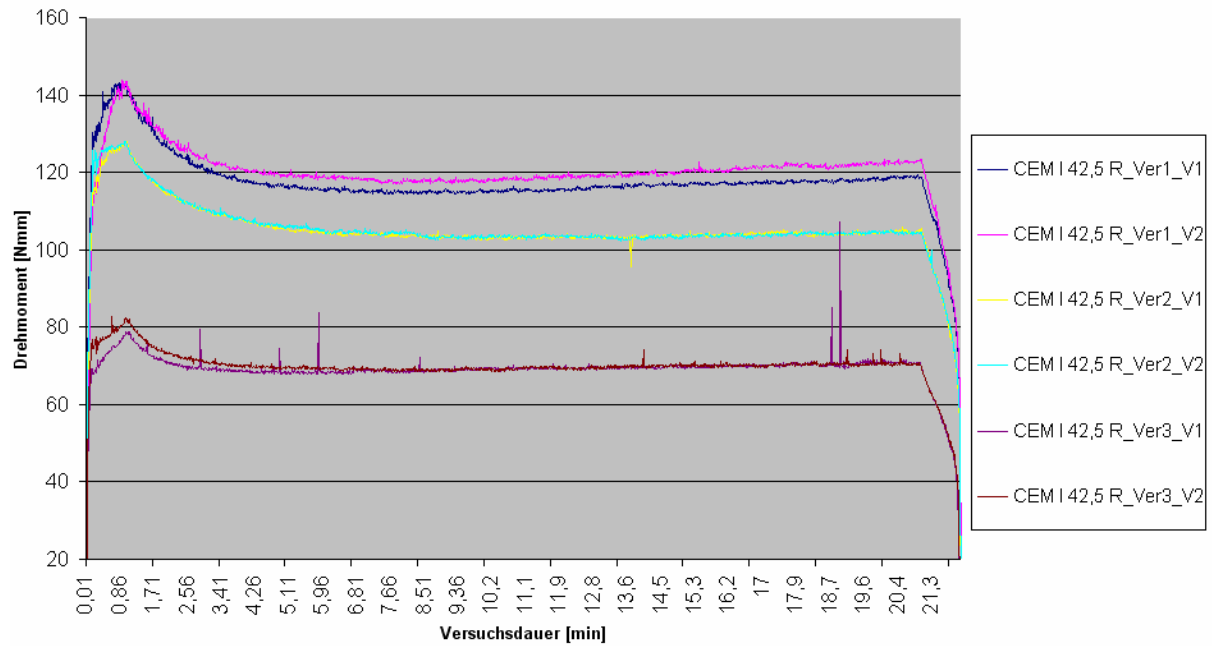


Abbildung 5-4: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe A2

Temperatur

Bei der Temperaturentwicklung ist kein Unterschied zwischen kubisch raumzentriertem Kristallgefüge und orthrhombischem Kristallgefüge nachzuweisen (Abb. 5-5).

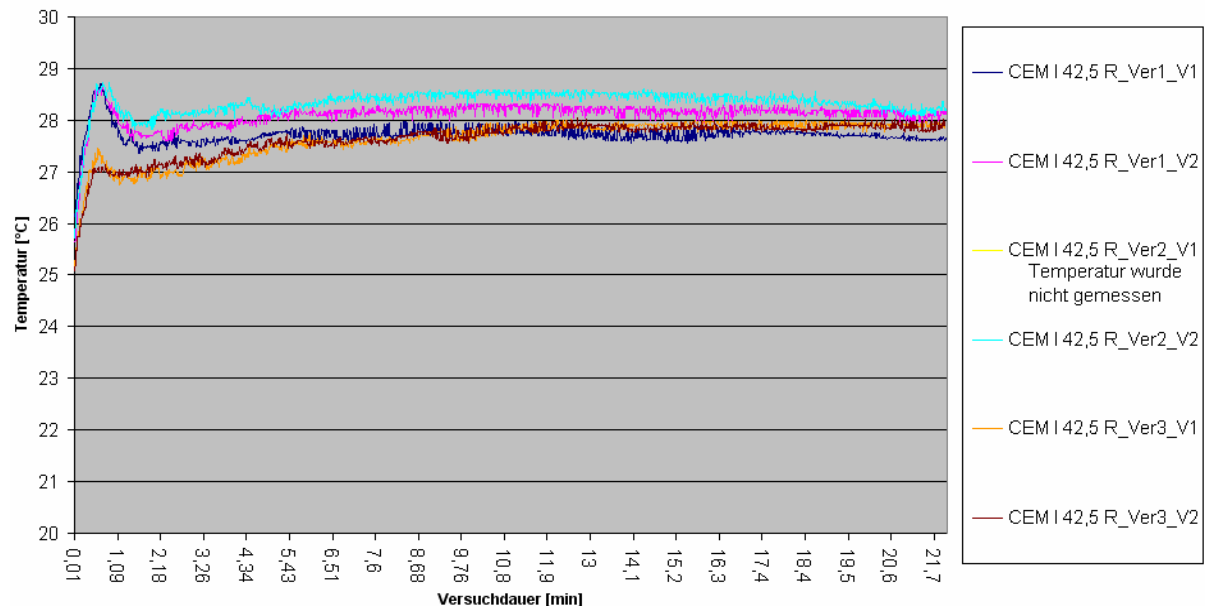


Abbildung 5-5: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe A2

Materialverhalten

Beim Materialverhalten kann man erkennen, dass CEM I 42,R Verhältnis 1 (kubisch raumzentriert) die höchste relative Fließgrenze (83 Nmm) besitzt. CEM I 42,5 R Verhältnis 2 weist eine Fließgrenze von (69 Nmm) auf. Beide Zemente weisen eine ähnliche relative Viskosität

von rund 0,35 auf. CEM I 42,5 R Verhältnis 3 (orthorhombisch) weist die niedrigste Fließgrenze (46Nmm) und die niedrigste Viskosität (0,22) auf (Abb. 5-6).

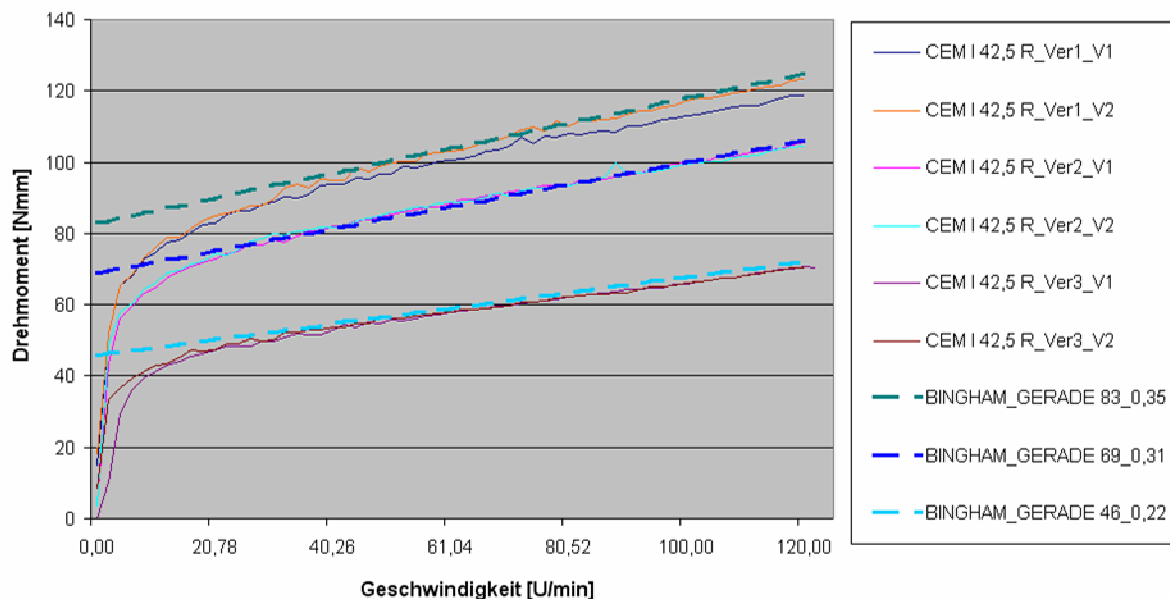


Abbildung 5-6: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe A2

5.1.3 Versuchsreihe A3

In Tabelle 5-3 ist die Versuchsreihe A3 dargestellt.

Tabelle 5-3: Versuchsreihe A3

A3 - Alkaligehalt		
Zement	Variation	Blaine cm ² /g
Gehalt 1 CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33	Alkaliarm	4.560
Gehalt 2 CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33	Alkalireich	4.730

Überblick über die Versuchsergebnisse

Drehmoment

Der alkalireiche Zement (CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT 33) weist am Anfang ein hohes Drehmoment auf. Das Drehmoment hat einen starken exponentiellen Abfall. Beim alkaliarmen Zement (CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT 33) ist das Drehmoment am Anfang deutlich geringer und fällt ebenfalls exponentiell ab. Sowohl der alkalireiche Zement wie auch der alkaliarme Zement weisen zu Versuchende hin ähnliche Drehmomente auf (siehe Abbildung 5-7)

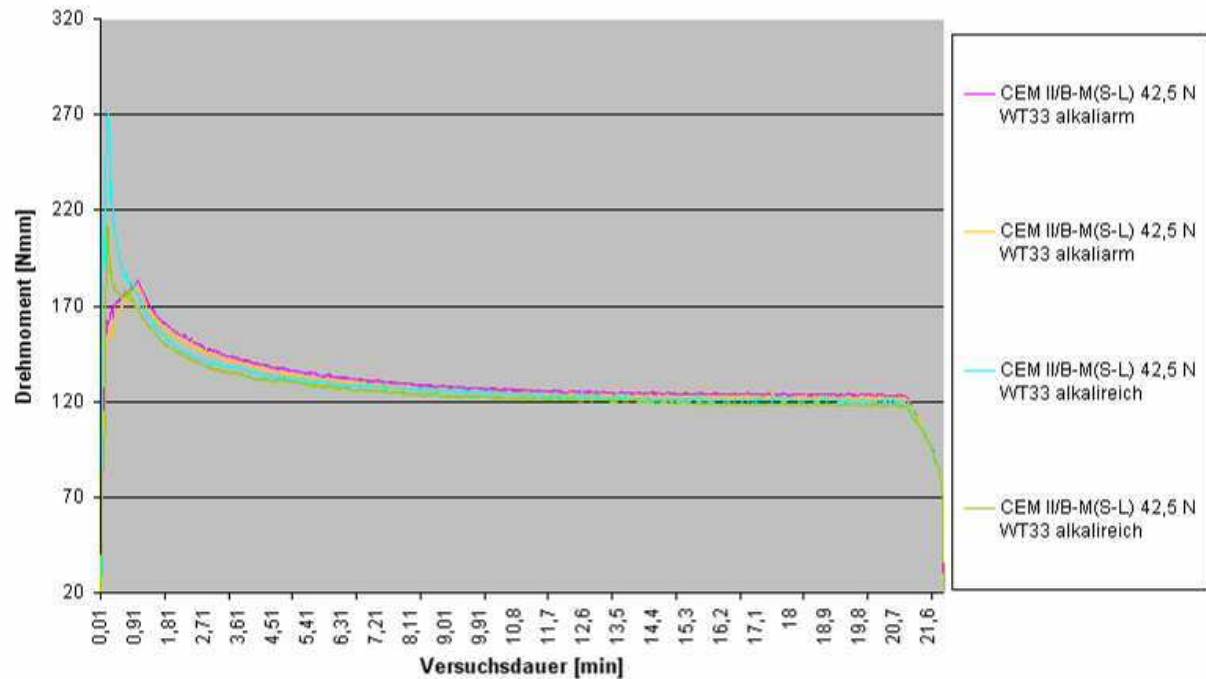


Abbildung 5-7: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe A3

Temperatur

Bei der Temperaturentwicklung ist kein Unterschied zwischen alkaliarmen und alkalireichen Zement aufgetreten (Abb. 5-8).

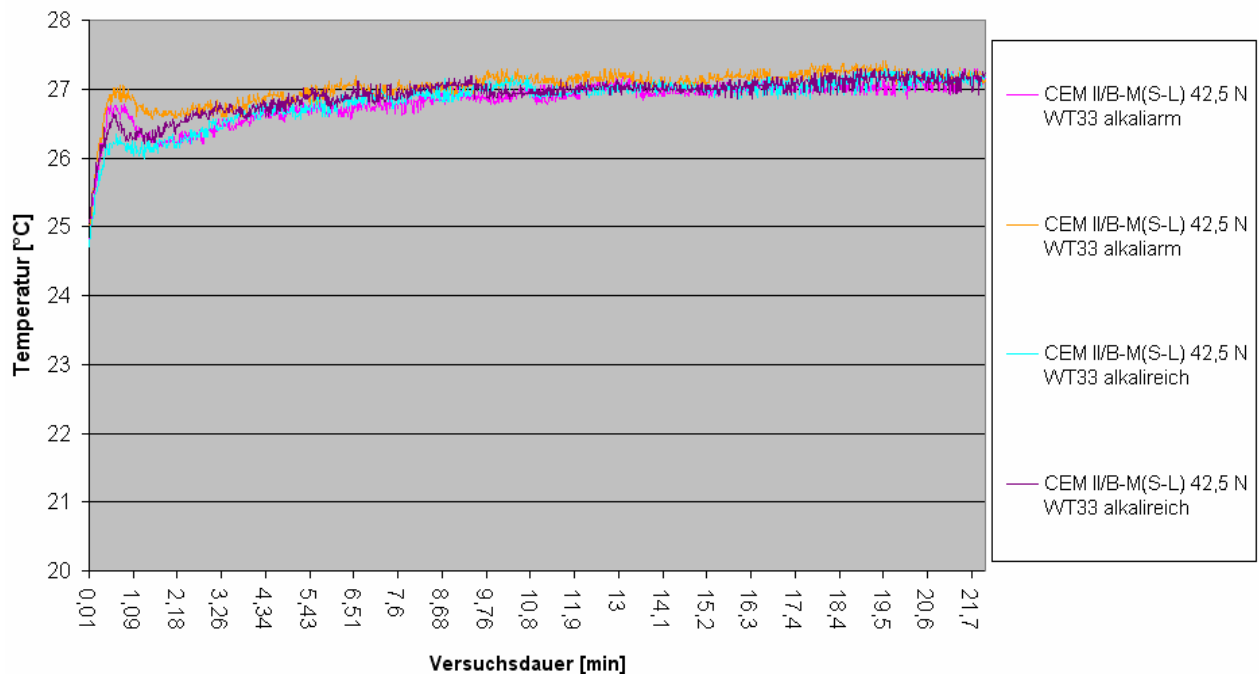


Abbildung 5-8: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe A3

Materialverhalten

Das Materialverhalten ist bei beiden Zementleimen ziemlich ähnlich (siehe Abbildung 5-9).

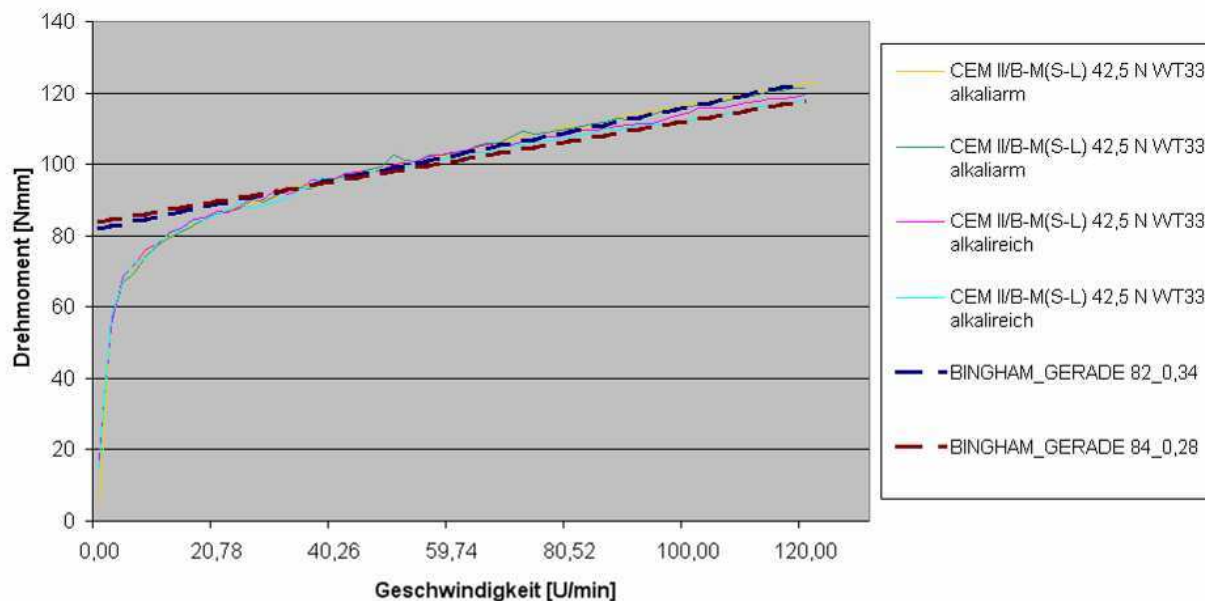


Abbildung 5-9: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe A3

5.1.4 Versuchsreihe B

In Tabelle 5-4 ist die Versuchsreihe B dargestellt.

Tabelle 5-4: Versuchsreihe B

Versuchsreihe B - Einfluss der Sulfatträger			
Zement	Variation	Blaine cm ² /g	
CEM I 42,5 R	Dihydrat 0,25%, Halbhydrat 4.358%	5.200	A
CEM I 42,5 R	Dihydrat 1.639%, Halbhydrat 2.547 %, Anhydrit 1.223 %	5.370	B

Überblick über die Versuchsergebnisse

Drehmoment

Der CEM I 42,5 R Variante A weist am Anfang ein hohes Drehmoment mit einen starken exponentiellen Abfall auf. Der CEM I 42,5 R Variante B weist am Anfang ein geringeres Drehmoment auf und auch einen exponentiellen Abfall auf. CEM I 42,5 R Variante A hat ein höheres Drehmoment beim Versuch als CEM I 42,5 R Variante B (Abb. 5-10). Der Unterschied liegt bei ca. 10%.

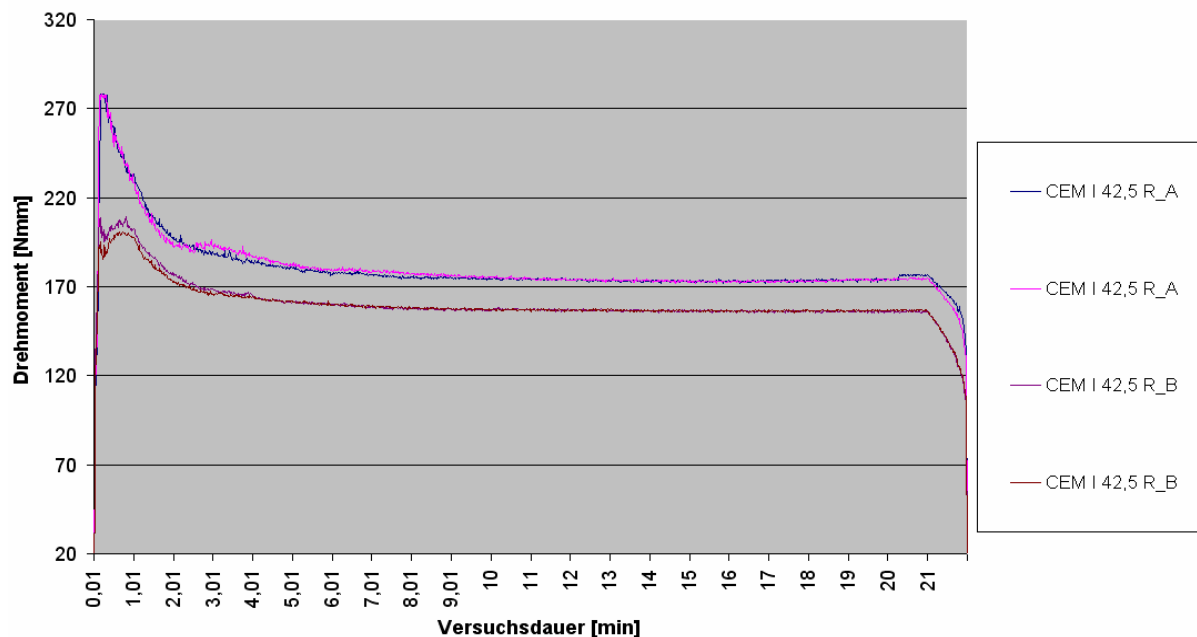


Abbildung 5-10: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe B

Temperatur

Bei der Temperatur ist nur ein geringer Unterschied zwischen CEM I 42,5 R Variante A und CEM I 42,5 R Variante B (Abb. 5-11). Der Zement mit dem Sulfatträger A weist eine höhere Temperatur auf als der Zement mit Sulfatträger B.

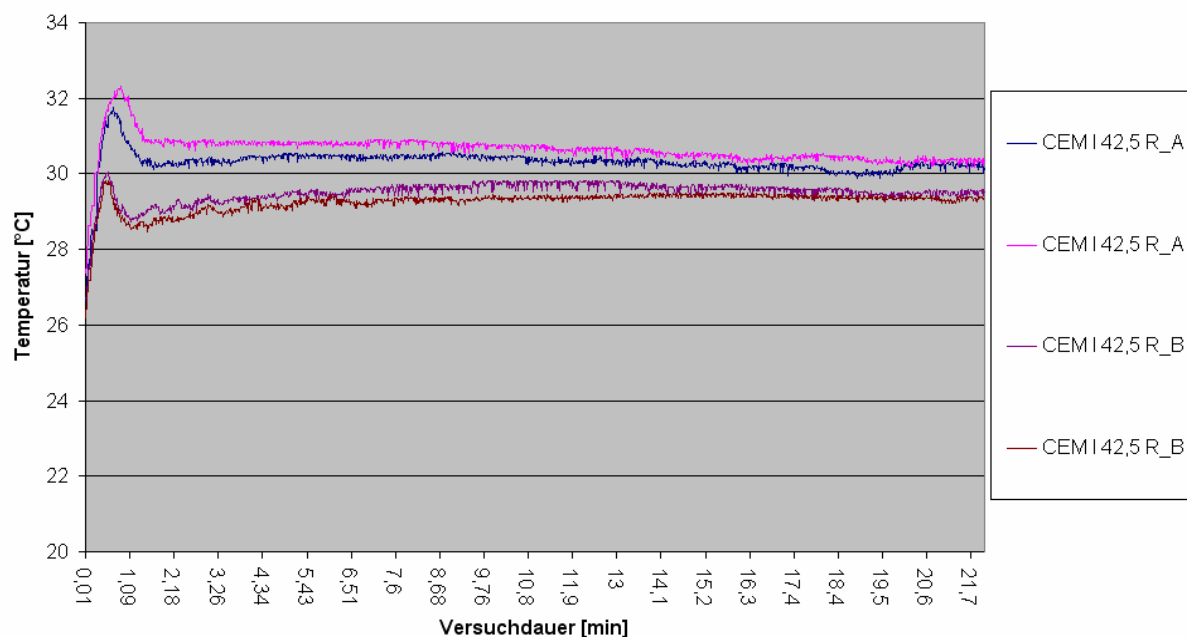


Abbildung 5-11: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe B

Materialverhalten

Der CEM I 42,5 R Variante A besitzt eine höhere relative Fließgrenze (147 Nmm), jedoch eine geringere Viskosität (0,23) als CEM I 42,5 R Variante B (Fließgrenze 124 Nmm ; Viskosität 0,30) (Abb. 5-12).

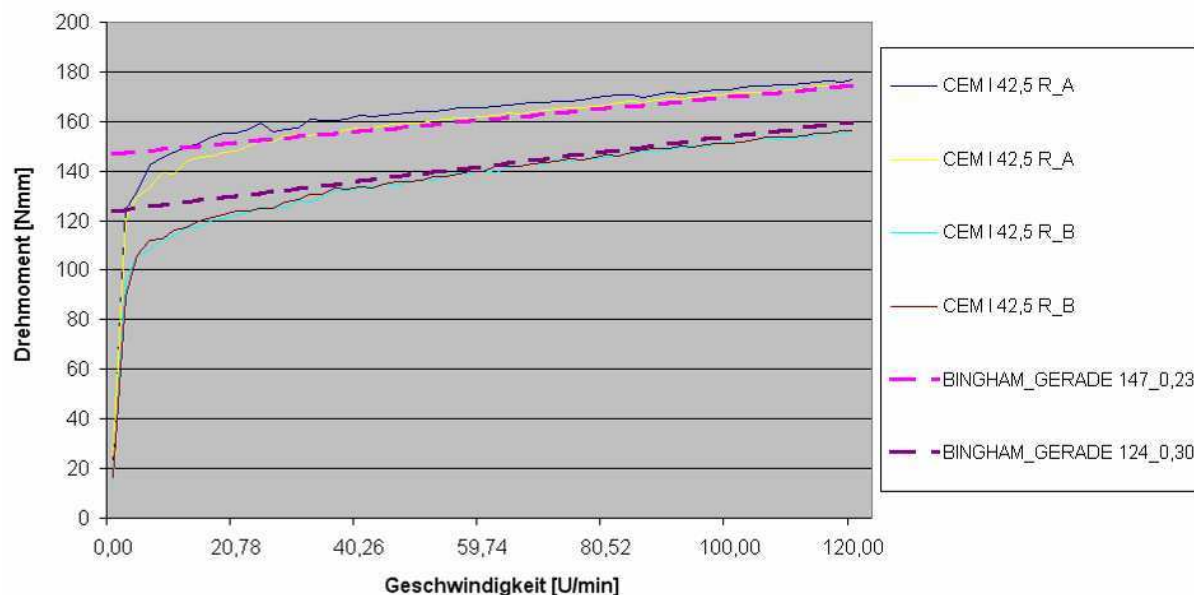


Abbildung 5-12: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe B

5.1.5 Versuchsreihe C1

In Tabelle 5-5 ist die Versuchsreihe C1 dargestellt.

Tabelle 5-5 : Versuchsreihe C1

C1 ohne Zusätze	
Zement	Blaine cm ² /g
CEM I 42,5 N	3.240
CEM I 42,5 R	4.520

Überblick über die Versuchsergebnisse

Drehmoment

Der Zement CEM I 42,5 R weist über die gesamte Versuchsdauer ein höheres Drehmoment auf als CEM I 42,5 N. Beide Zemente weisen einen starken exponentiellen Abfall am Anfang auf. Das Drehmoment des CEM I 42,5 R ist am Beginn relativ konstant und fällt anschließend exponentiell ab. Das Drehmoment korreliert mit dem Blaine-Wert (Abb. 5-13).

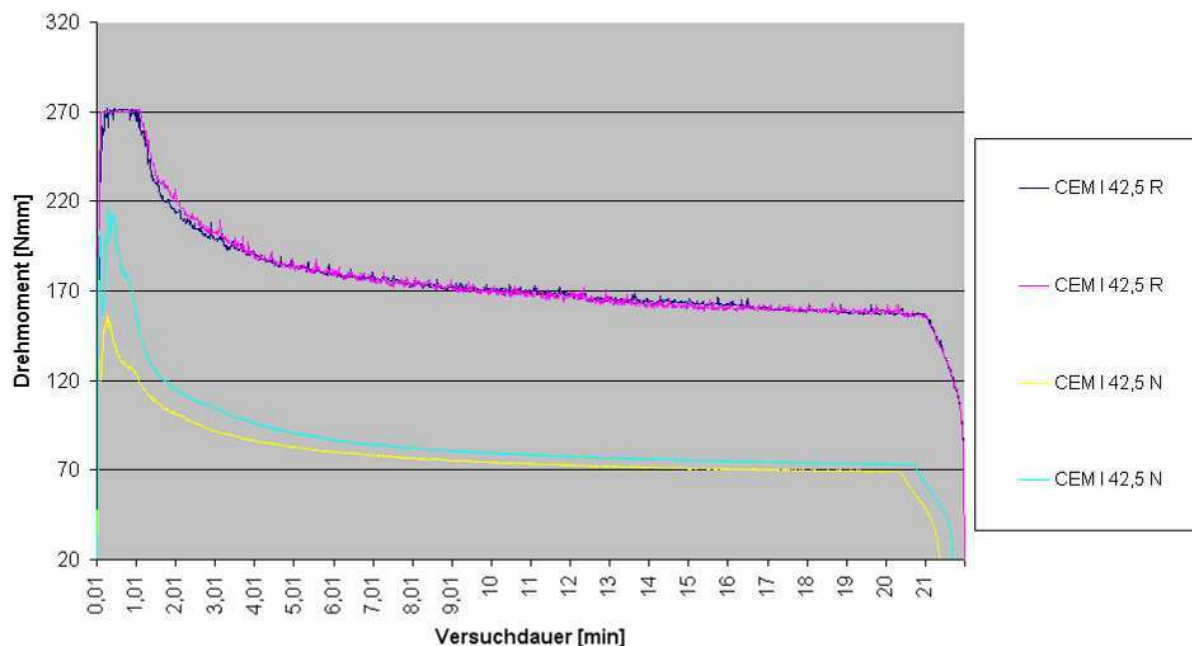


Abbildung 5-13: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe C1

Temperatur

Abbildung 5-14 zeigt, dass der CEM I 42,5 R eine höhere Temperaturentwicklung hat als CEM I 42,5 N.

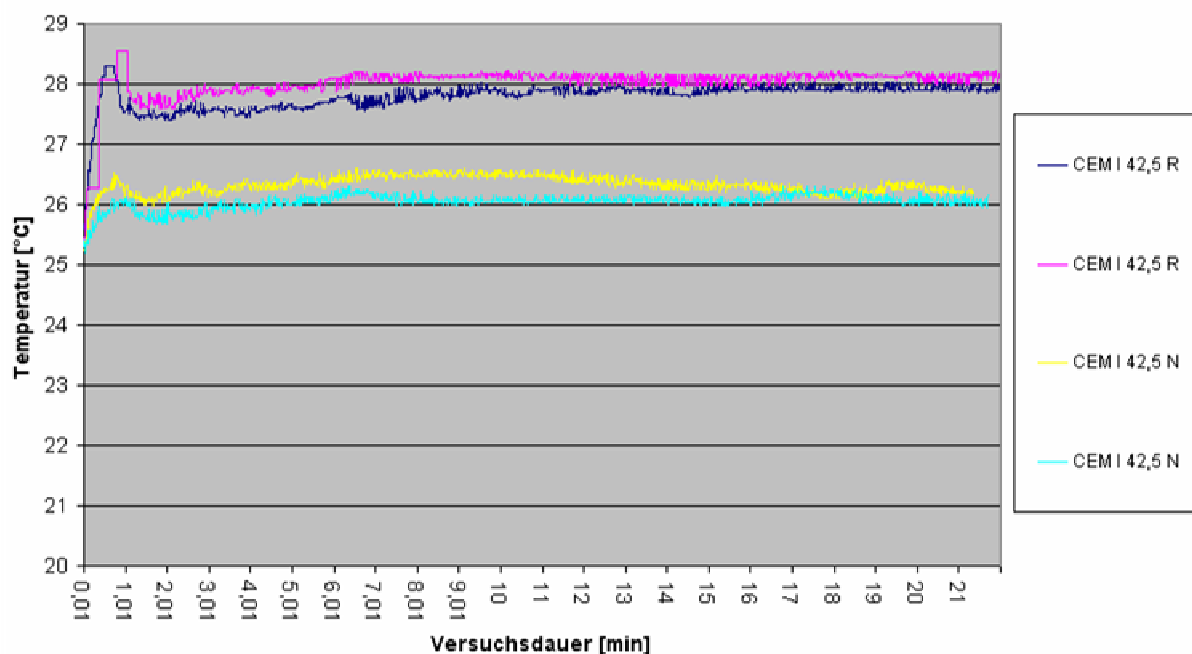


Abbildung 5-14: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe C1

Materialverhalten

Beim CEM I 42,5 R ist die relative Fließgrenze (108 Nmm) und Viskosität (0,40) deutlich höher als beim CEM I 42,5 N (Fließgrenze 37 Nmm und Viskosität 0,28) (Abb. 5-15).

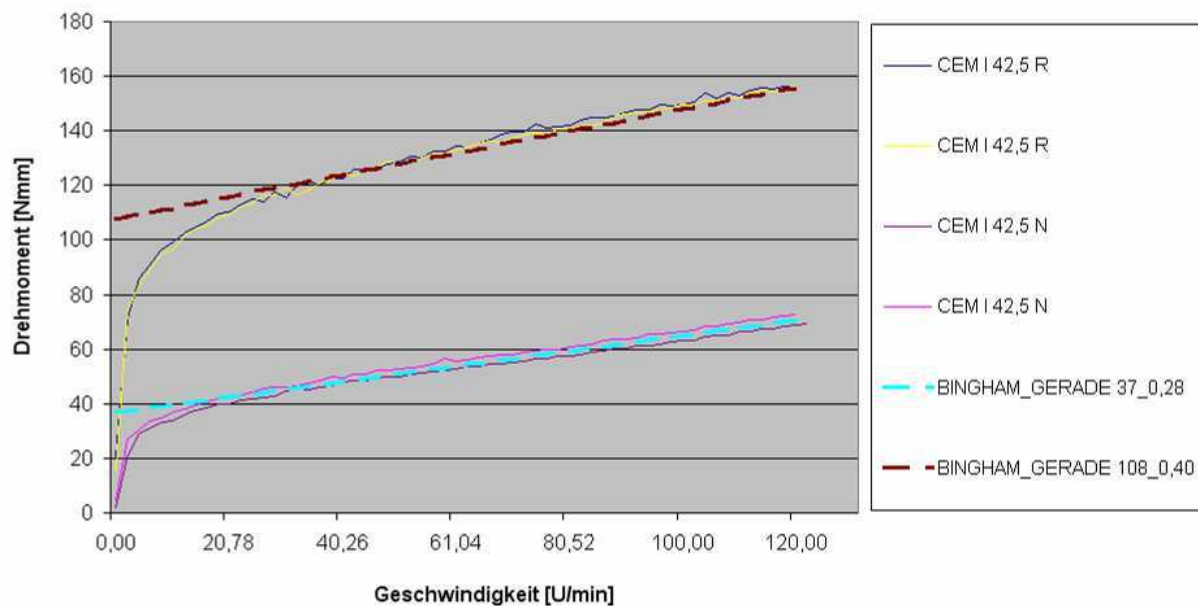


Abbildung 5-15: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe C1

5.1.6 Versuchsreihe C2

In Tabelle 5-6 ist die Versuchsreihe C2 dargestellt.

Tabelle 5-6: Versuchsreihe C2

C2 - Gehalt an Hüttensand		
Zement	Variation	Blaine cm ² /g
CEM II/A-S 32,5 R	6-20% S (10)	3.100
CEM II/B-S 42,5 N	21-35% S (23)	3.490
CEM III/A-S 32,5 N - LH	36-65% S (50)	3.930

Überblick über die Versuchsergebnisse

Drehmoment

Bei Abbildung 5-16 sieht man, dass CEM III/A-S 32,5 R (Zement mit dem meisten Hüttensand) das höchste Drehmoment aufweist. Prinzipiell kann man sagen, je höher der Anteil des Hüttensandes desto höher das Drehmoment. CEM II/A-S 32,5 R weist das niedrigste Drehmoment auf. Die Werte korrelieren auch mit dem Blaine-Werten der Zemente.

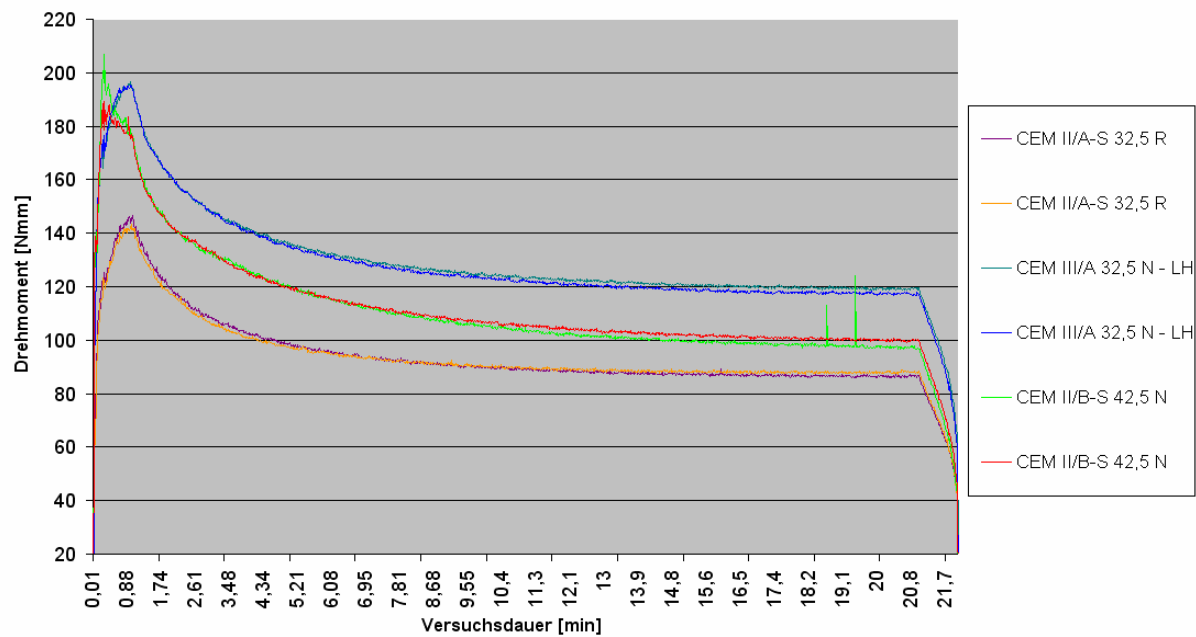


Abbildung 5-16: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe C2

Temperatur

Die höchste Temperatur ergab sich beim CEM II/A-S 32,5 R. Beim CEM III/A 32,5 N-LH und CEM II/B-S 42,5 N kann man keinen eindeutigen Unterschied in der Temperaturentwicklung feststellen (Abb. 5-17).

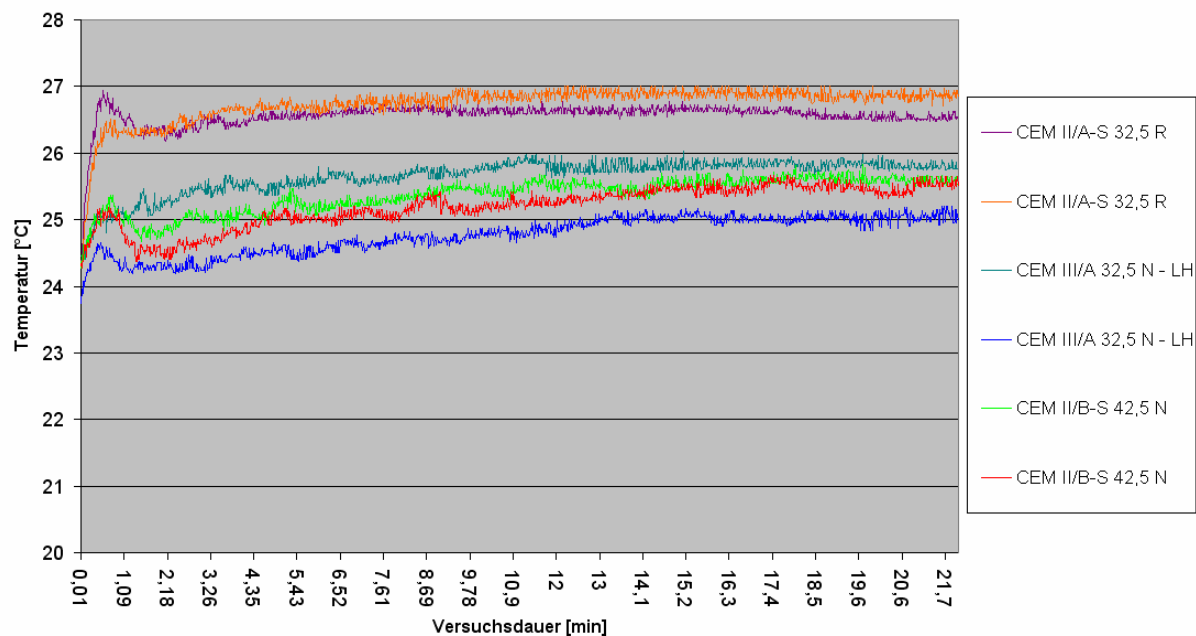


Abbildung 5-17: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe C2

Materialverhalten

Die Viskosität liegt bei allen Zementen in der gleichen Größenordnung von 0,28 – 0,36, die Fließgrenze ist jedoch bei den Zementen unterschiedlicher ausgeprägt. Je höher der Hütten-sandanteil umso höher die Fließgrenze (Abb. 5-18).

Beim CEM III/A 32,5 N-LH liegt die Fließgrenze bei 77 Nmm und die Viskosität liegt bei 0,36. CEM II/B-S 42,5 N hat die Fließgrenze von 58 Nmm und eine Viskosität von 0,33. Die niedrigste Fließgrenze und Viskosität weist der CEM II/A-S 32,5 R auf (55 Nmm und 0,28).

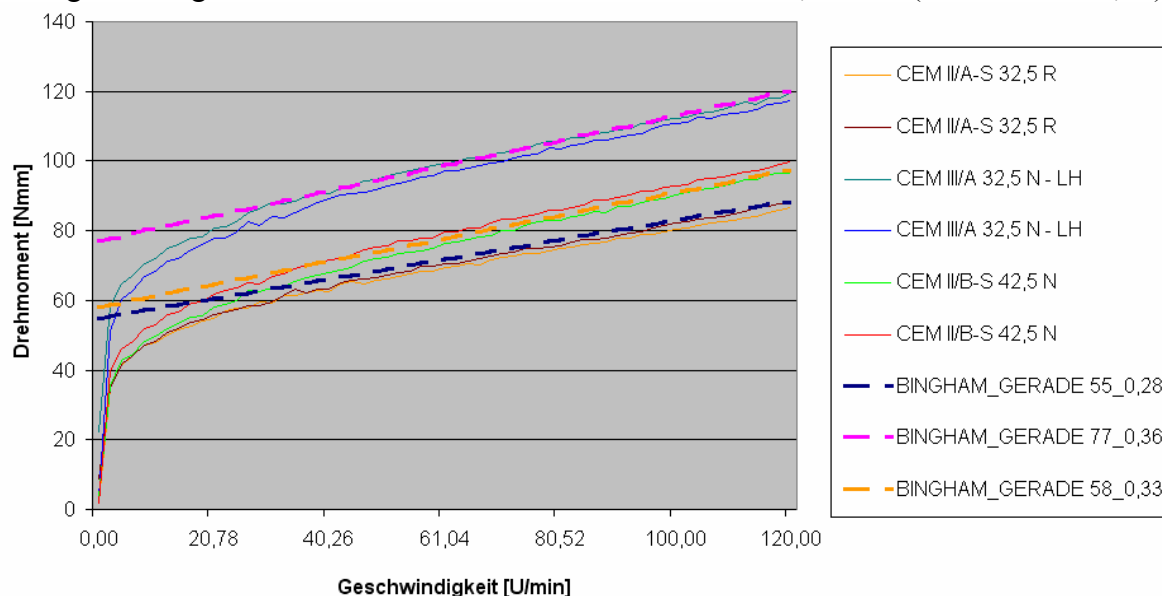


Abbildung 5-18: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe C2

5.1.7 Versuchsreihe C3

In Tabelle 5-7 ist die Versuchsreihe C3 dargestellt.

