



Dr.-Ing. Stefan Zwolinski

**Ermittlung der Grünzugfestigkeit
erdfeuchter Zementleimgemische
als Grundlage für die Optimierung
der Produktion von sofort
entschalteten Betonwaren**

**Ermittlung der Grünzugfestigkeit erdfeuchter Zementleimgemische als
Grundlage für die Optimierung der Produktion von
sofort entschalteten Betonwaren**

Dissertation

**zur Erlangung des Doktorgrades der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)**

**Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
Bergische Universität Wuppertal**

vorgelegt

von

Dipl.-Ing. Stefan Zwolinski

Solingen

Juli 2018

Veröffentlicht als Heft 25 in der Schriftenreihe des
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau
Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
Bergische Universität Wuppertal

Herausgeber

Der Geschäftsführende Direktor
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Bergische Universität Wuppertal

Fachgebiet

Werkstoffe im Bauwesen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Anders
Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Wolfram Klingsch
Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
Bergische Universität Wuppertal

Organisation und Verwaltung

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Bergische Universität Wuppertal
Pauluskirchstraße 11
42285 Wuppertal
Telefon: (0202) 439-4039

© **Dr.-Ing. Stefan Zwolinski**

ISBN 978-3-940795-24-3

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Mit Genehmigung des Autors ist es gestattet, dieses Heft ganz oder teilweise auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

Vorwort

An erster Stelle möchte ich Herrn Prof. Wolfram Klingsch danken für die Betreuung meiner Arbeit, sein unterstützender Zuspruch hat mehr als einmal entscheidend dazu beigetragen, das Ziel weiter zu verfolgen und zu einem Abschluss zu bringen.

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als Geschäftsführer und Leiter der Zertifizierungsstelle Güteschutz Beton, Düsseldorf, entstanden. Die Idee hierzu kam bei der Beobachtung der vielfältigen Produktionen von erdfeuchten Betonwaren, es ist beeindruckend, unmittelbar neben einem frischen Betonrohr zu stehen und zu sehen, dass es nicht zusammenfällt, ebenso wie die Geschwindigkeit des kontinuierlichen Fertigungsprozesses frischer Betonpflastersteine. Durch Herrn Werner Tietze, Beckum, der als technischer Assistent die Forschungsarbeiten von Prof. Hans-Joachim Wierig Ende der sechziger Jahre mit begleitete, wurde ich auf die Fragestellung der Technologie erdfeuchter Betone aufmerksam gemacht, hierfür gilt ihm mein herzlicher Dank. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den Vorsitzenden des Güteschutz Beton, Hans Vogt (Ehrenvorsitzer), Reinhold Lehde (Ehrenvorsitzer) sowie Martin Großkopff (Vorsitzer), die mich seit dem ersten Tag fortwährend ermuntert haben, und die mein berufliches Wirken als Vorbilder prägen. Frau Prof. Gabriele Masuch danke ich für ihren fachlichen Austausch und ihr persönliches Motivieren, meinen Kollegen Peter Niedrig und Hans-Peter Meister für die Diskussion der Produktionsprozesse und die technische Unterstützung.

Den Herren Prof. Matthias Pulsfort, Prof. Steffen Anders und Prof. Matthias Middel danke ich für Ihre Bereitschaft zur Besetzung der Prüfungskommission.

Für die Nutzung der Räume und der Geräte danke ich dem Lehrstuhl für Werkstoffe im Bauwesen der Bergischen Universität Wuppertal.

Wuppertal, November 2019

Stefan Zwolinski

Tag der Einreichung:	04. Juli 2019
Tag der mündlichen Prüfung:	01. Februar 2019
Prüfungskommission:	Prof. Dr.-Ing. Wolfram Klingsch Prof. Dr.-Ing. Steffen Anders Prof. Dr.-Ing. Matthias Middel
Vorsitzender der Prüfungskommission:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Pulsfort

Kurzdarstellung

Ein großes Spektrum unterschiedlicher Betonwaren und Betonteile wird in Produktionsverfahren mit sofortiger Entschalung hergestellt. Die Grundlage hierfür sind erdfeuchte Betone, die unmittelbar nach dem Verdichten in der Lage sind, den Prozess der Entschalung ohne Schäden wie z.B. Ausbrüche und Risse zu überstehen und anschließend formstabil zu erhärten. Weil in dieser sehr frühen Phase noch keine Festigkeit durch die Hydratation des Zementes entwickelt werden kann, muss alleine durch Haftkräfte zwischen den Feststoffen wie z.B. Zement, Flugasche, Sand und Kies eine ausreichende Standfestigkeit der frischen Betonteile erreicht werden. Das Verarbeitungsverhalten erdfeuchter Betone kann mit bisherigen Konsistenzmessverfahren in einem für die Produktion aussagekräftigem Unterscheidungsbereich nicht gemessen und verglichen werden.

In der vorliegenden Arbeit erfolgte eine umfangreiche theoretische Analyse der Haftkräfte zwischen feinen Feststoffpartikeln. Diese Größenklasse besteht aus Zement und Zusatzstoffen und ist maßgebend für die Übertragung von Haftkräften auf gröbere Fraktionen. Es zeigte sich, dass die Haftkraft zwischen Partikeln Anteile enthält, die aus Kräften aus adsorbierten Wasserfilmen, Flüssigkeitsbrücken, Van-der-Waals-Kräften, plastischen Van-der-Waals-Kräften sowie Reibung und Verzahnung besteht. Dabei werden die einzelnen Komponenten stark beeinflusst von den Rauigkeiten auf den Partikeloberflächen, der Partikelform und dem Wassergehalt. Es zeigte sich, dass alle Komponenten zahlenmäßige Anteile an der Gesamthaftkraft haben. Eine rechnerische Prognose über die zu erwartenden Zugspannungen in einer feuchten Partikelmatrix wie erdfeuchtem Zementleim ist bislang nicht möglich, weil zu wenige exakte Informationen auf der Ebene der Partikelformen und der Oberflächenbeschaffenheiten vorliegen und hierdurch die Haftkräfte über mehrere Größenordnungen hinweg beeinflusst werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein geeignetes Prüfverfahren entwickelt, mit dem Unterschiede in erdfeuchten Zementleimen dadurch ermittelt werden können, dass die zentrische Zugkraft innerhalb der Leime gemessen werden kann, ebenso wie der Dehnweg, der für den Zugbruch aufgebracht werden muss.

Die durchgeführten Versuche an Zementleimen mit verschiedenen Ausgangsstoffen und w/z-Werten zeigten, dass Unterschiede der Zugdehnung vorhanden sind und gemessen werden können. Auch Zusammensetzungen, die optisch nicht unterschieden werden können, verhalten sich während der Prüfung erkennbar anders in der Höhe der Zugkraft und/oder in ihrem Dehnungsverhalten. Die Prüfung an erdfeuchtem Beton mit 8 mm Größtkorn ergab ebenfalls erkennbare Unterschiede in den Verläufen der Zugdehnungskurven. Die in dieser Arbeit aufgezeigten Ergebnisse können als Grundlage dienen, um eine Optimierung zukünftiger Rezepturen zu ermöglichen.

Mit dem entwickelten und verwendeten Prüfverfahren steht eine Methode zur Verfügung, mit der durch praktische, kleinskalierte Versuche Unterschiede in dem Zugdehnungsverhalten erdfeuchter Leimgemische und erdfeuchter Betone identifiziert werden können. Es ist daher grundsätzlich dafür geeignet, die werkseigene Produktionskontrolle während der laufenden Herstellung erdfeuchter Betonteile zu ergänzen und bei der Entwicklung neuer Betonrezepturen eingesetzt zu werden.

Abstract

A wide range of different precast concrete products is manufactured by dry cast production process with immediate demoulding. Therefore so called dry cast, zero-slump or negative-slump concretes are used. In this case, the freshly compacted products are able to undergo the demolding procedure without sustaining any forms of damage, e.g. pop-outs or cracks, and to maintain their geometrical behavior until hardening is achieved. Given the lack of hydration-mediated strength development in the cement at such early stages, achievement of sufficient stability in such concrete-based elements is solely limited to the adhesive forces between the solids, e.g. cement, fly ash, sand and gravel. To this day, there is no available method for the measurement of workability and consistency of zero-slump concretes that can provide proper information on their behavior throughout the casting process.

Hence, comparative investigation of the characteristics of different types of concrete has hitherto remained elusive. In line with such need, the current work has sought to provide a detailed theoretical analysis of the adhesion forces among fine particles of less than 100 μm . This fraction mainly includes cement and other additive materials, and is most influential for the transmission of adhesion forces to coarser fractions. The current study found the intraparticulate adhesion to comprise a plethora of different forces such as those resulted from the adsorbed water layers, liquid bridge bindings, Van-der-Waals forces, plastic Van-der-Waals forces, friction and interlocking. The individual components were thus shown to be strongly influenced by the roughness of the particle surface and particle shape as well as the concrete's water content. The findings also indicated that all components have numerical shares in the total adhesion. Obviously, the main challenge that has thus far hindered the arithmetical prediction of the expected tensile strains in a moist particle matrix such as zero-slump cement slurry is the lack of exact information on the interparticulate level, e.g. the shape and surface texture of the particles, which can affect the adhesion forces over several orders of magnitude.

Within the current study, a suitable testing procedure was developed, enabling the detection of differences in zero-slump cement pastes by measuring the tensile force-strain behavior.

Experimental work on cement pastes with various starting materials and water to cement ratios confirmed the existence and measurability of differences in the tensile strain. It also became evident that even optically indistinguishable compositions behave differently during the testing procedure in terms of the tensile force and/ or the expansion behavior. Similarly, experimentation on zero-slump concrete with 8 mm coarse gravel could successfully detect noticeable changes in graphs of tensile force-strain behavior. Accordingly, the results of the present work can build a solid basis for the future optimization of zero-slump formulae. This developed and validated testing procedure can suitably facilitate making simple and small-scaled investigations on zero-slump cement pastes and concretes immediately after mixing in order to reliably identify the composition-mediated differences, e.g. those arising from the type of cements and additives as well as differences in water to cement ratio.

Therefore, the developed method can serve as a valuable tool both to supplement factory production control of the industrial manufacturing of zero-slump concrete elements, and the development of new concrete recipes e.g. when changing any kind of raw materials.

Inhalt

1.	Einleitung und Problemstellung	1
1.1	Anforderungen an die frisch hergestellten Produkte und an den verwendeten Beton	2
1.2	Bisherige Untersuchungen	5
1.3	Ziel der Arbeit	7
2.	Stand der Kenntnis	8
2.1	Rheologische Untersuchungen an Leimen	8
2.1.1	Abgrenzung zu Selbstverdichtendem Beton (SVB)	10
2.2	Konsistenz erdfeuchter Betone	12
2.2.1	Konsistenzbeeinflussende Faktoren	13
2.2.2	Methoden der Konsistenzmessung	14
2.2.3	Diskussion bestehender Prüfverfahren	18
2.3	Erdfeuchte Betone	19
2.3.1	Vergleich der Zusammensetzungen	19
2.3.2	Einflussfaktoren auf die Gründruckfestigkeit	21
2.3.3	Grundlagen der Gründruckfestigkeit	34
2.3.4	Zusammenfassung und Bewertung	39
2.4	Kraftübertragung zwischen Partikeln	43
2.4.1	Zustandsbeschreibung erdfeuchter Leimgemische	45
2.4.1.1	Verteilung des Wassers in Partikelschüttungen	49
2.4.1.2	Zementgranulometrie und -reaktion	52
2.4.1.3	Partikelformen und -oberflächen, Koordinationszahlen	57
2.4.2	Haftkräfte und Verformungen zwischen den Partikeln	60
2.4.2.1	Kräfte durch Adsorptionsschichten aus Wasser	62
2.4.2.2	Kräfte durch Flüssigkeitsbrücken	65
2.4.2.3	Verformungen an Partikeln und Flüssigkeitsbrücken	71
2.4.2.4	Van-der-Waals-Kräfte	74
2.4.2.5	Van-der-Waals-Kräfte durch plastische Verformung	78
2.4.2.6	Elektrostatische Kräfte	82
2.4.2.7	Reibung und Verzahnung	86
2.4.3	Zugspannungen und Zugfestigkeit	91
2.4.4	Zusammenfassung	95
3.	Entwicklung eines Prüfverfahrens für die Ermittlung der Grünzugfestigkeit erdfeuchter Leimgemische	97
3.1	Aufbau des Prüfgerätes	97
3.2	Herstellung der Leime	104
3.3	Verdichtung der Leimgemische	106
4.	Versuche	111
4.1	Vorversuche	111
4.1.1	Zement	111
4.1.2	Flugasche und Mikrosilika	115
4.1.3	Zugversuche an trockenen Ausgangsstoffen	118
4.1.4	Bruchflächenanalyse	125
4.2	Hauptversuche	126
4.2.1	Ausgangsstoffe, Leimrezepturen und verwendete Kenngrößen	126

4.2.2	Erläuterung der Kurvenverläufe nach Überschreiten der Maximalkräfte	138
4.2.3	Leime aus unterschiedlichen Zementen	139
4.2.4	Leime aus unterschiedlichen Zementen und jeweils einem Zusatzstoff	144
4.2.5	Leime aus unterschiedlichen Zementen und jeweils zwei Zusatzstoffen	152
4.3	Versuche an erdfeuchtem Beton für die Herstellung von Betonpflastersteinen	155
4.4	Versagensarten im zentrischen Zugversuch	160
4.5	Zusammenfassung der Hauptversuche	164
5.	Optimierungsansätze für das Zugdehnungsverhalten erdfeuchter Zementleime	166
5.1	Mögliche Parameter	166
5.2	Auswertung der Laborergebnisse	168
6.	Zusammenfassung	180
6.1	Erfahrungen mit dem Prüfverfahren	181
6.2	Ergebnisse	183
7.	Ausblick	185
8.	Anhang	187
9.	Literatur	197

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Herstellung von sofort entschalteten Rohren B-KF-GM 300 x 2500 a) Beginn des Zyklus: Innenkerne abgesenkt, Formenmantel fährt hinunter b) Befüll- und Verdichtungsvorgang beendet, Formenmantel fährt herauf c) fertige, frische Rohre werden von der Betonierstation verfahren	4
Abbildung 2:	Betonpflasterstein 10x20x8 mit Fehlstelle im Vorsatzbeton an der Oberfläche.....	6
Abbildung 3:	sofort entschaltete Stahlbetonrohre aus erdfeuchtem Beton, rechtes Rohr nach der Herstellung kollabiert (Länge 2000 mm, Innendurchmesser 600 mm, Wanddicke 120 mm)	6
Abbildung 4:	Viskosimeter Typ Viscomat NT der Fa. Schleibinger, aktuelle Serie, Bj. 2018 [23].....	8
Abbildung 5:	Scherwiderstand in Abhängigkeit vom Wassergehalt bei Übergang eines Kornhaufwerks in eine Suspension [28]	9
Abbildung 6:	Die Wechselwirkung molekularer Kräfte im System Wasser-Kornoberfläche nach [30]: a) Ausrichtung von Wasserdipolen an der Kornoberfläche b) Adsorption der Wassermoleküle in unmittelbarer Umgebung der Kornoberfläche c) Größe der molekularen Kräfte in der Nähe der Kornoberfläche 1: adsorbiertes Wasser, 2: Solvationswasser, 3: freies Wasser	11
Abbildung 7:	Bestimmen des Verdichtungsmaßes [42].....	15
Abbildung 8:	Aufbau des Vébé-Apparates [44].....	16
Abbildung 9:	Prinzip des Maniabilimètre/ LCL-Test [45]	17
Abbildung 10:	Intensive Compaction test - wiegen, verdichten, verdichteter Zylinder [46].....	18
Abbildung 11:	Schematischer Vergleich der Zusammensetzungen von selbstverdichtendem Beton (SCC), Normalbeton (NWC), erdfeuchtem Beton (EMC) und hydraulisch gebundenen Tragschichten (RCD) nach Hüsken [47]	20
Abbildung 12:	Prozentuale Verteilung der Frischbetonmasse bei drei unterschiedlichen Betonteilen aus erdfeuchtem Beton: Pflastersteine, Schachtringe, Betonrohre	20
Abbildung 13:	Definition der Reaktionsphasen des Betons [49].....	21
Abbildung 14:	Gründruckfestigkeiten für Betone mit unterschiedlichem Zementgehalt in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Betone [20].....	23
Abbildung 15:	Entwicklung der Druckspannung-Stauchungslinien bei unterschiedlichen Wassergehalten nach [20], Stauchung in [%]	24
Abbildung 16:	Einfluss der Rüttelzeit auf den Luftporengehalt in Abhängigkeit vom Wassergehalt [20]	25
Abbildung 17:	Einfluss des Zementgehaltes auf die Gründruckfestigkeit [20] dargestellt als Hüllkurven.....	26
Abbildung 18:	Einfluss der Feinheit des Zementes auf die Gründruckfestigkeit [20]	26
Abbildung 19:	Gründruckfestigkeit bei unterschiedlichen Sieblinien für zwei Rüttelzeiten [20].....	27

Abbildung 20:	Einfluss von Wasser- und Fließmittelgehalt auf Gründruckfestigkeit und Packungsdichte bei einem erdfeuchten Beton [52]	28
Abbildung 21:	Verringerung der Gründruckfestigkeit bei Zugabe von Flugasche [22] ...	28
Abbildung 22:	Einfluss von Form und Abmessung [20]	29
Abbildung 23:	Relative Gründruckfestigkeit von Probe-körpern mit doppelter Höhe bezogen auf die Gründruckfestigkeit von Probekörpern einfacher Höhe [20].....	29
Abbildung 24:	Rüttelproctor zur Erfassung des Verdichtungsverhaltens bei dynamischer Verdichtung [22]	30
Abbildung 25:	Einflussgrößen auf die Gründruckfestigkeit von erdfeuchten Betonen nach [22]	30
Abbildung 26:	Gründruckfestigkeit, Packungsdichte sowie Wasser-Feinstoffwert (als Funktion des Zementgehaltes) nach Bornemann [22]	31
Abbildung 27:	Einfluss des Wassergehaltes auf die Packungsdichte Verdichtungsgrad) von Quarzmehl und von Flugasche (ohne Zement) nach [47].....	31
Abbildung 28:	Spannungs-Dehnungslinien der Gründruckfestigkeit für zwei Feinstoffe (ohne Zement) bei unterschiedlichen Wassergehalten (bezeichnet mit Ψ_m) a) nur Quarzmehl, b) nur Flugasche [47]	32
Abbildung 29:	Spannungs-Dehnungskurven der Gründruckfestigkeit a) bei 520 kg/m ³ Quarzmehl b) bei 290 kg/m ³ Quarzmehl und unterschiedlichen Wassergehalten [47].....	33
Abbildung 30:	Spannungs-Dehnungskurven der Gründruckfestigkeit a) bei 478 kg/m ³ Flugasche b) bei 237 kg/m ³ Flugasche und unterschiedlichen Wassergehalten [47].....	33
Abbildung 31:	Gründruckfestigkeits-Dehnungskurven bei verschiedenen Gehalten an Superplastifizierer (SP) und konstanten Wassergehalten, a) Quarzmehl mit 12,9 M.-% Wasser, b) Flugasche mit 8,2 M.-% Wasser [47] (graue Kurven beziehen sich auf höhere Verdichtungsenergie)	33
Abbildung 32:	Spannungen in der Oberfläche des Zwickelwassers [20].....	34
Abbildung 33:	Druckkräfte zwischen zwei benetzten Kugeln [122]	35
Abbildung 34:	vereinfachte Darstellung des Spannungskreises nach Mohr [20] ($\sigma_1 = \beta_{Dr} =$ Druckspannung, $\sigma_c = \beta_z =$ Zugspannung)	36
Abbildung 35:	Mohrscher Spannungskreis mit Parabel als gekrümmter Hüllkurve [20] für feuchte Böden	36
Abbildung 36:	Rücktrocknungskurven von Mischungen ohne Zement mit unterschiedlichen Gehalten an Kalksteinmehl und einer Mischung mit Flugasche als Vergleich [22].....	37

Abbildung 37:	von Bornemann ermittelte, rechnerische Gründruckfestigkeit einer Rezeptur ohne Zement mit unterschiedlichen Gehalten an Quarzmehl und Wasser – ausgedrückt über den Leimgehalt [22]	38
Abbildung 38:	Verfahrensschema zur Trocknung von angefeuchteter Flugasche, Nr. 9: Hammermühle [56]	40
Abbildung 39:	Druckfestigkeit von feuchtem Quarzsand und Wasser (jeweils 100g Quarzsand und 20ml Wasser, links) Mitte: Wasser und Quarzsand in Zementfeinheit gemahlen als plastische Masse, rechts: Wasser und Quarzsand mit 20.000 cm ² /g Oberfläche als fester Körper [72]	41
Abbildung 40:	Zusammenhang zwischen Sättigungsgrad S_R , Reibungswinkel und Kohäsion am Beispiel von Tonsteinen nach Bönsch [58]	42
Abbildung 41:	Kanonenkugeln gleicher Größe in dichtester möglicher Packung, an den Kontaktpunkten verschweißt, Palastvorplatz Monaco; Bällebad mit ungeordneter Zufallspackung	44
Abbildung 42:	Erdfeuchter Beton für die Rohrproduktion mit 16 mm Größtkorn Kies, w/z-Wert 0,38; rechter Teil: vergrößerter Bereich des weißen Quadrates	46
Abbildung 43:	Kornverteilungskurve eines Zement-Gesteinskörnungs-Gemisches von Wierig im Vergleich zu den Sieblinien einiger typischer Böden [20]	46
Abbildung 44:	Wachstumsstadien, -grenzen und Einfluss der Partikelgröße [61]	47
Abbildung 45:	Oberflächenrauigkeiten in der Kontaktzone zweier ideal runder Partikel mit Radius R; l_R ist die Abweichung der Rauigkeiten vom Radius R, d = Abstand zwischen zwei Rauigkeiten [62]	48
Abbildung 46:	Einfluss der Flüssigkeitsschicht auf die Adhäsionskraft f_A zwischen zwei rauen, runden Partikeln; vorherrschende Systeme: I = sehr kleine Flüssigkeitsbrücke am Kontakt einzelner Rauigkeiten, II = Flüssigkeitsbrücke zwischen mehreren Rauigkeiten, III = sehr große Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei kugelförmigen Partikeln [62].....	48
Abbildung 47:	Sättigungsbereiche poröser Schichten (a) Adsorptionsschichten, (b) Zwickel- und Brückenbereich [67] (Wasser = schwarze Linien/Flächen)	51
Abbildung 48:	Sättigungsbereiche poröser Schichten (a) Übergangsbereich, (b) Sättigungsbereich [67] (Wasser = schwarze Linien/Flächen)	51
Abbildung 49:	idealisiert runde, ebene Partikel mit einer Schicht aus adsorbiertem Wasser (d_{Wad} nicht maßstäblich in blau).....	51
Abbildung 50:	Schematische Darstellung der Berührung zwischen zwei Körnern ohne (links) und mit Sorptionsschichten (rechts) [127]	52
Abbildung 51:	Partikelanalyse des CEM I 42,5 R aus den Hauptversuchen; alle Partikelanalysen siehe Anhang 1.....	53
Abbildung 52:	frühe Hydratationsprodukte (schematisch) in einer Flüssigkeitsbrücke [69].....	54

Abbildung 53:	Partikel- und Oberflächenverteilung eines Zementleimes aus feinem Zement nach 6-minütiger Hydratation aus Zingg [70], gemessen mit Cryo-FIB-nt (Focused-Ion-Beam Nanotomography).....	55
Abbildung 54:	Partikelformen von trockenem Portlandzement, aus van Breughel [74].	57
Abbildung 55:	Unterschiedliche Partikelformen nach Igwe [76].....	58
Abbildung 56:	Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Koordinationszahl nach einer umfassenden Literaturlauswertung und Modellierung nach German [80].....	59
Abbildung 57:	Massendurchgang und daraus errechnete Partikel- und Oberflächenverteilung eines Zementes CEM I 42,5 R	61
Abbildung 58:	sich überlagernde Adsorptionsfilme aus Wasser an zwei unterschiedlich großen, ideal runden und glatten Partikeln.....	63
Abbildung 59:	Kapillarkräfte in einer Flüssigkeitsbrücke: Einfluss von Abstandsverhältnis und Brückenvolumen auf die Haftkraft [88] ($F_{\max} = \sigma_{\text{Iq}} * \pi * d$)	65
Abbildung 60:	Flüssigkeitsbrücke zwischen realen Teilchen mit scheinbarem Abstand a' [125].....	66
Abbildung 61:	Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei gleich großen, ideal glatten Kugeln [88].....	66
Abbildung 62:	Zweidimensionale Darstellung der Flüssigkeitsbrückengeometrie für den Kontaktfall gleich großer Kugeln mit Abstand a in Anlehnung an [90] mit Randwinkel ϑ , d.h. ohne Adsorptionsschichten an den Oberfläche.....	67
Abbildung 63:	Flüssigkeitsbrücke zwischen Partikeln unterschiedlicher Größe [92]; mit Ψ_1, Ψ_2 als unterschiedliche Benetzungswinkel, θ als Randwinkel.....	69
Abbildung 64:	Detail der geometrischen Kontaktsituation zweier Partikel mit Wasserfilmen von jeweils $0,03 \mu\text{m}$	70
Abbildung 65:	links: Dehnungsverhalten von Feuchtagglomeraten, Vergleich zwischen Theorie und Experiment nach Rumpf [119], rechts: Modell für das Dehnungsverhalten feuchter Agglomerate nach Schubert, Hermann und Rumpf [93]; F_1 = äußere Zugkraft, F_2 = Druckkraft zwischen den Partikeln infolge Zugkräfte der Flüssigkeitsbrücken.....	72
Abbildung 66:	Einfluss der Rauigkeiten auf die Van-der-Waals Haftkraft nach [119], entnommen aus [103]	76
Abbildung 67:	Abplattung und Druckverlauf im Bereich der Kontaktfläche einer Kugel bei a) rein plastischer und b) elastisch-plastischer Verformung [97].....	78
Abbildung 68:	Mikrohärte an unterschiedlichen Betonzusammensetzungen, Darstellung zusammengefasst nach [108].	79
Abbildung 69:	Bezogenen Haftkraft einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln, ergänzt um negative Abstände als Modell für verformte Kontaktflächen [87]	81

Abbildung 70:	Anziehung als Funktion des Partikelabstandes nach Rumpf [119] mit 0,4 nm Kontaktabstand, entnommen aus [103]	82
Abbildung 71:	Haftkräfte am Kugel-Platte-Model nach Rumpf, aus [111]	83
Abbildung 72:	Schematische Darstellung der elektrischen Doppelschichten und des Zeta-Potentials bei flüssigkeitsgesättigten Partikelsystemen [118].....	84
Abbildung 73:	Elektrostatische Kräfte nach [115], aus [111].....	85
Abbildung 74:	Scherwiderstand in einem körnigen Erdstoff [30], a) Reibung auf der Oberfläche der Körner; b) Verzahnung der Körner ...	86
Abbildung 75:	Veränderung der Anteile des Reibungswinkels mit der Normalspannung und der Dichte [122] (Dilatation (a), Umordnung (b), Korn- zu-Korn-Reibung (c))	87
Abbildung 76:	Abschätzen des Scherwinkels eines Bodens aus der Korngrößenverteilung [121].....	88
Abbildung 77:	Änderung der Komponenten des Scherwiderstandes mit zunehmender Scherverschiebung : a) Haftfestigkeit, b) Dilatation, c) Reibungseffekte, d) Summenkurve gemessener Werte [122]	89
Abbildung 78:	Ermittlung der tatsächlichen Bruchflächen beim zentrischen Zug an erdfeuchten Zementleimen durch Frischhaltefolie und anschließender manueller Flächenausählung nach Bommers [134].....	90
Abbildung 79:	Vergleich von zwei Zementleimen [134].....	90
Abbildung 80:	Bruchbild nach zentrischem Zugversuch zweier erdfeuchter Zementleime, links $w/z=0,18$, rechts $w/z=0,25$. [132].	91
Abbildung 81:	Versagensebene und Partikelhaftkräfte eines Agglomerates unter zentrischer Zugbelastung [128].....	94
Abbildung 82:	Kontakt zweier Partikel unter Berücksichtigung von Oberflächenimperfectionen; Pkte. M: Kontaktpunkte- Pkt. N: Kontaktpunkt bei weiterer Annäherung der Oberflächen durch Deformation [128]	94
Abbildung 83:	Innenliegende Feder des Adapterringes, die als Distanzstück zwischen den Röhren dient (Detail aus Abbildung 85)	98
Abbildung 84:	Schematische Darstellung der Kräfte beim Zugversuch mit erdfeuchtem Leim [132].....	98
Abbildung 85:	Versuchsaufbau Variante 1 mit Prinzipskizze [132]	99
Abbildung 86:	Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad bei $w/z = 0,23$..	100
Abbildung 87:	Versuchsaufbau Variante 2 [133]	100
Abbildung 88:	Prinzipskizze Versuchsaufbau Variante 2 [133]	101
Abbildung 89:	Schalung für die Probekörper Variante 3 [134]	101
Abbildung 90:	Befüllen der fixierten Probekörperhälften (links), Anbringen der Lasteinleitungsplatte (mitte), Probekörperhälften mit gelöster Fixierung unter der Zugvorrichtung (rechts).....	102
Abbildung 91:	Variante 3 mit Versuchsstand und Einzelteilen [134]	102
Abbildung 92:	aufgezeichnete Rohdaten des Messgerätes für Versuch mit $w/f = 0,21$ aus Abbildung 127 (Zugdehnungen von Zement CEM III/A 42,5 R).....	103
Abbildung 93:	Bruchwege bei unterschiedlichen w/z -Werten Alt = Versuche nach Variante 1, NEU = Versuche nach Variante 3 [134].....	104

Abbildung 94:	Form von Luftinklusion im wassergefüllten Porenbereich zwischen Feststoffpartikeln aus Ton [58].....	105
Abbildung 95:	Zementleime mit CEM I 42,5 R, w/z = 0,21 und gleicher Mischdauer, unmittelbar nach dem Mischen und nach 15 Schlägen mit dem Hägermann-Tisch linke Seite: Mischreihenfolge Wasser langsam auf Zement, rechte Seite: Mischreihenfolge Zement langsam auf Wasser	106
Abbildung 96:	schlechter Verdichtungsgrad bei Verwendung der Humm-Sonde [132]	108
Abbildung 97:	Versuchsaufbau Variante 1 (vergl. Abbildung 85) mit Stößel beim Einbringen der Verdichtungsenergie durch den Gummihammer [132]	109
Abbildung 98:	alter Stößel links [132], neuer, modifizierter Stößel rechts und Gegenüberstellung der erreichten Verdichtungsgrade [134].....	110
Abbildung 99:	Verdichtungsgrad in Abhängigkeit der Anzahl der Verdichtungslagen [132].....	110
Abbildung 100:	Maximalwerte der Grünzugfestigkeiten (nach Variante 1, jeweils ein Versuch) verschiedener Zemente in Abhängigkeit des w/f-Werts; jeweilige Normsteife und massenbezogener β_p -Wert (als w/f-Fließgrenze angegeben) [132].....	112
Abbildung 101:	Ermittlung der relativen Ausbreitfläche Γ und Auswertung zur Bestimmung des β_p -Wertes [28]	113
Abbildung 102:	Zusammenhang zwischen mittlerer Grünzugfestigkeit aus jeweils 5 Versuchen und w/z-Wert (blaue Linie), Trendlinie (rot), Zement: CEM I 42,5 R (Variante 3) [134]	114
Abbildung 103:	Zugkraft-Zeit-Diagramme bei zwei w/z-Werten [134]	114
Abbildung 104:	Einfluss verschiedener Flugaschegehalte (mit CEM I 52,5 N) auf die Grünzugfestigkeit (oben) und den Verdichtungsgrad (unten) [132].....	116
Abbildung 105:	Einfluss verschiedener Flugaschegehalte auf Grünzugfestigkeit und Verdichtungsgrad [132]	117
Abbildung 106:	Grünzugfestigkeiten von CEM I 52,5 N mit 5% Microsilica und 5% Flugasche im Vergleich zu CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 N und CEM I 52,5 R [132] ..	117
Abbildung 107:	trockener Zement nach dem Zugversuch, links hängend ohne Entleerung, rechts: oberes Teilstück mit erkennbarem Bruchbild	118
Abbildung 108:	trockener Zement nach dem Zugversuch, unteres Teilstück: erkennbarer Zusammenhalt der einzelnen Partikel in größeren Agglomeraten	119
Abbildung 109:	Zugversuche (-01, -02, -03) an trockenem Zement CEM I 42,5 R, v = Verdichtungsgrad	120

Abbildung 110: Zugversuche an trockenem Zement CEM I 42,5 R, v = Verdichtungsgrad; Vergleich von bereits gerissenen Proben und kleinem Probekörper oben mit normaler Versuchsdurchführung	121
Abbildung 111: Darstellung der gemessenen Zugkraft im Verhältnis zur Gewichtskraft G_0 des oberen Probekörpers als relative Zugkraft, Versuche identisch mit Abbildung 110	122
Abbildung 112: Zugversuche an trockenen Zementen, v = Verdichtungsgrad	123
Abbildung 113: Zugversuche an trockenen Stoffen, v = Verdichtungsgrad	123
Abbildung 114: Ermittlung der tatsächlichen Bruchflächen beim zentrischen Zug an erdfeuchten Zementleimen durch Frischhaltefolie und anschließender manueller Flächenauszählung nach Bommers [134].	125
Abbildung 115: Vergleich der Querschnittsfläche des Schalrohres (rot) mit der durchschnittlichen äquivalenten Bruchfläche der Probekörper (grau) [134]	125
Abbildung 116: REM-Aufnahmen von CEM I 42,5 R, reiner Portlandzement	127
Abbildung 117: REM-Aufnahme von CEM II/A-LL 42,5 R, Portlandkalksteinzement; Bildmitte: Kalksteinmehl-Partikel	128
Abbildung 118: REM-Aufnahmen von CEM III/A 42,5 R, Hochofenzement; Bildmitte: Hüttensand-Partikel	129
Abbildung 119: REM-Aufnahmen von Flugasche	130
Abbildung 120: REM-Aufnahmen von Metakaolin	131
Abbildung 121: REM-Aufnahmen von Siliziumcarbid (SiC)	132
Abbildung 122: Aufnahme von Mikrosilika der Fa. Elkem [141].	133
Abbildung 123: Zusammenhang zwischen der Partikeloberfläche im Leim und der Wasserfilmdicke eines Quadratzentimeters Partikeloberfläche, Punkte = durchgeführte Versuche, Linien = rechnerischer Zusammenhang gem. Formel 38	137
Abbildung 124: Gegenüberstellung von theoretischem Kurvenverlauf (1), gemessenen Kurven (2), (3), (4), sowie dem Eigengewicht des oberen Probekörperteilstückes nach dem Bruch ((5), dargestellt im Foto rechts)	138
Abbildung 125: Zugdehnungen von CEM I 42,5 R	140
Abbildung 126: Zugdehnungen von CEM II/A-LL 42,5 R	141
Abbildung 127: Zugdehnungen von Zement CEM III/A 42,5 R	142
Abbildung 128: Zugdehnungen bei w/f = 0,21 und drei unterschiedlichen Zementen ...	143
Abbildung 129: Zugdehnungen von Zement CEM I 42,5 R mit Flugasche	145
Abbildung 130: Zugdehnungen von CEM II/A-LL 42,5 und CEM III/A 42,5 R mit Flugasche	146
Abbildung 131: Zugdehnungen von CEM I 42,5 R mit Metakaolin	147
Abbildung 132: CEM II und CEM III jeweils mit Metakaolin	148
Abbildung 133: CEM I mit Mikrosilika	149
Abbildung 134: CEM II und CEM III mit Mikrosilika	150
Abbildung 135: CEM I und Siliziumcarbid	151
Abbildung 136: CEM II und CEM III mit Siliziumcarbid	152
Abbildung 137: CEM I mit je zwei Zusatzstoffen bei w/f-Werten von 0,21 und 0,23	153
Abbildung 138: CEM II mit je zwei Zusatzstoffen bei w/f-Werten von 0,21 und 0,23 ...	154
Abbildung 139: CEM III mit je zwei Zusatzstoffen bei w/f-Werten von 0,21 und 0,23 ..	155

Abbildung 140: Rezeptur 1 rechts nach dem Mischen, links nach dem Prüfen	157
Abbildung 141: Rezeptur 2 rechts nach dem Mischen, links nach dem Prüfen	157
Abbildung 142: Zugkraft von drei Probekörpern aus einer Mischung erdfeuchten Betons mit $w/z = 0,428$ (Rezeptur 1).....	158
Abbildung 143: Zugkraft von drei Probekörpern aus einer Mischung erdfeuchten Betons mit $w/z = 0,53$ (Rezeptur 2)	158
Abbildung 144 Darstellung des „strain-softening“ als Schadens- und Bruchmechanismus bei der zentrischen Zugfestigkeit von erhärtetem Beton nach [], entnommen aus [143]	160
Abbildung 145: Phänomen der Rissüberbrückung bei Festbeton nach [143]	161
Abbildung 146: Zugfestigkeits-Dehnungsverlauf bei der Ermittlung der zentrischen Zugfestigkeit an einem Ton [123], Belastung bei konstanter Zuggeschwindigkeit von 0,001 mm/s bis zum Bruch.	161
Abbildung 147: REM-Aufnahme von Kaolinit [145].	162
Abbildung 148: Qualitative Darstellung der Versagensarten erdfeuchter Zementleime im zentrischen Zugversuch; waagerechte Verläufe rechts der Maximalkraft entsprechen dem Eigengewicht des oberen Probekörperteilstückes (gem. Abbildung 124).	163
Abbildung 149: Abbildung 128 mit gestrichelter Linie bei 0,6 mm Weg	167
Abbildung 150: erreichte Verdichtungsgrade in Abhängigkeit der Oberfläche im Leim ..	168
Abbildung 151: maximalen Zugkräfte in Abhängigkeit der erreichten Verdichtungsgrade.....	169
Abbildung 152: Maximalwerte der Zugkraft aller Versuche bei der jeweiligen Oberfläche im Leim.....	170
Abbildung 153: Bruchweg bei maximaler Zugkraft aller Versuche in Abhängigkeit der Oberfläche im Leim	171
Abbildung 154: Maximale Zugkraft aller Versuche in Abhängigkeit der Wasserfilmdicke	171
Abbildung 155: Bruchwege aller Versuche in Abhängigkeit der max. Zugkraft	172
Abbildung 156: Zugkraft $F_{Z0,6}$ bei 0,6 mm Weg in Abhängigkeit der Oberfläche im Leim.....	172
Abbildung 157: Verläufe und Kenndaten der Rezepturen mit den fünf höchsten maximalen Zugkräften	173
Abbildung 158: Verläufe und Kenndaten der Rezepturen mit den fünf niedrigsten Werten der Max. Zugkraft.....	174
Abbildung 159: Verläufe und Kenndaten der Rezepturen mit den höchsten Zugkräften bei 0,6 mm Weg.....	175
Abbildung 160: Verläufe und Kenndaten der Rezepturen mit den fünf niedrigsten Zugkräften bei 0,6 mm Weg	176
Abbildung 161: Verläufe und Kenndaten der Rezepturen mit den fünf maximalen Verdichtungsgraden	177
Abbildung 162: Verläufe und Kenndaten der Rezepturen mit den fünf minimalen Verdichtungsgraden	178
Abbildung 163: links Probe nach dem Bruch mit erkennbarer Exzentrizität der beiden Hälften, rechts Aufhängevorrichtung mit geringfügiger Verkantung vor dem Lasteintrag.....	182

1. Einleitung und Problemstellung

Vorgefertigte, industriell hergestellte Betonteile werden seit ca. 120 Jahren produziert. Die ersten Betonsteine als Pflastersteine wurden gegen Ende des neunzehnten Jahrhunderts hergestellt [1]. Die Anwendungsfälle und Bauteilarten sind dabei bemerkenswert vielfältig im Vergleich zu anderen Werkstoffen wie z.B. Ton, Keramik oder Stahl. Eine Übersicht der aktuell hergestellten Betonteile einschließlich ihrer technischen Regeln ist in [2] enthalten.

Produziert werden die Bauteile dabei als in der Form erhärtet oder als sofort entschalt. Produktionsverfahren mit sofortiger Entschalung werden immer dann eingesetzt, wenn eine große Stückzahl exakt identischer Betonteile innerhalb kürzester Zeit hergestellt werden soll. Damit diese Produktion mit nur einer Schalung, im Bereich der sofortigen Entschalung Formensatz genannt, durchgeführt werden kann, wird der Formensatz unmittelbar nach dem Befüllen von den frisch hergestellten Produkten entfernt und sofort erneut verwendet. Die frischen Betonteile werden dann auf Brettern oder Stahlunterteilen vom Befüllplatz zum anschließenden Lagerplatz, in der Regel eine Klimakammer, gebracht. Wenn sogenannte Bodenfertiger eingesetzt werden, bleiben die Produkte stehen und der gesamte Fertigungsmechanismus samt Schalung fährt auf einem ebenen Boden weiter. Diese Variante ist der Vorläufer der heutigen, modernen stationären Fertiger und wird zunehmend seltener eingesetzt, z.B. noch bei der Herstellung von Palisaden, Schachtringen und haufwerksporigen Pflanzringen.

Beispiele für sofort entschaltete Fertigungen sind:

- Betonpflastersteine nach DIN EN 1338 [3]
- Gehwegplatten aus Beton nach DIN EN 1339 [4]
- Bordsteine aus Beton nach DIN EN 1340 [5]
- Blockstufen, Palisaden, nach DIN EN 13198 [6]
- Mauersteine aus Beton und Leichtbeton nach DIN EN 771-1 [7]
- Dachsteine aus Beton nach DIN EN 490-1 [8]

Bei diesen Bauteilen handelt es sich um kleinformatige Betonteile (Länge max. 100 cm, Breite max. 50 cm) für den Garten- und Landschaftsbau sowie für den Wohnungsbau. Hierbei werden Pigmente eingesetzt, um farbig unterschiedliche Produkte anzubieten.

Beispiele für großformatige sofort entschaltete Betonteile sind:

- Rohre aus Beton- und Stahlbeton [9]
- Schächte aus Beton [10]
- Spannbetonhohlplatten [11].
- Spaltenböden für die Tierhaltung [12]

Rohre werden mit Durchmessern bis zu 3,00 m und einer Länge von 4,00 m produziert, Spannbetonhohlplatten mit einer Breite von 1,20 m und Längen bis zu 12,00 m. Diese Fertigung erfolgt auf Stahlbahnen mit Gleitfertigern bzw. Extruder-Gleitfertigern an einem Strang bis zu 120 Metern Länge. Die einzelnen Platten werden nach einem Tag auf die erforderliche Länge gesägt. Diese Produktion ist vergleichbar mit der Herstellung von Straßendecken aus Beton, die ebenfalls im Gleitverfahren erfolgt. Großformatige Produkte werden i.d.R. nicht mit Pigmenten eingefärbt, da keine ästhetischen Anforderungen an die Produkte gestellt werden. Jedoch ist die Anwendung im Bereich des Tiefbaus bei Rohrdurchmessern > DN 1200 (=1200 mm Durchmesser) seit einigen Jahren rückläufig,

da die Abnehmer schalungsglatte Oberflächen, wie sie bei dem Herstellverfahren „in der Form erhärtet“ entstehen, bevorzugen. Demgegenüber sind die Oberflächen der großformatigen, sofort entschalteten Produkte deutlich rauher und weniger geschlossen. Mit Ausnahme der Bodenfertigung und der Fertigung von Spannbetonhohlplatten werden alle sofort entschalteten Produkte unmittelbar nach der Herstellung bewegt, um die Betonierstation frei zu machen für den nächsten Produktionszyklus. Die Produktion von Dachsteinen aus Beton weicht hiervon ab, da die einzelnen Dachsteine auf stählernen Unterlagen, sog. Pellets, den Herstellungsprozess bis zum Ende der Erhärtung durchlaufen.

Die Betonage von sämtlichen Betonteilen in Herstellverfahren mit sofortiger Entschalung erfolgt mit erdfeuchten Betonen, im Falle von Dachsteinen mit erdfeuchten Mörteln. Detailliertere Beschreibungen der einzelnen Fertigungsverfahren sind in [13] enthalten.

1.1 Anforderungen an die frisch hergestellten Produkte und an den verwendeten Beton

Die Herstellprozesse der sofortigen Entschalung und der sofortigen Gleitfertigung erfordern die Verwendung von erdfeuchten Betonen.

Der Begriff erdfeucht beschreibt dabei das Aussehen dieser Betone, das einem Bodenge-misch mit kleinen Steinen ähnlich ist. Diese Betone können z.B. ähnlich einem bindigen Ton mit der Hand zu tennisballgroßen Kugeln geformt werden, ohne dabei zu zerfallen. Im Englischen Raum werden diese Betone als dry cast concrete oder auch als zero-slump-concrete bezeichnet, da der slump-Test zu keiner messbaren Verformung führt. Die Wasserzementwerte liegen im Bereich von ca. 0,30 bis 0,39. Erdfeuchte Betone sind sehr trocken und nicht mit Betonen der Konsistenzbereiche F2-F5 vergleichbar. Die Prüfung des Ausbreitmaßes führt bei erdfeuchten Betonen ebenfalls zu keinen messbaren Unterscheidungen, weil das Ausbreitmaß erst ab w/z-Werten von 0,40 ein geeignetes Prüfverfahren darstellt [42]. Während bei fließfähigen Betonen die Grenzwerte des w/z-Wertes der Expositionsklassen z.B. bei Transportbeton generell ausgenutzt werden auf Grund der wirtschaftlichen Zwänge, und entsprechende Kapillarporenräume durch Überschusswasser entstehen, sind erdfeuchte Betone so trocken, dass häufig zu wenig Wasser für eine vollständige Hydratation des Zementes zur Verfügung steht [14].

Durch den Einsatz hochwirksamer Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylatethylen (PCE) können auch Betone mit w/z-Werten von 0,20-0,40 in selbstverdichtender Konsistenz hergestellt werden. Diese werden in der Konsistenzklasse F6 mit dem Ausbreitmaß geprüft, wenn die Werte zwischen 630 mm und 700 mm liegen. Oberhalb von 700 mm erfolgt die Prüfung der Konsistenz mit dem Setzfließmaß [42]. Der w/z-Wertbereich, der bei erdfeuchten Betonen und selbstverdichtenden Betonen identisch ist, eignet sich nicht, um eine erdfeuchte Konsistenz zu beschreiben. Vorhandene Prüfverfahren, wie z. B. das Verdichtungsmaß, mit denen ein Konsistenzunterschied von sehr steifen Betonen gemessen werden kann um z.B. das Verarbeitungsverhalten abzuschätzen, weisen bei trockenen, erdfeuchten Betonen zu geringe Unterschiede auf [49].

Die Verarbeitung von erdfeuchten Betonen erfolgt in der Regel an modernen Fertigungsmaschinen mit einem hohen Automatisierungsgrad. Die Ausstattung solcher Maschinen ermöglicht eine Regelung der Taktzeiten sowie Dauer, Frequenz und Amplitude der Verdichtung [15].

Die problemlose Herstellung der Betonprodukte setzt eine ausreichende Standfestigkeit der frisch verdichteten Erzeugnisse voraus. Kleinformatige Teile neigen dabei weniger zum Kollabieren, d.h. Einsturz, sondern zum Deformieren. So vergrößert sich die Länge frischer, entformter Steine nach dem Entschalen abhängig von der Steinhöhe und dem w/z-Wert um 0,5 bis 1,0 mm bei 80 bis 100 mm Steinhöhe ($< 1\%$), und ca. 0,7 bis 2 mm bei 100 bis 140 mm Steinhöhe ($< 1,5\%$). Laut Unterlechner [16] ist die Verformung eine Folge von Innendruck und Eigengewicht, dadurch stellt sich ein bauchiges Aussehen ein, die Seitenflächen sind also nicht mehr eben.

Die Zusammenstellung und Dimensionierung der Betonrezeptur erfolgt in der Regel anhand von Erfahrungswerten und Großversuchen auf den Fertigungsanlagen. Die Auswirkungen von neuen Rezepturen werden überwiegend anhand der laufenden Produktion überprüft, was mit einem hohen Aufwand verbunden ist, da fehlerhafte Produktionen entstehen können. Laufende Kontrollen der Konsistenz finden nicht statt, weil die Betone so steif sind, dass Unterschiede durch Prüfverfahren wie z.B. dem Slump-Test und dem Verdichtungsmaß nicht mehr festgestellt werden können.

Für alle Produktionsverfahren bei sofortiger Entschalung werden an den frischen, erdfeuchten Beton verschiedene Anforderungen gestellt:

- Der Beton muss förderbar und verteilbar sein; er darf nicht im Mischer oder in Kübelbahnen anhaften. Beim Befüllen der Formen muss er sich in kurzer Zeit (z. T. in 2 Sekunden) gleichmäßig verteilen lassen.
- Bei Einsetzen der Vibration sollte er sich so geschmeidig verhalten, dass möglichst viele Luftporen in kurzer Zeit mit wenig eingesetzter Energie ausgetrieben werden können und die Einzelkomponenten der Betonmatrix mit dem Einsetzen einer Auflast eine dichte Lage zueinander einnehmen.
- Beim sofortigen Entschalen darf der Beton nicht an den Wandungen der Form oder an den Stempeln der Auflast haften.
- Nach dem Entschalen muss der Betonkörper seine Form und Maße beibehalten, d.h. hohe Formstabilität und geringe Deformationen um die Toleranzen für die Maßabweichungen aus den jeweiligen Produktnormen einzuhalten.
- Eine hohe Gründruckfestigkeit aufweisen, um eine Standfestigkeit und Verfahrbarkeit der Produkte zu ermöglichen.
- Einen möglichst hohen w/z-Wert um hohe Hydratationsgrade zu erreichen und damit hohe Festigkeiten, hohen Frost- und Taumittelwiderstand und ggf. hohen Abriebwiderstand zu erreichen.
- Möglichst unempfindlich reagieren auf geringfügige und unvermeidbare Schwankungen der Ausgangsstoffe und des Wassergehaltes, d.h. robust soweit wie möglich
- Wirtschaftliche, d.h. kostengünstige Zusammensetzungen mit geringen Zementgehalten.

Neben der in Fertigteilwerken erforderlichen werkseigenen Produktionskontrolle gem. der jeweiligen Produktnormen werden während der Produktion Sichtkontrollen an den frischen Produkten vorgenommen. Teilweise erfolgen Kontrollen der Maße, insbesondere der Bauhöhe. Bei kleinformatigen Betonwaren wie Pflastersteinen und Gehwegplatten werden frische Produkte stichprobenartig gewogen, um über den Vergleich der Sollgewichte und Rohdichten Anhaltswerte für die zu erwartende Festigkeit zu erhalten. Es handelt sich um indirekte oder qualitative Verfahren, zu denen auch Höhenkontrollen der frischen Produkte zählen, sowie die Sichtprüfungen, bei denen der Glanz der Seitenflä-

chen, deren Bauchigkeit sowie das Kleben von Rückständen an den Auflaststempeln eine Rolle spielen.

Für Qualitätskontrollen an dem frischen Beton, die ein Einhalten der oben beschriebenen Anforderungen im Rahmen von Eignungsprüfungen oder während der laufenden Produktion nachweisen, wird zur Zeit keines der wenigen, zur Verfügung stehenden Verfahren regelmäßig angewendet.

Das sog. „Erweiterte Steag-Verfahren“ kombiniert die Bestimmung der Poren mit dem Proctorversuch und einer anschließenden Ermittlung der Gründruckfestigkeit [17][18]. Das Verfahren ist recht aufwändig und erfordert eine umfangreiche Laborausstattung, weshalb es in der laufenden Praxis nur eine geringe Bedeutung erreicht hat. In seiner Variation ohne die Bestimmung der Gründruckfestigkeit ist es ebenfalls für die Bestimmung des optimalen Wassergehaltes bei Selbstverdichtenden Betonen geeignet [19].

Ein optimaler Produktionsablauf ist dadurch gekennzeichnet, dass die Taktzeit zum Befüllen und Entleeren der Formen möglichst kurz ist, und die frischen Produkte nach dem Entschalvorgang formstabil und vollkantig sind mit geschlossenen Oberflächen.



Abbildung 1: Herstellung von sofort entschalteten Rohren B-KF-GM 300 x 2500
a) Beginn des Zyklus: Innenkerne abgesenkt, Formenmantel fährt hinunter
b) Befüll- und Verdichtungsvorgang beendet, Formenmantel fährt herauf
c) fertige, frische Rohre werden von der Betonierstation verfahren

Die Taktzeit für einen kompletten Produktionsgang gem. Abbildung 1 lag bei ca. vier Minuten. Bei Betonpflastersteinen liegt die sogenannte Taktzeit für das Befüllen des Formensatzes, Verdichten, Entschalen und Verfahren minimal bei ca. 10-13 Sekunden. In dieser Zeit wird ein Fertigungsbrett mit ca. einem Quadratmeter Steine in 8 cm Höhe auf einer Steinfertigungsmaschine hergestellt.

Allein in Nordrhein-Westfalen stehen ca. 50 Maschinen, bundesweit ca. 300, die täglich mindestens im Einschichtbetrieb betrieben werden. Bei einem durchschnittlichen Arbeitstakt von 20 Sekunden werden täglich bei 8 Betriebsstunden ca. 432.000 m² (entspricht ca. 34.560 m³ Beton) produziert.

1.2 Bisherige Untersuchungen

Über erdfeuchte Betone und erdfeuchte Leime wurden in der Vergangenheit nur sehr wenige Forschungen durchgeführt. Zu Beginn der 70er Jahre wurde durch Wierig erstmalig an erdfeuchten Betonen die Gründruckfestigkeit untersucht [20].

Diese wurde als einziges Kriterium für die frisch verdichteten Produkte und deren Standfestigkeit, der sogenannten Grünstandsfestigkeit, angesehen. Dabei wurde insbesondere der Einfluss der Verdichtung und der Reib- und Verschiebewiderstand der groben Gesteinskörnung in der Frischbetonmatrix betrachtet. Bei der Rohrherstellung untersuchte Hillebrand 1983 den Einfluss der Vibrationsverdichtung auf die Gründruckfestigkeit bei geringen Variationen der Sieblinie der groben Gesteinskörnungen [21] ohne Einflüsse der Feinstoffe einzubeziehen. Auch in den neueren Untersuchungen von Bornemann 2005 [22] stand der Zusammenhang von Gründruckfestigkeit, Packungsdichten und Verdichtungsgraden im Vordergrund.

Eine wesentliche Voraussetzung für eine hohe Gründruckfestigkeit ist jedoch das Vorhandensein von Haftkräften zwischen den einzelnen Feststoffpartikeln und dadurch bedingt die Fähigkeit, bei Verschiebungen innerhalb der Matrix auch Zugkräfte aufzunehmen. Hierbei spielen insbesondere diejenigen Stoffe eine wichtige Rolle, die einen hohen Anteil an den inneren Oberflächen des gesamten Partikelgemisches haben. Dazu zählen sämtliche Feinstoffe wie z.B. Zemente, Flugaschen, Pigmente, Silika usw.