Tabelle 5-7: Versuchsreihe C3

C3 - Gehalt an Kalk		
Zement	Variation	Blaine cm ² /g
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33	12-20% L	4.510
CEM II B-M (S-L) 42,5 N WT 33	21-35% L	4.560

Überblick über die Versuchsergebnisse

Drehmoment

In Abbildung 5-19 ist ersichtlich dass der Zement mit dem höheren Kalkanteil das höhere Drehmoment aufweist.

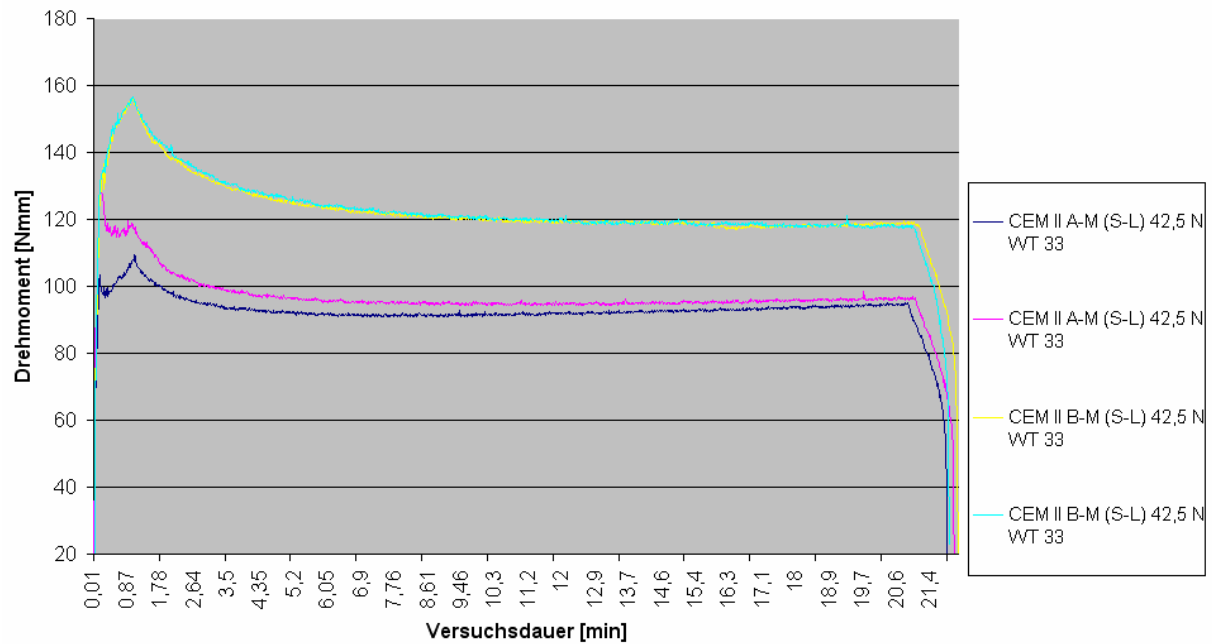


Abbildung 5-19: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe C3

Temperatur

Man kann einen Temperaturunterschied zwischen CEM II A-M(S-L) 42,5 N WT33 und CEM II B-M(S-L) 42,5 N WT 33 erkennen (Abbildung 11-20). CEM II A-M(S-L) 42,5 N WT33 weist eine um ca. 2°C höhere Temperatur beim Mischvorgang auf.

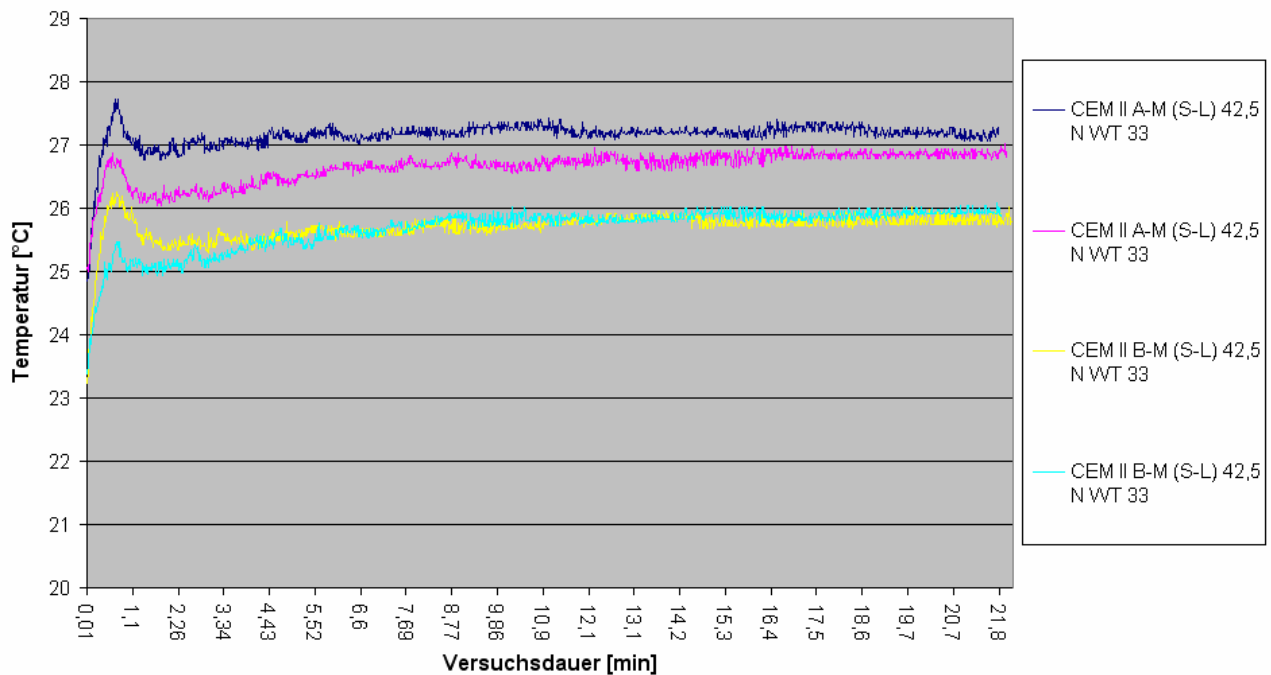


Abbildung 5-20: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe C3

Materialverhalten

CEM II B-M(S-L) 42,5 N WT 33 besitzt eine höhere Fließgrenze (84 Nmm) und eine höhere Viskosität (0,28) als CEM II A-M(S-L) 42,5 N WT33 (Fließgrenze von 65 Nmm und eine Viskosität 0,26) (Abbildung 5-21).

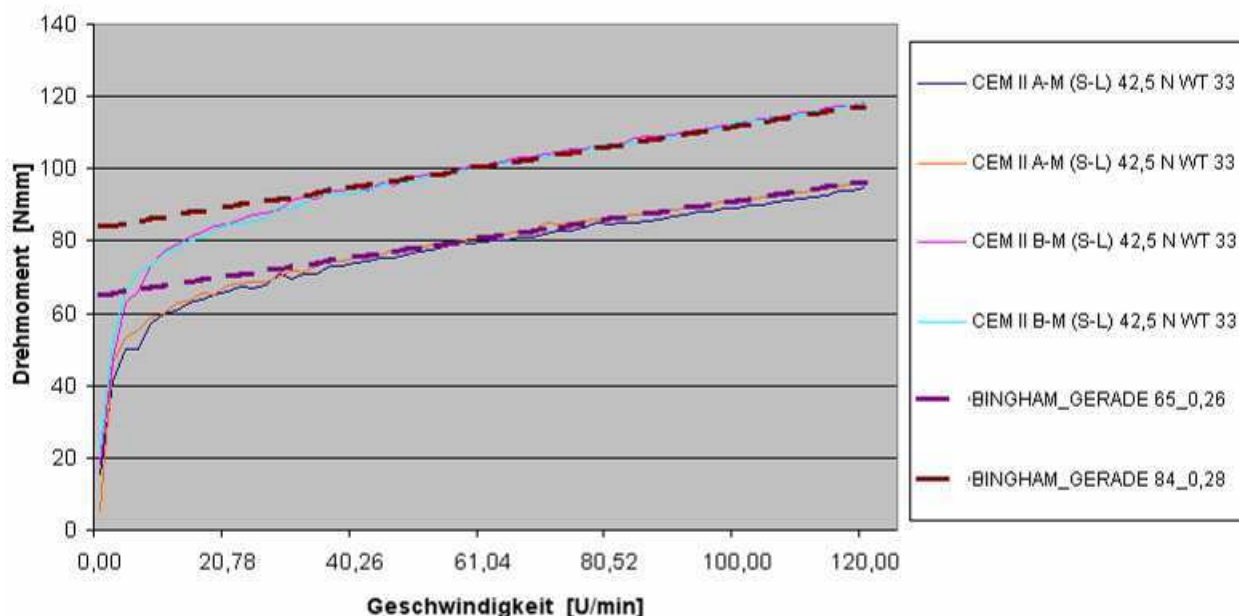


Abbildung 5-21: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe C3

5.1.8 Versuchsreihe C4

In Tabelle 5-8 ist die Versuchsreihe C4 dargestellt.

Tabelle 5-8: Versuchsreihe C4

C4 - Nachmahlung eines Zementes		
Zement	Variation	Blaine cm ² /g
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33	12-20% L	3.770
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33	12-20% L	4.510

Überblick über die Versuchsergebnisse

Drehmoment

In Abbildung 5-22 ist ersichtlich, dass Zement mit einer höheren Mahlfeinheit ein höheres Drehmoment aufweist. Am Versuchsanfang ist nur ein geringfügiger Unterschied zu sehen, der Unterschied wird zu Versuchende eindeutig.

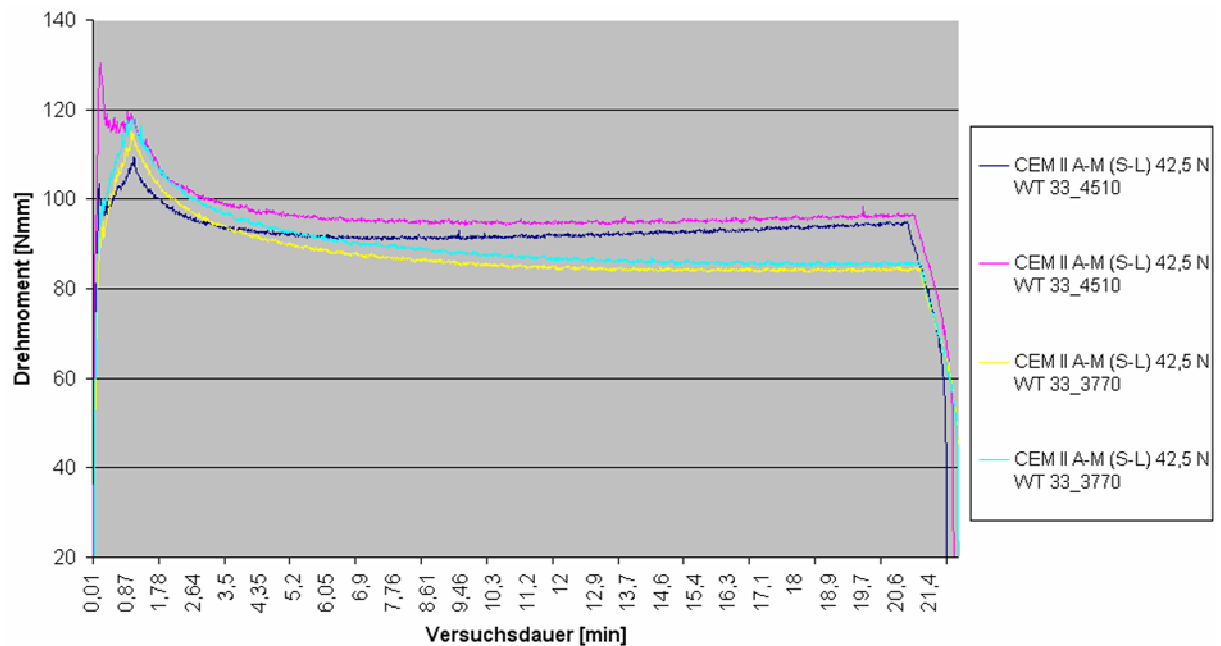


Abbildung 5-22: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe C4

Temperatur

Es ist kein großer Temperaturunterschied zwischen feinem und gröberem CEM II A-M(S-L) 42,5 N WT33 (Abb. 5-23) zu erkennen. Der Unterschied beträgt nur ca. 1°C.

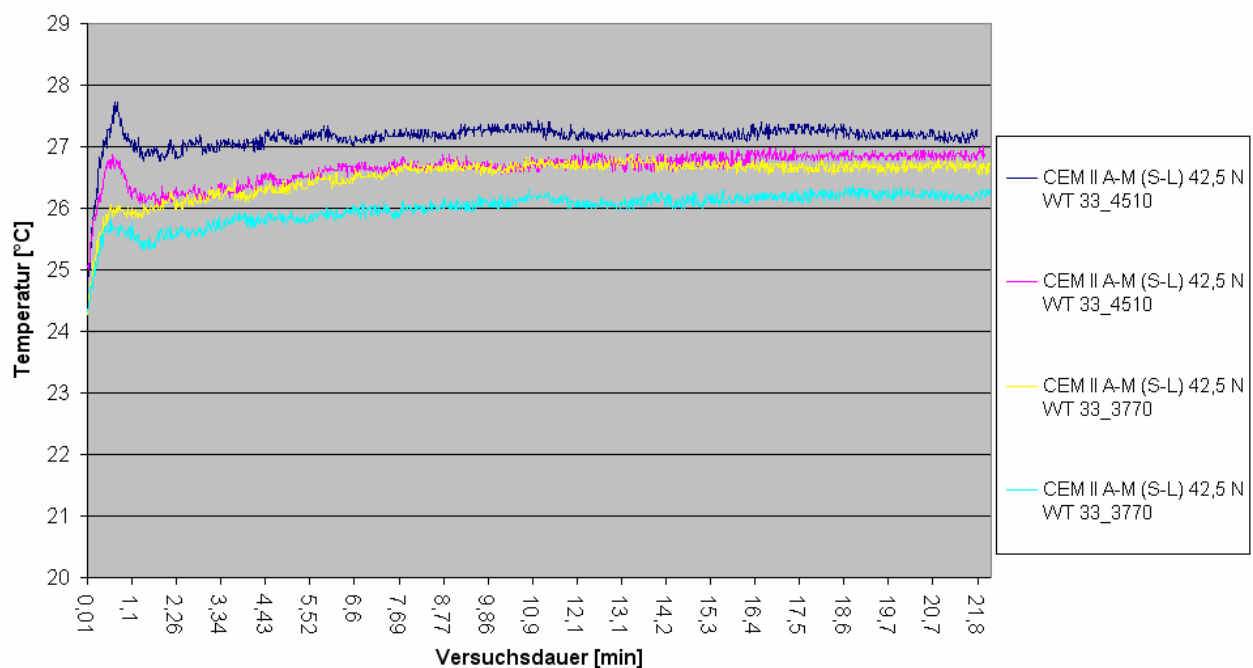


Abbildung 5-23: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe C4

Materialverhalten

Man erkennt in Abbildung 5-24, dass der CEM II B-M(S-L) 42,5 N WT 33 mit einem Blaine-Wert von 4510 eine höhere Fließgrenze besitzt, als der gröbere Zement (Blaine-Wert 3770). Die Viskosität bleibt annähernd gleich.

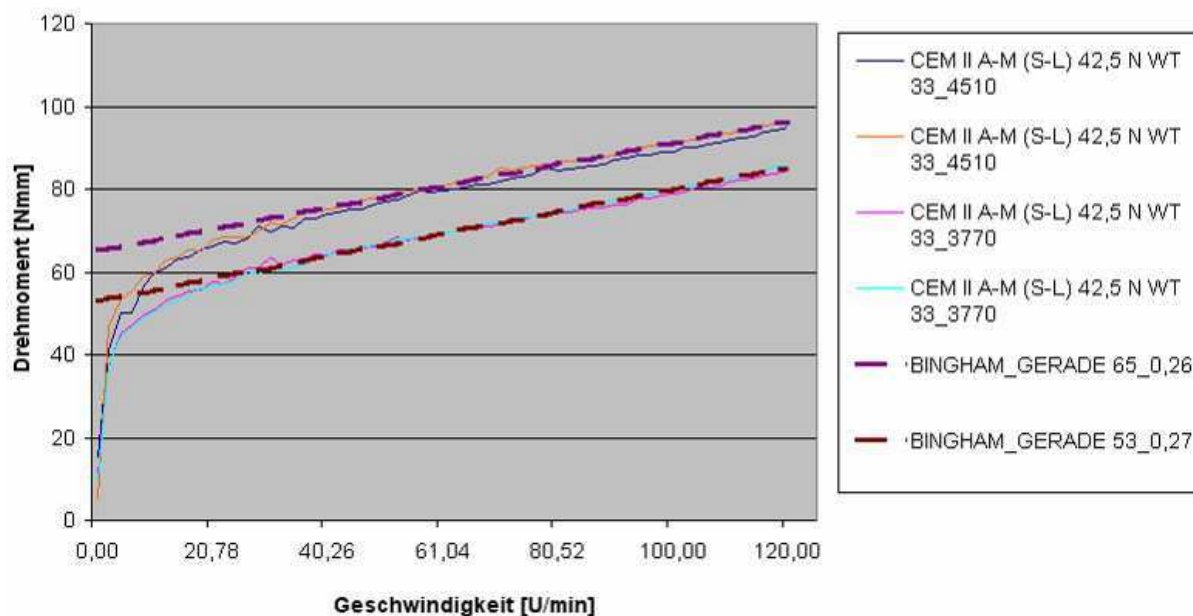


Abbildung 5-24: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe C4

5.1.9 Versuchsreihe D

In Tabelle 5-9 ist die Versuchsreihe D dargestellt

Tabelle 5-9: Versuchsreihe D

Versuchsreihe D - Feinheit der Zemente	
Zement	Blaine cm ² /g
CEM I 42,5 R grob	3.380
CEM I 42,5 R	5.200

Überblick über die Versuchsergebnisse

Drehmoment

Abbildung 5-25 zeigt, dass die Feinheit der Zemente einen maßgeblichen Einfluss auf das Drehmoment hat, d.h. der feinere Zement ein deutlich höheres Drehmoment über die gesamte Versuchsdauer besitzt.

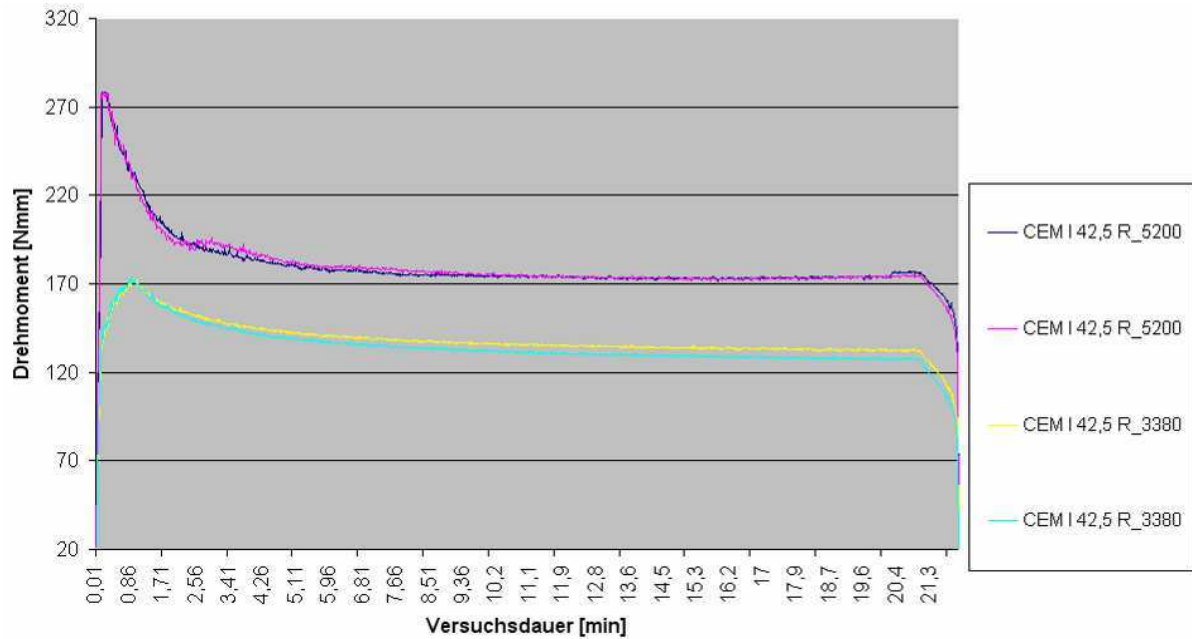


Abbildung 5-25: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe D

Drehmoment

Bei der Temperatur ist ebenfalls, wie zu erwarten, ein deutlicher Unterschied erkennbar zwischen den groben und feinen CEM I 42,5 R. Der Zement mit höherem Blaine-Wert hat ein deutlich höheres Temperaturniveau über die gesamte Versuchsdauer (Abb. 5-26).

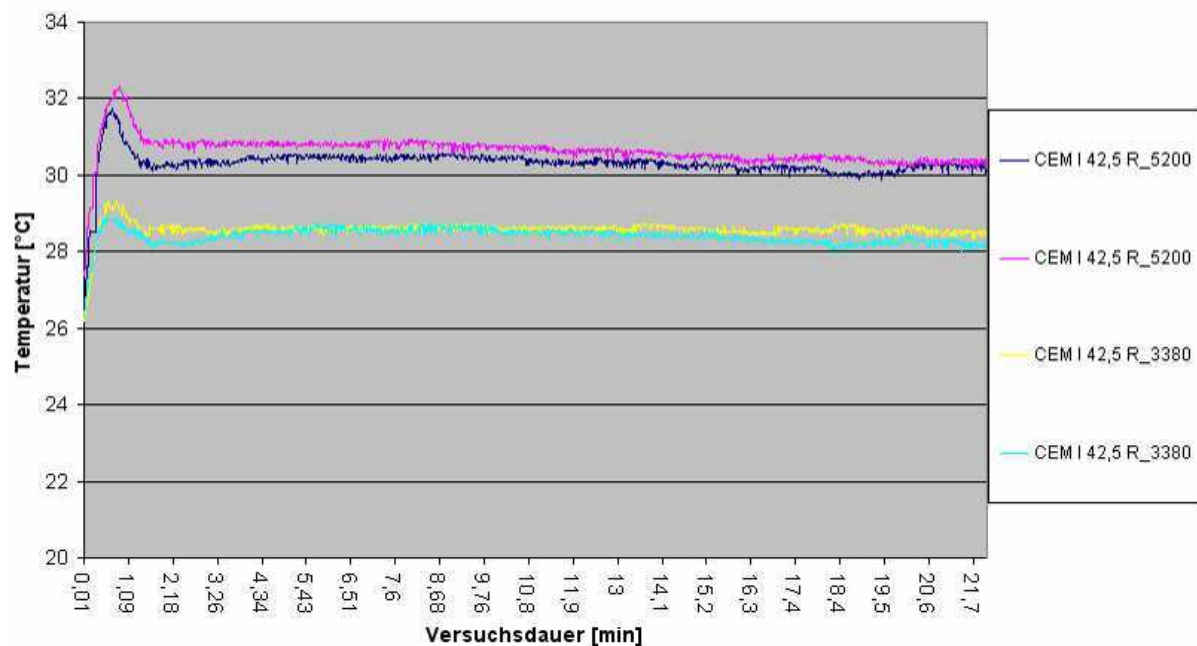


Abbildung 5-26: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe D

Materialverhalten

Der Zement CEM I 42,5 R mit einen Blaine-Wert von 5200 hat eine deutlich höhere Fließgrenze (147). Der gröbere CEM I 42,5R (3380) hat eine niedrigere Fließgrenze (105). Beide Zemente weisen gleiche Viskosität auf (0,23) (Abb. 5-27).

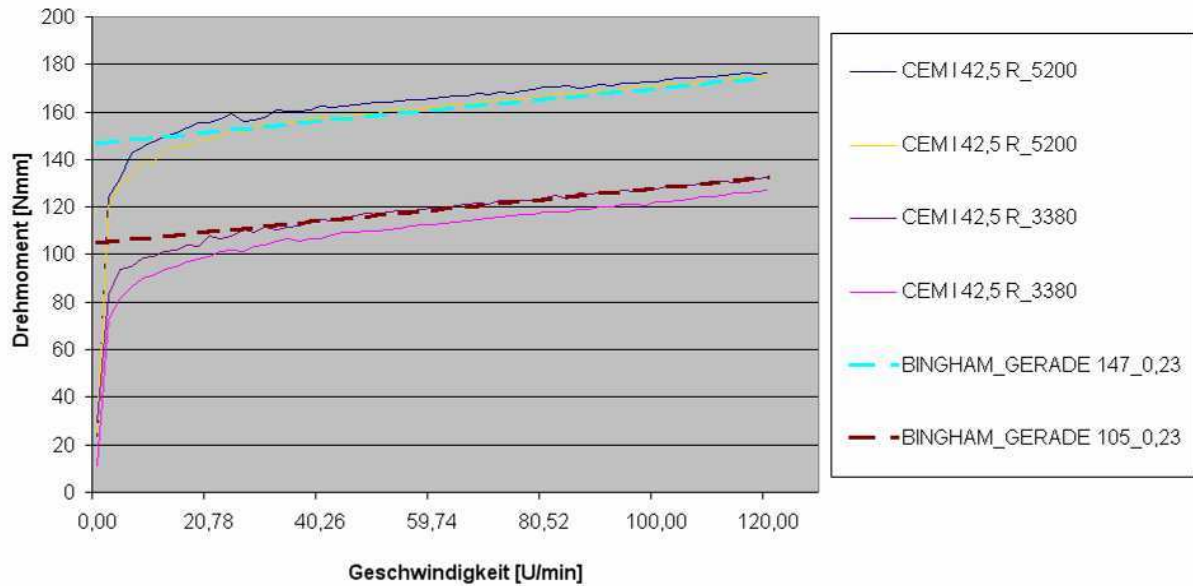


Abbildung 5-27: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe D

5.1.10 Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuchsreihen

In Tabelle 5-10 sind die Ergebnisse der Versuchsreihen tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 5-10: Zusammenfassen der Ergebnisse

Zement	Variation	Fließgrenze	Viskosität
A1 - C3A Gehalt			
CEM I 42,5 R/HS	C3A frei	98 Nmm	0,31
CEM I 42,5 R	Gehalt 2	147 Nmm	0,23
A2 - Verhältnis cub/orth			
CEM I 42,5 R	Verhältnis 1	83 Nmm	0,35
CEM I 42,5 R	Verhältnis 2	69 Nmm	0,31
CEM I 42,5 R	Verhältnis 3	46 Nmm	0,22
A3 - Alkaligehalt			
Gehalt 1 CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33	Alkaliarm	82 Nmm	0,34
Gehalt 2 CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33	Alkalireich	84 Nmm	0,28
B - Einfluss der Sulfatträger			
CEM I 42,5 R	A	147 Nmm	0,23
CEM I 42,5 R	B	124 Nmm	0,3
C1 ohne Zusätze			
CEM I 42,5 N	3.240	37 Nmm	0,28
CEM I 42,5 R	4.520	108 Nmm	0,4
C2 - Gehalt an Hüttensand			
CEM II/A-S 32,5 R	6-20% S (10)	55 Nmm	0,28
CEM II/B-S 42,5 N	21-35% S (23)	58 Nmm	0,36
CEM III/A-S 32,5 N - LH	36-65% S (50)	77 Nmm	0,36
C3 - Gehalt an Kalk			
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33	12-20% L	65 Nmm	0,26
CEM II B-M (S-L) 42,5 N WT 33	21-35% L	84 Nmm	0,28
C4 - Nachmahlung eines Zementes			
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33	4510	65 Nmm	0,26
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33	3770	53 Nmm	0,27
D - Feinheit der Zemente			
CEM I 42,5 R grob		105 Nmm	0,23
CEM I 42,5 R		147 Nmm	0,23

5.2 Hauptversuch mit Fließmittel

Für die Hauptversuche wurden drei verschiedene Fließmittel ausgewählt. Bei der Versuchsauswertung wurde nicht mehr wie im vorigen Abschnitt nach den in Versuchsreihen sondern nach dem verwendeten Zementen einzeln ausgewertet. Da sich meist ein ähnliches Bild bei allen Zementen ergab wurden für die Beschreibung zwei Zemente ausgewählt, die ein möglichst unterschiedliches Materialverhalten aufweisen. Die anderen Zemente werden im Anhang dargestellt. Dargestellt bzw. näher diskutiert werden:

- CEM I 42,5 R_VER3 (Versuchsreihe A3)
- CEM I 42,5 R/HS (Versuchsreihe A1)

Die Darstellungen zeigen also vor allem die unterschiedlichen Auswirkungen der Fließmittel auf den Zementleim.

Zement CEM I 42,5 R Verhältnis 3

Drehmoment

In Abbildung 5-28 ist zu sehen, dass bei allen Fließmittel der Scherwiderstand deutlich reduziert wird. Bei Fließmittel 2 ist diese Reduktion am besten zu beobachten. Man kann im Diagramm (Abb.5-28) die Zugabe des Fließmittels deutlich erkennen. Das Drehmoment sinkt nach den ersten 3 Minuten nach der Zugabe deutlich ab und steigt anschließend wieder an. Je mehr Fließmittel im Zementleim vorhanden ist, desto weniger deutlich ist dieser Effekt. Man kann einige Spitzen erkennen. Bei diesen Spitzen handelt es sich um Verunreinigungen im Material.

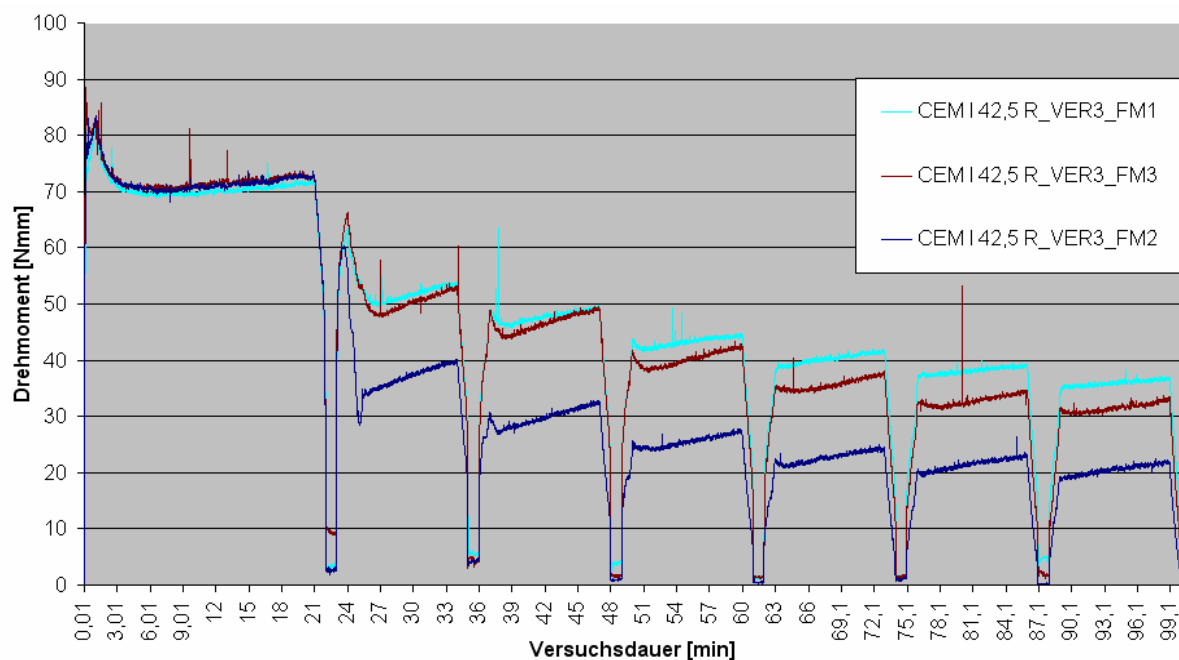


Abbildung 5-28: Scherwiderstand vom Zementleim mit Fließmittel

Temperatur

Die Temperaturentwicklung zeigt bei allen Versuchen eine kontinuierliche Abnahme (Abb. 5-29). Auf diese Darstellung wird daher im Weiteren verzichtet.

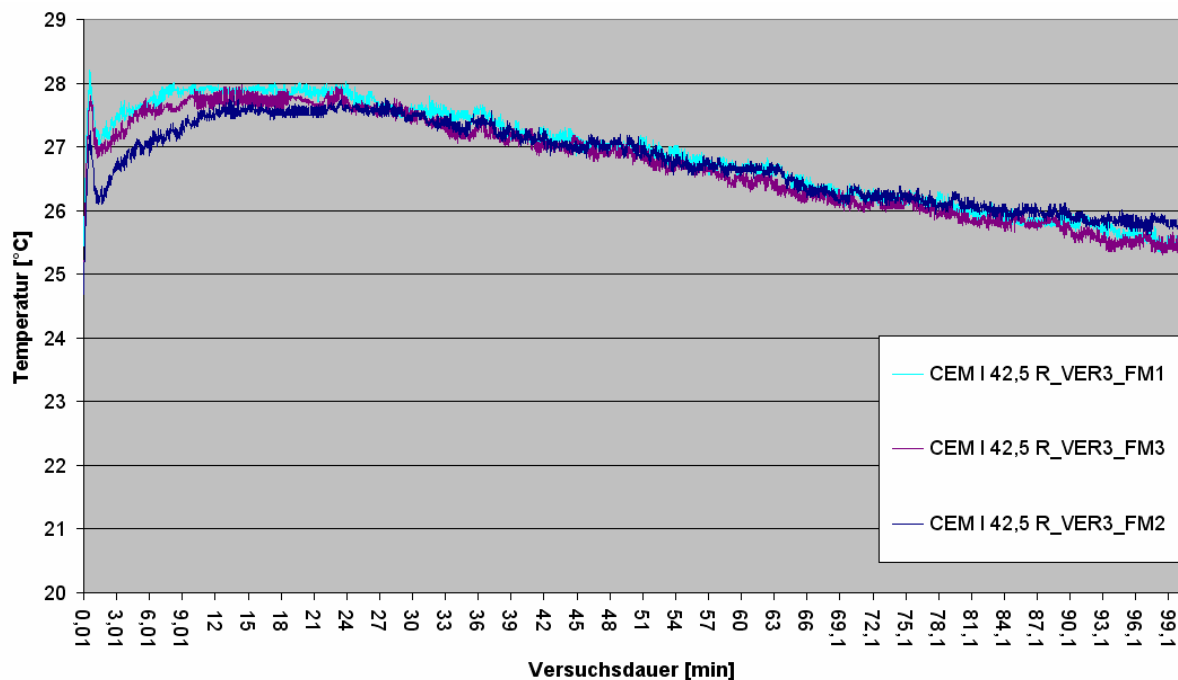


Abbildung 5-29: Temperaturentwicklung von Zementleimen mit Fließmittel

Materialverhalten

Bei Fließmittel 1 - 3 ist zu erkennen, dass es sich bei den Zementleimen um ein *Bingham'sches* Medium mit dilatantem Verhalten handelt. Bei Fließmittel 1 wird die Fließgrenze deutlich herabgesetzt (von 46 auf 12 Nmm) und die relative Viskosität ($\sim 0,21$) bleibt erhalten (Abb. 5-30). In Abbildung 5-30 sieht man bei den verschiedenen Fließmittelgehalten, dass sich die Viskosität kaum ändert. Die Fließgrenze sinkt bei einem zunehmenden Fließmittelgehalt.

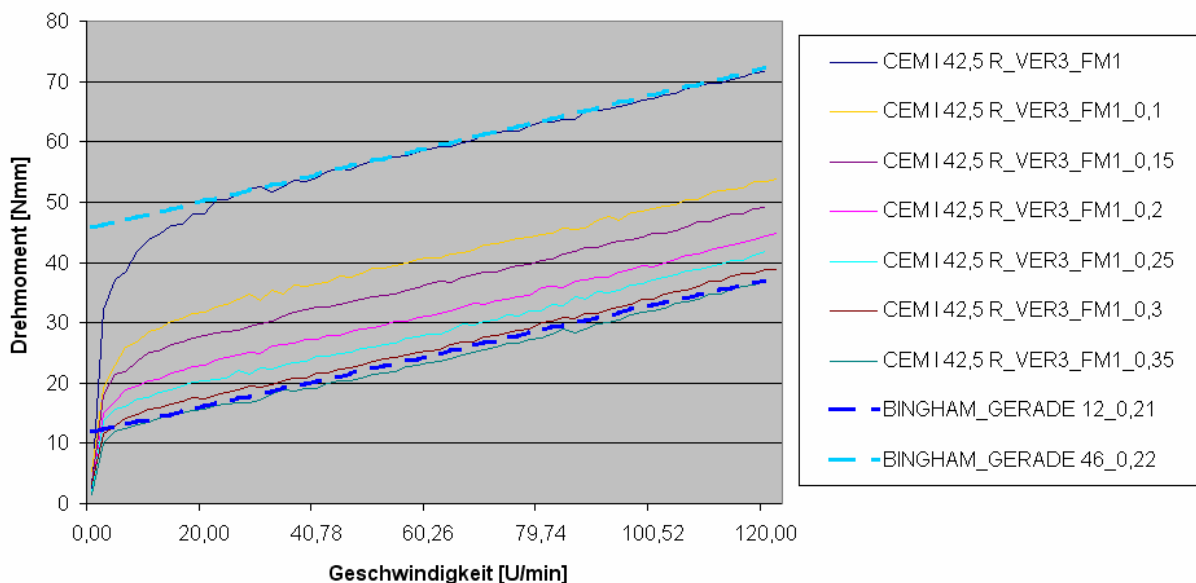


Abbildung 5-30: Materialverhalten von Zementleim mit Fließmittel 1

Fließmittel 2 beeinflusst das Materialverhalten am stärksten. Es sinken sowohl die Fließgrenze von 46 auf 1,5 Nmm als auch die Viskosität von 0,22 auf 0,17 bei zunehmenden Fließmittelgehalt (Abb. 5-31).

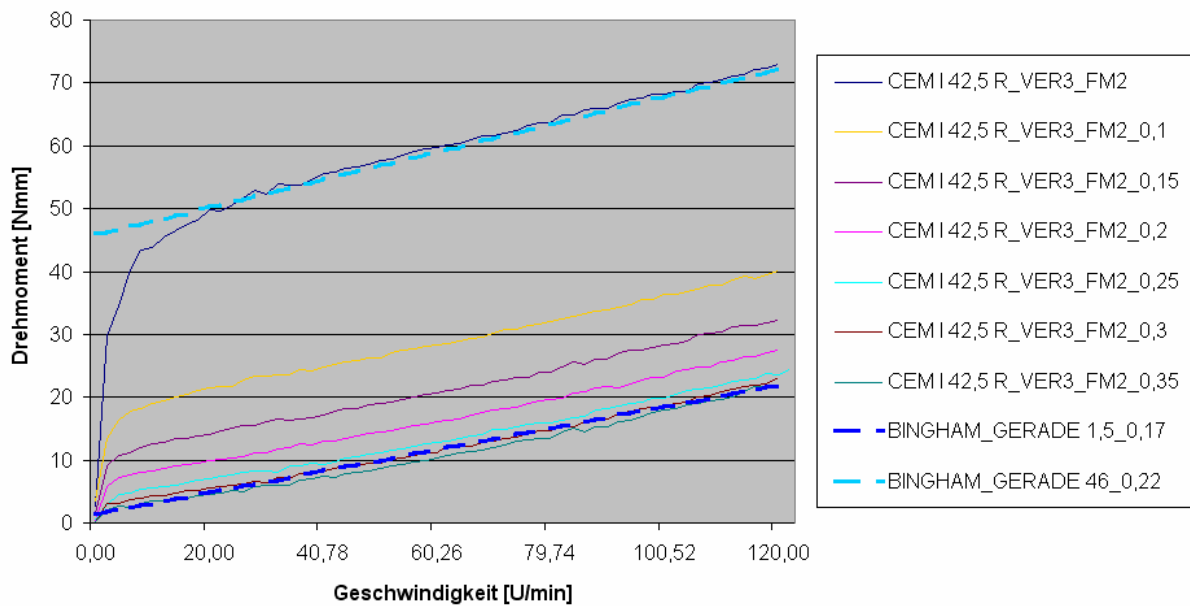


Abbildung 5-31: Materialverhalten von Zementleim mit Fließmittel 2

Fließmittel 3 ist ähnlich dem Wirkungsverhalten von Fließmittel 1. Es wird die Fließgrenze von 46 auf 6 Nmm verringert. Die Viskosität (0,22) verändert sich bei zunehmendem Fließmittelgehalt nicht (Abb. 5-32).

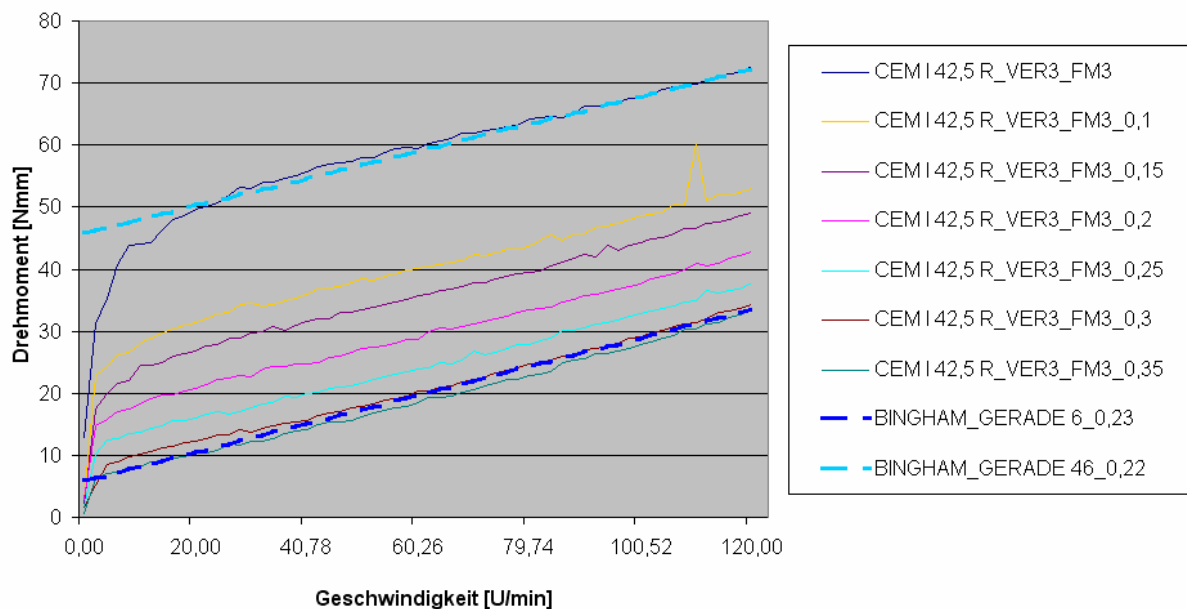


Abbildung 5-32: Materialverhalten von Zementleim mit Fließmittel 3

Sättigungskurve

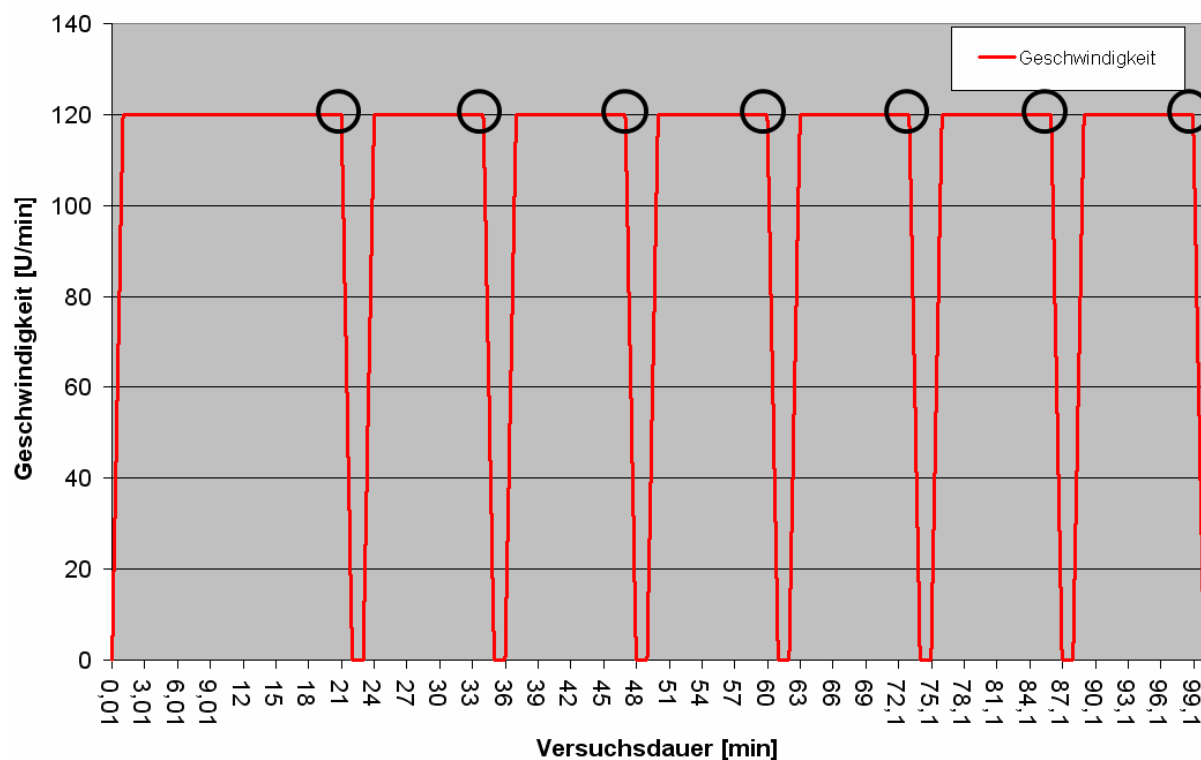


Abbildung 5-33: Auswertung der Sättigungspunkte

Es wurden jeweils die Drehmomente bei 120 U/min ausgewertet (schwarze Kreise in Abb. 5-33). Abbildung 5-34 zeigt das abfallende Drehmoment in Abhängigkeit der Zugabemenge des jeweiligen Fließmittels. Die stärkste Wirkung zeigt sich bei Fließmittel 2. Es ist auch am Kurvenverlauf erkennbar, dass eine höhere Fließmittelzugabe keine signifikante Verbesserung des Fließverhaltens mehr bewirkt.

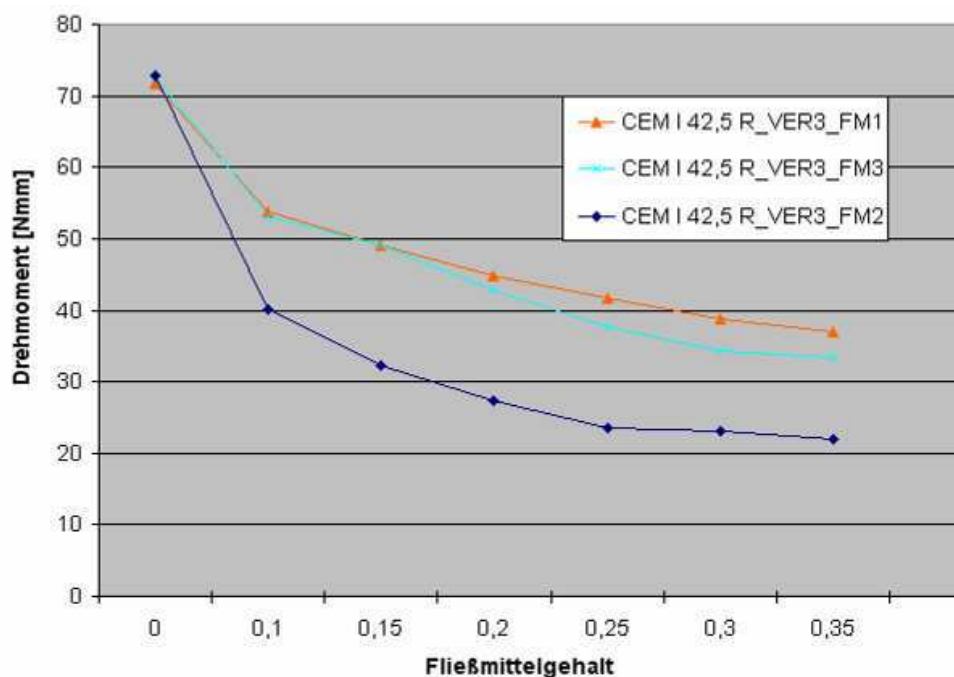


Abbildung 5-34: Sättigungskurven von Zementleimen mit Fließmittel

Zement CEM I 42,5 R/HS

Drehmoment

Abbildung 5-35 zeigt, dass auch bei diesem Zement das Fließmittel 2 den Scherwiderstand am deutlichsten reduziert. Der Vermischungsvorgang bei der Zugabe ist auch bei diesem Zement zu sehen (vgl. Abb.5-28).

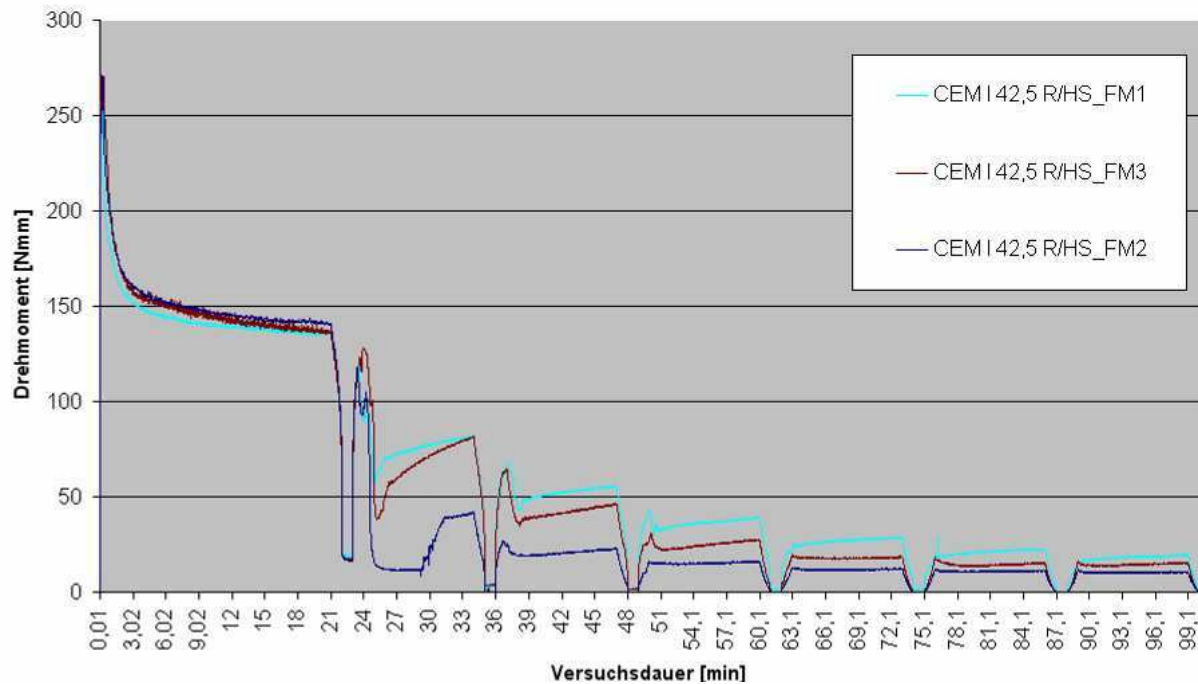


Abbildung 5-35: Scherwiderstand vom Zementleim mit Fließmittel

Temperatur

Bei der Temperaturentwicklung kann man erkennen, dass auch hier ein kontinuierlicher Abfall auftritt. Die Temperaturentwicklung ist vom Fließmittel abhängig. (Abb. 5-36).

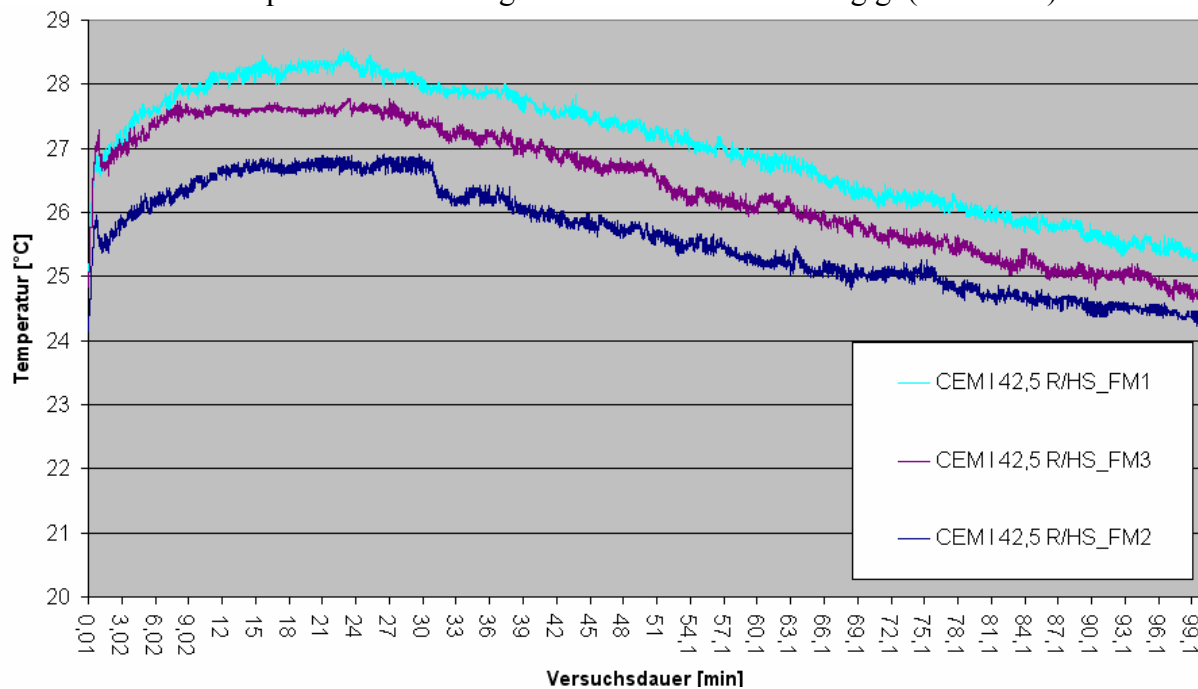


Abbildung 5-36: Temperaturverhalten von Zementleim mit Fließmittel

Materialverhalten

Bei Fließmittel 1 kann man eine Reduktion der Fließgrenze von 98 Nmm auf 1 Nmm und eine Verminderung der Viskosität von 0,31 auf 0,15 erkennen (Abb. 5-37).

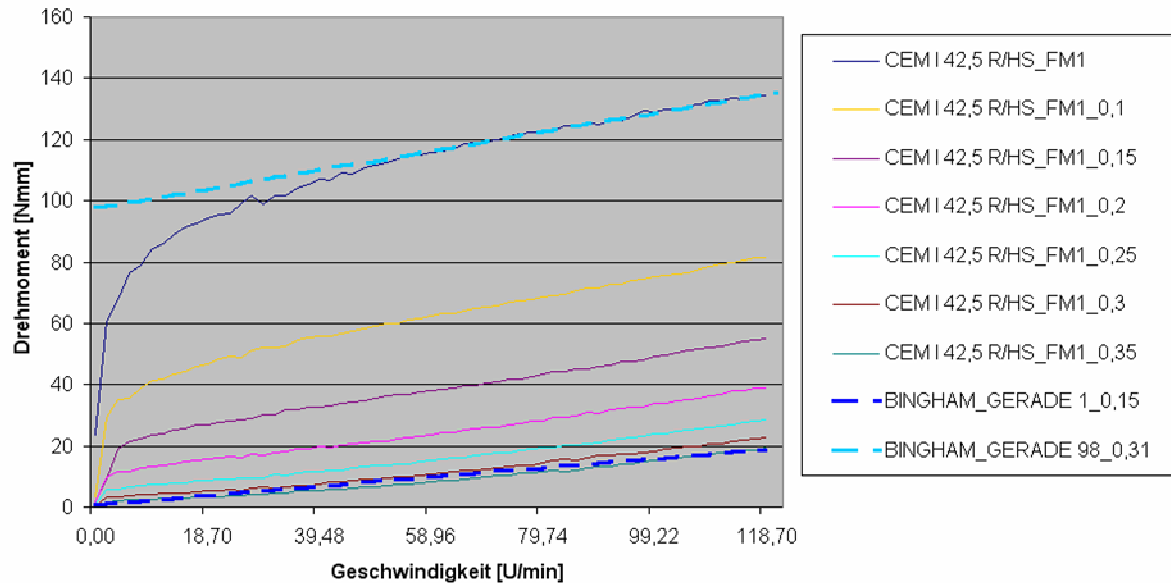


Abbildung 5-37: Materialverhalten von Zementleim mit Fließmittel 1

Beim Zementleim mit Fließmittel 2 handelt es sich um eine *Newton'sche* Flüssigkeit mit dilatantem Verhalten (Abb. 5-38). Die Fließgrenze wird zu Null und die Viskosität wird stark vermindert von 0,31 auf 0,09. Aufgrund dieser starken Reduktion neigt dieser Zementleim zur Entmischung.

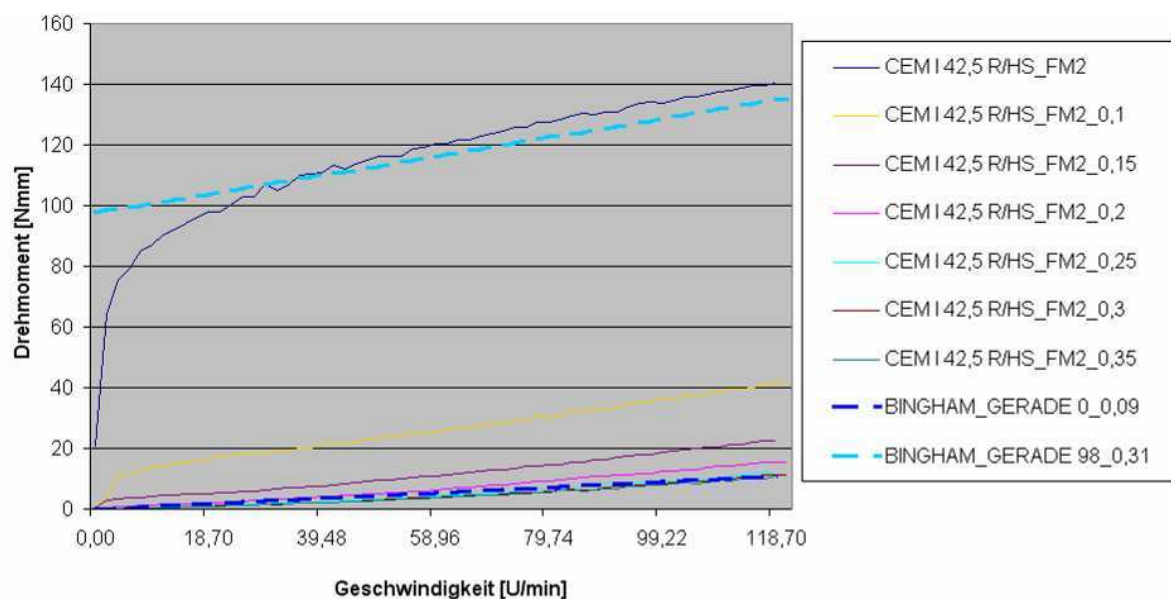


Abbildung 5-38: Materialverhalten von Zementleim mit Fließmittel 2

Der Zementleim mit Fließmittel 3 ist ebenfalls eine *Newton'sche* Flüssigkeit (Abb. 5-39). Dieser Zementleim weist die gleiche Viskosität auf wie der Zementleim mit Fließmittel 1.

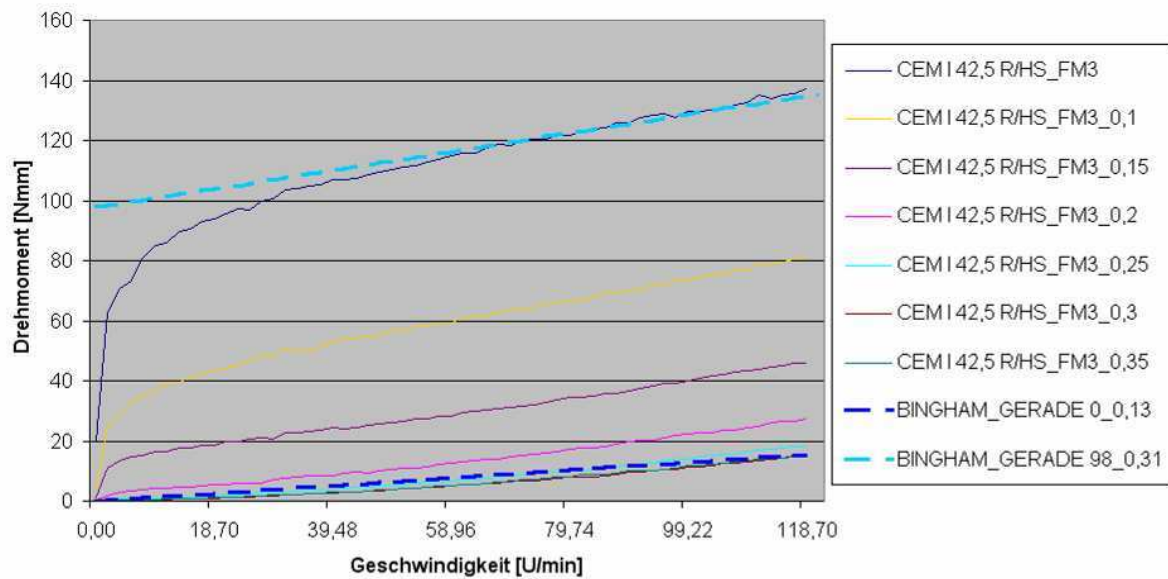


Abbildung 5-39: Materialverhalten von Zementleim mit Fließmittel 3

Sättigungskurve

Der Zementleim mit Fließmittel 2 erreicht am schnellsten die Sättigung. Alle Zementleime haben annähernd die gleichen Drehmomente bei einem Fließmittelgehalt von 0,35 (Abb. 5-40).

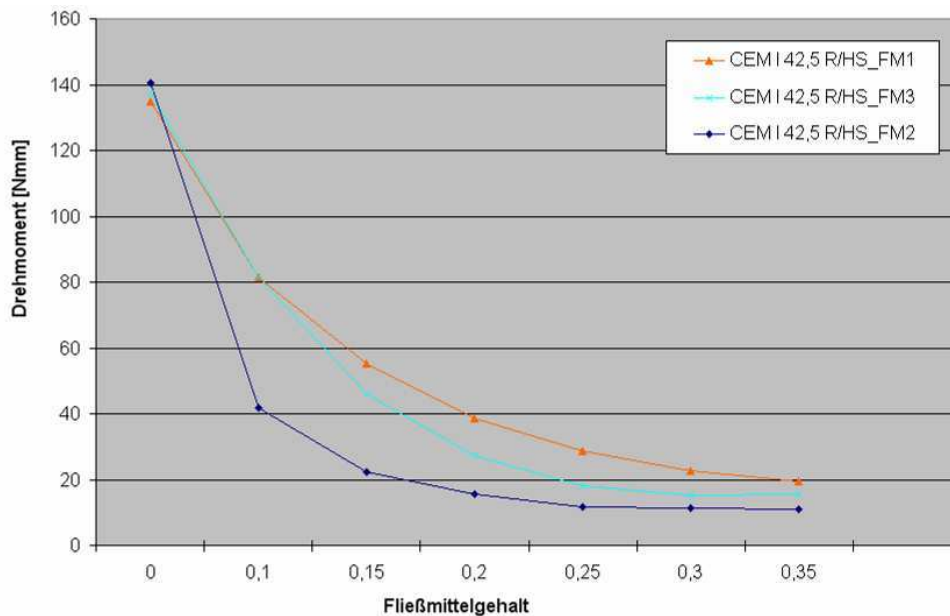


Abbildung 5-40: Sättigungskurven von Zementleimen mit Fließmittel

5.2.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Fließmittelversuche sind in Tabelle 5-11, 5-12 und 5-13 dargestellt:

Tabelle 5-11: Zusammenfassen der Ergebnisse

Zement	Fließmittel- gehalt: 0		Fließmittel- gehalt: 0,1		Fließmittel- gehalt: 0,15		Fließmittel- gehalt: 0,2		Fließmittel- gehalt: 0,25		Fließmittel- gehalt: 0,3		Fließmittel- gehalt: 0,35	
	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η
A1 - C₃A Gehalt														
CEM I 42,5 R/HS - FM1	98	0,31	44	0,31	21	0,28	11	0,23	5	0,19	2	0,17	1	0,15
CEM I 42,5 R/HS - FM2	98	0,35	11	0,25	2	0,17	0	0,13	0	0,10	0	0,09	0	0,09
CEM I 42,5 R/HS - FM3	93	0,36	39	0,35	13	0,28	1,5	0,21	0	0,15	0	0,13	0	0,13
CEM I 42,5 R - FM1	143	0,24	105	0,22	93	0,21	86	0,23	80	0,23	75	0,24	75	0,24
CEM I 42,5 R - FM2	132	0,20	63	0,21	42	0,21	26	0,21	17	0,21	12	0,20	8	0,20
CEM I 42,5 R - FM3	140	0,20	100	0,23	85	0,23	74	0,24	65	0,23	52	0,23	40	0,24
A2 - Verhältnis cub/orth														
CEM I 42,5 R - Ver 1 - FM1	83	0,35	55	0,35	49	0,35	42	0,36	34	0,36	27	0,36	23	0,35
CEM I 42,5 R - Ver 1 - FM2	83	0,24	35	0,23	21	0,23	12	0,22	7	0,23	5	0,23	3	0,23
CEM I 42,5 R - Ver 1 - FM3	79	0,36	52	0,33	39	0,35	30	0,34	20	0,35	17	0,30	13	0,37
CEM I 42,5 R - Ver 2 - FM1	69	0,31	40	0,31	37	0,31	27	0,32	21	0,31	17	0,31	15	0,30
CEM I 42,5 R - Ver 2 - FM2	69	0,31	15	0,23	10	0,24	5	0,24	3	0,23	2	0,23	1	0,23
CEM I 42,5 R - Ver 2 - FM3	67	0,30	35	0,31	25	0,30	18	0,31	12	0,31	9	0,31	7	0,31
CEM I 42,5 R - Ver 3 - FM1	46	0,22	28	0,21	23	0,21	19	0,22	15	0,22	13	0,21	12	0,21
CEM I 42,5 R - Ver 3 - FM2	46	0,22	17	0,19	11	0,18	6	0,18	3	0,18	2	0,18	2	0,17
CEM I 42,5 R - Ver 3 - FM3	46	0,22	26	0,22	23	0,22	16	0,22	11	0,22	8	0,22	6	0,23
A3 - Alkaligehalt														
Gehalt 1 CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33 (Alkaliarm) - FM1	85	0,31	46	0,31	33	0,28	24	0,28	16	0,28	11	0,28	9	0,28
Gehalt 1 CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33 (Alkaliarm) - FM2	85	0,31	15	0,23	7	0,22	3	0,32	2	0,18	0	0,18	0	0,10
Gehalt 1 CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33 (Alkaliarm) - FM3	85	0,31	43	0,30	27	0,28	14	0,27	7	0,27	3	0,26	1	0,25
Gehalt 2 CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33 (Alkalireich) - FM1	80	0,31	60	0,31	50	0,31	39	0,31	29	0,31	22	0,31	18	0,31
Gehalt 2 CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33 (Alkalireich) - FM2	83	0,31	35	0,29	17	0,27	8	0,27	5	0,25	2	0,25	1	0,23
Gehalt 2 CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33 (Alkalireich) - FM3	79	0,32	67	0,30	55	0,32	43	0,32	28	0,32	18	0,32	7	0,32

Tabelle 5-12: Zusammenfassen der Ergebnisse

Zement	Fließmittel- gehalt: 0		Fließmittel- gehalt: 0,1		Fließmittel- gehalt: 0,15		Fließmittel- gehalt: 0,2		Fließmittel- gehalt: 0,25		Fließmittel- gehalt: 0,3		Fließmittel- gehalt: 0,35	
	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η
B - Einfluss der Sulfatträger														
CEM I 42,5 R [A] - FM1	143	0,24	105	0,22	93	0,21	86	0,23	80	0,23	75	0,24	75	0,24
CEM I 42,5 R [A] - FM2	132	0,20	63	0,21	42	0,21	26	0,21	17	0,21	12	0,20	8	0,20
CEM I 42,5 R [A] - FM3	140	0,20	100	0,23	85	0,23	74	0,24	65	0,23	52	0,23	40	0,24
CEM I 42,5 R [B] - FM1	126	0,30	89	0,28	75	0,29	65	0,29	54	0,28	42	0,29	35	0,30
CEM I 42,5 R [B] - FM2	126	0,30	64	0,30	40	0,27	25	0,26	13	0,24	7	0,21	4	0,20
CEM I 42,5 R [B] - FM3	126	0,32	93	0,31	81	0,30	68	0,31	55	0,30	38	0,31	27	0,31
C1 ohne Zusätze														
CEM I 42,5 N - FM1	35	0,30	14	0,26	8	0,26	5	0,25	4	0,24	3	0,24		
CEM I 42,5 N - FM2	40	0,31	4	0,23	1	0,22	0	0,21	0	0,19	0	0,18	0	0,18
CEM I 42,5 N - FM3	35	0,30	12	0,28	5	0,26	1	0,27	0	0,26	0	0,25		
CEM I 42,5 R - FM1	108	0,40	76	0,40	61	0,40	42	0,40	28	0,38	17	0,38	12	0,38
CEM I 42,5 R - FM2	108	0,40	34	0,31	15	0,28	6	0,23	2	0,21	0	0,20	0	0,18
CEM I 42,5 R - FM3	108	0,40	70	0,40	38	0,40	20	0,38	10	0,40	4	0,40	3	0,40
C2 - Gehalt an Hüttensand														
CEM III/A-S 32,5 R - FM1	55	0,28	55	0,28	55	0,28	55	0,28	55	0,28	55	0,28	55	0,28
CEM III/A-S 32,5 R - FM2	55	0,30	12	0,21	5	0,19	2	0,18	0	0,16	0	0,13	0	0,13
CEM III/A-S 32,5 R - FM3	55	0,29	20	0,28	9	0,23	2	0,23	1	0,22	0	0,21	0	0,21
CEM III/B-S 42,5 N - FM1	58	0,33	15	0,30	8	0,29	4	0,28	2	0,28	1	0,26	1	0,26
CEM III/B-S 42,5 N - FM2	55	0,33	5	0,22	1	0,22	0	0,19	0	0,17	0	0,17	0	0,17
CEM III/B-S 42,5 N - FM3	58	0,35	14	0,33	4	0,33	1	0,33	0	0,31	0	0,28	0	0,27
CEM III/A-S 32,5 N-LH - FM1	77	0,36	22	0,30	8	0,25	2	0,23	2	0,22	1	0,18	1	0,17
CEM III/A-S 32,5 N-LH - FM2	77	0,36	13	0,26	3	0,20	1	0,15	0	0,13	0	0,11	0	0,11
CEM III/A-S 32,5 N-LH - FM3	77	0,37	11	0,31	1	0,27	1	0,24	0	0,19	0	0,16	0	0,16

Tabelle 5-13: Zusammenfassen der Ergebnisse

Zement	Fließmittel- gehalt: 0		Fließmittel- gehalt: 0,1		Fließmittel- gehalt: 0,15		Fließmittel- gehalt: 0,2		Fließmittel- gehalt: 0,25		Fließmittel- gehalt: 0,3		Fließmittel- gehalt: 0,35	
	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η	FG [Nmm]	η
C3 - Gehalt an Kalk														
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33 - FM1	65	0,26	33	0,24	24	0,24	18	0,24	13	0,23	10	0,21	8	0,21
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33 - FM2	67	0,27	18	0,23	9	0,21	4	0,18	2	0,16	1	0,14	0	0,14
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33 - FM3	65	0,26	38	0,25	25	0,26	13	0,24	7	0,23	4	0,21	2	0,21
CEM II B-M (S-L) 42,5 N WT 33 - FM1	80	0,31	60	0,31	50	0,31	39	0,31	29	0,31	22	0,31	18	0,31
CEM II B-M (S-L) 42,5 N WT 33 - FM2	83	0,31	35	0,29	17	0,27	8	0,27	5	0,25	2	0,25	1	0,23
CEM II B-M (S-L) 42,5 N WT 33 - FM3	79	0,32	67	0,30	55	0,32	43	0,32	28	0,32	18	0,32	7	0,32
Versuchsreihe D - Feinheit der Zemente														
CEM I 42,5 R grob - FM1	105	0,23	56	0,23	45	0,23	35	0,23	27	0,23	27	0,23	27	0,23
CEM I 42,5 R grob - FM2	108	0,26	36	0,24	20	0,23	11	0,21	3	0,19	4	0,18	1	0,18
CEM I 42,5 R grob - FM3	100	0,24	52	0,25	37	0,25	23	0,25	13	0,25	6	0,27	4	0,27
CEM I 42,5 R - FM1	143	0,24	105	0,22	93	0,21	86	0,23	80	0,23	75	0,24	75	0,24
CEM I 42,5 R - FM2	132	0,20	63	0,21	42	0,21	26	0,21	17	0,21	12	0,20	8	0,20
CEM I 42,5 R - FM3	140	0,20	100	0,23	85	0,23	74	0,24	65	0,23	52	0,23	40	0,24

6 Fließzeitversuch

Der Viskomat NT ist sehr gut geeignet um relative Werte zu vergleichen. Für die praktische Umsetzung von rheologischen Untersuchungen zur Materialüberwachung ist dieses Verfahren nicht geeignet.

Setzversuche für Mörtel mit dem *Hägermann*-Trichter sind bekannt und genormt, man bekommt mit diesem Versuch gute Richtwerte für die Konsistenz. Es lässt sich ein Zusammenhang zwischen den Ergebnissen des Rheometers (Drehmoment) und den Versuchen mit dem *Hägermann*-Trichter ableiten (Abb. 6-1): Je größer das Setzmaß desto niedriger das Drehmoment. Dieser Umstand ist in der Literatur⁴⁴ in ähnlicher Weise bekannt zwischen Betonkonsistenz und Mörtelsteife. Allgemein lautet der mathematische Zusammenhang:

$$y = f(x)$$

y = Drehmoment [Nmm]

x = Setzmaß [cm]

Für Zementleime mit einem W/Z-Wert von 0,4 ergibt sich folgender mathematischer Zusammenhang:

$$y = 8013,9x^{-1,6192}$$

y = Drehmoment [Nmm]

x = Setzmaß [cm]

Ob diese Gleichung auch für andere W/Z-Werte gültig ist, müsste in weiteren Arbeiten nachgewiesen werden.

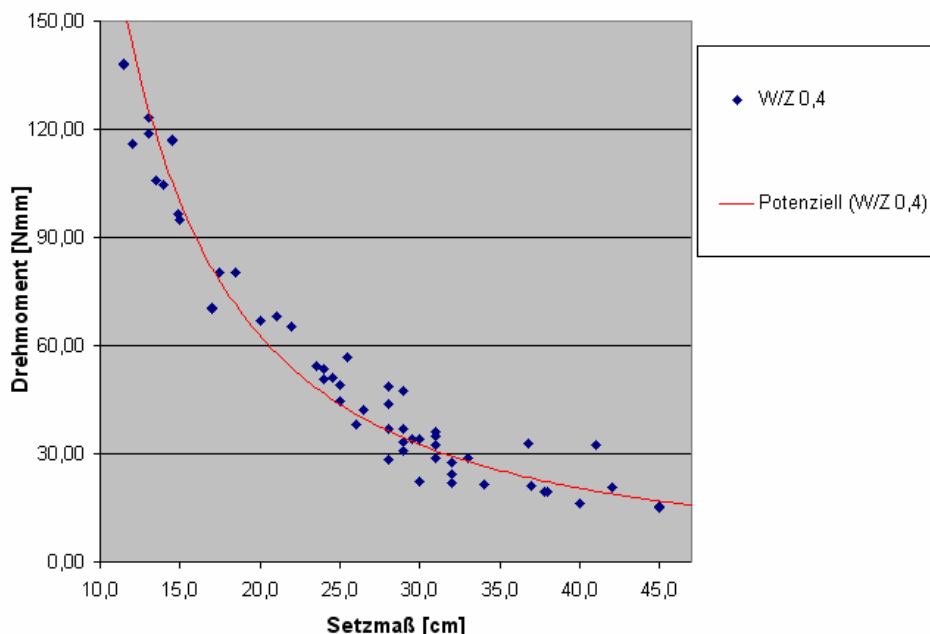


Abbildung 6-1: Zusammenhang zwischen Setzmaß und Drehmoment

⁴⁴ http://www.schleibinger.com/cmsimple/?download=teubert_1981_bft.pdf (Teubert, S5, /11/, letzter Zugriff 23.09.2012)

6.1 Durchführung von Fließzeitversuch

Der Fließzeitversuch ist in Abbildung 6-2 zu sehen und funktioniert in folgender Weise. Im ersten Schritt wird ein Setzversuch mit *Häggermann*-Trichter durchgeführt und im zweiten Schritt wird die Ausgangsfläche um 40 – 45° geneigt und die Zeit gemessen bis keine Bewegung mehr im Zementleim vorhanden ist (sich keine Tropfen mehr über die Abtropfkante bilden).

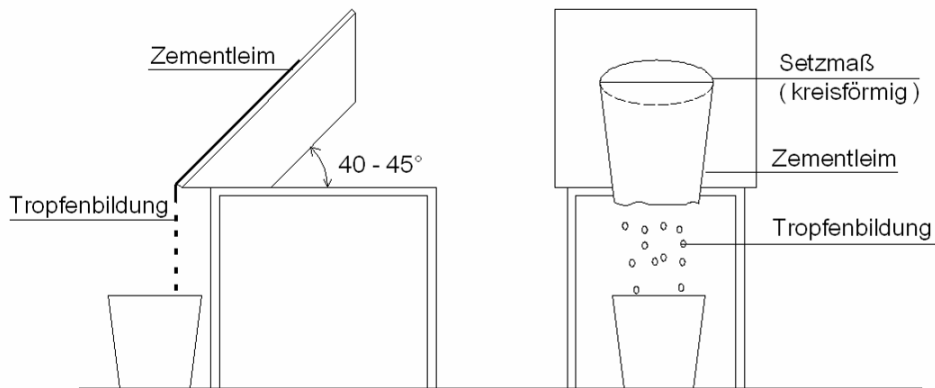


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des Flussversuches

Es lässt sich auch ein Zusammenhang zwischen Drehmoment und Fließzeitversuch nachweisen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 6-3 dargestellt. Der mathematische Zusammenhang lässt sich mit folgender Formel beschreiben:

$$y = 388,72x^{-0,5955}$$

y = Drehmoment [Nmm]

x = Flusszeit [sec]

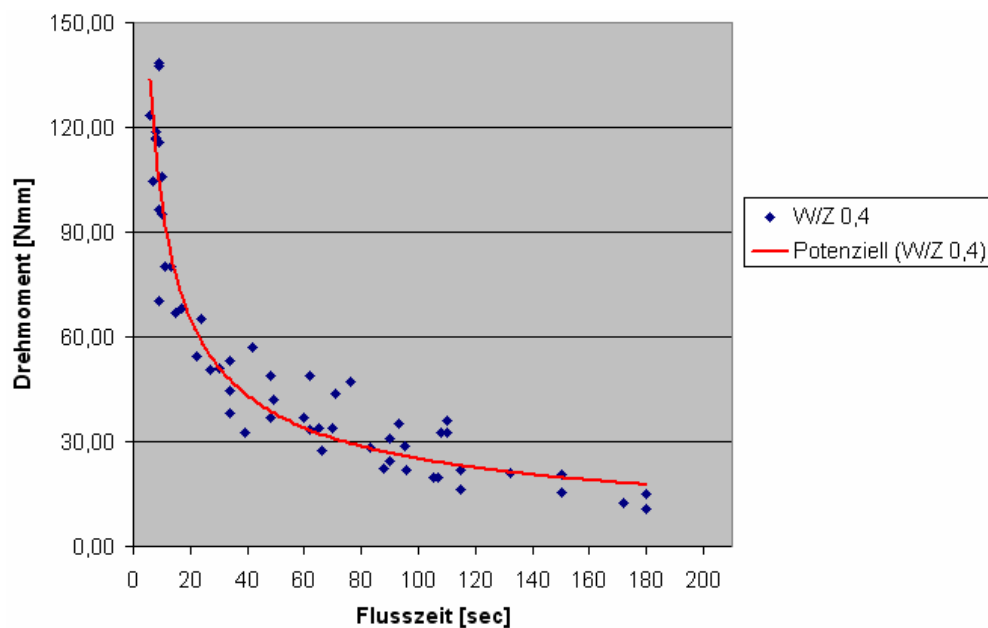


Abbildung 6-3: Zusammenhang zwischen Flusszeit und Drehmoment

Aus Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 kann man schließen dass es auch eine Korrelation zwischen Setzmaß und Fließzeit gibt. Je größer das Setzmaß desto länger dauert der Fließvorgang (Abb. 6-4). Die Streuung bei dieser Korrelation ist allerdings größer.

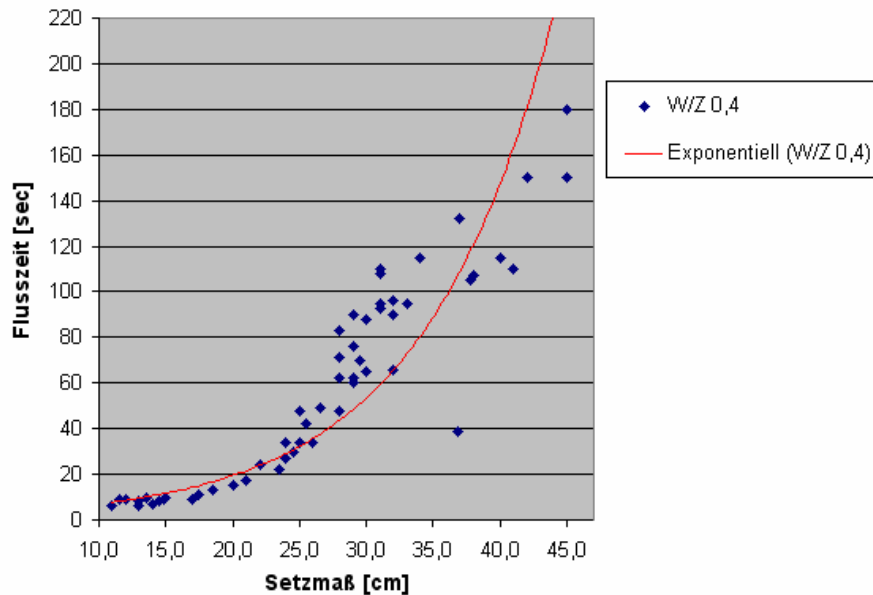


Abbildung 6-4: Zusammenhang zwischen Flusszeit und Drehmoment

6.2 Erweiterte Versuche mit CEM I 42,5 R

Bei den erweiterten Versuchen wurde folgendes untersucht:

- Variante A: Zusammenhang zwischen Setzmaß, Flusszeit und Drehmoment bei unterschiedlichem Fließmittelgehalt bei Zementleimen. Es wurde Einheitszement CEM I 42,5 R verwendet (gleicher Zement wie in den Vorversuchen)
- Variante B: Zusammenhang zwischen Drehmoment, Flusszeit bei annähernd gleichem Setzmaß und unterschiedlichen W/Z-Werten. Es wurde ebenfalls Einheitszement verwendet.