Bislang war es nicht möglich, die Zugfestigkeit erdfeuchter Betone oder Leime mit einem einfachen Versuchsaufbau zu überprüfen, die bei Wierig enthaltenen, wenigen Versuche zur Messung der Zugfestigkeit wiesen einen aufwändigen Versuchsaufbau auf, da zur Beginn der 70 er Jahre noch keine sensiblen digitalen Kraftmessgeräte zur Verfügung standen.

Eine systematische Untersuchung, die den Einfluss der feinen Feststoffpartikel und des Wassergehaltes auf die Zugfestigkeit frischer erdfeuchter Betone beschreibt, liegt bislang nicht vor, ebenso wenig wie Aussagen über das Verformungsverhalten der Partikelgemische bei Zugbeanspruchung.

Jedoch sind wesentliche Schadensbilder an frischen Produkten, die zur Eingruppierung als sofortiger Ausschuss während der Produktion führen, zurückzuführen auf Zugfestigkeitsversagen. So entstehen sogenannte Setzrisse an frischen Betonrohren dadurch, dass der obere Teil des frischen Rohres in der nach oben gezogenen Form haften bleibt und anschließend wieder auf das untere Teil fällt. Diese Risse sind während der Produktion mit dem Auge sehr schwer zu sehen. Sie können beim Transport des frischen Produktes zum Erhärtungsplatz zum Einsturz führen, oder Sie erzeugen im erhärteten Zustand Undichtigkeiten, die während der Seriendichtheitsprüfung mit Wasser oder Luft erkannt werden,

weil auch durch die Hydratationsprodukte während der Erhärtung die Gefügestörungen nicht überbrückt werden können.

Bei Pflastersteinen ist ein erheblicher Teil des Produktionsausschusses, der insgesamt bei ca. 1% liegt, zurückzuführen auf Oberflächenfehler. Teile der Steinoberseite bleiben an den nach oben fahrenden Auflaststempeln aus Metall haften und die Steinoberseite weist eine bleibende Vertiefung auf wie in Abbildung 2. Diese Steine werden unmittelbar nach der Erhärtung auf der Trockenseite der Fertigung aussortiert.

In beiden Fällen, bei Rohren und bei Pflastersteinen, kommt es zur Überschreitung der vorhandenen Haftkräfte an den Kontaktpunkten der Feststoffpartikel aufgrund von einwirkenden Zugkräften. Dadurch bleiben Teile der Matrix an Formen oder Auflaststempeln haften oder das Produkt kollabiert, d.h. zerfällt durch sein Eigengewicht.



Abbildung 2: Betonpflasterstein 10x20x8 mit Fehlstelle im Vorsatzbeton an der Oberfläche.

In diesem Fall sind die Haftkräfte des fehlenden Teilbereiches an der Metallstempelplatte größer als die Haftkräfte innerhalb der Mörtelmatrix.



Abbildung 3: sofort entschalte Stahlbetonrohre aus erdfeuchtem Beton, rechtes Rohr nach der Herstellung kollabiert (Länge 2000 mm, Innendurchmesser 600 mm, Wanddicke 120 mm)

Abbildung 3 zeigt ein frisch entschaltes Stahlbetonrohr, das nach dem Verfahren von der Befüllstation zu seinem aktuellen Lagerplatz dort wenig später zusammengefallen ist.

1.3 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, Kraftmechanismen, die in Feststoffpartikelgemischen mit geringer Feuchtigkeit wirken und die zu einer Übertragung von Zugkräften führen können, gegenüberzustellen und ihre Auswirkung auf erdfeuchte Zementleime abzuschätzen.

Weiterhin sollen die Einflüsse unterschiedlicher Ausgangsstoffe für erdfeuchte Zementleime auf die zentrische Zugfestigkeit und den Bruchweg in grünem, d.h. frischem Zustand überprüft werden. Hierfür ist ein geeignetes Prüfverfahren für die Zugfestigkeit erdfeuchter Zementleime zu entwickeln, mit dem die Auswirkungen von Veränderungen der Mischungszusammensetzung auf die Grünzugfestigkeit überprüft werden können, und das praxistauglich und einfach in der Handhabung sein soll, damit es bei laufenden Qualitätskontrollen während der Produktion sowie den Versuchen für die Rohstoffauswahl vor der Serieneproduktion tauglich ist. Von besonderem Interesse sind dabei unterschiedliche Zementarten. Mittlerweile kommt es recht häufig vor, dass die Zementart gewechselt wird, je nachdem ob ein wirtschaftlicher Vorteil durch den Einsatz von CEM II-Zementen besteht oder gerade CEM I-Zemente preiswert angeboten werden. Auch die zunehmenden Veränderungen in der Verfügbarkeit von Zusatzstoffen führen zu häufigen Wechseln bei der Verwendung von Zusatzstoffen wie Flugasche und Mikrosilika.

Anhand der Ergebnisse soll versucht werden, eine Optimierung der Grünzugfestigkeit unter Berücksichtigung des Bruchweges und -verhaltens bei Zementleimen zu erreichen. Dadurch soll versucht werden, Voraussagen für unterschiedliche Leimzusammensetzungen zu ermöglichen und daraus Empfehlungen für die Zusammensetzung des Leimes als Grundlage für die Rezepturoptimierung erdfeuchter Betone in der Praxis im Hinblick auf die in Kap. 1.1 genannten Anforderungen abzuleiten.

2. Stand der Kenntnis

Das Einsatzgebiet erdfeuchter Betone ist gänzlich anders als bei Betonen in den Konsistenzbereichen F2 bis F6 bzw. selbstverdichtendem Beton.

Dabei ist die Wirkungsweise des erdfeuchten Betons maßgeblich darauf zurückzuführen, dass die Feststoffmatrix nicht mit Wasser gesättigt ist, wodurch es zur Bildung von Flüssigkeitsbrücken und der Übertragung von hohen Haftkräften zwischen den Partikeln kommt (siehe 2.4). Demgegenüber stehen die fließfähigen Betone, bei denen aufgrund der verwendeten Wassermenge ein Zustand vorliegt, der über die Sättigung bei der dichtesten Packung der Partikel hinausgeht. Es bilden sich dicke Zementleimfilme um die feine und die grobe Gesteinskörnung. Die Rheologie dieser beweglichen Zementleime wurde in der Vergangenheit häufig mit Rheometern oder Rotationsviskosimetern untersucht.

2.1 Rheologische Untersuchungen an Leimen

Das Fließ- und Verformungsverhalten von Zementleimen und Zementmörteln wird häufig mit Rotationsviskosimetern wie in Abbildung 4 untersucht [23]. Überprüfungen von zeitabhängigen Konsistenzänderungen sowie den Einflüssen von Temperatur, Zusatzmitteln und Kunststoffzusätzen wurden bereits zu Beginn der 90er Jahre intensiv von Masuch durchgeführt [24].



Abbildung 4: Viskosimeter Typ Viscomat NT der Fa. Schleibinger, aktuelle Serie, Bj. 2018 [23]

Mit der zunehmenden Bedeutung der selbstverdichtenden Betone wurden verstärkt Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, die Fließgrenze und die dynamische Viskosität als Kenngrößen für den theoretischen Mischungsentwurf zu etablieren und beide durch die Verwendung hochwirksamer Fließmittel auf PCE-Basis und den Wasser-Feststoffgehalt gezielt zu beeinflussen.

In jüngster Zeit wurden insbesondere Untersuchungen über die Sedimentationsstabilität und die Robustheit selbstverdichtender Betone durchgeführt [25] [53]. Eine Besonderheit stellten rheologische Leimuntersuchungen für selbstverdichtende Straßenbaubetone dar, die eine hohe Grünstandsfestigkeit erzielen sollten, um in Gleitschalungsfertigern verar-

beitet werden zu können [26]. Dabei stellte sich heraus, dass es nicht möglich war, auch mit Hilfe von Thixotropiermitteln nicht, die gewonnenen Erkenntnisse der Viskosimeteruntersuchungen an fließfähigen Leimen zu verwenden, um die Grünstandsfestigkeit günstig zu beeinflussen.

Generell können mit Rotationsviskosimetern sowohl Newton-Flüssigkeiten als auch Suspensionen, die als Bingham-Körper reagieren, untersucht werden. Diese werden einem laminaren, stationären Schervorgang ausgesetzt, wodurch ihr Verformungsverhalten und die innere Reibung als Folge der Kraftwirkung zwischen den Molekülen (Viskosität) aufgezeichnet werden kann. Bei einer Suspension handelt es sich gem. Abbildung 5 um eine Flüssigkeit, in der fein verteilte Festkörper in Schwebe gehalten werden. Auch im landwirtschaftlichen Bereich werden Rotationsviskosimeter herangezogen, um Fragestellungen des Gülle- oder Futtertransportes bei der Bemessung von Förderanlagen zu untersuchen [27].

Folgende Grundvoraussetzungen müssen für Untersuchungen in Rotationsviskosimetern erfüllt sein [27]:

- laminare und stationäre Strömung mit parallelen Stromlinien,
- Inkompressibilität und Unabhängigkeit des Fließverhaltens vom Druck,
- Homogenität.

Alle drei genannten Voraussetzungen sind bei erdfeuchten Betonen und Leimen nicht erfüllt, da keine Sättigung der Feststoffmatrix mit Wasser vorliegt. Die darin vorhandene Luft ist notwendig, damit kräfteübertragende Zwickelwasserbrücken zwischen den Partikeln gebildet werden können. Dadurch sind erdfeuchte Betone inhomogen und bis zum Erreichen ihres maximalen Verdichtungsgrades kompressibel.

Um ein Kornhaufwerk in eine Suspension zu überführen, wird der Mindestwassergehalt benötigt. Dies ist der Wassergehalt, der erforderlich ist, um die Oberflächen der Feststoffpartikel zu benetzen und anschließend die Hohlräume des Haufwerks zu füllen. Er kennzeichnet den Übergang zwischen einem Kornhaufwerk und einer Suspension, an dem sich die scheinbare Kohäsion durch die Reduzierung der kapillaren Bindungskräfte verliert und das Korngemisch bei Energieeinwirkung zu fließen beginnt. Der Übergang tritt in der Regel schlagartig auf, siehe Abbildung 5 [28].

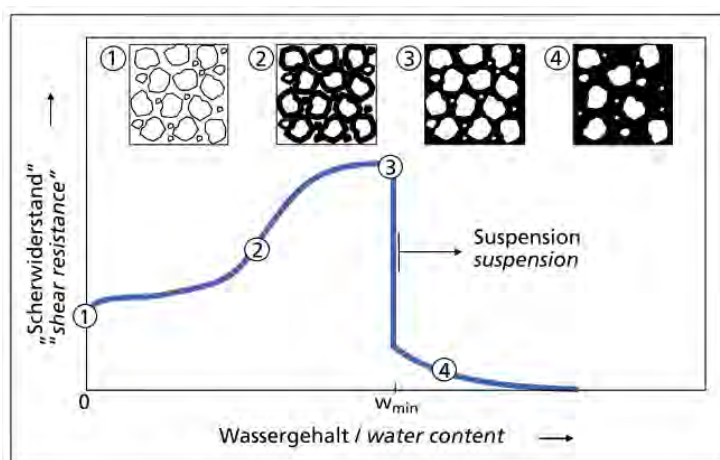


Abbildung 5: Scherwiderstand in Abhängigkeit vom Wassergehalt bei Übergang eines Kornhaufwerks in eine Suspension [28]

Der Mindestwassergehalt kann z.B. durch das Punkte-Verfahren und das β_p -Wert Verfahren ermittelt werden, wie sie in [29] beschrieben sind.

Erdfeuchte Leime sind auf die kapillaren Bindungskräfte angewiesen und haben Wassergehalte, die zum Teil deutlich unter dem Mindestwassergehalt liegen, wodurch sie sich wie feuchte Kornhaufwerke verhalten.

Rotationsviskosimeter sind daher für Untersuchungen an EF-Leimen und -mörteln grundsätzlich nicht geeignet. Weiterhin können die Ergebnisse aus den Untersuchungen von fließfähigen Leimen nicht auf EF-Leime übertragen werden, da das Kraft- und Verformungsverhalten aufgrund unterschiedlicher interpartikulärer Kräfte nicht vergleichbar ist. Bei allen fließfähigen Leimen bestehen keine kapillaren Bindungskräfte durch Flüssigkeitsbrücken an den Partikeln untereinander, da es sich um gesättigte Suspensionen handelt.

2.1.1 Abgrenzung zu Selbstverdichtendem Beton (SVB)

Erdfeuchte Betone (EFB) werden seit mehr als Einhundert Jahren eingesetzt. Demgegenüber handelt es sich bei Selbstverdichtenden Betonen um eine verhältnismäßig junge Variante des Betons, sie werden in Europa seit Ende der neunziger Jahre in Fertigteilwerken und auf Baustellen als Transportbeton eingesetzt. Die bauaufsichtliche, zulässige Verwendbarkeit in Deutschland wurde jedoch erst mit erheblicher Verzögerung im Jahr 2004 mit der Einführung der damaligen Richtlinie für SVB [29] möglich. Der w/z-Wertebereich beider Betone ist identisch, er liegt in Bereichen von 0,30 bis 0,39. SVB wird z.T. auch mit w/z-Werten bis 0,20 hergestellt. Das Größtkorn beträgt bei EFB und SVB in der Regel 16 mm. Unterschiede bestehen im Leimgehalt, der bei SVB ca. doppelt so hoch ist wie bei EFB.

Somit stellt ein extrem niedriger w/z-Wertebereich, wie er bei normalen Konsistenzen und Festigkeitsklassen ansonsten nicht eingesetzt wird, keine Möglichkeit mehr dar, eine erdfeuchte Betonrezeptur von einer selbstverdichtenden zu unterscheiden.

SVB wird hergestellt, indem einer Betonrezeptur mit sehr geringem Wassergehalt hochwirksame Fließmittel auf z.B. der Basis von Polycarboxylatethylenen (PCE) zugegeben werden. Die darin enthaltenen Makromoleküle mit Haupt- und Nebenkettensstrukturen wirken auf das Abstoßungsverhalten der Feststoffpartikel und verhindern die Bildung von Agglomeraten. Gleichzeitig reduzieren sie die Dicke der Wasserschicht, die als starres Wasser um Partikel gebunden ist und die keine Relativbewegung zum Partikel als Haftpartner vollziehen kann.

Die Oberflächenspannung des adsorbierten Wassers an Festkörperpartikeln ist nach [30] sehr groß und liegt in einer Größenordnung von 196 kN/cm^2 . Es wird als Sorptionswasser bezeichnet. Die Dicke beträgt 1 bis 10 Moleküle, dieses Wasser kann durch normale hydrodynamische Kräfte nicht in Bewegung gebracht werden und verhält sich wie Eis, siehe Bereich 1 in Abbildung 6. In etwas größerer Entfernung von $0,5 \mu\text{m}$ ($= 0,0005 \text{ mm}$, Bereich 2 gem. Abbildung 6) verhält sich das als aufgrund seiner geordneten Molekülstruktur als Solvationswasser bezeichnete Wasser vergleichsweise immer noch von der Konsistenz her wie ein viskoser Asphalt, seine Schichtdicke ist nicht größer als 200 Moleküle (auch als Hydrathülle infolge Hydratation bezeichnet, nicht gleichbedeutend mit Hydratisierung als chem. Zementreaktion). Erst danach werden die Eigenschaften des an Partikel gebundenen Wassers wieder denen des normalen Wassers gleich (freies Wasser, Bereich 3 Abbildung 6). Abbildung 6 stellt Änderung der Spannung in Abhängigkeit von der Entfernung grafisch dar:

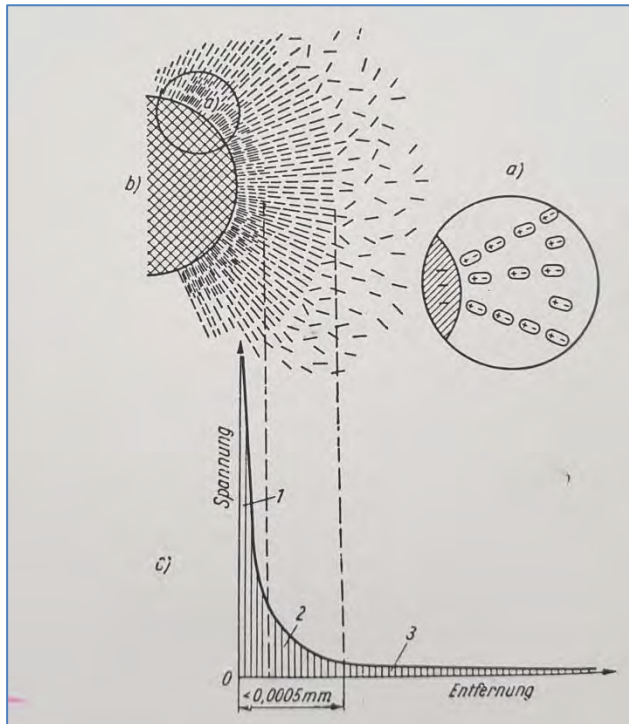


Abbildung 6: Die Wechselwirkung molekularer Kräfte im System Wasser-Kornoberfläche nach [30]:
a) Ausrichtung von Wasserdipolen an der Kornoberfläche
b) Adsorption der Wassermoleküle in unmittelbarer Umgebung der Kornoberfläche
c) Größe der molekularen Kräfte in der Nähe der Kornoberfläche
1: adsorbiertes Wasser, 2: Solvationswasser, 3: freies Wasser

Durch die Belegung der Partikeloberflächen mit den verzweigten Makromolekülen der PCE-Fließmittel bei SVB steht innerhalb der gesamten Feststoffmatrix des Frischbetons wesentlich mehr bewegliches Wasser zur Verfügung als bei EFB-Systemen. Die beschriebene Beweglichkeitseinschränkung der Wasserfilme ist eine der Ursachen dafür, warum feuchte Partikelgemische wie z.B. erdfeuchte Betone unter Einsatz erheblicher Verdichtungsenergie eine Form annehmen können, die sie nach Beendigung des Energieeintrages auch noch beibehalten. Die starren Wasserfilme des Solvationswassers lösen sich vorübergehend und begünstigen ein Umlagern und Verdichten der Matrix.

Durch die Verwendung von hochwirksamen Fließmitteln können auch in sehr niedrigen w/z-Wert Bereichen fließfähige und auch selbstverdichtende Betone hergestellt werden. Hierfür stehen hinreichend viele Untersuchungsmethoden zur Verfügung, die über Anwendungen in der Forschung, für die das Rheometer geeignet ist, bis hin zur praxisorientierten Versuchen wie Trichterauslaufzeit und dem Setzfließmaß reichen.

Für die Untersuchung von EF-Leimen ist bislang kein geeignetes Prüfverfahren bekannt, mit dem Rückschlüsse auf die Verarbeitbarkeit während der sofortigen Entschalung getroffen werden könnten. Hierzu zählen auch grundlegende Kenntnisse darüber, welchen Einfluss Zemente und Zusatzstoffe auf die Haftkräfte und die Verformungen dieser Leime ausüben.

2.2 Konsistenz erdfeuchter Betone

Der Begriff Konsistenz beschreibt als Eigenschaft des Frischbetons die Eignung des Betons für die Verarbeitung bei verschiedenen Anwendungsgebieten.

Konsistenz ist keine exakt definierte physikalische Größe, sondern dient dazu, die Verarbeitbarkeit unter praktischen Gesichtspunkten messen und vergleichen zu können.

Im Allgemeinen beeinflusst die Konsistenz maßgeblich das Verhalten des Frischbetons unter äußerer Beanspruchung beim Mischen, Transportieren, Einbringen, Verdichten und Verarbeiten. Sie ist genau wie die Zielgröße Druckfestigkeit eine wichtige Betoneigenschaft und ein Konformitätskriterium bei der Annahme von Transportbeton. Sie wird in der DIN EN 206-1 in sieben Klassen von sehr steif (C0, Verdichtungsmaß) bis sehr fließfähig (F6, Ausbreitmaß) unterteilt [31]. Die zugehörigen Prüfverfahren sind in DIN EN 12350-1 - 5 festgelegt [32], [33], [34], [35], [36].

Tabelle 1: Konsistenz des Frischbetons Klassen C und F [42]

Konsistenzklasse	C0	F1 C1	F2 C2	F3 C3	F4	F5	F6
Ausbreitmaß [mm]	–	≤ 340	350...410	420...480	490...550	560...620	≥ 630
Verdichtungsmaß c [-]	≥ 1,46	1,45...1,26	1,25...1,11	1,10...1,04	–	–	–
Konsistenzbeschreibung	sehr steif	steif	plastisch	weich	sehr weich	fließfähig	sehr fließfähig
Eigenschaften des Feinmörtels	erdfeucht	erdfeucht und etwas nasser	weich	flüssig	sehr flüssig		
Eigenschaften des Frischbetons beim Schütten	lose	lose/schollig	schollig bis zusammenhängend	schwach fließend	fließend		
Verdichtungsart	kräftig wirkende Rüttler und/oder kräftiges Stampfen bei dünner Schüttlage		Rütteln	Rütteln	„Entlüften“ durch Stochern oder leichtes Rütteln		

Tabelle 1 verdeutlicht, dass in der Klasse C0 (sehr steif) keine weitere Unterteilung mehr vorgesehen ist.

Gemäß [37] wird der Begriff Konsistenz verwendet, um

- die maximal mögliche Verformbarkeit eines Betons beim Einbau zu bestimmen,
- die Homogenität der Mischung (Zusammenhalt von festen und flüssigen Phasen) zu charakterisieren und
- die maximal mögliche Verdichtbarkeit (Austreiben der gasförmigen Phase) zu beschreiben.

Das anzuwendende Messverfahren für die Konsistenz ist danach auszuwählen, welche der o.g. Eigenschaften für das Einbringen des Betons von Bedeutung sind, da in der Regel mit einem Verfahren nicht alle Eigenschaften überprüft werden können.

Aufgrund der Zusammensetzung und den angewendeten Methoden des "Betonierens" unterscheiden sich die Anforderungen an die Verarbeitbarkeit von frischem erdfeuchten Beton von denen für Beton der Konsistenzbereiche nach DIN EN 206-1. Eine Überprüfung der Homogenität und des Zusammenhaltes der Mischung tritt bei EF-Betonen in den Hintergrund, da durch den geringen Anteil der flüssigen Phase an der Mischung eine Neigung zur Separation der Feinbestandteile (Bluten) oder der Grobanteile nicht vorliegt.

Die Verformbarkeit bzw. Verteilbarkeit unter Eigengewicht ist ebenfalls ohne Bedeutung, da die Verwendung hoher Verdichtungsenergien im Vergleich zu anderen Betonierverfahren der maßgebendere Faktor für die Verteilbarkeit ist.

Im Vordergrund steht bei erdfeuchten Betonen die Verdichtbarkeit sowie die anschließende Grünstandfestigkeit, die eine Form- und Maßstabilität der Produkte gewährleistet.

2.2.1 Konsistenzbeeinflussende Faktoren

Die Konsistenz von Beton wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Generell lässt sich eine Unterscheidung treffen in innere Einflüsse, die durch Art und Mengenverhältnis der Inhaltsstoffe bedingt sind sowie äußere Einflüsse, die durch z.B. Temperatur, Mischintensität und Zeitraum der Verarbeitung verursacht werden. Ein weithin bekannter Einflussfaktor ist der Feuchtegehalt der Gesteinskörnungen. Moderne Misch- und Dosieranlagen sind deshalb mit einer automatischen Messung des Feuchtegehaltes ausgestattet. Diese erlaubt eine Ermittlung der noch fehlenden Wassermenge sowie eine Korrektur der Gesteinskörnungen um den Gewichtsanteil, der nicht als Gesteinskörnung, sondern als Gesteinskörnungsfeuchte mit eingewogen wird. Neben dem Feuchtegehalt existieren noch andere Größen, von denen ein Einfluss auf die Konsistenz ausgeht.

Eine Zusammenstellung von konsistenzbeeinflussenden Faktoren, gemessen an dem für ein gleiches Slump- Maß erforderlichen Wasseräquivalent, ist in Tabelle 3 enthalten. Die Angaben in der Tabelle eignen sich nur für eine relative Gewichtung der Einflussgrößen untereinander, da konkrete Angaben über die eigentliche Ausgangskonsistenz sowie Angaben zur Betonzusammensetzung nicht vorliegen. Eine zahlenmäßige Übertragung auf den Bereich erdfeuchter Betone ist in jedem Fall ausgeschlossen, weil der Slump-Test keine Unterscheidung in diesem Bereich ermöglicht.

Dennoch wird durch diese Tabelle verdeutlicht, dass nicht nur von den Schwankungen des Feuchtegehaltes der Gesteinskörnung Auswirkungen auf die Betonkonsistenz ausgehen.

Tabelle 2: Einfluss verschiedener Faktoren auf die Konsistenz, gemessen am Wasseräquivalent [38].

Nr.	Einflussgrößen	Erforderliche Änderung in der Wasserzugabe in Liter/m ³ bei konstantem Slump-Wert
1	Abstufung der groben Gesteinskörnung	+/- 3
2	Form der groben Gesteinskörnung	+/- 6
3	Abstufung der feinen Gesteinskörnung	+/- 5
4	Feuchtegehalt grobe Gesteinskörnung (+/- 1 %)	+/- 12
5	Feuchtegehalt feine Gesteinskörnung (+/- 2 %)	+/- 15
6	Wasseraufnahme d. Gesteinskörnung	+/- 3
7	Wasseranspruch des Zementes	+/- 6
8	Temperatur	+/- 6
9	Dosiergenauigkeit (+15 kg/m ³ Sand)	+/- 2

Insbesondere die Abstufung der Gesteinskörnung (Sieblinie) und die Form der groben Gesteinskörnung, aber auch der Wasseranspruch des Zementes und die Betontemperatur sind zu berücksichtigen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass im englischen bzw. amerikanischen Sprachgebrauch das Wort "Workability" in der Regel zur Beschreibung des Verhaltens von Beton beim Mischen, Einbauen, Verdichten und Glätten verwendet wird. Der Begriff "Consistency" wird meistens verwendet, um das Bewegungsverhalten von Zementleim, Mörtel oder Beton zu beschreiben. Workability beinhaltet also die mit dem Wort Konsistenz umschriebenen Eigenschaften, während Consistency mit dem deutschen Gebrauch von Rheologie gleichgesetzt werden kann. In der englischsprachigen Literatur werden erdfeuchte Betone (EF-Betone) als Non-Slump-Betone, zero-slump oder negative slump-Betone bezeichnet, da sie nicht auf das Setzmaß (Slump-Test) reagieren. Hinsichtlich ihrer Verformungsfähigkeit können sie nicht weiter differenziert werden [39].

2.2.2 Methoden der Konsistenzmessung

In der Literatur ist eine Vielzahl von Verfahren dargestellt, die einer Beschreibung der Verarbeitbarkeit bzw. der Konsistenz dienen. Die zahlreichen Konsistenzmessverfahren für den Frischbeton lassen sich auf wenige Grundprinzipien zurückführen und können wie folgt eingeteilt werden [40]:

- Setzversuche
- Fließmaße
- Eindringversuche
- Verformungsversuche
- Verdichtungsversuche
- Fallversuche
- Scherversuche
- Messen der Leistungsaufnahme beim Mischen
- Rheologische Untersuchungen (Viskosimeter)

Die Verfahren können weiter unterschieden werden in Verfahren

- ohne Energieeintrag von Außen
- mit Eintrag von kinetischer Energie, z.B. durch Vibration
- mit dem Eintrag von kinetischer und potentieller Energie (Vibration + Auflast)

Eine Übersicht über Methoden zur Bestimmung der Konsistenz mit einer detaillierten Beschreibung einzelner Verfahren ist in [41] enthalten.

Für in Frage kommende Messverfahren ist zu berücksichtigen, dass bei erdfeuchten Betonen das Bewegungsvermögen im Vergleich zu anderen Betonen sehr herabgesetzt ist, so dass diese Betone unter Verwendung niedriger Verdichtungsenergie nur sehr eingeschränkt zu verarbeiten sind. Bei Anwendung hoher Verdichtungsenergie ändert sich das

Bewegungsverhalten erdfeuchter Betone und eine gute Verarbeitbarkeit mit ausreichender Beweglichkeit des Betons wird erreicht.

Daher ist bei sämtlichen Messverfahren, die ohne oder mit geringem Energieeintrag in die Betonprobe arbeiten, eine Bestimmung der Konsistenz als Aussage über die Verarbeitbarkeit erdfeuchter Betone nicht möglich.

Im Weiteren wird auf die Verfahren eingegangen, mit denen Messungen der Konsistenz an erdfeuchten Betonen durchführbar sind.

Verdichtungsmaß nach DIN EN 12350-4 [35][42]:

Das Verdichtungsmaß nach Walz eignet sich für Splittbetone, sehr mehlkornreichen Beton, Leicht- und Schwerbetone sowie für Beton mit sehr steifer Konsistenz [43].

Dabei wird nach Abbildung 7 die Höhe h_1 des nicht verdichteten Betons zur Höhe h des verdichteten Betons ins Verhältnis gesetzt. Die Verdichtung erfolgt dabei auf einem Rütteltisch.

Trotz der Bekanntheit des Verdichtungsmaßes liegen keine vergleichenden Aussagen zu dessen Genauigkeit vor [42]. Wenngleich die Prüfvorschrift auch eindeutig ist, so liegt eine mögliche Fehlerquelle in dem Befüllen der 40 cm hohen Stahlform mit frischem Beton, da hierbei bereits eine unbeabsichtigte, teilweise Verdichtung stattfinden kann.

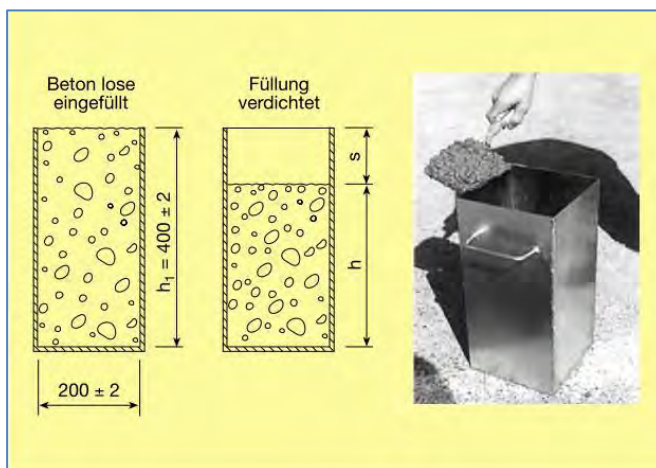


Abbildung 7: Bestimmen des Verdichtungsmaßes [42]

Informationen darüber, ob die Genauigkeit, die das Verdichtungsmaß zulässt ausreicht, um Schwankungen bei der Zusammensetzung erdfeuchter Betone grundsätzlich festzustellen, liegen ebenfalls nicht vor. In der Praxis wird es weder bei der Entwicklung von Rezepturen noch bei laufenden Kontrollen eingesetzt. Vor allem wird mit 16 Litern Beton eine verhältnismäßig große Menge benötigt, wodurch das Gewicht der gefüllten Form bei fast 40 kg liegt und das Verfahren sehr unhandlich werden lässt.

Vébé-Test:

Bei diesem Verfahren wird eine Betonprobe in der Form des vom Ausbreitmaß bekannten Kegelstumpfes in eine zylindrische Probe umgeformt (Skizze siehe Abbildung 8). Das Umformen erfolgt durch Rütteln (Vibration) und Auflast. Gemessen wird die Zeit, die der Beton zum vollständigen Übergang in einen Zylinder benötigt.

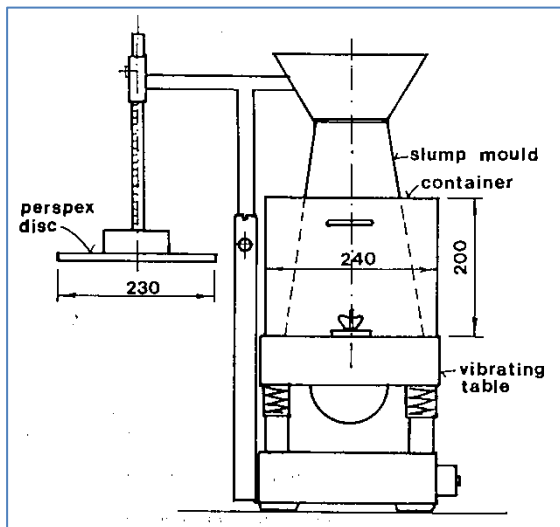


Abbildung 8: Aufbau des Vébé-Apparates [44]

Der Test ist anwendbar bei Beton mit geringer Beweglichkeit, steifen und trockenen Mischungen. Ein möglicher Fehler ist das Messen der Zeit bis zum vollständigen Anliegen der Plexiglasscheibe an der Oberfläche des Zylinders. Insgesamt jedoch wird die gute Einsatzmöglichkeit für steife Betone hervorgehoben. Bei einem Vergleich des Vébé-Tests mit zwei weiteren Verfahren, dem Compacting factor und dem Verfahren nach Thaulow, wurde festgestellt, dass sich für sehr trockene Mischungen nur der Vébé-Test und der Thaulow-Falltisch eignen, wobei der Vébé-Test aufgrund der höheren Empfindlichkeit als Nachweisverfahren favorisiert wird [44]. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Vergleich der Konsistenzmaße für verschiedene Methoden [44].

Konsistenz	Slumpmaß [cm]	Vébézeit [sec]	compacting- factor	Thaulow [Hübe]
extrem trocken	-	32 - 18	-	112 - 56
sehr steif	-	18 - 10	0,70	56 - 28
steif	0 - 3	10 - 5	0,75	28 - 14
plastisch-steif	3 - 8	5 - 3	0,85	14 - 7
plastisch	8 - 13	3 - 0	0,90	< 7
fließend	13 - 18	-	0,95	-

Wie aus Tabelle 4 ersichtlich ist, ergibt sich somit durch das Vébé bzw. Thaulow-Verfahren die Möglichkeit, die Konsistenzbereiche sehr steif und extrem trocken, für die das Slump-Maß keine Aussage liefert, gegeneinander abzugrenzen.

Aufgrund der geringeren Empfindlichkeit im Vergleich zum Vébé-Test wird auf eine Beschreibung der beiden anderen Versuche verzichtet.

Maniabilimètre:

Das Maniabilimètre besteht aus einer rechteckigen Stahlform, in die Beton eingefüllt und unter Vibration verdichtet wird. Anschließend wird eine Trennwand in der Form entfernt und die Zeit ermittelt, die der abgeöschte Betonkörper benötigt, um durch Vibration gleichmäßig in der gesamten Form verteilt zu werden [45]. Eine Weiterentwicklung des Maniabilimètre ist der LCL-Test, der in der französischen Norm enthalten ist und im wesentlichen eine verbesserte Handhabung bei gleichem Versuchsprinzip aufweist [41].

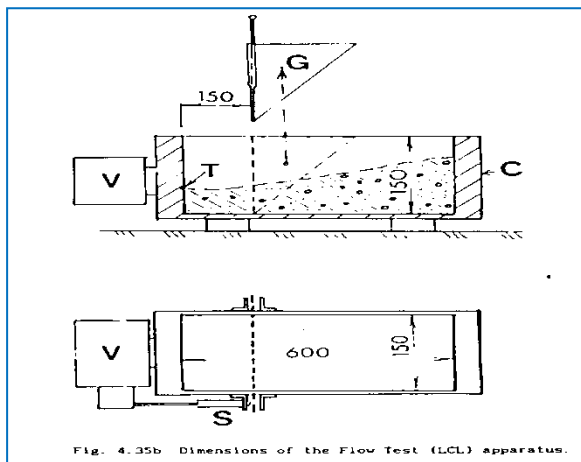


Abbildung 9: Prinzip des Maniabilimètre/ LCL-Test [45]

Der LCL Test ist geeignet für Mischungen, die eine niedrige bis mittlere Beweglichkeit besitzen. Für Beton mit sehr ausgeprägtem Bewegungsverhalten wie z.B. Fließbetone aber auch mit sehr niedrigem Bewegungsverhalten, zu denen auch erdfeuchte Betone gehören, wird das Gerät für nicht geeignet gehalten.

Intensive Compaction Tester (IC-Test):

Eine etwas neuere Methode, mit der die Verdichtungsfähigkeit erdfeuchter Betone ermittelt werden kann, ist der Intensive Compaction Tester [46].

Dabei wird der Beton, wie in Abbildung 10, in einem zylindrischen Prüfgefäß von oben und unten mit einer definierten, wiederholten Bewegung und zusätzlicher Druckkraft langsam verdichtet.

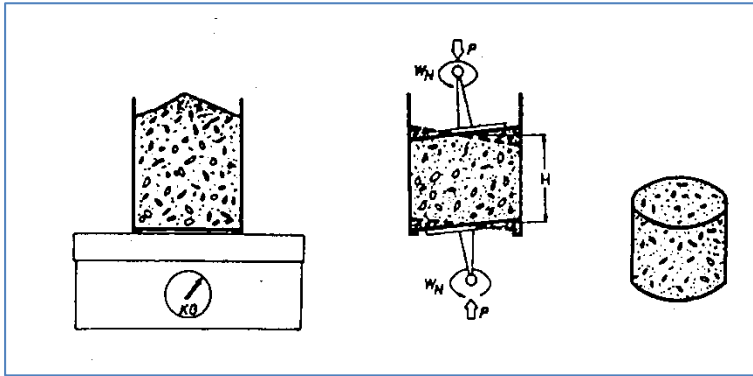


Abbildung 10: Intensive Compaction test - wiegen, verdichten, verdichteter Zylinder [46]

Gemessen wird die Veränderung der Höhe der Betonprobe während der Verdichtung. Ausgehend vom Gewicht der Probe wird daraus die Veränderung der Dichte in Abhängigkeit von der Zeit bzw. des Verdichtungsprozesses - ausgedrückt in Bewegungszyklen - berechnet. Durch Festlegen einer Rohdichte, bei der eine Fertigungsmaschine, die Betonwaren aus erdfeuchtem Beton herstellt, den Beton gut verarbeitet, kann die mit dem Compaction Tester gemessene Dichte dem so festgelegten Soll gegenübergestellt werden.

Das Verfahren ist anwendbar bei erdfeuchten Betonen bzw. bei Betonen mit einer Vébé-Zeit länger als 15-20 Sekunden. Die Genauigkeit, mit der Änderungen im Verdichtungsverhalten bestimmt werden können, wird mit 3 bis 5 Liter Wasser pro m^3 Beton angegeben. Hüsken [47] verwendete bei seinen Untersuchungen zur Gründruckfestigkeit und Packungsdichte den IC-Test.

2.2.3 Diskussion bestehender Prüfverfahren

Die Literatur enthält über 50 verschiedene Konsistenzprüfverfahren, von denen an dieser Stelle nur diejenigen näher vorgestellt wurden, deren Anwendbarkeit im Bereich der steifen Konsistenzen bis hin zu trockenen Mischungen angegeben war.

Die hier erwähnten Verfahren unterscheiden sich in ihrer Wirkungsweise in Untersuchungen des Fließverhaltens wie das Maniabilimètre und der LCL-Test sowie in Prüfungen der Verdichtbarkeit wie das Verdichtungsmaß nach Walz und der Intensive Compaction tester. Der Vébé-Test nimmt eine Zwischenstellung ein, da sowohl ein Umformen des Probekörpers vom Konus zum Zylinder vorgenommen wird als auch eine Verdichtung durch Vibration solange erfolgt, bis der Frischbeton zu einem Zylinder umgeformt wurde. Mit Ausnahme des Intensive Compaction testers ist allen Verfahren gemeinsam, dass die während des Versuches aufgebrachte Beanspruchung quantitativ nicht zu erfassen ist und die Ergebnisse daher nur als relative und physikalisch nicht definierbare Vergleichswerte betrachtet werden können. Insbesondere können aus den Verfahren keine Aussagen über die Standfestigkeit der verdichteten Betone abgeleitet werden.

Ein Vergleich unterschiedlich zusammengesetzter Betone, und inwieweit Schwankungen innerhalb einer Mischung, wie sie in Tabelle 2 aufgelistet sind und damit festgestellt werden können, ist ungewiss. Hinzu kommt, dass in der maschinellen Verarbeitung der erdfeuchten Betone bereits Unterschiede von wenigen Litern Wasser pro Kubikmeter Auswirkungen haben können. Ein Prüfverfahren für die Verarbeitungseigenschaften muss daher eine hohe Genauigkeit bei der Feststellung von Änderungen aufweisen und die bestehen-

den Anforderungen an die Verarbeitbarkeit wie in Kap.1.1 beschrieben, mit erfassen, um in der Praxis von Nutzen zu sein.

Ein Zusammenhang zwischen Gründruckfestigkeit, -zugfestigkeit oder dem Verformungsverhalten erdfeuchter Betone und den vorgestellten Messverfahren für Konsistenzen ist aus den vorliegenden Veröffentlichungen nicht erkennbar. In der Praxis wird keines der Verfahren für die regelmäßige werkseigene Produktionskontrolle oder für die Entwicklung von neuen Betonrezepturen im erdfeuchten Bereich herangezogen.

Für die Entwicklung eines geeigneten Prüfverfahrens ist es wichtig, zunächst den Stand der Forschungen bei erdfeuchten Betonen zu betrachten und umfängliche Kenntnisse über die Grundlagen der Kraftübertragung zwischen nicht frei beweglichen Partikeln innerhalb einer Feststoffmatrix zu erhalten.

2.3 Erdfeuchte Betone

In der Vergangenheit wurden Untersuchungen lediglich an erdfeuchten Betonen und nicht an erdfeuchten Leimgemischen durchgeführt. Auch über die Zugkräfte sowie die für das Erreichen der Zugkräfte erforderlichen Wege wurden bislang keine Untersuchungen veröffentlicht. Die Einflüsse unterschiedlicher Feststoffe auf die Haftkräfte zwischen einzelnen Partikeln und auf das Verformungsverhalten sind von Interesse, weil mit dem Verständnis dieser Zusammenhänge eine zielgerichtete Verbesserung bestehender und Entwicklung neuer erdfeuchter Betonrezepturen erzielt werden kann. Daher wird im Folgenden auf die Ergebnisse eingegangen, die bislang bei erdfeuchten Betonen gewonnenen werden konnten.

2.3.1 Vergleich der Zusammensetzungen

Ebenso wie bei Betonteilen, die in der Form erhärtet hergestellt werden, müssen auch bei sofort entschalteten Betonteilen aus EF-Betonen nach ca. 15 bis 20 Stunden bereits hohe Festbetondruckfestigkeiten vorhanden sein.

Hierbei kommt es nicht darauf an, die Form oder den Schalplatz möglichst schnell wieder zu belegen, wie es bei in der Form erhärteten Bauteilen der Fall ist. Bei Massenprodukten aus EF-Betonen ist es wichtig, die Lagerflächen der frisch entschalteten Produkte im Hochregallager oder in den Erhärtungslagern in den Hallen schnellstmöglich wieder zu leeren, in denen sie ca. 15 bis 20 Stunden witterungsgeschützt bei konstanten Lufttemperaturen und -feuchten verweilen. Erst wenn die Trockenlager entleert sind und die Betonteile in die normalen Lagerbereiche überführt wurden, ist erneut Platz für die nächsten frisch hergestellten, noch grünen Betonteile vorhanden.

Aus diesem Grund werden fast ausschließlich Zemente in den Festigkeitsklassen 42,5 und 52,5 als normal (N) oder schnell erhärtend (R) verwendet. Der Anteil der CEM I-Zemente ist mit ca. 70 % nach wie vor recht hoch. Die restlichen 30 % verteilen sich auf die Kompositzemente CEM II-A/LL, CEM II-P/V und Hüttensandzement. Alle weiteren Zementarten werden bei der Produktion von Betonteilen so gut wie nicht eingesetzt [48].

An Zusatzstoffen werden Flugaschen und Gesteinsmehle eingesetzt. Die Gesteinskörnungen variieren, je nach örtlicher Verfügbarkeit werden Kiese oder Splitte eingesetzt. Dabei ist das Größtkorn auf max. 16 mm begrenzt für großformatige Betonteile. Für kleinere Produkte wie z.B. Betonpflastersteine werden lediglich 8 mm bis 12 mm als Größtkorn verwendet.

Bei Produkten mit geringer Höhe, die auf Unterlagsbrettern hergestellt und darauf in die Trockenkammer gefahren werden, kommen oft zwei Rezepturen zum Einsatz. Der Kern-

beton oder auch Hinterbeton genannt besteht aus einer groben Rezeptur bis 12 mm Größtkorn. Der Kernbeton wird in die Formenkästen eingebracht und evtl. kurz angerüttelt oder durch kurzes Absenken der Stempelplatten etwas zusammengedrückt. Dann wird der Vorsatzbeton eingebracht und beide gemeinsam unter Vibration und Auflast verdichtet. Der Vorsatzbeton ist sehr fein mit maximal 4 mm Größtkorn und einem höheren Leimgehalt damit die Oberflächen möglichst geschlossen und gleichmäßig aussehen.

Ein grober Vergleich von Betonzusammensetzungen in unterschiedlichen Konsistenzbereichen ist in [47] enthalten.

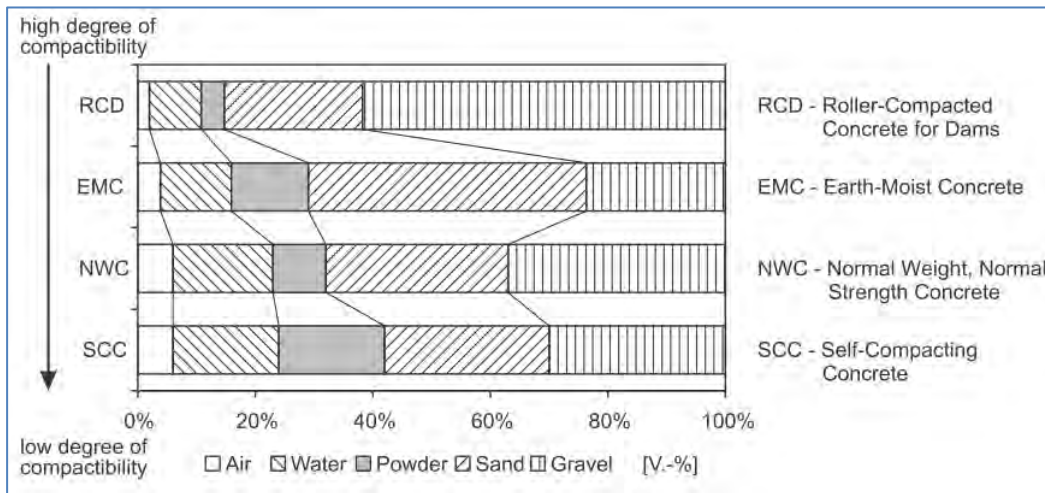


Abbildung 11: Schematischer Vergleich der Zusammensetzungen von selbstverdichtendem Beton (SCC), Normalbeton (NWC), erdfeuchtem Beton (EMC) und hydraulisch gebundenen Tragschichten (RCD) nach Hüsken [47]

Die Darstellung unterscheidet nicht zwischen Zement und Zusatzstoffen, sondern gibt den Pulveranteil <math> < 0,125 \text{ mm}</math> (powder) insgesamt an. Auch ist der Unterschied im Größtkornbereich darin nicht explizit enthalten, der bei den dargestellten EMC bei 8 mm und bei RCD bei bis zu 40 mm liegt. Erkennbar ist, dass der Leimgehalt bei EF-Betonen ca. 5 % geringer ist als bei Normalbetonen bei gleichzeitiger Reduzierung des Wasseranteils und einem erhöhten Pulveranteil.

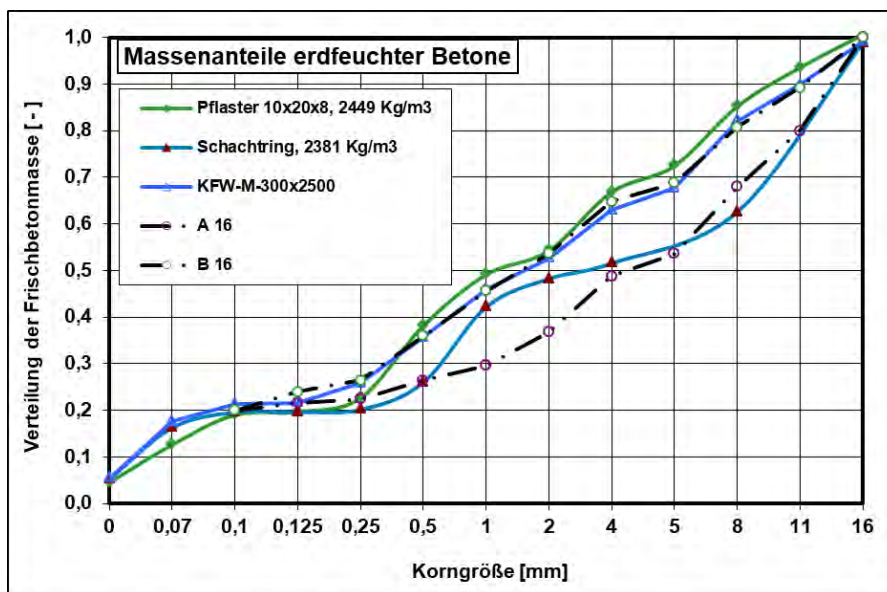


Abbildung 12: Prozentuale Verteilung der Frischbetonmasse bei drei unterschiedlichen Betonteilen aus erdfeuchtem Beton: Pflastersteine, Schachtringe, Betonrohre

Ein detaillierterer Vergleich der Unterschiede innerhalb des erdfeuchten Betonbereiches stellt beispielhaft Abbildung 12 dar. Für drei Betonteile, die aus erdfeuchten Betonen mit 16 mm Größtkorn in unterschiedlichen Herstellverfahren produziert werden, sind die Zusammensetzungen als prozentuale Verteilung der Frischbetonmasse in Abbildung 12 gegenübergestellt. Dabei wurde der Wassergehalt w auf der y-Achse angegeben (entspricht 0 mm Korngröße), der Zementgehalt z bei 0,07 mm (70 μm) und Flugasche f bei 0,1 mm (100 μm). Die Zusammensetzungen unterscheiden sich insbesondere ab 0,1 mm recht stark voneinander. Eine pauschale Zuordnung, mit welcher Betonzusammensetzung welche Betonteile erfolgreich hergestellt werden können, ist alleine anhand der verglichenen Kurven ebenso wenig möglich wie anhand der schriftlichen dokumentierten Rezepturen. Hierfür liegt in der Fachliteratur bislang keine vergleichende Datenbasis veröffentlicht vor.

2.3.2 Einflussfaktoren auf die Gründruckfestigkeit

Bei allen Herstellverfahren mit sofortiger Entschalung muss der verdichtete Beton nach dem Entfernen der Form bereits eine Festigkeit aufweisen, obwohl die Hydratation noch nicht wirksam geworden ist und chemische Bindungen nicht vorliegen.

Für diese trockenen, erdfeuchten Betone ergibt sich eine andere zeitliche Abfolge bei der Bezeichnung der Reaktionsphasen des Betons. Die Reaktionsphasen für trockenen und für weichen Beton werden in Abbildung 13 gegenübergestellt [49].

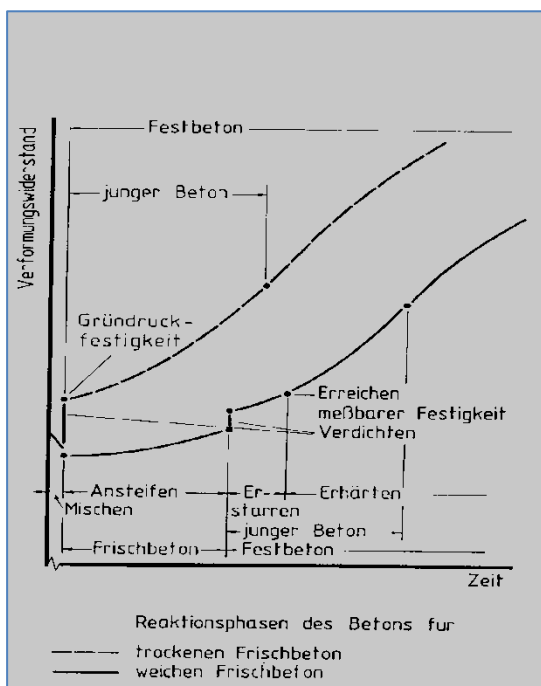


Abbildung 13: Definition der Reaktionsphasen des Betons [49]

Ein Beton, in Abbildung 13 als weicher Beton bezeichnet (Anm.: Konsistenzklassen F2-F4), wird unmittelbar nach dem Verdichten bis zum Erreichen des Maximums der Erhärtungsgeschwindigkeit, das dem Wendepunkt des Kurvenverlaufes entspricht, als junger Beton bezeichnet. Bei dem Kurvenverlauf des erdfeuchten Betons, bezeichnet als trockener Beton, ist bereits nach dem Verdichten eine Festigkeit messbar, die bei einem weichen Beton erst nach Abschluss der Erstarrungsphase auftritt. Die Bezeichnung "grüner Beton" beschreibt bei weichen Konsistenzen in der Regel die Anfangsphase des jun-

gen Betons unmittelbar nach dem Verdichten, während der die Hydratationsreaktion des Zementes zwar bereits begonnen hat, jedoch dadurch noch keine Festigkeit vorhanden ist.

Bei der Verarbeitung erdfeuchter Frischbetone zu Betonwaren hingegen bezeichnet man mit "grünem Beton" den unmittelbar nach der Verdichtung entformten, standfesten Beton. Die Eigenschaft, die es dem zum fertigen Produkt verdichteten Beton ermöglicht, das Eigengewicht unter Einhaltung der Form und Maße zu tragen, wird als "Grünstandfestigkeit" bezeichnet. Die minimal erforderliche Grünstandfestigkeit errechnet sich aus der Frischbetonmasse bezogen auf den Betonquerschnitt. Sie ist bei einem Betonpflasterstein mit 10 cm Höhe geringer als bei einem Betonrohr mit 250 cm Baulänge. Die auf den Beton bezogene Materialeigenschaft ist die "Gründruckfestigkeit" [50], [20]. Die bisher umfangreichsten Untersuchungen zur Gründruckfestigkeit wurden in den siebziger Jahren durch Wierig vorgenommen [20] sowie von Bornemann 2005 [22].

Nachfolgend werden die wichtigsten Zusammenhänge und Ergebnisse dieser Arbeiten erläutert.

Die Gründruckfestigkeit des Systems Beton, bestehend aus den Komponenten Festsubstanz, Wasser, Luft sowie möglicher, flüssiger Zusätze wird gemäß Wierig durch drei Komponenten bestimmt:

- echte Kohäsion,
- kapillare Kohäsion,
- Strukturwiderstand (Verzahnung und Reibung) der Feststoffkörper.

Die Begriffe stammen aus der Bodenmechanik und beschreiben die bodenmechanische Kenngröße der Scherfestigkeit von Böden. Dabei wird mit echter Kohäsion das Aneinanderhaften von kleinen Bodenpartikeln bei bindigen Böden wie z.B. Ton und Lehm bezeichnet. Damit sich eine Kohäsion einstellt, muss der Boden einen Anteil von ≥ 5 Gew.-% des Korndurchmessers $\leq 0,006$ mm aufweisen.