6.2.1 Variante A: Veränderungen des Fließmittelgehaltes bei Zementleimen

Die Versuchsdurchführung war ähnlich wie bei den Fließmittelversuchen nur wurde der Versuch bei den jeweiligen Fließmittelgehalten (0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35) beendet. Abbildung 6-5 zeigt die Ergebnisse von Fließmittel 1 und Abbildung 6-6 von Fließmittel 3.

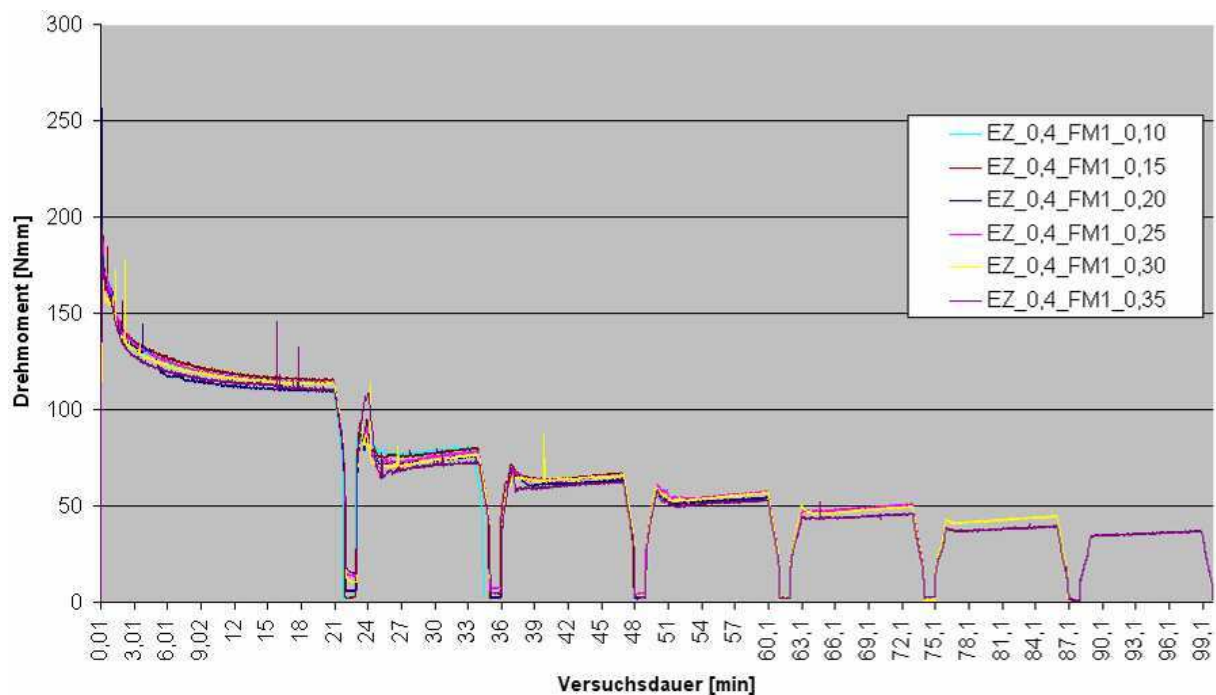


Abbildung 6-5: Scherwiderstand vom Zementleim mit Fließmittel 1

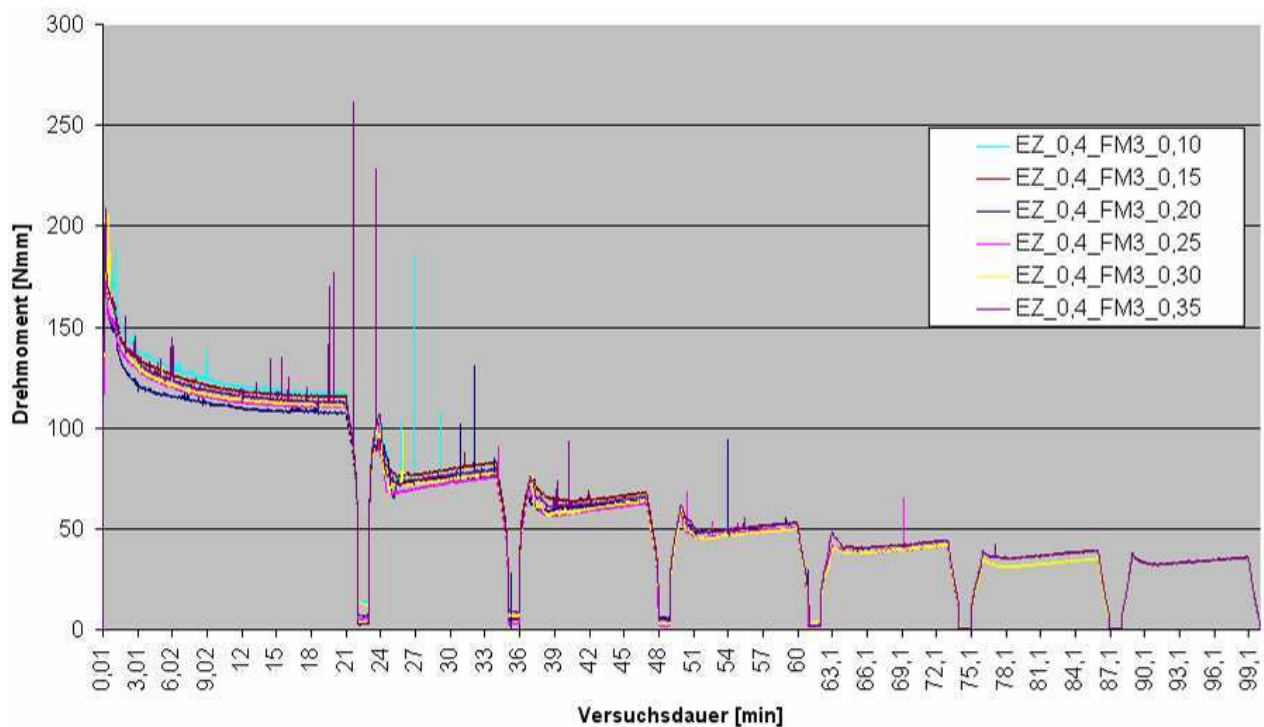


Abbildung 6-6: Scherwiderstand vom Zementleim mit Fließmittel 3

Nach den Versuchen mit den Viskomat NT wurden jeweils das Setzmaß und die Laufzeit ermittelt. Der Zusammenhang Abbildung 6-7 ergibt folgenden mathematischen Zusammenhang:

$$y = 8591,1x^{-1,6192}$$

y = Drehmoment [Nmm]

x = Setzmaß [cm]

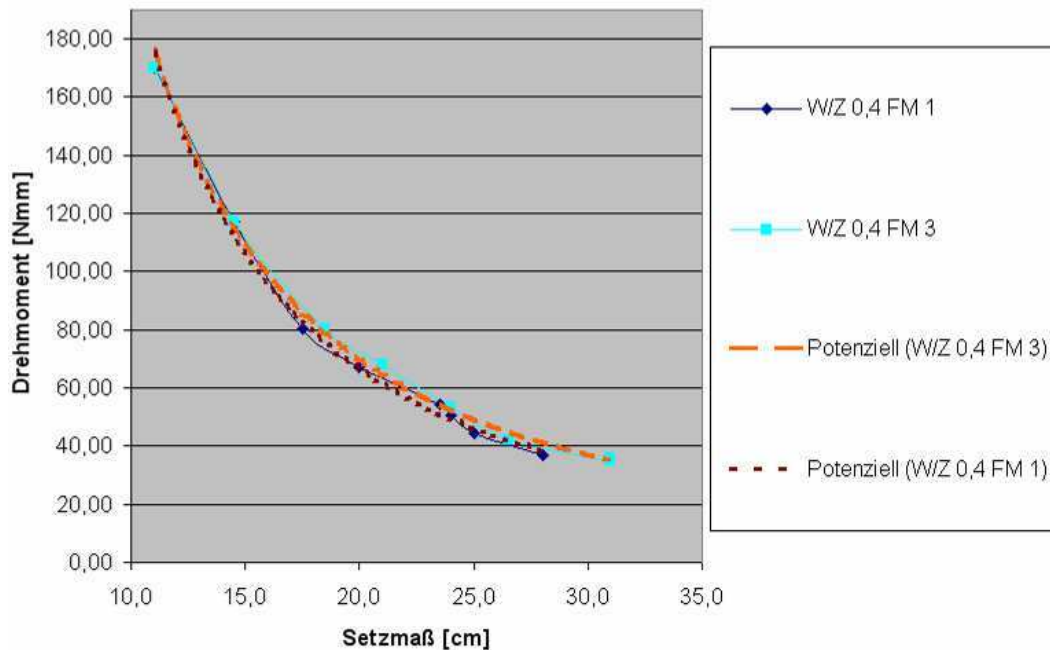


Abbildung 6-7: Zusammenhang zwischen Setzmaß und Drehmoment

Den Zusammenhang zwischen Drehmoment und Flusszeit zeigt Abbildung 6-8. Hier treten bei einem annähernd gleichen Setzmaß große Unterschiede zwischen Zementleim mit Fließmittel 1 und Zementleim mit Fließmittel 3 auf, d.h. man kann nicht automatisch vom Drehmoment auf die Flusszeit schließen.

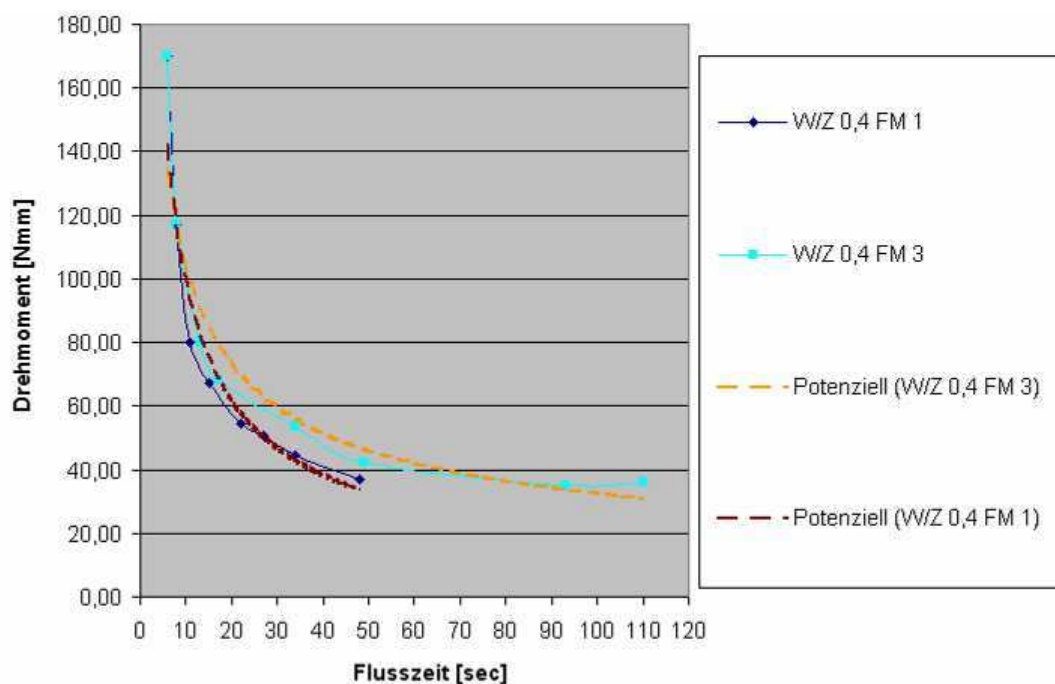


Abbildung 6-8: Zusammenhang zwischen Flusszeit und Drehmoment

In Abbildung 6-9 ist der Zusammenhang zwischen Flusszeit und Setzmaß dargestellt. Es ist auch wie in Abbildung 6-8 erkennbar, dass zwischen Zementleimen mit Fließmittel 1 und Zementleimen mit Fließmittel 3 große Unterschiede beim Verhältnis von Flusszeit und Setzmaß auftreten.

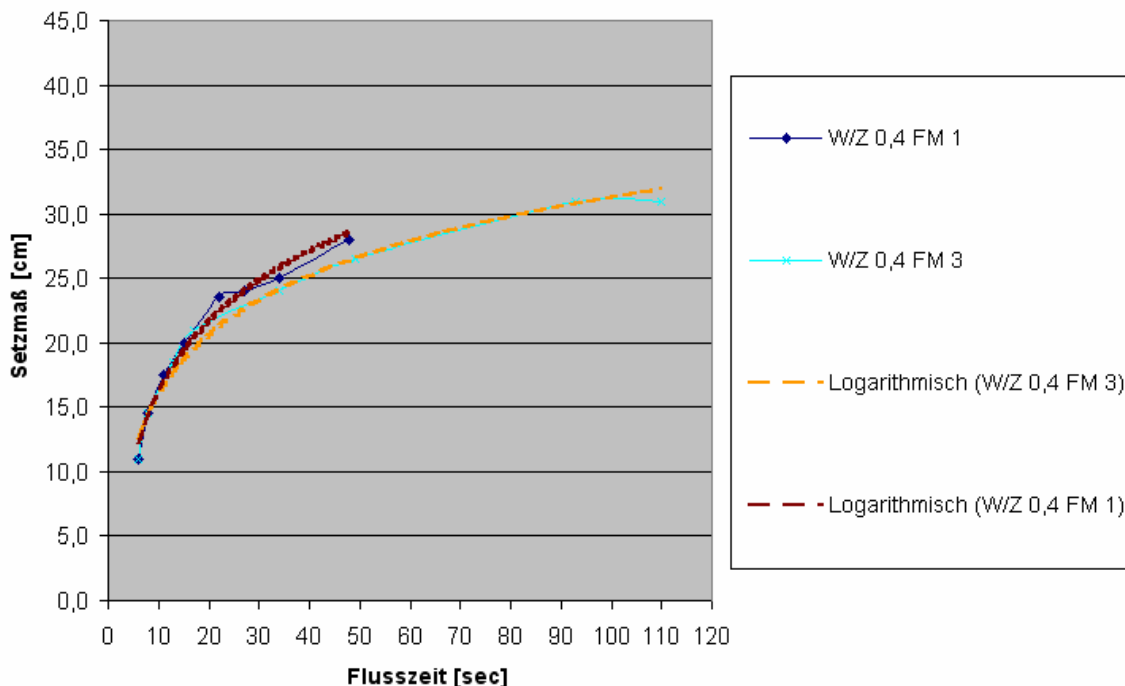


Abbildung 6-9: Zusammenhang zwischen Flusszeit und Setzmaß

6.2.2 Variante B: W/Z Variationen mit gleichen Setzmaß

Bei der Versuchsdurchführung wurden unterschiedliche W/Z-Werte verwendet und unterschiedliche Fließmittelgehalte. Es wurde der Zementleim 90 Sekunden angemischt dann

Fließmittel hinzugefügt in unterschiedlichen Tropfen und 30 Sekunden weitergemischt. Ab einer gewissen Menge an Fließmittel (100 Tropfen) mussten die Tropfen auf 2-3 Mal dosiert werden. Danach wurden die unterschiedlichen Zementleime im Viskomat NT geprüft.

Es wurden folgende Zementleime hergestellt:

- Zementleim mit einem W/Z-Wert von 0,6
- Zementleim mit einem W/Z-Wert von 0,5 und danach 40 Tropfen Zugabe von Fließmittel 1 bzw. 25 Tropfen Zugabe von Fließmittel 3.
- Zementleim mit einem W/Z-Wert von 0,45 und danach 75 Tropfen Zugabe von Fließmittel 1 bzw. 45 Tropfen Zugabe von Fließmittel 3
- Zementleim mit einem W/Z-Wert von 0,4 und danach eine Zugabe 3 x 55 Tropfen Fließmittel 1 bzw. 70 Tropfen Zugabe von Fließmittel 3

Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 6-1 für Zementleime mit Fließmittel 1 und Fließmittel 3 dargestellt.

Tabelle 6-1: Darstellung der gemessenen Ergebnisse

W/Z Variationen FM1	Viskomat NT [Nmm]	Setzmaß [cm]	Flußzeit [sec]
W/Z 0,6	17,00	29,5	33
W/Z 0,5 + 40 Tropfen	22,00	29,5	40
W/Z 0,45 + 75 Tropfen	26,00	29,5	54
W/Z 0,4 + 3x55 Tropfen	34,00	29,5	70

W/Z Variationen FM 3	Viskomat NT [Nmm]	Setzmaß [cm]	Flußzeit [sec]
W/Z 0,6	18,00	29,0	32
W/Z 0,5 + 25 Tropfen	25,00	29,0	39
W/Z 0,45 + 45 Tropfen	31,00	29,5	60
W/Z 0,4 + 70 Tropfen	47,00	29,0	76

Schlussfolgerungen:

- Trotz des gleichen Setzmaßes kann man erkennen, dass das Drehmoment unterschiedlich ist. Je höher der W/Z-Wert im Zementleim ist, desto niedriger das Drehmoment und kürzer die Flusszeit.
- Die Flusszeit unterscheidet sich bei Zementleimen mit höherem W/Z-Wert nur gering unabhängig vom verwendeten Fließmittel. Je niedriger der W/Z-Wert ist, desto größer der Einfluss des Fließmittels auf die Laufzeit.
- Trotz des gleichen Setzmaßes bei den Zementleimen mit unterschiedlichem W/Z-Wert ist die Flusszeit stark unterschiedlich.
- Um ein gleiches Setzmaß zu erhalten benötigt man bei Fließmittel 1 eine wesentlich höhere Menge als bei Fließmittel 3.

Um eine Erklärung für die unterschiedlichen Laufzeiten bei gleichem Setzmaß zu finden wird nun die gemessenen Daten des Rheometers ausgewertet. Abbildung 6-10 zeigt die Ergebnisse von Fließmittel 1 und Fließmittel 3.

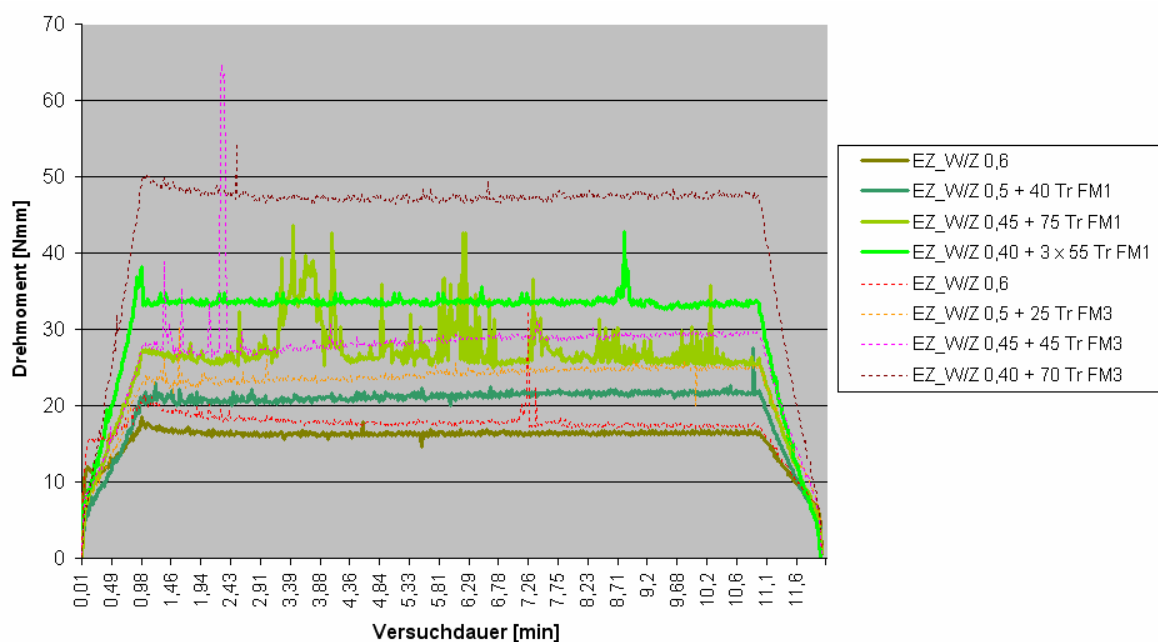


Abbildung 6-10: Scherwiderstand vom Zementleimen

Das Materialverhalten für Zementleime mit Fließmittel 1 wird in Abbildung 6-11 dargestellt. Je niedriger der W/Z-Wert vom Zementleim desto höher die Viskosität. Die Fließgrenze bleibt bei allen W/Z-Werten mit gleichen Ausbreitmaß annähernd gleich.

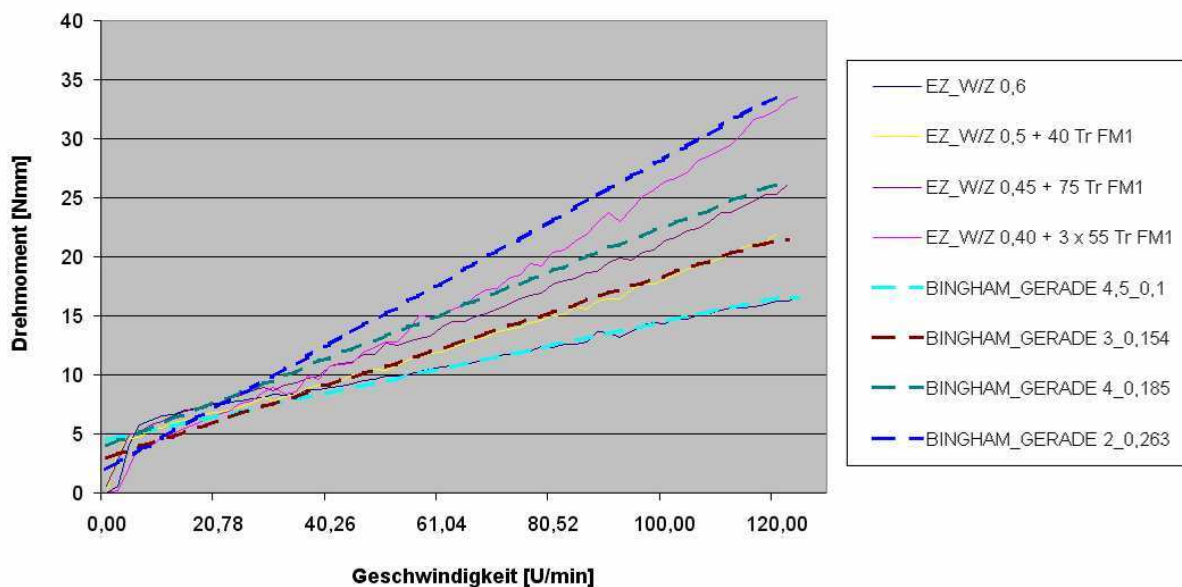


Abbildung 6-11: Materialverhalten von Zementleimen mit FM1

Für Zementleime mit Fließmittel 3 wird das Materialverhalten in Abbildung 6-12 dargestellt. Man kann erkennen dass die Viskosität höher ist bei Zementleimen mit Fließmittel 3 als bei Zementleimen mit Fließmittel 1. Bei einer höheren Viskosität stellt sich eine längere Fließzeit ein. Die Fließgrenze bleibt bei allen W/Z-Werten mit gleichen Ausbreitmaß annähernd gleich.

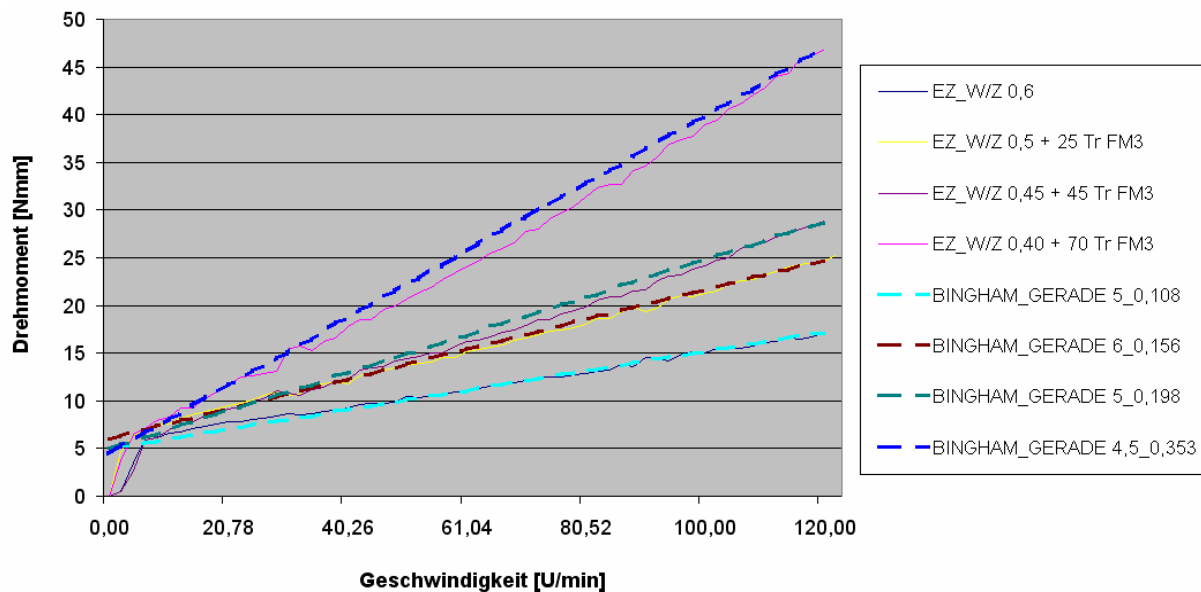


Abbildung 6-12: Materialverhalten von Zementleimen mit FM3

In Tabelle 6-2 sind die Ergebnisse der Flusszeiten und der Viskosität dargestellt.

Tabelle 6-2 : Darstellung der Viskosität und Flusszeit

	Viskosität	Flusszeit [sec]
EZ_W/Z 0,6	0,108	32
EZ_W/Z 0,5 + 25 Tr FM3	0,156	39
EZ_W/Z 0,45 + 45 Tr FM3	0,198	60
EZ_W/Z 0,40 + 70 Tr FM3	0,353	76
EZ_W/Z 0,6	0,1	33
EZ_W/Z 0,5 + 40 Tr FM1	0,154	40
EZ_W/Z 0,45 + 75 Tr FM1	0,185	54
EZ_W/Z 0,40 + 3 x 55 Tr FM1	0,263	70

Man kann erkennen, dass die Viskosität einen großen Einfluss auf die Flusszeit hat. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 6-13 grafisch dargestellt.

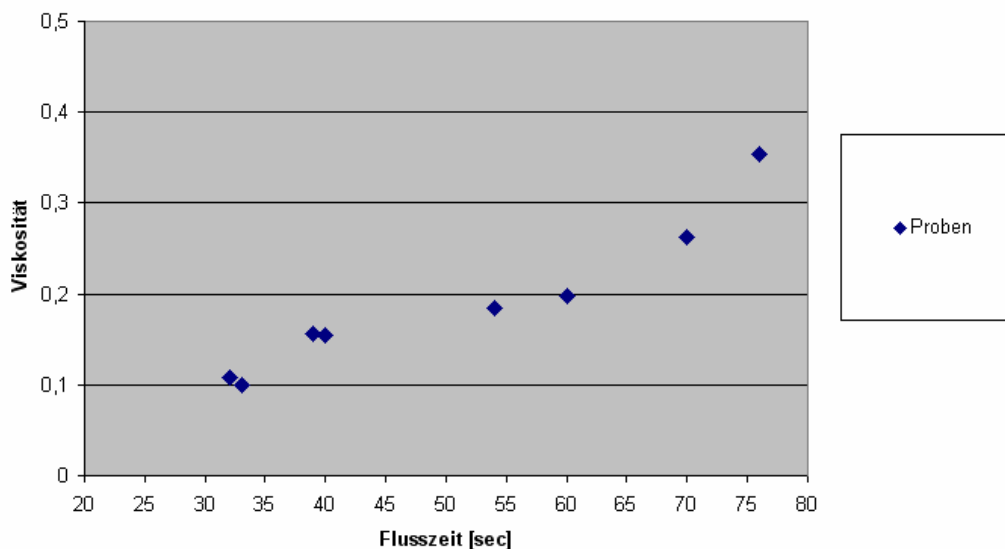


Abbildung 6-13: Zusammenhang zwischen Flusszeit und Viskosität

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die konventionellen Versuche - Ausbreitmaß und visuelle Kontrollen - sind Momentaufnahmen und können nur punktuelle Eindrücke über das rheologische Materialverhalten liefern. Beim Rheometer hat man im Unterschied zu den konventionellen Versuchsmethoden die Möglichkeiten über einem längeren Zeitraum das Material zu beobachten und zu analysieren. Die Versuche mit dem Rheometer umfassten im Rahmen dieser Arbeit die im Abschnitt 4.4 dargestellte Versuchsmatrix mit 4 Durchgängen. Beim ersten Versuchsdurchgang wurde der reine Zementleim ohne Fließmittel analysiert mit einer Wiederholung. Die Wiederholbarkeit ist als gut einzustufen. Bei den weiteren Durchgängen wurde das Verhalten von Zementleimen mit dem Einsatz von Fließmittel untersucht. Im Verlauf der Arbeit wurden die rheologischen Untersuchungen auf das Setzmaß und Fließversuch ausgeweitet.

Das Materialverhalten von Zementleimen wird über das *Bingham – Modell* beschrieben. Die relative Fließgrenze von Zementleimen ohne Fließmittel ist stark von den verschiedenen Zementarten abhängig. Die Fließgrenze kann eine Bandbreite von 37 bis 145 Nmm aufweisen. Die relative Viskosität hat eine Bandbreite zwischen 0,22 und 0,4 und ist ebenfalls von der Zementsorte abhängig.

Beim Einsatz von Fließmittel konnte eine Reduktion der Fließgrenze und der Viskosität beobachtet werden. Die Wirksamkeit ist vom Fließmitteltyp abhängig. Bei allen Zementleimen mit Fließmittel 2 fand die größte Reduktion der Fließgrenze und der Viskosität statt. Fließmittel 1 und Fließmittel 3 sind in der Wirkungsweise sehr ähnlich (siehe Tab. 5-11 bis Tab. 5-13)

Beim Setzmaß gab es einen Zusammenhang zwischen dem gemessenen Drehmoment und dem Setzmaß. Je höher das Drehmoment (auch die Fließgrenze) ist, desto geringer ist das Setzmaß und die Flusszeit und desto plastischer ist der Zementleim. Der Umkehrschluss gilt auch zwischen niedrigem Drehmoment und größerem Setzmaß und längerer Flusszeit. Der Zusammenhang zwischen Drehmoment, Setzmaß und Flusszeit verhält sich nicht proportional.

Es konnte festgestellt werden, dass die in der Literatur bekannten Phänomene im Bezug auf das prinzipielle rheologische Verhalten von Zementleimen gemessen über die Versuchsdauer (Abb. 3-10) auch bei den durchgeführten Versuchen aufgetreten sind.

Die Darstellung 3-11 (Steuerung der Fließgrenze mit Hilfe der Fließmitteldosierung) konnte jedoch nur zum Teil bestätigt werden. Die Viskosität hängt maßgeblich vom Wassergehalt des Zementleims ab. Je höher der Wassergehalt desto niedriger die Viskosität. Das ist auch der Grund für die unterschiedlichen Laufzeiten bei unterschiedlichen W/Z-Werten. Je niedriger die Viskosität desto kürzer die Laufzeit. Die Darstellung 3-11 weist auf die Reduzierung der Fließgrenze hin, aber nicht auf die Reduktion der Viskosität. Die Viskosität hat einen Einfluss auf die Stabilität von Zementleimen (Bluten etc.), das konnte auch in den Versuchen festgestellt werden. Je niedriger die Viskosität desto höher ist die Neigung zur Instabilität des Zementleimes.

Die Versuche mit dem Rotationsviskosimeter haben gute Genauigkeiten (Schwankungen unter 5%) aufgewiesen und es handelt sich um ein gut reproduzierbares Verfahren. Jedoch sollte man beachten, dass es sich auch um eine temporäre Aufnahme handelt. Die Versuchsergeb-

nisse können je nach Probenmaterial, Wassergehalt, Fließmittelgehalt und der menschlichen Komponente starke Variationen aufweisen.

Zwischen den *Vicat*-Versuch und dem Rheometer konnte ein Zusammenhang festgestellt werden (siehe Abb. 7-1). Dieser Zusammenhang wird später erforscht und wurde in der Diplomarbeit nicht weiter behandelt.

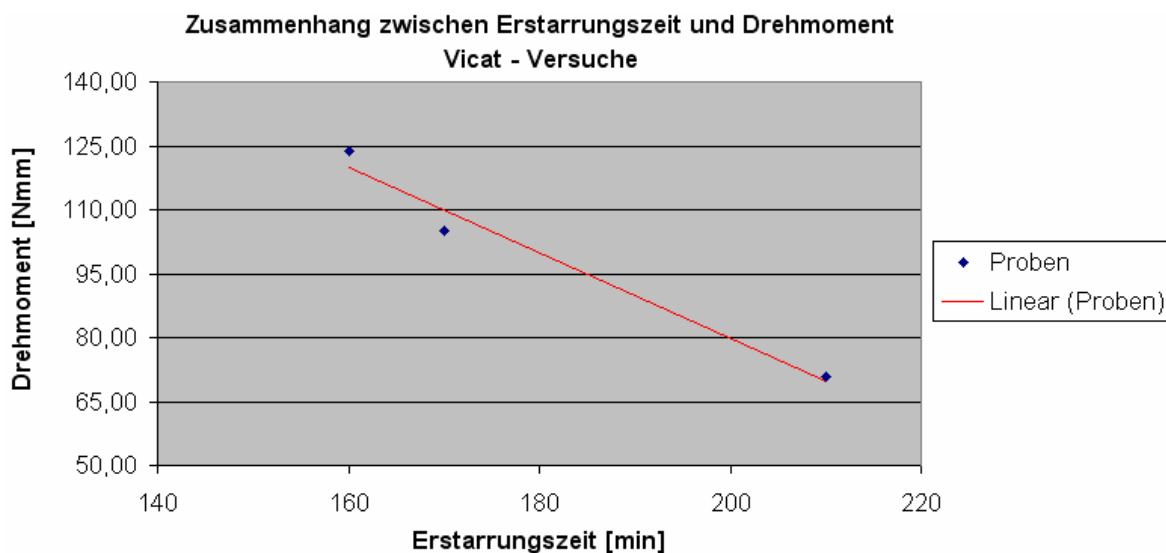


Abbildung 7-1: Zusammenhang zwischen Drehmoment und Erstarrungszeit

Beim Flussversuch wäre es weiters interessant ob sich die Erkenntnisse der Zementleime auf Beton übertragen lassen können.

Mit Hilfe des Rheometers kann man eine zielsichere, wirtschaftlichere Verarbeitbarkeit von Betonen simulieren und erproben. Baufolgen und auch Sommer- bzw. Wintersimulationen wären für die Anwender interessant. Weiters können Entwicklungsmöglichkeiten in der Bontontechnologie - z.B. im Bereich der Betonstoffmatrix insbesondere der baustellentechnischen Verarbeitung - optimale Gemische aus Zement, Mörtel und Beton ergeben. Ein weiteres Forschungsfeld wäre auch für UHPC-Betone und Fasernbetone gegeben.

Quellen

- [1] Vdz: *Zemente und ihre Herstellung*, Ausgabe 2006
<http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Zementmerkblaetter/B1.pdf>
 letzter Zugriff 23.09.2012
- [2] Grübl P., Weigerl H., Karl S.: *Beton Arten, Herstellung und Eigenschaften*. Ernst & Sohn, Berlin, 2. Auflage 2001
- [3] VÖZ: *Zementsorten*, Stand 2012
<http://www.zement.at/index.php/zement/zement/zementsorten-bezeichnungennormen>
 letzter Zugriff 23.09.2012
- [4] ÖNORM B 3327-1: *Zemente gemäß ÖNORM EN 197-1 für besondere Verwendungen Teil 1: Zusätzliche Anforderung*. Austrian Standards Institute / Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausgabe: 2005
- [5] *Betontechnologie 1 (BT1) Praxisorientierte Aus- und Weiterbildung in ganz Österreich*, Herausgeber: Betonakademie; Ausgabedatum: Jänner 2012
- [6] Kustemann A.: *Baustoffkunde FHM, Betonzusatzstoffe, Betonzusatzmittel*. Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, München 2008
<http://www.unibw.de/bauv3/lehre/skripten/betonzusatzmittelbetonzusatzstoffefhm2008.pdf>
 letzter Zugriff 23.09.2012
- [7] Technisches Merkblatt BASF: *Wirkung von Fließmittel in zementgebundenen Baustoffen*, Ausgabe 2006
http://www.basf-cc.at/de/Service/TechnischeDokumentation/Documents/Wirkung_von_Flie%C3%9Fmitteln_d.pdf
 letzter Zugriff 23.09.2012
- [8] Germann A.: *Fließmittel der neuen Generation für die Transportindustrie*. Admixture news Nr.1 Jänner 2008
http://www.basf-admixtures.ch/de/publikationen/Documents/071206_ASNews_Nr1.pdf
 letzter Zugriff 23.09.2012
- [9] Kompendium Zement: *Hydratation des Zements und Gefüge des Zementsteins*.
http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/KompendiumZementBeton/1-4_Hydratation.pdf
 letzter Zugriff 23.09.2012
- [10] Schneider U., Horvath J.: *Skriptum Spezialbetone* TU-Wien, Institut für Hochbau und Technologie; Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit, Wien, Ausgabe: 2003

-
- [11] Haist M.: *Zur Rheologie und physikalischen Wechselwirkung bei Zementsuspensionen*. KIT, Karlsruhe, 2010
 - [12] Beizel M.: *Frischbetondruck unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften*. Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruhe 2009
digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/1535187
 letzter Zugriff 23.09.2012
 - [13] Breit K.: *Skriptum zur Vorlesung Baugrundinjektionstechnik*. Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, Wien, 2010
 - [14] Strobel T.: *SCC - SVB selbstverdichtender Beton*. BASF, Stand 2012
http://www.basf-cc.at/de/Service/TechnischeDokumentation/Documents/SCC_pannnenfrei.pdf
 letzter Zugriff 23.09.2012
 - [15] Prospekt: Vicat-Nadelgeräte http://www.testing.de/prospekte/vicat_nadelgeraete.pdf
 letzter Zugriff 23.09.2012
 - [16] Kompendium Zement: *Bautechnische Eigenschaften des Zements*.
http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/KompendiumZementBeton/1-5_Bautechn_Eigensch.pdf
 letzter Zugriff 23.09.2012
 - [17] Falter M.: *Optimierung der gerätetechnischen Messparameter zur systematischen Bestimmung der Verarbeitungseigenschaften von Zementmörtel mittels Viskomat NT*. Fachhochschule Regensburg, Regensburg, 2005
 - [18] <http://rheologie.homepage.t-online.de/mess.html#m1d>
 - [19] http://www.psl-systemtechnik.de/viscometry_site_knowledge.html
 - [20] http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Rheologie:Viskomat_NT_-_Rheometer_f._M%F6rtel_und_Leim
 - [21] Banfill P.: *Rheology of Fresh cement and Concrete* E & F.N. Spon, Cambridge, 2. Auflage 1990
 - [22] http://mobile.euro-inox.org/map/body_centred_cubic/DE_body_centred_cubic.php
 - [23] Herlach D.: *Kristallstrukturen*. Ruhr-Universität Bochum, Institut für Materialphysik im Weltraum, 2003, Bochum
http://www.dlr.de/mp/Portaldata/22/Resources//2_Kristallstrukturen.pdf
 letzter Zugriff 23.09.2012

- [24] Teubert J.: *Die Messung der Konsistenz von Betonmörtel und ihre Bedeutung für die Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons*, Obertaufkirchen, 1981
http://www.schleibinger.com/cmsimple/?download=teubert_1981_bft.pdf

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Zementproduktion.....	6
Abbildung 2-2: Darstellung einer Zementbezeichnung nach EN 197-1	11
Abbildung 2-3: Darstellung einer Zementbezeichnung nach EN 197-1	12
Abbildung 2-4: Übersicht über Betonzusatzmittel und Betonzusatzstoffe.....	15
Abbildung 2-5: Darstellung der Zementkornagglomeration unter Einschluss von Wasser....	15
Abbildung 2-6: Darstellung der Zementkorndispersion unter frei werden von Wasser	16
Abbildung 2-7: Elektrostatische Dispergierung.....	16
Abbildung 2-8: Sterische Dispergierung.....	17
Abbildung 2-9: Elektrosterische Dispergierung	17
Abbildung 2-10: Wirkungsweise grenzflächenaktiver Stoffe.....	17
Abbildung 2-11: Wirkungsdauer von Fließmittel bei sofortiger Zugabe.....	18
Abbildung 2-12: Schematischer Aufbau eines Polycarboxylethers.....	19
Abbildung 2-13: Schematische Darstellung der Erhärtung von Zementen bei unterschiedlichen W/Z – Werten.....	20
Abbildung 3-1: Qualitativer Verlauf von Fließfunktionen	21
Abbildung 3-2: Qualitativer Verlauf von der Fließfunktion nach <i>Newton</i>	22
Abbildung 3-3: Qualitativer Verlauf von der Fließfunktion nach Bingham.....	23
Abbildung 3-4: Verlauf von Suspensionen im Bauwesen	23
Abbildung 3-5: <i>Hägermann</i> -Trichter.....	24
Abbildung 3-6: <i>Vicat</i> -Nadelgerät.....	24
Abbildung 3-7: Definition von Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zement	25
Abbildung 3-8: Auslauftrichter.....	25
Abbildung 3-9: Messsysteme von Rotationsrheometer	26
Abbildung 3-10: Scherwiderstand infolge konstanter Belastung	28
Abbildung 3-11: Fließkurven unterschiedlicher Zusammensetzung	28
Abbildung 4-1: Viskomat NT – Rheometer für Mörtel und Leim.....	29
Abbildung 4-2: Zementleimpaddel (links) und Mörtelpaddel (rechts).....	29
Abbildung 4-3: Versuche mit unterschiedlicher Mischzeit	30
Abbildung 4-4: Versuch mit einer Versuchsdauer von 120 min	31
Abbildung 4-5: Versuche mit einer Versuchsdauer von 30 min, W/Z-Wert = 0,4.....	32
Abbildung 4-6: Fahrweise A und B und die Versuchsdauer	33
Abbildung 4-7: Versuchsergebnisse mit Fahrweise A und B	33
Abbildung 4-8: Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen W/Z – Werten.....	34
Abbildung 4-9: Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen W/Z – Werten.....	35
Abbildung 4-10: Versuchsergebnisse (Drehmoment) mit unterschiedlichen Zementarten....	36
Abbildung 4-11: Versuchsergebnisse (Temperatur) mit unterschiedlichen Zementarten	36