Ein ähnlicher Effekt wie von der echten Kohäsion geht von der Kapillarkohäsion aus, die bei nichtbindigen, teilgesättigten Lockergesteinen wie z.B. Sand und Kies auftritt. Sie entsteht durch Kapillarspannungen zwischen Porenwasser und Festsubstanz. Bei Austrocknung oder Sättigung des Bodens ist keine Kapillarkohäsion vorhanden [51].

Der Strukturwiderstand ist die gegenseitige Verzahnung und Reibung der Bodenteilchen, die bei einer Verschiebung der Teilchen gegeneinander aktiviert wird. Der Anteil der Normalspannung auf eine Bodenprobe kann nur durch den Strukturwiderstand eine Scherfestigkeit auslösen. Der Grad der Reibung wird durch den Reibungsbeiwert μ als Funktion des inneren Winkels der Reibung ausgedrückt.

Alle im weiteren betrachteten Einflussgrößen der Zusammensetzung und der Verarbeitung erdfeuchter Betone wirken sich auf einen oder mehrere dieser beschriebenen Komponenten der Gründruckfestigkeit aus. Der Begriff Gründruckfestigkeit ist in diesem Zusammenhang das Ergebnis eines einaxialen Druckversuches. Die eigentliche Zerstörung eines Prüfkörpers aus grünem Beton erfolgt im einaxialen Druckversuch dadurch, dass die Scherfestigkeit an einer oder mehreren Gleitflächen überschritten wird. In oben erwähnten Untersuchungen [20] wurde eine Reihe von Parametern aus der Betontechnologie im Hinblick auf deren Auswirkungen auf die Gründruckfestigkeit analysiert.

Im einzelnen wurden dabei betrachtet:

- a) Wassergehalt
- b) Verdichtung (Rüttelzeit)
- c) Luftgehalt
- d) Feststoffgehalte
- e) Zementgehalt, -feinheit, -oberfläche
- f) Gesteinskörnung, Sieblinien
- g) Zusätze (Trass, Quarzmehl, Bentonit, Weißkalk, Verflüssiger)
- h) Form u. Abmessung d. Prüfkörper, Belastungsgeschwindigkeit

Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse dieser Betrachtungen kurz wiedergegeben und in ihren Auswirkungen auf die Komponenten der Gründruckfestigkeit eingeschätzt.

a) und b) Wassergehalt und Rüttelzeit:

Der Zusammenhang von Wassergehalt und Gründruckfestigkeit bei unterschiedlicher Verdichtung- ausgedrückt durch Rüttelzeit- ist in Abbildung 14 dargestellt.

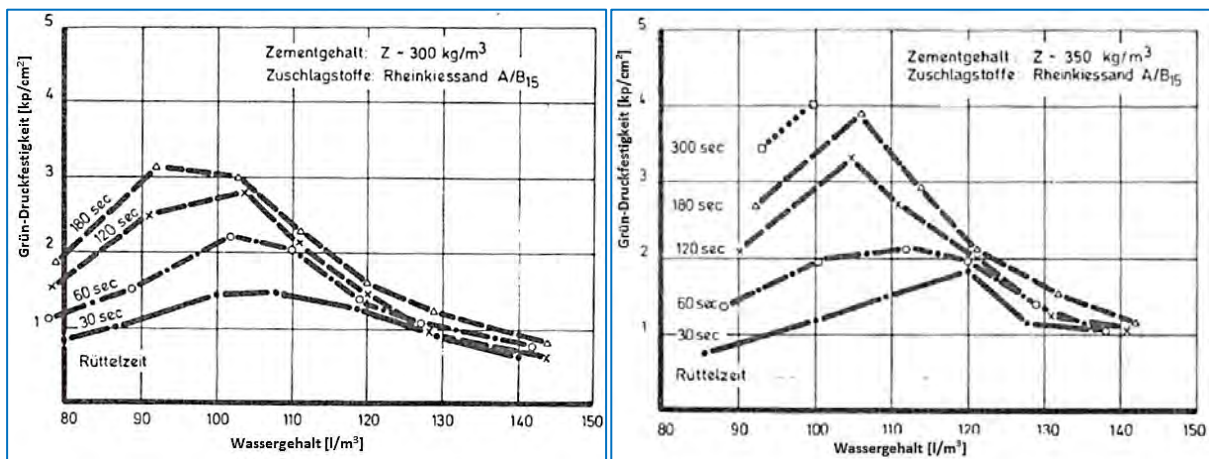


Abbildung 14: Gründruckfestigkeiten für Betone mit unterschiedlichem Zementgehalt in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Betone [20]

Es ist zu erkennen, dass es für jede Rüttelzeit einen dazugehörigen optimalen Wassergehalt gibt, bei dem die höchste Gründruckfestigkeit erreicht wird. Dabei tritt in beiden Bildern das absolute Maximum der Gründruckfestigkeit bei der längsten Rüttelzeit auf. Je höher der Grad der einwirkenden Verdichtungsenergie ist, desto höher ist auch die erreichte Festigkeit.

Rechts der Maxima ist der Abfall der Festigkeit, in allen Fällen deutlich geringer als im Bereich links der Maxima. Unabhängig vom Zementgehalt und der Rüttelzeit ist der Festigkeitsunterschied ab einem Wassergehalt von 120 l/m^3 relativ gering.

Als Ursache wird angeführt, dass die Betone mit geringerem als dem optimalen Wassergehalt unzureichend verdichtet wurden und einen erhöhten Luftgehalt aufweisen. Die Erklärung wird darin gesehen, dass der Beton in der ersten Phase der Verdichtung schnell zusammensackt. Es bilden sich dann aber Wabenstrukturen, die vergleichbar der Gewölbewirkung im groben Gesteinskörnungsbereich sind. Die einzelnen Körner überbrücken gewölbartig Hohlräume, die größer sind als die Körner selbst. Zugleich haften die Teilchen bereits infolge der Kohäsion aneinander. Dadurch setzt der teilverdichtete Beton

der weiteren Verdichtung einen relativ großen Widerstand entgegen und Luftporen bleiben in der Matrix eingeschlossen.

Dieser Widerstand nimmt mit steigendem Wassergehalt ab. Ausschlaggebend dafür ist die Filmdicke des Wassers auf den einzelnen Teilchen, die mit zunehmendem Wassergehalt größer wird. Dadurch nimmt die Verschieblichkeit der einzelnen Körner gegeneinander zu und die erforderliche Verdichtungsarbeit wird geringer. Zugleich ist nach der Verdichtung die Gründruckfestigkeit kleiner, da wegen der dickeren Wasserfilmschicht weniger Berührungspunkte der Feststoffkörner vorliegen und die innere Reibung und Scherfestigkeit reduziert werden.

Die bei Wierig verwendeten Rüttelzeiten sind für die verwendeten Probekörper mit 20 cm Höhe insgesamt sehr lang. In der Praxis hängt die Rüttelzeit vom Produkttyp und der Produkthöhe ab, bei Betonpflastersteinen mit einer Höhe von 8 cm liegt die Rüttelzeit bei ca. 3,5 Sekunden, bei 2,50 m langen Betonrohren zwischen 45 und 90 Sekunden. Daher ist die Angabe der Rüttelzeit bei Wierig eine Relativangabe, die sich nicht auf praktische Gegebenheiten beziehen lässt.

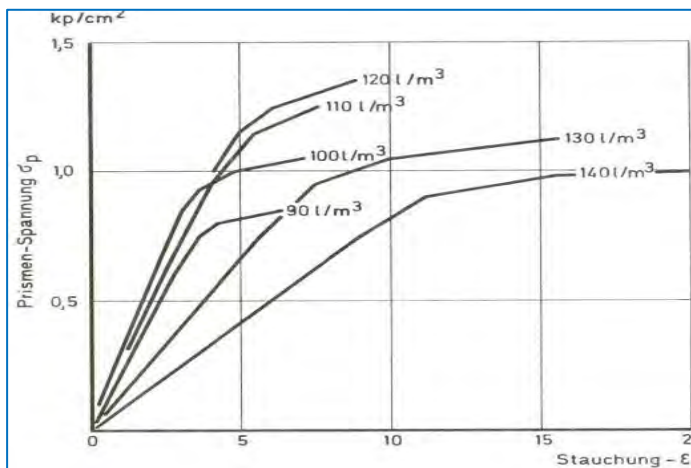


Abbildung 15: Entwicklung der Druckspannung-Stauchungslinien bei unterschiedlichen Wassergehalten nach [20], Stauchung in [‰]

Interessant sind auch die Unterschiede beim Stauchungsverhalten in Abhängigkeit vom Wassergehalt. In Abbildung 15 ist zu erkennen, dass es Wassergehalte gibt, bei denen die Bruchstauchung stark zunimmt. Hierbei handelt es sich um Betone mit einem ausgeprägten Verformungsverhalten. Diese werden sich klebriger verhalten, da sie zunächst hohe Verformungen zulassen bis sich ihre maximale Gründruckfestigkeit einstellt. Es steigt die Möglichkeit, dass es zu Anhaftungen an den Formeneinrichtungen kommen kann.

c) und d) Luftgehalt und Feststoffgehalte:

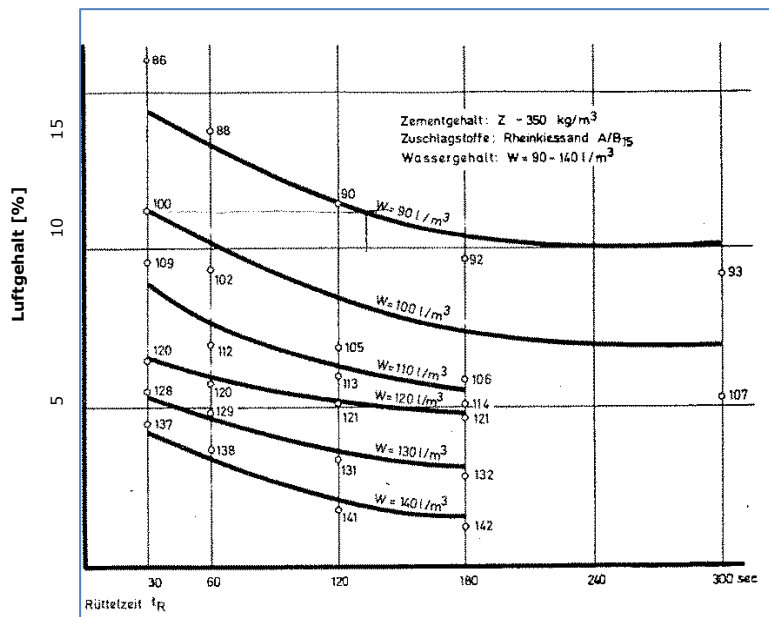


Abbildung 16: Einfluss der Rüttelzeit auf den Luftporengehalt in Abhängigkeit vom Wassergehalt [20]

Die Darstellung der Abbildung 16 korrespondiert zu dem rechten Diagramm der Abbildung 14. In Zusammenhang damit ist erkennbar, dass geringe Luftgehalte, die auf einen hohen Verdichtungsgrad hindeuten, nicht gleichzeitig auch eine hohe Gründruckfestigkeit mit sich bringen. So weisen die Wassergehalte ab 120 l/m^3 in etwa die gleichen Druckfestigkeiten auf wie der Wassergehalt von 90 l/m^3 , obwohl dabei der Luftgehalt annähernd doppelt so hoch ist. Die in Abbildung 15 erkennbaren hohen Stauchungen bei diesen Wassergehalten deuten darauf hin, dass ein Tausch der druckkraftübertragenden Mechanismen stattfindet. So werden durch Stauchungen die Kraftübertragung durch Verzahnung der Partikel an Bedeutung gewinnen, während die Haftkräfte aus Kohäsion und Flüssigkeitsbrücken, die nur sehr kurze Reichweiten besitzen, sich verringern. Ergänzend ist darauf hinzuweisen, dass die Art der Verdichtung, die Wierig [20] verwendet hat, in der Intensität nicht mit der Rüttelpressverdichtung moderner Fertigungen von z.B. Betonpflastersteinen vergleichbar ist. Daher liegen die Luftgehalte bei diesen Fertigungen auch bei Verdichtungszeiten von 15 Sekunden unter 5 Vol.-%.

e) Zementgehalt, -feinheit, -oberfläche:

Die Auswirkungen des Zementgehaltes sind in Abbildung 17 dargestellt. Sie zeigt die Zusammenhänge der Abbildung 14 in übersichtlicherer Form und bis zu Zementgehalten von 400 kg/m^3 .

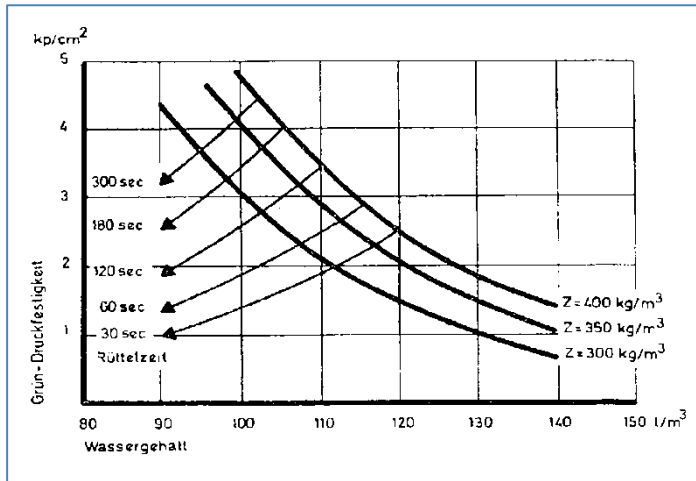


Abbildung 17: Einfluss des Zementgehaltes auf die Gründruckfestigkeit [20] dargestellt als Hüllkurven

Rechts der Maxima nimmt die Gründruckfestigkeit mit wachsendem Zementgehalt um ca. $0,5\text{-}1 \text{ kp/cm}^2 = 0,05\text{-}0,1 \text{ N/mm}^2$ je 50 kg Zement zu. Die nach links abfallenden Kurven, d.h. die Bereiche unzureichender Verdichtung sind für die jeweilige Rüttelzeit zusammengefasst dargestellt, da der Einfluss des Zementgehaltes dort vergleichsweise gering ist. Daraus wird die Folgerung abgeleitet, dass mit einer bestimmten Verdichtungsenergie nur eine bestimmte Anzahl von Berührungsstellen der Teilchen für die Aufnahme der Gründruckfestigkeit geschaffen werden können. Die Zahl der möglichen Berührungsstellen, die mit der Zementmenge zunimmt, ist dabei ohne Belang. Diese Folgerung ist noch zu ergänzen, da bei niedrigen Wassergehalten eine Erhöhung des Zementgehaltes einer Reduzierung des Bewegungsverhaltens gleichkommt und eine Umlagerung der Matrix durch eine Erhöhung der Zahl der Berührungspunkte erschwert wird. Der Zement stellt im Korngemisch des Betons den feinsten Stoff dar und trägt so maßgeblich zur Ausbildung der Kohäsion bei. Erhöht sich der Zementgehalt im Austausch für größere Gesteinskörnungsanteile wird dadurch der mittlere Korndurchmesser des Gesamtgemisches reduziert und die kohäsiven Effekte nehmen zu. Diese tragen beim verdichteten Beton zu einer Zunahme der Gründruckfestigkeit bei. Auf der anderen Seite muss die eingesetzte Verdichtungsenergie groß genug sein, um die bereits beim Verdichten vorhandene Kohäsion zu überwinden.

An der Abbildung 18 ist zu erkennen, dass ein feinerer Zement zu einer höheren Gründruckfestigkeit führt. Dieses Verhalten ist in den rechten Kurvenbereichen ab Wassergehalten größer als 120 l/m^3 weniger stark ausgeprägt.

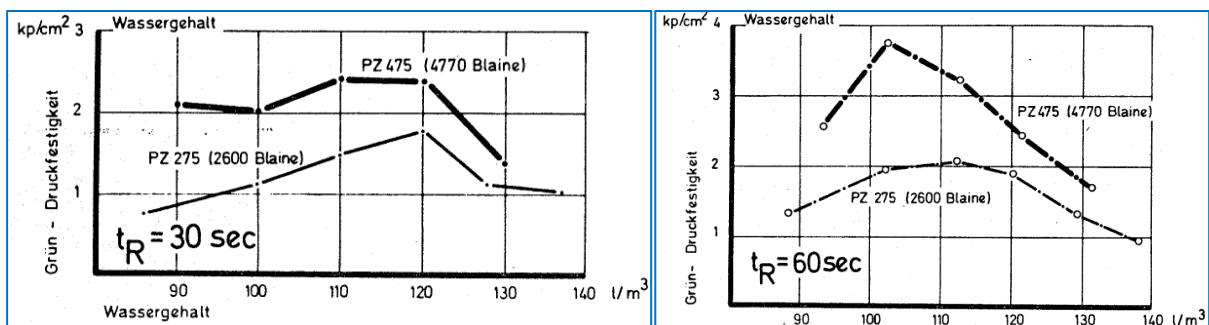


Abbildung 18: Einfluss der Feinheit des Zementes auf die Gründruckfestigkeit [20]

Auch die Erhöhung der Oberfläche des Zementes beeinflusst die Kohäsion und führt zu einem Anstieg der Gründruckfestigkeit.

f) Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung:

Der Einfluss der Sieblinie der Gesteinskörnung ist in der nachfolgenden Abbildung 19 wiedergegeben.

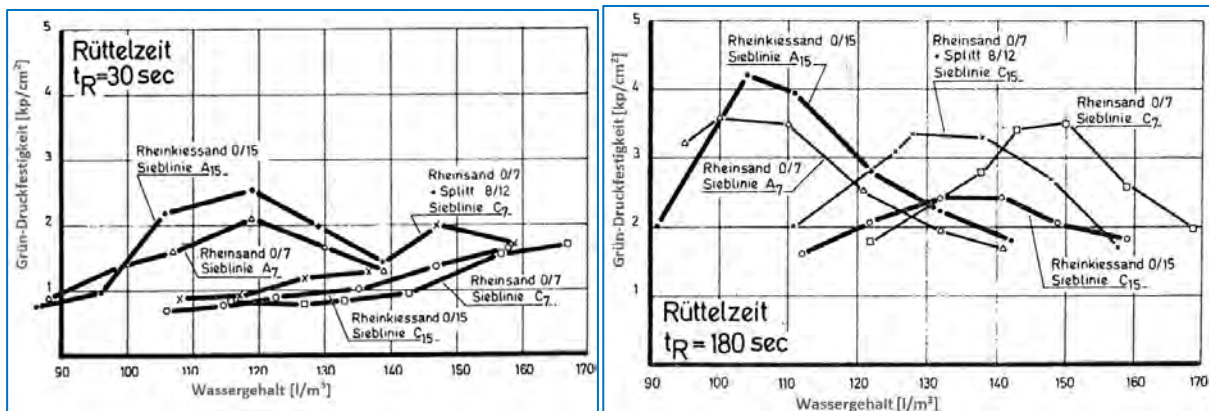


Abbildung 19: Grundruckfestigkeit bei unterschiedlichen Sieblinien für zwei Rüttelzeiten [20]

Mit einem charakteristischen Maximum und zu beiden Seiten abfallenden Kurvenverläufen ähneln die Kurven den bereits erwähnten Ergebnissen. Mit zunehmender Feinheit der Sieblinie sinkt der Absolutwert des Maximums und es verschiebt sich hin zu höheren Wassergehalten. Es ist auch hier zu erkennen, dass die Gesteinskörnungen in Abhängigkeit der Verdichtungsenergie einen unterschiedlichen Einfluss auf die Grundruckfestigkeit ausüben. Als besonders günstig werden die Sieblinien A15 und A7 beschrieben, die in diesem Vergleich als grobe Sieblinien angesehen werden.

Als Ursache für eine gute Eignung, also eine hohe Grundruckfestigkeit wird darauf verwiesen, dass die einzelnen groben Körner direkten Kontakt miteinander haben und die innere Reibung vergrößern. In umgekehrter Weise wird die Erklärung für die schlechte Festigkeit des Betons aus der Sieblinie C15 herangezogen, in der wenige grobe Körner in einer relativ feinen Matrix schwimmen. Dort ist kein Kontakt der groben Körner untereinander vorhanden und das stetige Gefüge der Matrix ist zerstört. Ein ungünstiges Verhalten der Mischung bei der Verdichtung durch Rütteln konnte ebenfalls nicht ausgeschlossen werden.

Der Beton mit Splittzusatz weist etwas höhere Grundruckfestigkeiten auf als der Beton mit runden Gesteinskörnungen, da der Strukturwiderstand durch die Reibung der scharfkantigen Splittkörner über dem des runden Materials liegt.

Zu ergänzen ist das Verhalten der Sieblinie C7 bei verschiedenen Rüttelzeiten. Während bei einer Rütteldauer von 30 Sekunden alle Ergebnisse unter $0,2 \text{ N/mm}^2$ liegen, steigt die Grundruckfestigkeit bei 180 Sekunden Rütteldauer auf über $0,35 \text{ N/mm}^2$ an. Als Ursache hierfür kommt die höhere Kohäsion, bedingt durch die Feinheit der Gesteinskörnung, in Frage. Dadurch ist beim Verdichten ein höherer Energieaufwand erforderlich. Ist der Widerstand beim Verdichten überwunden worden, so dass eine Umlagerung der Bestandteile der Matrix stattfinden konnte, verstärkt die Kohäsion des verdichteten Betons das Ergebnis der Grundruckfestigkeit.

g) Zusatzstoffe und Zusatzmittel:

Als Zusatzstoffe wurden dem Beton Trass, Quarzmehl, Flugasche, Weißkalk, Bentonit sowie ein Verflüssiger als Zusatzmittel beigefügt und die Auswirkung auf die Grundruck-

festigkeit untersucht [20]. Bei der Zugabe von Quarzmehl oder Flugasche stellte sich kein nennenswerter Effekt ein. Insbesondere bei der Flugasche wurde eine mögliche Kugellagerwirkung der kugeligen Flugascheteilchen dafür verantwortlich gemacht, dass die innere Reibung zwischen den Körnern verringert wurde und die durch die hohe spezifische Oberfläche zu erwartende Zunahme der Gründruckfestigkeit neutralisierte. Die Zugabe von Traß bewirkte eine Festigkeitssteigerung in gleichem Umfang wie eine Zugabe von Zement; die Zugabe von Bentonit sowie Weißkalk rief gestrecktere Kurvenverläufe mit nicht so deutlich ausgeprägten Maxima hervor.

Bei der Zugabe von Verflüssiger zeigt sich deutlich, dass ein Herabsetzen der Oberflächenspannung des Porenwassers zu einer Abminderung der Gründruckfestigkeit führt. Davon kann sowohl die Höhe der Kapillarkohäsion betroffen sein als auch ein Abbau der, insbesondere bei höheren Wassergehalten, partiell vorhandenen, scheinbaren Kohäsion durch Porenwasserüberdruck. Der Einfluss von Fließmitteln wurde auch im VDZ-Tätigkeitsbericht 2005-2007 dargestellt [52].

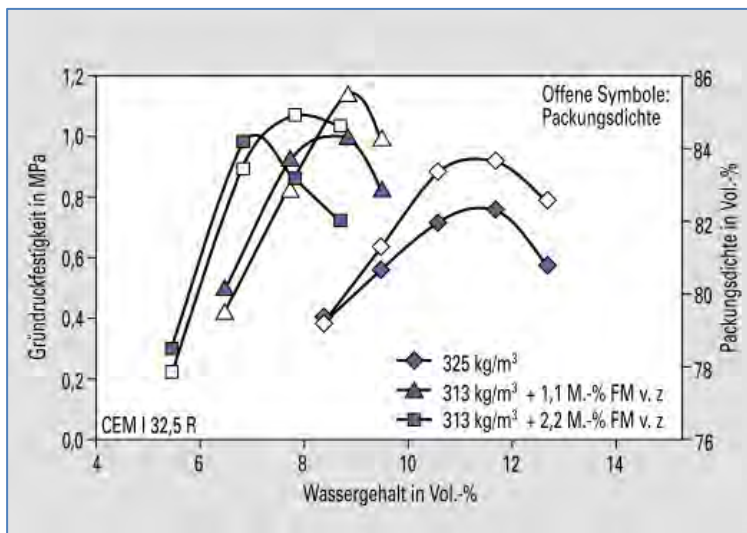


Abbildung 20: Einfluss von Wasser- und Fließmittelgehalt auf Gründruckfestigkeit und Packungsdichte bei einem erdfeuchten Beton [52]

Abbildung 20 zeigt, dass die Zugabe von Fließmittel zu höheren Gründruckfestigkeiten führt bei deutlich reduzierten Wassergehalten. Die Höhe der Dosierung spielte dabei eine untergeordnete Rolle.

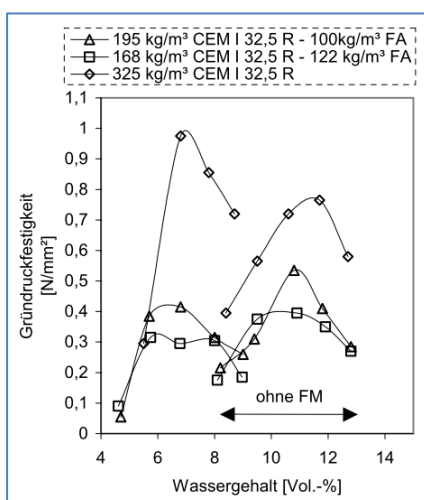


Abbildung 21: Verringerung der Gründruckfestigkeit bei Zugabe von Flugasche [22]

Die Zugabe von Flugasche in Abbildung 21 [22] führte zu einer erheblichen Verringerung der Gründruckfestigkeit, die bei gleichzeitiger Zugabe von Fließmittel noch weiter zurückging. Die Darstellung des Zementes ohne Flugasche ist dabei identisch mit Abbildung 20.

h) Form und Abmessung der Prüfkörper; Belastungsgeschwindigkeit

In den Untersuchungen von Wierig wurde festgestellt, dass die Gründruckfestigkeit mit zunehmender Schlankheit der Probekörper stark abfällt (siehe Abbildung 22). Dieser Zusammenhang wird vom Wassergehalt und der Verdichtungsenergie (hier nicht dargestellt) beeinflusst. So wird der in Abbildung 23 dargestellte Unterschied in der Gründruckfestigkeit von Probekörpern mit doppelter und einfacher Höhe mit steigenden Wassergehalten geringer. Es liegt bei der Grünstandsfestigkeit also eine Abhängigkeit von der Gründruckfestigkeit und von der Gestalt und Geometrie des betonierten Körpers vor. Als Ursache für diese Abhängigkeit wurde der sehr kleine E_0 -Modul angenommen, der die Stabilität des grünen Betons vermutlich in ähnlicher Weise beeinflusst wie die des Festbetons.

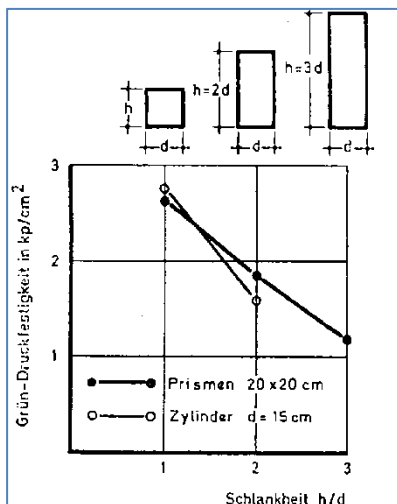


Abbildung 22: Einfluss von Form und Abmessung [20]

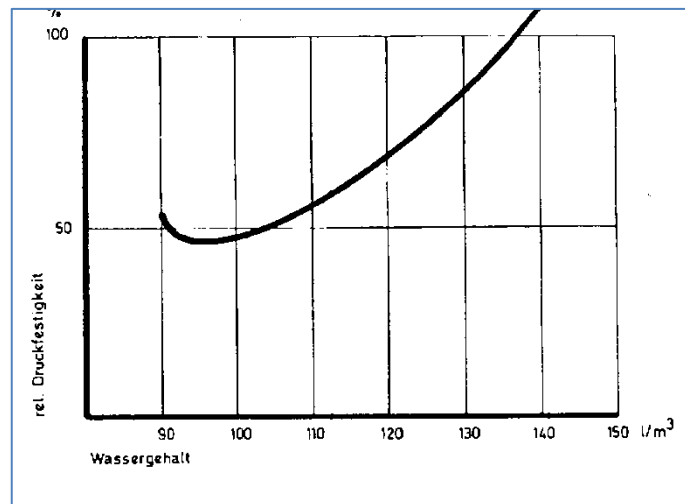


Abbildung 23: Relative Gründruckfestigkeit von Probekörpern mit doppelter Höhe bezogen auf die Gründruckfestigkeit von Probekörpern einfacher Höhe [20]

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Vorgänge innerhalb der Betonmatrix, die zur Ausbildung der Gründruckfestigkeit führen, durch die Geometrie nicht unmittelbar beeinflusst werden, sondern z.B. durch ein anderes Verdichtungsverhalten mit zunehmender Höhe die Absolutwerte der Gründruckfestigkeit niedriger ausfallen.

Die Belastungsgeschwindigkeit der Probekörper wurde in der Auswirkung auf den grünen Beton ähnlich bewertet wie auf den Festbeton. Mit kleinerer Belastungsgeschwindigkeit wird die Gründruckfestigkeit geringer. Hierfür wurden Wasserbewegungen innerhalb des Betons verantwortlich gemacht. Das Wasser setzt der Belastung bevor es ausweicht einen Anfangswiderstand entgegen, dem es dann allmählich nachgibt.

Wierig [20] führte auch Zugversuche, jedoch in sehr geringer Anzahl durch. Die mit den damaligen Messmitteln zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zur Ermittlung der vergleichsweise geringen Kräfte waren sehr begrenzt und die Versuchstechnik sehr aufwändig. Dabei stellte er Zugfestigkeiten von im Mittel $0,05 \text{ kp/cm}^2$ ($=0,5 \text{ N/cm}^2$) fest.

Bornemann verwendete für seine Arbeiten an erdfeuchten Betonen ein speziell entwickeltes Rüttelproctorgerät.



Abbildung 24: Rüttelproctor zur Erfassung des Verdichtungsverhaltens bei dynamischer Verdichtung [22]

Insgesamt sind die Packungsdichten, die in den Ergebnissen enthalten (Abbildung 25) sind, mit 79 bis 86 Vol.-% als sehr niedrig einzustufen. In diesen Bereichen hat eine Erhöhung der Packungsdichte proportional gesehen größere Auswirkungen als in den Bereichen oberhalb von 90 %, da dort die Verdichtung bereits recht intensiv erfolgt ist.

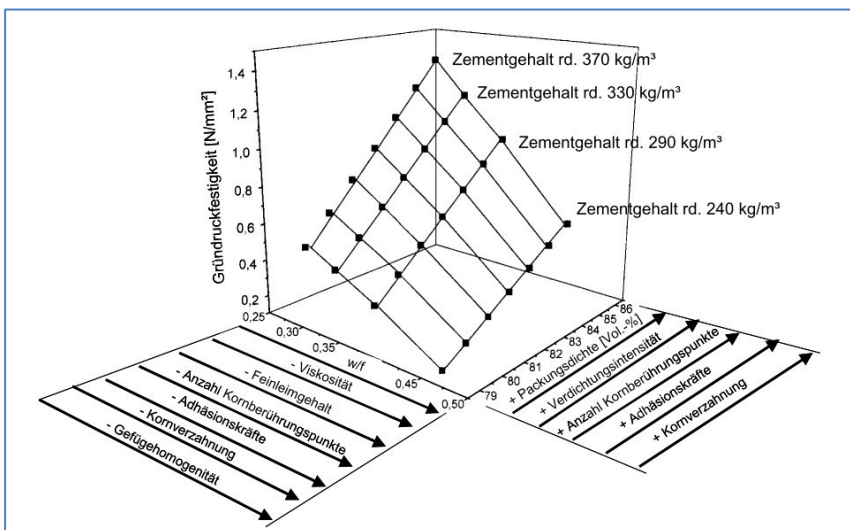


Abbildung 25: Einflussgrößen auf die Gründruckfestigkeit von erdfeuchten Betonen nach [22]

Die Packungsdichte ist dabei gleichbedeutend mit dem Verdichtungsgrad, ausgedrückt in Volumenprozent. Nach Abbildung 25 wird die Gründruckfestigkeit von der Packungsdichte, dem Zementgehalt und dem Wasser-Feinstoffwert beeinflusst.

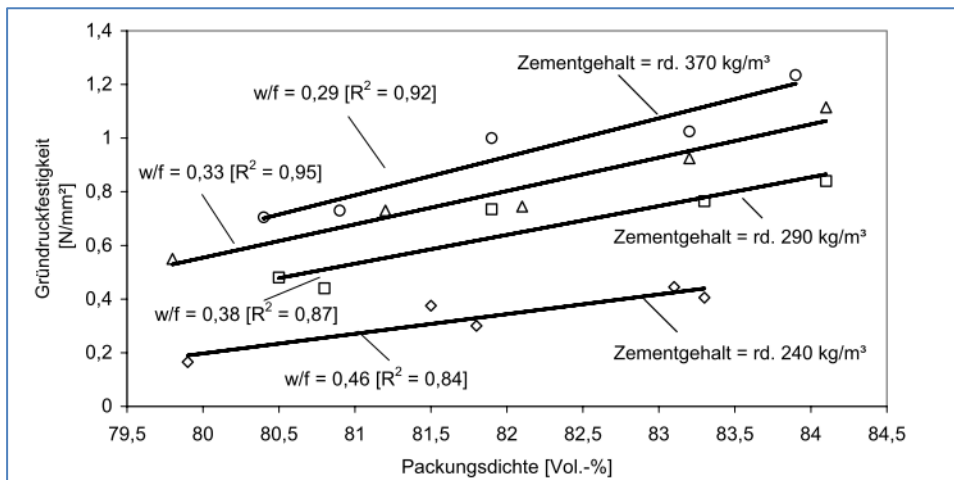


Abbildung 26: Grundruckfestigkeit, Packungsdichte sowie Wasser-Feinstoffwert (als Funktion des Zementgehaltes) nach Bornemann [22]

Der dreidimensionale Zusammenhang findet sich in Abbildung 26 übersichtlicher wieder. Auch ist besser erkennbar, dass der Wasser-Feinstoffwert (w/f-Wert) nahezu exakt vom Zementgehalt abhängt und in der Untersuchung keine eigenständige Größe darstellt, da lediglich geringe Feinanteile aus der Gesteinskörnung darin enthalten sind und keine Zugaben von Zusatzstoffen. Es zeigt also, dass mit geringer werdendem Wasser-Feinstoffwert, d.h. wasserärmeren Mischungen, die Grundruckfestigkeit zunimmt. Diese Zunahme ist größer als die Steigerung aufgrund von höheren Packungsdichten. Auch ist erkennbar, dass der Einfluss der Packungsdichten bei allen Wasser-Feinstoffwerten relativ gleich bleibend ist, die Regressionsgeraden verlaufen nahezu parallel.

Der Einfluss des w/f bzw. w/z-Wertes steht im Widerspruch zu den Ergebnissen von Wie- rig in Abbildung 14. Danach nimmt die Grundruckfestigkeit nicht immer weiter zu, je geringer der w/z-Wert ist, sondern verringert sich in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades, d.h. der Packungsdichte, ab ca. $w/z < 0,30$ wieder. Da Bornemann keine Versuche mit so geringen w/f-Werten durchgeführt hat, ist dieser Umschlagpunkt evtl. dabei nicht erkannt worden.

Hüsken [47] hat in seinen Arbeiten zu erdfeuchten Betonen ebenfalls interessante Erkenntnisse zur Grundruckfestigkeit erhalten. Dabei wurden auch die Wege ermittelt. Er verwendete den Intensive Compaction tester (IC), bei dem durch zyklische Verdichtung zylindrische Probekörper (ca. 15 cm x 15 cm) gewonnen werden, siehe auch Kap. 2.2.2.

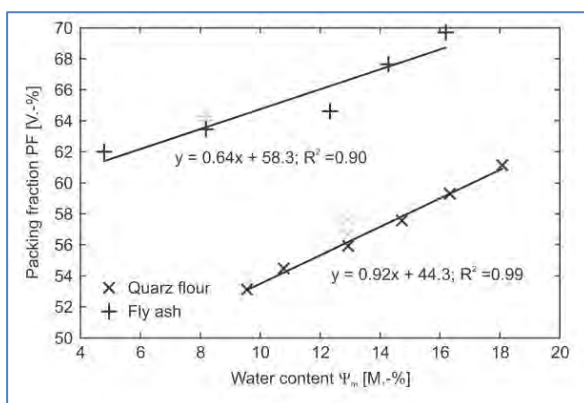


Abbildung 27: Einfluss des Wassergehaltes auf die Packungsdichte (Verdichtungsgrad) von Quarzmehl und von Flugasche (ohne Zement) nach [47]

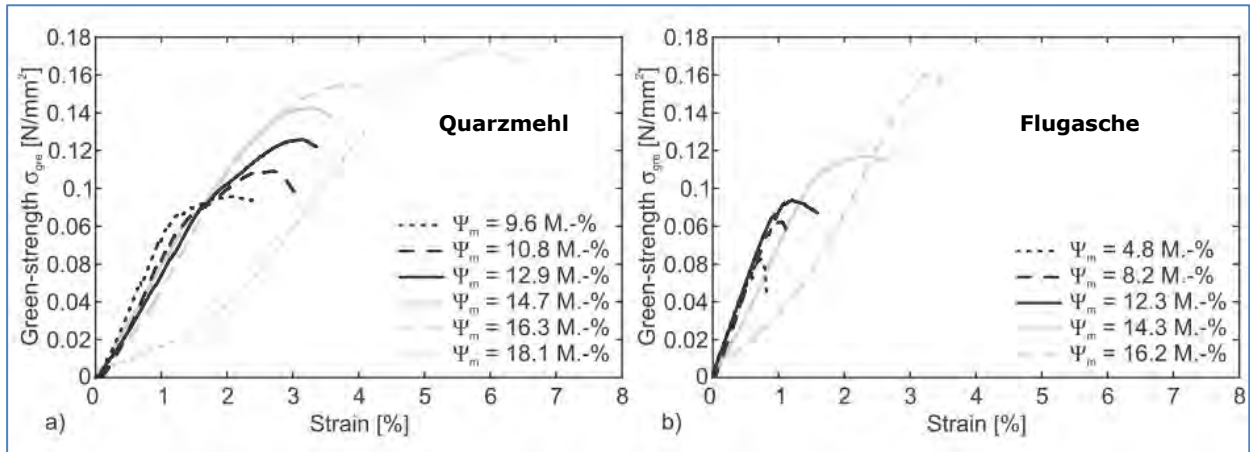


Abbildung 28: Spannungs-Dehnungslinien der Gründruckfestigkeit für zwei Feinstoffe (ohne Zement) bei unterschiedlichen Wassergehalten (bezeichnet mit Ψ_m)
a) nur Quarzmehl, b) nur Flugasche [47]

Damit Effekte der sehr frühen chemischen Hydratisierungsreaktion, wie sie bei Zementen unmittelbar nach Wasserzugabe einsetzen, ausgeschlossen werden konnten, wurde ein Quarzmehl einer Flugasche bei jeweils unterschiedlichen Wassergehalten gegenübergestellt. Dabei erreichte die Flugasche wesentlich höhere Verdichtungsgrade als Quarzmehl (Abbildung 27), was der kugeligen Gestalt der Flugaschepartikel zugeschrieben wurde. Diese erleichterte die Verdichtung im Vergleich zu den Quarzmehlpartikeln, die durch den Mahlvorgang kantige und eckige Kubaturen aufwiesen. Die Sieblinie wurde dabei für beide Stoffe annähernd gleich gewählt.

Der höhere Verdichtungsgrad führte jedoch nicht zu einer Zunahme der Gründruckfestigkeit. Die in Abbildung 28 enthaltenen Festigkeiten waren bei Quarzmehl trotz geringerer Packungsdichte größer als bei Flugasche. Auch zeigte Quarzmehl ein ausgeprägteres Dehnungsverhalten. Es wurden höhere Dehnungen bis zum Erreichen der Maxima gemessen, sowie ein langsamerer Spannungsabfall danach. Bei Flugasche fielen die Spannungen nach den Maxima überwiegend schnell ab. Die Ursache wurde in dem höheren Anteil an innerer Reibung als kraftübertragender Faktor bei Quarzmehl gesehen. Dabei müssen zunächst Verschiebungen stattfinden, damit es zu einer weiteren Verzahnung der Partikel und damit zu höheren Kraftübertragungen kommt. Der Spannungsanstieg bei Flugasche verläuft steiler, Spannungen werden durch Flüssigkeitsbrücken oder elektrostatische Kräfte übertragen, die bereits bei sehr geringen Verformungen Widerstand entgegensetzen und mit wachsender Entfernung rasch abnehmen.

Weiterhin wurde eine Rezeptur bestehend aus jeweils gleichen Anteilen an Sand 0/2 mm und Kies 2/8 mm mit jeweils zwei unterschiedlichen Gehalten an Quarzmehl und an Flugasche miteinander verglichen, siehe Abbildung 29 für Quarzmehl und Abbildung 30 für Flugasche. Dabei ist die Gründruckfestigkeit bei Quarzmehl deutlich höher als bei Flugasche, die jeweiligen Dehnungen unterscheiden sich nicht stark.

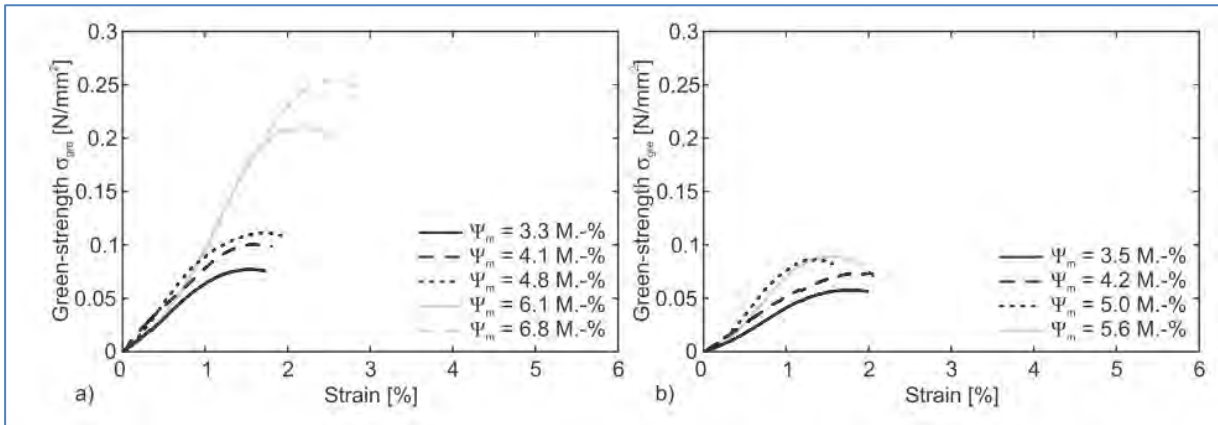


Abbildung 29: Spannungs-Dehnungskurven der Gründruckfestigkeit a) bei 520 kg/m³ Quarzmehl b) bei 290 kg/m³ Quarzmehl und unterschiedlichen Wassergehalten [47]

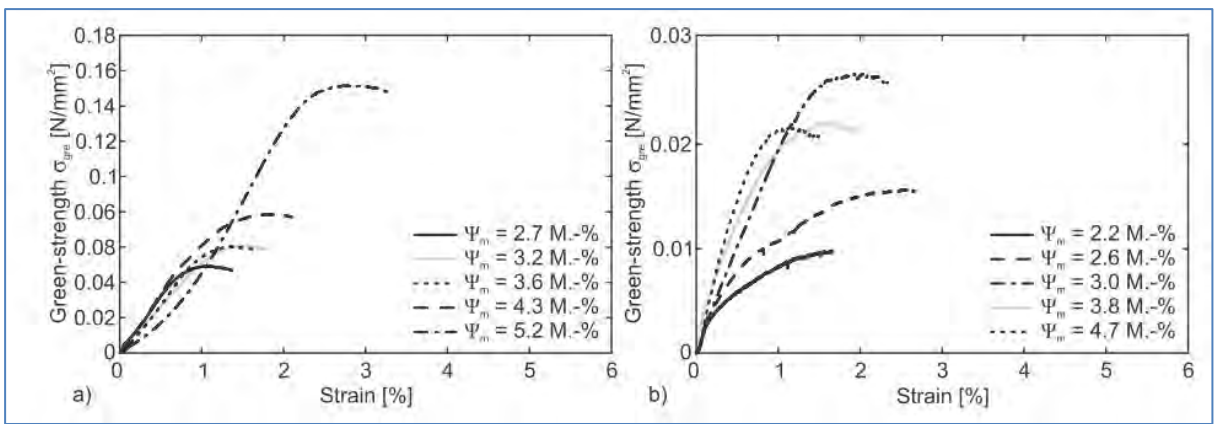


Abbildung 30: Spannungs-Dehnungskurven der Gründruckfestigkeit a) bei 478 kg/m³ Flugasche b) bei 237 kg/m³ Flugasche und unterschiedlichen Wassergehalten [47]

Die Wirkung von superplastifizierenden Fließmitteln (vermutlich PCE, Angaben hierzu wurden nicht gemacht) wurde als vorteilhaft für die zu erreichenden Packungsdichten beschrieben, die durch die Zugabe anstiegen. Dennoch gingen die Gründruckfestigkeiten zurück, was Hüskens auf verringerte Oberflächenspannungen des Wassers aufgrund der Fließmittel zurückführte. Die Höhe der Oberflächenspannung wirkt sich unmittelbar auf die in Flüssigkeitsbrücken übertragenen Kräfte aus.

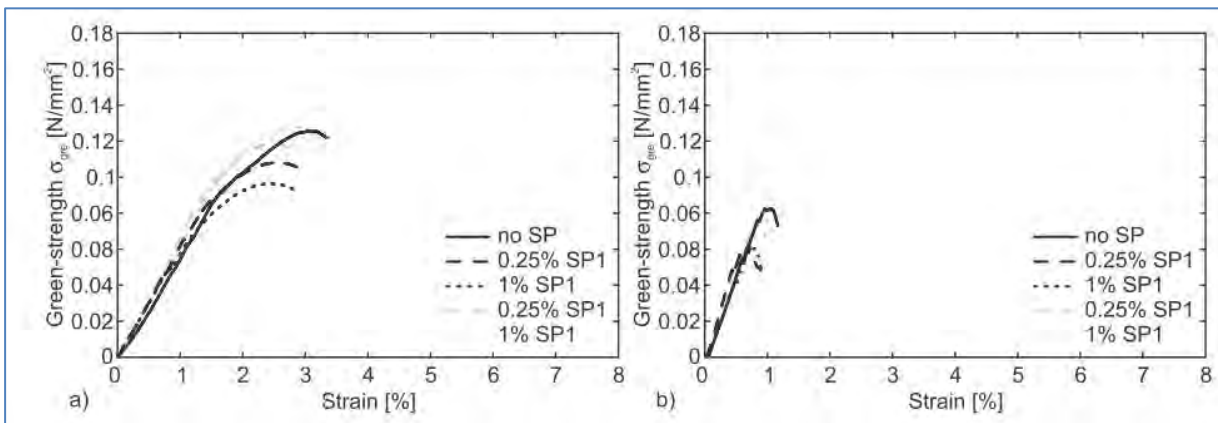


Abbildung 31: Gründruckfestigkeits-Dehnungskurven bei verschiedenen Gehalten an Superplastifizierer (SP) und konstanten Wassergehalten, a) Quarzmehl mit 12,9 M.-% Wasser, b) Flugasche mit 8,2 M.-% Wasser [47] (graue Kurven beziehen sich auf höhere Verdichtungsenergie)

Hierzu ist anzumerken, dass die sogenannten Superplastifizierer im Wirkungsbereich der PCE-Fließmittel alle auf Basis langkettiger und verzweigter Makromoleküle wirken. Dadurch vermindern sie nicht die Oberflächenspannung, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3: Rohstoffe und Wirkung von Fließmitteln im Vergleich nach Höveling [53]

Wirkstoff	Wirkung
Ligninsulfonate	Verminderung der Oberflächenspannung
Melaminsulfonate, Naphthalinsulfonate	Verminderung der Oberflächenspannung, elektrostatische Abstoßung
Polyacrylate	im Wesentlichen sterisch, zusätzlich elektrostatisch und tribologisch
Polycarboxylatether	im Wesentlichen sterisch, zusätzlich elektrostatisch und tribologisch

Bei den Versuchen von Hüsken [47] wurde der Wassergehalt konstant gehalten, trotz Zugabe der Superplastifizierer. Hierbei könnte es versäumt worden sein, den Wassergehalt des Zusatzmittels in Anrechnung zu bringen. Auch ist naheliegend, dass bei verringertem Wassergehalt, wie in Abbildung 20 zu sehen ist, ebenfalls eine Erhöhung der Gründruckfestigkeit zu erwarten ist. Wenn der Wassergehalt bei der Zugabe von Fließmittel reduziert wird um mehr als den Wasseranteil des Fließmittels, dann werden die unbeweglichen Wasserfilme um die Partikel kleiner, dadurch steigt die Zahl der unmittelbaren Partikelkontaktpunkte an und eine Erhöhung der Gründruckfestigkeit wie von Bornemann festgestellt erscheint wahrscheinlicher als eine Verringerung durch eine Beeinflussung der Oberflächenspannung. Ansonsten zeigt Abbildung 31, dass die Unterschiede zwischen Flugasche und Quarzmehl auch bei Zugaben von Superplastifizierer wie in den vorherigen Abbildungen dargestellt, weiterhin bestehen bleiben.

2.3.3 Grundlagen der Gründruckfestigkeit

Entgegen der dargestellten Unterscheidung in drei Mechanismen (echte Kohäsion, Kapillarkohäsion, Strukturwiderstand), beschränkte sich Wierig [20] in den theoretischen Untersuchungen darauf, die kapillare Kohäsion für das Entstehen der Gründruckfestigkeit anzusetzen sowie den Reibungswinkel als Einflussfaktor für den Strukturwiderstand.

Die kapillare Kohäsion entsteht durch das Zwickelwasser an der Berührungsstelle zweier benetzter Körper (siehe Abbildung 32).

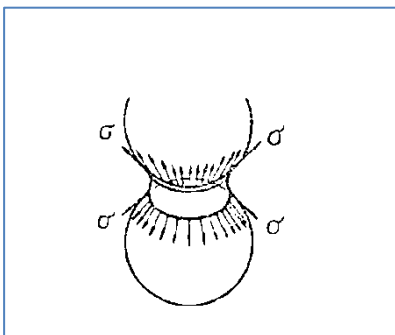


Abbildung 32: Spannungen in der Oberfläche des Zwickelwassers [20]

Voraussetzung für das Wirken der Oberflächenspannung ist das Vorhandensein von Luft an den Grenzflächen der Flüssigkeitsbrücke, d.h. ein Dreiphasensystem. Ein gesättigtes Zement-Wasser-Gemisch ist lediglich ein Zweiphasensystem, es bestehen darin keine isolierten Flüssigkeitsbrücken und es fehlen die für das Wirken der Oberflächenspannung

notwendigen Grenzflächen Wasser-Luft. Die im Zwickelwasser vorhandene Zugspannung überträgt sich auf die benachbarten Flächen und drückt sie, wie in Abbildung 33 dargestellt, gegeneinander.

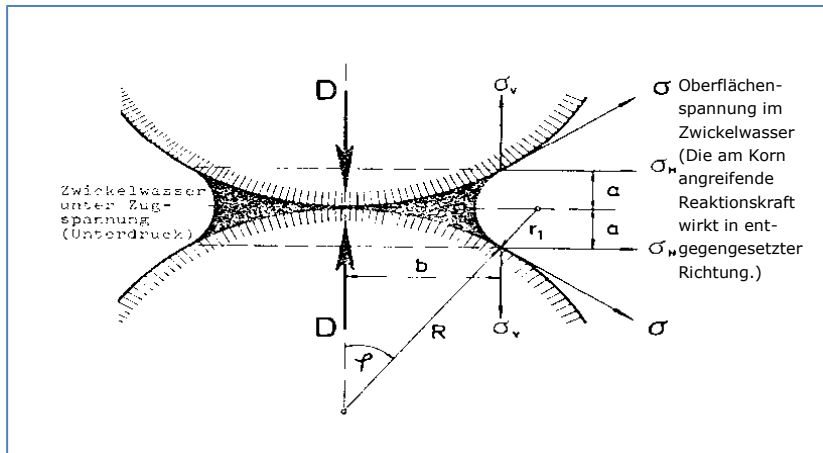


Abbildung 33: Druckkräfte zwischen zwei benetzten Kugeln [122]

Dabei reduziert sich die Höhe der Zugspannung mit zunehmender Größe des Zwickels, z.B. durch Hinzufügen von Wasser. Über eine Erweiterung der Modellvorstellung für beliebig gekrümmte Flächen, wie sie an Gesteinskörnern vorliegen, wird die Zugfestigkeit eines Dreiphasensystems theoretisch abgeschätzt. Aus dieser Modellvorstellung ergibt sich, dass die Haftung zwischen zwei Zementkörnern kleiner ist als die zwischen einem Zement- und einem Gesteinskorn. Dem Zementleim fällt dadurch der Charakter des schwächsten Gliedes zu. Daher erfolgte der rechnerische Nachweis der Zugfestigkeit bei Wierig [20] für den Zementleim (siehe Kap. 2.4.3), ebenso wie die Herleitung der theoretischen Druckfestigkeit aus der errechneten Zugfestigkeit des Zementleimes mit Hilfe des Mohr'schen Spannungskreises.

Die Berechnung der Zugfestigkeit erfolgte unter den Annahmen, dass Zementkörner als Kugeln mit einem mittleren Durchmesser betrachtet werden, die in der lockersten Lagerung gepackt sind.

Für kleine Benetzungswinkel φ wird der Verlauf des Meniskus in der Schnittebene als Kreisbogen angenommen. Die Druckkraft zwischen zwei Partikeln ist dann

$$D = 2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot R$$

Formel 1

Die mittlere Oberflächenspannung σ des Wassers bei 20 °C liegt bei $72,75 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$.

Für die theoretische Grünzugfestigkeit bei lockerster Lagerung bestimmt Wierig

$$\beta_z = \frac{\pi \cdot \sigma}{d}$$

Formel 2

d = mittlere Korndurchmesser des Zementes

Bei einem mittleren Partikeldurchmesser von 22 μm liegt die Zugfestigkeit bei 1,04 N/cm^2 . In den wenigen durchgeführten Zugversuchen wurden ca. 0,5 N/cm^2 erreicht, was als befriedigende Übereinstimmung interpretiert wurde.

Anhand der rechnerischen Grünzugfestigkeit wurde die Gründruckfestigkeit mit Hilfe des Mohrschen Spannungskreises berechnet. Der für die Druckfestigkeit erforderliche Rei-

bungswinkel ρ wurde berechnet aus dem Gleitwinkel α , unter dem die Probekörper im Druckversuch abscheren zu

$$\rho = (90^\circ - 2 \cdot \alpha)$$

Formel 3

Dabei lagen die Gleitwinkel der Probekörper im Mittel bei $\alpha = 27^\circ$. Die ermittelten Gleitwinkel streuten sehr stark und erwiesen sich ebenfalls als abhängig von der Verdichtung und dem Wassergehalt.