Abbildung 4-12: Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Fließmittelgehalten bei W/Z-Wert 0,4.....	37
Abbildung 4-13: Fahrweise für die Versuche mit Fließmittel	38
Abbildung 4-14: Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Fließmittelgehalten bei W/Z-Wert 0,4.....	38
Abbildung 4-15: Materialverhalten bei Zementleim mit EZ und unterschiedlichen Fließmittelgehalten.....	39
Abbildung 4-16: Messung des Scherwiderstandes von Kalibrieröl.....	42
Abbildung 4-17: Messung der Temperatur.....	42
Abbildung 4-18: Messung des Scherwiderstandes von Wasser.....	43
Abbildung 4-19: Darstellung von Atom mit kubisch raumzentrierten Kristallgefüge (links) und Darstellung von einem Atom mit orthorhombischen Kristallgefüge (rechts)	47
Abbildung 4-20: Messung des Scherwiderstandes von Fließmittel.....	50
Abbildung 4-21: Materialverhalten von Fließmittel	51
Abbildung 5-1: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe A1	52
Abbildung 5-2: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe A1	52
Abbildung 5-3: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe A1	53
Abbildung 5-4: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe A2	54
Abbildung 5-5: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe A2	54
Abbildung 5-6: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe A2.....	55
Abbildung 5-7: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe A3	56
Abbildung 5-8: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe A3	56
Abbildung 5-9: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe A3.....	57
Abbildung 5-10: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe B	58
Abbildung 5-11: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe B	58
Abbildung 5-12: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe B.....	59
Abbildung 5-13: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe C160	60
Abbildung 5-14: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe C1	60
Abbildung 5-15: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe C1	61
Abbildung 5-16: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe C262	62
Abbildung 5-17: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe C2	62
Abbildung 5-18: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe C2.....	63
Abbildung 5-19: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe C364	64
Abbildung 5-20: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe C3	64
Abbildung 5-21: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe C3.....	65
Abbildung 5-22: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe C466	66
Abbildung 5-23: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe C4	66
Abbildung 5-24: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe C4.....	67
Abbildung 5-25: Messung des Scherwiderstandes von Zementleimen der Versuchsreihe D	68
Abbildung 5-26: Messung der Temperatur von Zementleimen der Versuchsreihe D.....	68
Abbildung 5-27: Materialverhalten von Zementleimen der Versuchsreihe D.....	69
Abbildung 5-28: Scherwiderstand vom Zementleim mit Fließmittel	71
Abbildung 5-29: Temperaturentwicklung von Zementleimen mit Fließmittel.....	72
Abbildung 5-30: Materialverhalten von Zementleim mit Fließmittel 1	72
Abbildung 5-31: Materialverhalten von Zementleim mit Fließmittel 2	73
Abbildung 5-32: Materialverhalten von Zementleim mit Fließmittel 3	73
Abbildung 5-33: Auswertung der Sättigungspunkte.....	74
Abbildung 5-34: Sättigungskurven von Zementleimen mit Fließmittel	74

Abbildung 5-35: Scherwiderstand vom Zementleim mit Fließmittel	75
Abbildung 5-36: Temperaturverhalten von Zementleim mit Fließmittel	75
Abbildung 5-37: Materialverhalten von Zementleim mit Fließmittel 1	76
Abbildung 5-38: Materialverhalten von Zementleim mit Fließmittel 2	76
Abbildung 5-39: Materialverhalten von Zementleim mit Fließmittel 3	77
Abbildung 5-40: Sättigungskurven von Zementleimen mit Fließmittel	77
Abbildung 6-1: Zusammenhang zwischen Setzmaß und Drehmoment.....	81
Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des Flussversuches.....	82
Abbildung 6-3: Zusammenhang zwischen Flusszeit und Drehmoment	82
Abbildung 6-4: Zusammenhang zwischen Flusszeit und Drehmoment	83
Abbildung 6-5: Scherwiderstand vom Zementleim mit Fließmittel 1	84
Abbildung 6-6: Scherwiderstand vom Zementleim mit Fließmittel 3	84
Abbildung 6-7: Zusammenhang zwischen Setzmaß und Drehmoment.....	85
Abbildung 6-8: Zusammenhang zwischen Flusszeit und Drehmoment	86
Abbildung 6-9: Zusammenhang zwischen Flusszeit und Setzmaß.....	86
Abbildung 6-10: Scherwiderstand vom Zementleimen	88
Abbildung 6-11: Materialverhalten von Zementleimen mit FM1	88
Abbildung 6-12: Materialverhalten von Zementleimen mit FM3	89
Abbildung 6-13: Zusammenhang zwischen Flusszeit und Viskosität	89
Abbildung 7-1: Zusammenhang zwischen Drehmoment und Erstarrungszeit	91

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Darstellung der Zemente nach EN 197-1	8
Tabelle 2-2: Darstellung der Festigkeitsklasse.....	10
Tabelle 2-3: Dichte von Zementen.....	10
Tabelle 2-4: Darstellung der verwendeten Zemente in Österreich.....	11
Tabelle 2-5: Darstellung der verwendeten Zemente in Österreich.....	13
Tabelle 2-6: Ausgewählte Eigenschaften von Fließmittel auf PCE - Basis	19
Tabelle 4-1: Darstellung der Einzelergebnisse mit Mittelwert und Varianz.....	35
Tabelle 4-2 : Verwendet Fließmittelmengen.....	37
Tabelle 4-3: Darstellung der Fahrweise Tabellarisch.....	40
Tabelle 4-4: Produktdaten vom Silikonöl zur Kalibrierung.....	41
Tabelle 4-5: Auswertung mit Viskomat NT.....	43
Tabelle 4-6: Überblick über die Versuchsmatrix	45
Tabelle 4-7: Versuchsreihe A1	46
Tabelle 4-8: Versuchsreihe A2.....	46
Tabelle 4-9: Versuchsreihe A3	47
Tabelle 4-10: Versuchsreihe B	48
Tabelle 4-11: Versuchsreihe C1	48
Tabelle 4-12: Versuchsreihe C2	49
Tabelle 4-13: Versuchsreihe C3	49
Tabelle 4-14: Versuchsreihe C4	49
Tabelle 4-15: Versuchsreihe D.....	50
Tabelle 4-16: verwendete Fließmittel.....	50
Tabelle 5-1: Versuchsreihe A1	51

Tabelle 5-2: Versuchsreihe A2	53
Tabelle 5-3: Versuchsreihe A3	55
Tabelle 5-4: Versuchsreihe B	57
Tabelle 5-5 : Versuchsreihe C1	59
Tabelle 5-6: Versuchsreihe C2	61
Tabelle 5-7: Versuchsreihe C3	63
Tabelle 5-8: Versuchsreihe C4	65
Tabelle 5-9: Versuchsreihe D	67
Tabelle 5-10: Zusammenfassen der Ergebnisse	70
Tabelle 5-11: Zusammenfassen der Ergebnisse	78
Tabelle 5-12: Zusammenfassen der Ergebnisse	79
Tabelle 5-13: Zusammenfassen der Ergebnisse	80
Tabelle 6-1: Darstellung der gemessenen Ergebnisse	87
Tabelle 6-2 : Darstellung der Viskosität und Flusszeit	89

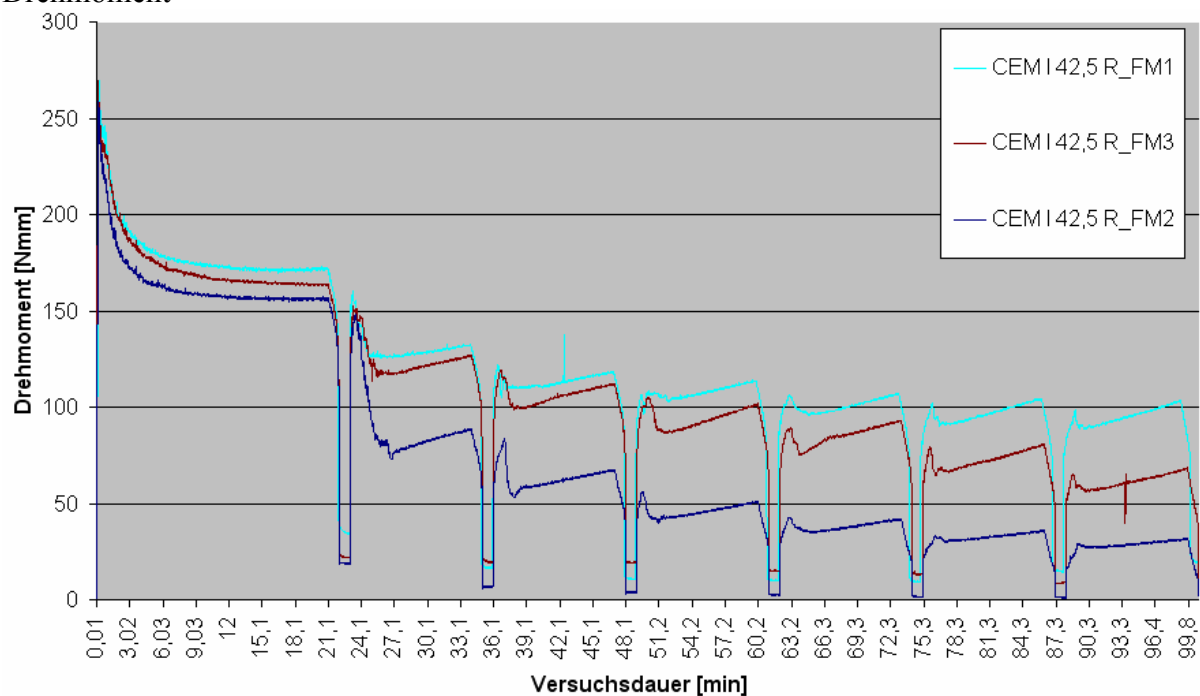
Anhang

Im Anhang werden die Zementleime mit Fließmittel 1-3 beschrieben und nach Versuchsreihen geordnet. Es wird auf die Beschreibung der Temperaturentwicklung verzichtet, weil da diese in diesem Zusammenhang wenig aussagekräftig ist.

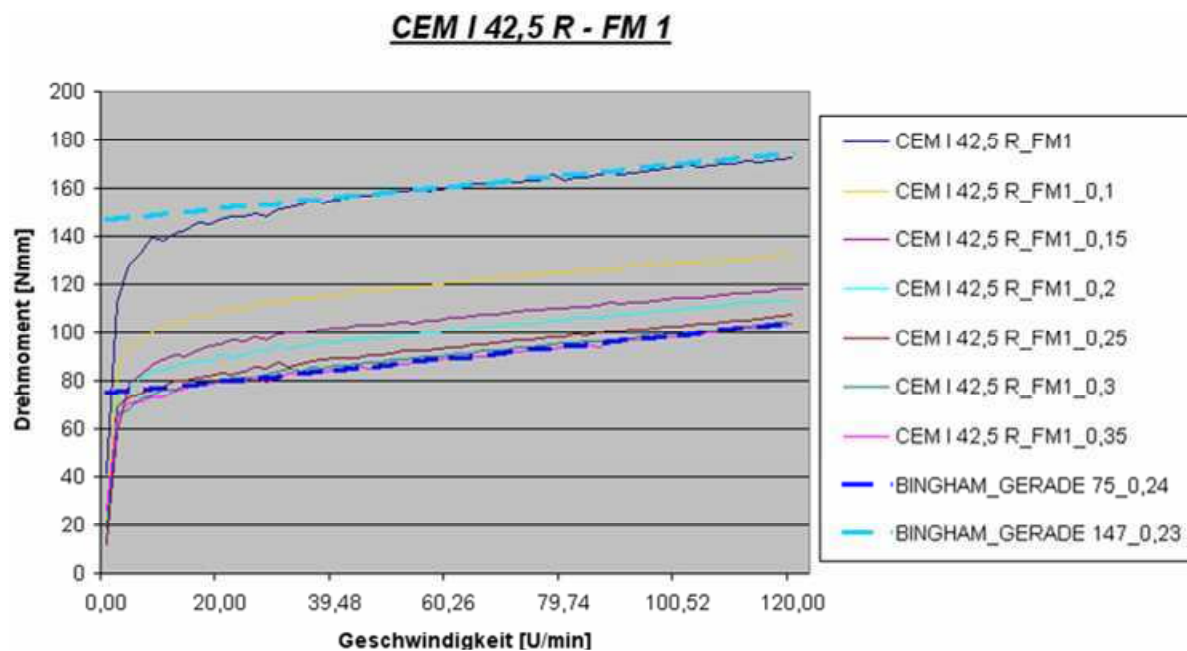
CEM I 42,5 R (Versuchsreihe A1; Versuchsreihe B(Typ A) und Versuchsreihe D)

Der Blaine - Wert von diesem Zement beträgt 5200.

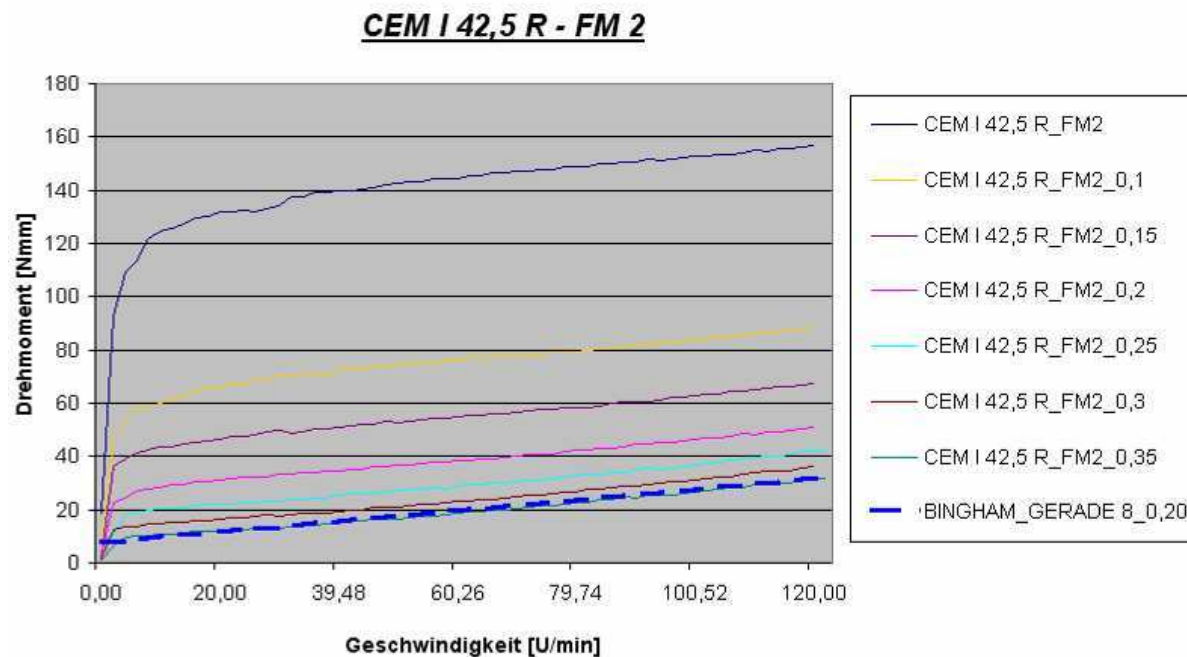
Drehmoment



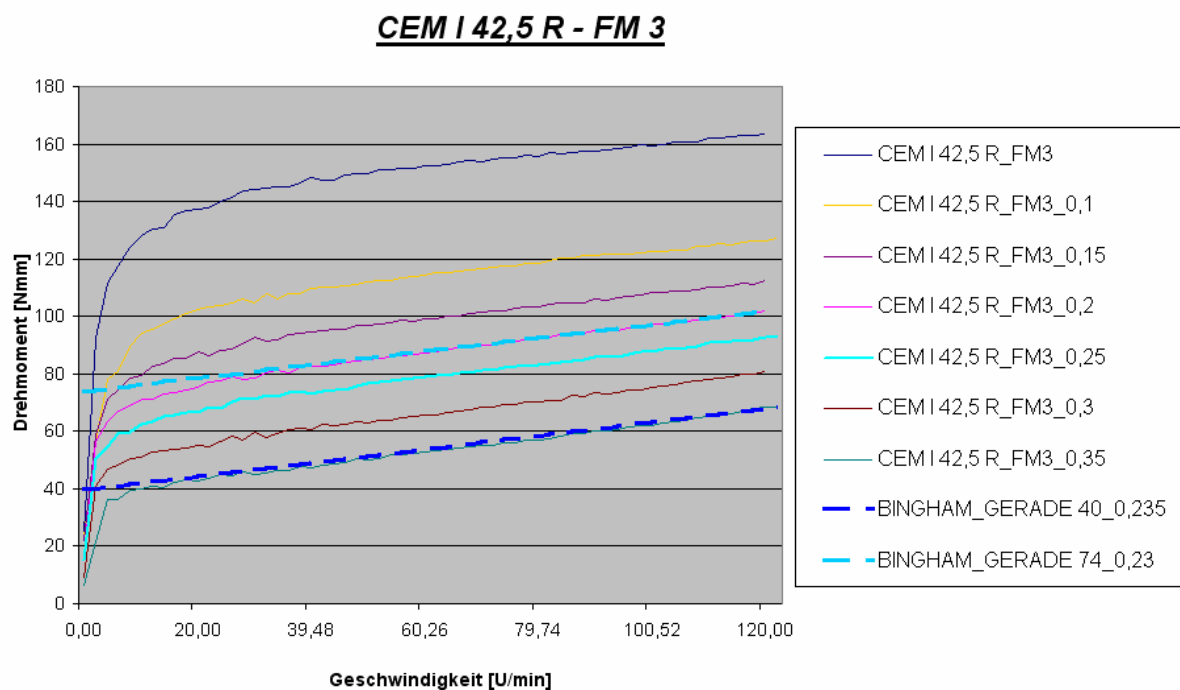
Materialverhalten für Zementleim mit FM 1



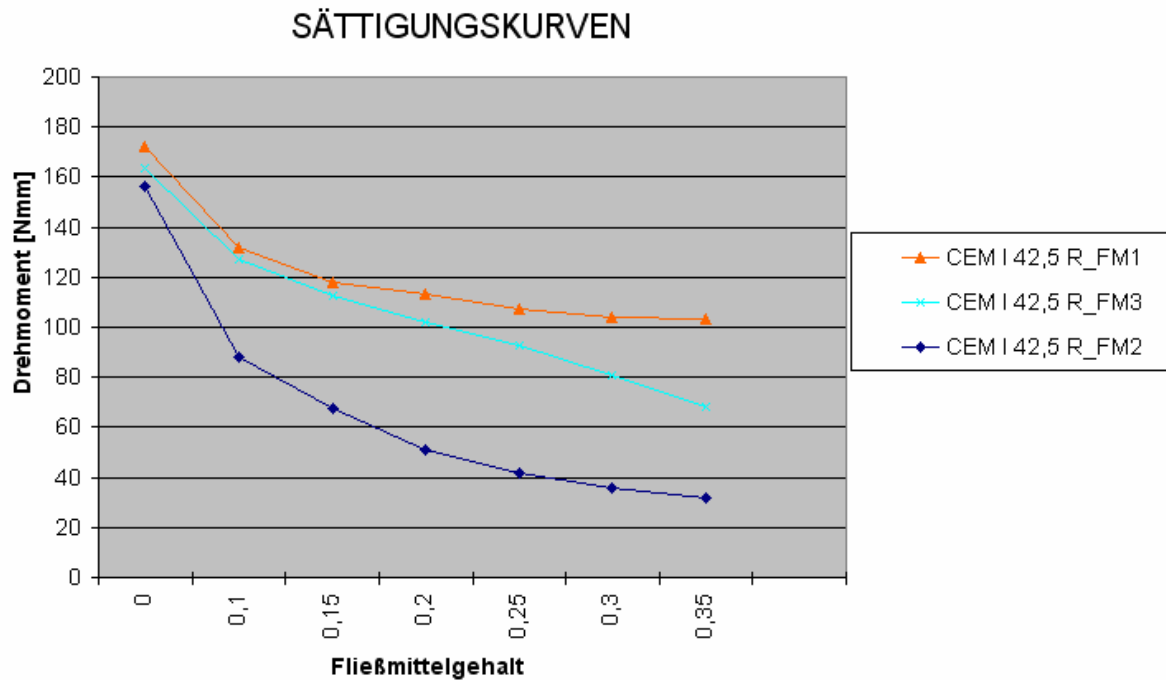
Materialverhalten für Zementleim mit FM 2



Materialverhalten für Zementleim mit FM 3

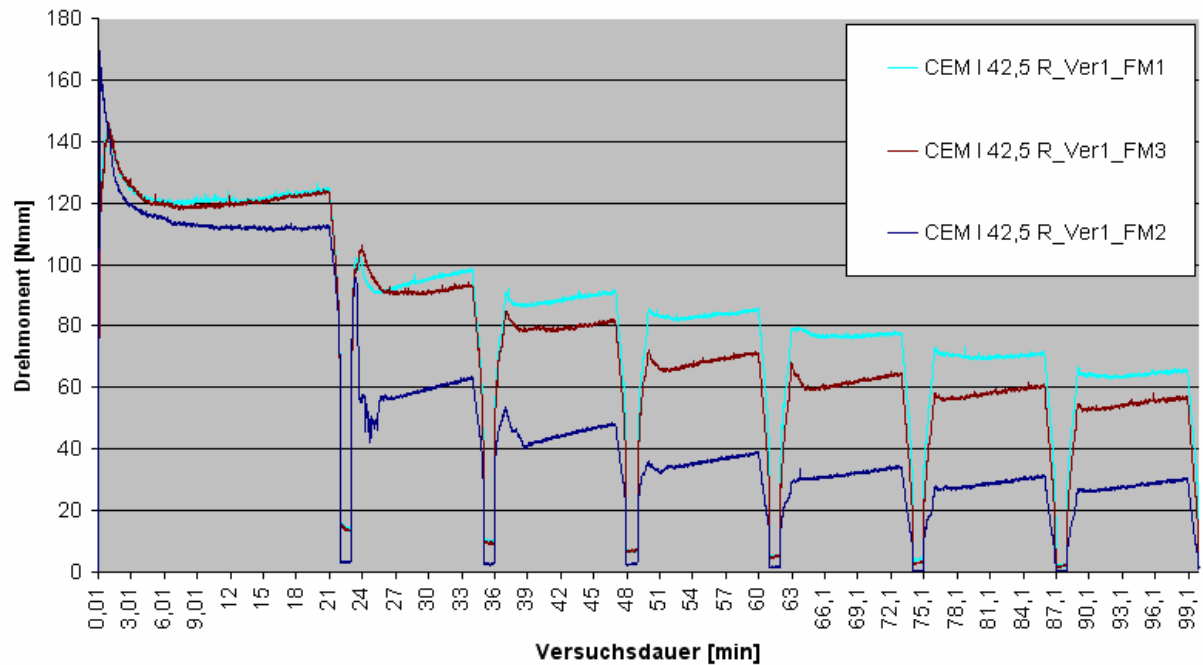


Sättigungskurven

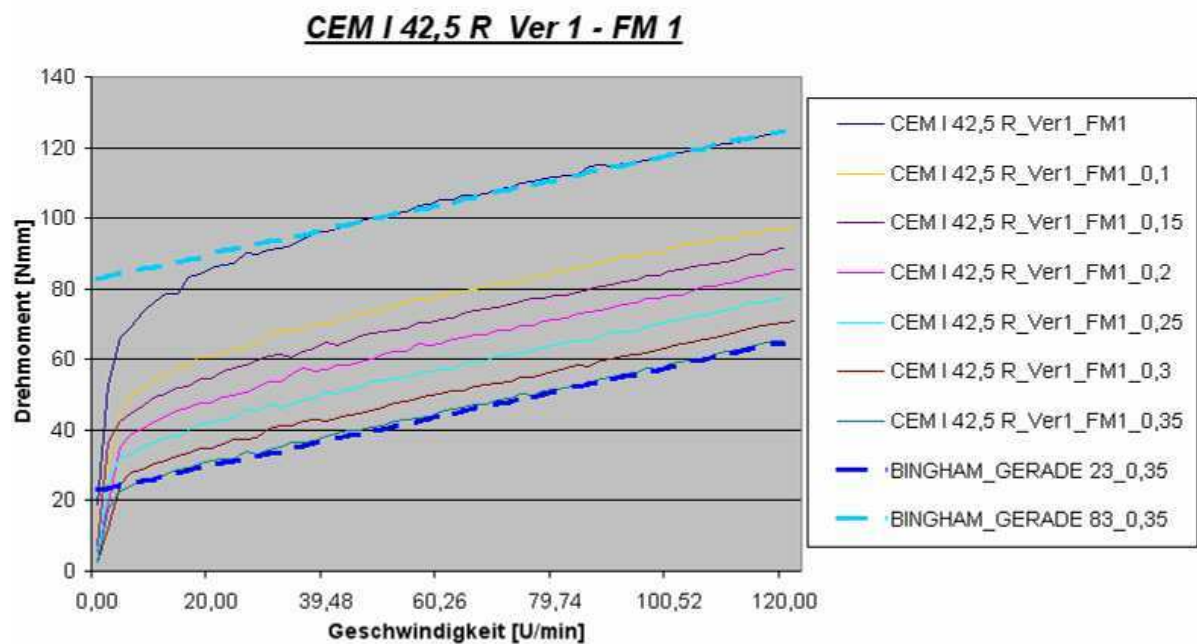


CEM I 42,5 R – Verhältnis 1 (Versuchsreihe A2)

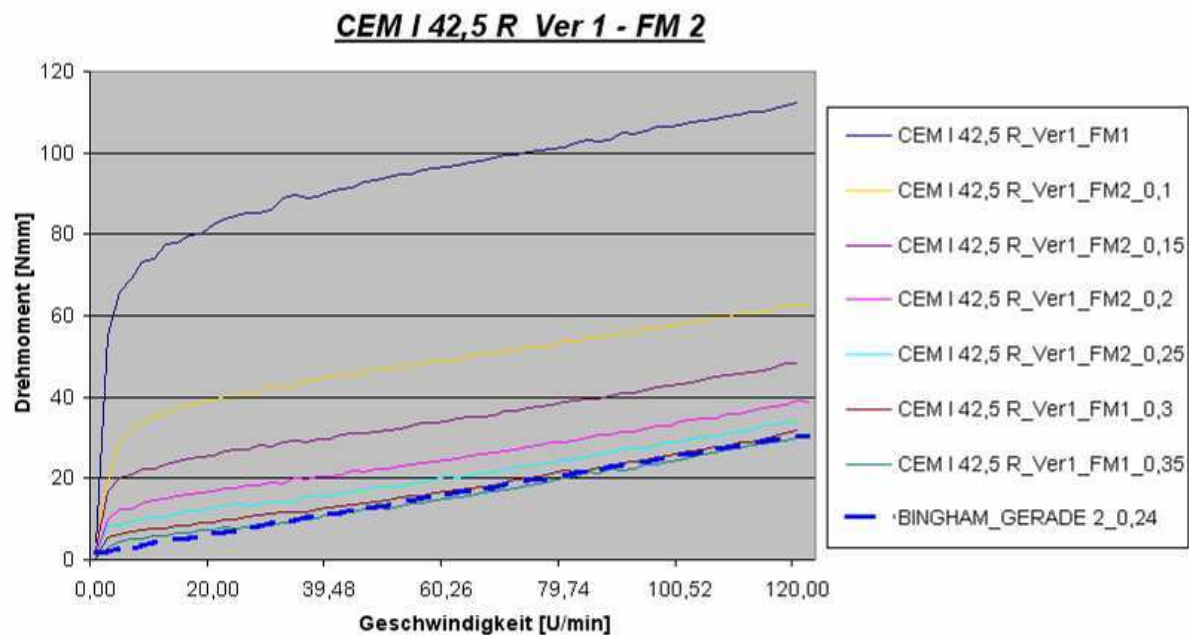
Drehmoment



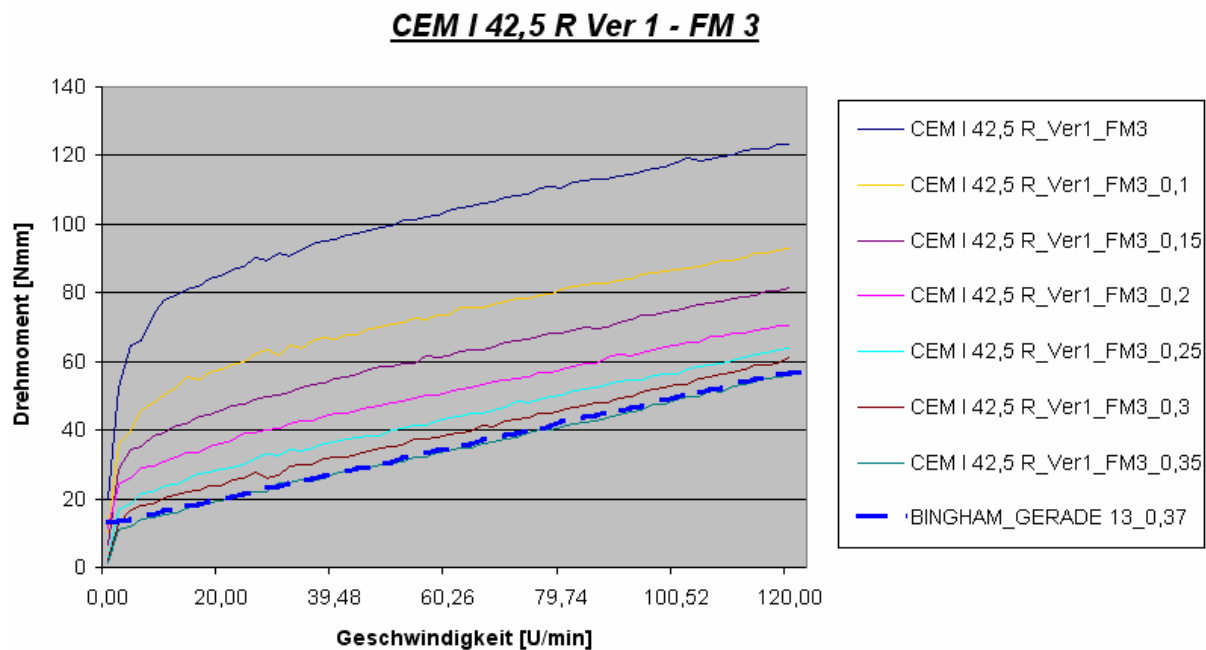
Materialverhalten für Zementleim mit FM 1



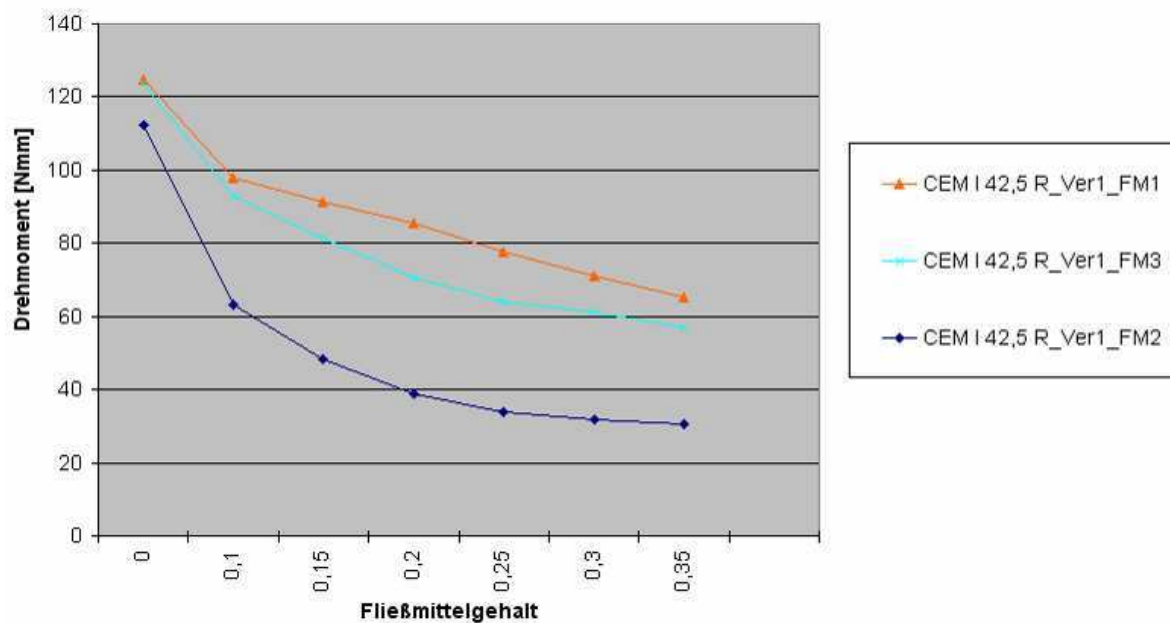
Materialverhalten für Zementleim mit FM 2



Materialverhalten für Zementleim mit FM 3

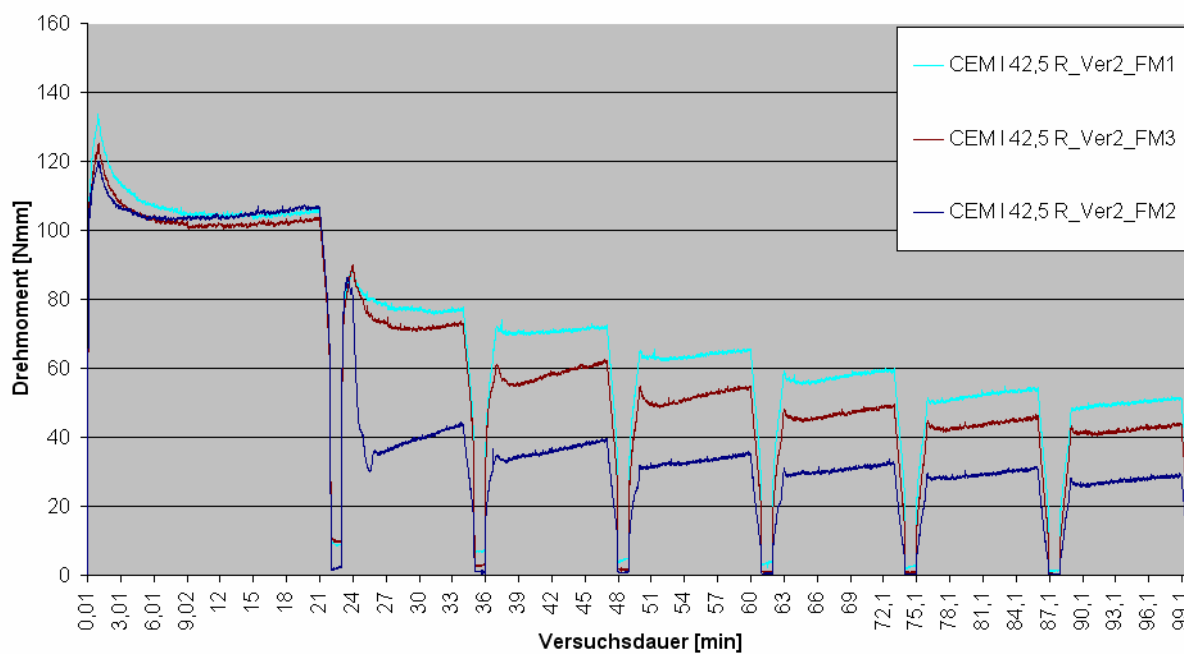


Sättigungskurven

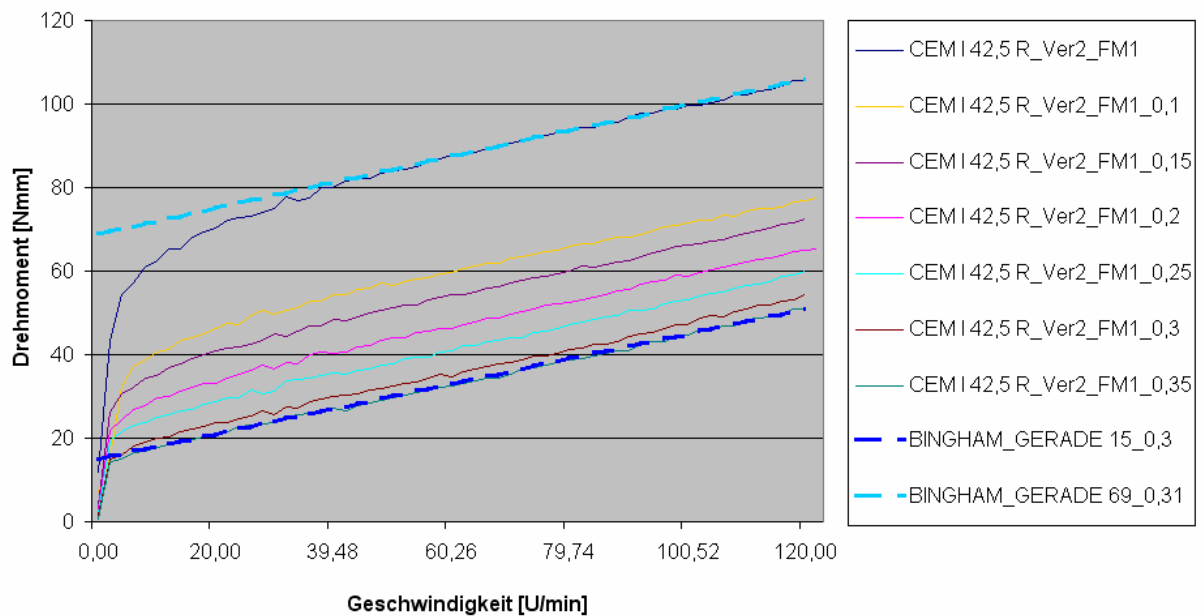


CEM I 42,5 R – Verhältnis 2 (Versuchsreihe A2)

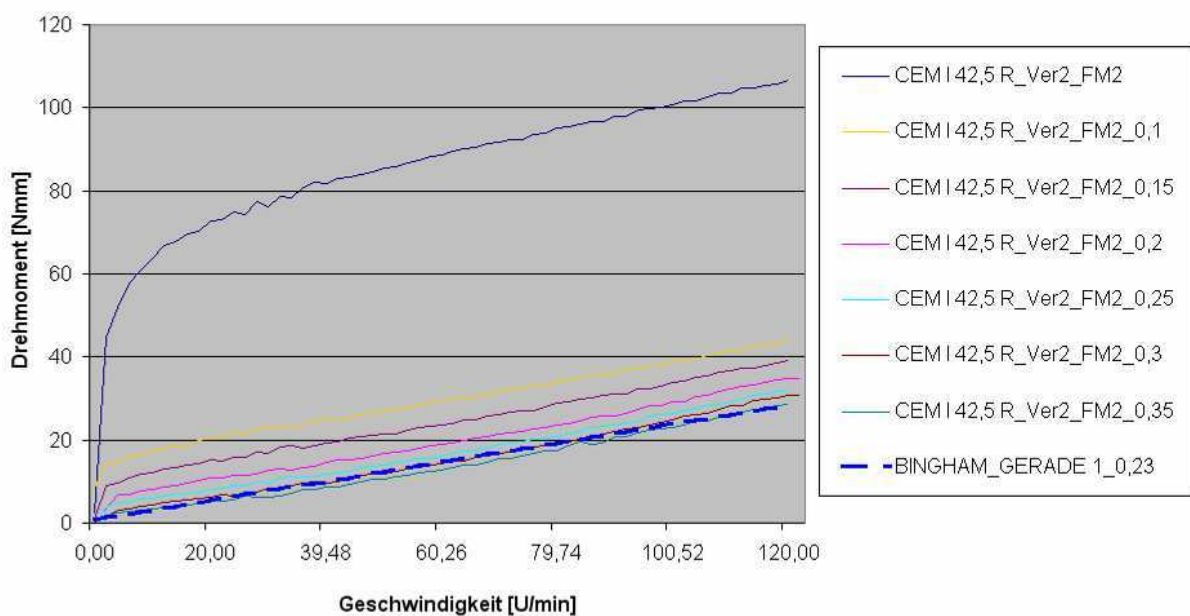
Drehmoment



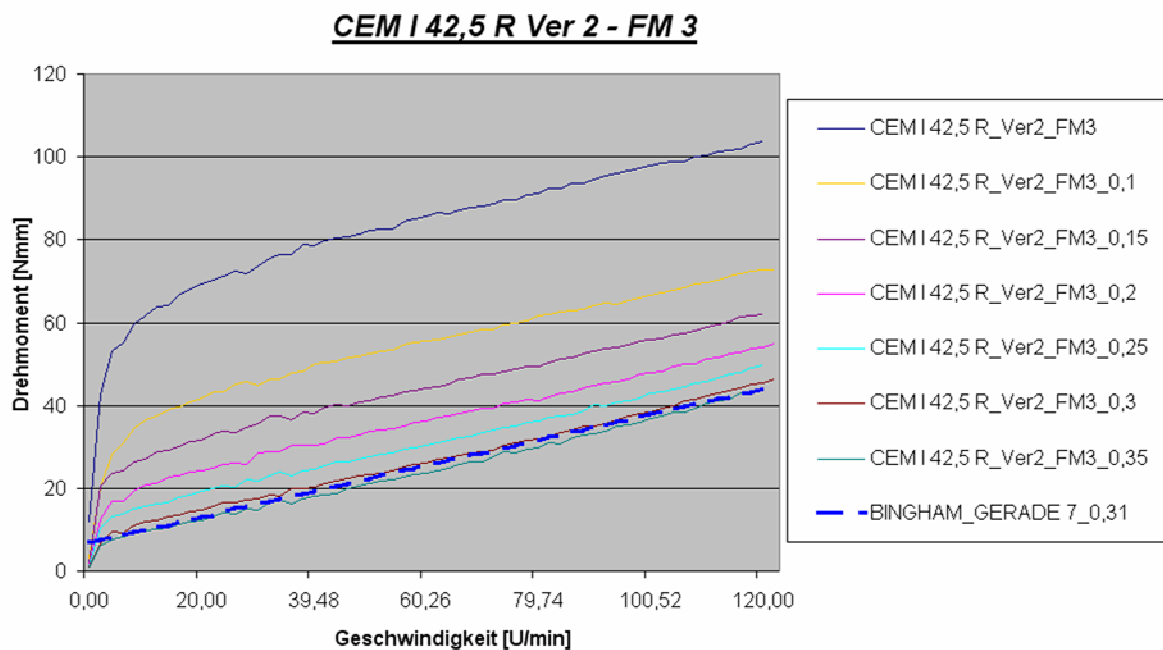
Materialverhalten für Zementleim mit FM 1