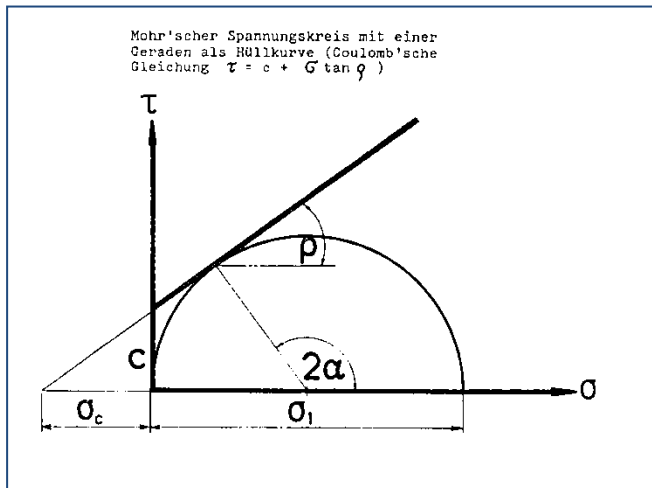


Abbildung 34: vereinfachte Darstellung des Spannungskreises nach Mohr [20]
($\sigma_1 = \beta_{Dr}$ = Druckspannung, $\sigma_c = \beta_z$ = Zugspannung)

Die Gründruckfestigkeit β_{Dr} wurde unter der Annahme der Darstellung in Abbildung 34 wie folgt berechnet:

$$\beta_{Dr} = \frac{2 \cdot \beta_z \cdot \sin \rho}{1 - \sin \rho}$$

Formel 4

Dabei errechnete Wierig eine Gründruckfestigkeit von 4 N/cm^2 . Die gemessenen Gründruckfestigkeiten lagen bei etwa 11 N/cm^2 . Wierig schlägt daher vor, sich am Mohrschen Spannungskreis mit gekrümmten Hüllkurven zu orientieren, da aus der Bodenmechanik bekannt ist, dass für feuchte Böden die Einhüllenden keine Geraden, sondern zur x-Achse konkav gekrümmte Kurven sind, siehe Abbildung 35.

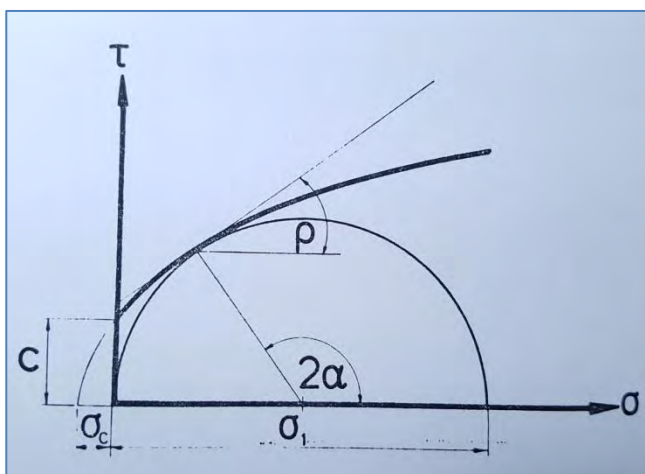


Abbildung 35: Mohrscher Spannungskreis mit Parabel als gekrümmter Hüllkurve [20]
für feuchte Böden

Dies führt zu einem größeren Verhältnis von Druck- zu Zugfestigkeit von ca. 11, so dass er eine genaue Übereinstimmung feststellt.

Der Einfluss der Verdichtung auf die Gründruckfestigkeit wird erklärt, indem auf eine Zunahme der Berührungsstellen der Feststoffe und damit auch eine Erhöhung der Zahl der Menisken mit dichter werdender Lagerung verwiesen wird.

Bei dem mittleren Durchmesser der Zementpartikel und der daraus resultierenden Anzahl pro Flächeneinheit wurde der Wasserfilm um die Zementpartikel nicht mit berücksichtigt. Jedoch führen die Wasserfilme dazu, dass sich der anzusetzende Durchmesser je Partikel vergrößert und sich die Packungsdichte, d.h. die Nähe der einzelnen Körner zueinander verringert.

Bornemann [22] kommt zu einer von Wierig [20] komplett gegenteiligen Schlussfolgerung. Danach geht von der Kapillarität gar kein Einfluss bzw. lediglich ein ganz geringer Einfluss aus. Dies begründet er mit dem Ergebnis von Rücktrocknungsversuchen, die an Kalksteinmehl vorgenommen wurden, siehe Abbildung 36. Bei vollständiger Rücktrocknung war die Gründruckfestigkeit bei allen vier überprüften Zusammensetzungen am höchsten. Daher schließt er die Haftkräfte bedingt durch Kapillarität als Einfluss aus, weil sowohl im trockenen wie auch im gesättigten Zustand keine Kapillarkräfte wirken können. Der Reibungswinkel und die innere Verzahnung spielen nach seiner Einschätzung die wesentliche Rolle bei der Gründruckfestigkeit.

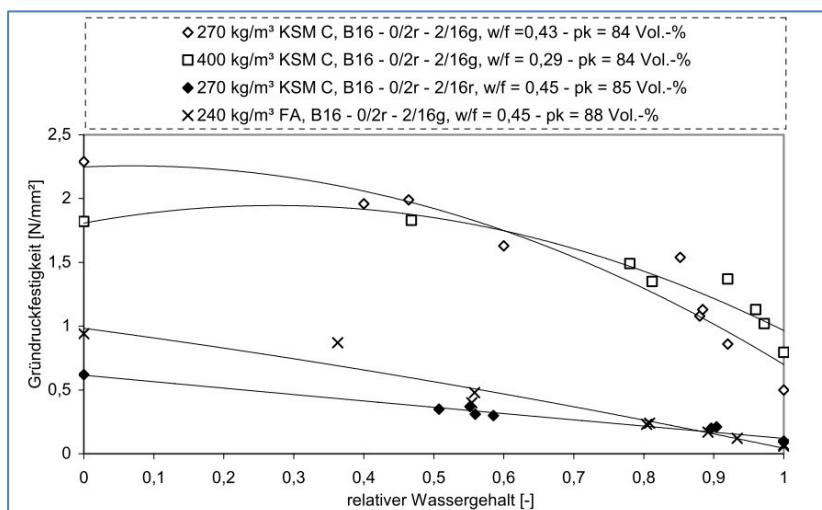


Abbildung 36: Rücktrocknungskurven von Mischungen ohne Zement mit unterschiedlichen Gehalten an Kalksteinmehl und einer Mischung mit Flugasche als Vergleich [22]

Die Berechnung der Gründruckfestigkeit erfolgte bei Bornemann nicht über eine theoretische Herleitung der Zugfestigkeit wie bei Wierig. Die Ermittlung der Kohäsion und des Reibungswinkels erfolgte anhand von Rahmenscherversuchen. Dabei wurden keine erdfeuchten Betone untersucht, sondern lediglich Gemische aus Feinquarz, Sand und Kies bis 8 mm um die Bildung von Hydratationsprodukten während des relativ aufwändigen Rahmenscherversuches zu vermeiden.

Die Tragfähigkeitsberechnung erfolgte als freistehender Bodenkörper ohne seitliche Abstützung nach Rankine, wobei die horizontale Spannung durch die Kohäsionsspannung ersetzt wurde. Dabei ergab sich die Gründruckfestigkeit zu

$$\sigma_1 = \frac{2c}{\tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)}$$

Formel 5

mit c = Kohäsion und φ = Reibungswinkel [°], beides aus Rahmenscherversuchen.

Jedoch lagen die errechneten Gründruckfestigkeiten erheblich unter den gemessenen, was dadurch erklärt wurde, dass die o.a. Formel nur für sehr schlanke Probekörper gelte.

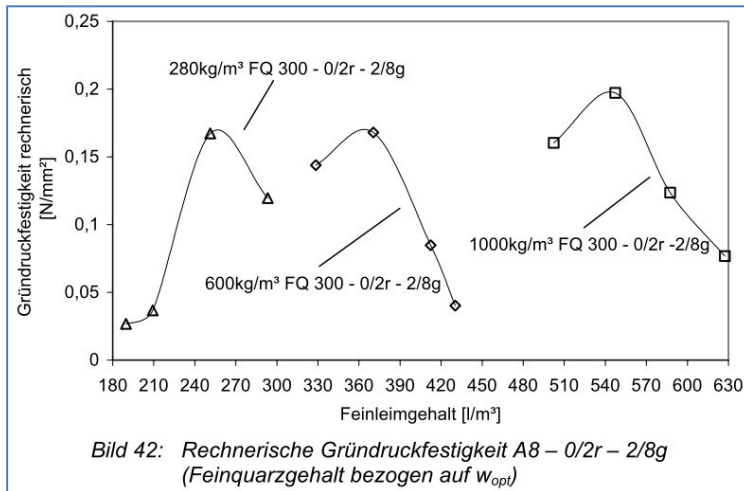


Abbildung 37: von Bornemann ermittelte, rechnerische Gründruckfestigkeit einer Rezeptur ohne Zement mit unterschiedlichen Gehalten an Quarzmehl und Wasser –ausgedrückt über den Leimgehalt [22]

Die Werte in Abbildung 37 sind zu vergleichen mit den in Abbildung 26 enthaltenen Versuchsergebnissen, die an erdfeuchten Betonen mit Zement ermittelt wurden.

Bei Analyse der Rahmenbedingungen, mit denen die rechnerischen Ausgangsgrößen Kohäsion und Reibungswinkel ermittelt wurden, insbesondere ohne Einsatz von Zement, fällt auf, dass die Gründruckfestigkeiten in Abbildung 26 deutlich größer sind.

Eine mögliche Erklärung liegt darin, dass die Haftkräfte zwischen den Zementpartikeln deutlich größer sein können als zwischen Quarzpartikeln, mit denen die Kohäsion und der Reibungswinkel im Rahmenscherversuch ermittelt wurde.

Dadurch ist die Kohäsion höher und auch der Reibungswinkel, so dass höhere gemessene Festigkeiten als die errechneten die Folge sind.

Insgesamt steht bei Bornemann der Reibungswinkel, der die Verzahnung der Partikel untereinander ausdrückt, an erster Stelle als Erklärung für die Gründruckfestigkeit. Bereits geringe Schwankungen des Reibungswinkels durch z.B. Zugabe runder Partikel oder höheren Leimgehalten führen zu großen Unterschieden bei der Gründruckfestigkeit. Die Kapillarkohäsion ist aus seiner Sicht vernachlässigbar, die Auswirkungen echter Kohäsion hält er für möglich, jedoch findet sie in seinen Berechnungen keinen Eingang. Er weist darauf hin, dass erdfeuchte Betone im Allgemeinen einen hohen inneren Reibungswinkel und hohe Kohäsionskräfte aufweisen. Bei nur geringen Veränderungen sinkt die Tragfähigkeit stark ab. Für solche Systeme seien Rahmenscherversuche zu ungenau, um diese geringen Abweichungen messtechnisch erfassen zu können [22].

2.3.4 Zusammenfassung und Bewertung

Die Untersuchungen von Wierig, Bornemann und Hüskens zeigten, dass nahezu alle Faktoren wie Wasser, Zement, Gesteinskörnung und Rüttelenergie Auswirkungen auf die Gründruckfestigkeit haben.

Da diese, wie in Kap. 2.3.2 beschrieben, aus echter und kapillarer Kohäsion sowie dem Strukturwiderstand besteht, muss jede Veränderung bei der Zusammensetzung oder Verdichtung des Betons auch einen Effekt auf einen oder mehrere der Gründruckkomponenten sowie deren Gewichtung ausüben.

Die Erkenntnisse von Bornemann, deren zu Folge Kapillarität keinen Einfluss auf die Gründruckfestigkeit hat, sind kontrovers zu betrachten. Auch seine Begründung darüber, dass die Viskosität der Zementleime keinen kohäsiven Einfluss ausüben kann, da die gemessene Viskosität zu gering sei. Wenn kohäsive Effekte vorhanden sind, dann müssen sie zwangsläufig aus der Interaktion der Zementpartikel mit ihrer Umgebung, d.h. sich selber oder anderen Partikeln kommen, da die Zementpartikel die kleinsten Bestandteile sind und Kohäsion erst bei geringen Korngrößen wirksam werden kann. Auch weist Bornemann an anderer Stelle darauf hin, dass erdfeuchte Betone hohe innere Reibungswinkel und hohe Kohäsionskräfte aufweisen, was im Widerspruch zu seiner Aussage steht, dass geringe Viskosität ein Beleg für fehlende Kohäsion sei. In der bodenmechanischen Literatur ist beschrieben, dass bei vollkommener Sättigung wie auch bei vollständiger Austrocknung keine Kapillarkräfte vorhanden sind [51]. Hinzu kommt, dass die eingesetzten Materialien ein Wasseraufnahmevermögen besitzen, siehe Tabelle 4 für Quarzmehl.

Tabelle 4: Durchschnittliches Wasseraufnahmevermögen von Böden und künstlichen Gemischen in M.-% [58]

Bodenart	w_{\max} [%]
Quarzmehl	30
Tone	60-150
Kaolin	70-100
Ca-belegter Bentonit	300
Na-belegter Bentonit	700
Humus	500

Daher wird auch Kalksteinmehl, das in seiner Struktur aufgrund der ursprünglichen, sedimentären Entstehungsgeschichte des Kalksteines im Allgemeinen poröser und weniger dicht ist als Quarz, eine Feuchte aufnehmen können, die sich womöglich im Zuge einer Rücktrocknung nicht vollständig austreiben lässt. Auch bei Flugasche handelt es sich nicht um einen Stoff, der durchgehend homogen ist und bei dem auch nicht alle Partikeloberflächen glasig überzogen sind. Auch dabei existieren ungünstig geformte Partikel wie Hohlkugeln und Bereiche, bei denen Partikel keine glasig gesinterte Oberfläche besitzen, folglich auch Wasser aufnehmen können. Der Glasgehalt liegt nach Splittgerber [54] bei ca. 60 -80 M.-%.

Ein verfahrenstechnisches Beispiel für die Wirkung kapillarer Haftkräfte ist die Anfeuchtung von Flugasche bei einem Hersteller in Werne [55], der so die Staubemission beim Einlagern im Winter drastisch reduziert. Wenn die Flugasche sich nicht anfeuchten lassen würde, d.h. an den Oberflächen kein Wasser adsorptiv gebunden werden könnte, wäre diese Verfahrenstechnik nicht durchführbar. Auch ist es ein Beleg dafür, dass die Kräfte

zwischen den Partikeln nicht dann am größten sind, wenn keine Feuchtigkeit mehr vorhanden ist. Ansonsten würde Flugasche im trockenen Zustand weniger stauben als im feuchten und die Vorgänge der Anfeuchtung und späteren, energieintensiven Rücktrocknung wären unnötig. Im Zuge der großtechnischen Rücktrocknungsanlage werden die groben Bestandteile der Flugasche in einer Hammermühle gebrochen. Dabei geht es nicht darum, eine insgesamt feinere Flugasche herzustellen, sondern die Agglomerate, die durch das Befeuchten und Rücktrocknen entstanden sind, zu zerkleinern [56].

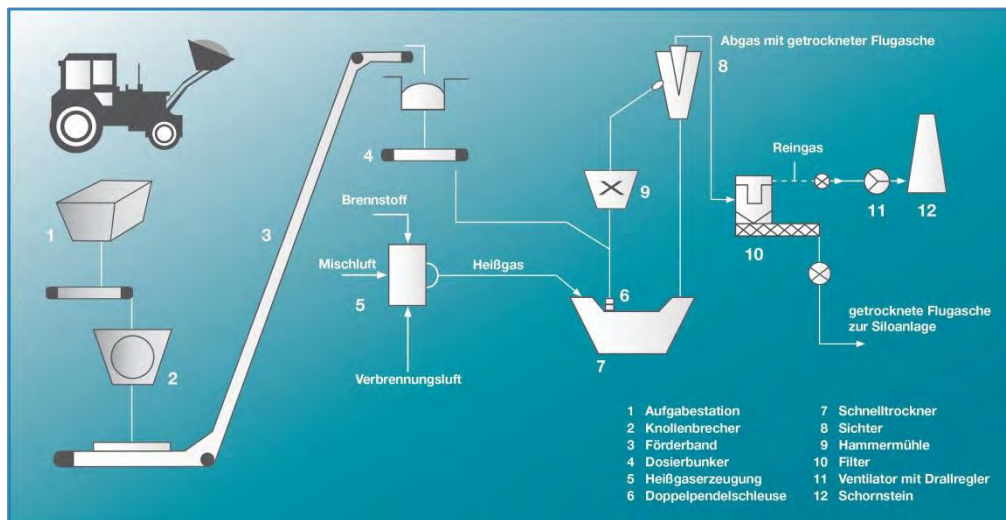


Abbildung 38: Verfahrensschema zur Trocknung von angefeuchteter Flugasche, Nr. 9: Hammermühle [56]

Ebenso könnten bedingt durch die hohen Saugspannungen weiterhin punktförmige kapillare Bindungen in den Kontaktpunkten verbleiben. Auch wird es im Zuge der Trocknung dazu kommen, dass die Partikel durch die kleiner werdenden Menisken aneinander gepresst werden und sich Oberflächenunebenheiten verformen, wodurch sich die Effekte der echten Kohäsion, die auf Van-der-Waal-Kräfte usw. beruhen, weiter verstärken.

Eine weitere mögliche Ursache für die hohen Haftkräfte in ausgetrocknetem Zustand kann in der Belegung der Flugaschepartikel mit Kalkrückständen aus der trockenen Rauchgasreinigung liegen [57]. Dabei wird Kalkhydrat als Sorptionsmittel eingesetzt, um aus dem Abgasstrom insbesondere Schwefeldioxid durch die chemische Bindung mit Kalk zu entfernen. Dabei liegt das stöchiometrische Verhältnis, das das Verhältnis zu noch reaktivem Kalk in der Filterasche zu der Gesamtmenge des eingedüsten Kalks beschreibt, bei zwei bis drei. Das bedeutet, dass weniger als die Hälfte des eingesetzten Kalks in der Zeit zwischen Eindüsung und Herausfiltern reagieren kann. Der Rest bleibt an den Aschepartikeln haften.

Wenn sich an dem überprüften Leim aus Flugasche und Wasser durch Rücktrocknung Restbestandteile der Kalkrückstände in den Kontaktpunkten der Flugaschepartikel sammeln, könnten dadurch Verfestigungseffekte auftreten.

Wenn die Erkenntnis richtig ist, dass die Gründruckfestigkeit im trockenen Zustand größer ist als im feuchten, dann könnten ebenso trockene Gemische der verwendeten Stoffe eingebaut werden, die dann eine ebenso große Gründruckfestigkeit erzielen würden.

Da die Klärung dieser Fragestellung von großem Interesse ist, werden im Versuchsprogramm auch Zugversuche mit trockenen, verdichteten Feinstoffen durchgeführt werden.



**Abbildung 39: Druckfestigkeit von feuchtem Quarzsand und Wasser (jeweils 100g Quarzsand und 20ml Wasser, links)
Mitte: Wasser und Quarzsand in Zementfeinheit gemahlen als plastische Masse, rechts: Wasser und Quarzsand mit 20.000 cm²/g Oberfläche als fester Körper [72]**

In Abbildung 39 rechts ist erkennbar, dass fein aufgemahlener Quarzsand, der eine extrem hohe Oberfläche hat, unter Zugabe von Wasser eine erhebliche Festigkeit ausbildet. Dabei ist der auf die Partikeloberfläche bezogene Wassergehalt im Bild rechts ca. fünfmal niedriger im Vergleich zur plastischen Masse in Bildmitte. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass bei einer absoluten Verringerung der Wasserzugabe bzw. ganz ohne Wasserzugabe noch höhere Festigkeiten des trockenen Quarzsandes erreicht werden können. Dieser Fall würde bedeuten, dass eine erhebliche echte Kohäsion vorliegen würde, was nach Bornemann jedoch auch nicht als wesentliche Ursache der Gründruckfestigkeit angesehen wird. Eher ist davon auszugehen, dass der überwiegende Wasseranteil adsorptiv an die Partikel gebunden ist. In diesen adsorptiven Bereichen, die im Wesentlichen durch die innere Oberfläche bestimmt werden, herrschen Spannungen von etwa 5.000 N/cm² vor [58]. Dadurch haften die Partikel mit einem hohen Druck aneinander.

Zum Vergleich dieser Spannung dient in der Bodenkunde der permanente Welkepunkt. Der permanente Welkepunkt ist der Punkt, an dem die Saugspannungen einer Pflanze nicht mehr ausreichen, um Wasser in ihre Kapillarsysteme einzusaugen aus dem Boden. Das Wasser ist durch Adhäsionskräfte so stark gebunden, dass Pflanzen es nicht mehr daraus lösen können. Es dringt Luft in die Kanäle der Pflanze ein und sie wird welk. Dieser Punkt liegt bereits bei einer relativ niedrigen Saugspannung von 150 N/cm².

Wenn durch Rücktrocknung eines feuchten Partikelgemisches mit zunehmendem Trocknungsgrad höhere Kräfte gemessen werden, dann handelt es sich um Verfestigungen, die aufgrund von Deformationen der Partikel und durch ein Aneinandersaugen durch die starken kapillaren Unterdrücke während der Trocknungsphase entstehen. Ein ähnlicher Effekt ist in dem Lufttrocknen von Lehmen oder Tonen vorzufinden, wodurch sogar Trockenziegel entstehen, die in manchen Gegenden zum Hausbau verwendet werden.

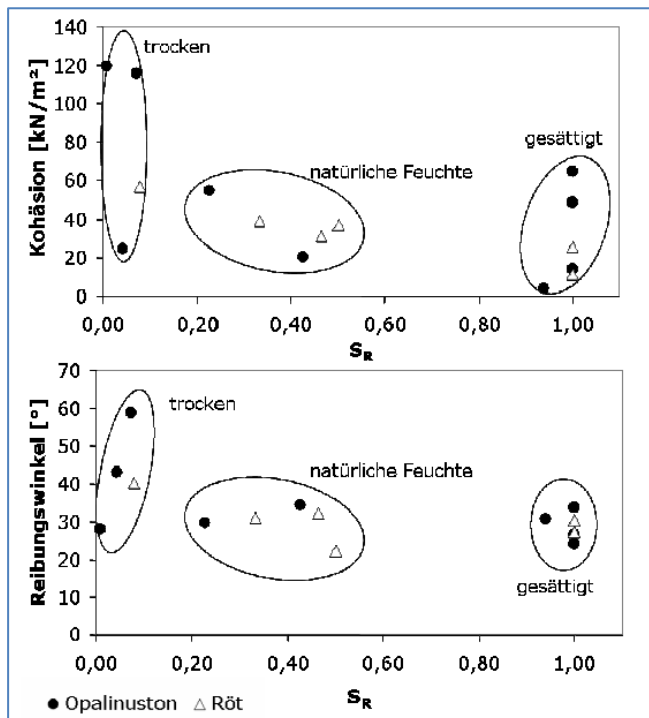


Abbildung 40: Zusammenhang zwischen Sättigungsgrad S_R , Reibungswinkel und Kohäsion am Beispiel von Tonsteinen nach Bösch [58]

Am Beispiel von Tonsteinen zeigt sich, dass sowohl der Reibungswinkel als auch die Kohäsion unabhängig vom Verwitterungsgrad durch einen höheren Sättigungsgrad reduziert werden [58] (Abbildung 40). Eine Veränderung des Wassergehaltes wirkt sich auf die Festigkeit der Tonsteinaggregate aus, da die Qualität des Zusammenhalts der feinkörnigen Partikel beeinflusst wird. Die Änderung der Festigkeitsparameter Reibungswinkel und Kohäsion ist im Bereich niedriger Sättigungsgrade, das heißt hoher Saugspannungen, wesentlich deutlicher als auf höherem Sättigungsniveau. Je geringer der Sättigungsgrad im Scherversuch, umso höher sind Reibungswinkel und Kohäsion [58]. Auch bei kompletter Austrocknung, d.h. 0% Sättigung, liegen die Werte zum Teil über denen höherer Sättigungsgrade.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass sich die oben beschriebenen Ergebnisse der durchgeführten, grundlegenden Versuche zum grünen Beton [20] lediglich für eine qualitative Abschätzung der wesentlichen Beziehungen und Einflußfaktoren auf die Gründruckfestigkeit eignen, da bei den Untersuchungen nicht alle wesentlichen Größen konstant gehalten wurden.

So wurde Zement aus unterschiedlichen Lieferungen verwendet und es traten, bedingt durch die unterschiedlichen Grade der Verdichtung, z.T. erhebliche Abweichungen zwischen den Soll- und Istzusammensetzungen der Betone auf.

Die in Kap. 2.3.3 beschriebene theoretische Herleitung geht von stark vereinfachten Annahmen aus. So wird ein Bezug von der theoretischen Zugkraft des Zwickelwassers, welche die Grundlage für die kapillare Kohäsion ist, mit dem mittleren Korndurchmesser des verwendeten Zementes hergestellt. Gegen dieses Vorgehen spricht, dass der Zement aufgrund seiner Korngröße auch für das Auftreten echter Kohäsion verantwortlich ist.

Für die Berechnung der Haftkräfte werden gleichgroße Partikel angenommen, deren Durchmesser aus dem Blainewert des Zementes als mittlerer Durchmesser berechnet wird. Außerdem berücksichtigt der rechnerische Ansatz von Wierig lediglich Haftkräfte

aufgrund der Wasserbrücken zwischen den Partikeln. Haftkräfte, die zur echten Kohäsion zählen wie van-der-Waals-Kräfte, wurden nicht berücksichtigt.

Die Grünzugfestigkeit wurde bei Wierig nur am Rande in insgesamt drei Versuchen betrachtet. Gründe lagen in dem damals recht aufwändigen Versuchsaufbau sowie darin, dass der Grünzugfestigkeit keine weitere Bedeutung beigemessen wurde.

Einflüsse des Verformungsverhaltens auf die Höhe der Gründruckfestigkeit blieben bei der Optimierung von Bornemann, die sich sehr stark auf die Packungsdichte und den Wasser-Feinstoffwert fokussierte, außer Betracht. Jedoch hatte, wie Abbildung 15 zeigte, bereits Wierig festgestellt, dass deutliche Unterschiede im Verformungsverhalten, d.h. der Stauchung bestehen, bevor die maximale Gründruckfestigkeit erreicht wird.

Beide Verfahren der Probenvorbereitung, das Rüttelproctorverfahren bei Bornemann und der IC-Test bei Hüskens haben als Nachteil eine relativ lange Zeit bis zum Ende der Verdichtung. So benötigt der Rüttelproctor bis zu 15 Minuten, bevor eine Probe soweit verdichtet ist, dass keine weitere Zunahme mehr erfolgt, im Falle des IC-Tests sind es 2,5 Minuten. Diese Verdichtungszeiten liegen deutlich über den sehr kurzen Verdichtungs- und Verarbeitungszeiten von nur wenigen Sekunden bei kleinformatischen Betonteilen. Vor allem werden sich innerhalb von 15 Minuten bereits deutlich mehr Hydratationsprodukte bilden als es bei 2,5 Minuten oder gar nur wenigen Sekunden der Fall ist. Diese wiederum werden sich auf die Haftkräfte und den Reibungs- und Verdrehungswiderstand auswirken. Auch wird von Hüskens die höhere Auflast des IC-Tests als positiv bewertet, da sie zu höheren Packungsdichten führt. Die Verdichtungszeiten bei Wierig variierten zwischen 30 Sekunden und 5 Minuten und wurden entsprechend gut rückverfolgbar angegeben.

Insgesamt zeigen die bisherigen Arbeiten auf dem Gebiet der erdfeuchten Betone, dass unterschiedliche Auffassungen über die maßgebenden kraftübertragenden Mechanismen bestehen. Das Kraft-Verformungsverhalten wurde nur am Rande und als Druckspannungs-Stauchungs-Verhalten untersucht. Grundlegende Erkenntnisse über die Wirkungsweise der Kraftübertragung zwischen Partikeln und ihre Auswirkungen auf die Grünzugfestigkeit und auf das Verformungsverhalten liegen bislang nicht vor.

2.4 Kraftübertragung zwischen Partikeln

Die Frage nach den Kräften, die zwischen Feststoffpartikeln wirken, wird in sehr verschiedenen Disziplinen behandelt, wie z.B. der Bodenmechanik, der Schüttgutmechanik und der Partikeltechnologie bis hin zur Pharmazie bei Vorgängen der Pelletierung und Tablettierung, der Offset-Drucktechnik ebenso in der Lebensmittelchemie beim Granulieren von z.B. Milchpulver, Kakao oder Kaffee, sowie in der Mikromechanik bei beweglichen Komponenten wie z.B. Beschleunigungssensoren. Die Mikrosystemtechnik und -mechanik ist eine Erweiterung der Mikroelektronik um mechanische Sensor- und Aktorfunktionen, deren Genauigkeit durch Mikropartikel, Adsorbate und Oberflächenladungen beeinflusst wird [59].

Dabei beschäftigen sich die meisten Fragestellungen, damit, wie für die jeweiligen Anwendungen aus der Verfahrenstechnik, z.B. vom Pressen von Kohlenstaub zu Eierkohlen, dem Instantisieren von Saucen für Lebensmittel oder der Beweglichkeit von Filterstäuben von Großfeuerungsanlagen, die Partikel aneinander haften, d.h. mit der Haftkraft und ihrer Resultierenden, der Zugkraft, und wie diese Effekte entweder verstärkt oder verhindert werden können, d.h. gesteuert und vorhergesagt. Fragestellungen der Druckfestigkeit zwischen den Partikeln und ihren durch Herstellverfahren verfestigten, daraus herge-

stellten Produkten, sind in diesen Bereichen so gut wie nicht zu finden und nicht von Interesse.

Im Vergleich zur Schüttgutmechanik und Partikeltechnologie sind die theoretischen Ansätze aus der Bodenmechanik, die dem Bauingenieurwesen am Nächsten liegt, eher makroskopisch skaliert und setzen die Schwerpunkte auf physikalische Vorgänge der Reibung, Vorbelastung von Böden und der Kohäsion an vorwiegend quellfähigen, bindigen Bodenbestandteilen wie Ton.

Allen Ansätzen ist gemeinsam, dass sie Annahmen treffen, unter denen das Haften, d.h. die Adhäsion, einzelner Partikel aneinander theoretisch beschrieben werden kann.

Weder in der Natur oder in der Industrie finden Vorgänge statt, bei denen Partikel entstehen, die so beschaffen sind wie in Abbildung 41. Die Kanonenkugeln in Monaco und die Bälle im „Bällchenbad“ eines Möbelhauses sind alle exakt gleich groß (monodispers), ideal rund und mit glatter Oberfläche ohne Rauigkeiten. Im Falle des Bällchenbades sind sie außerdem meistens trocken.



Abbildung 41: Kanonenkugeln gleicher Größe in dichtester möglicher Packung, an den Kontaktpunkten verschweißt, Palastvorplatz Monaco; Bällebad mit ungeordneter Zufallspackung

Wie in 2.3.3 beschrieben, wurden in den wenigen, bisherigen Arbeiten über erdfeuchte Betone, die auch eine theoretische Annäherung an die Grünzug- oder Gründruckfestigkeit enthielten und nicht nur experimenteller Natur waren, sehr starke Vereinfachungen vorgenommen. Wierig setzte voraus, dass alle Zementpartikel monodispers kugelig mit glatter Oberfläche und symmetrisch ausgebildeten Flüssigkeitsmenisken ausgestattet sind und lediglich Kapillarkräfte wirken sowie die Reibung und Verzahnung der Partikel untereinander.

Ähnlich wie bereits bei Wierig werden bei allen Untersuchungen von Haftkräften vereinfachende Annahmen getroffen und folgende Punkte mehr oder weniger präzise beschrieben, um Modelle für die Kraftübertragung zu entwickeln:

- Liegen Partikel in ihrer Größe verteilt vor, d.h. haben sie eine Sieblinie, oder sind sie monodispers
- Sind die Partikel rund oder kubisch oder beliebig geformt
- Sind die Oberflächen der Partikel glatt oder sind auf ihnen Rauigkeitserhebungen zu finden
- Ist das Wasser an den Partikeloberflächen überall gleich verteilt oder konzentriert an den Kontaktpunkten
- Sind die Partikeloberflächen starr oder verformbar
- Welche Arten von Kräften werden an den Kontaktpunkten der Partikel übertragen
- Welche Positionen nehmen Partikel zueinander ein, d.h. welche Packungsdichten und Modelle für die räumliche Packung werden zugrunde gelegt

Um ein vollständigeres Bild über die Vorgänge zu erhalten, die in erdfeuchten Zementleimgemischen dazu führen, dass Grünzugfestigkeit entsteht, werden zunächst die vorhandenen und bekannten Zustände in erdfeuchten Leimgemischen dargestellt.

Danach werden die Mechanismen der unterschiedlichen möglichen Haftkräfte vorgestellt und sowie Rechenansätze zur theoretischen Ermittlung der Zugfestigkeit zur Festigkeit von Partikelsystemen beschrieben. Diese wurden an nicht zementbasierten Partikelsystemen getroffen und stammen aus den Bereichen der Agglomerationstechnik, da die Betrachtungsebene über die Vorgänge an Zementpartikeln im Bereich der Zementchemie und Betontechnologie bislang überwiegend an Leimsuspensionen, d.h. in gesättigten Bereichen und nicht in Packungen oder Haufwerken stattgefunden haben.

Das Agglomerieren stellt nach [97] die Umkehrung des Zerteilens dar. Feine, einzelne Teilchen werden durch das Wirksamwerden von Bindekräften zwischen den Partikeln aneinander gelagert und gröbere Teilstücke erzeugt, die Agglomerate genannt werden.

Die ebenfalls als Agglomeration bezeichnete Anhäufung feiner Teilchen in Suspensionen zu Flocken wird an dieser Stelle nicht betrachtet, da dieser Vorgang für das Verständnis von Feststoffagglomeraten mit Festigkeiten gegenüber äußeren, mechanischen Beanspruchungen ohne Bedeutung ist.

Als Verfahrenstechniken, die Agglomerate erzeugen, also das Wirksamwerden von Bindekräften begünstigen, kommen die Aufbauagglomeration durch Abrollen der Partikelschüttung oder durch Mischbewegungen, die Pressagglomeration durch Aufgabe von erhöhtem Druck auf die Partikel und das Sintern in Betracht. Bei der Mischung und der Verdichtung erdfeuchter Betone finden also Aufbauagglomerationen und Pressagglomerationen statt.

2.4.1 Zustandsbeschreibung erdfeuchter Leimgemische

Bereits der Begriff "erdfeuchter Beton" beinhaltet den Hinweis auf eine durch Augenschein zu erkennende Ähnlichkeit des Betons mit erdigen Bodengemischen. Im Gegensatz zu Betonen üblicher Konsistenzbereiche, die man in etwa mit einem breiigen, feucht glänzendem Aussehen beschreiben kann, wirkt erdfeuchter Beton klumpig bis rollig und matt ohne erkennbare Feuchtigkeit. Abbildung 42 zeigt einen erdfeuchten Beton, der aus dem Mischer in einen Eimer geschaufelt und anschließend ausgekippt wurde. Im linken

Bildteil sind in der Mitte noch die Bereiche zu erkennen, die sich im unteren Eimerteil so aneinander geheftet haben, dass Reste des Eimerbodens als Kontur der Form noch zu erkennen sind. Im linken Bildteil als Vergrößerung des weißen Quadrates wird deutlich, dass sehr wenig Wasser in der Mischung vorhanden ist. Auch auf den sehr glatten Flächen der groben Kieskörner haften erdfeuchte Agglomerate aus Sand und Zement.



Abbildung 42: Erdfeuchter Beton für die Rohrproduktion mit 16 mm Größtkorn Kies, w/z-Wert 0,38; rechter Teil: vergrößerter Bereich des weißen Quadrates

Im rechten Teil sind Partikel bis ca. 0,5 mm zu erkennen, die darunter liegenden Partikelgrößen des Sandes und des Zementes als hauptsächliche Komponente in dieser Größenordnung sind in der Darstellung nicht mehr zu unterscheiden.

Auch die granulometrische Zusammensetzung eines erdfeuchten Betons läßt eine Vergleichbarkeit mit Gemischen aus dem Bereich des Erd- und Grundbaus erkennen.

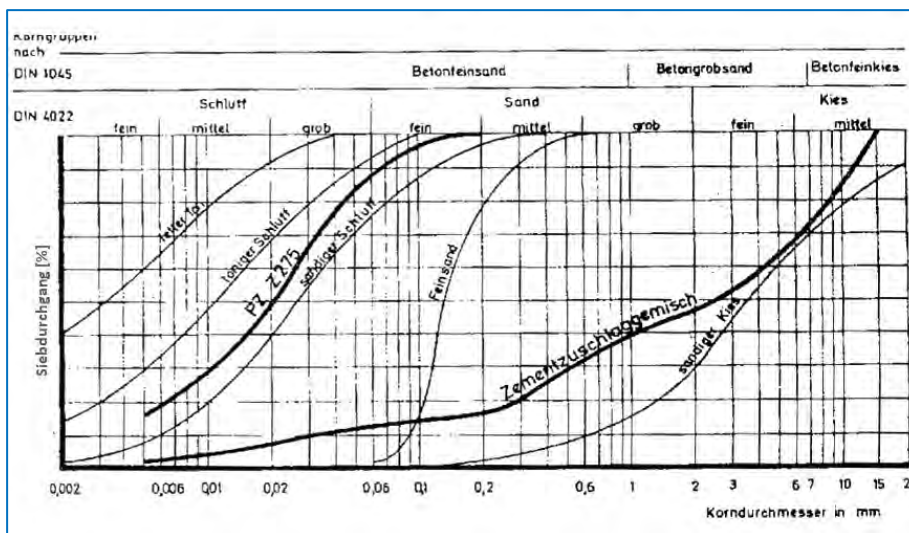


Abbildung 43: Kornverteilungskurve eines Zement-Gesteinskörnungsgemisches von Wierig im Vergleich zu den Sieblinien einiger typischer Böden [20]

Wie in Abbildung 43 zu erkennen ist, liegt die Gesamtsieblinie eines Zement-Gesteinskörnungsgemisches verteilt zwischen den Korngruppenbereichen eines sandigen Schluffes über Feinsand bis hin zu sandigem Kies [20], was bereits auch in Abbildung 12 dargestellt ist. Ein so breites Spektrum wird von einem einzigen gängigen Bodenmaterial in der Regel nicht eingenommen, so dass für das Verhalten erdfeuchter Betone eine Kombination der Eigenschaften der tangierten Bodenbereiche erwartet werden

kann. Diese beziehen sich auf das kohäsive Verhalten bindiger, toniger Böden und auf die Kapillarkohäsion wie sie an Sanden bis ca. 4 mm beobachtet werden kann. Bei Wassersättigung und Austrocknung geht die Kapillarkohäsion dieser Böden verloren [60].

Während der in dieser Arbeit betrachteten Phasen des frischen und des grünen Betons hat der Zement noch nicht begonnen, Festigkeit aufgrund der unmittelbar einsetzenden Hydratationsreaktion zu bilden. Neben der optischen Vergleichbarkeit ist der grüne Beton auch festigkeitstheoretisch daher näher mit einem bindigen Boden als mit dem erhärteten Beton verwandt. Der Zement übernimmt dabei einschließlich anderer Feinststoffe die Funktion der sehr feinen Bodenteilchen. Mit fortschreitender Zeit vollzieht sich dann in der Phase des jungen Betons der Übergang von der Anwendbarkeit der Bodenmechanik hin zur Mechanik des Festbetons [20].

Bereits nach dem Mischvorgang liegen keine vereinzelt Partikel mehr vor, es handelt sich um eine Agglomeration von Partikeln in einem feuchten Haufwerk, d.h. Partikel haften bereits in Gruppierungen aneinander sofern die Reichweite der Bindekräfte durch Annäherung der Partikel bereits unterschritten wird. Dieses selbständige Aneinanderlagern von Partikeln wird auch als Aufbaugranulation bezeichnet [119]. Dieser Zustand der Agglomeratbildung ist auch in Abbildung 42 gut erkennbar. Auch in der fraktal kleineren Skalierung als Leim ohne Partikel über 100 μm werden sich ähnliche Agglomerate bilden, die dann nur aus Zementpartikeln und weiteren Komponenten wie z.B. Flugasche, soweit zugegeben, bestehen.

Ein Modell über die Mechanismen des Agglomeratwachstums bei feuchten Pulvern ist in [61] beschrieben. Liegen in einer feinen Partikelschüttung trockene Einzelpartikel vor, die auf einen Flüssigkeitstropfen treffen, so gelangt der Tropfen durch Kapillarkräfte zwischen die Partikel und ein Initialagglomerat bildet sich. Der Porenraum dieses Agglomerates ist vollständig mit Wasser gefüllt, so dass dort der Eintrittskapillardruck wirkt. Das weitere Wachstum erfolgt durch einen Flüssigkeitstransport hin zu den noch ungebundenen Partikeln, die das Agglomerat umgeben.

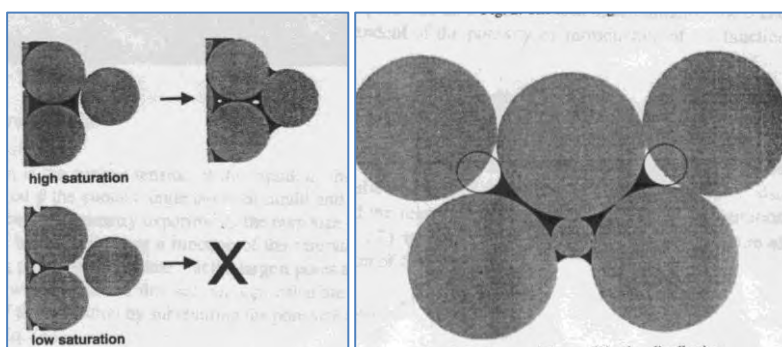


Abbildung 44: Wachstumsstadien, -grenzen und Einfluss der Partikelgröße [61]

Nähern sich Partikel durch z.B. Mischprozesse, bleiben sie am Agglomerat haften, wenn sie in Kontakt mit dem darin enthaltenen Wasser kommen und sich Flüssigkeitsbrücken bilden können. Während dieser Prozesse nimmt durch den Wassertransport von innen nach außen der Grad der Wassersättigung im Agglomerat ab und das Wasser liegt überwiegend an den Kontaktpunkten der Partikel vor. Aufgrund der großen Krümmung der Flüssigkeitsmenisken ist es nur noch kleineren Partikeln möglich, in Kontakt mit dem Agglomeratwasser zu gelangen und durch die entstehenden Haftkräfte ein Teil des Agglomerates zu werden. Die Wachstumsgrenze ist dann erreicht, wenn aufgrund der Partikelverteilung keine Teilchengrößen mehr vorliegen, denen der Zugang zu den immer gekrümmter werdenden Oberflächen des interpartikulären Wassers möglich ist (Abbildung

44). Das in Abbildung 44 dargestellte Agglomeratwachstum geht von ideal trockenen Partikeln aus, auf die ein Wassertropfen trifft. Während des Mischvorganges von EF-Betonen und -leimen werden jedoch bereits die Oberflächen der Partikel insgesamt befeuchtet. Das Wachstum von Agglomeraten hängt im Falle feuchter Oberflächen davon ab, ob die einzelnen Wasserfilme der Partikel dick genug sind, um die Rauigkeiten auf der Partikeloberfläche auszufüllen und so in Kontakt zu den Wasserfilmen der Nachbarpartikel zu kommen.

Diese Situation ist in Abbildung 45 dargestellt. Wenn lediglich eine monomolekulare Wasserschicht die Oberfläche benetzt, dann findet eine Kraftübertragung nur an den punktuellen Kontakten der Rauigkeiten statt [62].

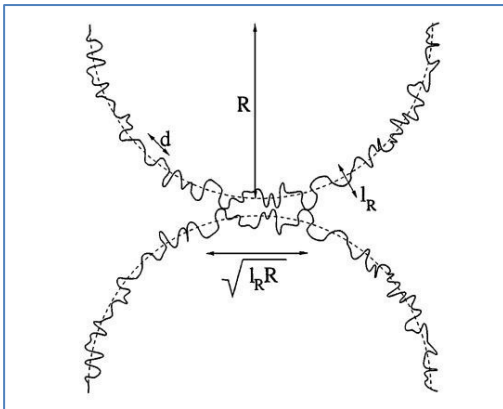


Abbildung 45: Oberflächenrauigkeiten in der Kontaktzone zweier ideal runder Partikel mit Radius R ; l_r ist die Abweichung der Rauigkeiten vom Radius R , d = Abstand zwischen zwei Rauigkeiten [62]

Wenn der Wasserfilm dicker ist, dann kann sich innerhalb des Bereiches zwischen einer oder mehrerer Rauigkeiten Wasser ansammeln und der Bereich der Adhäsion zwischen beiden Partikeln vergrößert sich.

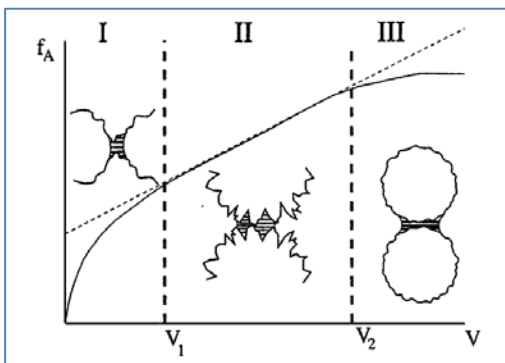


Abbildung 46: Einfluss der Flüssigkeitsschicht auf die Adhäsionskraft f_A zwischen zwei rauen, runden Partikeln; vorherrschende Systeme:
I = sehr kleine Flüssigkeitsbrücke am Kontakt einzelner Rauigkeiten,
II = Flüssigkeitsbrücke zwischen mehreren Rauigkeiten,
III = sehr große Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei kugelförmigen Partikeln [62]

Nimmt das Wasservolumen weiter zu, dann kann sich eine geschlossene Flüssigkeitsbrücke ausbilden, von der die Rauigkeiten beider Partikel großflächig umhüllt werden, siehe Abbildung 46. Die Darstellung ist lediglich eine qualitative Einschätzung, daher kann auch der Fall auftreten, dass bei jeweils konstantem Flüssigkeitsvolumen mehrere Flüssigkeitsbrücken im Zustand I zu einer höheren Gesamtadhäsionskraft führen als eine große

Flüssigkeitsbrücke im Zustand III. Dort ist durch den höheren Abstand der Partikelrauheiten auch der Festigkeitszuwachs durch Reibung und Verzahnung vermutlich geringer.

2.4.1.1 Verteilung des Wassers in Partikelschüttungen

Modellvorstellungen, die sich bei Zementleimen, -mörteln oder Betonen mit der Verteilung des Wassers um die Feststoffpartikel beschäftigen, gehen immer von Suspensionen aus, in denen Partikel in Wasser „schwimmen“ und keine nennenswerten Grenzflächen zu Luft vorhanden sind. Nach dem Mischen aller Feststoffpartikel mit Wasser werden bei ausreichendem Wasserangebot alle Partikel mit einem Wasserfilm umgeben und die Hohlräume, die in den Zwickeln zwischen den Feststoffpartikeln verbleiben, mit Wasser gefüllt. Durch die Dicke des die Partikel umgebenden Wasserfilms wird die Lage der Partikel zueinander charakterisiert. Je größer der Wassergehalt des Betons- bezogen auf die gesamte Oberfläche aller Feststoffpartikel ist, umso weiter liegen die Partikel auseinander. Somit führt ein zunehmender Wassergehalt auch trotz einer optimierten und hohen Packungsdichte der Feststoffpartikel in trockenem Zustand, zu einer verminderten Packungsdichte im Frisch- und Festbeton [63]

Ein vereinfachtes Modell über die Ausbildung der Wasserfilmdicke um Zementpartikel an Leim- und Mörtelsuspensionen, d.h. gesättigten Systemen, ist in der Arbeit von Krell enthalten [64]. Dieser kommt zum Ergebnis, dass für die Normsteife von Zement rein physikalisch eine Wasserfilmdicke d_{lq} von rd. 22μ für jedes Partikel erforderlich ist unter der Annahme ideal kugeligter Partikel mit glatter Oberfläche. Die dort vorgeschlagene Ermittlung der Wasserfilmdicke durch Division der Summe des Wasservolumens durch die Summe der Partikeloberfläche ist aufgrund der großen Abweichung der gekrümmten Partikeloberfläche von der Ebenen fehlerbehaftet und weist insbesondere bei sehr kleinen Partikeln eine Abweichung von ca. 25 % auf.

Genauer ist es, wenn d_{lq} berechnet wird mit dem Ansatz als Kugelschale/ Hohlkugel aus der Differenz der beiden Kugelvolumina (Partikelvolumen mit Wasserfilm und ohne Wasserfilm).

Bei bekannter Wassermenge V_w je Gramm Zement ist die Dicke des Wasserfilms um ein Partikel unter Berücksichtigung der gekrümmten Oberfläche:

$$d_{lq} = \sqrt[3]{\left(\frac{4}{3} \pi r_p^3 + V_w\right) \frac{3}{4\pi}} - r_p. \quad \text{Formel 6}$$

d_{lq} = Dicke des Wasserfilms

r_p = Partikelradius

Bei einer bekannten Partikelverteilung kann näherungsweise der mittlere Partikelradius angenommen werden, über den dann die Partikelanzahl je Gramm Zement berechnet werden kann. Dadurch kann eine mittlere Wasserfilmdicke je Partikel berechnet werden.

Bei der Verteilung von Wasser, das einer Partikelschüttung wie z.B. Zement zugegeben wird, geht Krell davon aus, dass sich erst dann zwischen den einzelnen Partikeln ein Wasserfilm bildet, wenn alle Hohlräume (Zwickel) mit Wasser gefüllt sind. Diese Vorstellung geht davon aus, dass zunächst eine vollständige Füllung der Zwischenräume mit Wasser erfolgt und bei einer weiteren Erhöhung der Wassermenge der Kontakt der Partikel untereinander durch zunehmend große Wasserfilme um die Partikel aufgehoben wird. Bei erdfeuchten Betonen liegen jedoch so geringe Wasseranteile vor, dass ein vollständiges Ausfüllen der Hohlräume und ein dadurch bedingtes "schwimmen" der Partikel in ei-

ner wassergesättigten Matrix nicht stattfindet. Daher ist das Modell für den Bereich erdfeuchter Betone nicht anwendbar.

Im Vergleich zu der Summe der Flächen aller möglichen Flüssigkeitsbrücken in den Zwickeln zwischen den Partikeln ist die Summe aller Partikeloberflächen groß. Daher ist bei Kontakt mit Wasser ein Benetzen der Partikeloberflächen unvermeidlich und es bilden sich immer zuerst Adsorptionsfilme an den Partikeloberflächen aus, bevor dann Zwickel und Zwischenräume mit Wasser gefüllt werden [65].

Reschke [63] berechnet die zu erwartende Wasserfilmdicke auf der Grundlage der Untersuchungen von Krell [64]. Er berechnet das Volumen der Wasserhülle, die Partikel umgibt anhand einer Wasserfilmdicke von 10 µm, die bei Normsteife für alle Feinstoffe näherungsweise gleich angenommen wird [63]. Dabei geht er davon aus, dass alle Feinstoffpartikel dieselbe Wasserfilmdicke umgibt. In der Realität ist die Dicke des Wasserfilms abhängig von der Partikelgröße, da diese auch das Zeta-Potential (siehe Abbildung 72) und somit auch die Anziehungskraft auf das Wasser beeinflusst. Ebenso wird die Rauigkeit der Partikel die reale Wasserfilmdicke unterschiedlich beeinflussen [66]. Partikel, die eine Größe von 1 µm haben werden nicht von einem Wasserfilm umgeben sein der genauso dick ist wie der bei Partikeln mit 80 µm Durchmesser. Daher stellt die Angabe einer mittleren Wasserfilmdicke eine Hilfsgröße dar, die reale Verteilung wird in einem Verhältnis zum Partikeldurchmesser stattfinden und dazu führen, dass kleine Partikel mit einem dünneren Film umgeben sind als größere. In realen Verhältnissen wird die maximal umgebende Wasserfilmdicke vom Partikeldurchmesser, dem Gewichtsverhältnis Feststoff-Wasserfilm oder den Unterschieden der Massenträgheitsmomente mit bzw. ohne Wasserfilm abhängen. Aussagen hierzu liegen in der gesichteten Literatur nicht vor.

Die molare Masse von Wasser ist 18. 1 mol sind $6,023 \cdot 10^{23}$ Moleküle. 1 Wassermolekül benötigt etwa 18 \AA^2 Fläche – das entspricht $1,8 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ [58] und einem Durchmesser von $4,79 \text{ \AA}$. Damit kann für jede Partikelverteilung berechnet werden, wieviel Wasser für nur eine Monolayerschicht unter der Annahme kugeligter Körner erforderlich ist.

Bei einem Zement mit einer aus der Kornverteilung errechneten Gesamtoberfläche von $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ werden insgesamt $5000 / 1,8 \times 10^{-15} = 2,77 \times 10^{18} / \text{g}$ Moleküle Wasser je Gramm Zement benötigt. Das entspricht einem Gewicht von $2,77 \times 10^{18} \times 18 / 6,023 \times 10^{23} = 8,3 \times 10^{-5} \text{ g}$ für eine Monolayerschicht Wasser. Anders ausgedrückt beträgt der gravimetrische w/z-Wert für eine Monolayerschicht Wassermoleküle 0,000083.

Ein w/z-Wert von 0,18 entspricht einem Gewicht von 0,18 g Wasser pro Gramm Zement. Damit ist die mittlere Wasserschicht auf der Zementoberfläche ca. 2.168 Wassermoleküle dick, also ca. 1 µm im Mittel.

Das Wasser, das der Feststoffmischung zugeführt wird, kann auf verschiedene Arten in den Haufwerksporen gebunden werden. Schematisch veranschaulicht wird dies in Abbildung 47 und Abbildung 48. Die Bindung der Flüssigkeit ist abhängig von der zugeführten Wassermenge und der Benetzbarkeit der Feststoffpartikel. Die Flüssigkeit ist bei der Bildung eines Haftflüssigkeitsfilmes um die Feststoffteilchen (Adsorptionsschicht) in dieser Schicht nicht frei beweglich, siehe Abbildung 6. Die Verbindung zwischen Flüssigkeit und Oberfläche des Feststoffes kann mechanisch nicht gelöst werden. Im Gegensatz dazu ist das Wasser im Brückenbereich frei beweglich und kann mechanisch von den Feststoffteilchen gelöst werden. Genauso im Übergangsbereich, dort entstehen Flüssigkeitsinseln, die ganze Hohlräume verschließen. Der Sättigungsgrad liegt in diesem Bereich zwischen 30% und 80%.

Im Sättigungsbereich liegt der Sättigungsgrad über 80%, die Haufwerksporen sind fast vollständig mit der Flüssigkeit gefüllt [67].

Zement ist mit Wasser vollständig benetzbar. Bei den niedrigen Wassergehalten eines erdfeuchten Zementleimes wird der Sättigungsbereich des Zements nicht erreicht. Es wird angestrebt, bei der Herstellung des Zementleims mindestens den Adsorptionsschichtenbereich zu erlangen. Das heißt, dass die Oberfläche jedes Feststoffteilchens mit einer Flüssigkeitsschicht überzogen ist und keine unbenetzten Partikeloberflächen mehr vorhanden sind.