CEM I 42,5 R Ver 2 - FM1

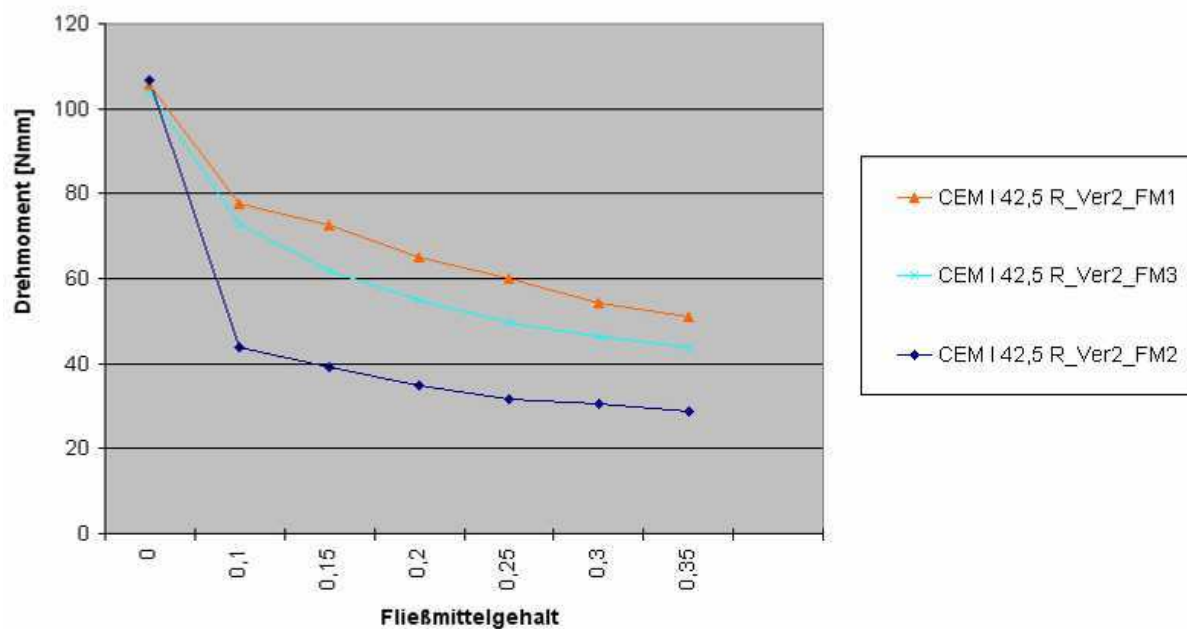
Materialverhalten für Zementleim mit FM 2

CEM I 42,5 R Ver 2 - FM 2

Materialverhalten für Zementleim mit FM 3

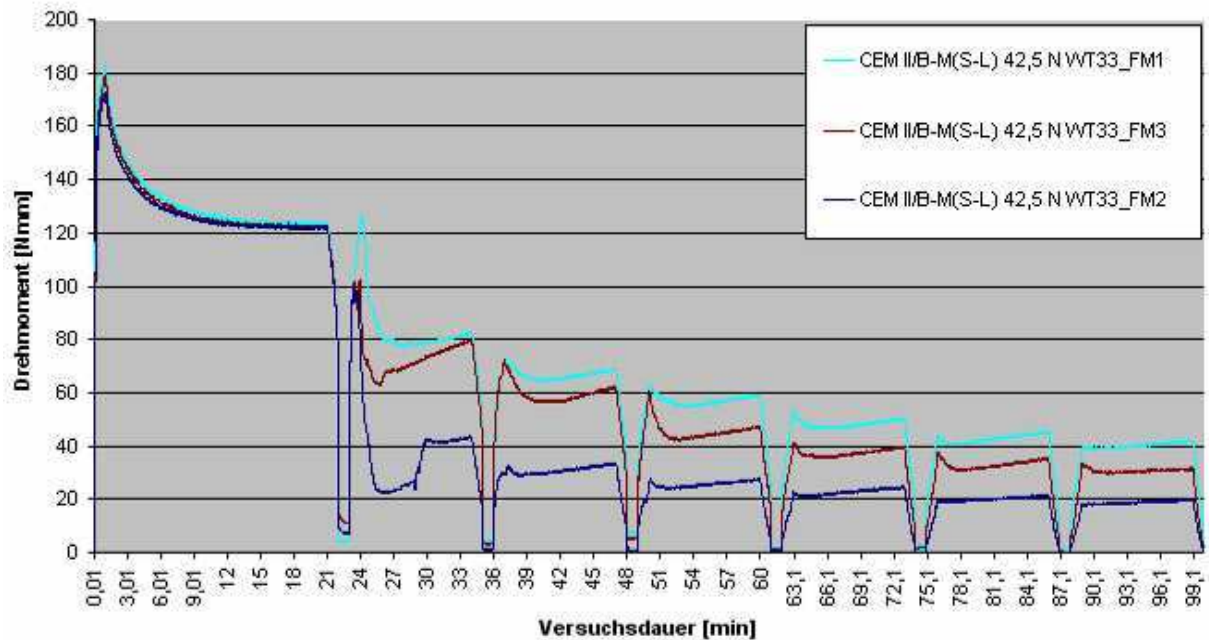


Sättigungskurven



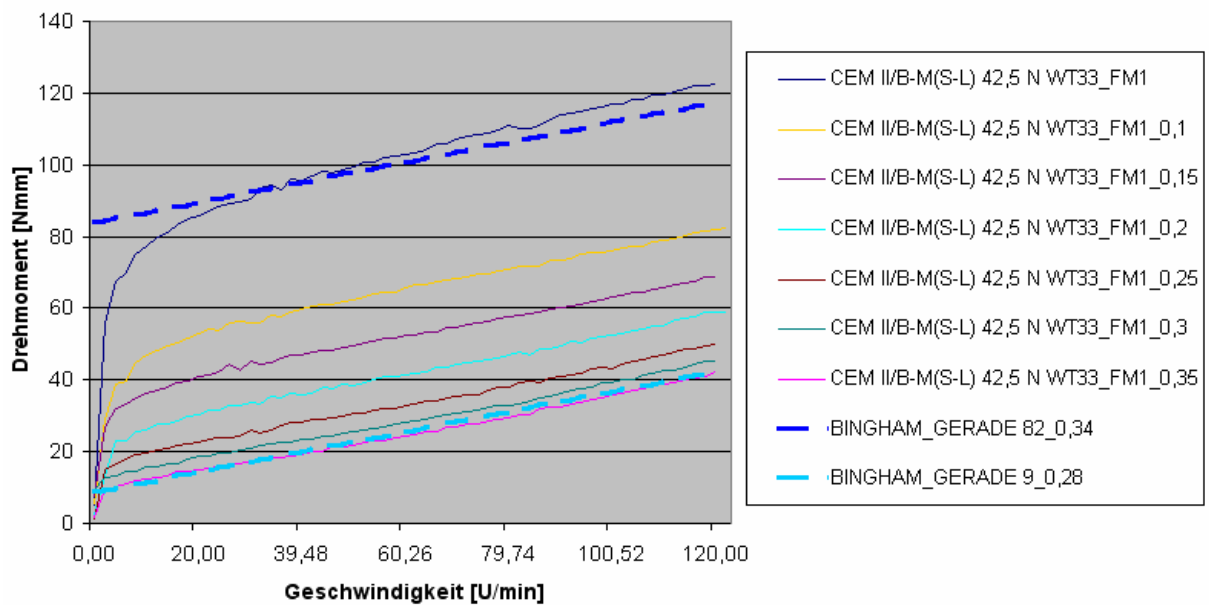
CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33 – ALKALIARM (Versuchsreihe A3 und Versuchsreihe C3)

Drehmoment

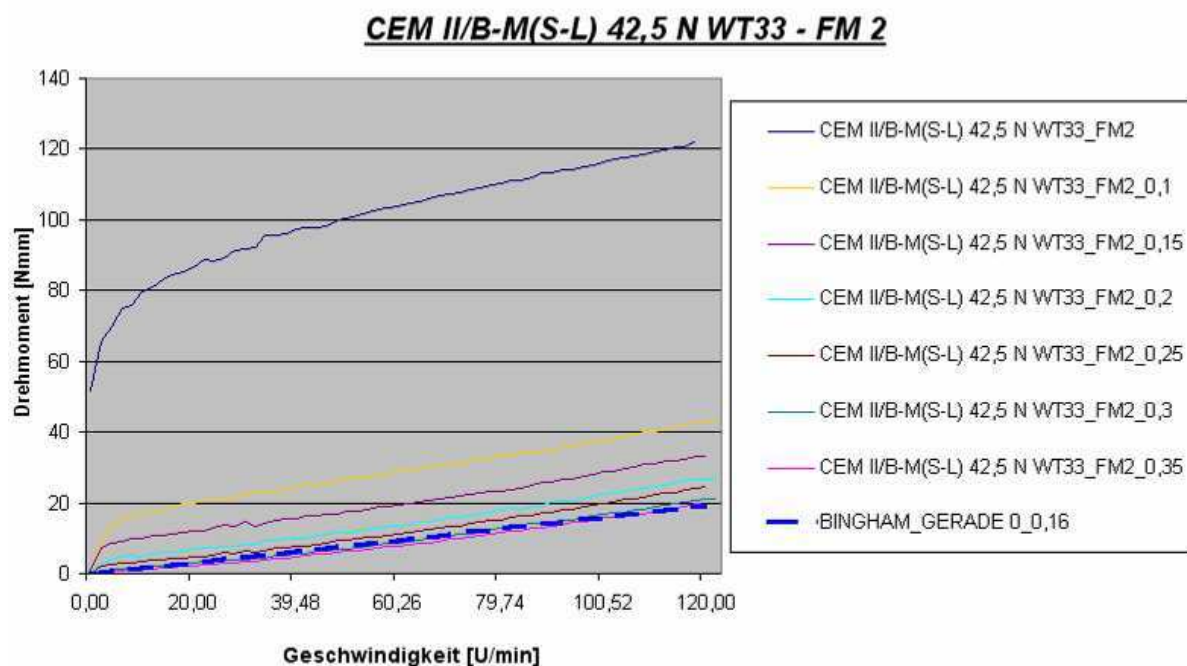


Materialverhalten für Zementleim mit FM 1

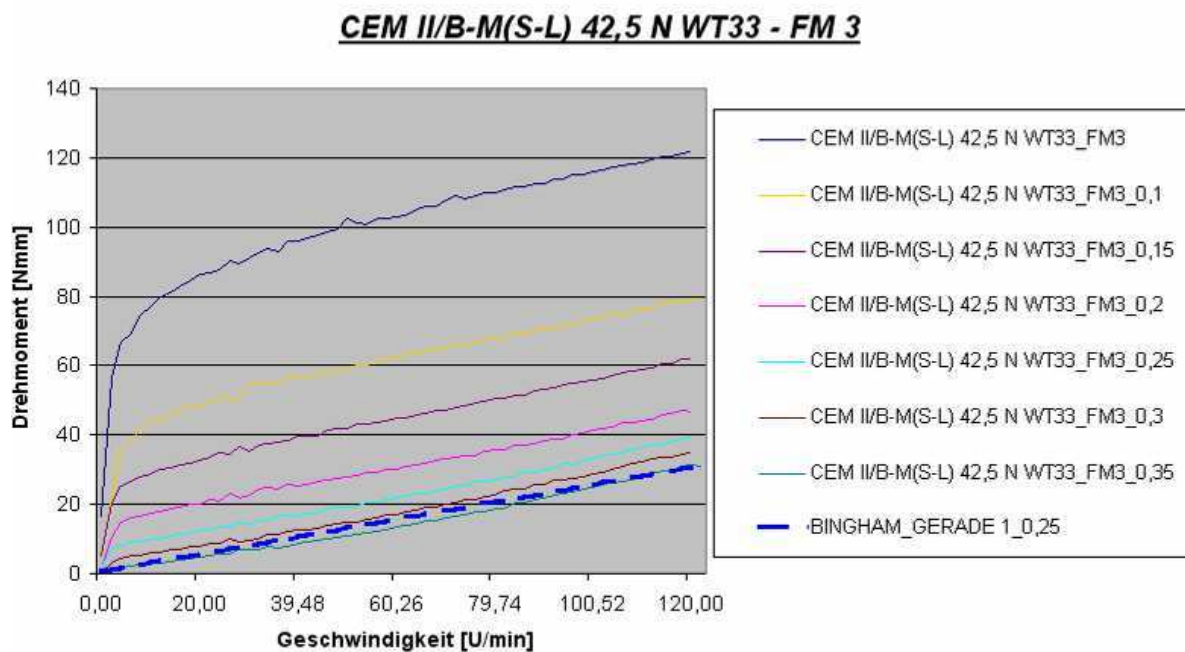
CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33 - FM 1



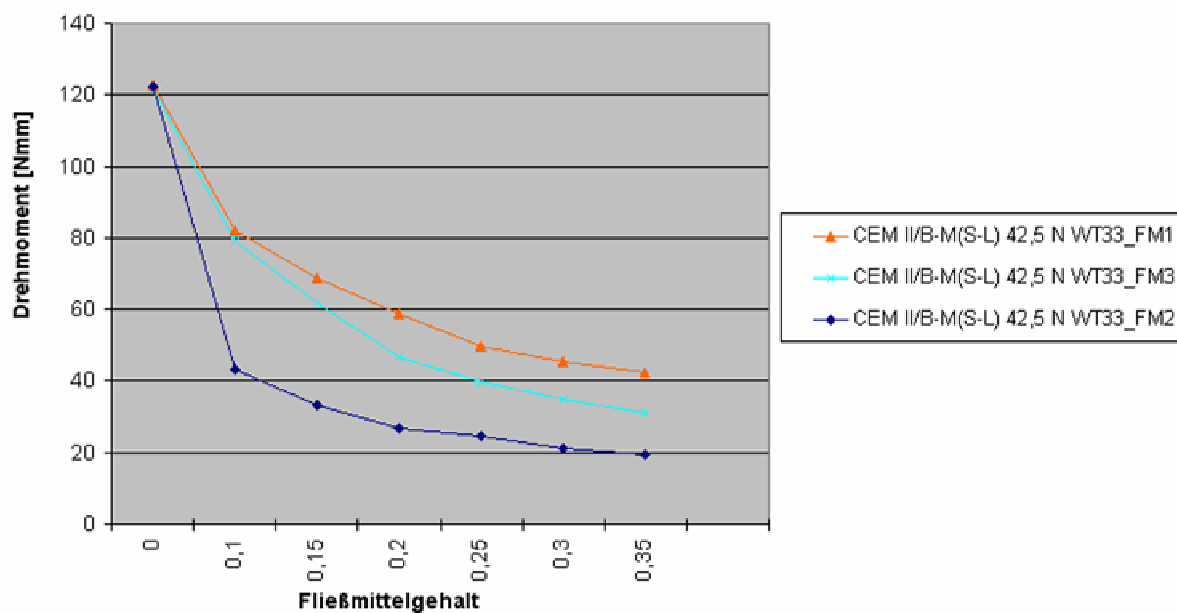
Materialverhalten für Zementleim mit FM 2



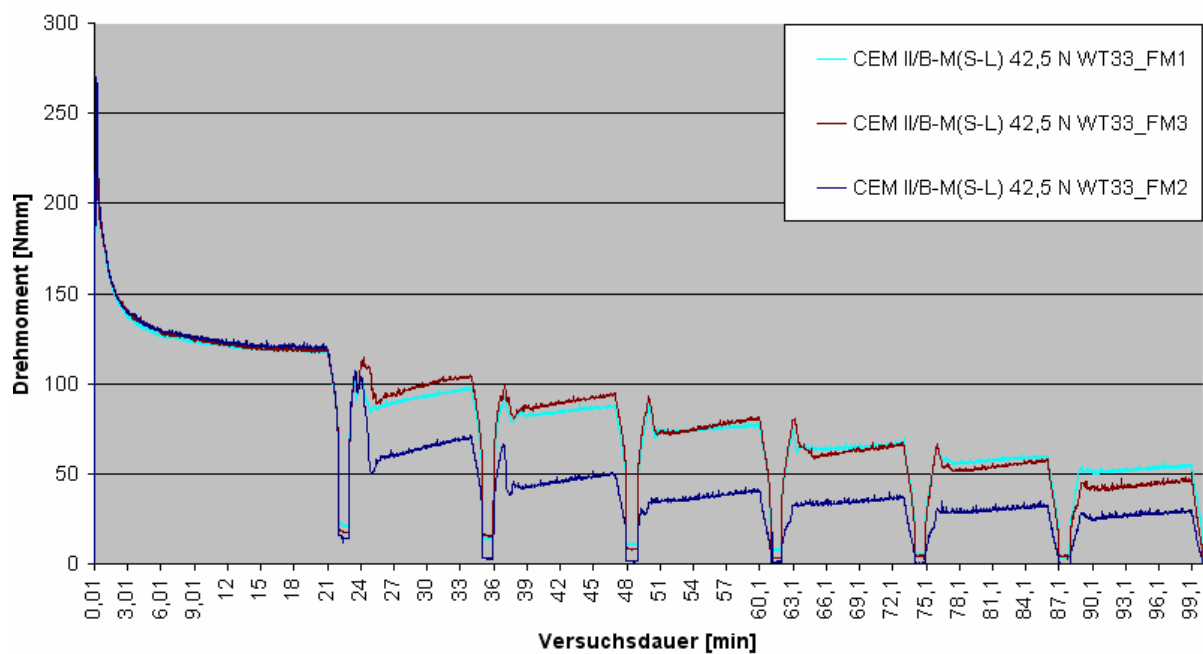
Materialverhalten für Zementleim mit FM 3



Sättigungskurven

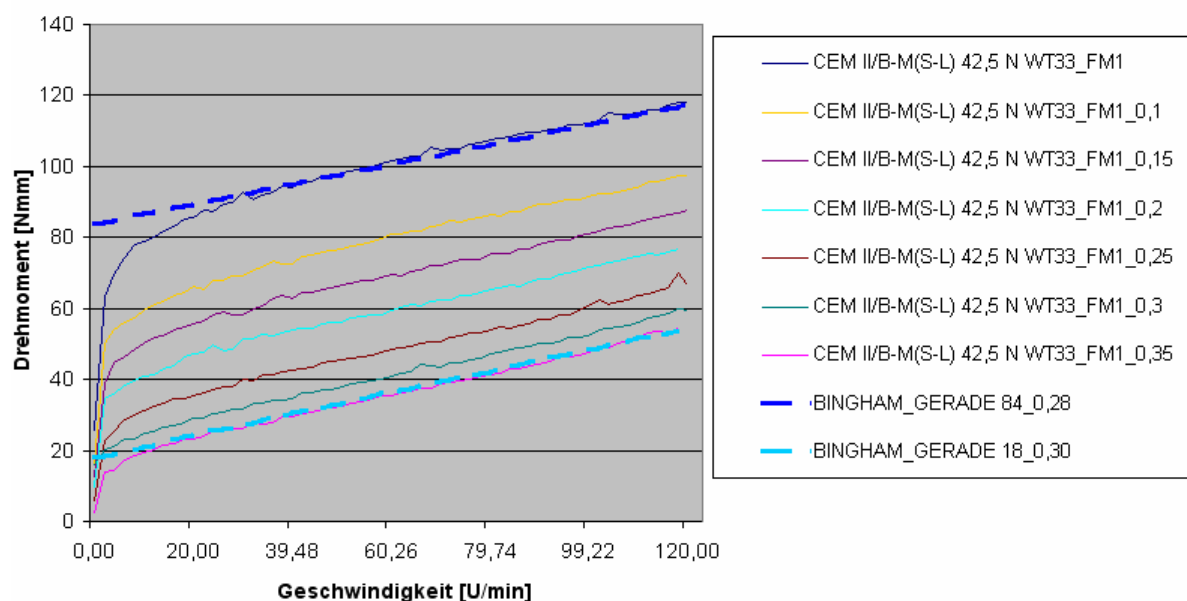
**CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33 – ALKALIREICH (Versuchsreihe A3)**

Drehmoment



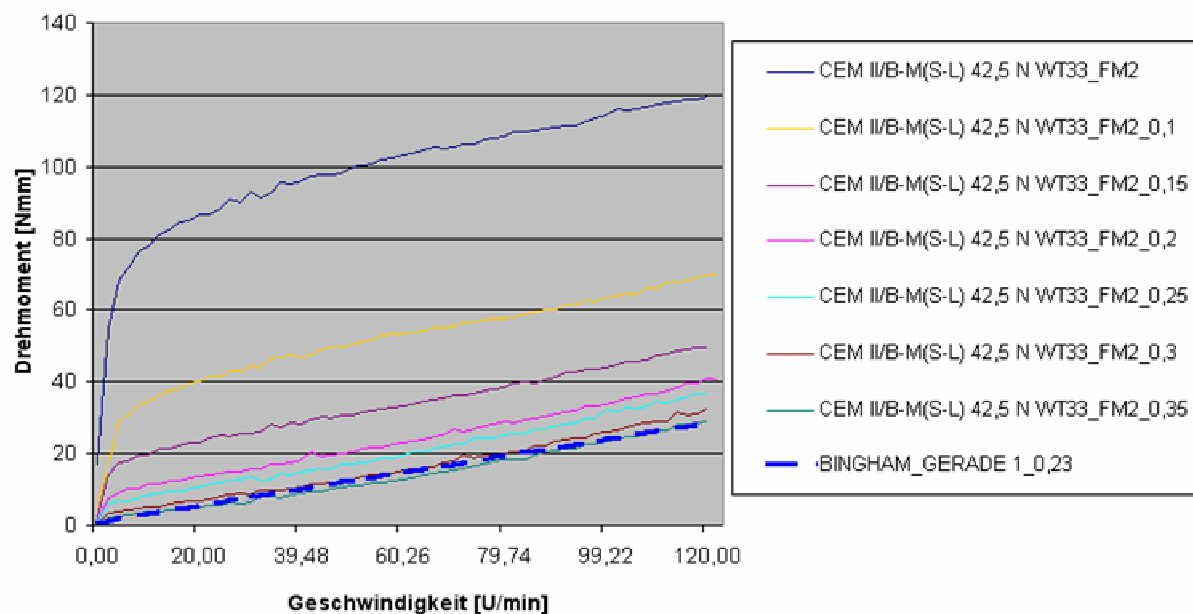
Materialverhalten für Zementleim mit FM 1

CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33 - FM 1

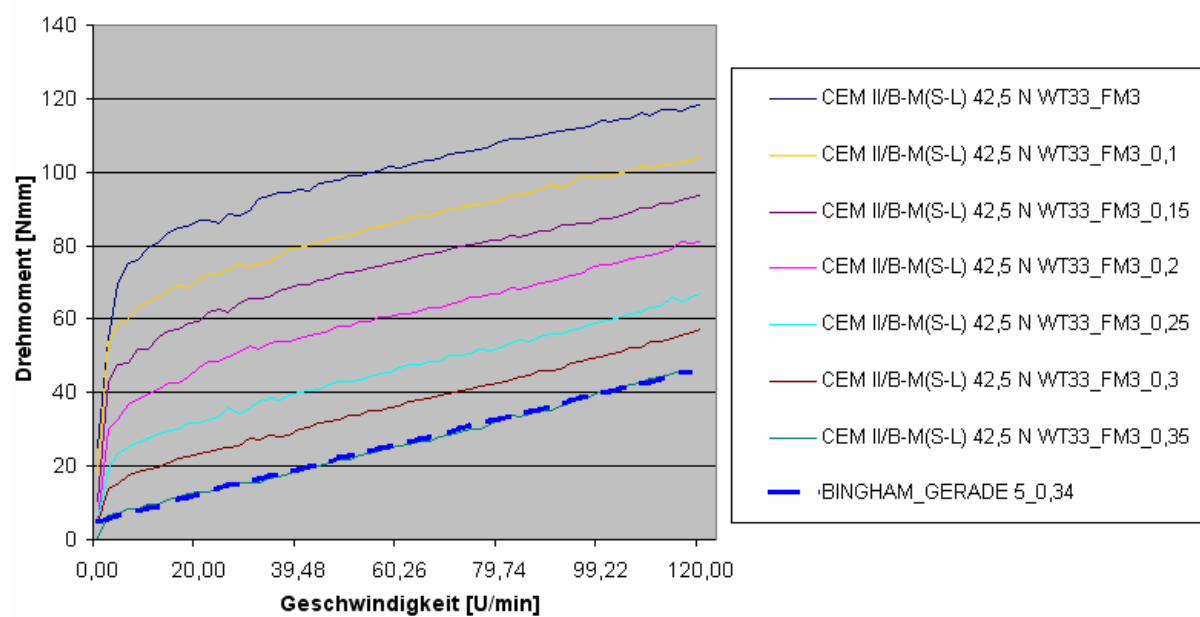


Materialverhalten für Zementleim mit FM 2

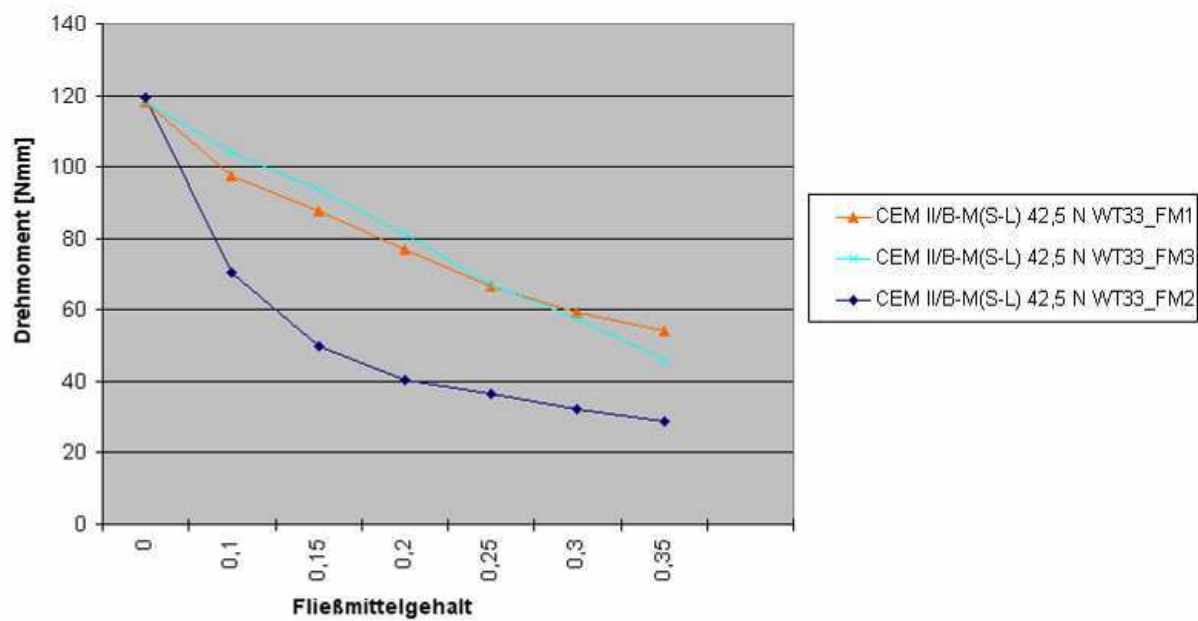
CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33 - FM 2



Materialverhalten für Zementleim mit FM 3

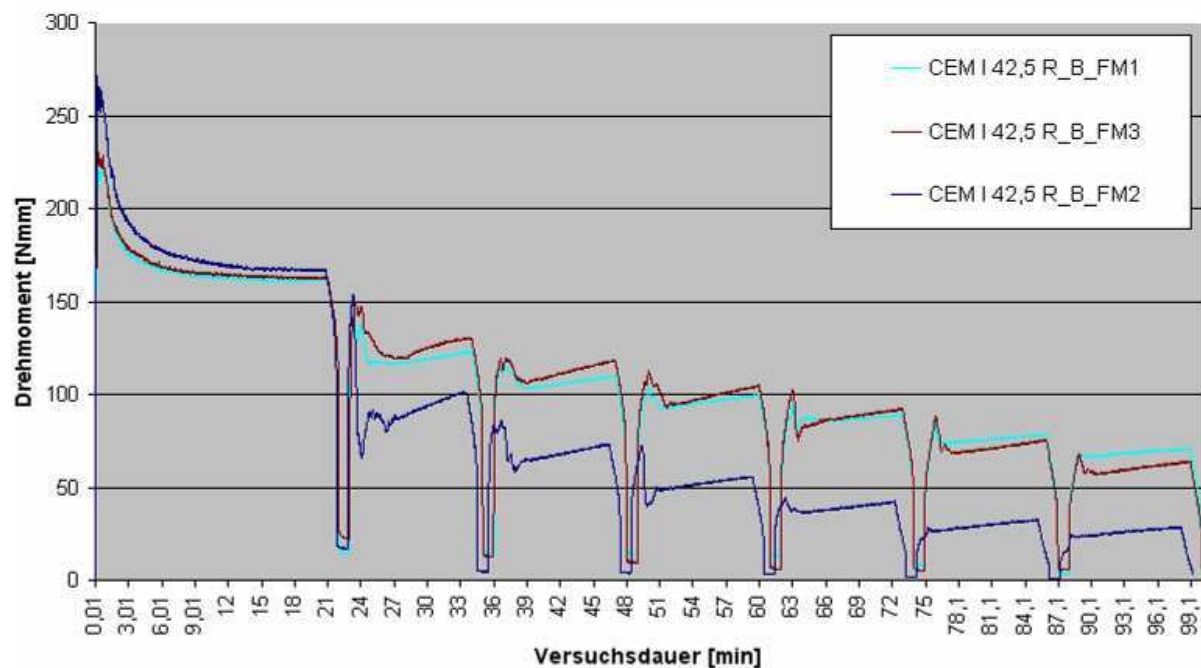
CEM II/B-M(S-L) 42,5 N WT33 - FM 3

Sättigungskurven



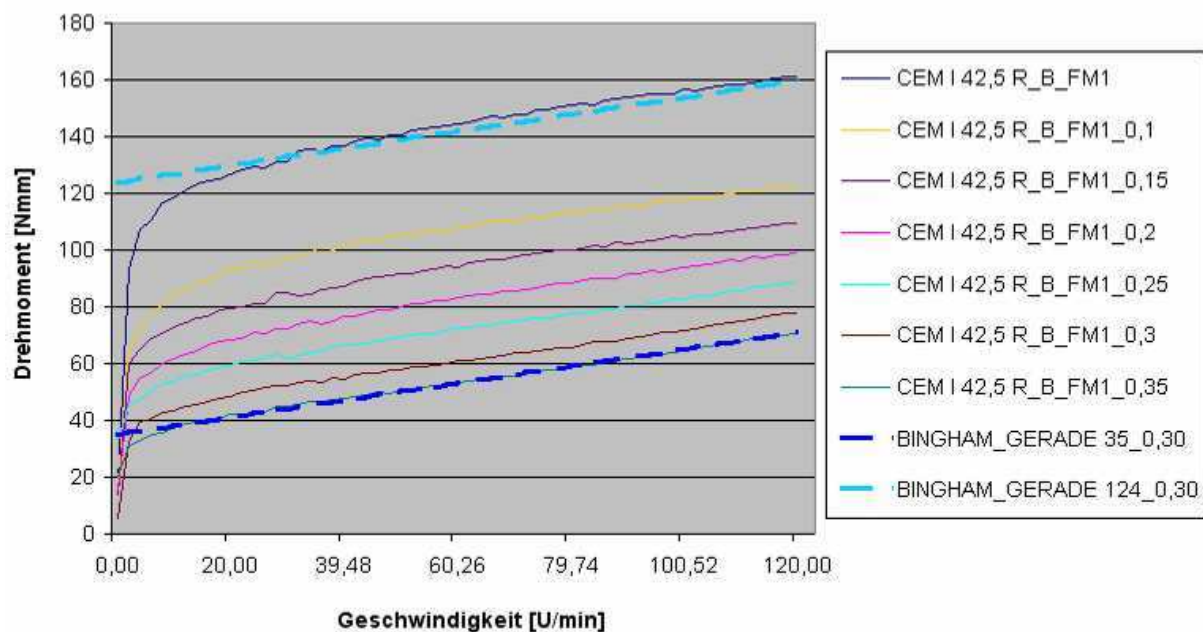
CEM I 42,5 R – Typ B (Versuchsreihe B)

Drehmoment

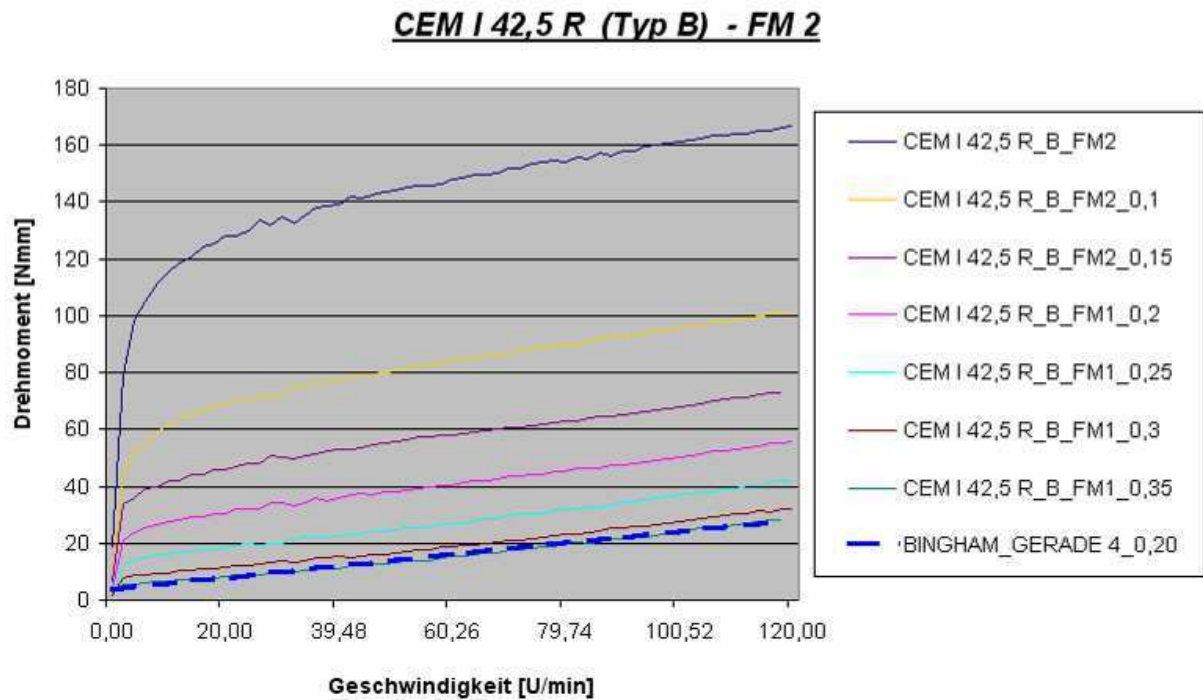


Materialverhalten für Zementleim mit FM 1

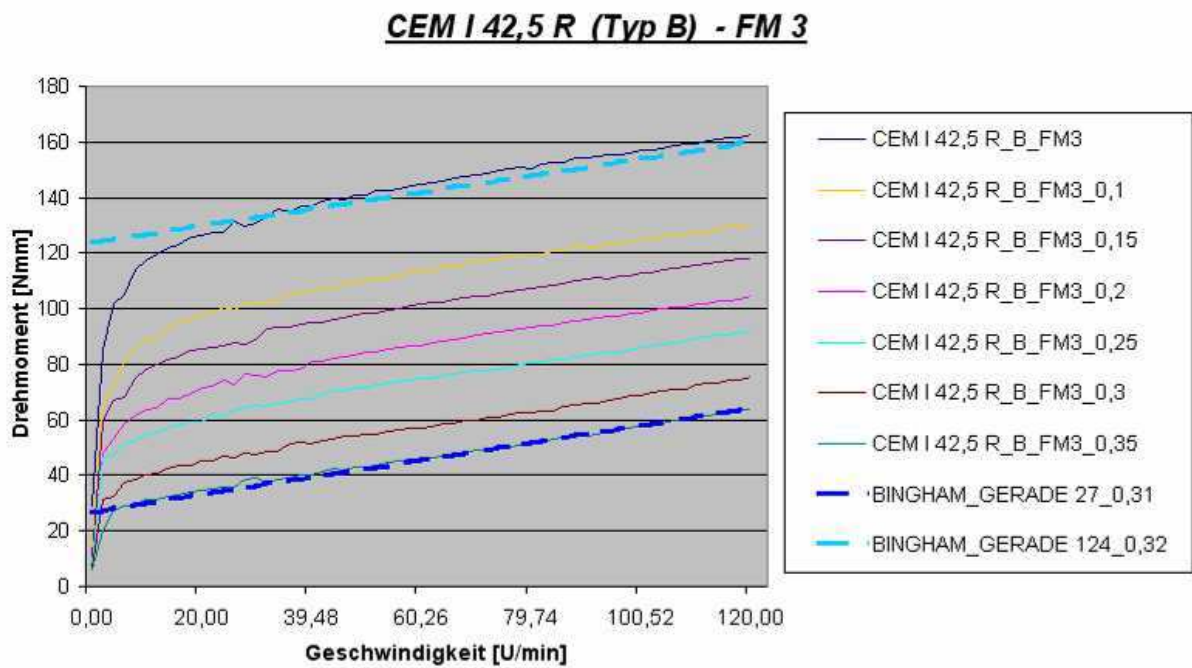
CEM I 42,5 R (Typ B) - FM 1



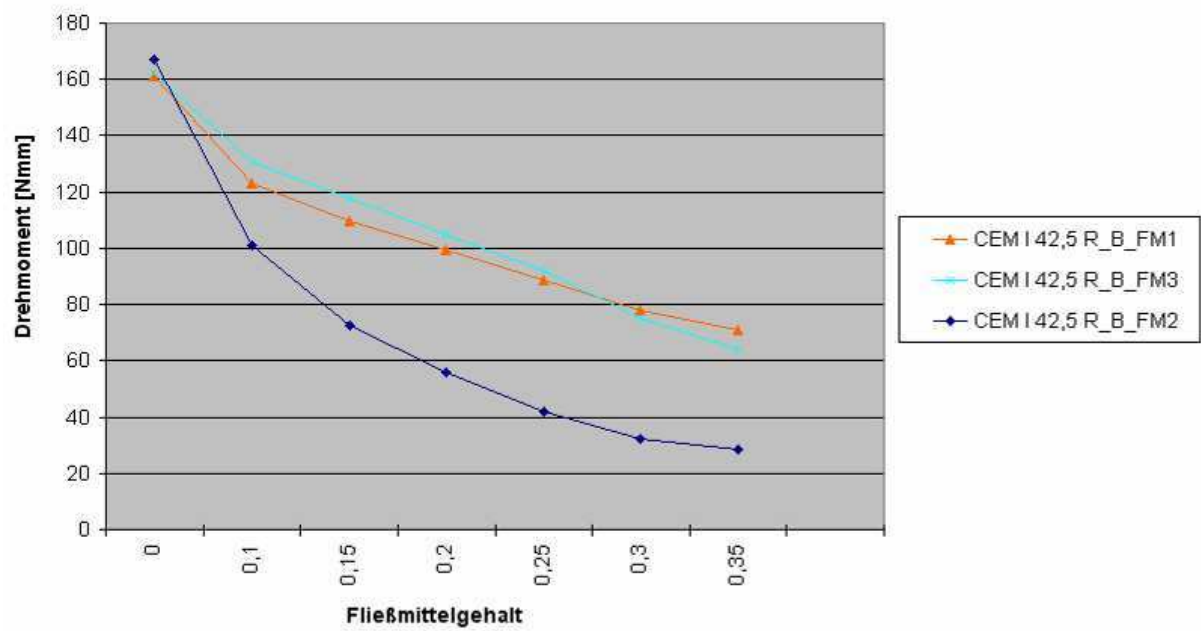
Materialverhalten für Zementleim mit FM 2