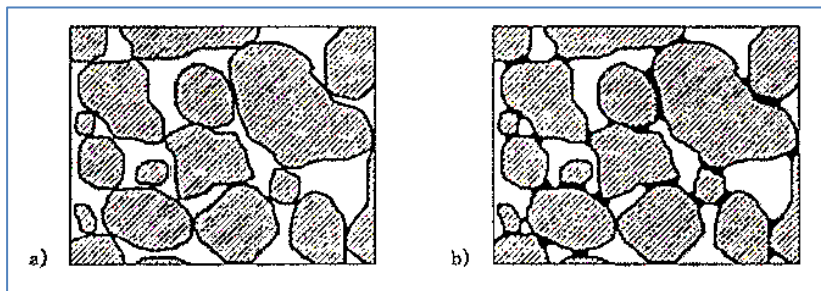


Abbildung 47: Sättigungsbereiche poröser Schichten (a) Adsorptionsschichten, (b) Zwickel- und Brückenbereich [67] (Wasser = schwarze Linien/Flächen)

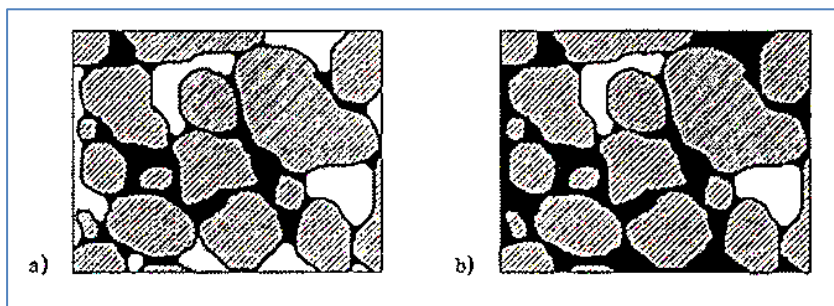


Abbildung 48: Sättigungsbereiche poröser Schichten (a) Übergangsbereich, (b) Sättigungsbereich [67] (Wasser = schwarze Linien/Flächen)

Die Flüssigkeitsbrücken zwischen den Partikeln werden sich durch die angelagerten, vollflächigen Wasserfilme um die Partikel in ihrer Geometrie von der Situation in Abbildung 33 unterscheiden. Isolierte Flüssigkeitsbrücken, die nicht in den Wasserfilm eingebunden sind, der die Partikel umgibt, können nicht existieren, da sich zuerst die adsorptiv gebundenen Wasserfilme bilden und die Partikel einhüllen. Erst wenn danach noch genügend Wasser zur Verfügung steht, werden Wasserbrücken ausgebildet und die Zwischenräume in den Zwickeln beginnen sich zu füllen [65].

Entweder es ist genügend Wasser vorhanden, um ausgeprägte Kapillarbrücken zwischen den Partikeln zu ermöglichen oder die Adsorptionswasserfilme verformen sich bei dem Kontakt der Partikel und bilden aus sich heraus eine wesentlich kleinere Brücke.

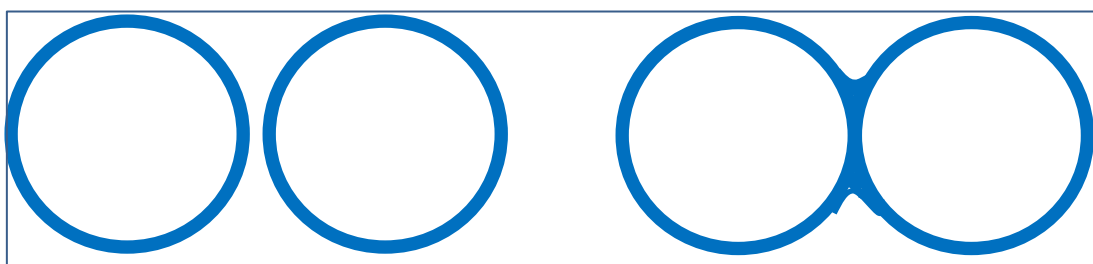


Abbildung 49: idealisiert runde, ebene Partikel mit einer Schicht aus adsorbiertem Wasser (d_{wad} nicht maßstäblich in blau)

Im Kontaktfall durchdringen sich die Adsorptionswasserfilme zunächst und der Abstand der Partikel beträgt nicht $2 \cdot d_{\text{Wad}}$ sondern $1 \cdot d_{\text{Wad}}$ wie in Abbildung 49 dargestellt. Wenn die Packungsdichte der Partikel untereinander hoch genug ist, werden unmittelbare Korn- zu Korn-Kontakte entstehen. Beide Fälle führen zu einer Umlagerung des Adsorptionswassers und die geringe Menge des entstehenden Überschusswassers wird entweder die Filmdicke erhöhen oder bildet eine Brücke aus.

Bei Partikelkontakten mit Adsorptionsfilmen kommt es insgesamt zu einer Verstärkung der Haftkräfte durch Adsorptivkräfte. Die adsorbierten Wasserschichten dürfen bei dünnen Schichten als unbeweglich, angenähert als zum Feststoff gehörend, betrachtet werden, siehe auch Abbildung 6. Es ist zu erwarten, dass sich die Wassermoleküle in den energetisch günstigen Rauigkeitsvertiefungen der Feststoffoberfläche anlagern. Sie bewirken somit eine Vergrößerung der korrespondierenden Flächen zweier Teilchen bzw. eine scheinbare Verringerung des Abstandes a und vergrößern dadurch die Haftkraft [127]. Dieser Zustand ist in Abbildung 50 dargestellt. Wassermengen, die über die für eine Monolayerschicht benötigte Menge hinaus gehen, werden sich zunächst solange ungleich verteilen, bis die Vertiefungen in der Partikeloberfläche weitgehend ausgefüllt sind.

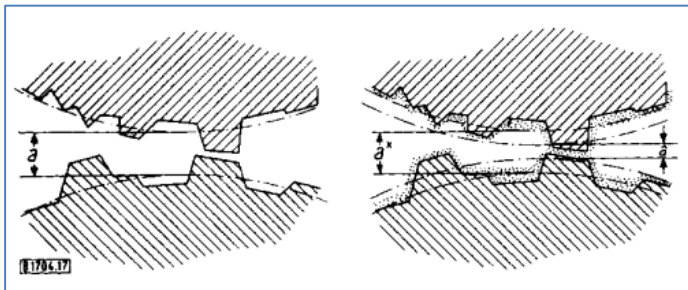


Abbildung 50: Schematische Darstellung der Berührung zwischen zwei Körnern ohne (links) und mit Sorptionsschichten (rechts) [127]

Erst wenn sich durch größere Wassermengen Wasserbrücken an den Kontaktpunkten bilden können, kommen die kapillaren Bindungskräfte hinzu.

Im Vergleich zu polymolekularen Substanzen wie z.B. Kunststoffen, Gele aus Eisen (III)-Hydroxid, und Aluminiumhydroxid kann eine niedermolekulare Substanz im flüssigen Zustand eine molekulare Berührung mit dem Gesteinskörnungsstoff nicht so leicht erzielen, weil sie sich infolge ihrer großen Oberflächenspannung über oberflächliche Unebenheiten der Gesteinskörnung hinwegspannt [68]. So kann Wasser z.B. auch Mikrorisse sowie kleinere Unebenheiten des Kornes überbrücken, wenn der Film sich in Ruhe ausbilden kann. Im Zuge der Partikelreibung im Mischer ist die Ausbildung dieser Filme durch die ständige Umlagerung und Reibung nicht möglich. Jedoch kann hier auch ein Erklärungsansatz dafür liegen, warum manche Mischsysteme im suspensiven Bereich (d.h. normale, bewegliche Konsistenzen) weichere Betone mischen als andere.

2.4.1.2 Zementgranulometrie und -reaktion

Zement sowie alle anderen pulverförmigen Zusatzstoffe, die bei Betonen verwendet werden, bestehen aus Feststoffpartikeln unterschiedlicher Größe, sie sind polydispers. Mit Ausnahme von Flugasche und Mikrosilika werden alle Komponenten durch eine Kombination aus Brech- und Mahlvorgängen erzeugt, deren Ergebnis immer Partikel mit unterschiedlichen Korngrößen sind und keine nährungsweisen monodispersen Partikel mit einer identischen Größe. Flugasche, die ohne weitere verfahrenstechnische Bearbeitung

aus den Filtern von Steinkohlekraftwerken stammt, weist ebenfalls eine Kornverteilung auf und ist ebenfalls polydispers. Im Falle von Zement ist die Mahlfineinheit die Größe, mit der die Festigkeitsklassen des Zementes eingestellt werden. Je feiner ein Zement ist, umso höher ist seine normative Endfestigkeit.

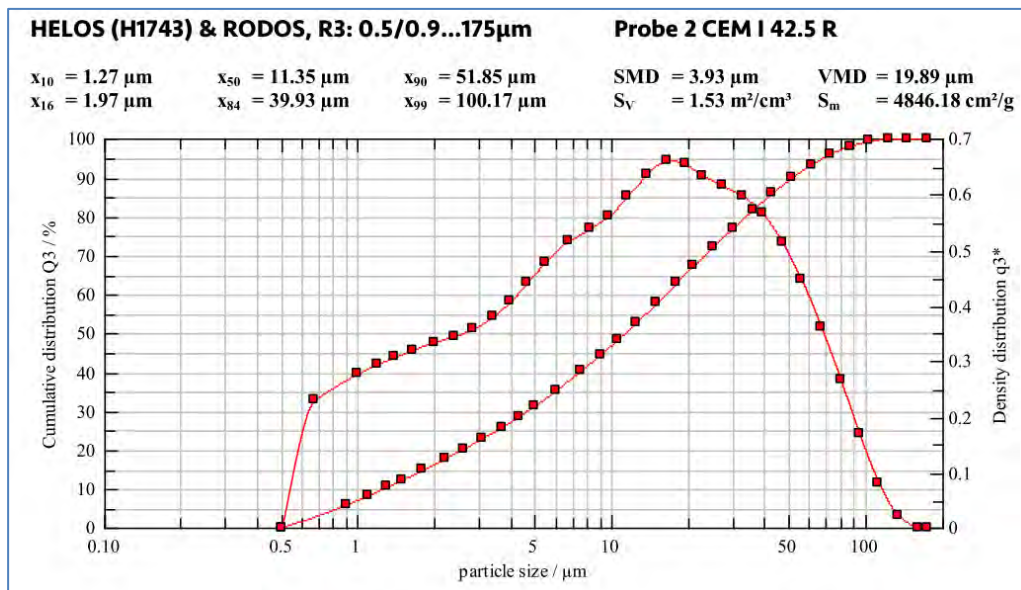


Abbildung 51: Partikelanalyse des CEM I 42,5 R aus den Hauptversuchen; alle Partikelanalysen siehe Anhang 1

Während früher der Blaine-Wert herangezogen wurde, um eine schnelle und einfache Möglichkeit der Bestimmung der Zementoberfläche durchzuführen, sind heute Analysen mit Lasergranulometern, wie in Abbildung 51 dargestellt, üblich, weil dadurch Aussagen über das gesamte Kornband hinweg erhalten werden, wohingegen der Blaine-Wert lediglich eine Zahl in cm^2 je Gramm darstellt, aus der eine mittlere Korngröße über Rückrechnung erhalten werden kann. Sie ist daher nicht in der Lage, die Unterschiede in der Partikelverteilung wiederzugeben. Auch führt das Wesen des Versuches als Durchströmwiderstand dazu, dass rauhere Körner, wie sie z.B. durch Adsorptionsbelegungen an Hütensandpartikeln vorkommen können, einen höheren Widerstand verursachen als die eigentliche Korngröße [75].

Die in 2.4.2 beschriebenen Kräfte zwischen Partikeln werden maßgeblich beeinflusst durch die Flüssigkeitsverteilung, Größenverteilung und Oberflächenbeschaffenheit der Partikel. Auch die Zementreaktion während der ersten Phase der Hydratation ist hierbei von Bedeutung, ebenso sowie die Kornverteilung und -beschaffenheit. Nach der Wasserzugabe beginnen die Hydratationsreaktionen. Dabei bilden sich als Hydratationsprodukte vorwiegend faserförmige Calciumsilicathydrate, Calciumhydroxid sowie in geringerer Menge Ettringit und Monosulfat. Diese Hydratationsprodukte werden auch als Zementgel bezeichnet. Ihre mittlere Kristallgröße beträgt nur etwa ein Tausendstel der mittleren Zementkorngröße und liegt damit im Nanometerbereich.

Das Zementgel umgibt das Zementkorn zunächst nur in einer dünnen Schicht, wie in Abbildung 52 in der Mitte dargestellt. Zur weiteren Hydratation diffundiert das Wasser zunächst durch die äußere Gelschicht bis an den noch nicht hydratisierten Kern des Zementkorns. Dort löst es einen weiteren Teil des Zementkorns. In dem dabei frei werden inneren Raum fällt ein Teil der gelösten Stoffe sofort als Zementgel aus. Die restlichen gelösten Stoffe diffundieren durch die bereits vorhandene Gelschicht nach außen und fallen dort an der Grenze Gelschicht/Wasser aus.

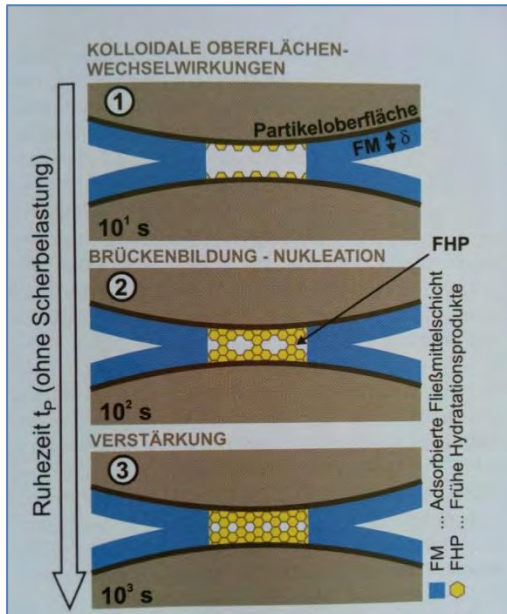


Abbildung 52: frühe Hydratationsprodukte (schematisch) in einer Flüssigkeitsbrücke [69]

Bei Betrachtungen der Robustheit von SVB und den Einflüssen auf Suspensionen zeigt Lowke [69] auf, dass die Bildung eines Netzwerks infolge kolloidaler Oberflächenwechselwirkungen als physikalischer Prozess bereits innerhalb der ersten 10 Sekunden nach Wasserzugabe erfolgt, siehe oberer Teil von Abbildung 52. Gleichzeitig kommt es auf den Partikeloberflächen auch während der Induktionsperiode (bzw. dormanten Phase) der Hydratationsreaktion zur Nukleation von ersten Hydratationsprodukten. An den weichen Kontaktpunkten kommt es zunehmend zur Bildung von Brücken aus ersten C-S-H-Phasen und anderen frühen Hydratationsprodukten wie bspw. Ettringit, siehe mittlerer Teil von Abbildung 52. Das zunächst auf kolloidalen Oberflächenwechselwirkungen basierende Netzwerk wandelt sich nach und nach in ein auf der Verbrückung früher Hydratationsprodukte basierendes Netzwerk um. Diesem chemisch gesteuerten Prozess kann eine Dauer ca. 30 bis 100 s zugeordnet werden. Anschließend verstärkt sich die Struktur, bis die Prozesse des Strukturaufbaus und des Strukturabbaus mit einsetzender Erstarrung nicht mehr reversibel sind, unterer Teil der Abbildung 52. Im Falle von Suspensionen wird das Netzwerk zwischen den einzelnen, frei beweglichen Partikeln innerhalb der ersten 100 s verstärkt, ohne dass bereits dauerhafte chemische Bindungen zwischen den Partikeln zur Festigkeitsbildung beitragen [69].

Auch bei erdfeuchten Zementleimen wirken chemische Bindungen des Wasser mit dem Zement nicht an den interpartikulären Bindungskräften mit, weil diese Reaktionsprodukte erst zwischen 60 und 90 Minuten beginnen, Festigkeiten zu entwickeln, zu diesem Zeitpunkt sind erdfeuchte Betone und Leime bereits verarbeitet.

Im Hinblick auf die interpartikulären Wechselwirkungen in zementbasierten Suspensionen mit verschiedenartigen Stoffen kommt den frühen Hydratationsprodukten selbst eine maßgebliche Rolle zu. So zeigen Untersuchungen von Zingg [70], dass sich bereits unmittelbar nach Wasserzugabe eine dünne Schicht aus Ettringit und C-S-H-Nadeln auf der Oberfläche der Zement- und Zusatzstoffpartikel bildet. Bei Wechselwirkung zweier Partikel kommt es nun in weiten Bereichen der Oberfläche weniger zu einer Wechselwirkung der Partikeloberflächen selbst als vielmehr zur Wechselwirkung der auf der Oberfläche abgelagerten Hydratationsprodukte. Somit kann eine vergleichsweise dünne Schicht auf der Oberfläche abgelagerter Hydratationsprodukte die Eigenschaften des gesamten Partikels dominieren. Da sich die Hydratationsprodukte sowohl auf Zement- als auch auf Zusatz-

stoffen ablagern können, gleichen sich die Oberflächeneigenschaften der stofflich unterschiedlichen Partikel einander an [69].

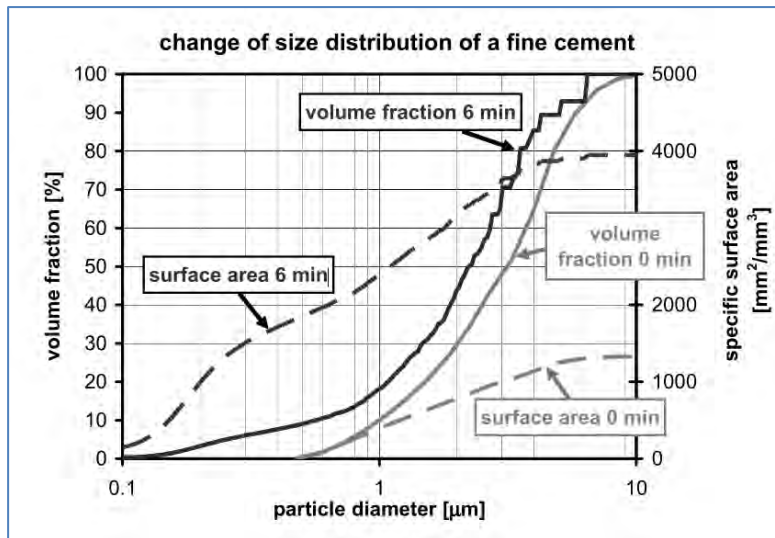


Abbildung 53: Partikel- und Oberflächenverteilung eines Zementleimes aus feinem Zement nach 6-minütiger Hydratation aus Zingg [70], gemessen mit Cryo-FIB-nt (Focused-Ion-Beam Nanotomography)

Sämtliche o.g. Forschungsergebnisse beziehen sich auf eine wassergesättigte Frischbetonmatrix, in der die einzelnen Festkörperbestandteile einschließlich der Zementkörner in der Wasserumgebung frei beweglich sind. Die untersuchten Konsistenzbereiche bewegen sich dabei in den Bereichen F2 bis F5.

Bei erdfeuchten, wasserarmen Mischungen stehen die Festkörperoberflächen im unmittelbaren Kontakt zueinander und der gegenseitige Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit nimmt z.B. bei der Kraftübertragung und der Beweglichkeit der Festkörper an Bedeutung zu.

Bereits unmittelbar nach dem ersten Kontakt eines Zementkorns mit Wasser setzt eine kurze, aber intensive Hydratation ein [71]. Calciumsulfate gehen teilweise und Alkalisulfate nahezu vollständig in Lösung. Aus der Reaktion von Calcium- und Sulfationen mit Tricalciumaluminat bilden sich auf den Oberflächen der Klinkerpartikel kurze, hexagonal säulenförmige Trisulfatkristalle. Daneben kommt es, ausgehend von Tricalciumsilicat, zur Bildung von ersten Calciumsilikathydraten in kolloidaler Form. Innerhalb der ersten fünf Minuten treten auf den Zementkornoberflächen bereits Veränderungen der Beschaffenheit und der Größe der Gesamtoberfläche auf.

Czerny [72] gibt an, dass die spezifische Oberfläche des Zementsteins stets seinem Anteil an chemisch gebundenem Wasser entspricht. Werden bis zur völligen Hydratation 25 % Wasser chemisch gebunden, wächst die Oberfläche von ca. 3.000 cm²/g auf etwa 2.000.000 cm²/g an. Eine Menge von 0,5 % vom Zementgewicht an chemisch gebundenem Wasser nach beendetem Erstarrungsvorgang entspricht bereits einer spezifischen Oberfläche von ca. 40.000 cm²/g, also ca. dem zehnfachen der ursprünglichen Oberfläche.

Die Gelbildung beginnt bereits innerhalb der ersten 30 Sekunden. Durch Abrasionswirkung während des Mischprozesses können evtl. erste Gelphasen von den Zementpartikeln entfernt werden. Dadurch besteht für das Wasser eine bessere Möglichkeit, erneut

eine Gelbildung einzuleiten und erst danach die Hydratation durch Diffusion durch die Gelschicht in Richtung Zentrum des Partikels fortzusetzen.

Abbildung 53 zeigt, dass bereits sechs Minuten nach Wasserzugabe sich sowohl die Kornverteilung selber in Richtung höherer Feinanteile verschoben hat, und außerdem die Oberflächensumme ganz erheblich angestiegen ist. Zingg führt dies darauf zurück, dass sich von größeren Partikeln die ersten Reaktionsprodukte abgelöst haben können und ihrerseits Partikelagglomerate bilden, die feiner sind als die Ausgangspartikel. Zusätzlich vergrößert sich die Gesamtoberfläche durch die auf den Oberflächen aller Partikelgrößen gebildeten Hydratationsprodukte. Über die Härte und die Festigkeit sowie die Verformbarkeit dieser Produkte liegen keine Angaben vor. Sie werden sich jedoch wesentlich weicher und verformbarer verhalten als trockene Zementpartikel.

Im Gesamtkollektiv aller Zementpartikel einer Verteilung verhalten sich nicht alle gleich. Bedingt durch die Mühlenatmosphäre innerhalb der Zementmühle kommt es zu einem inerten Verhalten der Partikelfraktionen $<1 \mu\text{m}$ [64]. Diese Partikel haben bereits mit der dort herrschenden Luftfeuchtigkeit reagiert, ihre Oberflächen sind bereits mit Hydratationsprodukten belegt. Dadurch bedingt verhalten sie sich bei der Zugabe von Wasser zum Zement inert, von ihnen geht nur ein sehr geringer Beitrag zur Festigkeitsentwicklung aus. Durch die bereits stattgefundenen Hydratation ihrer Oberflächen sind diese anders strukturiert als die übrigen Partikel und mit erhärteten Hydratationsprodukten belegt.

Untersuchungen der Zementleimmikrostruktur mittels ESEM-FEG (Rasterelektronenmikroskop mit Feldemissionskathode, das Untersuchungen bei geringem Unterdruck und in Wasserdampf-atmosphäre ermöglicht) zeigen [73], dass mit zunehmendem Kaliumsulfatgehalt eine erhöhte Menge an langprismatischen Kristallen auftritt. Der größte Teil dieser etwa $2\text{-}10 \mu\text{m}$ langen und $0,2 \mu\text{m}$ dicken ($0,5\text{-}1,0 \mu\text{m}$ breiten) Kristalle wird unmittelbar nach Zugabe des Anmachwassers gebildet und ist auch nach zwei Stunden Hydratation mittels ESEM-FEG nachweisbar. Die typische Morphologie und Ergebnisse EDX-spektroskopischer Analysen (energiedispersive Röntgenmikrobereichsanalytik) weisen darauf hin, dass es sich bei diesem Mineral um Syngenit handelt. In vorausgegangenen Arbeiten wurde bereits festgestellt, dass Syngenit eine typische Mineralneubildung der frühen Zementhydratation ist (Stark et al. 2001). Weiterhin wurde in den Zementleimen Ettringit in kurzprismatischer Ausbildung beobachtet. Im Vergleich zu Ettringit weist Syngenit eine 5-20-mal größere Länge auf und ist etwa 5-mal so breit [73].

Über die mechanischen Eigenschaften dieser sehr frühen Reaktionsprodukte sind keine Informationen veröffentlicht. Es ist aufgrund der generellen, zugrunde liegenden chemischen Reaktion davon auszugehen, dass diese Reaktionsprodukte leicht verformbar sind und daher u.U. bereits unter dem Einfluss der wirkenden interpartikulären Anziehungskräfte zu Deformationen neigen können, die wiederum die Wirkung der Haftkräfte verstärken.

Laut Krell [64] beträgt die Dicke der Reaktionsschicht der ersten Minuten ca. $0,2 \mu\text{m}$, sie hängt vom C3A-Umsatz in Gew.-% bezogen auf den jeweiligen C3A-Gehalt eines Zementes ab.

Aus den bisherigen zur Verfügung stehenden Informationen über die Zementreaktion innerhalb der ersten Minuten nach Wasserzugabe folgt, dass in diesem kurzen Zeitraum bereits Änderungen auf den Partikeloberflächen und sogar in der Partikelverteilung eintreten, die Auswirkungen auf die Haftkräfte der Partikel untereinander ausüben werden. Sie sind –wie die Hydratationsvorgänge insgesamt– abhängig von der Temperatur und der chemischen Zusammensetzung der Zemente sowie der Mahlfineinheit. Weil diese Vor-

gänge chemisch hervorgerufen werden, können mit den in Kap. 2.4.2 beschriebenen theoretischen Modellvorstellungen über die physikalischen Ursachen die Haftkräfte jedoch nicht exakt mit erfasst werden.

2.4.1.3 Partikelformen und –oberflächen, Koordinationszahlen

Wie in Kap. 2.4.2 beschrieben wird, gehen von den Oberflächenbeschaffenheiten der Partikel Einflüsse auf die Ausbildung und Übertragung der interpartikulären Kräfte aus.

Die meisten bestehenden Modellvorstellungen, die überwiegend aus den Jahren 1950-1970 stammen, gehen aus Gründen der Vereinfachung überwiegend von ideal glatten Oberflächen und kugeligen Formen aus. Von einer Kugelform sind reale Zementpartikel sehr stark abweichend, wie Abbildung 54 exemplarisch darstellt. Bedingt durch den Mahlvorgang des Klinkers und evtl. zugegebener weiterer Stoffe weisen die Partikel eine unregelmäßige, kantige Form auf, die aus dem Zerkleinern von größeren Stücken in kleinere folgt.

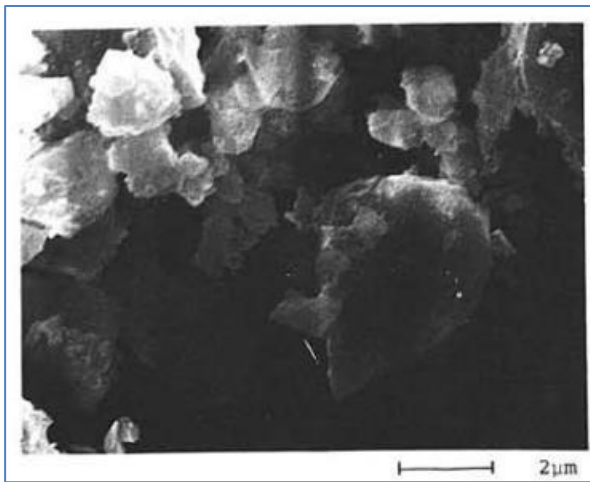


Abbildung 54: Partikelformen von trockenem Portlandzement, aus van Breughel [74]

Je nachdem ob die Zerkleinerung überwiegend schlagend erfolgt, was bei Korngrößen über 30 µm vermutet wird oder eher reibend bei den darunterliegenden Korngrößen, können die Partikelformen in Abhängigkeit der Korngröße Unterschiede aufweisen. Hierzu liegen jedoch keine gesicherten Erkenntnisse vor, so dass van Breughel [74] davon ausgeht, dass die Partikelform als von der Partikelgröße unabhängig angesehen werden kann. Während Zertrümmerungsbrüche, die durch sehr hohe Beanspruchungsintensitäten hervorgerufen werden, meist kantige Partikel produzieren, führen Abrasivbrüche zu abgerundeten Partikeln [75]. Daher haben die Mahlsysteme für Zemente, Gutbett-Walzenmühle, Vertikal-Wälzmühle und Kugelmühle, einen Einfluss auf die Kornform des jeweiligen Zementes. Zement besteht aus kantigen Partikeln mit nicht exakt definierter Geometrie. Die tatsächliche Oberfläche einzelner Zementpartikel ist aufgrund der Mahlprozesse zerklüftet und mit Tal- und Sattelpunkten versehen, die in der Regel scharfkantig geformt sind.

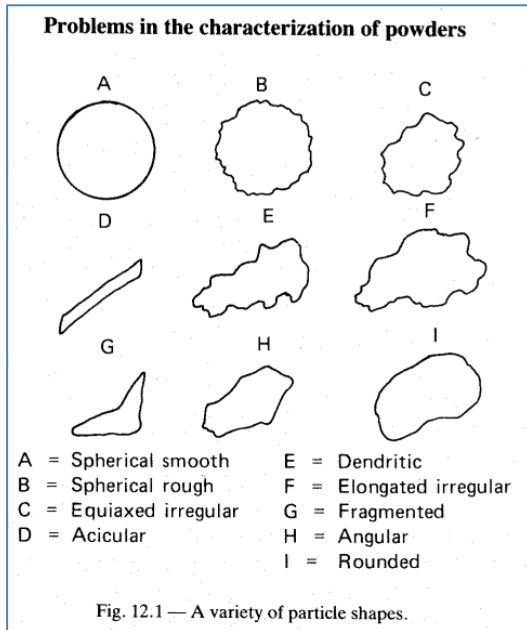


Abbildung 55: Unterschiedliche Partikelformen nach Igwe [76]

Auch eine Beschreibung der Partikelformen gemäß Abbildung 55 [76] ist lediglich eine Annäherung, anhand derer Zement z.B. eher in die Kategorie H „Angular“ eingeordnet werden kann und Flugasche in B „Spheric rough“. Die eigentliche Partikelform beeinflusst das Verhalten bei Verdichtung, die mögliche Packungsdichte sowie den Abstand der Partikeloberflächen und die Gesamtkontaktfläche, die möglich ist.

Eine wesentliche Größe bei der Berechnung von Spannungen in Agglomeraten ist die Zahl der benachbarten, sich berührenden Partikel, genannt Koordinationszahl. Die Koordinationszahl k gibt die Zahl der Berührungspunkte eines Teilchens mit Nachbarpartikeln und damit die Zahl der Kraftübertragungspunkte an. Sie ist abhängig von der Raumausfüllung Φ , auch bezeichnet als Packungsdichte, die bei trockenen Partikelsystemen errechnet wird aus dem Anteil des Volumens aller Partikel am Gesamtvolumen, das die Packung beansprucht. Der Hohlraumanteil am Gesamtvolumen des Stoffsystems wird als Porosität ϵ bezeichnet ($\epsilon = 1 - \Phi$).

Sämtliche Faktoren, die einen Einfluss auf die Porosität haben, wie z.B. Partikelgröße und -verteilung, beeinflussen auch die Koordinationszahl. Im Falle der Kanonenkugeln der Abbildung 41 beträgt die Koordinationszahl für monodisperse Kugeln in sog. Hexagonal dichtester Packung raumzentriert $k = 12$. Die empirische Bestimmung der Koordinationszahl einer Partikelschüttung bzw. eines Agglomerates bestehend aus Kugeln verschiedener Größe oder gar beliebig geformten Teilchen ist bislang nicht eindeutig reproduzierbar erfolgt.

In solchen Packungen bestehen außerdem nicht nur Berührungspunkte, sondern auch Nahpunkte. Nahpunkte bestehen dann, wenn die Nachbarpartikeln bei Betrachtung eines bestimmten physikalischen Mechanismus gerade noch miteinander in Wechselwirkung treten, ohne dass ein Massenkontakt stattfindet.

Aufgrund der unterschiedlichen Reichweite der in Kap. 2.4.2 beschriebenen Kraftmechanismen existieren also in Abhängigkeit der Haftursache unterschiedlich viele physikalische Nachbarn. In mehreren Arbeiten werden Annahmen bezüglich der Koordinationszahlen zugrundegelegt. Ein Überblick über Koordinationszahlen in Abhängigkeit des räumlichen Verteilungsmodells in einer Matrix ist in [77] enthalten, sie liegen bei gleich großen

Kugeln zwischen 6 (loose Packung) und 12 (dichteste Packung). Neben der Frage, ob alle Partikel gleich groß sind oder Partikel in verschiedenen Größen vorhanden sind, geht auch ein Einfluss von einer umgebenden Behälterwand aus, der von dem Verhältnis der Behältergröße zur Partikelgröße abhängt.

Für den einfachen Fall einer Schüttung bzw. eines Agglomerates aus gleichgroßen Partikeln existieren mehrere experimentell bestätigte Zusammenhänge der Abhängigkeit der Koordinationszahl k von der Packungsdichte ε , $k(\varepsilon)$.

So nennt Rumpf einerseits

$k^*\varepsilon=3,1 \approx \pi$, (entspricht $k = 12$ für hexagonal dichteste Packungen raumzentriert) [126], sowie $k = 19,3-28*\varepsilon$ [125] als mögliche Annäherungsbeziehungen für die Koordinationszahl eines Teilchens in einer Packung von deren Porosität ε .

Iwadata [78] wählt für seine Anwendung der Zugfestigkeitsgleichung von Rumpf auf die Fluidisierbarkeit von Pulvern die Koordinationszahl

$k = 1,61\varepsilon^{-1,48}$ ($\varepsilon \leq 0,82$) für Agglomerat-zu-Agglomerat-Kontakte. Auf Suzuki [79] geht ein Modell zur Bestimmung der Koordinationszahl einer Mehrkomponenten-Kugelschüttung mit polydispersen Partikeln zurück. Dabei wird mit dem Anteil der rechnerischen Partikelanzahl je Fraktion an der Gesamtpartikelanzahl der Oberflächenanteil jeder Partikelfraktion ermittelt. Es zeigte sich, dass bei drei verschiedenen Ansätzen der Partikelverteilung (Log-uniform, Rosin-Rammler, Andreasen (Gaudin-Schumann)) die Koordinationszahlen immer in der Nähe von 6 lagen.

Insgesamt wurde sich bisher in zahlreichen Arbeiten damit beschäftigt, eine Vorhersage zu entwickeln. German [80] hat über 113 Arbeiten ausgewertet und kommt zu einem sehr übersichtlichen Abschluss. Nach Abbildung 56 stellt sich unter Berücksichtigung aller von German ausgewerteten Ergebnisse ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Koordinationszahl ein, obwohl verschiedenste Zustände zusammen aufgeführt wurden: Zufallspackung (random), verdichtet gesintert (P+S), gesintert mit Flüssigphase (LPS).

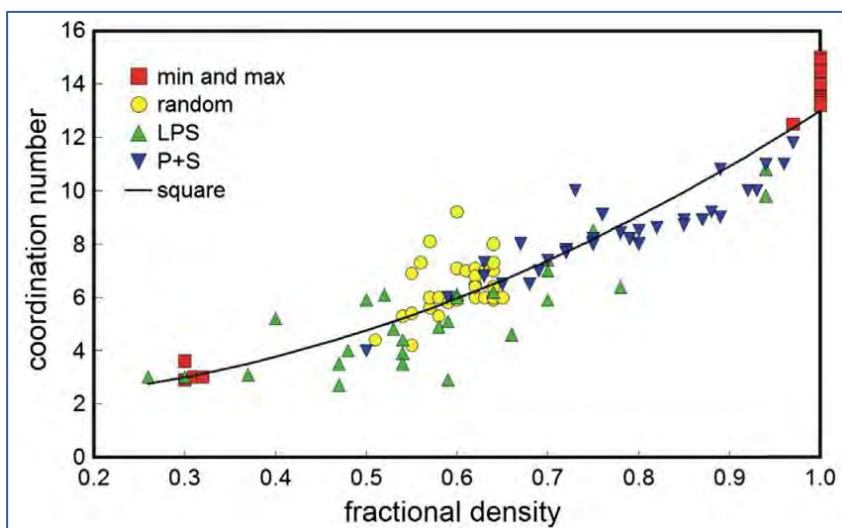


Abbildung 56: Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Koordinationszahl nach einer umfassenden Literaturlauswertung und Modellierung nach German [80]

Jedoch führen stark haftende Partikel sowie Partikel mit hoher Reibung durch Rauigkeiten oder Kornform zu geringeren Dichten und damit auch zu geringeren Koordinationszahlen als nach Abbildung 56.

Bei den theoretischen Betrachtungen zur Optimierung von Packungsdichten, wie sie z.B. Teichmann [81] bei fließfähigen Suspensionen durchführte, wird vorausgesetzt, dass sämtliche Partikel trocken sind und keine Flüssigkeit vorhanden ist oder dass es sich um eine Suspension handelt, bei der die Flüssigkeit zusammen mit feinen Partikeln die Rolle des Abstandshalters zwischen den einzelnen größeren Partikeln übernimmt. Ebenso werden ideal runde Partikel vorausgesetzt. Im EF-Bereich, in dem alle Partikeloberflächen mit Wasser benetzt sind, vergrößern sich zum Einen die Partikeldurchmesser um den unbeweglichen Anteil sterischen Wassers, von dem sie umgeben werden. Zum Anderen werden durch die Haftkräfte durch Flüssigkeitsbrücken und durch evtl. elektrische Aufladungen während des Mischprozesses sowie durch Van-der-Waal-Kräfte die Partikel nicht die ideal theoretisch dichteste Lagerung zueinander einnehmen können. Sie beginnen vorher aufgrund der Haftkräfte zu agglomerieren, d.h. sich zu punktuellen Partikelhaufwerken zusammen zu heften.

Auch in trockenen Partikelhaufwerken wird die theoretisch dichteste Packung, die durch viele Optimierungsansätze versucht wurde, zu erreichen, nicht erzielt, weil die Haftkräfte der feinen Partikel < 1 mm größer sind als deren Gewichtskraft und daher ein Hineingleiten in noch unbesetzte, leere Matrixräume nicht gelingt, weil sie vorher an Haftpartnern agglomerieren.

Die hier dargestellten Zusammenhänge verdeutlichen, dass die Partikel von Zement weder ideal glatte Oberflächen noch runde Partikelformen aufweisen. Dadurch wird die theoretische Abschätzung der Koordinationszahl erschwert, was bereit durch das polydisperse Auftreten (Körner unterschiedlicher Größe) der Fall ist. Somit ist eine Berechnung einer Koordinationszahl unter den realen Bedingungen wie sie bei Zementen vorliegen, bislang nicht möglich.

2.4.2 Haftkräfte und Verformungen zwischen den Partikeln

Innerhalb der Matrix eines Zementes besteht der zahlenmäßig größte Partikelanteil aus Teilchen mit einer Korngröße ≤ 2 μm . Abbildung 57 stellt die Verteilung des Massendurchganges eines handelsüblichen Portlandzementes CEM I 42,5 R unter der Annahme ideal runder und glatter Partikel der rechnerischen Partikelanzahl je Durchmesser und der daraus errechneten Oberfläche je Durchmesser gegenüber. Danach sind 99% der Partikel kleiner als 2 μm , diese stellen ca. 70% der spezifischen Oberfläche. Es zeigt sich, dass die absolute Partikelanzahl und ihr Anteil an der Oberfläche wesentlich kleineren Partikelklassen zugeordnet werden muss als es anhand des Massendurchganges der Fall ist. Dies ist von Bedeutung, weil die Mechanismen der Haftkräfte und der Partikelverformungen sehr stark von den Partikeldurchmessern und den Partikeloberflächen beeinflusst werden.

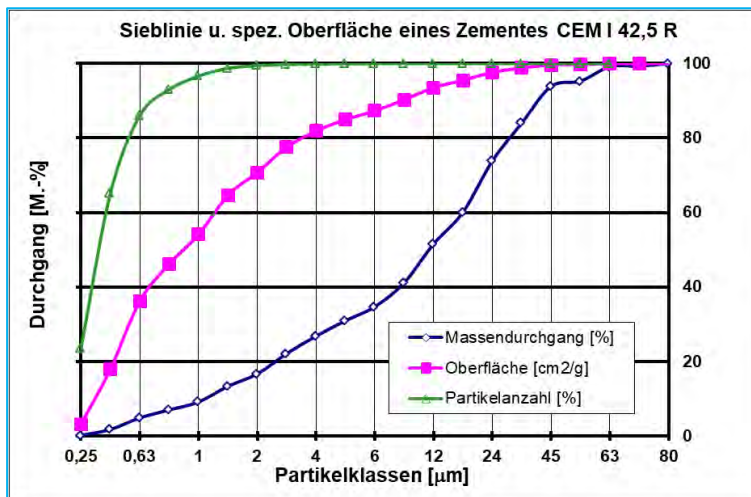


Abbildung 57: Massendurchgang und daraus errechnete Partikel- und Oberflächenverteilung eines Zementes CEM I 42,5 R

Die zwischen den einzelnen Partikeln wirkenden Kräfte beeinflussen entscheidend die Beweglichkeit der Matrix. Der Widerstand gegen eine Umlagerung durch Verdichtung aber auch der Verformungswiderstand des verdichteten Betons bei einer aufgetragenen äußeren Belastung sind abhängige Größen des Bewegungsverhaltens der Partikelmatrix.

Wierig [20] berücksichtigte in seinem theoretischen Modell über die Gründruckfestigkeit erdfeuchter Betone die Kräfte zwischen den Zementpartikeln aufgrund von Flüssigkeitsbrücken. Zwischen den Partikeln eines Bodens bzw. eines Schüttgutes wie z.B. erdfeuchtem Beton wirken eine Reihe weiterer Kräfte, deren Einflüsse und Mechanismen bei der Ermittlung der Haftkräfte für die Abschätzung der Zugfestigkeit einbezogen werden müssen. Abbildung 39 verdeutlicht mit einfachen Mitteln, dass die Summe aller Haftkräfte in Partikel-Wassergemischen von mehr abhängen muss, als von der absoluten Wassermenge. Czernin [72] weist mit diesem Beispiel darauf hin, dass die spezifische Oberfläche der Feststoffe eine entscheidende Größe bei Ausbildung von Haftkräften ist, die in der Summe von der Partikelgröße ebenso wie von der Oberflächenbeschaffenheit (glatt, rau, zerklüftet) der Partikel abhängt.

Aus der Literatur [82],[30], sind an Mischungen bestehend aus Feststoffpartikeln unter 100 µm Durchmesser, Wasser und Gas (Luft) folgende Kraftmechanismen, die an den Kontaktpunkten der Partikel untereinander wirken, bekannt:

1. Adsorptionsschichten aus Wasser
2. Flüssigkeitsbrücken,
3. Kräfte durch Verformungen an Partikeln und Flüssigkeitsbrücken
4. Van-der-Waals-Kräfte
5. Van-der-Waals-Kräfte aufgrund von plastischen Verformungen
6. Elektrostatische Kräfte (anziehend und abstoßend)
7. Gewichtskräfte
8. Chemische Bindungen
9. Magnetische Kräfte
10. Reibung und Verzahnung

Gewichtskräfte dominieren als Druckkräfte ab einem Partikeldurchmesser von 1 mm. Zugkräfte bzw. Haftkräfte können durch Gewichtskräfte nicht ausgelöst und auch nicht übertragen werden. Sie stellen für viele der anderen Kraftmechanismen eine Vorbelastung dar, die wiederum zu Verformungen der Partikel an den Kontaktpunkten führen

können. Gewichtskräfte werden an dieser Stelle nicht separat betrachtet, weil die Partikelgrößen bei Zementleimgemischen max. 0,1 mm betragen und sie keine Zugkräfte bilden können. Weiterhin sind für die hier angestellten Betrachtungen im Bereich des Frischbetons chemische Bindungen und magnetische Kräfte ohne Bedeutung. Die Wirkungsweisen der weiteren Kraftkomponenten werden im Folgenden vorgestellt.

2.4.2.1 Kräfte durch Adsorptionsschichten aus Wasser

Als Adsorptionsschichten werden Schichten von Molekülen bezeichnet, die als mono- oder multimolekulare Schichten auf einer Feststoffoberfläche adsorbieren. Dabei kann es dazu kommen, dass die Oberflächeneigenschaften nicht mehr von der chemischen Zusammensetzung des Feststoffs sondern teilweise bzw. vollständig von der adsorbierten Schicht definiert werden. Adsorptionsschichten von Molekülen, die in der makroskopischen Betrachtung als flüssigkeitsähnlich definiert würden, verhalten sich im Adsorptionsschichtbereich nicht flüssigkeitsähnlich und weisen ein anderes Bewegungs- und Bindungsverhalten auf. Die Moleküle der Wasseradsorptionsschicht erfahren ein geringeres Beweglichkeitspotenzial als im freien Wasser und steuern einen erheblichen Teil zur interpartikulären Haftkraft bei, der nicht vernachlässigt werden darf. Wasseradsorptionsschichten haben, abhängig von ihrer Dicke und den mit der Partikeloberfläche eingegangenen Wechselwirkungen, andere Eigenschaften als flüssiges Wasser und rufen eine Phasenänderung hervor. Es ändert sich die Phasenübergangstemperatur und die Oberflächenspannung verringert sich. Die ersten Wassermolekülschichten auf der Oberfläche werden durch Wasserstoffbrückenbindungen adsorbiert, die stärker sind als in weiterer Entfernung von der Kornoberfläche. Sie können als chemisch gebundene Hydratationsschicht angenommen werden [83], wobei es sich nicht um eine Hydratation im Sinne der Zementchemie handelt, die als Hydratisierung bezeichnet wird, siehe auch Erläuterungen zu Abbildung 52.

Die Form der Bindung von zwei Feststoffpartikeln durch adsorbierte Wassermoleküle wird verursacht, wenn sich dünne Adsorptionsschichten von benachbarten Partikeln bei Annäherung der Partikel durchdringen und überlappen wie in Abbildung 58 dargestellt. Die Größe dieser Kraft ist proportional zu der entstehenden Kontaktfläche der sich überlappenden Wasserfilme und zu der Zugspannung σ_{af} der adsorbierten Wasserfilme. Diese Haftkraft ist von der Anzahl der Kontaktpunkte, der Oberflächenrauigkeit, sowie der aufgenommenen Feuchte abhängig. Die aufgenommene Feuchte wiederum hängt davon ab, ob eine Mikroporosität durch z.B. abrasive Mahlvorgänge hervorgerufen, vorhanden ist, oder ob die Partikeloberflächen lediglich rau, jedoch geschlossen und nicht zerklüftet sind. Bei seiner Festwasserthese zur Zement erhärtung geht Keil [84] ebenfalls von pseudofesten Wasserfilmen aus, die andere physikalische Eigenschaften haben als flüssiges Wasser. Diese Wasserfilme von nur molekularen Dimensionen wirken zwischen den sich nicht unmittelbar berührenden Feinstpartikeln als Bindeglieder, worin Ende der vierziger Jahre ein Erklärungsansatz für die Grünstandsfestigkeit frischer Betone gesehen wurde.

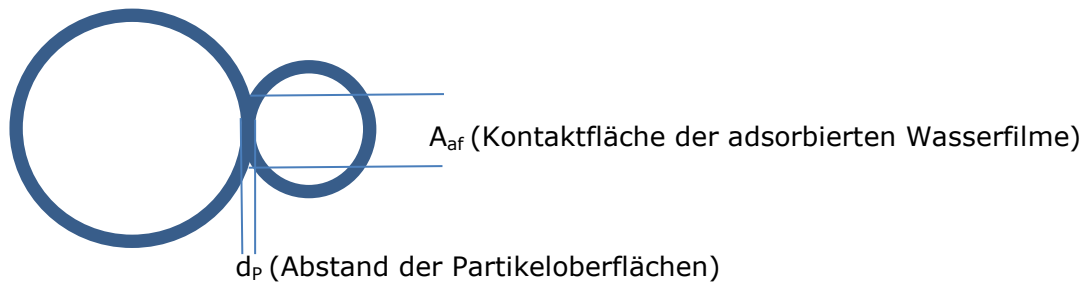


Abbildung 58: sich überlagernde Adsorptionsfilme aus Wasser an zwei unterschiedlich großen, ideal runden und glatten Partikeln

Nach Coelho [85] berechnet sich die interpartikuläre Kraft F_{af} zu:

$$F_{af} = \sigma_{af} * A_{af} \quad \text{Formel 7}$$

Die Kontaktfläche der sich überlappenden Wasserfilme errechnet er zu

$$A_{af} = 4\pi \left(d_{af} - \frac{d_p}{2} \right) \frac{D_2}{2} \left(\frac{\frac{D_1}{D_2}}{\frac{D_1}{D_2} + 1} \right) \quad \text{Formel 8}$$

Mit

D_1 = Durchmesser des größeren Partikels

D_2 = Durchmesser des kleineren Partikels,

d_p = Abstand der Partikeloberflächen,

d_{af} = Dicke des adsorbierten Filmes,

der bei beiden Partikeln als gleich groß angenommen wurde.

Über die Größe der Zugspannung σ_{af} der adsorbierten Wasserfilme existieren in der Literatur unterschiedliche Angaben. Coelho [85] bezieht sich auf Rumpf, der eine Spannung von $0,981 \text{ MN/m}^2$ annimmt. Nach Bönsch [58] liegen im adsorptiven Bereich der Wasserschichten Spannungen von 50 MN/m^2 vor. Kedzdi [30] nennt eine Größe von 1.960 MN/m^2 für die ersten Moleküllagen um Partikeloberflächen, siehe auch Kap. 2.1.1. Aus Abbildung 6 geht hervor, dass die Spannung innerhalb des adsorptiven Bereiches sehr schnell und rapide abfällt und bei ca. $0,5 \mu\text{m}$ Entfernung von der Oberfläche den Zustand des normalen Umgebungswassers erreicht hat. Daher ist für eine präzise rückverfolgbare Annahme der Zugspannung die Angabe der Entfernung zur Partikeloberfläche von Bedeutung.

Näherungsweise kann die Zugspannung in einem Adsorptionsfilm berechnet werden als die Zugspannung, die aufgebracht werden muss, um die Druckspannung in einem Wassertropfen aufgrund des in ihm herrschenden Überdruckes zu überwinden. Dabei ist der Überdruck umso größer, je kleiner der Tropfenradius ist.

Bei Anwendung der Formel

$$\Delta_p = \frac{2\sigma_{wa}}{R} \quad \text{Formel 9}$$

zur Bestimmung des Druckes in einem Wassertropfen [86] mit Radius R und der Oberflächenspannung des Wassers $\sigma_{wa} = 0,07275 \text{ [N/m]}$ erhält man für eine Wasserfilmdicke von 10 \AA Durchmesser (d.h. ca. 3 Moleküllschichten Wasser) und einem fiktiven Tropfenradius

von 5Å eine Spannung

$$\sigma_{af} = \frac{2 \cdot 0,07275}{5 \cdot 10^{-10}} = 2,91 \cdot 10^5 \left[\frac{kN}{m^2} \right]$$

entsprechend 291 MN/m². Solche sehr dünnen Adsorptionsfilme von nur wenigen Molekülschichten stellen sich lediglich durch Wasserdampfdiffusion ein. Demgegenüber sind die zu erwartenden Filmdicken bei erdfeuchten Leimen, wie sie überschlägig in Kap. 2.4.1.1 berechnet wurden, erheblich dicker.

Die Spannung von 0,981 MN/m², die Coelho bei der Berechnung der Adsorptionsfilme annimmt, entspricht bei Rückrechnung mit der Formel 9 einer Filmdicke von 0,03 µm (ca. 62 Molekülschichten Wasser).

Als Beispiel für die Abschätzung der Größenordnung der Kräfte durch sich überlappende Adsorptionsfilme wird die Adsorptionskraft berechnet für den Kontakt von zwei Partikeln mit den Durchmessern 1 µm (=D₂) und 10 µm (=D₁) für eine Spannung von 0,981 MN/m² und einer Filmdicke von 0,03 µm sowie einem Partikelabstand in Höhe der Filmdicke:

Es ist die Kontaktfläche der Adsorptionsfilme

$$A_{af} = 4\pi \left(0,03 - \frac{0,03}{2} \right) \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{10}{1}}{\frac{10}{1} + 1} \right) = 0,0857 \mu\text{m}^2 (= 8,567 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2)$$

$$\text{Und damit } F_{af} = 0,981 \cdot 10^6 \cdot 8,567 \cdot 10^{-14} \\ = 8,405 \cdot 10^{-08} \text{ [N]}$$

(Für den in Kap. 2.4.2.4 verwendeten minimalen Kontaktabstand von 0,0004 µm ist $F_{af} = 1,67 \cdot 10^{-07}$ [N].)

Im Vergleich dazu beträgt die Gewichtskraft F_{P_2} des kleineren Zementpartikels ($\rho_Z = 3.100 \text{ kg/m}^3$) P_2 :

$$F_{P_2} = \pi d^3 / 6 \cdot \rho \cdot 9,81$$

Formel 10

$$= \pi \cdot 10^{-18} / 6 \cdot 3.100 \cdot 9,81 \\ = 1,59 \cdot 10^{-11} \text{ [N].}$$

Damit ist die Adsorptionskraft im Verhältnis zu der Gewichtskraft des kleineren Partikels ausgedrückt

$$F_{af} / F_{P_2} = 5.286 \text{ mal so groß wie die Gewichtskraft des kleineren Partikels } P_2.$$

Bei einem Abstand von 0,4 nm, wie er in Kap. 2.4.2.4 für die maximal mögliche Annäherung von Festkörpern vorausgesetzt wird, verringert sich die Kontaktfläche auf $1,14 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$, und gleichzeitig erhöht sich die Zugspannung des Adhäsionsfilmes auf $\sigma_{af0,4} = 363 \text{ MN/m}^2$.

Somit ist $F_{af0,4} = 4,15 \cdot 10^{-06} \text{ N}$ deutlich höher und beträgt ca. das 261.000 fache der Gewichtskraft F_{P_2} , die höhere Zugspannung wirkt sich also stärker aus als die verringerte Kontaktfläche.

Diese Vergleiche gelten für ideal glatte und kugelige Partikel. Oberflächenrauigkeiten verringern den Einfluss der Adsorptionsfilme in etwa um die Wassermenge, die in den Tälern der mittleren Rauigkeiten Platz findet [85]. Die maßgebende Kontaktfläche weicht dann von den Überlegungen in Abbildung 58 ab und entspricht eher den Verhältnissen wie sie in Abbildung 45 dargestellt sind, d.h. vereinzelte Durchdringungen der Adsorptionsfilme an Rauigkeitserhebungen.

Selbst wenn durch die tatsächlichen Gegebenheiten der Oberfläche, der Adsorptionsspannung oder des Partikelabstandes die Adsorptionskraft nur 1/100 der errechneten betragen würde, liegt sie immer noch erheblich über der reinen gravimetrischen Kraftkomponente.