Materialverhalten für Zementleim mit FM 3

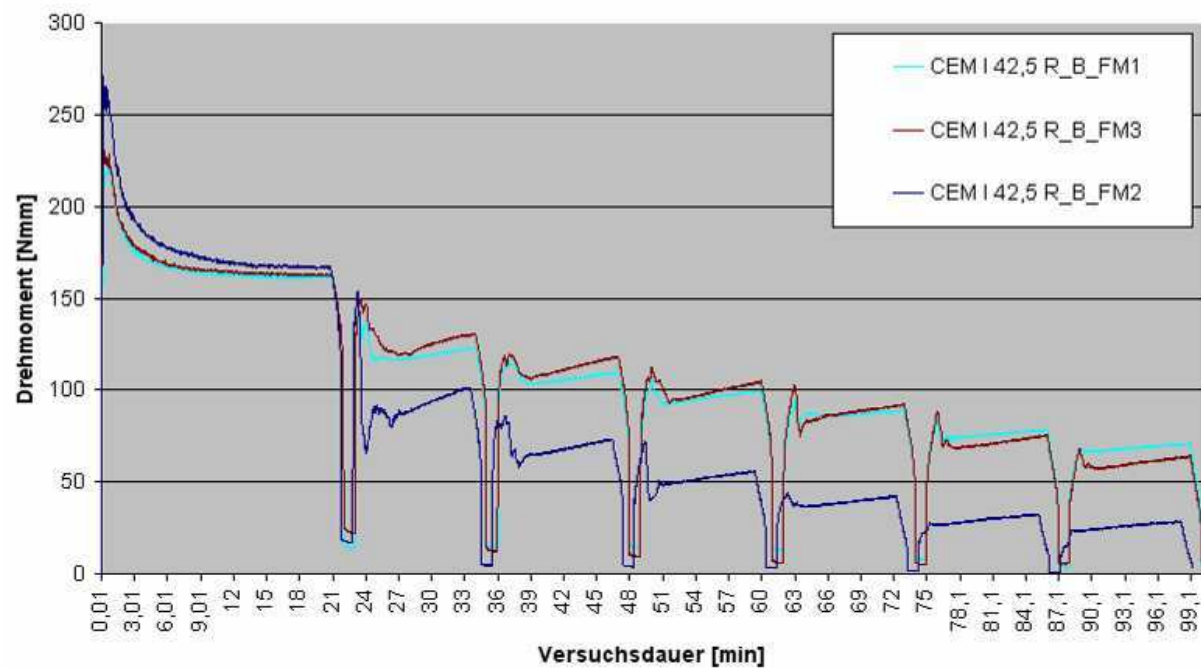


Sättigungskurven

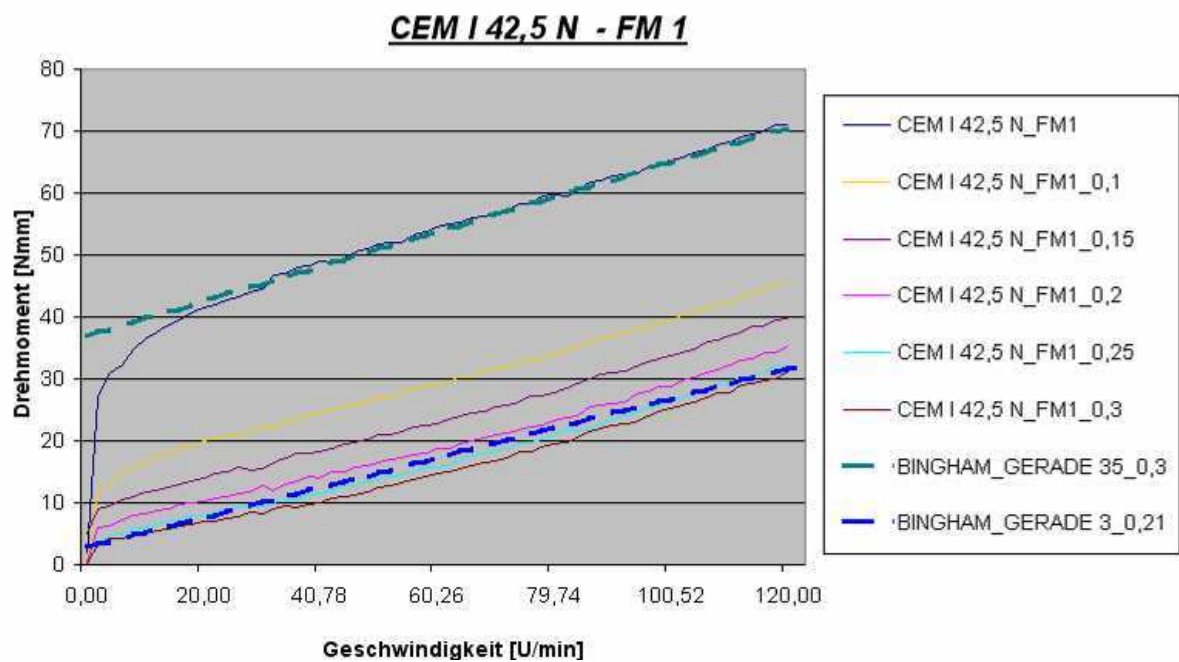


CEM I 42,5 N (Versuchsreihe C1)

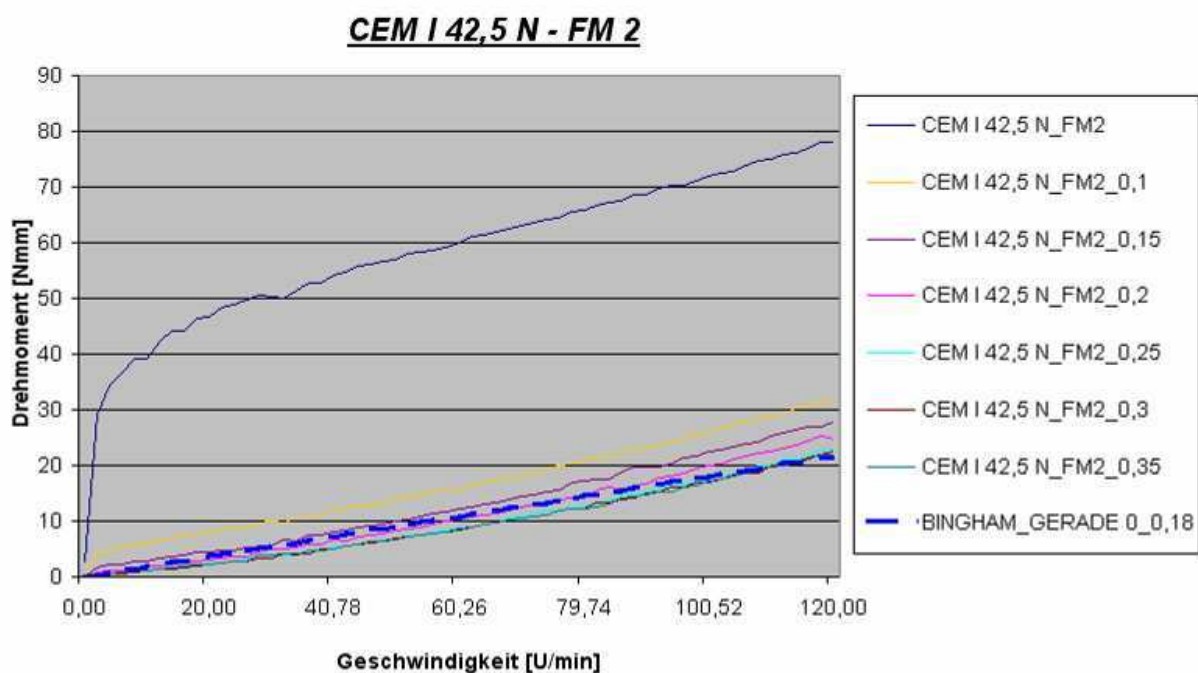
Drehmoment



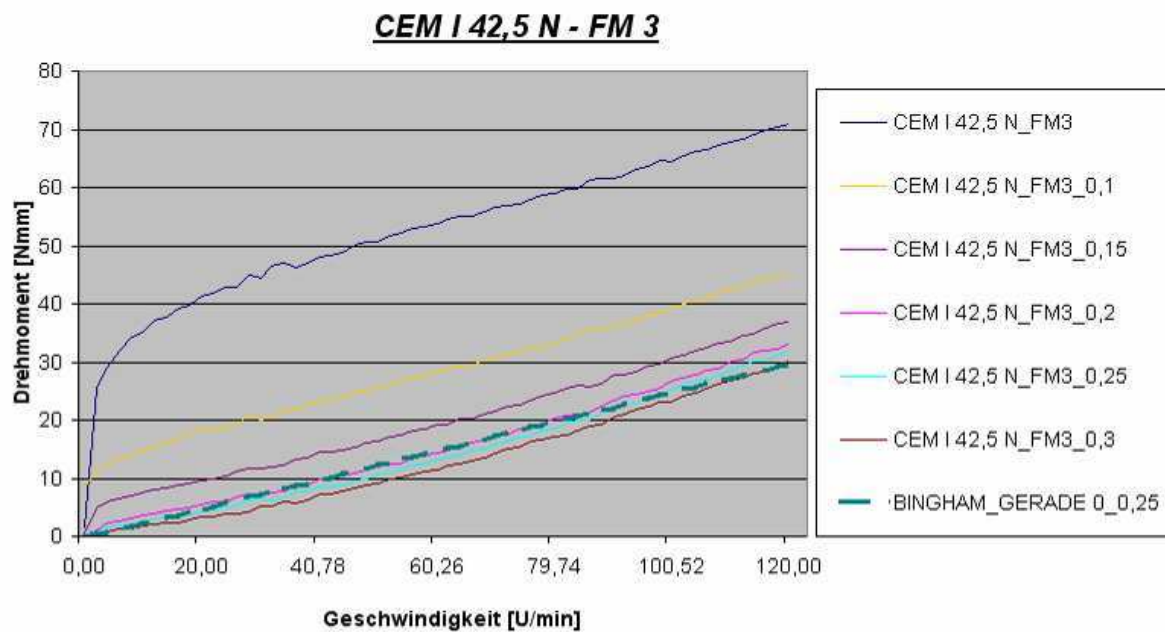
Materialverhalten für Zementleim mit FM 1



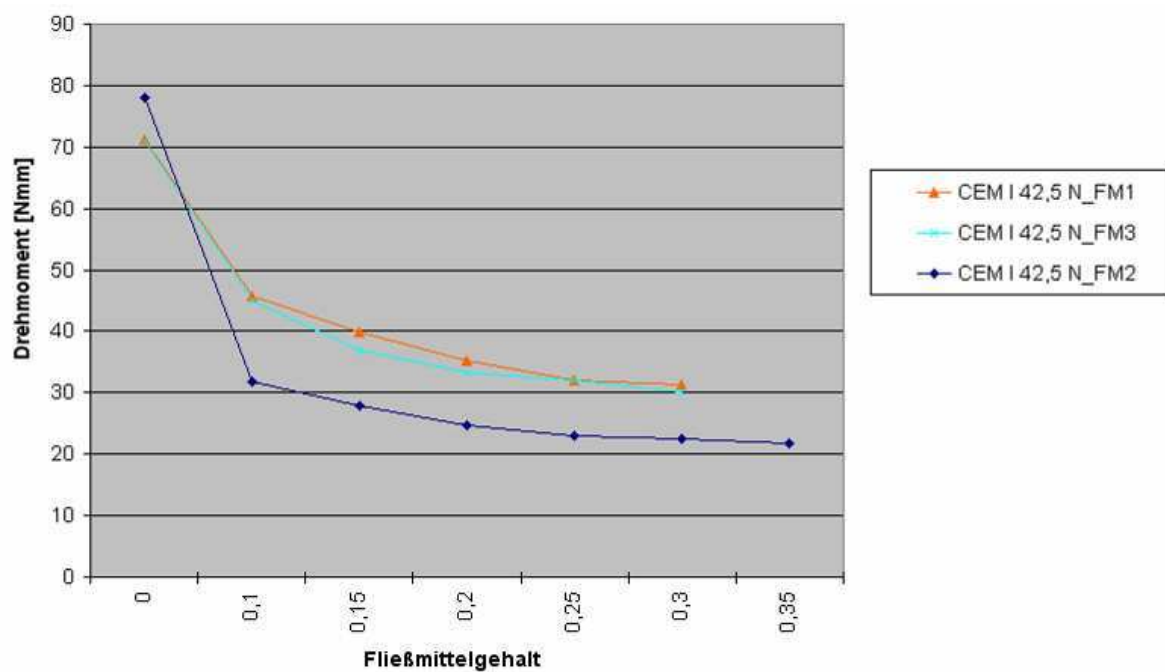
Materialverhalten für Zementleim mit FM 2



Materialverhalten für Zementleim mit FM 3

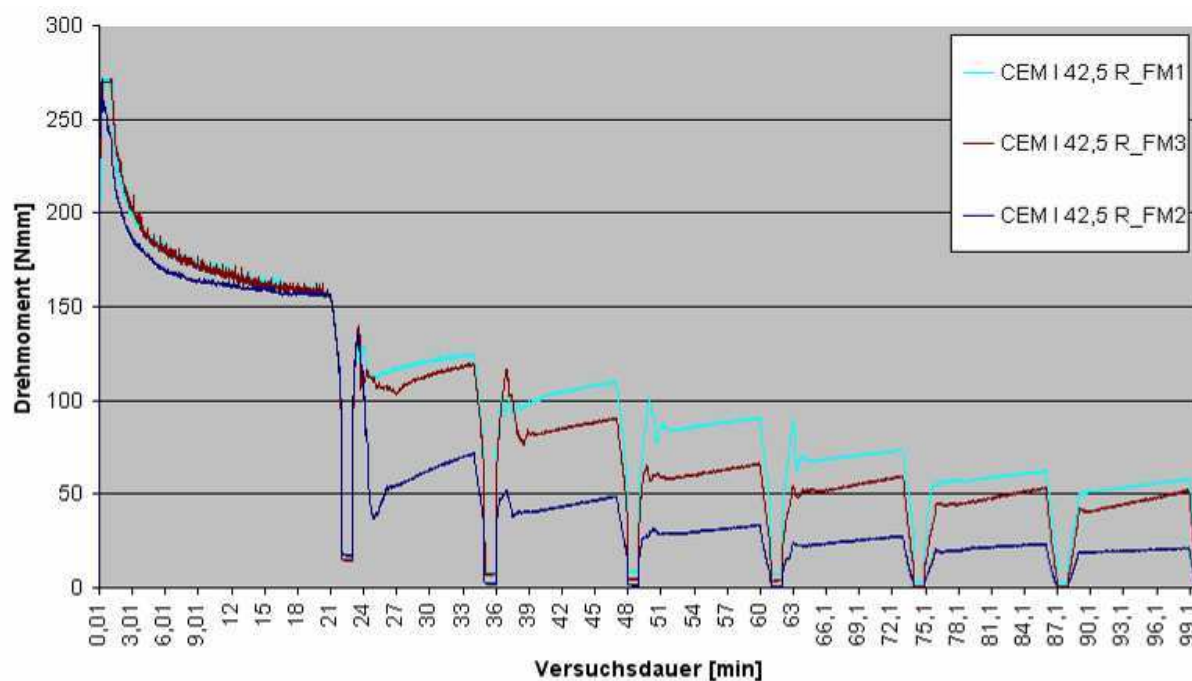


Sättigungskurven

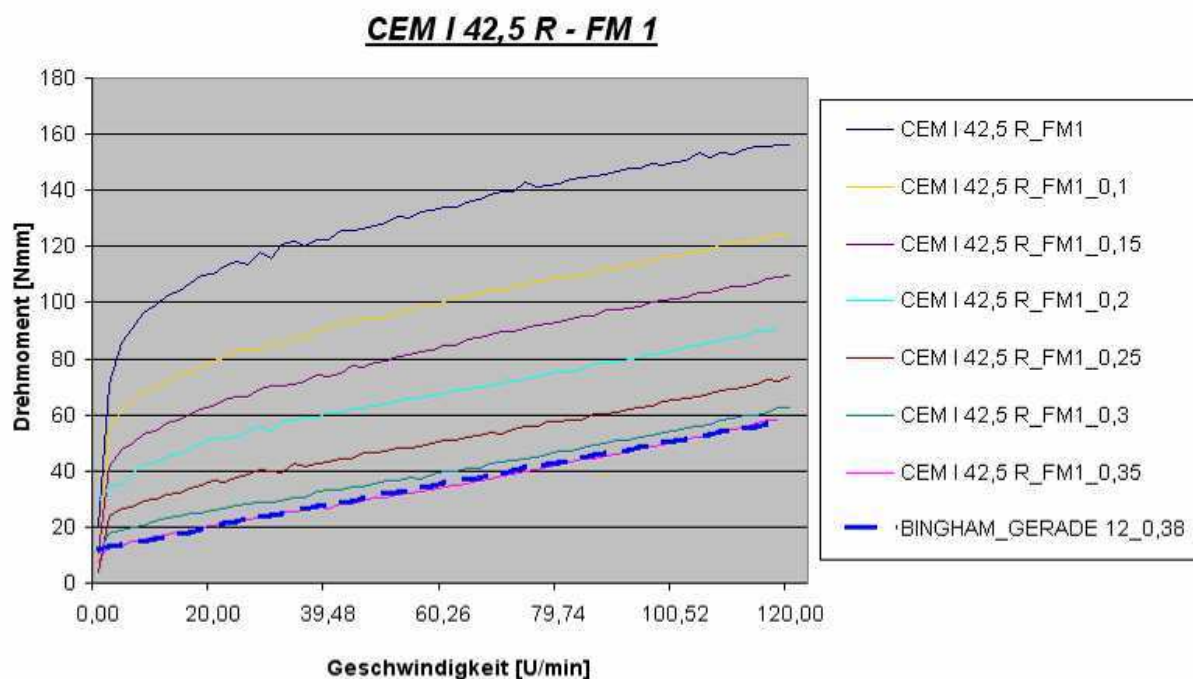


CEM I 42,5 R (Versuchsreihe C1)

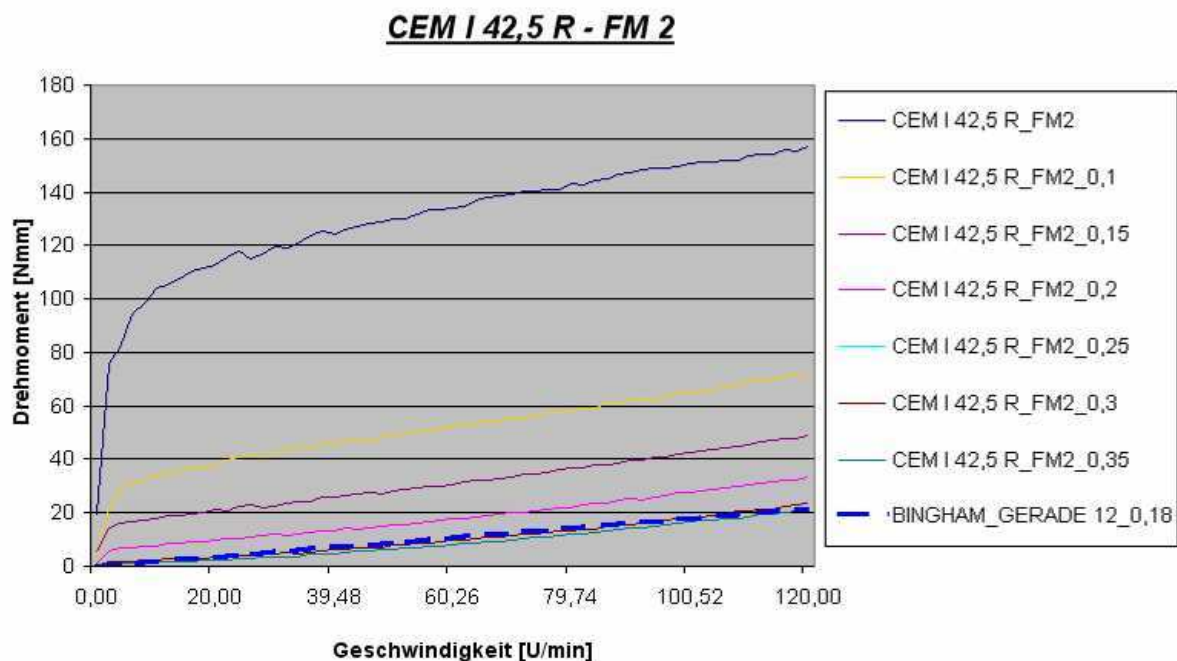
Drehmoment



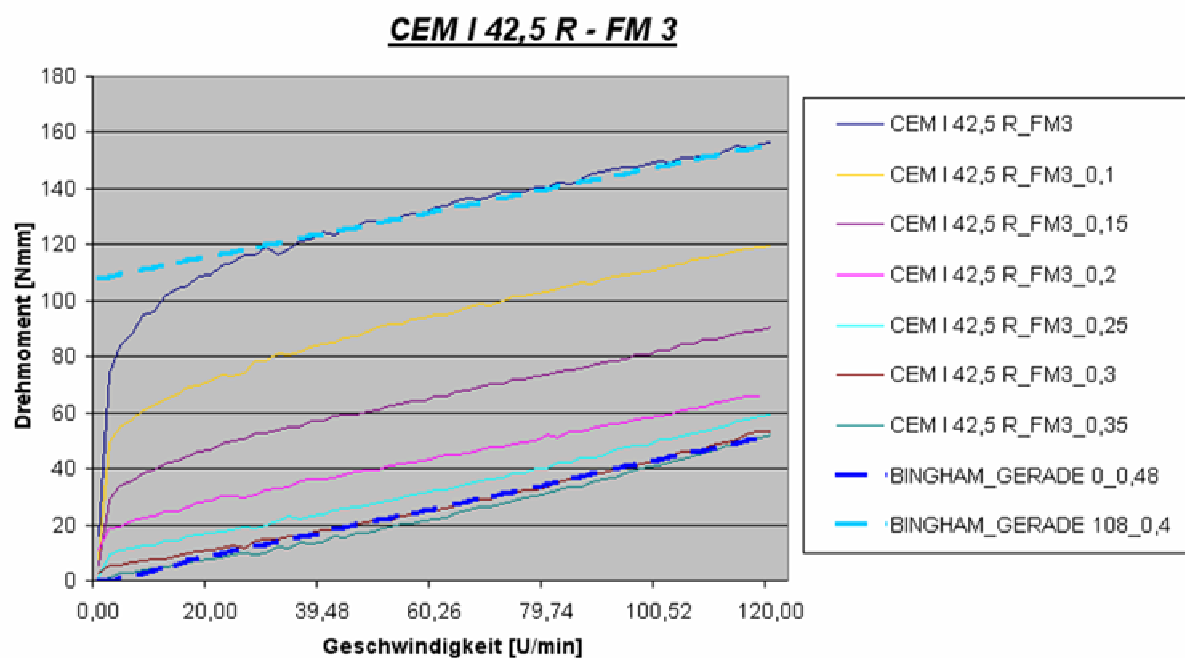
Materialverhalten für Zementleim mit FM 1



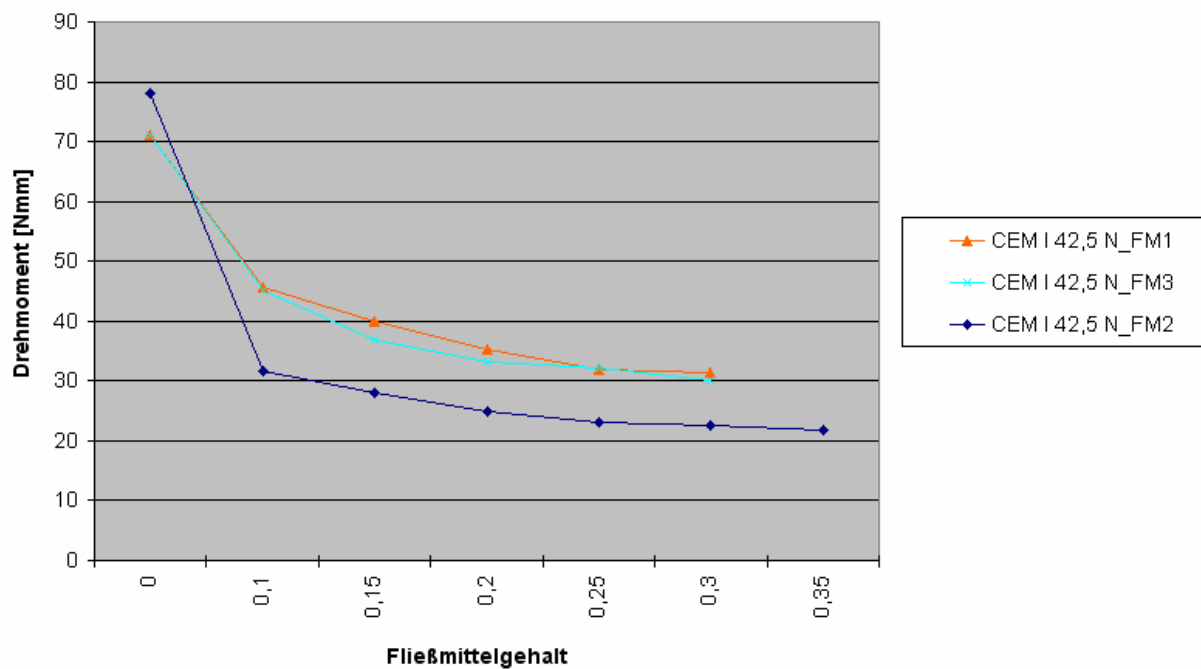
Materialverhalten für Zementleim mit FM 2



Materialverhalten für Zementleim mit FM 3

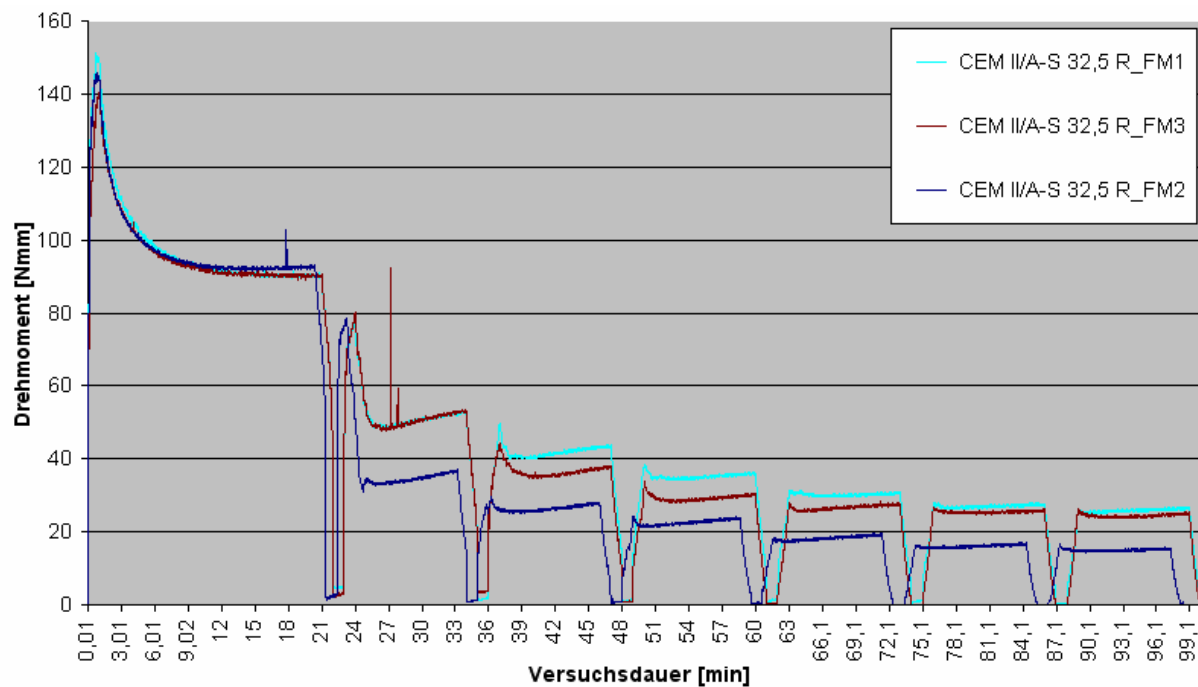


Sättigungskurven

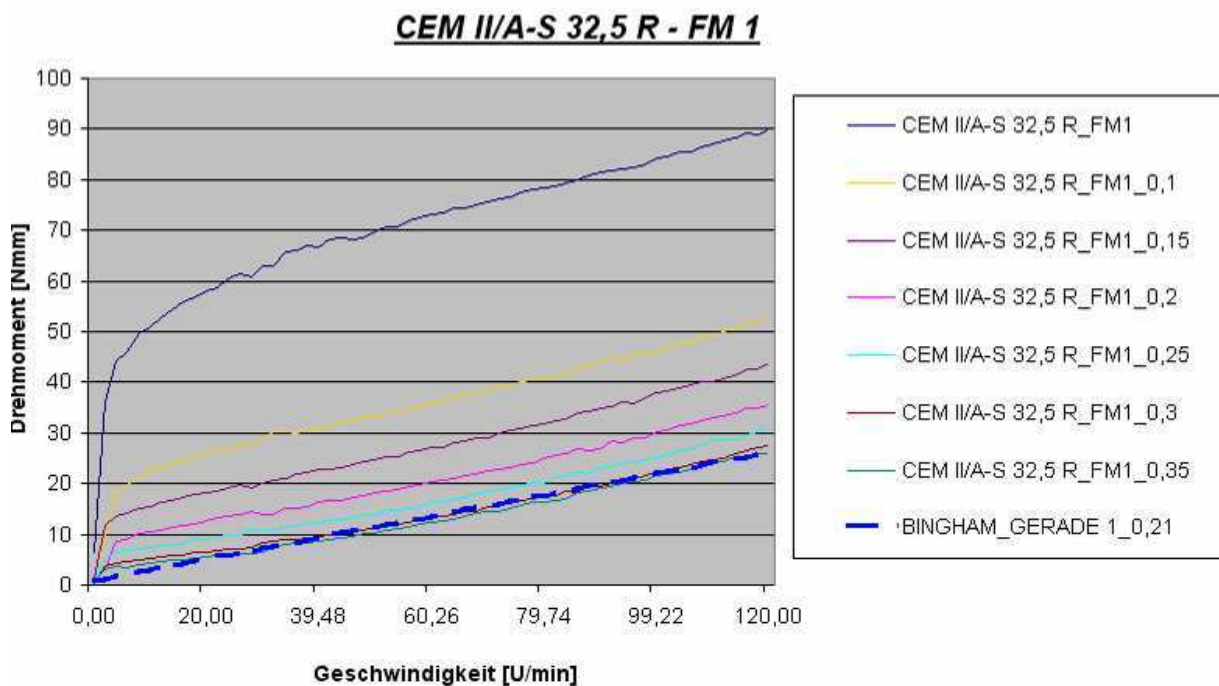


CEM II/A-S 32,5 R (Versuchsreihe C2)

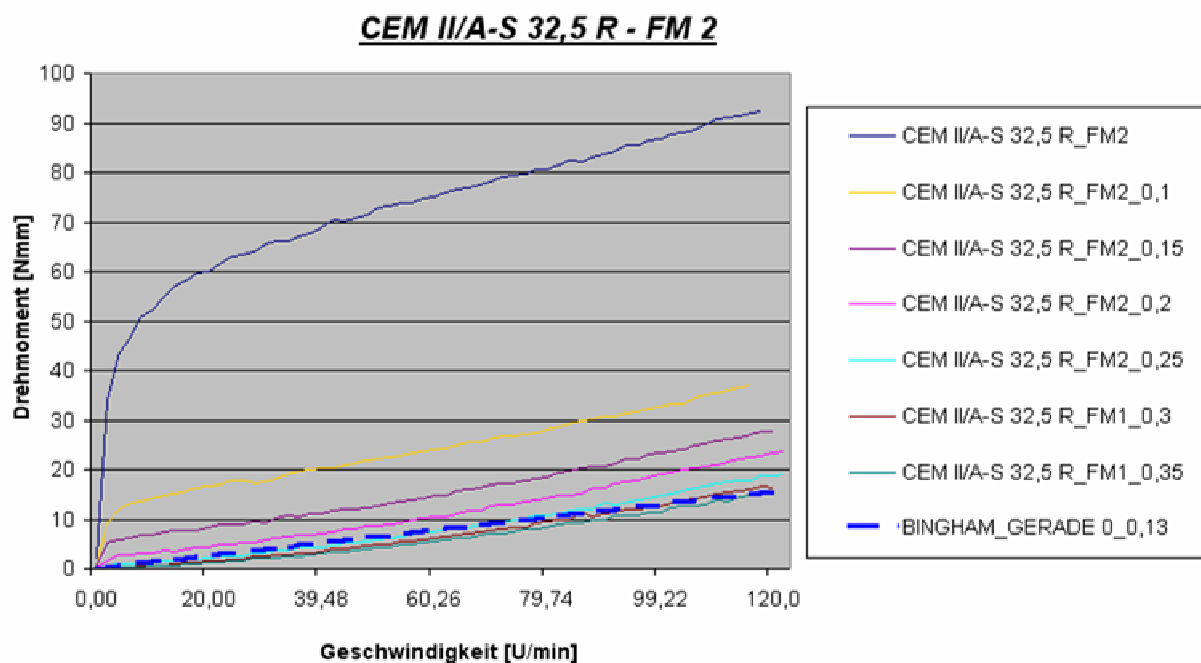
Drehmoment



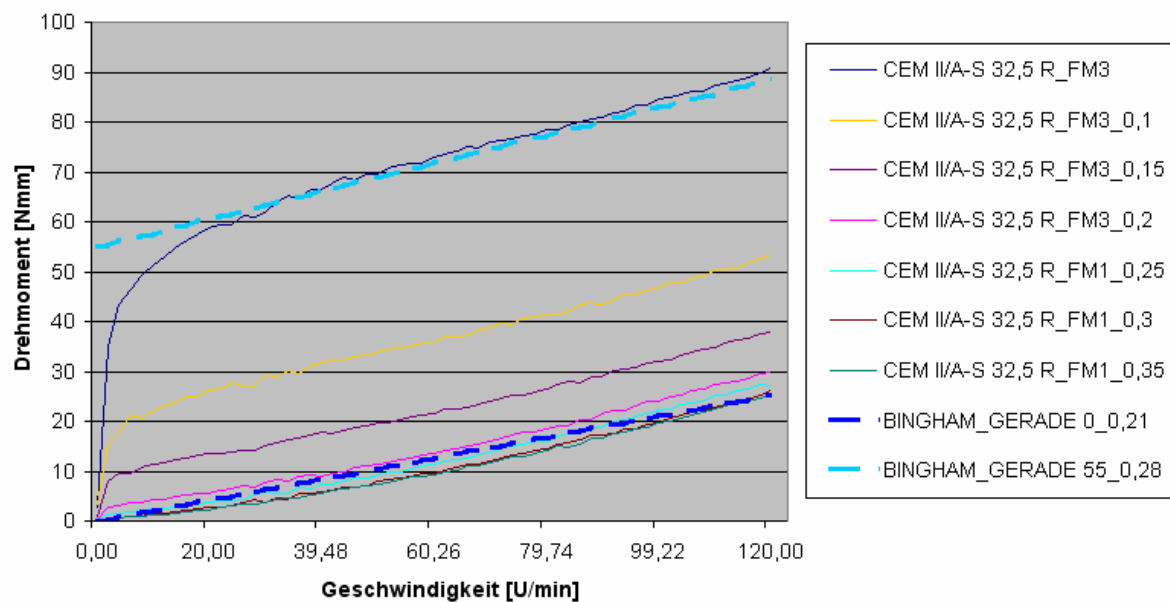
Materialverhalten für Zementleim mit FM 1



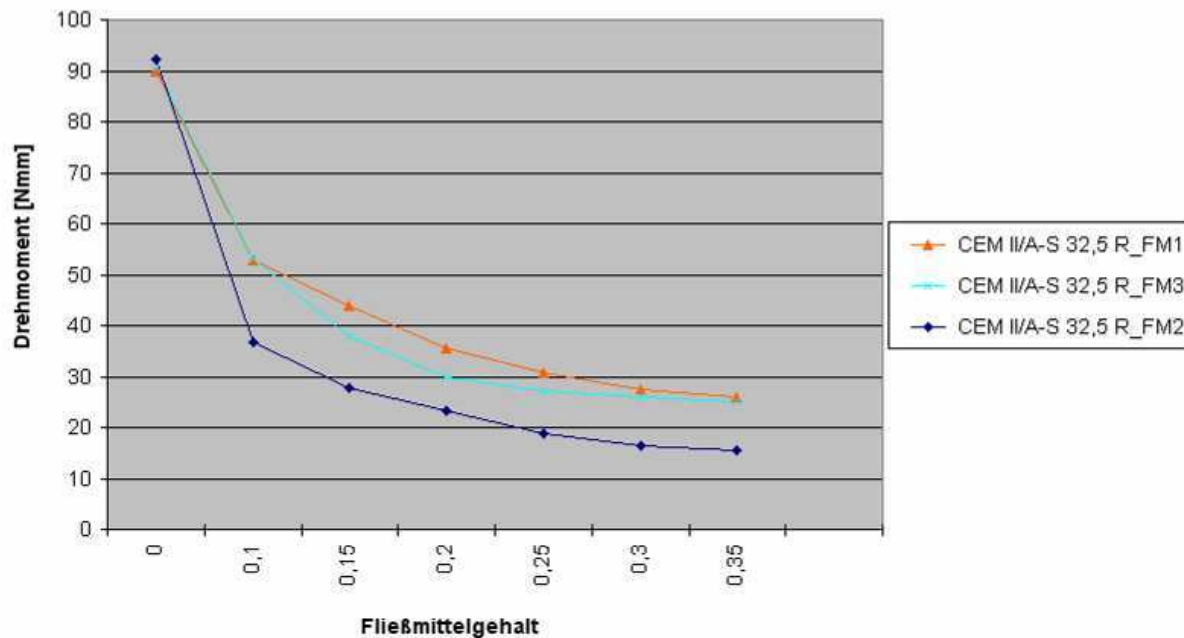
Materialverhalten für Zementleim mit FM 2



Materialverhalten für Zementleim mit FM 3

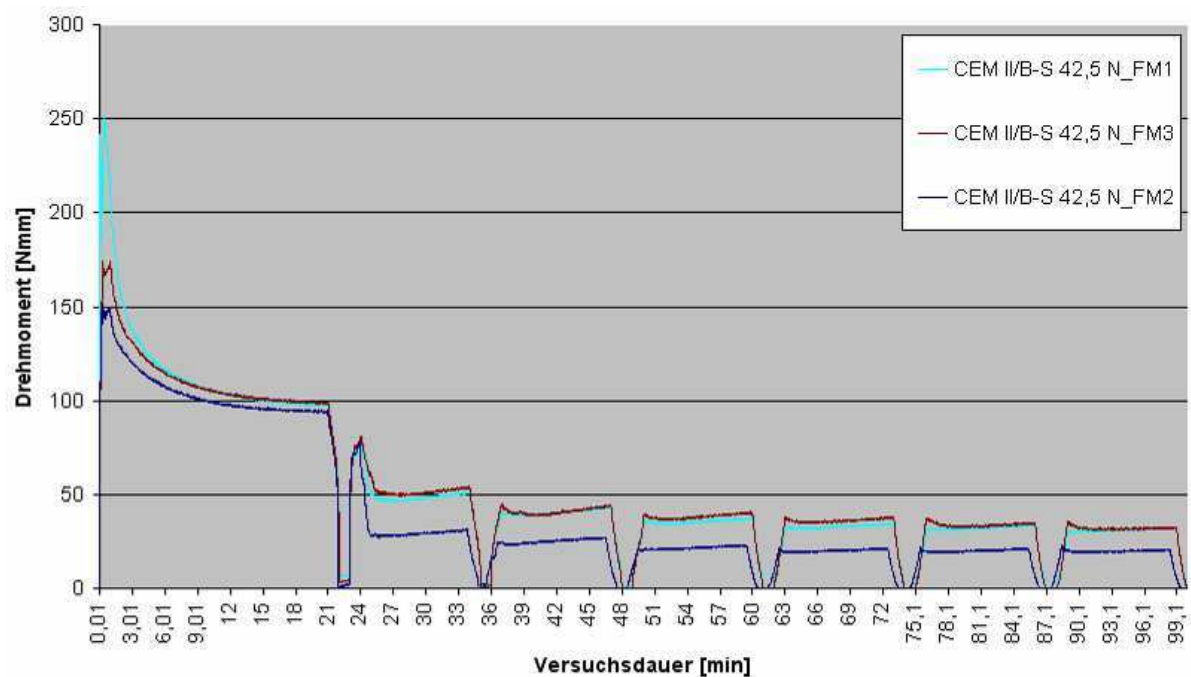
CEM II/A-S 32,5 R - FM 3

Sättigungskurven



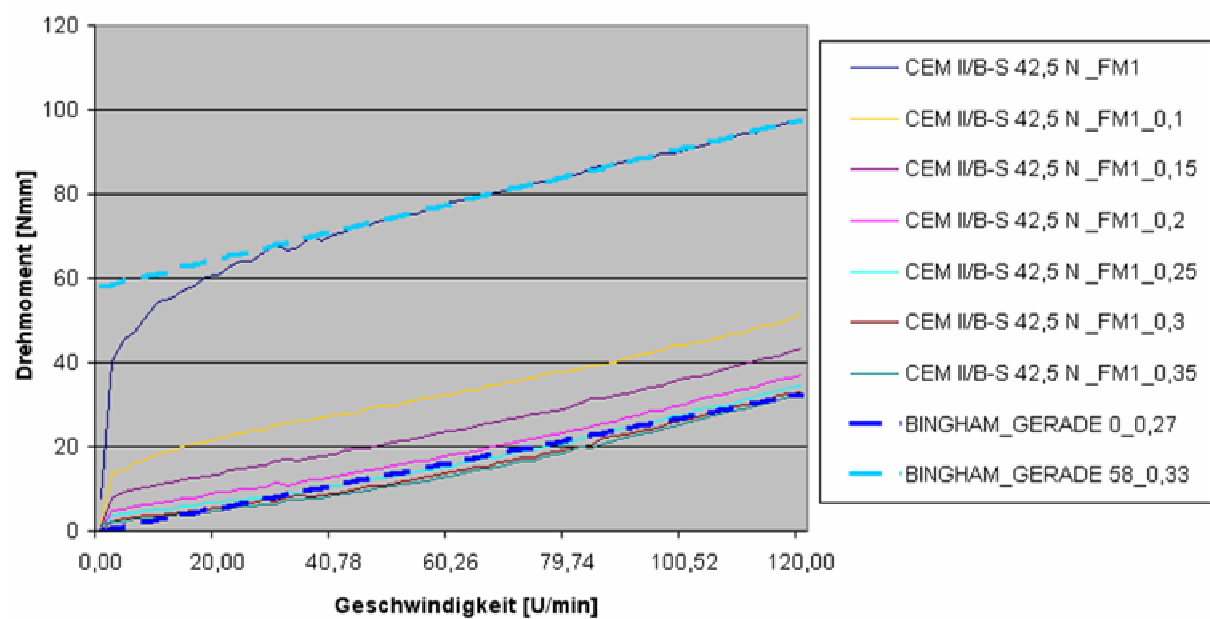
CEM II/B-S 42,5 N (Versuchsreihe C2)