Da die Adsorptionsfilme generell als immanent zum Partikel zugehörig betrachtet werden können, aufgrund ihrer hohen Bindungskräfte zu dessen Oberfläche, und sie gleichzeitig die Vertiefungen auf der Oberfläche ausfüllen, werden dadurch außerdem die für die Van-der-Waals-Kräfte wirksamen Partikelabstände reduziert und die Van-der-Waals-Kräfte verstärken sich.

Bei auftretenden Dehnungen in Folge äußerer Zugkräfte werden die Adsorptionskräfte empfindlich reagieren und bereits bei sehr geringem Auseinanderdriften der sich überlagernden Adsorptionsfilme sehr schnell nachlassen, da die Kontaktflächen sich bereits bei geringen Abstandszunahmen stark verringern.

2.4.2.2 Kräfte durch Flüssigkeitsbrücken

In Kap. 2.4.2.1 wurden die Kräfte durch Adsorptionsschichten auf den Partikeloberflächen beschrieben. Wenn genügend Wasser zur Verfügung steht, um eine Filmdicke auszubilden, die größer ist als die Distanz des adsorptiv mit hohen Haftspannungen an der Oberfläche gebundenen Wassers, dann können sich Flüssigkeitsbrücken (sog. Zwickelkapillare) zwischen benachbarten Partikeln bilden. Bei konstanter Oberflächenspannung der Flüssigkeit ist die Höhe der Haftkraft von der geometrischen Situation der Flüssigkeitsbrücke und dem Brückenvolumen abhängig. Ein wesentlicher Faktor, der die Zugfestigkeit von Feuchtagglomeraten beeinflusst, ist das Verhältnis von Partikelabstand a zu Durchmesser d bzw. x wie in Abbildung 59 dargestellt. Auch das absolute Verhältnis des Volumens Flüssigkeit V_l zum Volumen Feststoff V_s (V_l/V_s) beeinflusst die Kapillarkraft:

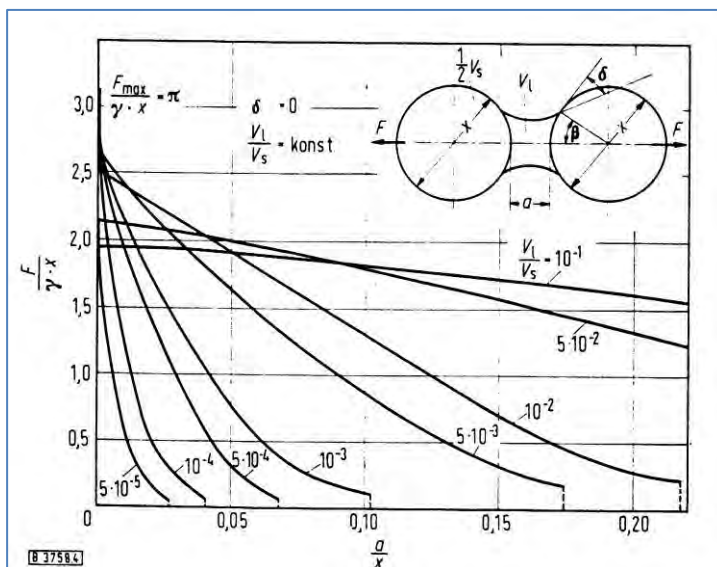


Abbildung 59: Kapillarkräfte in einer Flüssigkeitsbrücke: Einfluss von Abstandsverhältnis und Brückenvolumen auf die Haftkraft [88] ($F_{\max} = \sigma_{lq} \cdot \pi \cdot d$)

Mit kleiner werdendem Abstandsverhältnis a/x nimmt die Haftkraft zwischen den Partikeln zu. Anders ausgedrückt reagiert die Haftkraft mit kleiner werdendem relativen Brückenvolumen empfindlich auf Abstandsänderungen, der Abriss der Brücke erfolgt bei umso geringeren Dehnungen, je geringer das Brückenvolumen V_l ist. Wird eine Brücke gedehnt, so wird sie bei Erreichen des kritischen Abstandes instabil und platzt. Je kleiner

die Brücke ist, umso früher tritt Instabilität auf. Der kritische Abstand kann bereits auch durch Mikrorauhigkeiten (Spitzen und Täler) an den Kontaktstellen erreicht werden, wodurch die Haftkraft genauso verringert wird wie durch Dehungen der Brücke selber [87]. Da in der Praxis keine absolut glatten Teilchenoberflächen vorliegen, kommt der Fall $a = 0$ mit großer Wahrscheinlichkeit nicht vor. Es stellt sich ein scheinbarer Abstand a' ein, der durch die Rauigkeitserhebungen bestimmt ist. a' sollte nach [125] für Teilchen verschiedener Größe des gleichen Stoffes annähernd gleich sein. Daraus ergibt sich, dass der Einfluss der Rauigkeiten mit zunehmender Partikelgröße abnimmt, da der Quotient a/x geringer wird. Bei kleinen Partikeln wird die Haftkraft durch die Oberflächenrauigkeiten deutlicher verringert als bei größeren Partikeln.

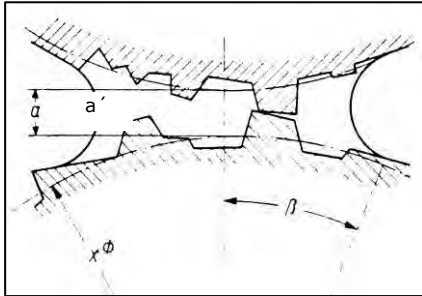


Abbildung 60: Flüssigkeitsbrücke zwischen realen Teilchen mit scheinbarem Abstand a' [125]

In Abhängigkeit der mittleren Rauigkeit und der Dicke der adsorbierten Wasserschicht nimmt die Haftkraft der Flüssigkeitsbrücke ab, da sich der Abstand der Partikel vergrößert und gleichzeitig die zu benetzende Oberfläche der Partikel zunimmt. Bei einer konstanten Wassermenge bildet sich daher ein dünnerer Wasserfilm um die Partikel aus und das Brückenvolumen nimmt ab [85]. Da dann das Abstandsverhältnis a/x mit größer werdender Teilchengröße abnimmt, werden die Zugfestigkeitswerte bei Flüssigkeitsfüllungsgraden, die isolierte Brückenmodelle zulassen, zunehmen.

Bei der Berechnung der Haftkräfte durch Flüssigkeitsbrücken wird in der Regel von gleichgroßen Kugeln ausgegangen, zwischen denen eine einzelne, isolierte und symmetrische Flüssigkeitsbrücke existiert, wie sie in Abbildung 61 dargestellt ist [88].

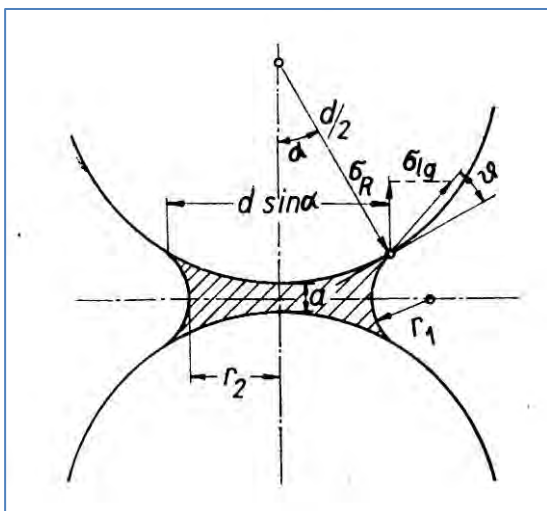


Abbildung 61: Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei gleich großen, ideal glatten Kugeln [88]

Die Bindung ist auf die Kapillarkraft durch den kapillaren Unterdruck in der Flüssigkeitsbrücke und auf die Randkraft längs des Dreiphasenkontaktes Partikel-Wasser-Luft (Oberflächenspannung) zurückzuführen. Es sind gerade so viele Flüssigkeitsanteile vorhanden,

dass sich ein Verhältnis wie in Abbildung 47b) einstellt. Wenn die Zwischenräume völlig mit Flüssigkeit ausgefüllt sind wie in Abbildung 48b), so wirkt nur ein kapillarer Unterdruck, da keine Dreiphasenkontakte existieren.

Für den Fall idealer, isolierter Flüssigkeitsbrücken wie er in der Abbildung 61 und Abbildung 62 dargestellt ist, ergibt sich die Haftkraft der Flüssigkeitsbrücke H_{lq} aus den Anteilen der Randkraft σ_R infolge Oberflächenspannung und der Kapillarkraft zu

$$H_{lq} = \sigma_{lq} \pi d_p \left[\sin(\alpha + \vartheta) \sin \alpha + \frac{d_p}{4} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \sin^2 \alpha \right] \quad \text{Formel 11}$$

d_p = Partikeldurchmesser

σ_{lq} = Oberflächenspannung der Flüssigkeit ($7,275 \cdot 10^{-08}$ [N/ μ m] für Wasser 20°C)

α = halber Benetzungswinkel

ϑ = Randwinkel

Bei benetzenden Flüssigkeiten beträgt der Randwinkel ϑ maximal $\pi/2$. Unter der Annahme vollständiger Benetzung der Partikeloberfläche aufgrund von vorhandenen Adsorptionsschichten, wie sie bei erdfeuchten Wasser-Feststoffgemischen gem. Kap. 2.4.2.1 zu erwarten sind, ist $\vartheta = 0$ [89]. Damit reduziert sich Formel 11 zu

$$H_{lq} = \sigma_{lq} \pi d_p \left[\sin^2 \alpha + \frac{d_p}{4} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \sin^2 \alpha \right] \quad \text{Formel 12}$$

Der jeweils bezogen auf die Flüssigkeit konvexe Azimutradius r_2 und der konkave Meridionalradius r_1 können nach [90] aus der geometrischen Situation von Abbildung 62 abgeleitet werden:

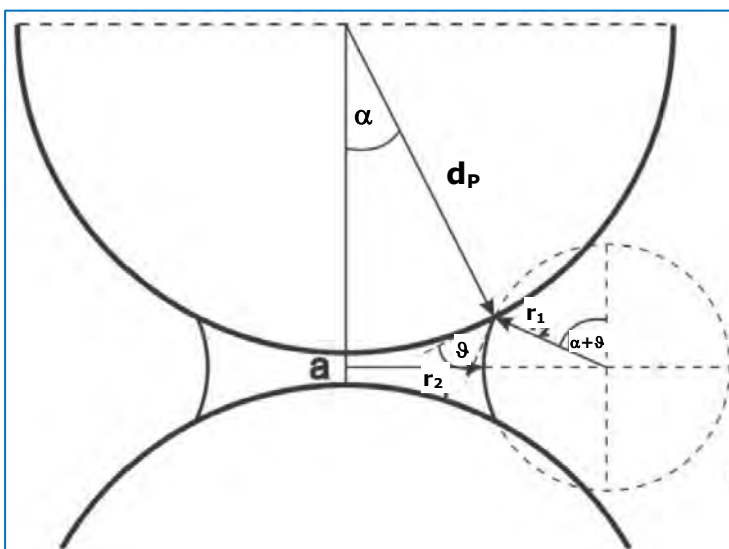


Abbildung 62: Zweidimensionale Darstellung der Flüssigkeitsbrückengeometrie für den Kontaktfall gleich großer Kugeln mit Abstand a in Anlehnung an [90] mit Randwinkel ϑ , d.h. ohne Adsorptionsschichten an den Oberfläche

Die Hauptkrümmungsradien der Flüssigkeitsbrücke berechnen sich zu [90]:

$$r_2 = \frac{d_p}{2} \sin \alpha - r_1 (1 - \sin(\alpha + \vartheta))$$

Formel 13

$$r_1 = \frac{\frac{d_p}{2} (1 - \cos \alpha) + \frac{a}{2}}{\cos(\alpha + \vartheta)}$$

Formel 14

Als Beispiel wird für zwei gleich große Partikel mit $d_p = 1 \mu\text{m}$ und einem Abstand $a = 0,03 \mu\text{m}$ die Haftkraft bei vollständiger Benetzung (d.h. Adsorptionsfilme sind vorhanden) berechnet. Zur Berechnung eines Winkels α wird angenommen, dass beide Partikel mit Wasserfilmen mit einer Dicke $d_{lq} = 0,03 \mu\text{m}$ umgeben sind, die gleich groß sind wie der Abstand a .

Für diese Verhältnisse gilt

$$\cos \alpha = \frac{\frac{1}{2}(D_p + d_{lq})}{\frac{D_p}{2} + d_{lq}}$$

Formel 15

und damit beträgt $\alpha = 13,67^\circ$.

Es errechnen sich $r_1 = 0,03 \mu\text{m}$ (entspricht d_{lq}), $r_2 = 0,0952 \mu\text{m}$ und damit $H_{lq} = 8,5618 \cdot 10^{-08} \text{ [N]}$.

Das Verhältnis der Haftkraft durch die Flüssigkeitsbrücke zur Gewichtskraft des Partikels mit $D_p = 1 \mu\text{m}$ (Zement) beträgt damit 5.385.

Gemäß Abbildung 59 beträgt die maximale Haftkraft einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei gleich großen Partikeln mit Durchmesser $D_p = 1 \mu\text{m}$:

$$H_{lq1-1, \max} = \pi \sigma_{lq} D_p$$

Formel 16

$= 2,29 \cdot 10^{-07} \text{ N}$, so dass die tatsächliche Haftkraft in diesem Beispiel bei ca. 38 % der maximal möglichen Kraft liegt ($H_{lq} / H_{lq1-1, \max} = 0,38$).

Je kleiner das Brückenvolumen, desto größer ist die Haftkraft, deren Maximum lediglich von dem Partikeldurchmesser abhängig ist. Wenn beide Partikel deutlich größer sind und einen Durchmesser von $10 \mu\text{m}$ aufweisen bei unverändertem Abstand und Schichtdicken, dann wird die Haftkraft ansteigen, da das Verhältnis V_l/V_s (Brückenvolumen zu Feststoffvolumen) insgesamt 2000 mal kleiner ist als bei zwei Partikeln von $1 \mu\text{m}$ und das Verhältnis a/x bzw. a/D_p ebenfalls 10 mal kleiner ist.

Für andere geometrische Verhältnisse als in Abbildung 61 bzw. 57 ist eine Berechnung der Haftkraft nur schwer möglich. Die mit Formel 12 angegebenen Zusammenhänge gelten für gleich große Kugeln mit ideal glatter Oberfläche. Die überwiegende Zahl der Arbeiten auf dem Gebiet geht von diesen vereinfachenden Annahmen bei der Ableitung der theoretischen Haftkräfte aus [92].

Bei unterschiedlich großen Partikeln, wie sie in den meisten Partikelverteilungen wie z.B. Zement, Flugasche oder Kalksteinmehl vorkommen, ist die Berechnung des Brückenvolumens relativ aufwendig [91]. Für unterschiedlich große Partikel finden sich komplexere Ansätze für die Berechnung. Auf Mehrotra und Sastry [92] geht ein Ansatz zurück, der den Fall von Flüssigkeitsbrücken zwischen Partikeln unterschiedlicher Größe berücksichtigt, wie er bei statistischen Partikelverteilungen vorkommt.

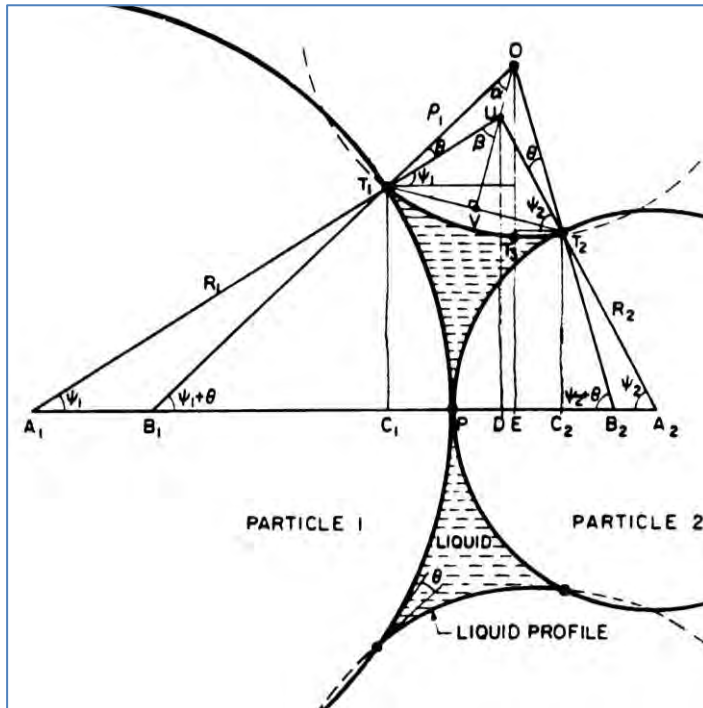


Abbildung 63: Flüssigkeitsbrücke zwischen Partikeln unterschiedlicher Größe [92]; mit ψ_1, ψ_2 als unterschiedliche Benetzungswinkel, θ als Randwinkel

Für diesen Kontaktfall tritt die maximale Haftkraft einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei kugelförmigen Partikeln mit unterschiedlichen Durchmessern D_{P1} und D_{P2} und Radien R_1 und R_2 auf, wenn die beiden Benetzungswinkel und der Randwinkel gegen Null gehen. Sie beträgt:

$$H_{lq1-2,max} = \pi \sigma_{lq} (R_1 + R_2) \text{ [N]}.$$

Formel 17

Damit ist die maximale Haftkraft $H_{lq1-2,max}$ zwischen einem großen und einem kleinen Partikel immer geringer als die maximale Haftkraft $H_{lq1-1,max}$ zwischen zwei großen Partikeln. Für den Fall $R_2 = R_1$ wird Formel 17 zu Formel 16.

Bedingt durch die asymmetrische geometrische Situation der Flüssigkeitsbrücke ist die Berechnung der Haftkraft aufwändiger. Der Hauptkrümmungsradius r_1 (dargestellt als ρ_1 in Abbildung 63) kann exakt berechnet werden, während für den Hauptkrümmungsradius r_2 (senkrecht zur Linie der Partikelmittelpunkte) ein mittlerer Radius angenähert werden muss:

Nach [92] ist der Brückenwinkel

$$\psi_1 = 2 \tan^{-1} \left[\frac{R_2}{R_1} \tan \left(\frac{\psi_2}{2} \right) \right]$$

Formel 18

und die Krümmungsradien der Flüssigkeitsbrücke

$$\rho_1 = \frac{2}{(R_1 + R_2)} \frac{2}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \frac{\left[\frac{R_2}{R_1} (1 - \cos\psi_2) + (1 - \cos\psi_1) \right]}{(\cos\psi_1 + \cos\psi_2)} \quad \text{Formel 19}$$

$$* \frac{\cos \left[\left(\frac{\psi_1 + \psi_2}{2} \right) \right]}{\cos \left[\left(\frac{\psi_1 + \psi_2 + 2\theta}{2} \right) \right]}$$

$$\rho_2 = \frac{2}{(R_1 + R_2)} \left[\frac{2\rho_1}{(R_1 + R_2)} \sin(\psi_2 + \theta) + \frac{2 \frac{R_2}{R_1} \sin\psi_2}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)} \right] * \ln \left[\tan \frac{\psi_1 + \theta}{2} \tan \frac{\psi_2 + \theta}{2} \right] \quad \text{Formel 20}$$

$$- \frac{2\rho_1}{(R_1 + R_2)}$$

Damit berechnet sich H_{lq1-2} zu:

$$H_{lq1-2} = \pi * \sigma_{lq} R_1^2 \sin^2 \psi_1 \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) + 2\sigma_{lq} \pi R_1 \sin(\psi_1 + \theta) \sin\psi_1 \quad \text{Formel 21}$$

O.a. Formeln [92] beschreiben den Kontaktfall der Partikel, ein Abstand a ist darin nicht berücksichtigt. Der für die Berechnung der Haftkraft H_{lq1-2} erforderliche Brückenwinkel Ψ_2 kann für zwei unterschiedlich große Partikel mit zwei unterschiedlich dicken Wasserfilmen berechnet werden zu:

$$\cos\psi_2 = \frac{(R_2 - d_{lq1})}{(R_2 + d_{lq2})} \quad \text{Formel 22}$$

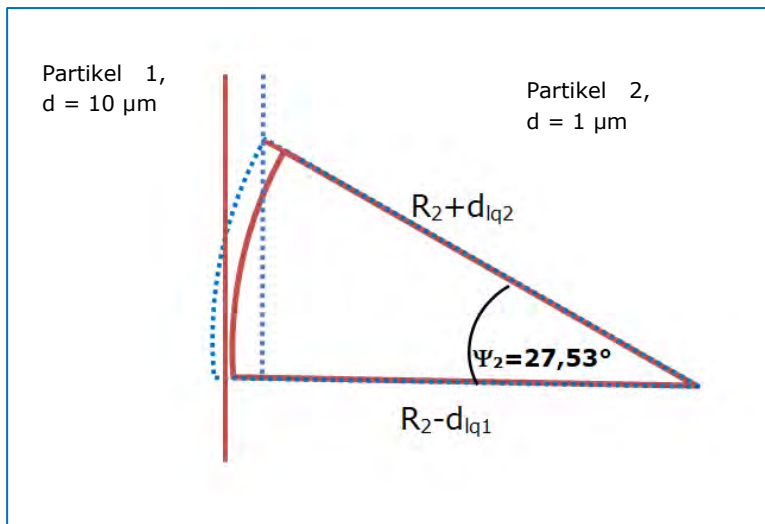


Abbildung 64: Detail der geometrischen Kontaktsituation zweier Partikel mit Wasserfilmen von jeweils 0,03 µm

Als Beispiel dient der Partikelkontakt, der in Kap. 2.4.2.1 bei der Berechnung der Adsorptionskraft angenommen wurde, die Partikel 1 und 2 sind in Abbildung 64 als stark vergrößerter Ausschnitt dargestellt:

Es ist Partikel 1 = 10µm ($R_1 = 5\mu\text{m}$, links) und Partikel 2 = 1 µm groß ($R_2 = 0,5 \mu\text{m}$, rechts). Der Flüssigkeitsfilm um beide Partikel beträgt 0,03 µm, wobei angenommen wird, dass der Film an der Kontaktzone verdrängt wird und keinen Abstand bildet. Der Kontaktwinkel θ (=9) beträgt Null wegen vorhandener Adsorptionsschichten.

Es ist mit Formel 22:

$$\cos\psi_2 = \frac{(0,5 - 0,03)}{(0,5 + 0,03)}$$

$$\psi_2 = 27,53^\circ$$

$$\text{Und } \psi_1 = 2 * \tan^{-1} \left[\frac{0,5}{5} * \tan \left(\frac{27,53}{2} \right) \right] = 2,81^\circ. \quad (\text{Formel 18})$$

(Anm.: beide Winkel wurden durch geometrische Konstruktion der Kontaktsituation aus Abbildung 64 überprüft.)

Damit ist

$$\rho_1 = \frac{2}{(5+0,5)} \frac{2}{1+\frac{0,5}{5}} \frac{\left[\frac{0,5}{5}(1-\cos 27,53) + (1-\cos 2,81) \right]}{(\cos 2,81 + \cos 27,53)} * \frac{\cos \left[\frac{(2,81+27,53)}{2} \right]}{\cos \left[\frac{(2,81+27,53)}{2} \right]} = 4,392 * 10^{-03}$$

und

$$\rho_2 = \frac{2}{(5+0,5)} \frac{\left[\frac{2*4,392*10^{-03}}{(5+0,5)} \sin(27,53) + \frac{2*\frac{0,5}{5} \sin 27,53}{(1+\frac{0,5}{5})} \right]}{(2,81+27,53) - \pi} * \ln \left[\tan \frac{2,81}{2} \tan \frac{27,53}{2} \right] - \frac{2*4,392*10^{-03}}{(5+0,5)} = -7,39 * 10^{-03}$$

Eingesetzt in Formel 21 ist

$$H_{lq1-2} = \pi * 7,275 * 10^{-08} * 5^2 * \sin^2 2,81 \left(\frac{1}{4,392 * 10^{-03}} + \frac{1}{-7,39 * 10^{-03}} \right) + 2 * 7,275 * 10^{-08} * \pi * 5 * \sin(2,81) * \sin 2,81$$

$H_{lq1-2} = 1,275 * 10^{-06}$ [N] die Haftkraft der Flüssigkeitsbrücke zwischen den beiden Partikeln.

Im Vergleich zur Gewichtskraft des kleineren Partikels F_{p2} aus Formel 10 ist

$$H_{lq1-2} / F_{p2} = 1,275 * 10^{-06} / 1,59 * 10^{-11} = 80.189 \text{ mal größer.}$$

Nach Formel 17 ist die maximale Haftkraft der Brücke

$H_{lq1-2, \max} = \pi \sigma_{lq} (R_1 + R_2) = \pi * 7,275 * (5 + 0,5) = 1,257 * 10^{-06}$ [N] und liegt damit geringfügig unter dem Ergebnis von H_{lq1-2} . Vermutlich liegt die Abweichung darin begründet, dass es sich bei den Formeln für zwei ungleiche Partikel lediglich um Näherungslösungen handelt, mit denen die Brückengeometrien erfasst werden können.

Um sie mit der Adsorptionskraft F_{af} vergleichen zu können, muss diese wie in Kap.2.4.2.1 berechnet werden, jedoch ohne Partikelabstand.

F_{af} beträgt dann $1,678 * 10^{-07}$ N. Damit ist die Haftkraft der Flüssigkeitsbrücke 7,6 mal größer als die Adsorptionskraft. Die Adsorptionskraft beträgt also ca. 13 % der Haftkraft einer Flüssigkeitsbrücke bei annähernd gleichen Verhältnissen.

2.4.2.3 Verformungen an Partikeln und Flüssigkeitsbrücken

Flüssigkeitsbrücken bewirken durch ihre Haftkraft eine Verformung der Partikel, die überwiegend elastisch ist. Wenn äußere Zugbeanspruchungen einwirken, gehen zunächst

diese Verformungen zurück bis anschließend nach dem Überschreiten der maximalen Zugkraft bei größeren Wegen die Haftkräfte der Flüssigkeitsbrücken langsam abnehmen, bis ihre kritische Zerreißlänge überschritten wird [87].

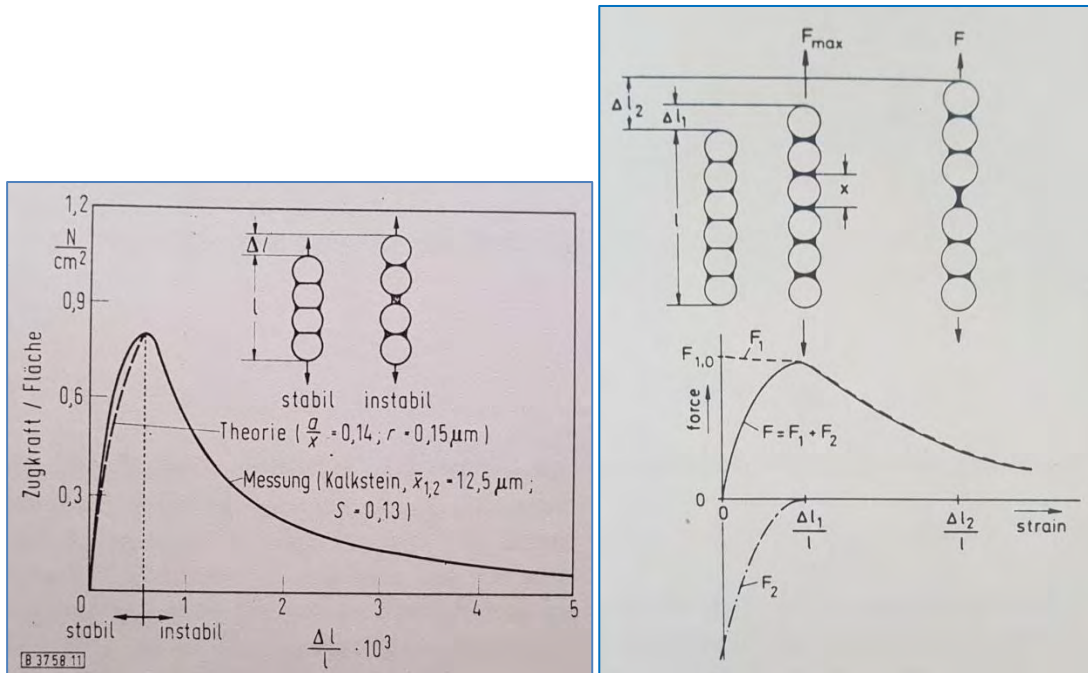


Abbildung 65: links: Dehnungsverhalten von Feuchtagglomeraten, Vergleich zwischen Theorie und Experiment nach Rumpf [119], rechts: Modell für das Dehnungsverhalten feuchter Agglomerate nach Schubert, Hermann und Rumpf [93]; F_1 = äußere Zugkraft, F_2 = Druckkraft zwischen den Partikeln infolge Zugkräfte der Flüssigkeitsbrücken

Aus Abbildung 65 ist erkennbar, dass sich die Flüssigkeitsbrücken zwischen Partikeln, die miteinander in Kontakt sind, verformen, wenn Dehnungen aufgebracht werden. Dadurch verringert sich die Kontaktfläche zum Partikel und die Haftkraft nimmt ab, ohne sofort und schlagartig auf Null zu sinken. Ein Abriss der Brücken an der schwächsten Stelle und damit der Wegfall der Zugkraft findet erst bei wesentlich größeren Längenänderungen statt [93].

Auf dem ansteigenden Ast der Zugkraft wird die maximale Kraft bereits bei sehr geringen Längenänderungen erreicht, siehe rechtes Bild von Abbildung 65. Dieser ansteigende Ast entsteht dadurch, dass sich Partikel durch die wirkenden Haftkräfte der Flüssigkeitsbrücken elastisch verformen. In diesem Zustand wird der dargestellten Aneinanderreihung von Partikeln die Länge l zugewiesen, und eine Längenänderung Δl_1 eintritt. Bei auftretender äußerer Zugkraft werden zunächst die elastischen Verformungen wieder aufgehoben. Es stellt sich eine Verlängerung Δl_1 ein, und die Verstärkungen der Haftkräfte, die sich auf Grund der Vergrößerung der Kontaktflächen durch die elastischen Verformungen eingestellt haben, gehen zurück. Die Haftkräfte der Flüssigkeitsbrücken verringern sich mit der Reduzierung der Kontaktfläche und der beginnenden Einschnürung der Brücke durch die Längenänderung und die Abstandsvergrößerung der Partikeloberflächen.

Die Deformationslänge Δl_1 kann nach [93] berechnet werden zu:

$$\Delta l_1 = \frac{l}{x} \sqrt[3]{\frac{9(1-\nu^2)^2}{2R_{df} * E^2}} * H_{lq}^{2/3}$$

Formel 23

Mit

l = Länge der Agglomeratkette (bei zwei Partikeln ist $l=2x$)

x = Partikeldurchmesser

R_{df} = Radius der Deformation an den Partikeln

H_{lq} = Haftkraft der Flüssigkeitsbrücke ohne Deformation

ν = Querdehnungszahl des Partikelmaterials

E = E-Modul des Partikelmaterials

Als Radius der Deformation R_{df} wurden bei Rumpf Annahmen getroffen, die rekursiv aus Versuchsergebnissen gewonnen und nicht näher dargelegt wurden. Wenn man davon ausgeht, dass eine Partikeldeformation auf Grund der anziehenden Haftkräfte der Flüssigkeitsbrücke erfolgt, erscheint es als eine Näherung zutreffend, dass die Deformation sich höchstens über den wirksamen Azimutradius r_2 der Brücke erstreckt, da in diesem Bereich auch die Haftkräfte wirken.

Als Beispiel wird ein Partikelkontakt aus zwei Partikeln mit je $1\mu\text{m}$ Durchmesser (daher $l=2\mu\text{m}$), jeweils einem Film $d_{lq}=0,03\mu\text{m}$ berechnet mit Abstand $a=0$.

Dabei sind $r_2(=R_{df})=0,146\mu\text{m}$, $r_1=0,03\mu\text{m}$ und $H_{lq}=1,916\cdot 10^{-07}\text{N}$.

Unter der Annahme dass näherungsweise $R_{df} = r_2$ ist und für die Materialkonstanten $\nu=0,27$ für Zementstein [94] und $E=50\text{ GPa}$ ($\approx 0,50\text{ N}/\mu\text{m}^2$) für unhydratisierten Zement [95] angesetzt werden, ist:

$$\Delta l_1 = \frac{2}{x} \sqrt[3]{\frac{9(1-0,27^2)^2}{2 \cdot 0,146 \cdot 0,50^2}} * 1,916^{-07^{2/3}} = 3,145 \cdot 10^{-04} \mu\text{m}$$

Jeder der beiden Partikel deformiert sich also um $1,572 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}$, das entspricht einer Längenänderung von $0,157\text{ ‰}$ unter der Annahme ideal glatter Oberflächen. Wenn die Oberflächen mit Rauigkeitsspitzen belegt sind, wird die Deformation größer sein, weil die Rauigkeiten kleinere Durchmesser aufweisen und leichter verformt werden können.

Eine auf Messergebnissen basierende Näherungsgleichung für die Zerreißlänge a_{krit} einer Flüssigkeitsbrücke wurde in Abhängigkeit vom Brückenvolumen V_L von Lian et al. [96] entwickelt, dabei wird das Brückenvolumen nach [90] empirisch angenähert:

$$a_{krit} = (1 + 0,5\theta) \sqrt[3]{V_L} \quad \text{Formel 24}$$

und

$$V_L = 0,24R \sin^4 \beta \left(1 + 3 \frac{a}{R}\right) (1 + 1,1 \sin \theta) \quad \text{Formel 25}$$

Mit

R = Partikelradius (Annahme gleich großer Partikel)

β = Kontaktwinkel

a = Abstand Partikeloberflächen

θ = Randwinkel (i.d.R. = 0 bei benetzten Oberflächen und Wasser)

Als Beispiel wird für zwei gleich große Partikel mit $D_p = 1\mu\text{m}$ und einem Abstand $a = 0,03\mu\text{m}$ die Haftkraft bei vollständiger Benetzung (d.h. Adsorptionsfilme sind vorhanden) berechnet. Zur Annahme eines Winkels α wird angenommen, dass beide Partikel mit Wasserfilmen mit einer Dicke $d_{lq} = 0,03\mu\text{m}$ umgeben sind, die gleich groß ist wie der

Abstand a . Der Kontaktwinkel beträgt $13,67^\circ$ wie am Bsp. gleich großer Kugeln bereits berechnet.

$$\text{Es ist } V_L = 0,24 * 0,5 * \sin^4 13,67 \left(1 + 3 \frac{0,03}{0,5}\right) (1 + 1,1 \sin 0) = 4,417 * 10^{-04} [\mu\text{m}^3]$$

$$\text{Und } a_{\text{krit}} = (1 + 0,5 * 0)^3 \sqrt[3]{4,417 * 10^{-04}} = 0,076 [\mu\text{m}]$$

Der mögliche Weg ist $a_{\text{krit}} - a = 0,046 \mu\text{m}$. Bis zu dessen Erreichen wird die Haftkraft H_{lq} immer weiter abnehmen.

Im Vergleich mit der Darstellung der Abbildung 65 ist

$$\frac{\Delta l}{l} * 10^3 = \frac{0,046}{1 + 1 + 0,03} = 0,0227 * 10^3 = 22,7.$$

Im Vergleich zu dem Wert von 5 aus Abbildung 65, bei dem immer noch eine Restkraft $\neq 0$ wirkt, ist das Ergebnis von 22,7 bei einer Kraft $= 0$ in guter Übereinstimmung.

Mit V_L und der vorher für den symmetrischen Fall gleich großer Kugeln errechneten Haftkraft $H_{lq} = 8,5618 * 10^{-08} [\text{N}]$ kann anhand von Abbildung 59 überprüft werden, ob der Wert plausibel ist. Es gilt für einen Vergleich mit Abbildung 59: $F / (\gamma * x) = H_{lq} / (\sigma_{lq} * D_p)$.

$$\text{Es ist } H_{lq} / (\sigma_{lq} * D_p) = 1,18$$

Aus der Abbildung erhält man mit dem Verhältnis

$$V_L / V_S = 4,417 * 10^{-04} / (2 * (\pi * 1^3 / 6)) = 4,22 * 10^{-04}$$

und $a/x (= a/D_p) = 0,03$ einen ablesbaren Wert von ca. 1,0, der die Größenordnungen in etwa bestätigt.

Der Einfluss der Rauigkeiten wird in der Literatur unterschiedlich bewertet. Einerseits wird davon ausgegangen, dass die Rauigkeiten keinen verringernden Einfluss auf die Größe der Haftkraft haben, weil die Täler mit Flüssigkeit ausgefüllt

werden und die Erhebungen in die Flüssigkeitsbrücke hineinragen und so den wirksamen Abstand nicht ändern [Rumpf, Schubert]. Bei sehr niedrigen Feuchten legen neuere Messergebnisse jedoch nahe, dass sich dann nur sehr wenige kleine Flüssigkeitsbrücken zwischen einzelnen Rauigkeitserhebungen ausbilden, wie auch in Abbildung 45 dargestellt. Erst mit zunehmender Feuchte steigt die Anzahl der Mikrobrücken bis sie sich dann zu einer größeren Brücke vereinigen [62],[90].

Auch das Deformationsverhalten wird durch Oberflächenrauigkeiten beeinflusst werden.

Die Fläche der Rauigkeiten, die in Kontakt miteinander stehen, ist wesentlich kleiner als der zu erwartende Deformationsradius des gesamten Partikels, daher wirken auf diese Erhebungen unter der Annahme gleicher Kontaktkraft zwischen den Partikeln wesentlich größere Spannungen, so dass sich zunächst die Rauigkeiten einebnen werden bevor dann der an den ehemaligen Tälern der Rauigkeiten beginnende Kernbereich der Partikel ebenfalls deformiert wird. Die Gesamtdeformation und damit die Annäherung der Partikelmittelpunkte aneinander wird durch die Rauigkeiten größer ausfallen als es mit Formel 23 berechnet werden kann.

2.4.2.4 Van-der-Waals-Kräfte

Van-der-Waals-Kräfte ergeben sich aufgrund der elektrischen Dipolmomente und sind immer vorhanden, wenn Atome bzw. Moleküle aufeinander wirken. Anders als bei Adhäsion

sionskräften oder den Haftkräften durch Flüssigkeitsbrücken, die nur dann wirken, wenn Wasser vorhanden ist, existieren Van-der-Waals-Kräfte auch zwischen trockenen Partikeloberflächen, ebenso wie zwischen zwei Luftblasen in einer Flüssigkeit. Für die Berechnung der Van-der-Waals-Wechselwirkungen von Körpern lassen sich zwei theoretische Ansätze unterscheiden. Die mikroskopische Berechnung (Hamaker) [97] geht vom Prinzip der Additivität der Wechselwirkungen von Atom- bzw. Molekülpaaren aus, so dass die Van-der-Waals-Kräfte zwischen den Körpern durch Integration über alle Paare von Atomen und Molekülen berechnet werden. Die makroskopische Berechnung (Lifshitz) [97] geht von den optischen Eigenschaften der wechselwirkenden Körper aus. Hierbei werden die Van-der-Waals-Kräfte aus dem imaginären Teil der komplexen frequenzabhängigen Dielektrizitätskonstanten bestimmt [97]. Im Gegensatz zur mikroskopischen Berechnung nach Hamaker berücksichtigt die Lifshitz-Theorie alle Arten der Van-der-Waals-Kräfte: Keesom-, Debye-, und London-Kraft. Sie berücksichtigt alle Bereiche des elektromagnetischen Spektrums, deren Wellenlänge groß ist im Vergleich zu den atomaren Abständen. Sie verliert ihre Gültigkeit, wenn die Dimensionen des makroskopischen Körpers nicht mehr groß gegenüber atomaren Abständen sind und wenn die beteiligten Medien nicht isotrop sind. Ein detaillierter Vergleich des theoretischen Hintergrundes beider Ansätze ist in [98] enthalten.

Aus physikalischer Sicht befriedigt die Theorie von Lifshitz mehr [88]. Dennoch wird gerade in neueren Veröffentlichungen zur Schüttgutmechanik überwiegend auf die Anwendung der Theorie von Hamaker Bezug genommen [99]. Die geringe Reichweite der Van-der-Waals-Wechselwirkungen hat zur Folge, dass beim Kontakt von Körpern die unmittelbare Geometrie der Kontaktstellen für die Intensität der Wechselwirkungen sehr maßgeblich ist. Damit gewinnen Kornform und Oberflächenrauigkeiten entscheidenden Einfluss auf die Haftkräfte. Die Rolle der Van-der-Waals-Kräfte nimmt nach [100] bei Partikeldurchmessern $> 100 \mu\text{m}$ stark ab.

In Abhängigkeit der Adhäsionspartner (Kugel/Kugel, Kugel/Platte) gibt Schubert an ideal glatten, starren Modellkörpern für Abstände $< 50 \text{ nm}$ folgende Formeln für die Berechnung der Van-der-Waals-Kräfte an:

$$F_{\text{Kugel/Kugel}} = \frac{A_H}{6a^2} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{Formel 26}$$

$$F_{\text{Kugel/Platte}} = \frac{A_H R_1}{6a^2} \quad \text{Formel 27}$$

A_H = Hamaker-Konstante [J], [Nm] , siehe Erläuterung zu Formel 29

a = Abstand der Festkörper; bei Kontakt: $a = 0,4 \text{ Nanometer [nm]}$.

R_1, R_2 = Radius der Partikel 1 bzw. 2

Die Formeln gelten für Abstände $a < 50 \text{ nm}$. Für größere Abstände sind die Van-der-Waals-Kräfte wesentlich kleiner als sie sich nach diesen Formeln ergäben. Für den Abstandswert a wird im Kontaktfall der Festkörper ein Gleichgewichtsabstand von $0,4 \text{ nm}$ eingesetzt, der auf Untersuchungen von Krupp [101] zurückgeht. Unterhalb dieses Abstandes wachsen die intermolekularen Repulsivkräfte stark an.

Nach Molerus [102] gilt für Partikel mit einem Durchmesser $d_{p1,2} > 1 \mu\text{m}$, dass deren Haftkraftverhalten durch die Oberflächenrauigkeiten im Bereich von unter $0,1 \mu\text{m}$ fest-

gelegt ist. Abbildung 66 stellt den Zusammenhang dar für den Kontaktfall Platte/rauhige Kugel für eine Hamaker-Konstante von $A = 8 \cdot 10^{-19}$ J.

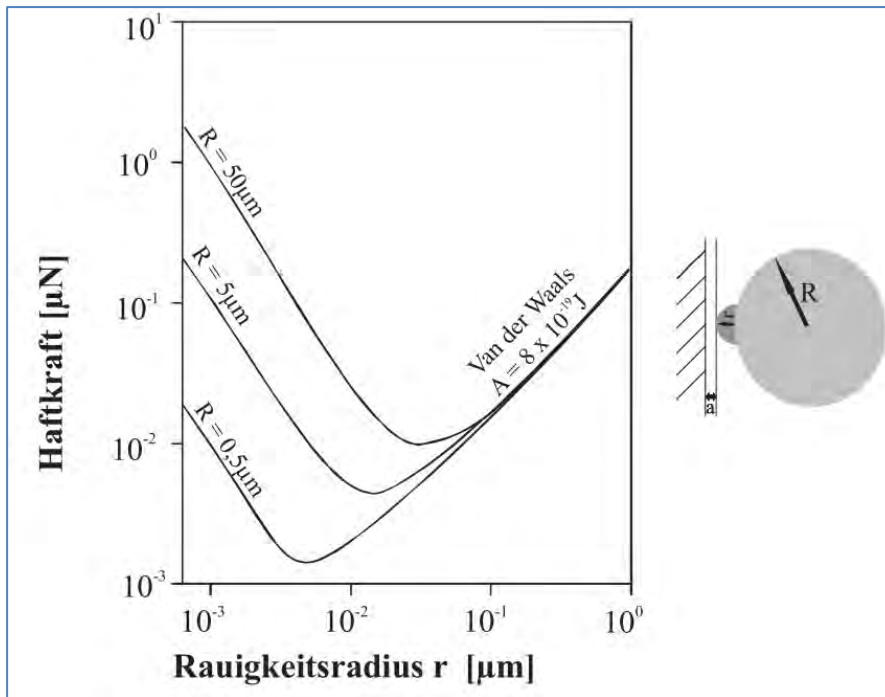


Abbildung 66: Einfluss der Rauigkeiten auf die Van-der-Waals Haftkraft nach [119], entnommen aus [103]

Zunächst nimmt die Haftkraft mit steigendem Radius r der Rauigkeit stark ab, um mit weiter wachsendem r dann wieder anzusteigen. Bei kleinen Rauigkeitserhebungen dominiert noch die auf die Grundkugel wirkende Adhäsionskraft, deren Abstand sich jedoch mit wachsendem r immer weiter vergrößert und die Adhäsionskraft dadurch verringert. Bei weiterer Zunahme von r wird dann die Van-der-Waals-Kraft der Rauigkeitserhebung für die gesamte Adhäsionskraft entscheidend, und diese steigt wegen der Zunahme von r wieder an. In dem Moment verliert der Radius des Grundpartikels seine Bedeutung, daher verlaufen die Kurven für alle drei Durchmesser im rechten Bereich identisch. Konkret am Beispiel von Abbildung 66 [103] bedeutet dies, dass bei einem Partikel mit $10 \mu\text{m}$ Durchmesser ($R = 5 \mu\text{m}$) die Van-der-Waals-Kraft am größten ist bei Oberflächenrauigkeiten von $0,001 \mu\text{m}$ und $1 \mu\text{m}$, sie beträgt ca. $0,3 \mu\text{N}$. Sie ist mit nur $0,007 \mu\text{N}$ minimal bei Rauigkeiten von ca. $0,02 \mu\text{m}$. Bedingt dadurch lassen sich Van-der-Waals-Kräfte kaum zuverlässig unter realen Bedingungen berechnen, sie müssen gemessen werden [97]. Bei unregelmäßig geformten Partikeln, wie es z. B. bei Zement der Fall ist, sind daher die Durchmesser der Oberflächenrauigkeiten anstelle der Partikeldurchmesser einzusetzen mit den oben geschilderten Folgen, d.h. Vergrößerung oder Verringerung der Van-der-Waals-Kraft.

O.a. Formeln gelten für ideale Verhältnisse im Vakuum bzw. in einer Gasatmosphäre. Sind die Teilchen in einer Flüssigkeit dispergiert, werden die Van-der-Waals-Kräfte dadurch verändert. Für die Adhäsionskräfte zwischen zwei Teilchen ist dann zusätzlich deren Wechselwirkung zu den Flüssigkeitsmolekülen durch Modifizierung der Hamaker-Konstanten zu berücksichtigen. Für den allgemeinen Fall zweier unterschiedlicher Körper (1,2), die durch eine Flüssigkeit als drittes Medium wirken (3), ergibt sich die komplexe Hamaker-Konstante A_{132} zu

$$A_{132} = A_{12} + A_{33} - A_{13} - A_{23}$$

Formel 28

A_{33} = Hamaker-Konstante der Flüssigkeit

Die kombinierten Hamaker-Konstanten wie A_{12} werden dabei aus dem geometrischen Mittel der Konstanten für die einzelnen Komponenten berechnet [104], d.h.

$$A_{12} = \frac{2A_{11}A_{22}}{A_{11} + A_{22}} \approx \sqrt{A_{11}A_{22}}$$

Formel 29

A_{11} = Hamaker-Konstante des Körpers aus Material 1

A_{22} = Hamaker-Konstante des Körpers aus Material 2

Für den Kontaktfall von zwei gleichen Materialien in Gegenwart eines dritten Mediums (z.B. Wasser):

$$A_{131} = A_{11} + A_{33} - 2A_{13} = \frac{(A_{11} - A_{33})^2}{A_{11} + A_{33}} \approx (\sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{33}})^2$$

Formel 30

Die aus den komplexen Hamaker-Konstanten berechnete Anziehungskraft ist umso geringer, je mehr die Konstanten der einzelnen Komponenten (Partikelsubstanzen und Flüssigkeit) übereinstimmen. Die Hamaker-Konstante ist ein materialspezifischer Wert. Sie beträgt nach Haist für Zement $5,24 \cdot 10^{-24}$ J bzw. Nm ($\approx 5,24 \cdot 10^{-18}$ μ Nm) [105] und für Wasser $4,20 \cdot 10^{-20}$ J bzw. Nm ($\approx 4,20 \cdot 10^{-14}$ μ Nm), wobei hierfür die Angaben in der Literatur stark streuen [106]. Je größer der Unterschied zwischen den Konstanten ist, desto größer ist die Anziehungskraft.

Wässrige Adsorptionsschichten an Partikeln bewirken eine Zunahme der Van-der-Waals-Kräfte, weil die adsorptiv gebundenen Wasserschichten auf Grund ihrer hohen Spannungen als zum Partikel gehörend betrachtet werden können, wodurch die Distanz zwischen zwei Partikeln reduziert wird. Die Van-der-Waals-Kräfte wachsen daher an, da sie umso größer werden, je geringer der interpartikuläre Abstand ist [85]. Auch wird der Einfluss der Oberflächenrauigkeiten durch Adsorptionsschichten verringert werden, da sie so wirken, als wenn die mittleren Rauigkeitserhebungen verringert werden.

Damit kann die Van-der-Waals Kraft für den Beispielfall, wie er bereits bei Kap. 2.4.2.1 betrachtet wurde, wie folgt berechnet werden (Kontakt von zwei Kugelpartikeln gleichen Materials, Zement, mit den Durchmessern $1 \mu\text{m}$ ($=D_2$) und $10 \mu\text{m}$ ($=D_1$) und einer Wasserfilmdicke von $0,03 \mu\text{m}$ sowie einem Partikelabstand in Höhe der Filmdicke):

Mit der kombinierten Hamaker-Konstante für Zement-Wasser-Zement-Kontakt

$$A_{131} = A_{ZWZ} = \frac{(5,24 \cdot 10^{-18} - 4,20 \cdot 10^{-14})^2}{5,24 \cdot 10^{-18} + 4,20 \cdot 10^{-14}} = 4,198 \cdot 10^{-14} \mu\text{Nm}$$

ist die wirkende Van-der-Waals-Kraft:

$$F_{\text{vdW,ZWZ}} = \frac{4,198 \cdot 10^{-14} \cdot 0,5 \cdot 5}{6 \cdot 0,03^2 \cdot 0,5 + 5} = 3,53 \cdot 10^{-12} \text{N}$$

Bei einer Distanz von $0,03 \mu\text{m}$ beträgt damit das Verhältnis der Van-der-Waals-Kraft zur Gewichtskraft F_{P2} des kleineren Partikels

$$F_{\text{vdW,ZWZ}} / F_{P2} = 3,53 \cdot 10^{-12} / 1,59 \cdot 10^{-11} = 0,222$$

Wenn jedoch davon ausgegangen wird, dass lediglich der minimale Kontaktabstand von $0,4 \text{ nm}$ ($\approx 0,0004 \mu\text{m}$) zwischen den Partikeln vorliegt, dann wächst die Van-der-Waals-

Kraft an auf $F_{\text{vdW,ZWZ}} = 1,99 \cdot 10^{-08} \text{ N}$, und damit beträgt das Verhältnis $F_{\text{vdW,ZWZ}} / F_{\text{P2}} = 1,99 \cdot 10^{-08} / 1,59 \cdot 10^{-11} = 1.252$.

Dieser Vergleich der beiden Abstände verdeutlicht, dass die Van-der-Waals-Kräfte sehr stark abhängig sind von dem Abstand der Oberflächen und mit zunehmender Entfernung sehr rasch abnehmen.

2.4.2.5 Van-der-Waals-Kräfte durch plastische Verformung

Neben den beschriebenen Van-der-Waals-Kräften treten zusätzliche Van-der-Waals-Kräfte dann auf, wenn durch Kräfte, die an den Kontaktpunkten der Partikel übertragen werden, plastische Deformationen der Kontaktpunkte auftreten [102]. Die Deformationen an den Kontaktpunkten werden durch Kräfte verursacht, die sich aus Haftkräften aufgrund von z.B. Adsorptionsfilmen, Flüssigkeitsbrücken und Van-der-Waals-Kräften sowie aus externen Kräften durch Auflasten zusammensetzen [88].

Die Haftkraftverstärkung, die von plastischen Deformationen im Kontaktbereich ausgeht, wird auf Umordnungen und Verformungen sehr kleiner Rauigkeitserhebungen im Nanometerbereich zurückgeführt. Beides trägt dazu bei, den wirksamen Abstand der Haftpartner zu verringern, was zu einer Verstärkung der Adhäsionskräfte führt. Bei stärkerer Anpressung können auch größerer Bereiche der Kontaktzone plastisch verformt werden. Die Haftkraftverstärkung ergibt sich aus der zusätzlichen Wirkung des Van-der-Waals-Druckes der verformten Kontaktflächen [87]. Abbildung 67 zeigt eine durch Deformation vergrößerte Kontaktfläche. Dadurch ist die Fläche, über die der mikroplastische Fließdruck wirkt, deutlich größer, und dadurch auch die absolute Haftkraft in diesem Kontakt.

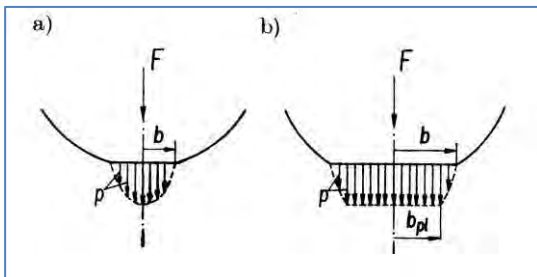


Abbildung 67: Abplattung und Druckverlauf im Bereich der Kontaktfläche einer Kugel bei a) rein plastischer und b) elastisch-plastischer Verformung [97]

Mit der Vereinfachung, dass die Intensität der Haftkraft nur von den Komponenten der Kontaktkräfte normal zur Partikeloberfläche abhängt, gilt für die zusätzlichen Van-der-Waals-Kräfte aufgrund plastischer Verformungen der Kontaktpunkte der Haftpartner [97]:

$$F_{\text{VDW,pl}} = \frac{A_H}{6 \cdot \pi \cdot a^3 \cdot p_f} (\Sigma F_p + N_p) \quad \text{Formel 31}$$

p_f = Mikroplastischer plastischer Fließdruck [N/mm^2]

ΣF_p = Summe aller in einem Partikelkontakt übertragenen Haftkräfte (innere Kräfte)

N_p = Anteil der in einem Partikelkontakt übertragenen äußeren Kraft (Auflast)

a = Abstand der Festkörper; bei Kontakt: $a = 0,4 \text{ nm}$.

A_H = Hamaker-Konstante, bzw. kombinierte Hamaker-Konstante A_{131} [Nm]

Auch hierbei wird die kombinierte Hamaker-Konstante verwendet, sobald der Kontakt in Anwesenheit von Wasser stattfindet.

Der mikroplastische Fließdruck p_f ist nach [107] gleichbedeutend mit der mikroskopischen Materialhärte HV ermittelt mit dem Messverfahren nach Vickers. Diese beträgt für Kalkstein $HV = 500 \text{ N/mm}^2$. Für nicht hydratisierten Zement ist p_f nicht bekannt, weil das Messverfahren nach Vickers, bei dem die Länge eines Diamanteindrucks in eine Oberfläche gemessen wird, an einzelnen Zementkörnern nicht angewendet werden kann. Jedoch wurde mit dem Verfahren nach Vickers die Mikrohärtigkeit an Beton gemessen [108]. Sie liegt für die Rezeptur mit dem höchsten untersuchten Zementgehalt von 370 kg/m^3 und dem niedrigstem w/z-Wert von 0,40 bei $HV = 732 \text{ N/mm}^2$.

Betonserie	Zement kg/m ³	Wasser l/m ³	Flußsand 0/4 mm kg/m ³	Flußkies 4/16 mm kg/m ³	Theoret. Frischbeton- rohddichte kg/m ³	w/z-Wert	Verarbeit- barkeit nach Vebe s	Mikro- härte N/mm ²
1	290	188,5	786	1042	2306,5	0,65	23	256
2	310	186,0	780	1034	2310,0	0,60	20	343
3	330	181,5	779	1033	2323,5	0,55	13	471
4	350	166,0	789	1046	2351,0	0,475	12	558
5	370	148,0	802	1064	2384,0	0,40	17	732

Abbildung 68: Mikrohärtigkeit an unterschiedlichen Betonzusammensetzungen, Darstellung zusammengefasst nach [108].

Für nichthydratisierten Zement wird p_f vermutlich noch höher sein, wohingegen bei den Reaktionsphasen mit Wasser, die innerhalb der ersten Minuten bereits auftreten, die mikroskopische Materialhärte deutlich geringer sein wird. Zum Vergleich beträgt die Mikrohärtigkeit für Feldspat 792 N/mm^2 (ist mit der Stahlfeile ritzbar), wohingegen Talk bei $2,4 \text{ N/mm}^2$ liegt (ist mit dem Fingernagel schabbar) [109].

Als Beispiel wird die zusätzliche, plastische Van-der-Waals-Kraft berechnet unter der Annahme einer Mikrohärtigkeit von 732 N/mm^2 ($\cong 7,32 \cdot 10^{-04} \text{ N/\mu m}^2$) und einer Mikrohärtigkeit von $2,4 \text{ N/mm}^2$ an dem bereits bekannten Beispiel

((Kontakt von zwei Kugelpartikeln gleichen Materials, Zement, mit den Durchmessern $1 \mu\text{m}$ ($=D_2$) und $10 \mu\text{m}$ ($=D_1$), minimaler Kontaktabstand von $0,4 \text{ nm}$ ($\cong 0,0004 \mu\text{m}$)). Dabei werden entsprechend der bereits berechneten Beispiele die ermittelten Kräfte aus Adsorptionsschichten, Flüssigkeitsbrücken und Van-der-Waals-Kräften, jeweils für den Kontaktabstand $0,0004 \mu\text{m}$ berechnet und addiert zur wirkenden Gesamthaftkraft des Partikelkontaktes:

$$\text{Adsorptionskraft Wasserfilme: } F_{af} = 16,7 \cdot 10^{-08} \text{ N}$$

$$\text{Haftkraft Flüssigkeitsbrücke: } H_{lq1-2} = 128 \cdot 10^{-08} \text{ N}$$

$$\text{Van-der-Waals-Kraft: } F_{vdW,ZWZ} = 1,99 \cdot 10^{-08} \text{ N}$$

$$\text{Und damit } \Sigma F_p = 147 \cdot 10^{-08} \text{ N.}$$

Damit errechnet sich

$$F_{VDW,pl} = \frac{4,198 \cdot 10^{-14}}{6 \cdot \pi \cdot 0,0004^3 \cdot 7,32 \cdot 10^{-04}} \cdot 1,47 \cdot 10^{-06} = 6,99 \cdot 10^{-08} \text{ N}$$

Somit ist der plastische Anteil zusätzlicher Van-der-Waals-Kräfte 3,5 mal höher als die Van-der-Waals-Kraft. Tabelle 5 enthält die Anteile der einzelnen Kraftarten an der Gesamtkraft des Beispiels:

Tabelle 5: Anteile der einzelnen Kraftmechanismen für zwei ideal glatte, runde Zementpartikel mit 10 µm und 1 µm Durchmesser und einem Wasserfilm von jeweils 0,03 µm.

Kraftart	Zement ohne Hydratationsprodukte, Annahme: Mikrohärtte 732 N/mm ² (ca. Feldspat)		Zement mit Hydratationsprodukten, Annahme: Mikrohärtte 2,4 N/mm ² (ca. Talk)	
	[N]	Prozent	[N]	Prozent
Adsorptionsfilme	1,670*10 ⁻⁰⁷	10,37	1,670*10 ⁻⁰⁷	0,73
Flüssigkeitsbrücke	1,280*10 ⁻⁰⁶	83,29	1,280*10 ⁻⁰⁶	5,62
Van-der-Waal	1,990*10 ⁻⁰⁸	1,29	1,990*10 ⁻⁰⁸	0,09
Van-der-Waal plastisch	6,990*10 ⁻⁰⁸	4,55	2,130*10 ⁻⁰⁵	93,56
Gesamthaftkraft	1,540*10 ⁻⁰⁶	100,00	2,280*10 ⁻⁰⁵	100,00
Gewichtskraft beider Partikel (F _{P1} + F _{P2})	1,594*10 ⁻¹¹	0,00104	1,594*10 ⁻¹¹	0,00007

Das Beispiel zeigt den bedeutenden Effekt der Haftkraftverstärkung durch plastische Verformungen an Partikeln, die in gegenseitigem Kontakt miteinander stehen. Die Verformungen aufgrund unterschiedlicher Mikrohärtte wirken sich unmittelbar lediglich auf die Kraftart Van-der-Waal plastisch aus, siehe Formel 31. Alle anderen Kraftarten bleiben in ihrer absoluten Größe unverändert. Der in Tabelle 5 enthaltene Vergleich einer harten (Feldspat) mit einer weichen (Talk) Mikrohärtte zeigt, dass sich die Gesamthaftkraft erhöht, sie ist bei weicher Mikrohärtte 14,8 mal höher als bei harter Mikrohärtte. Auch die prozentualen Anteile der einzelnen Kraftkomponenten verschieben sich, bei weicher Mikrohärtte dominiert die plastische Van-der-Waals-Kraft, Kräfte aus der Flüssigkeitsbrücke und den Adsorptionsfilmen verlieren ihr gegenüber an Bedeutung. Durch eine weichere Oberfläche ist die Deformation der Partikel, die durch die Haftkräfte aneinander gedrückt werden, größer, dadurch vergrößert sich die gesamte Kontaktfläche. Die Haftkräfte werden über die Kontaktfläche übertragen, daher bewirkt eine Vergrößerung der Kontaktfläche eine Erhöhung der Haftkräfte. Das Ergebnis aus diesem Beispiel, einer Erhöhung der Haftkräfte bei weichen Oberflächen, stimmt mit den Erläuterungen zu Abbildung 67 überein und ist somit plausibel. Die Gewichtskraft beider Partikel ist zum Vergleich angegeben, sie ist in beiden Fällen deutlich geringer als die Gesamthaftkraft.

Außerdem führt die Deformation der Partikel noch zu einer Zunahme der Kontaktgeometrien für die Adsorptionsfilme und die Flüssigkeitsbrücken, so dass auch diese Kraftanteile durch die Deformation der Partikel eine weitere Verstärkung erfahren. Diese zusätzlichen Anteile sind an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Jedoch sind in Abbildung 69 plastisch verformte Kontaktflächen als negativer Abstand dargestellt um die Auswirkung der Deformation zu veranschaulichen.

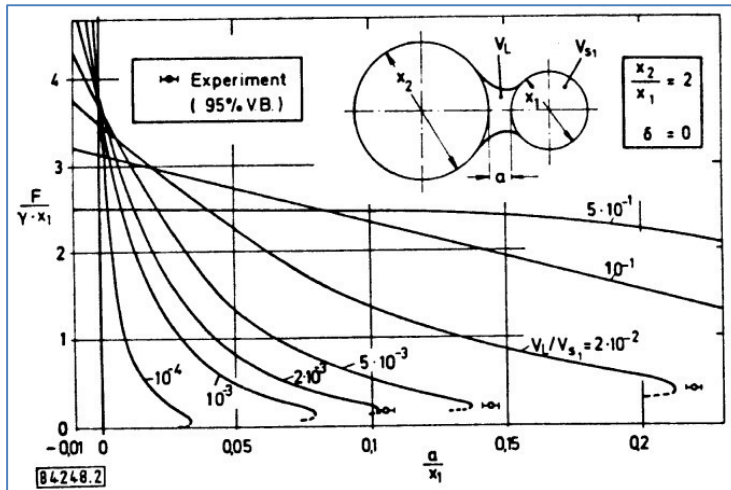


Abbildung 69: Bezogenen Haftkraft einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln, ergänzt um negative Abstände als Modell für verformte Kontaktflächen [87]

Dabei nimmt die bezogene Haftkraft insbesondere für kleine Brückenvolumina weiter deutlich zu und liegt über den Werten bei normaler Berührung mit Abstand $a=0$. So gesehen verstärkt sich zunächst die Van-der-Waals-Kraft aufgrund von plastischen Verformungen durch Kräfte aus Flüssigkeitsbrücken, die gleichzeitig noch einmal durch die auftretenden Verformungen eine Verstärkung erfahren.

Die Rechnung ist mit mehreren Unsicherheiten behaftet. So wurden hier die Partikeldurchmesser eingesetzt, wengleich auch bei Partikeln kleiner gleich $1 \mu\text{m}$ stattdessen die Höhe der Oberflächenrauigkeiten verwendet werden sollte. Dies würde zu einer geringfügigen Verringerung von lediglich den Van-der-Waals-Kräften führen, was somit keinen großen Einfluss auf die Höhe der plastischen Kraftkomponente hat, da ihr Anteil an der auslösenden Kraft gering ist. Andererseits ist die Mikrohärtigkeit der frischen Hydratationsprodukte vermutlich näher an der Größe von Talk als an der von Feldspat. Unter dieser Annahme verlagern sich die prozentualen Anteile gravierend und die Komponente der plastischen Van-der-Waals-Kräfte ist dominierend mit über 93 %. Dies ist umso bemerkenswerter, als dass sie ausgelöst wird durch die vorhandenen Kräfte, die dann in der absoluten Größe deutlich hinter die plastischen Van-der-Waals-Kräfte zurückfallen. In dieser Größenordnung führt das Auftreten der hohen plastischen Haftkraftanteile zu einer weiteren Verstärkung im Sinne der Theorie zweiter Ordnung.

Auch ohne die ersten Hydratationsprodukte können bereits alleine Adsorptionsschichten von Wasser auf den Oberflächen der Partikel die Oberflächenhärte (und damit den plastischen Fließdruck, also die Mikrohärtigkeit) vermindern und so die Verformbarkeit der Oberflächen begünstigen [88].

Wenn zusätzlich noch äußere Kräfte auf die Partikel einwirken, wie es bei den verwendeten Auflasten während der Verarbeitung erdfeuchter Betone im industriellen Rüttelpressverfahren der Fall ist, dann wird dadurch eine zusätzliche Verstärkung erzeugt.

Die Gesamtabplattung h beider Haftpartner kann nach Molerus [102] berechnet werden zu

$$h = \frac{\Sigma F_P}{D_1 + D_2} \pi p_f \quad [\mu\text{m}]$$

Formel 32

Für die in Tabelle 5 enthaltenen zwei Fälle beträgt $h = 0,7 \text{ nm}$ bei einer Mikrohärtigkeit von 732 N/mm^2 bzw. $h = 0,21 \text{ }\mu\text{m}$ bei der sehr weichen Härte von $2,4 \text{ N/mm}^2$.

Mit dieser Verformung können dann erneut die Berechnungen der Adsorptions- und Brückenkräfte vorgenommen werden.

2.4.2.6 Elektrostatische Kräfte

Die Reichweite von elektrostatischen Kräften ist größer als die der van-der-Waals-Kräfte und der Flüssigkeitsbrücken. Sie treten zwischen gleich- oder gegensinnig geladenen Körpern auf und haben eine abstoßende bzw. anziehende Wirkung. Steigt die relative Luftfeuchtigkeit der gasförmigen Umgebung an, so verringern sich die elektrostatischen Wechselwirkungen. In Partikelpulvern können elektrostatische Kräfte unter anderem aufgrund der sogenannten triboelektrischen Aufladung auftreten, beispielsweise verursacht durch Berührung, bzw. Reibung von Partikeln gegeneinander oder an Wänden, dabei lädt sich das Material mit der größeren Dielektrizitätskonstante positiv auf [110].

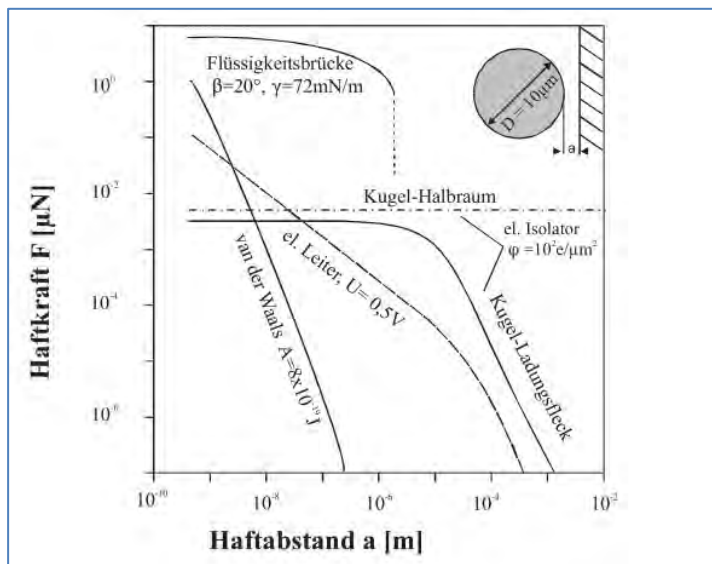


Abbildung 70: Anziehung als Funktion des Partikelabstandes nach Rumpf [119] mit 0,4 nm Kontaktabstand, entnommen aus [103]

An Abbildung 70 und Abbildung 71 [111] ist für jeweils ideal glatte Kugeln ohne Rauigkeiten dargestellt, dass die elektrostatischen Kräfte deutlich geringer sind als Kräfte durch Flüssigkeitsbrücken und die van-der-Waals-Kräfte, auch unter idealen Verhältnissen bei trockenen Partikelkontakten. Jedoch reagieren sie unempfindlicher auf Abstandsänderungen und wirken auch dann noch, wenn die beiden anderen Kraftarten bereits deutlich abfallen [112].

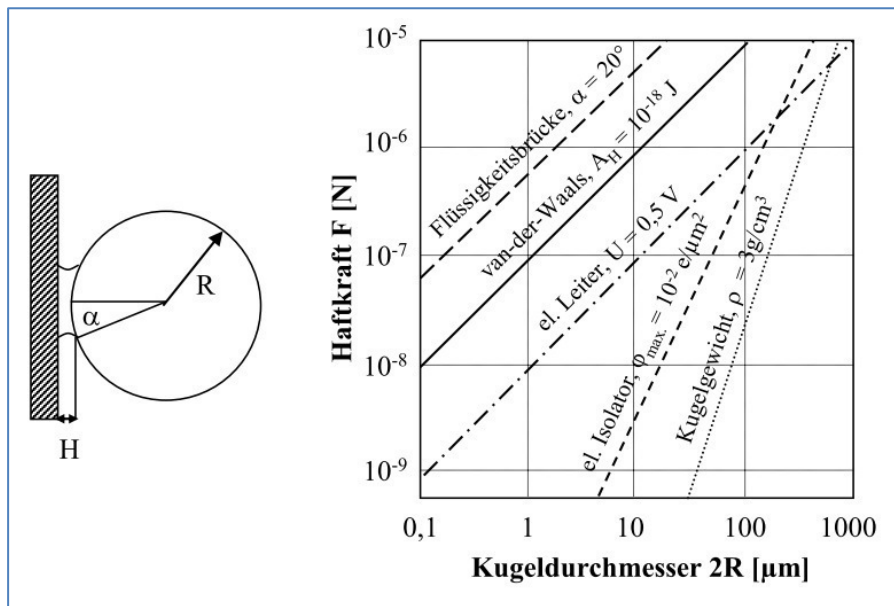


Abbildung 71: Haftkräfte am Kugel-Platte-Model nach Rumpf, aus [111]

Beide Abbildungen beschreiben das Verhalten elektrostatischer Kräfte bei ideal trockenen Bedingungen, unter denen sie deutlich ausgeprägt sind.

Außerdem treten sie bei flüssigkeitsgesättigten Partikeldispersionen wie z.B. Zementleimen und Betonen in weichen und flüssigen Konsistenzbereichen auf.

Treten Feststoffpartikel wie z.B. Zement, Flugasche oder Kalksteinmehl in Kontakt mit Wasser, bildet sich eine Wasserschicht an den Kornoberflächen aus, deren Eigenschaften sich deutlich von dem Wasser unterscheiden, das weiter entfernt von einer Kornoberfläche ist. Die Schicht von Wassermolekülen unmittelbar an der Oberfläche eines polaren und damit benetzbaren Festkörpers bezeichnet man als Hydrathülle. Daran schließt sich eine Schicht mit veränderter Wasserstruktur an, die häufig als Grenzschichtwasser oder vicinales Wasser bezeichnet wird. Kezdi [30] beschreibt eine sehr hohe Oberflächenspannung in dem strukturierten Bereich, die erst in einer Entfernung von ca. 0,5 μm von der Kornoberfläche auf das Normalniveau des Umgebungswassers absinkt, siehe auch Abbildung 6. Eine elektrostatische Kraftkomponente F_{el} kommt dadurch zustande, dass die Wechselwirkungen zwischen den oberflächennahen Ionen oder Atomen der Feststoffpartikel und den Wassermolekülen nicht nur zur Bildung einer Hydrathülle führen, sondern auch zum Entstehen einer Oberflächenladung. Durch Adsorptionsvorgänge wird die Oberflächenladung weiter modifiziert und es bildet sich eine elektrische Doppelschicht aus [97][113]. Diese Doppelschicht ist das Resultat des Gleichgewichtszustandes zwischen der Oberflächenladungsdichte auf dem Festkörper und einer Raumladungsdichte in der angrenzenden Flüssigkeit. Der Teil der Doppelschicht, der aus beweglichen Ionen besteht, wird als diffuse Doppelschicht bezeichnet. Für die Dicke der diffusen Doppelschicht gibt Nägele [114] bei polaren, hydrophilen Stoffen ca. 10 nm an.

Aufgrund von Relativbewegungen der Ionen zwischen der Hydrathülle und der angrenzenden Doppelschicht entsteht eine Potentialdifferenz. Jener Teil der Potentialdifferenz einer elektrischen Doppelschicht, der zwischen unbeeinflusster Lösung und der von der Teilchenoberfläche fest gebundenen Hydrathülle besteht, ist messbar und wird als elektrokinetisches Potenzial oder Zeta-Potenzial bezeichnet [115]. Zusammenfassungen über die unterschiedlichen theoretischen Ansätze zum Aufbau der Doppelschicht und über

Meßmethoden des Zeta-Potenzials sind an anderer Stelle ausführlich beschrieben [114], [115], [116], [117], [118].

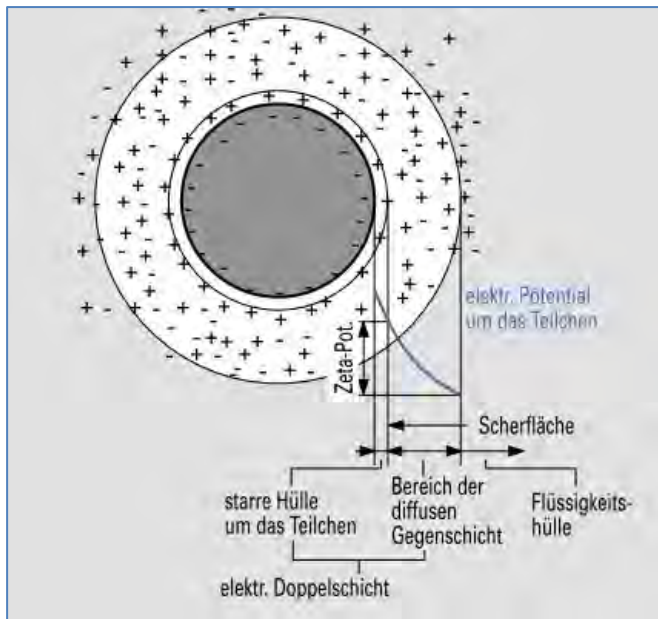


Abbildung 72: Schematische Darstellung der elektrischen Doppelschichten und des Zeta-Potentials bei flüssigkeitsgesättigten Partikelsystemen [118]

Das Zeta-Potential ist ein elektrokinetisches Potential in der Grenzfläche zwischen dem bewegten und dem starren Teil der Doppelschicht in Abbildung 72, die sich an der Phasengrenze zwischen Festkörpern und wässrigen Lösungen bildet. Das Potential gibt Hinweise über die Ladungsverhältnisse an der Partikeloberfläche.

Eine weitere Kraftkomponente ist die sterische Kraft F_{St} , die auf die Strukturierung der Hydrathülle zurückzuführen ist. Im Falle hydrophiler Teilchenoberflächen bewirkt sie bei genügender Annäherung eine Abstoßung und für hydrophobe Oberflächen eine Anziehung. Nach [97] läßt sich die Strukturierung der Hydrathülle durch Adsorption hydrophiler Makromoleküle verstärken, was im gesättigten Porenraum (mit hinreichender Bewegungsmöglichkeit) die Dispergierung verbessert. Auch bei gesättigten, beweglichen Systemen kommt Lowke zu dem Schluss, dass die elektrostatischen Kräfte der Doppelschicht-Wechselwirkungen keinen maßgeblichen Einfluss auf das Bewegungsverhalten haben, sondern dass hierfür die sterischen Kräfte maßgeblich sind [25]. Die sterischen Kräfte sind auch für Sedimentations- und Entmischungsprozesse bei selbstverdichtenden Betonen und Leimen verantwortlich, sie können durch Ladungsträger auf den Molekülen der PCE-Zusatzmittel gezielt beeinflusst werden.

Da erdfeuchte Betone i.d.R. einen ungesättigten Porenraum besitzen, sind die einzelnen Partikel untereinander nicht frei beweglich. Eine Dispersion kann daher nicht stattfinden, vielmehr wird aufgrund der eingeschränkten Beweglichkeit eine Agglomeration bzw. Koagulation zwangsweise vorgegeben. Auch ungestörte Wasserschichten liegen nicht vor, da die Kontaktabstände hierfür zu gering sind. Die Lagerung der Partikel und deren Verhalten bei einer Umordnung aufgrund externer Kräfte wird durch die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Kräfte beeinflusst. Auch können erdfeuchte Systeme nicht entmischen, was ein Beleg dafür ist, dass sterische Kräfte nicht im nennenswertem Umfang wirken.

Von den bisher beschriebenen Kräften ist gem. Rumpf [119] die elektrostatische Kraft die schwächste und insbesondere im Falle geringer vorhandener Flüssigkeitsmengen nicht die maßgebende Kraft bei der Anlagerung der Partikel untereinander. Nur im Falle von großen Partikeln ($> 100 \mu\text{m}$) in trockenen Systemen können die Rauigkeitsunempfindlichen elektrostatischen Anziehungskräfte der Partikel untereinander auf Grund von Überschussladungen einen maßgeblichen Einfluss auf Haftung und Agglomeration gewinnen. Bei größeren Abständen der Festkörper gewinnen die elektrostatischen Anziehungskräfte an Bedeutung. Van der Waals-Kräfte klingen sehr schnell ab und sind bei Abständen $> 1 \mu\text{m}$ praktisch Null. Flüssigkeitsbrücken kommen nur zum Tragen, wenn sie bei sehr kleinem Abstand gebildet wurden und der Abstand danach vergrößert wird. Sie reißen bei einem bestimmten Abstands-Durchmesser Verhältnis ab. Bei Abständen $> 1 \mu\text{m}$ wirken nur noch elektrostatische Kräfte. Sie beeinflussen die Anlagerungsvorgänge bevor die Haftung realisiert wird. Dennoch trägt sie gerade im Anfangsstadium der Partikelagglomeration ebenfalls zur Gruppierung der Partikel bei.

Eine mathematisch exakte Beschreibung der Größe der anziehenden bzw. abstoßenden Kräfte, die von Oberflächenladungen ausgehen ist, aufgrund der Vielzahl der Einflussparameter wie z.B. Art und Konzentration der Ionen, Partikelgröße und -konzentration, nur unter stark vereinfachten Voraussetzungen näherungsweise möglich [114].

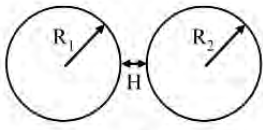
Modellgeometrie	Elektrischer Leiter	Elektrischer Isolator
 <p>Kugel/Kugel</p>	$F_{\text{el}} = \frac{1}{2} \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot U^2 \cdot \frac{R}{H}$	$F_{\text{el}} = \frac{\pi}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{\varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot R^2}{\left(1 + \frac{H}{R_1 \cdot R_2}\right)^2}$

Abbildung 73: Elektrostatische Kräfte nach [115], aus [111]

Je nachdem, ob es sich um elektrische Leiter oder Isolatoren handelt, können die elektrostatischen Kräfte mit den in Abbildung 73 enthaltenen Formeln berechnet werden.

Darin sind:

ϵ_r = Dielektrizitätskonstante des Mediums zwischen den Haftpartnern

ϵ_0 = Influenzkonstante ($\epsilon_r = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{As/Vm}$)

U = Kontaktpotential ($U = (0,1 \leq V \leq 0,7 \text{ V})$)

φ = Flächenladungsdichte ($\varphi_{\text{max}} = 100 \text{e}/\mu\text{m}^2$; $1\text{e} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$)

Grundsätzlich gilt, dass die Oberflächenladung für stofflich gleichartige Teilchen unter den jeweiligen Bedingungen gleich ist. Daraus folgt eine Abstoßung der Teilchen, wenn sich die diffusen Teile der elektrischen Doppelschichten durchdringen. Auch die Hydrathülle, in der die Wassermoleküle an der Teilchenoberfläche gebunden sind, setzt dem Annähern der Teilchen einen Widerstand entgegen, die sog. sterische Kraft. Im Falle stofflich unterschiedlicher Teilchen, z.B. Zement und Quarzsand können entgegengesetzte Oberflächenladungen vorliegen. In diesem Fall ziehen sich die Partikel und die umgebenden Hydrathüllen gegenseitig an. Nach [120] ist die Bedeutung elektrostatischer Kräfte auf den Bereich von Partikelgrößen $< 10 \mu\text{m}$ begrenzt und verringert sich in Anwesenheit von Feuchtigkeit, da das Wasser einen Ladungsverlust auf den Teilchenoberflächen bewirkt.

Aufgrund der dargestellten Einschränkungen der Wirkungsweise elektrostatischer Kräfte bei feuchten, unbeweglichen und ungesättigten Systemen, wie sie bei erdfeuchten Zementleimen auftreten, werden diese im weiteren Verlauf nicht betrachtet.

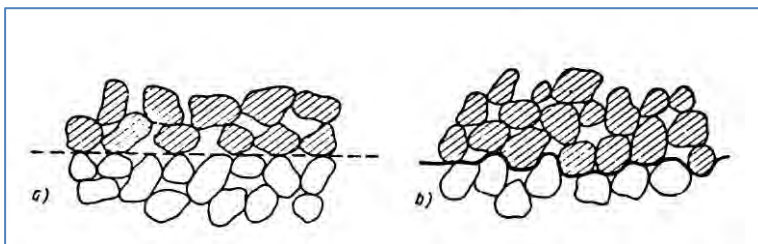
2.4.2.7 Reibung und Verzahnung

In den Kontaktpunkten von Partikeln in einem Schüttgut oder einem Erdstoff können die bereits erwähnten Kräfte sowie äußere Kräfte als Normalkräfte übertragen werden. Werden die Partikel gegeneinander verschoben, treten zusätzlich Schubspannungen auf, die einer Verschiebung entgegen wirken.

Der Widerstand gegen die Verschiebung setzt sich aus folgenden drei Komponenten zusammen [122]:

1. Reibungswiderstand auf der Oberfläche der Körner
2. Umordnung durch gegenseitige Verdrehung und Verzahnung der Körner
3. durch Anheben verbundene Volumenvergrößerung (Dilatation)

Bei dieser Art der Kraftübertragung handelt es sich um Kräfte, die ohne äußere Einflüsse zwischen Partikeln nicht wirken. Vielmehr wirken Reibung und Verzahnung erst dann kraftübertragend, wenn Verschiebungen zwischen den Partikeln stattfinden und sich durch Reibung und Verzahnung ein Widerstand gegen die Verschiebungsrichtung ausbildet. Abbildung 74 verdeutlicht die Komponenten am Beispiel eines unterschiedlich dicht gelagerten Sandes.



**Abbildung 74: Scherwiderstand in einem körnigen Erdstoff [30],
a) Reibung auf der Oberfläche der Körner; b) Verzahnung der Körner**

Der Reibungswiderstand wirkt der Gleitung eines Kornes auf dem anderen entgegen und ist von der Oberflächenrauigkeit der Körner abhängig. Die Verzahnung der Körner nimmt mit der Dichte der Lagerung zu, da die Körner zueinander eine engere Position einnehmen und ein Anheben der Körner erforderlich ist, um eine seitliche Bewegung durchzuführen. Dadurch kommt es zu einer Volumenvergrößerung (Dilatation) des dicht gelagerten Schüttgutes. Die Dilatation ist umso größer, je ungleichförmiger die Einzelkörner in der betrachteten Gesamtmatrix sind. Die Ungleichförmigkeit ist ein Kennwert für den Größenunterschied der Körner einer Matrix. Der Widerstand gegen Verdrehen bei gegenseitiger Verzahnung ist bei kantigen und unregelmäßig geformten Körnern größer als bei ideal runden Körnern [51], [30], [121]. Die Schubspannungen, die aufgrund des Gesamtwiderstandes von der Matrix der Körner aufgenommen werden können und den Verschiebungen entgegenwirken, sind von der Höhe der Normalkraft abhängig, die in den Kontakten der gegeneinander verschobenen Körner wirkt. Die graphische Darstellung in dem aus der Bodenmechanik geläufigen σ - τ -Diagramm (siehe Abbildung 34) zeigt unter der Annahme des Bruchkriteriums nach Coulomb eine steigende Gerade, deren Winkel der innere Reibungswinkel der Kornmatrix ist und von den drei o.g. Mechanismen abhängt. Bei größeren Normalspannungen ($\sigma > 0,5 \text{ N/mm}^2$) ist der lineare Zusammenhang

nicht mehr gültig und der Reibungswinkel nimmt ab.

Die Abhängigkeit von der Normalspannung und der Dichte der Kornmatrix ist in Abbildung 75 beispielhaft für einen Sand dargestellt [122].

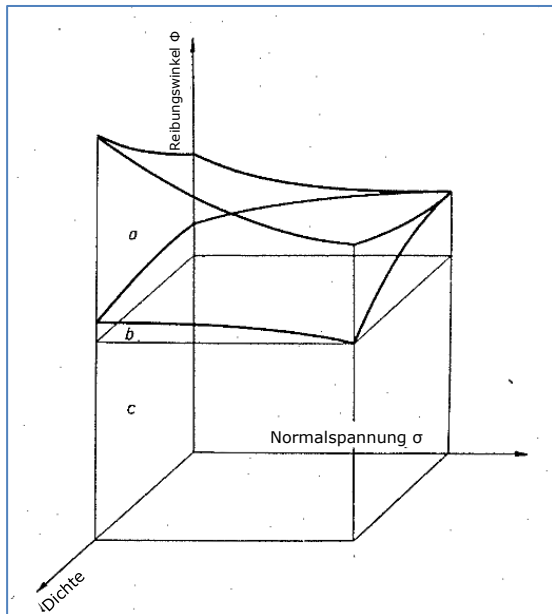


Abbildung 75: Veränderung der Anteile des Reibungswinkels mit der Normalspannung und der Dichte [122] (Dilatation (a), Umordnung (b), Korn- zu-Korn-Reibung (c))

Der Anteil c), die Korn-zu-Korn-Reibung, ist konstant und unabhängig von der Dichte und der Normalspannung. Der Anteil der Umordnung der Körner am Reibungswinkel ist bei geringer Dichte am Größten, dann steht innerhalb des Feststoffes mehr Raum zur Verfügung. Der Anteil der Dilatation dann am geringsten, weil bei geringen Dichten ausreichend Raum innerhalb der Matrix für eine Umordnung ohne Volumenvergrößerung (Dilatation) zur Verfügung steht. Sie kommt zum Tragen, wenn hohe Dichten und geringe äußere Spannungen vorherrschen. Bei hohen Dichten liegt der Anteil der Dilatation immer ein Vielfaches über dem Anteil aus Umordnung. Beide zusammen sind in etwa so groß wie der Anteil aus der Korn-zu-Korn-Reibung.

Eine Abschätzung des Reibungswinkels ist in Abbildung 76 wiedergegeben.

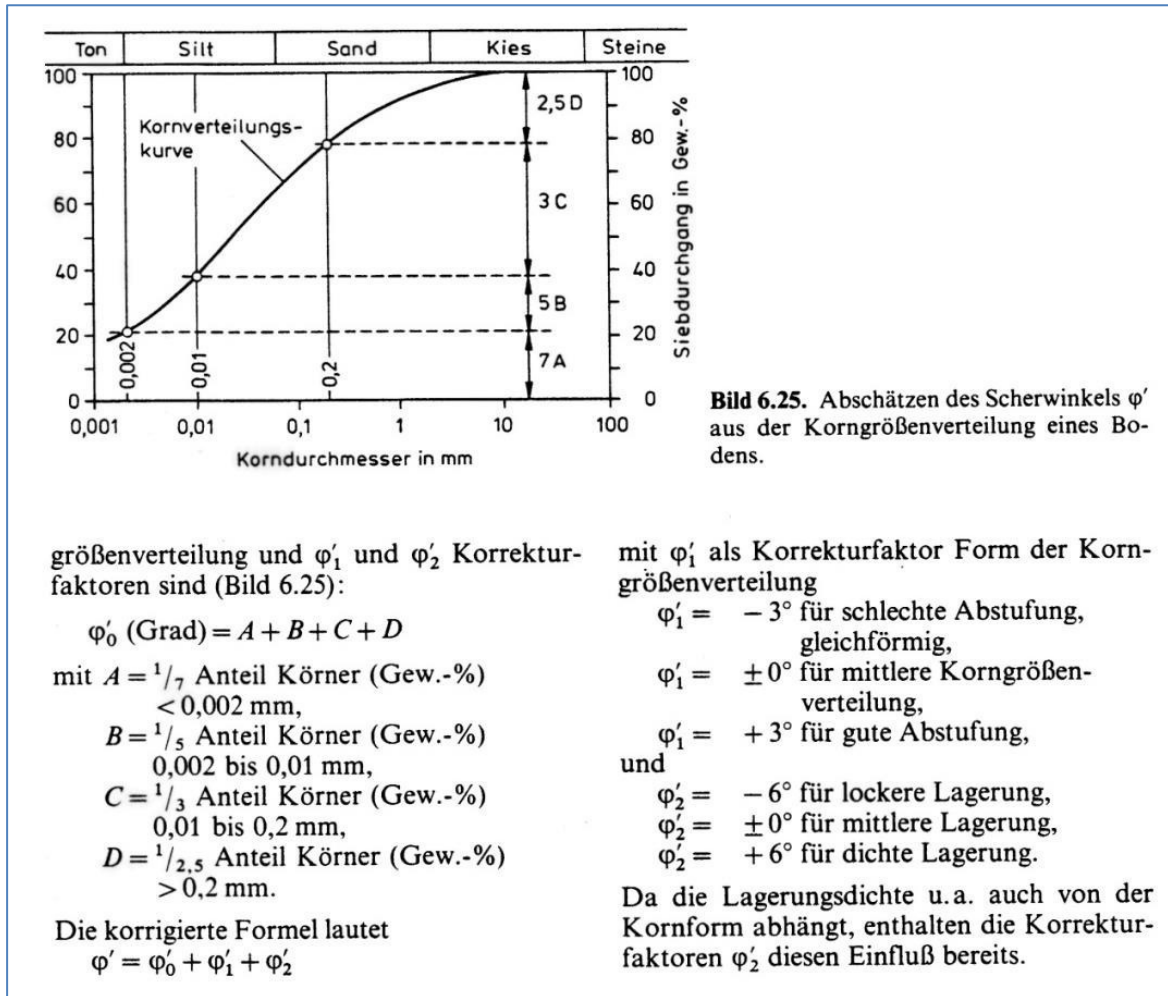


Abbildung 76: Abschätzen des Scherwinkels eines Bodens aus der Korngrößenverteilung [121]

Über mehrere Größenordnungen der Korngrenzen hinweg gilt, dass der Reibungswinkel abnimmt, je feiner die Bestandteile der Matrix zusammengesetzt sind. So ist der Reibungswinkel von Sand geringer als von Kies. Bei grobem Kalksteinmehl (Korngröße 20 - 45 μm) hat Molerus [102] durch Zugabe von feinem Kalksteinmehl (Korngröße 3,4-7 μm) nachgewiesen, dass der innere Reibungswinkel mit steigendem Feinanteil ebenfalls abnimmt und bei ca. 30 M.-% Feinanteil das Grobgut keinen Einfluss ausübt. Der Reibungswinkel entsprach dem der reinen Feinkornschüttung.

Auch bei der Bestimmung des Scherwiderstandes werden die in Kap. 2.4.2.2 - 2.4.2.6 beschriebenen Mechanismen, die Haftkräfte auslösen, bereits bei sehr kleinen Scherver-schiebungen aktiviert. Aufgrund der recht geringen Reichweiten der einzelnen Haftkraftkomponenten endet die Haftfestigkeit bei Überschreiten der einzelnen Reichweiten, bevor die Reibungseffekte ihren Höhepunkt erreichen. Dies ist in Abbildung 77 erkennbar.

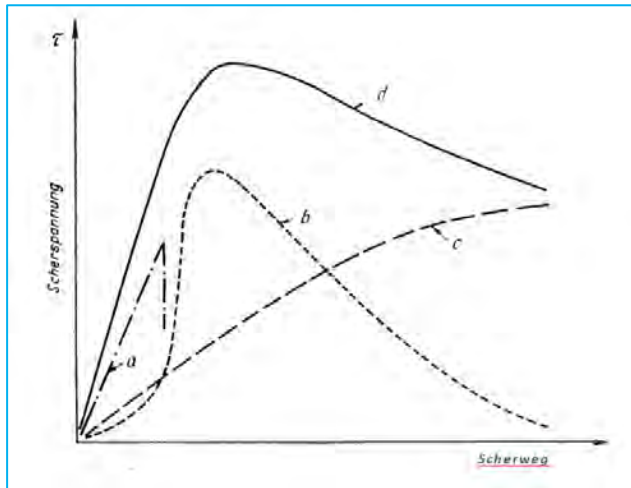


Abbildung 77: Änderung der Komponenten des Scherwiderstandes mit zunehmender Scherverschiebung : a) Haftfestigkeit, b) Dilatation, c) Reibungseffekte, d) Summenkurve gemessener Werte [122]

Da sich die Darstellung auf feuchte Sande bezieht, bei denen der Scherwiderstand unter Auflast in eine Scherzelle gemessen wurde, ist das Resultat nur bedingt auf zentrische Zugfestigkeit und auf deutlich kleinere Partikelsysteme übertragbar. Dies ist insbesondere daran zu erkennen, dass die Reibungseffekte mit dem Weg immer weiter zunehmen. Auch handelt es sich bei dem abfallenden Ast der Kurve d) nicht um eine Resttragfähigkeit, sondern um den verbleibenden Anteil an Widerstandskomponenten, der erkennbar gegen c) konvergiert. Bedeutsam ist jedoch, dass die Haftfestigkeit sehr rasch und stark zunimmt und auch wieder abfällt, die Dilatation verzögert und dann schlagartig einsetzt um dann langsam abzufallen.

Bornemann [22] stellte im Rahmen seiner Untersuchungen an erdfeuchten Betonen bei Druckversuchen an vollständig ausgetrockneten Feinkorgemischen die höchsten Druckfestigkeiten fest und zog als Ursache die höheren Reibungs- und Verzahnungswiderstände im Vergleich zu feuchteren Gemischen heran. Zeh [123] führte umfangreiche Zugversuche an bindigen Böden durch. Bei seinen Versuchen und auch bei den diskutierten Literaturergebnissen zeigte sich, dass die Zugfestigkeit bei abnehmenden Wassergehalten stark ansteigt. Nach [123] sind jedoch Effekte wie die Meniskenumkehr (Oberflächenspannungshysterese) dafür verantwortlich, da die zentrischen Zugversuche nicht derartig stark von Reibungseffekten der Partikel untereinander abhängen können.

Zementpartikel, ebenso wie Flugasche, Silika und Kalksteinmehle weisen an ihren Oberflächen Rauigkeiten auf. Dadurch entsteht eine Reibung dieser Rauigkeiten aneinander, wenn sich die Oberflächen voneinander entfernen durch eine äußere aufgebrachte Zugkraft. Wenn Partikel unterschiedlicher Materialien also z.B. glatte Oberflächen haben und andere rauhe, dann werden die rauhen Oberflächen bei bereits eingesetzten Verformungen der Matrix durch aufgebrachte Zugkräfte dann einen höheren Widerstand gegen die Verformung, d.h. die Vergrößerung der Partikelabstände, entgegensetzen können als glattere. Auch werden die Haftkräfte zwischen glatten Oberflächen größer sein, da der wirksame Kontaktabstand geringer ist. Weil die Wege bei Zugversuchen deutlich geringer sind als bei Druck- und Scherversuchen, werden die Reibungskräfte nur einen sehr geringen Beitrag über eine sehr kurze Distanz hinweg stellen können.

Eine Verzahnung und Verdrehung der Körner unter Beibehaltung ihrer Lage, also ohne Dilatation, findet statt, wenn die Bruchebene z.B. um den halben Umfang eines Partikels

oder noch weiter, herumführt. Hierfür wird in der Matrix Platz benötigt, daher ist dieser Anteil bei geringeren Dichten größer als bei den vorherrschenden, hohen Packungsdichten erdfeuchter Leimgemische. Dilatation tritt am stärksten bei hohen Dichten auf, dabei vergrößert sich die Bruchfläche. Bommes [134] hat in umfangreichen Messungen der tatsächlichen Bruchfläche an zentrischen Zugversuchen erdfeuchter Zementleime nachgewiesen, dass es zu relativ konstanten Abweichungen von der idealen geringsten Bruchfläche kommt, die Vorgehensweise wird in Kap. 4.1.4 beschrieben.



Abbildung 78: Ermittlung der tatsächlichen Bruchflächen beim zentrischen Zug an erdfeuchten Zementleimen durch Frischhaltefolie und anschließender manueller Flächenauszahlung nach Bommes [134]

Die allgemein auftretende, recht konstante Erhöhung des Bruchquerschnittes deutet auf Effekte der Dilatation hin. Auch ist in Abbildung 78 erkennbar, dass der Bruch im Zementleim nicht ideal eben erfolgt ist. Insbesondere bei Zementleimen mit höheren Wassergehalten war erkennbar, dass sie ein duktileres Verhalten zeigten als trockenere, siehe Abbildung 79.

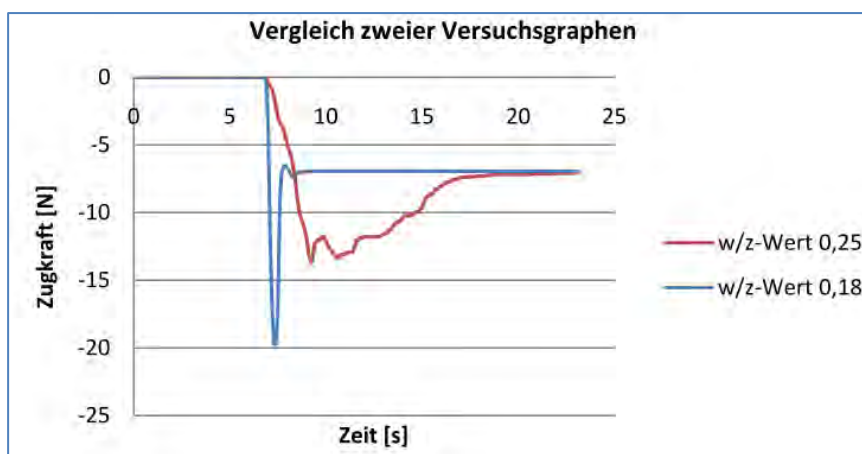


Abbildung 79: Vergleich von zwei Zementleimen [134]

Bommes beschreibt eine höhere Zementleim-Dehnbarkeit, die er auch bei den Reinigungsvorgängen der Schalung beobachten konnte, indem Leime mit höheren w/z-Werten sich augenscheinlich verformbarer verhielten. Auch nach dem Überschreiten der Maximalkraft führten diese Leime noch zu einem duktilen Verhalten, sie nehmen weiterhin Kräfte auf bei Zunahme der Wege.



Abbildung 80: Bruchbild nach zentrischem Zugversuch zweier erdfeuchter Zementleime, links $w/z=0,18$, rechts $w/z=0,25$. [132].

Der Unterschied der Bruchbilder ist in Abbildung 80 erkennbar. Während der rechte Bruchquerschnitt auch geböschte bzw. annähernd senkrechte Bereiche beinhaltet, ist der linke Querschnitt vergleichsweise eben verlaufen. Dies deckt sich mit dem unterschiedlichen Verhalten der Kurven in Abbildung 79. Ob es sich um Effekte aus Dilatation handelt oder um beobachtete Dehnungen von Flüssigkeitsbrücken- wie sie in Kap.2.4.2.3 beschrieben wurden- handelt, oder einer Kombination, kann nicht sicher bestätigt werden.

Bei der Bestimmung der zentrischen Zugfestigkeit einer Partikelmatrix handelt es sich um einen isostatischen, einachsigen Zugversuch, bei dem idealerweise nahezu keine Schubkräfte auftreten. Dadurch kann auch kein Reibungswinkel aktiviert werden, und die Erkenntnisse aus Schubversuchen Abbildung 77 sind nicht exakt übertragbar. Zudem sind die Wege bei der Prüfung von Zugfestigkeiten sehr gering, so dass für die Aktivierung der mechanischen Widerstände nur sehr geringe Verformungen zur Verfügung stehen, bevor es zum Bruch und damit zum Kontaktverlust kommt. Dennoch werden die beschriebenen Anteile, die in ihrer Summe den schubspezifischen Reibungswinkel bilden, auch in etwas geringerer Form bei zentrischen Zugversuchen in der Lage sein, der Verformung einen Widerstand entgegen zu setzen.

Anders als bei den vorgestellten Mechanismen der Haftkräfte ist es nicht möglich, anhand von Beispielen einen konkreten Anteil der Reibung, Verzahnung und Dilatation an der Zugfestigkeit zu berechnen. Jedoch können die erläuterten Mechanismen des Reibungswinkels dazu beitragen, den relativen Einfluss abzuschätzen.

Auf eine detaillierte Beschreibung der Versuche zur Ermittlung des Reibungswinkels an dieser Stelle wird hier verzichtet und auf die Literatur verwiesen [124].

2.4.3 Zugspannungen und Zugfestigkeit

Damit aus den theoretischen Überlegungen zu den wirkenden Haftkräften zwischen einzelnen Partikeln die Zugfestigkeit einer Partikelpackung berechnet werden kann, müssen Annahmen über die Kräfte und über die Kontaktflächen im Bruchquerschnitt getroffen werden. Zur Theorie der Zugspannungen in Agglomeraten existieren unterschiedliche Ansätze. Allen gemeinsam ist die Grundlage, über das Integral der Haftkräfte pro Partikel

auf die Gesamthaftkraft in dem betrachteten Agglomeratquerschnitt zu schließen und damit die Zugspannung auszudrücken, die in einem Agglomerat wirkt.

Die Unterschiede in den Theorien liegen in den berücksichtigten Kraftarten, die zwischen den Partikeln übertragen werden und der Art und Weise, wie das Integral der Haftkräfte über die Fläche angenähert wird. Dabei spielt die Koordinationszahl, welche die Berührungspunkte der Partikel untereinander angibt, eine große Rolle. Sie wird dadurch beeinflusst, ob monodisperse Partikel vorausgesetzt werden, oder ob Partikelverteilungen $n(x)$ berücksichtigt werden. Entsteht in einem Partikelagglomerat ein Bruch infolge äußerer Zugkraft, verläuft die Bruchfläche entlang der Partikelgrenzen. Ein Bruch innerhalb der Partikel scheidet aufgrund der geringen Zugkräfte aus.

Wierig [20] berechnete in seinem Modell die Druckfestigkeit erdfeuchter Betone anhand der Zugspannung in der Betonmatrix. Dabei berücksichtigte er ausschließlich Haftkräfte durch Flüssigkeitsbrücken zwischen den Zementpartikeln. Die Zugfestigkeit berechnete er dabei aus der lockersten Lagerung der Zementkörner (kubische Verteilung mit dem Partikeldurchmesser d als Seitenlänge, dabei bilden vier Partikel einen Würfel mit der Kantenlänge $2 \cdot d$) unter der Annahme einer monodispersen Partikelverteilung mit dem mittleren massenbezogenen Korndurchmesser des Zementes mit

$$\sigma_z = \frac{\pi \sigma_{lq}}{2r} \quad , \text{ siehe Kap.2.3.3, Formel 2.}$$

Dabei wird die maximale Haftkraft einer Flüssigkeitsbrücke angesetzt, die dann auftritt, wenn die Ausdehnung der Brücke punktförmig ist und der Winkel des Oberflächensegmentes der Brücke auf der Kugeloberfläche gegen Null geht.

Auf Rumpf [125], [126] geht ein weit verbreiteter Ansatz zurück, der die realen Verhältnisse in einer Partikelmatrix besser berücksichtigt.

Ausgehend von der Vorstellung, dass die Festigkeit eines Agglomerates an den Kontaktstellen zwischen den agglomeratbildenden Teilchen durch die dort herrschenden Bindkräfte übermittelt wird, ergibt sich, dass die Zugfestigkeit von der Zahl der Teilchen im Querschnitt, der Anzahl der Berührungsstellen je Korn (Koordinationszahl k) und von der Haftkraft je Berührungsstelle abhängt.

Damit ist

$$\sigma_z = (1 - \varepsilon) k \frac{H_m}{A_p} \quad \text{Formel 33}$$

H_m = mittlere Haftkraft je Kontaktstelle

ε = Packungsporosität

A_p = mittlere Partikeloberfläche ($= \pi d^2$ für monodisperse Kugeln)

k = π/ε (aus der Annahme dass $k \cdot \varepsilon \sim \pi$ ist)

unter folgenden Voraussetzungen gültig:

- gleichmäßige Zufallspackung der Partikel, d.h. Volumenporosität = Flächenporosität
- Bindkräfte an den Kontaktpunkten schwanken um einen Mittelwert, durch den sie ersetzt werden können
- gleichmäßige, zufällige Verteilung der Kontaktpunkte
- agglomeratbildende Teilchen sind gleich große Kugeln

Im Gegensatz zu Wierig nähert Rumpf durch k und ε die tatsächlichen Lagerungsbedingungen der Partikel innerhalb der Gesamtmatrix an. Sofern die Teilchenoberfläche nicht

ideal glatt ist, kann die tatsächliche Oberfläche berücksichtigt werden, wenn ein entsprechender Vergrößerungsfaktor bekannt ist.

Für Agglomerate aus Teilchen mit beliebiger Korngrößenverteilung $n(x)$ mit $x = d_p$ gibt Rumpf eine erweiterte Form der Zugfestigkeitsgleichung an [126].

In diesem Fall sind die vereinfachten Überlegungen der gleich verteilten Werte der Haftkraft pro Partikelkontakt und eines mittleren Erwartungswertes der Koordinationszahl, die Formel 2 zugrunde liegen, nicht mehr gültig.

Bei Partikeln mit unterschiedlicher Größe hängt die Haftkraft von der Teilchengröße und der Größe der jeweiligen Haftpartner ab, also von x und von $n(x)$.

Danach ist die ideale, einachsige Zugfestigkeit, die als Zerreißfestigkeit definiert ist gleich

$$\sigma_z = \frac{1 - \varepsilon}{f_0 M_{30}} \int_0^{\infty} k(x) H[x, n(x)] x n(x) dx. \quad \text{Formel 34}$$

H = Haftkraft, hier abhängig von x und $n(x)$

f_0 = Formfaktor d. Oberflächenvergrößerung bei nicht ideal glatten Oberflächen

$n(x)$ = Teilchengrößenverteilung

und

$$M_{30} = \int_0^{\infty} x^3 n(x) dx \quad [127] \quad \text{Formel 35}$$

mit M_{30} =statistisches Moment der Masseverteilung, errechnet aus der Anzahlverteilung $n(x)$.

Die Anwendung und Integration der Formel 34 ist nur möglich, wenn die Abhängigkeit der Koordinationszahl und der Haftkraft von der Teilchengröße und -verteilung bekannt sind.

Ein weiterer Ansatz zur Ermittlung der Zugfestigkeit wird von Cheng [128] beschrieben. Bei diesem Ansatz werden die Packungsdichte und die Partikelverteilung berücksichtigt. Die interpartikulären Kräfte werden dadurch berücksichtigt, dass alle möglichen kraftauslösenden Mechanismen wie Van der Waals, Flüssigkeitsbrücken und elektrostatische Kräfte in Abhängigkeit der Oberflächenentfernung t in der Funktion $h(t)$ enthalten angenommen werden. Unter dem Einfluss einer einachsigen Zugspannung verläuft die Versagensfläche unregelmäßig entlang der getrennten Partikelpaare, wodurch ein Bereich eines Versagensvolumens entlang der unregelmäßigen Bruchlinie geformt wird, siehe Abbildung 81.

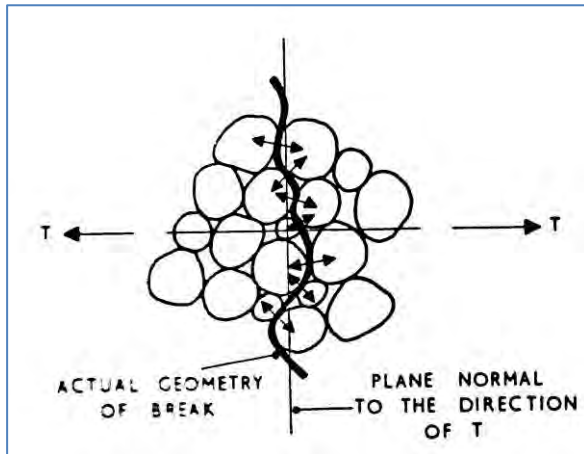


Abbildung 81: Versagensebene und Partikelhaftkräfte eines Agglomerates unter zentraler Zugbelastung [128].

Innerhalb des Versagenvolumens befindet sich unter Annahme einer zufälligen Verteilung der Partikel die gleiche Funktion der Partikelverteilungsdichte wie in der gesamten Agglomeratmatrix. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Oberflächenimperfectionen der Partikel werden Annahmen zur Geometrie der Mikrokontakte zwischen den Partikeln bezüglich der Gesamtkontaktfläche und der Oberflächenentfernung getroffen.