Drehmoment

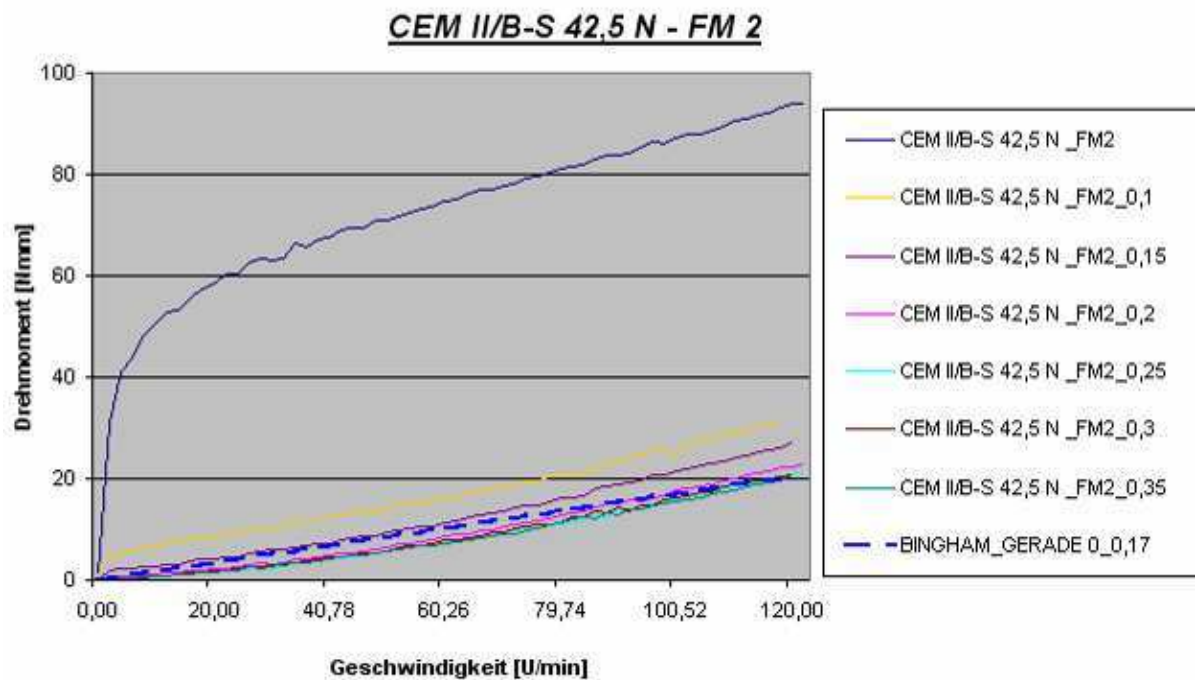


Materialverhalten für Zementleim mit FM 1

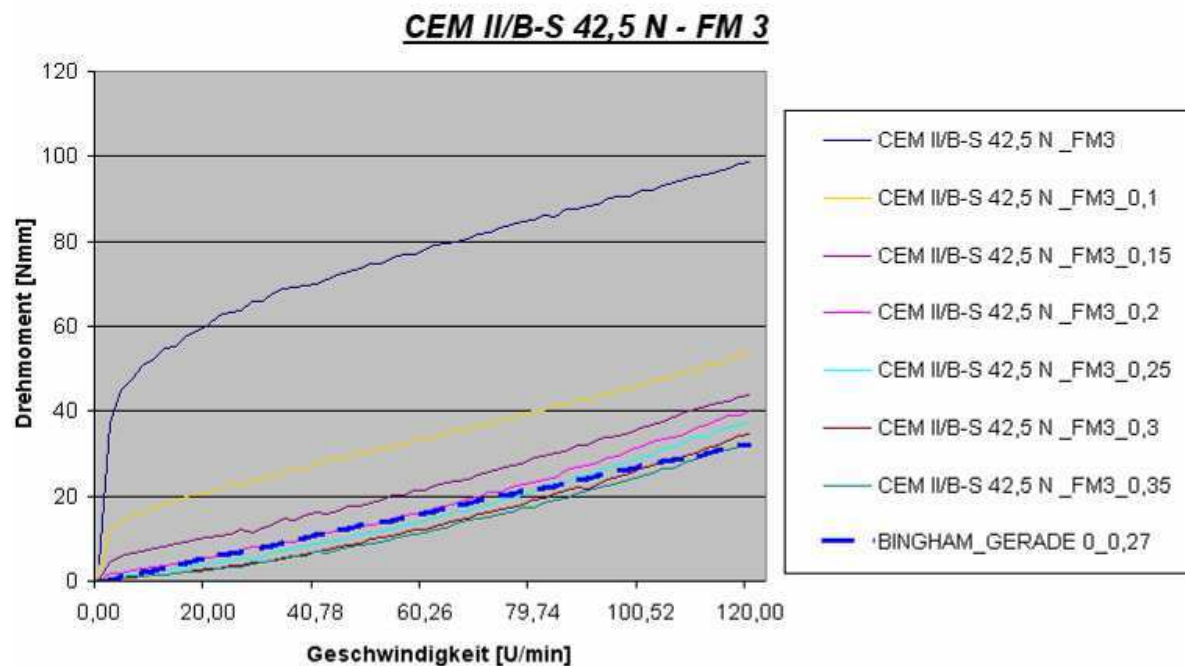
CEM II/B-S 42,5 N - FM 1



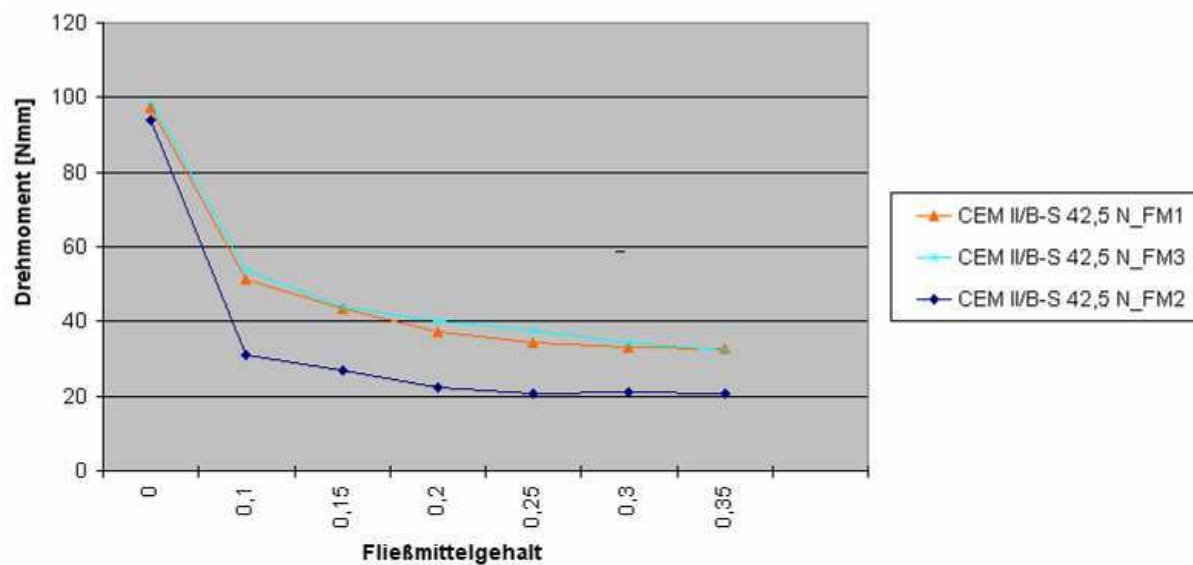
Materialverhalten für Zementleim mit FM 2



Materialverhalten für Zementleim mit FM 3

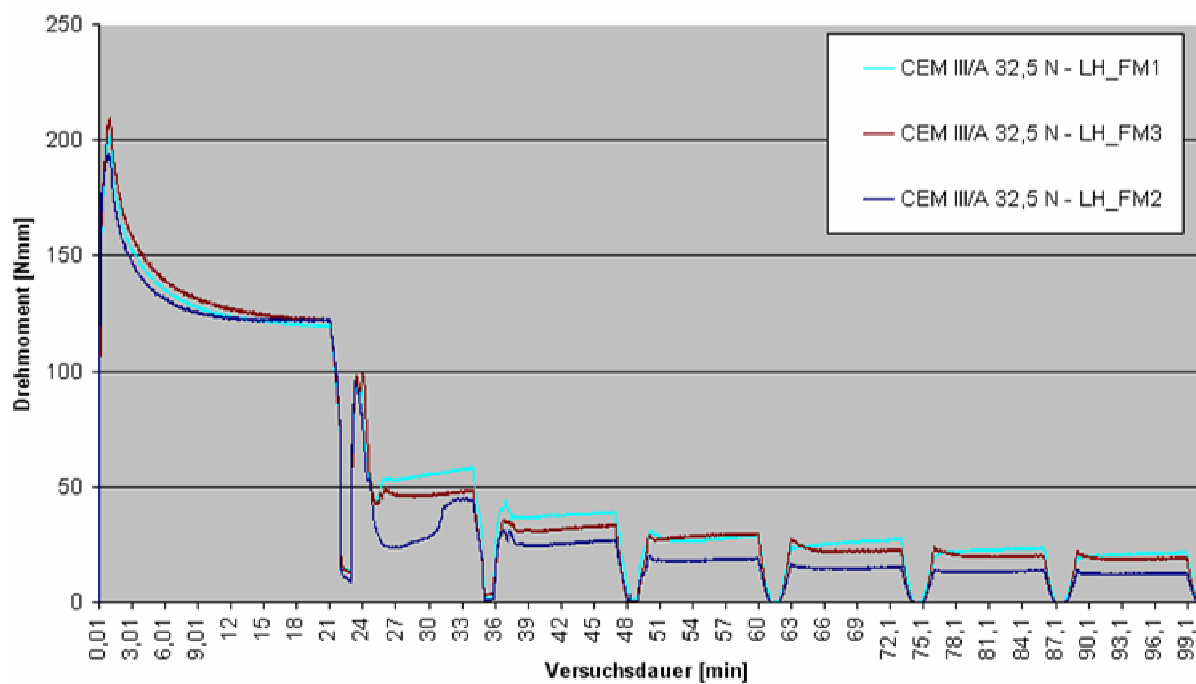


Sättigungskurven

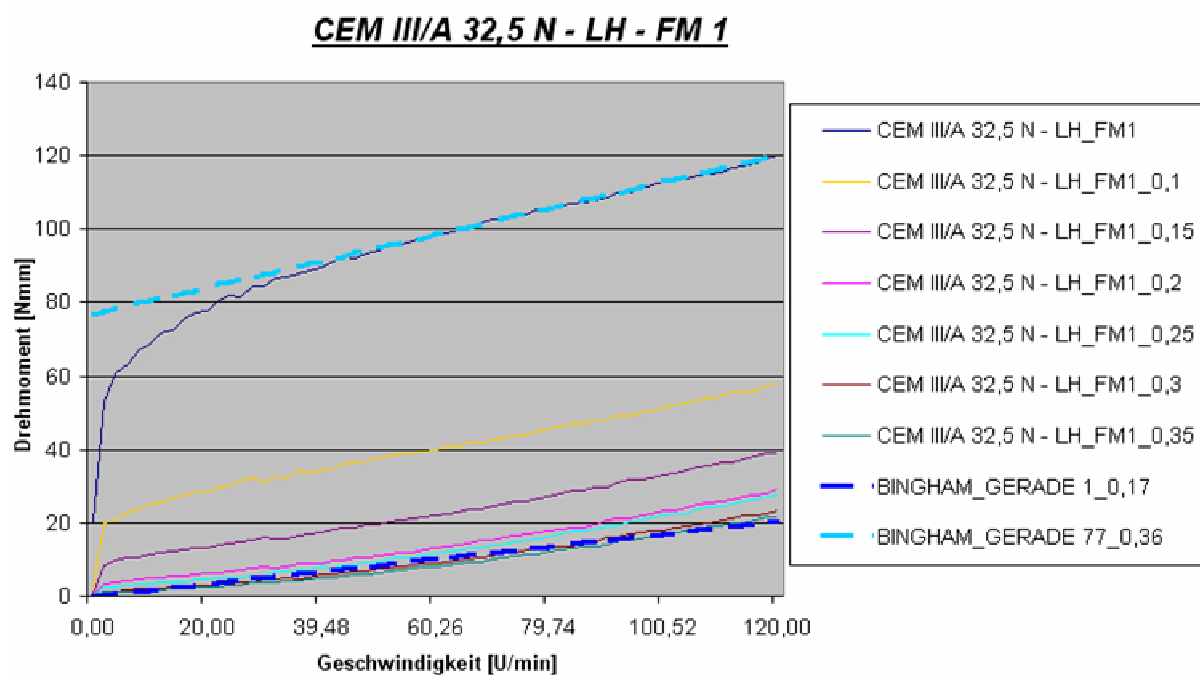


CEM III/A 32,5 N – LH (Versuchsreihe C2)

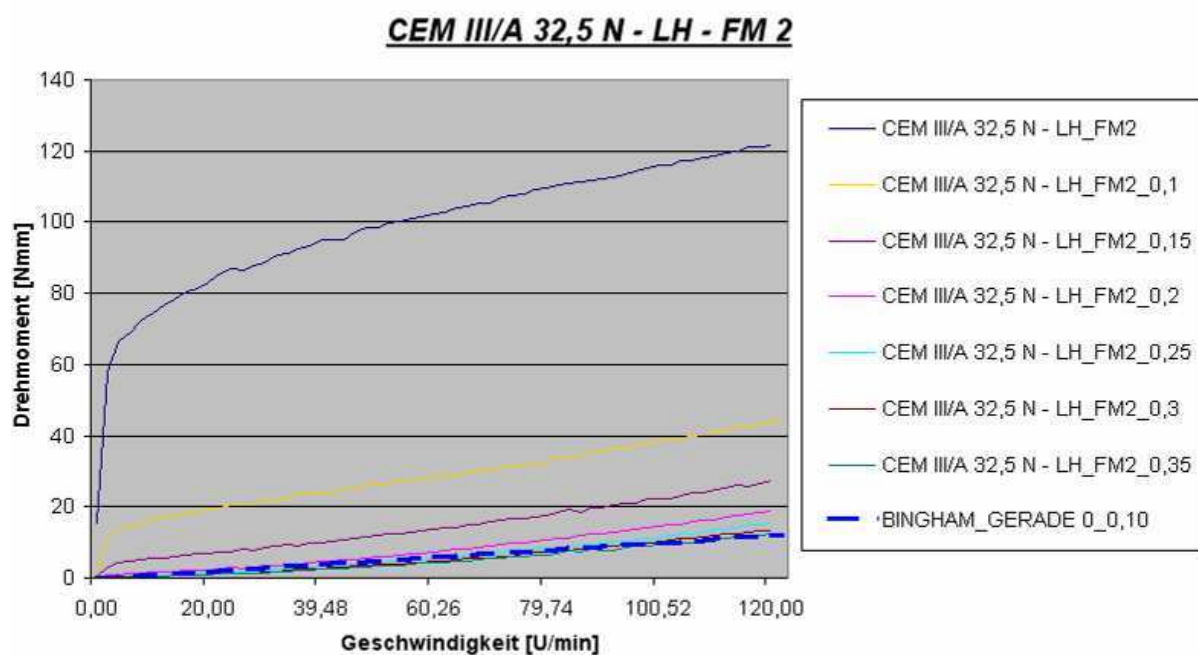
Drehmoment



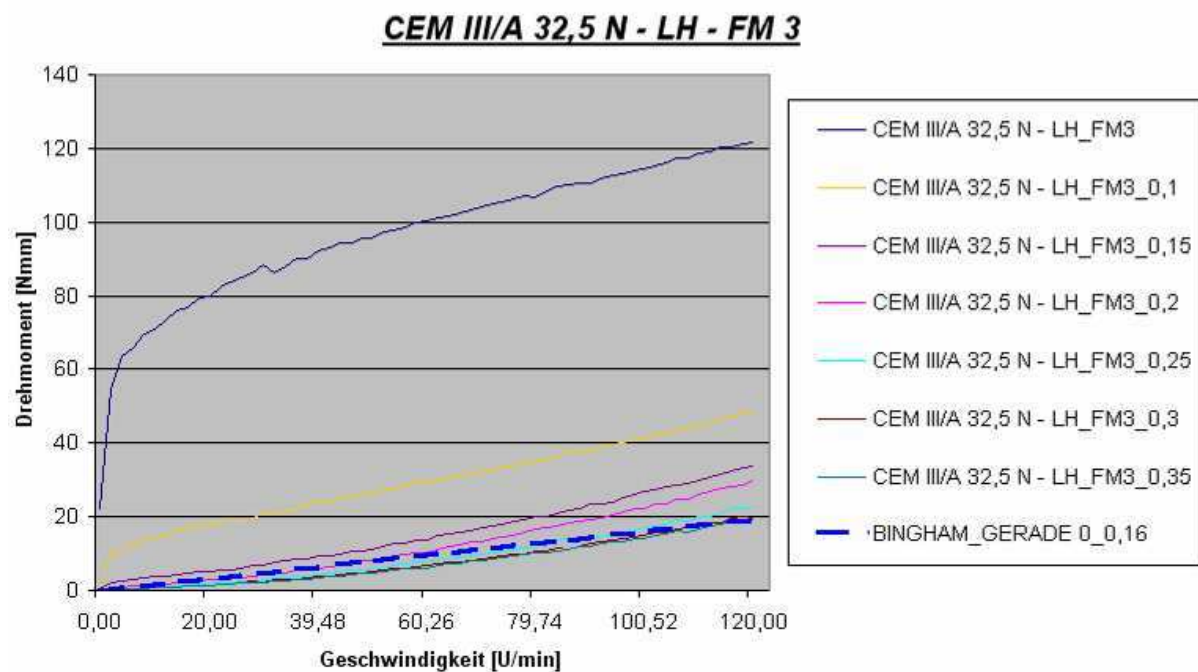
Materialverhalten für Zementleim mit FM 1



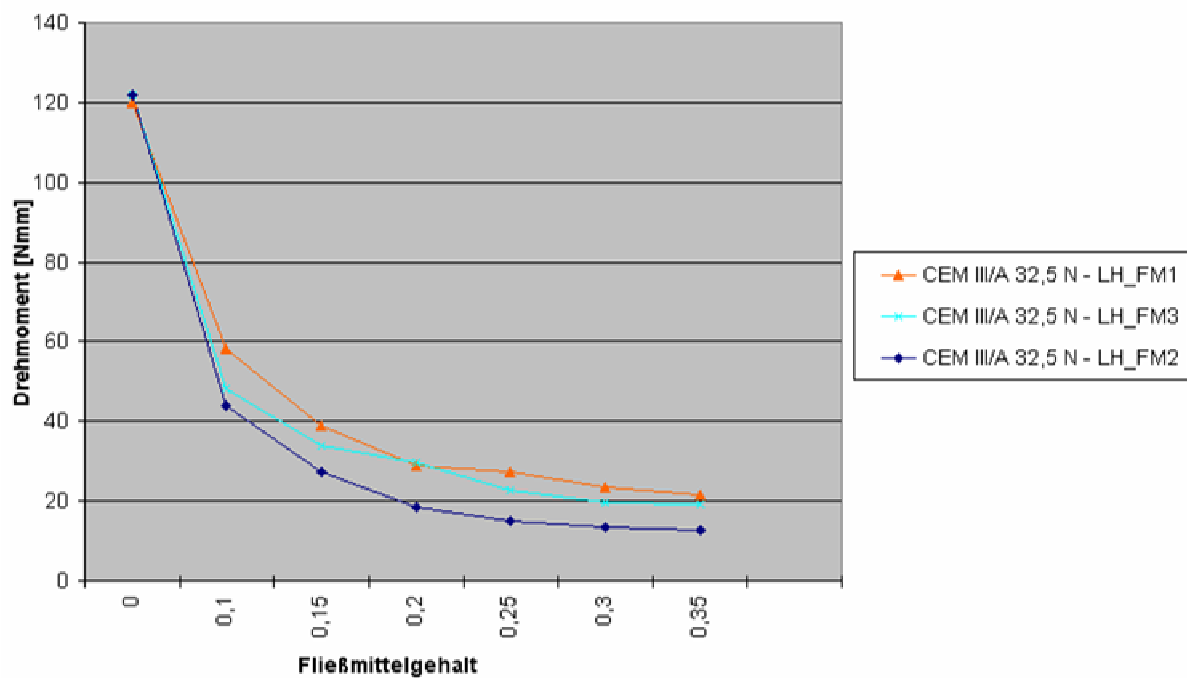
Materialverhalten für Zementleim mit FM 2



Materialverhalten für Zementleim mit FM 3

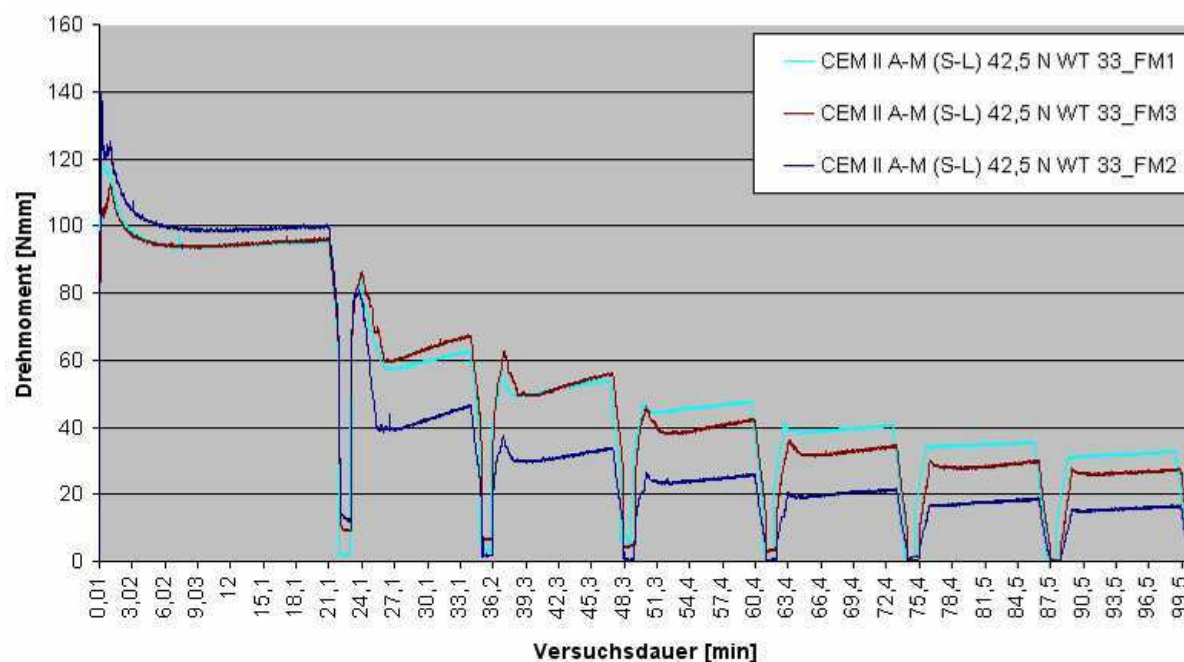


Sättigungskurven



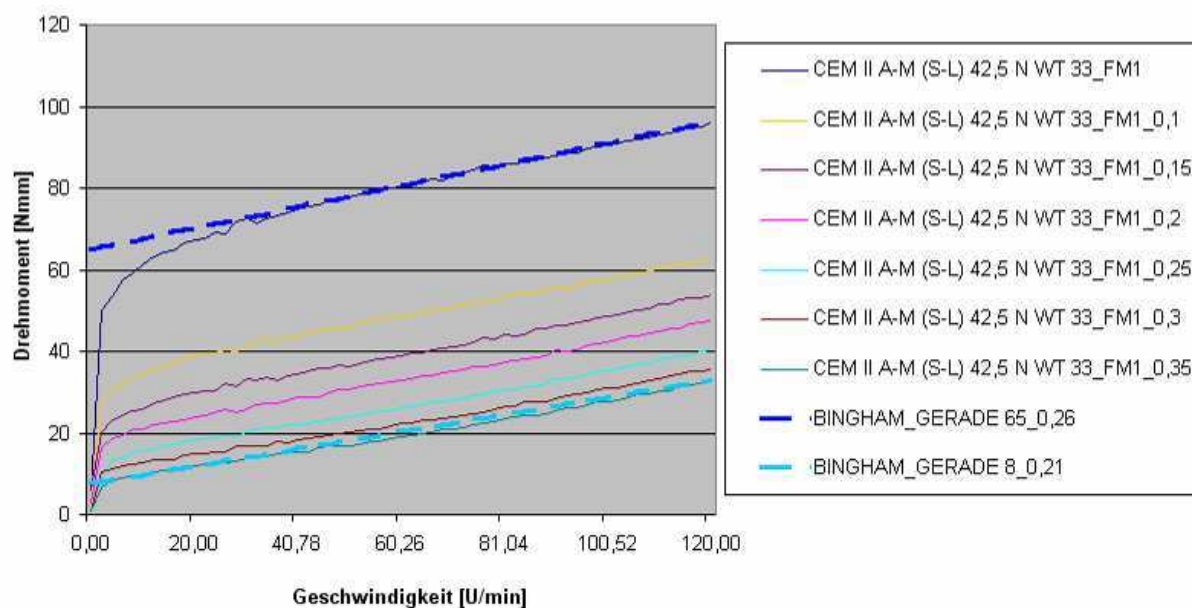
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33 (Versuchsreihe C3)

Drehmoment

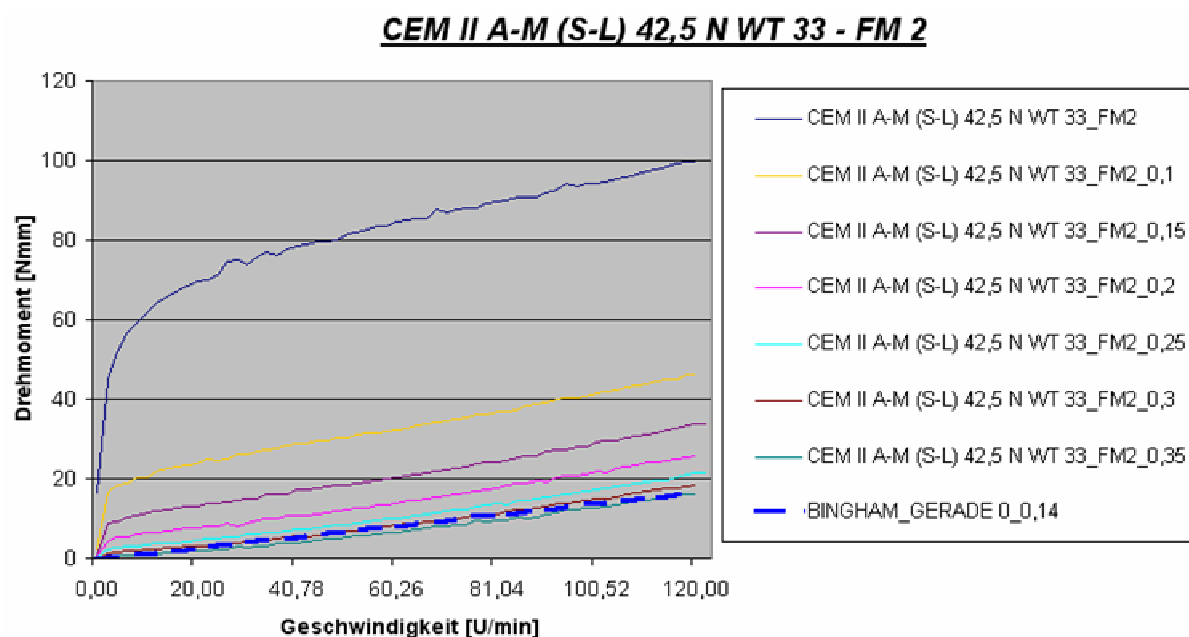


Materialverhalten für Zementleim mit FM 1

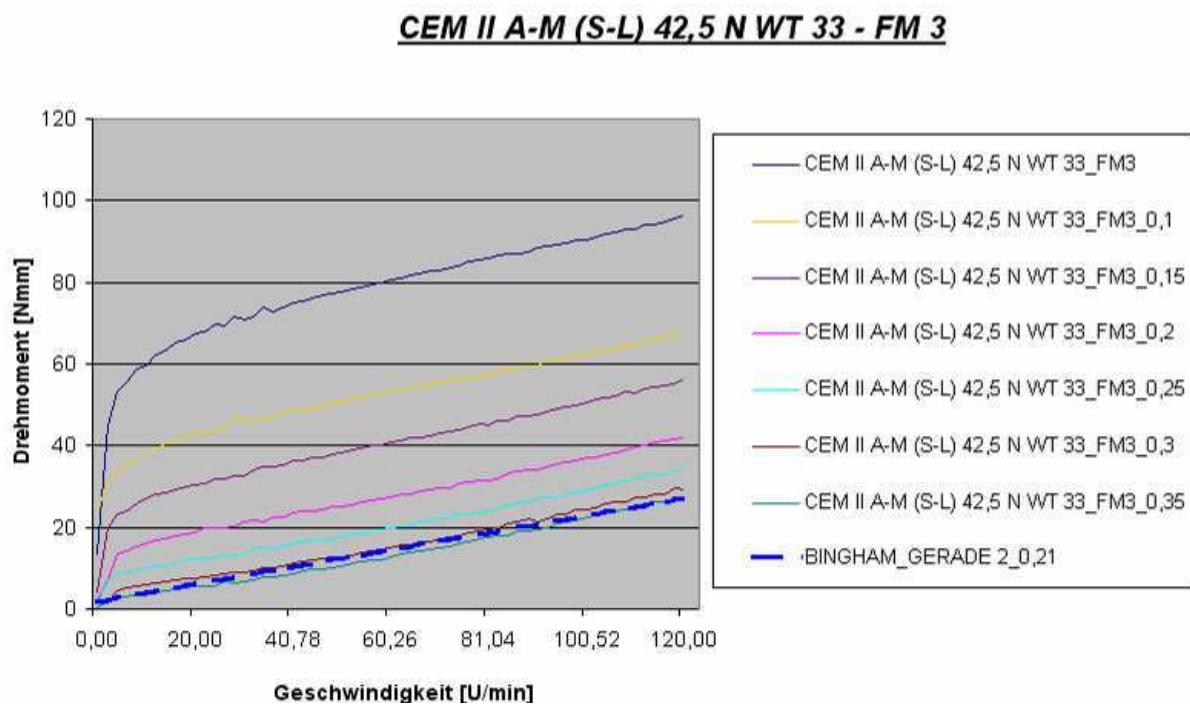
CEM II A-M (S-L) 42,5 N WT 33 - FM 1



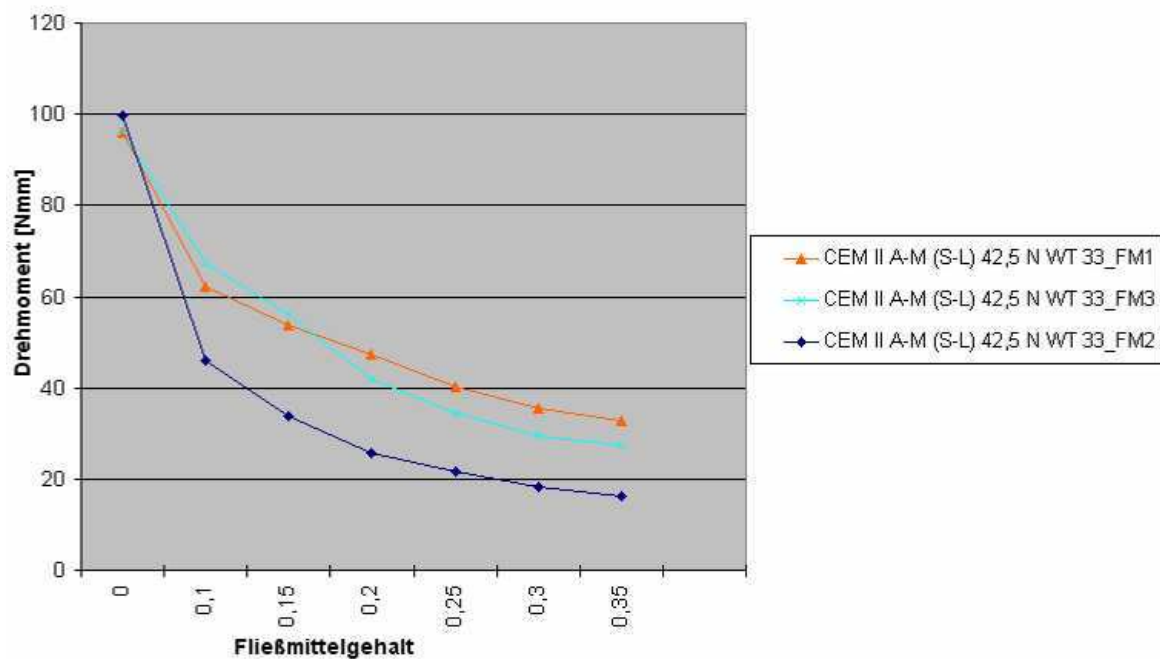
Materialverhalten für Zementleim mit FM 2



Materialverhalten für Zementleim mit FM 3

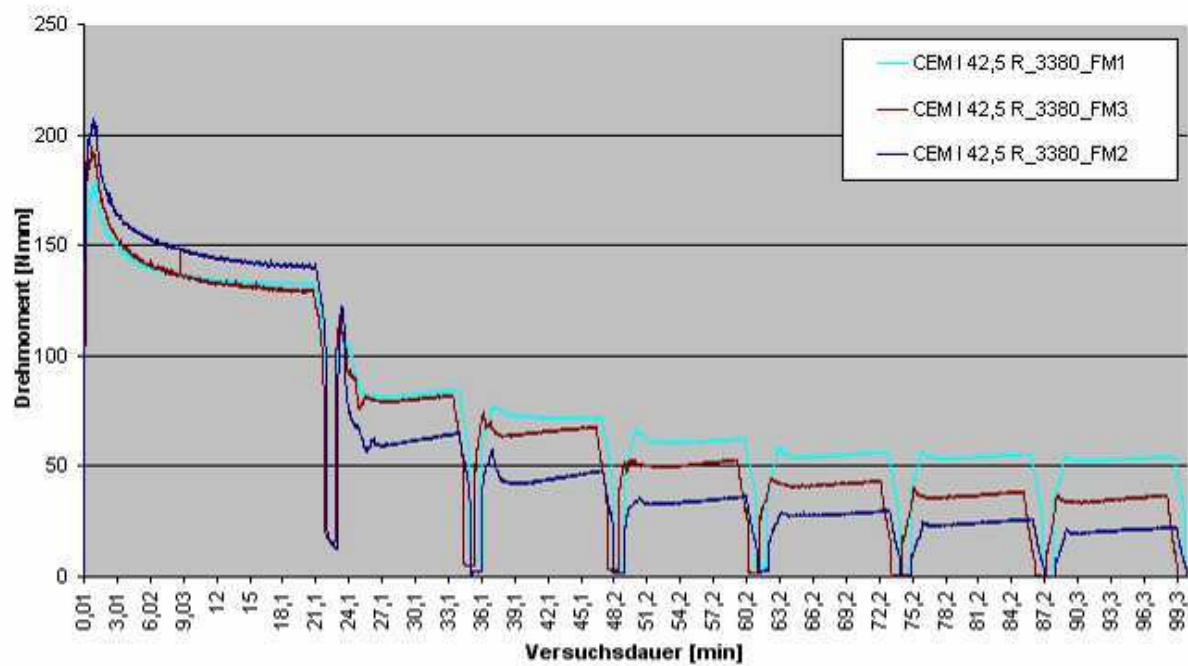


Sättigungskurven

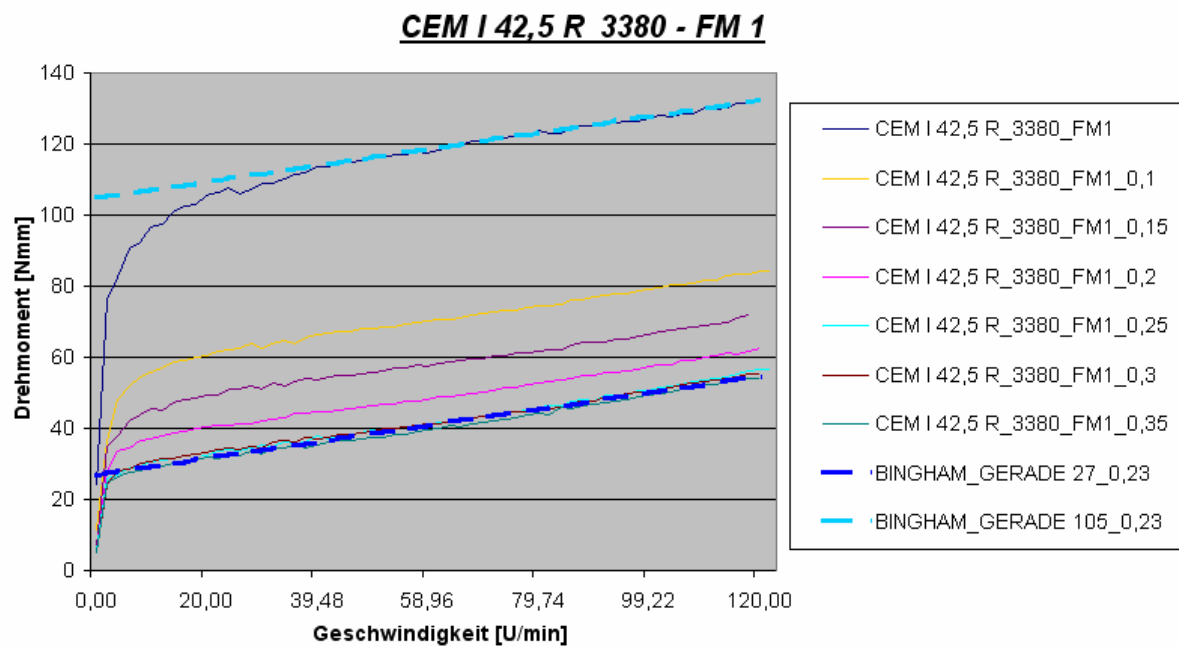


CEM I 42,5 R 3380 (Versuchsreihe D)

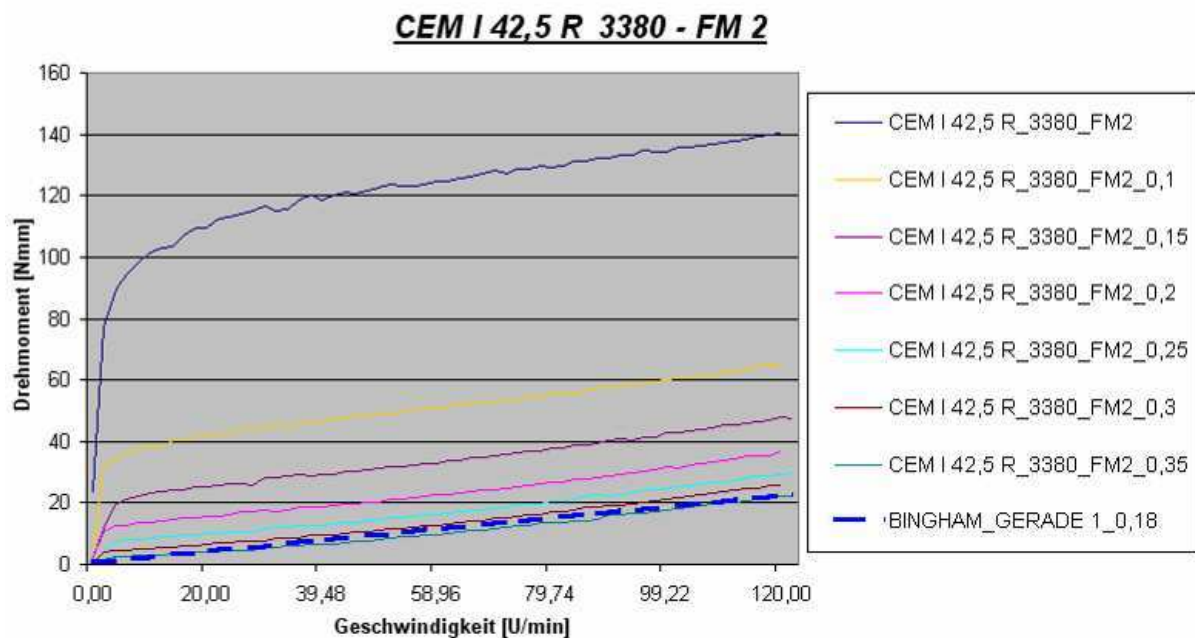
Drehmoment



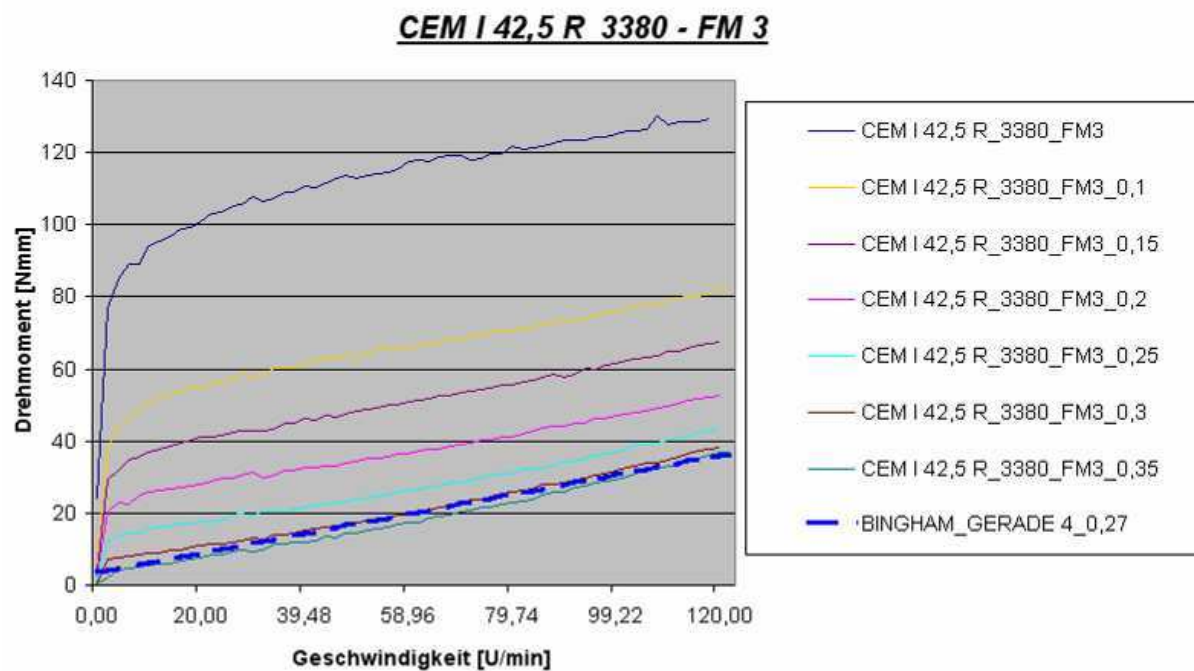
Materialverhalten für Zementleim mit FM 1



Materialverhalten für Zementleim mit FM 2



Materialverhalten für Zementleim mit FM 3



Sättigungskurven