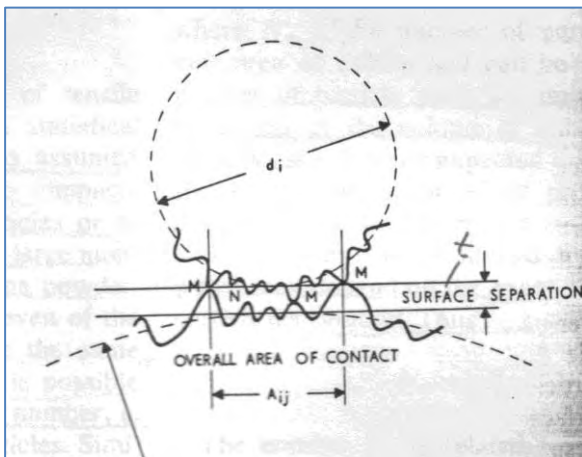


Abbildung 82: Kontakt zweier Partikel unter Berücksichtigung von Oberflächenimperfectionen; Pkte. M: Kontaktpunkte- Pkt. N: Kontaktpunkt bei weiterer Annäherung der Oberflächen durch Deformation [128]

Bei diesem Ansatz wird die Zugkraft T aus der Summe aller Einzelkontaktflächen A_{ij} (Abbildung 82) in Abhängigkeit von der Zugspannung $h(t)$ und der Oberflächendistanz t der Partikelpaare berechnet. Da sowohl A_{ij} als auch die Oberflächendistanz t durch Rechenansätze oder materialspezifische Gesichtspunkte kaum beschrieben werden können, wurden für diese Größen stark vereinfachte Abschätzungsgleichungen aufgestellt, die wiederum mit empirischen Proportionalitätskonstanten versehen sind.

Die Partikelpaare in der Bruchlinie werden hier über einen Ansatz aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung abgeschätzt.

Mit

$$x_{ij} = \frac{n_i n_j}{\sum_{i \leq j} n_i n_j}$$

Formel 36

wird der Anteil der Partikelpaare bestehend aus den Partikeln i und j aus deren Fraktionsanteilen n_i , n_j an der Gesamtpartikelzahl ermittelt. Als Ergebnis seiner Arbeiten machte Cheng zwei wesentliche Faktoren als Einflussgrößen auf die Zugfestigkeit von Agglomeraten aus: die Partikelgrößenverteilung und die Abhängigkeit der Interpartikulären Kräfte vom Abstand der Partikeloberflächen, hervorgerufen durch Oberflächenrauigkeiten. Dieser Faktor ist maßgeblich dafür verantwortlich, dass Zugfestigkeiten zum Teil erheblich variieren, obwohl nur geringe Dichteunterschiede im Agglomerat festgestellt wurden.

Es existieren noch viele weitere Modelle über die Ermittlung der Spannungen in Haufwerken und Packungen aus feuchten Partikeln [129],[130], die für Fälle von Partikelverteilungen mit unterschiedlichen wirkenden Kräften je Kontaktfall sehr aufwändig werden und dennoch nur Näherungslösungen liefern. Diese versuchen alle, durch zunehmende Komplexität der Annahmen eine scharfe und realistische Darstellung der Zugfestigkeit zu ermöglichen, jedoch laufen die Gegenüberstellungen mit Versuchsergebnissen immer darauf hinaus, dass Korrektur- und Anpassungsfaktoren erforderlich sind, um die theoretischen Berechnungen mit den praktischen Resultaten in annähernde Übereinstimmung zu bringen. Allen Ansätzen gemeinsam ist, dass sie bisher nicht vermocht haben, einen theoretischen Zusammenhang des Zug-Dehnungsverhaltens mit bekannten Eingangsgrößen der Partikelverteilung, -anzahl und -oberflächengestalt zu schaffen. Daher greifen auch neuere Arbeiten [131] wiederholt auf die einfache Formel von Rumpf zurück (Formel 33) und wählen mittlere Durchmesser und angenäherte Koordinationszahlen aus, um Abschätzungen der zu erwartenden Zugfestigkeit vorzunehmen.

2.4.4 Zusammenfassung

Bei der Betrachtung der einzelnen Mechanismen, die Haftkräfte zwischen Partikeln in Gegenwart von Wasser auslösen können zeigte sich, dass der Partikelabstand der Oberflächen, und die Rauigkeit der Oberflächen die Größe der Kräfte wesentlich bestimmen. Auch die einzelnen Kräfte beeinflussen sich gegenseitig.

Im Kontaktfall (d.h. bei einem Gleichgewichtsabstand von 0,4 nm) findet durch jede der Kräfte auch eine Verformung der Partikel statt. Es stellt sich eine Abplattung ein, die zu einer Vergrößerung der Kontaktfläche und damit zu einer Erhöhung der Kräfte führt.

Flüssigkeitsbrücken erzeugen eine Verformung, die dann bei den Adsorptionskräften mit berücksichtigt werden muss für die Kontaktfläche. Beide Deformationen und Kraftanteile wiederum sind bei der Kontaktfläche für die Van-der-Waals-Kräfte mit anzusetzen.

Ähnlich wie bei statischen Systemen handelt es sich somit auch bei interpartikulären Kräften um Systeme zweiter Ordnung, bei denen zu der Summation aller wirkenden Haftkraftanteile auch die zusätzlichen Anteile der Haftkräfte addiert werden müssen, die aus den sich einstellenden Deformationen der Partikel, und auch der Deformation der Rauigkeiten auf den Partikeloberflächen, entstehen.

Die Spannungsberechnung aus den theoretischen Haftkräften gelingt nur unter vereinfachenden Annahmen, wie sie in Kap. 2.4.3 vorgestellt wurden. Entscheidende Einflüsse gehen von den Oberflächenrauigkeiten, der Anzahl der berücksichtigten Partikelkontakte je Fläche und der Korngrößenverteilung aus. Diese kann nur im trockenen Zustand als bekannt vorausgesetzt werden, da sie, wie in Kap. 2.4.1.2 erläutert, sich durch den Kontakt mit Wasser erheblich verändern und es bereits nach wenigen Minuten zu einer Vergrößerung der Oberfläche bei Zement um den Faktor vier kommt. Außerdem können Partikelgrößenverteilungen und Partikelanzahlen nur mit vergleichsweise aufwändigen Re-

chengängen mathematisch berücksichtigt werden, dahingegen muss für eine Berücksichtigung der Oberflächengestalt sowie der Kornform an sich auf empirische Annahmefaktoren zurückgegriffen werden.

Und auch damit wurden bislang keine Ergebnisse erzielt, die sich anhand von Versuchen bestätigen ließen. Hinzu kommen die Veränderungen der Oberfläche und Partikelgröße, die bereits in den ersten Minuten nach Wasserkontakt durch die beginnende Hydratationsreaktion stattfinden, wie in 2.4.1.2 beschrieben. Dadurch liegen keine zuverlässigen Eingangsgrößen für die Beschreibung der Partikeloberflächen und der Kornverteilung vor. Zusammenfassend ist es bisher nicht möglich, anhand der vorhandenen Ansätze eine zuverlässige Vorausberechnung der Zugfestigkeit erdfeuchter Zementleimgemische durchzuführen, da alle Rechenansätze starke Vereinfachungen und Annahmen vornehmen und entsprechend stark selbst von idealisierten Experimenten mit z.B. ideal runden Glaskugeln im μm -Meterbereich abweichen.

Eine Möglichkeit, Aussagen über die Zugfestigkeit zu erhalten und darüber, wodurch sie bei erdfeuchten Zementleimen beeinflusst wird ist, zunächst ein geeignetes Prüfverfahren zu entwickeln, mit dem Aussagen zu dem Last-Verformungsverhalten gewonnen werden können. Mit den gewonnenen Ergebnissen kann dann versucht werden, empirische Zusammenhänge aufzuzeigen und ggf. in der Praxis zu überprüfen, ob eine Bestätigung erbracht werden kann.

3. Entwicklung eines Prüfverfahrens für die Ermittlung der Grünzugfestigkeit erdfeuchter Leimgemische

Kornhaufwerke, bindige Böden und Partikelschüttungen sind in der Lage, äußere Kräfte sowie ihr Eigengewicht formstabil aufzunehmen, wenn die einzelnen Feststoffpartikel so aneinander haften, d.h. Haftkräfte übertragen werden, dass eine relative Verschiebung der Partikel untereinander nicht stattfindet. Da die Reichweite der Haftkräfte sehr kurz ist, reichen bereits sehr kleine Verformungen der Partikelgemische aus, um die Haftkräfte gegen Null zu verringern und ein Versagen der Formstabilität herbei zu führen. Es sind also die Haftkräfte, gleichbedeutend mit den Zugkräften, die zwischen den Partikeln übertragen werden können, die für die Formstabilität eines erdfeuchten Betons und EF-Leimes verantwortlich sind.

Aus der Praxis der Verarbeitung von EF-Betonen zeigt sich außerdem, dass bei frisch hergestellten EF-Betonen fehlerhafte Produkte sehr häufig durch das Überschreiten der Zugkräfte innerhalb der verdichteten Betonmatrix auftreten.

Bei der Rohrherstellung äußert sich dies durch sogenannte radiale Setzrisse. Dabei haftet das obere Teilstück an den Wandungen der Form während die Form nach oben gezogen wird und setzt sich dann unmittelbar wieder auf das untere Stück auf. Obwohl rein optisch kaum erkennbar, entstehen dadurch Fehlstellen, die bei der Prüfung der Wasserdichtheit für Wasseraustritte sorgen.

Bei der Produktion von kleinformatigen Betonwaren wie z.B. Betonpflastersteinen oder Bordsteinen weisen fehlerhafte Produkte Ablösungen an den frischen Oberfläche auf in der Form von ungewollte Vertiefungen, siehe Abbildung 2. Dabei bleiben Rückstände des Mörtels bzw. Betons an den Stempeln kleben, mit denen die Verdichtungsenergie eingetragen wird und die Steinoberfläche weist eine Fehlstelle auf. Diese Produkte werden direkt nach dem Verlassen der Steinformmaschine auf der frischen Seite per Hand vom Band entfernt, bevor sie weiter in die Erhärtungskammer fahren können.

Bislang wurde systematisch nur die Gründruckfestigkeit untersucht, und auch diese Ergebnisse sind in nur relativ wenig Veröffentlichungen enthalten. Bei der praktischen Prüfung der Gründruckfestigkeit ist immer auch der Einfluss der Reibung, Verzahnung und Dilatation enthalten, d.h. der Verzahnungs- und Verdrehungswiderstand der einzelnen Partikel untereinander.

Eine Abschätzung darüber, durch welche Komponenten die reinen Haftkräfte zwischen den Feststoffpartikeln beeinflusst werden können setzt voraus, dass möglichst ausschließlich die Zugkräfte der EF-Leime gemessen werden können. Hierfür wurde in den Jahren 2008 bis 2015 ein Versuchsaufbau entwickelt

3.1 Aufbau des Prüfgerätes

Die ersten Versuche wurden im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt [132].

Die Versuchseinrichtung besteht aus zwei nahtlos geformten Kunststoffröhren, die durch einen Adapterring aufeinander gestellt werden können. Die untere Röhre ist durch einen ebenen Boden verschlossen. Die obere Röhre wird durch eine Lasteinleitungsplatte verschlossen, die mit vier Feststellschrauben befestigt wird. Bei dem Zugversuch wird in die Lasteinleitungsplatte durch eine Befestigungsschraube eine zentrische Zugkraft eingeleitet, über die Feststellschrauben wird die Kraft auf die obere Röhre umgeleitet und ermög-

licht, dass diese zentrisch nach oben gezogen wird. Die Verbindung der beiden Röhren durch den Adapterring wird nicht mechanisch befestigt, sondern ohne Zwang aufgesteckt, siehe Abbildung 83.

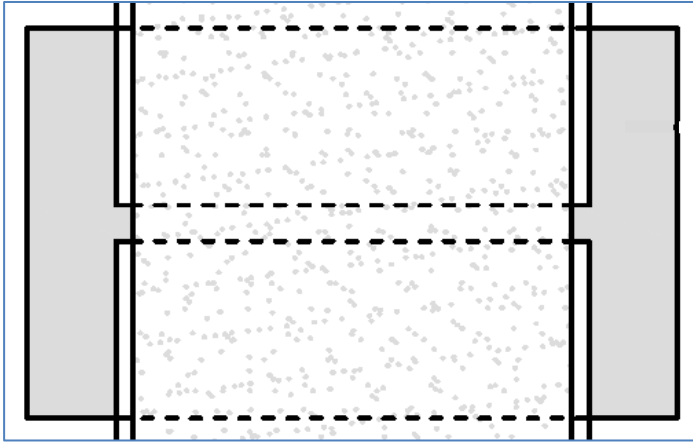
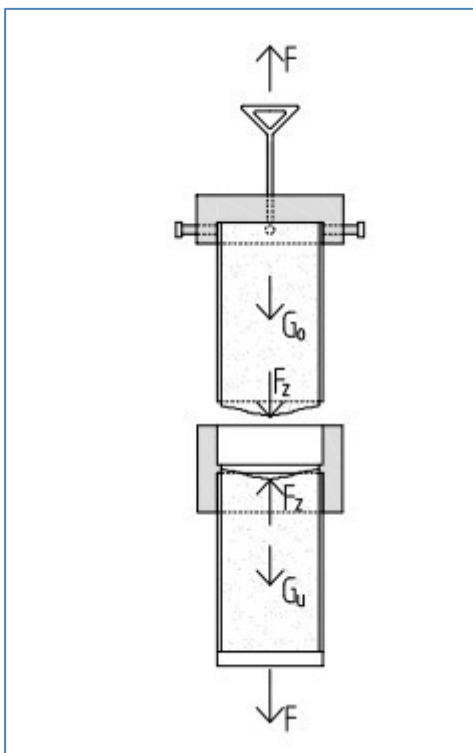


Abbildung 83: Innenliegende Feder des Adapterringes, die als Distanzstück zwischen den Röhren dient (Detail aus Abbildung 85)

Die Röhren stehen lotrecht aufeinander und der Adapterring verhindert ein gegenseitiges Verschieben. Der Versuchsaufbau ist so konstruiert, dass sich die Röhren im unbefülltem Zustand unter Zugbelastung ohne Widerstand auseinander ziehen lassen. Im Inneren des Adapterringes ist eine 4,5 mm breite Feder angeordnet, die einen Anschlagpunkt für die beiden Rohrstücke bilden und sich dadurch nicht direkt berühren. Dieser Bereich stellt eine 4,5 mm breite Sollbruchkante dar. Es ist vorgesehen, dass der Zementleim in diesem Bereich reißt.



- F : Zugkraft
- F_z : Zugfestigkeit des Zementleims
- G_o : Eigengewicht des abgerissenen Zementleims mit oberer Röhre und Lasteinleitungsplatte
- G_u : Eigengewicht des abgerissenen Zementleims mit unterer Röhre und Adapterring

Abbildung 84: Schematische Darstellung der Kräfte beim Zugversuch mit erdfuchtem Leim [132]

Am Boden (rot in Abbildung 84) wird die Einrichtung fixiert und entspricht einem statisch eingespannten System. Abbildung 84 zeigt eine schematische Darstellung der wirkenden

Kräfte während des Zugversuches. Damit der Zementleim an der vorgesehenen Sollbruchkante reißt, muss die äußere Reibung F_R des Zementleims an der Wandung der Röhre größer sein als die maximale Zugfestigkeit F_Z des Zementleims. Die äußere Reibung ist ein Widerstand zwischen zwei Kontaktflächen. Es gibt verschiedene Formen der äußeren Reibung. Für die Funktionalität des Zugversuchs an erdfeuchten Zementleimen sind die Haftreibung und die Gleitreibung ausschlaggebend.

Die Haftreibung ist die größere der beiden Reibungskräfte. Sie wirkt, wenn die Bewegung der beiden aufeinander treffenden Materialien noch nicht eingesetzt hat. Sie ist abhängig von der Rauigkeit der Oberflächen und der senkrecht zur Haftreibung wirkenden Normalkraft F_N . Die Gleitreibung wirkt, wenn die Bewegung der beiden Kontaktflächen gegeneinander eingesetzt hat und ist geringer als die Haftreibung. Die Haftreibung bewirkt beim Zugversuch, dass der Zementleim an der Wandung haftet und so auf Grund des Versagens der Zugfestigkeit des Zementleims ein Riss im Bereich der Sollbruchkante entsteht. Gleitreibung darf nicht eintreten, da sonst die obere Röhre an dem verdichteten Zementleim nach oben hin abgleitet und kein Riss im Zementleim entsteht. Dann ist es nicht möglich, die zentrische Zugfestigkeit des Zementleims zu bestimmen. Für die Funktionalität der Versuchseinrichtung muss deswegen die nachstehende Bedingung erfüllt sein:

$$F_R \geq F_Z$$

Formel 37

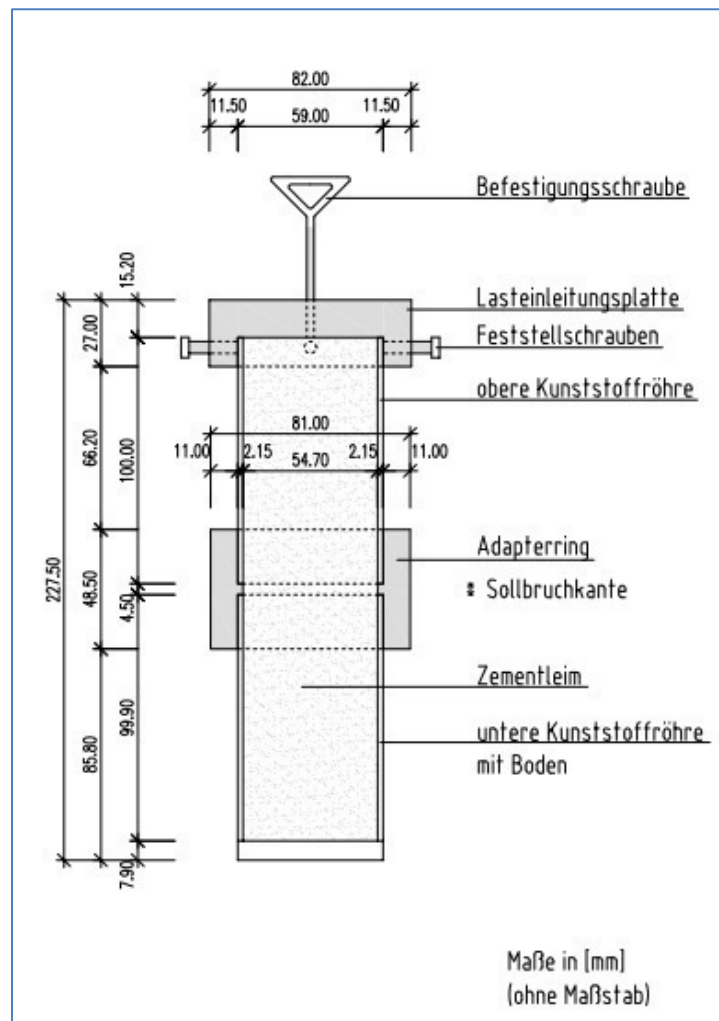
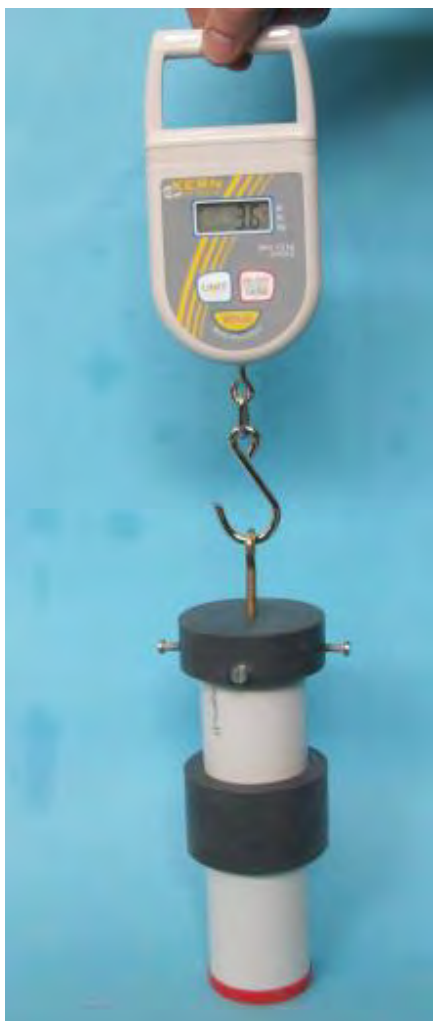


Abbildung 85: Versuchsaufbau Variante 1 mit Prinzipskizze [132]

Kusche erkannte als Schwächen dieses Aufbaus die Präzisionswaage (Typ Sartorius TYP 3808004-2MP8) und die manuelle Führung dieser Waage, wodurch eine exakte Krafteinleitung ohne exzentrische Lasten nicht sichergestellt werden konnte.

Weiterhin stellte sich heraus, dass der Adapterring dazu führte, dass bei Gemischen mit höherem w/z-Wert Leim zwischen Ring und äußerer Wandung des Formrohres eintreten konnte und zusätzliche Haftkräfte verursachte, die als Messfehler wirkten.

Dennoch zeigte sich, dass die Messung der zentrischen Zugfestigkeit möglich ist und eine Zunahme der Zugfestigkeit mit steigendem Verdichtungsgrad nachgewiesen werden konnte, dargestellt in Abbildung 86.

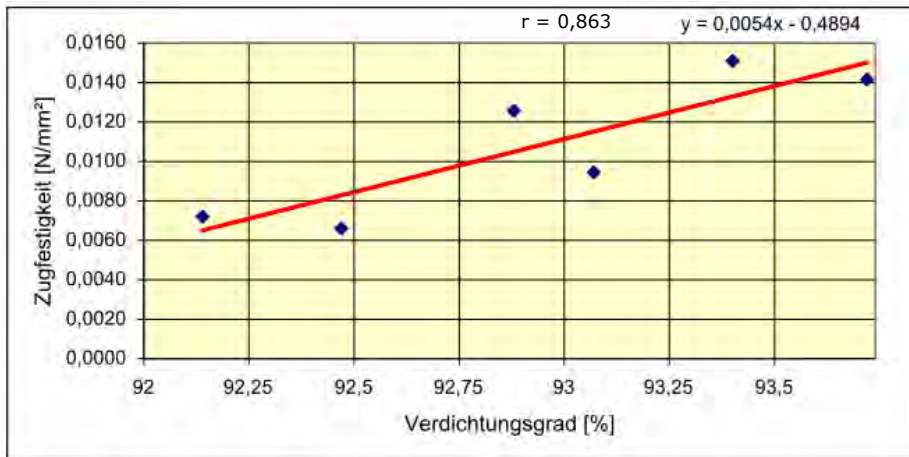


Abbildung 86: Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad bei w/z = 0,23

Die Verdichtung erfolgte dabei wie in Kap. 3.3 beschrieben. Der Verdichtungsgrad wurde als Quotient aus dem Zementleimgewicht in den Probekörpern und dem theoretischen Zementleimgewicht aus der Mischungsberechnung berechnet.

Veränderungen des Versuchsaufbaus erfolgten Ende 2010 [133].

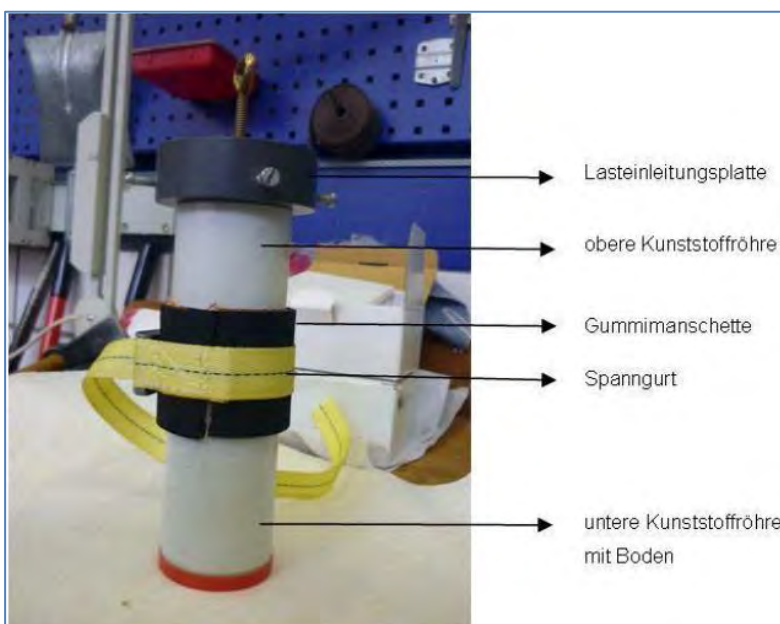


Abbildung 87: Versuchsaufbau Variante 2 [133]

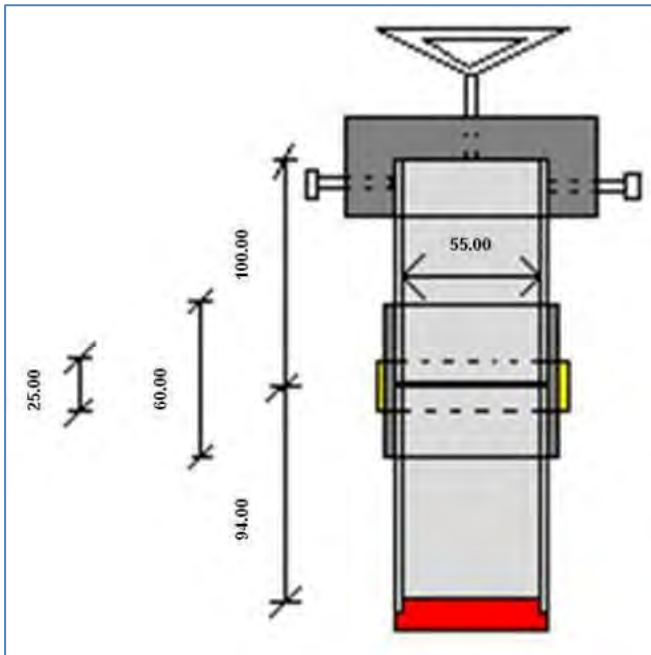


Abbildung 88: Prinzipskizze Versuchsaufbau Variante 2 [133]

Nunez [133] ersetzte den Adapterring, der eine Hinterläufigkeit des Leimes verursachte, durch eine Gummimanschette mit Spanngurt. Damit wurden die beiden Kunststoffrohre während des Befüllens miteinander verspannt, siehe Abbildung 87 und Abbildung 88.

Diese Fixierung erwies sich als zu wenig steif und führte zu höheren Abweichungen bei den erreichten Verdichtungsgraden als es bei der Variante 1 der Fall war. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurden weitere Veränderungen in der Variante 3 umgesetzt [134].

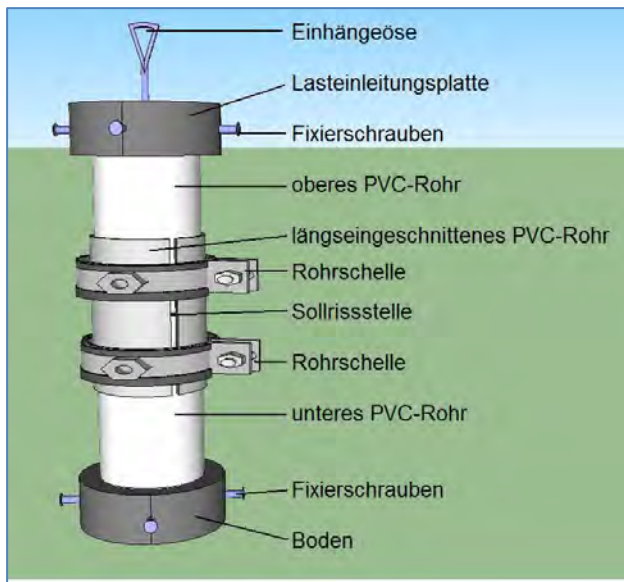


Abbildung 89: Schalung für die Probekörper Variante 3 [134]

Abbildung 89 zeigt das Prinzip des bereits befüllten Probekörpers, an dem nach dem Befüllen die Lasteinleitungsplatte bereits befestigt wurde. Die Rohrschellen dienen der Fixierung des Versuchsaufbaus während des Befüllens und Verdichtens. In der hier dargestellten Montageausführung wird der Aufbau unter die Zugeinrichtung gestellt. Danach wer-

den die Rohrschellen vorsichtig gelöst und das längseingeschnittene PVC-Rohr nach unten geschoben, so dass die Fuge zwischen den beiden Rohrabschnitten freiliegend ist und die beiden gefüllten Probekörperhälften frei aufeinanderstehen. Abbildung 90 zeigt die einzelnen Schritte der Handhabung. Der Boden lässt sich durch Fixierschrauben vom unteren PVC-Rohr lösen, damit die Reinigung nach erfolgtem Zugversuch einfacher und schneller möglich ist.



Abbildung 90: Befüllen der fixierten Probekörperhälften (links), Anbringen der Lasteinleitungsplatte (mitte), Probekörperhälften mit gelöster Fixierung unter der Zugvorrichtung (rechts)



Abbildung 91: Variante 3 mit Versuchsstand und Einzelteilen [134]

Die Versuchseinrichtung wurde vollständig erneuert und besteht aus zwei Teilen: der Zugvorrichtung mit dem Kraftmessgerät (PCE-FG 200), und dem Schalkkörper, der den Zementleim während des Verdichtens und während des Zugversuchs in Form hält. Die Zu-

geinrichtung besteht aus einem Gestell, das über eine Kurbelvorrichtung in der Höhe verstellbar ist (Abbildung 91). Durch Betätigung der Kurbel wird ein senkrecht Anheben des eingehängten Kraftmessgerätes ermöglicht. Die aufgenommenen Daten werden mittels Datenkabel auf einen Computer mit zum Prüfgerät gehöriger Software transferiert.

Durch manuelles Betätigen der Kurbel fährt das Kraftmessgerät nach oben. Der Weg wird über den am Messgerät eingehängten Haken auf die Einhängeöse der Lasteinleitungsplatte (siehe Abbildung 89) übertragen. Dadurch bewegt sich das obere PVC-Rohr nach oben. Währenddessen wird durch das Messgerät die Kraft gemessen und zusammen mit der Zeit elektronisch aufgezeichnet, dabei beträgt die maximale Messfrequenz 10 Hz (10 Messwerte je Sekunde). Eine komplette Kurbelumdrehung bewegt die Zugvorrichtung um 3 mm nach oben. Es wurde festgelegt, dass eine Kurbelumdrehung möglichst eine Sekunde betragen soll. In der praktischen Anwendung heißt das, der Zugversuch wird mit in etwa immer der gleichen Kurbelgeschwindigkeit als weggesteuerter Versuch gefahren. Bei der Analyse des Bruchweges sollte jedoch beachtet werden, dass aufgrund der manuellen Bedienung nur eine annähernde Aussage über den Bruchweg getroffen werden kann. Der untere Teil des Probekörpers wird manuell fixiert.

Das Auslesen der Daten geschieht mit Hilfe der Messprotokolle, die aus dem Zugversuch auf den Computer übertragen werden. Neben den zehn Zugkräften pro Sekunde (10 Hz als maximale Abtastrate) werden auch die Zeiten in Zehntel pro Sekunde zu der jeweiligen Kraft aufgezeichnet. Aus den Rohdaten werden die Daten gefiltert, die zwischen dem Beginn und dem Ende der Messung liegen. Dabei kennzeichnet der erste Messwert der Kraft den Beginn. Das Ende tritt dann ein, wenn die Restkraft, die aus dem Eigengewicht der gefüllten, oberen Probekörperhälfte besteht, konstant ist.

Als Bruchzeit wird die Zeit definiert, die nach Auftreten der ersten Zugkraft bis zum Eintreten der Höchstzugkraft liegt. Diese Zeit wird mit dem Faktor drei multipliziert, um den Bruchweg in Millimeter zu berechnen.

130_021_160229_1432.txt - Editor		34	0
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?		35	0
* SETTINGS *		36	0,0 -2.65
SPEED: SCHNELL			
SPEED: AUTO		37	-22.1
DATA : R/-		38	0,60 -21.1
UNIT : 'N'		39	0,90 -10.2
COUNT : 172		40	1,20 -6.75
TIME : 0.100 sec		41	1,50 -5.9
QTY. : 172		42	1,80 -5.85
		43	-5.8
		44	2,10 -5.8
		45	-5.8
SMP. RESULT DATE&TIME		46	-5.8
1 0		47	-5.8
2 0		48	-5.8
3 0		49	-5.8
4 0		50	-5.8
5 0		51	-5.8

Abbildung 92: aufgezeichnete Rohdaten des Messgerätes für Versuch mit $w/f = 0,21$ aus Abbildung 127 (Zugdehnungen von Zement CEM III/A 42,5 R)

Der Bruchweg gibt Auskunft über die Duktilität der Probekörper. Ein weicher Probekörper, etwa mit einem höheren w/z -Wert, wird voraussichtlich einen längeren Bruchweg haben als ein trockener Probekörper, der sich nur gering verformt.

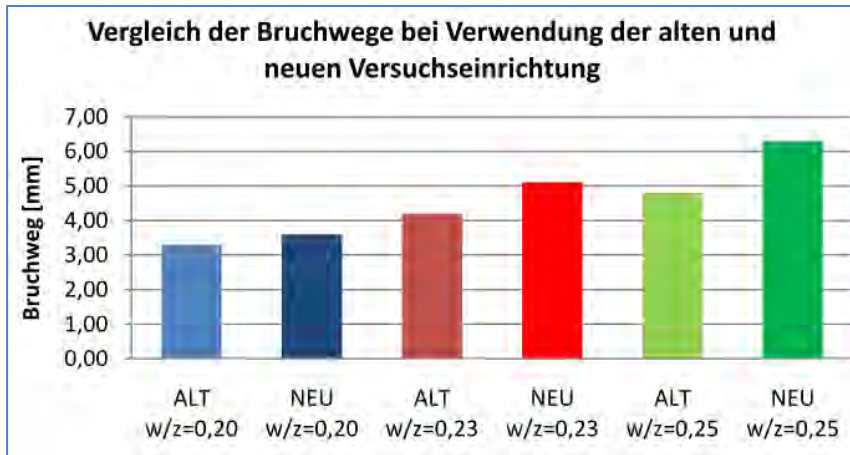


Abbildung 93: Bruchwege bei unterschiedlichen w/z -Werten
ALT = Versuche nach Variante 1, NEU = Versuche nach Variante 3 [134]

Bereits im Rahmen eines Vergleiches der beiden Versuchsvarianten 1 und 3 zeigte sich, dass ein Zusammenhang zwischen Bruchweg und w/z -Wert festgestellt werden kann.

Der alte Versuchsaufbau Typ 1 führte im Vergleich zu Typ 3 bei allen drei betrachteten w/z -Werten zu niedrigeren Bruchwegen. Der bei Typ 1 verwendete Adapterring wird von den Leimen hinterlaufen und es bildete sich eine zusätzliche Kontaktzone an den Außenwänden der Rohre in dem Bereich des Adapterringes. Dadurch erhöhen sich die gemessenen Haftkräfte und die Bruchwege verringern sich.

Für alle weiteren Versuche wurde der Versuchsaufbau Typ 3 verwendet, bei dem die Übertragung der Zugkraft an der Sollbruchstelle des Leimkörpers ohne Störung verläuft.

3.2 Herstellung der Leime

Die Herstellung der Leime erfolgte jeweils unmittelbar vor jedem Zugversuch, d.h. jeder Leim wurde nur für einen Zugversuch verwendet.

Verwendet wurde ein Labor-Mörtelmischer Bauform 1.0203 der Firma Testing Bluhm und Feuerherdt GmbH. Die Mischdauer wurde mit zwei Minuten konstant gehalten, die Geschwindigkeit wurde auf Stufe 1 eingestellt und betrug 140 U/min..

Bei den ersten Vorversuchen zeigte sich, dass erdfeuchte Leime mit dem Mörtelmischer im Labor in einer anderen Reihenfolge zubereitet werden müssen als Mörtel oder Leime mit fließfähiger Konsistenz [132]. Üblicherweise wird bei der Betonherstellung in Großmischern sowie bei der Herstellung von Mörteln zu Versuchszwecken das Wasser auf die bereits dosierten Feststoffe (Zement, Sand usw.) zugegeben. Bei erdfeuchten Zementleimen mit sehr wenig Wasseranteil kam es bei w/z -Werten unterhalb von 0,23 jedoch zu sichtbaren Agglomeratbildungen von Zementpartikeln, die nicht mit Wasser in Kontakt gekommen waren. Diese Mischung ergab einen nicht prüfaren, schlecht durchmischten und teilweise mit trockenen Zementteilchen durchsetzten Zementleim. Bei gleicher Mischungszusammensetzung wurde die Reihenfolge der Zugabe geändert. Auf das Wasser in der Mischschüssel wurde langsam und stetig der Zement dosiert. Dadurch entstand ein homogener, erdfeuchter Leim, der gut verdichtet und dessen Zugfestigkeit gemessen werden konnte.

Dieser beobachtete Effekt ist darin begründet, dass so wenig Wasser für erdfeuchte Leime verwendet wird, dass innerhalb des gesamten Partikelhaufwerks bestehend aus Zement und ggf. weiteren Körnern wie z.B. Flugasche usw. kein durchgängiger Sättigungsbereich erreicht werden kann. Es werden also weniger als 80 % der vorhandenen Poren innerhalb des Feststoffhaufwerkes mit Wasser gefüllt [135]. Gerade darauf beruht das optische Erscheinungsbild und auch die Wirkungsweise der Kapillarkräfte zwischen den Feststoffen, für die ein ungesättigter Zustand, bei dem auch noch Luft in der Matrix vorhanden ist, erforderlich ist.

Wird das Wasser auf den Zement dosiert, dann kommt es aufgrund der Hydrophilizität des Zementes unmittelbar zu einer Adhäsion des Wassers durch nicht-kovalente Anziehungskräfte (van-der-Waals, Wasserstoffbrücken) und die Partikeloberflächen werden benetzt [136]. Dabei bilden sich Agglomerate aus Zement, in denen Wasser in Zwickel- und Brückenbereichen einzelner Partikelansammlungen angelagert wird. Dieses Wasser steht nicht mehr zur Verfügung, um sämtliche Partikel der Mischung mit einem durchgehenden Adsorptionsfilm aus Haftflüssigkeit zu umhüllen, so dass innerhalb dieser Mischungen auch trockene Zementpartikel verbleiben. Auch treten Luftinklusionen auf, wie in Abbildung 94 dargestellt.

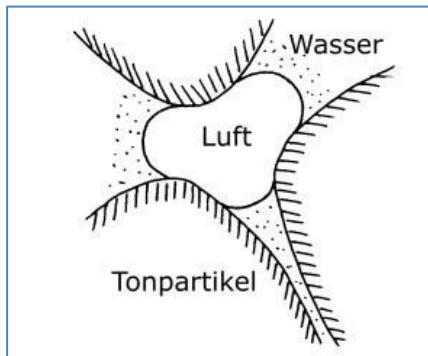


Abbildung 94: Form von Luftinklusion im wassergefüllten Porenbereich zwischen Feststoffpartikeln aus Ton [58]

Diese Luftinklusionen tragen dazu bei, dass Wasser zwischen zwei benachbarten Luftinklusionen und den Oberflächen der Partikel verbleibt und sich nicht weiter in die noch trockenen Bereiche der Feststoffmatrix hinein verteilen kann.

Wenn der Zement kontinuierlich dem Wasser zugegeben wird, dann werden alle Zementpartikel zuerst mit einem Adsorptionsfilm versehen, bevor es dann zur Ausbildung von gleichmäßig verteilten Flüssigkeitshaftbrücken zwischen den Partikeln kommt. Daher wurden bei allen durchgeführten Versuchen die Feststoffe innerhalb von einer Minute kontinuierlich dem Wasser im Topf des Leimmischers zugegeben. Unter diesen Aspekten ist die Mischreihenfolge, bei der dem trockenen Feststoff sukzessive Wasser zugemischt wird, wie es Bornemann [22] praktiziert hat, kritisch zu sehen.

Abbildung 95 zeigt auf der linken und der rechten Seite Zementleime mit identischer Zusammensetzung, jedoch unterschiedlichen Dosierreihenfolgen. Dabei wurden die Gesamtmischzeit und die Mischergeschwindigkeit konstant gehalten. Unmittelbar nach dem Mischen sind Unterschiede nur schwer zu erkennen, der Leim auf der rechten Seite weist eine geringfügig höhere Anzahl an kugeligen Agglomerationen von Partikeln auf. Nach jeweils 15 Schlägen mit dem Hägermann-Ausbreittisch weisen die beiden Mörtelkonus erkennbare Unterschiede auf. Der rechte Konus ist deutlich formstabiler geblieben, die Oberfläche ist leicht feucht glänzend, während der linke Konus trockener aussieht und an mehreren Stellen während der Schläge größere Teile abfielen.



**Abbildung 95: Zementleime mit CEM I 42,5 R, $w/z = 0,21$ und gleicher Mischdauer, unmittelbar nach dem Mischen und nach 15 Schlägen mit dem Hägermann-Tisch
linke Seite: Mischreihenfolge Wasser langsam auf Zement,
rechte Seite: Mischreihenfolge Zement langsam auf Wasser**

3.3 Verdichtung der Leimgemische

Bei erdfeuchten Betonen muss mehr Verdichtungsenergie aufgebracht werden als bei Verdichtung von Frischbeton in den üblichen Konsistenzbereichen F2 bis F5. Das Ziel der Verdichtung ist, die Luft aus dem Frischbeton zu verdrängen und eine dichte Lagerung

der einzelnen Bestandteile zu erreichen. Durch das Einleiten der Verdichtungsenergie wird die Kohäsion des Frischbetons überwunden, sodass sich eine dichte Lagerung der Bestandteile einstellt und die Luft entweicht.

Bei steifen Betonen eignet sich generell das Verdichten durch Stampfen [137]. Der Beton wird dabei so lange gestampft, bis sich eine glatte und geschlossene Oberfläche bildet. Der Eintrag der Verdichtungsenergie ist dabei nicht genau definierbar.

Bei der Herstellung von Betonwaren wird zur Verdichtung des erdfeuchten Betons eine Kombination aus Pressung und Schockvibration verwendet. Die Pressung erfolgt durch Aufbringen einer gravimetrischen oder hydraulischen Druckkraft, bei Steinformmaschinen geschieht dies durch den Stempel der Form [13]. Gleichzeitig werden in das System Schwingungen eingebracht, die eine zusätzliche Verdichtung durch Vibration bewirken.

Bei den Versuchen wurde die Wahl der Verdichtungsart dadurch bestimmt, dass mit möglichst geringem Aufwand eine geeignete Reproduzierbarkeit der Verdichtung erreicht werden kann. Sämtliche Versuche fanden daher ohne dynamische Verdichtung durch Vibration statt, da der versuchstechnische Aufwand hierfür recht groß ist. Ebenso wurde die Kraft, mit der die Verdichtung stattfindet, aus dem gleichen Grund nicht gemessen. Hinzu kommt, dass Verfahren mit einer reproduzierbaren Verdichtungsenergie, wie z.B. das Rüttelproctorverfahren in den Untersuchungen von Bornemann [22], viel Zeit zwischen dem Mischen und dem eigentlichen Versuchsbeginn in Anspruch nehmen und damit weit von den kurzen Verarbeitungszeiten der Praxis entfernt sind (vergl. Kap. 1.1). Hinzu kommt der Einfluss der beginnenden Hydratation, der umso geringer ist, je kürzer die Zeitspanne zwischen Mischende und Versuchsende ist.

Gewählt wurde eine schlagende Verdichtungsart, bei der ein Holzstößel mit einem Hammer durch eine definierte Schlaganzahl und annähernd gleiche Schlagkraft den lose eingebrachten Leim verdichtet, bis kein weiteres Eindringen des Stößels in die jeweilige Lage erkennbar ist.

Der Zementleim wird in mehreren gleichhohen Schichten (ca. 4 cm bei fünf Schichten) in die Versuchseinrichtung eingefüllt und jede Lage für sich verdichtet. Die Versuchseinrichtung ist dabei stets gut gegen Verdrehungen und Verschiebungen manuell zu fixieren, damit sich nicht während des Verfüllens durch Bewegungen der Röhren gegeneinander eine Bruchkante im Zementleim ausbildet. Um einen hohen Grad der Verfüllung im oberen Bereich (Lasteinleitungsplatte/ obere Röhre) zu erreichen, wird der oberen Röhre ein weiterer Adapterring, und eine dritte Röhre aufgesteckt um die zweite Röhre zu überfüllen und zu verdichten. Nach dem Abnehmen des oberen Adapterrings und der dritten Röhre kann der Zementleim bündig am Röhrenende mit einem Stahllineal oder einem Spachtel mit sägenden Bewegungen abgeschnitten werden. Da der Zementleim im erdfeuchten Zustand sehr zäh ist, können durch das Abschneiden kleinere Fehlstellen im oberen Randbereich auftreten. Diese dürfen aufgefüllt und verspachtelt werden, um einen hohen Verfüllungsgrad und eine glatte Oberfläche zu erreichen, da dieser Bereich keine maßgeblichen Einflüsse auf die Zugfestigkeit in dem Sollbruchbereich hat. Von großer Bedeutung ist, dass die Versuchseinrichtung mit möglichst wenig Lufteinschlüssen oder Fehlstellen befüllt wird, da dies Einflussfaktoren auf den Verdichtungsgrad sind [132].

In Vorversuchen wurde die Verdichtungsenergie zunächst mit der Betonsonde nach Humm über den Verdichtungsstößel in den Zementleim eingebracht. Dies hatte den Vorteil, dass die Verdichtungsenergie genau definiert werden konnte. Die Betonsonde besteht aus einem Fallgewicht von 0,5 kg mit einer Fallhöhe von 20 cm. Insgesamt misst

die Betonsonde 50 cm und ist 1 kg schwer. Bei einer Verdichtung in 5 Lagen à 10 Schlägen wird dem erdfeuchten Zementleim eine Beschleunigungsarbeit W_B zugeführt von

$$W_B = 0,5 \text{ kg} \times 0,2 \text{ m Fallhöhe} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 5 \text{ Lagen} \times 10 \text{ Schläge} \\ = 49,05 \text{ Nm.}$$

Diese Verdichtungsenergie reichte nicht aus, um den erdfeuchten Zementleim gut zu verdichten. Durch eine Erhöhung der Schläge von 10 auf 15 wurde auch kein ausreichender Verdichtungsgrad erreicht, siehe Abbildung 96.



Abbildung 96: schlechter Verdichtungsgrad bei Verwendung der Humm-Sonde [132]

Der Verdichtungsgrad wurde durch Wiegen der Probe und Vergleich mit dem rechnerischen Sollgewicht ermittelt. Er lag im Falle des Zementleims der Abbildung 96 bei ca. 63%. Durch die vielen Lufteinschlüsse war die Haftreibung im Randbereich sehr geschwächt. Bei der Zugprüfung konnte kein Ergebnis festgestellt werden. Die obere Röhre glitt nach oben ab und es entstand kein Riss.

Die Verdichtungsenergie musste daher wesentlich erhöht werden. Um dies zu erreichen, wurde die Verdichtungsarbeit durch Schläge mit einem Gummihammer über den Stößel in den Zementleim eingebracht, siehe Abbildung 97. Der Stößel hat einen Durchmesser von 53,5 mm und eine Höhe von 210 mm und ist mit einer Scala versehen, sodass verfolgt werden kann, ob durch die aufgebrachten Schläge ein weiteres Absinken festgestellt werden kann. Die Verdichtung erfolgt dann so lange, bis kein weiteres Absinken des Stößels festzustellen ist. Bei dieser Art von Verdichtung ist die eingebrachte Energie nicht genau definierbar.



Abbildung 97: Versuchsaufbau Variante 1 (vergl. Abbildung 85) mit Stößel beim Einbringen der Verdichtungsenergie durch den Gummihammer [132]

Die Versuchseinrichtung Variante 1 ist bei der Verdichtung durch eine zweite Person gegen Verkantungen, Verdrehungen und ein Aufschwimmen der oberen Röhre durch Festhalten zu sichern. Bei Variante 3 war diese Sicherung nicht erforderlich.

Eine relevante Größe zur Beurteilung der erdfeuchten Zementleime ist der Verdichtungsgrad, da es auch in der Anwendungspraxis von Bedeutung für die Produktqualität und die Dauerhaftigkeit ist, gute und hohe Verdichtungsgrade zu erreichen. Für die Durchführung und die Ergebnisse des Zugversuchs ist es nicht nötig, die genaue Verdichtungsenergie zu kennen. Das Einbringen der Verdichtungsenergie soll neben dem Verdrängen der Luft-einschlüsse dazu dienen, die beim Mischen entstandenen Zementagglomerationen aufzubrechen, um eine gleichmäßige Beschaffenheit des Zementleims zu erzielen. Dies ist mit geringem Krafteintrag gut möglich. Ein zusätzliches Verdichten durch Klopfen an die Wandung der Versuchseinrichtung hat sich als ungeeignet bestätigt, da sich dadurch die Verbindung des Zementleims durch Kapillarbrücken löst. An der Wandung bildet sich auf diese Weise ein wässriger Gleitfilm, der zur Folge hat, dass die Haftreibung stark abnimmt und der Versuch nicht funktioniert. Weiterhin tritt vermehrt Zementleim im Bereich des Adapterrings aus.

Ein weiterer wichtiger Aspekt in Bezug auf die Verdichtung ist das Einbringen des Zementleims in mehreren gleichgroßen Lagen. Eine hohe Anzahl an Verdichtungslagen begünstigt den Verdichtungsgrad. Die Verdichtungsfugen bilden jedoch eine Schwachstelle im Gefüge, da die Oberflächen der einzelnen Lagen durch den Stößel sehr glatt werden. Der Verbund in den Verdichtungsfugen ist dadurch schlechter als in dem restlichen Bereich. Es ist daher empfehlenswert, gerade bei niedrigen w/f -Werten, die Oberflächen nach dem Verdichten geringfügig anzurauen, um den Verbund zwischen den Lagen zu verbessern. Während der Verdichtung wurde ein rückfederndes Verhalten des Stößels beobachtet, sowie ein hörbares, zischendes Entweichen der Luft aus dem zu verdichtenden Leim. Es wurde vermutet, dass die Luft aufgrund des engen Ringspaltes zwischen Stößel und Formwand nicht schnell genug entweichen konnte, und Luftanteile durch die weitere Befüllung im Leim verbleiben. Ein veränderter Stößel wurde mit Einkerbungen im unteren Bereich versehen, durch die die Luft besser nach oben entweichen kann. Durch

diese Modifizierung des Stößels, wie sie in Abbildung 98 dargestellt ist, wurde eine deutlich bessere Verzahnung der Lagen erreicht, und die Verdichtungsgrade erhöhten sich vor allem in Bereichen $w/z < 0,23$.

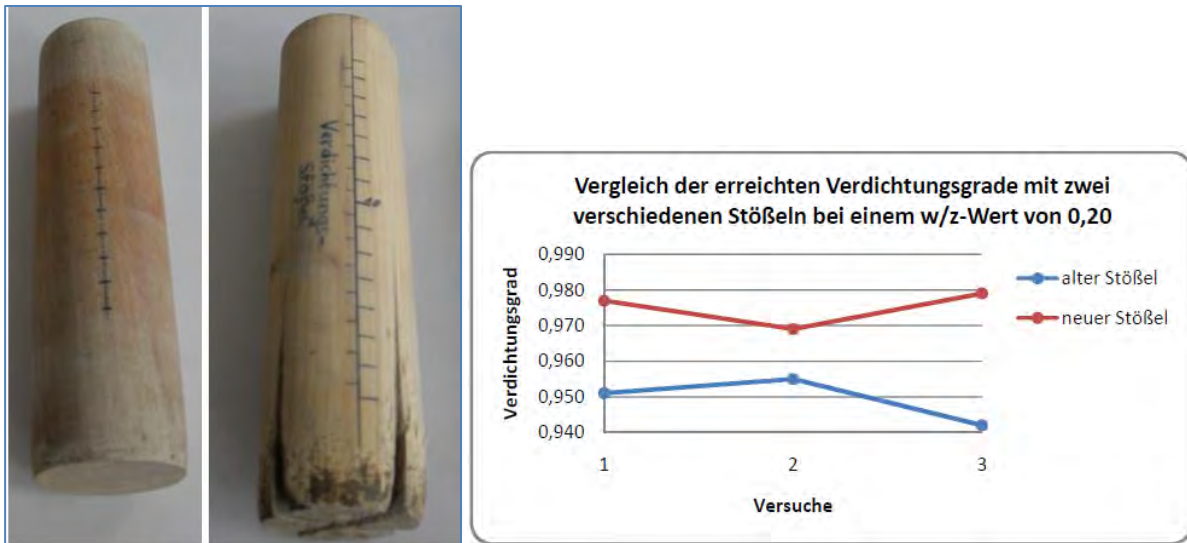


Abbildung 98: alter Stößel links [132], neuer, modifizierter Stößel rechts und Gegenüberstellung der erreichten Verdichtungsgrade [134]

Bei den Versuchen in Kap.4 wurde ausschließlich der neue Stößel eingesetzt.

Um den Einfluss der Anzahl der Verdichtungslagen zu untersuchen, wurden Zugversuche an Zementleimen mit gleichem w/z -Wert und ohne Zusatzstoffe durchgeführt. Die Lagenanzahl wurde dabei variiert zwischen 3, 5 und 7 Lagen. Die Anzahl der Lagen weiter zu erhöhen, wurde als nicht sinnvoll erachtet, da die Verdichtungslagen zu nah im den Bereich der Sollbruchkante liegen würden. In diesem Fall wäre nicht gewährleistet, ob der Zementleim an der Sollbruchkante reißt oder genau in der Verdichtungsstufe. Die Anzahl der Lagen soll ungerade sein, damit im Bereich der Sollbruchstelle eine Verdichtungslage mittig liegen und die Versagensfläche dort auftreten kann.

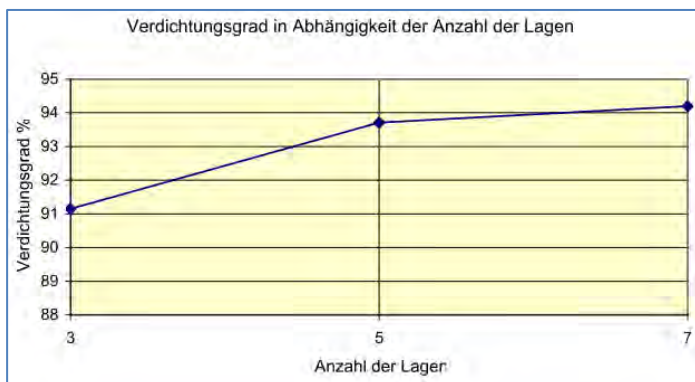


Abbildung 99: Verdichtungsgrad in Abhängigkeit der Anzahl der Verdichtungslagen [132]

Die Steigerung der Anzahl der Lagen brachte auch eine Steigerung des Verdichtungsgrades (vgl. Abbildung 99). Bei sieben gleich großen Verdichtungslagen ist jede Lage für sich ≈ 29 mm stark. Das bedeutet, dass der Abstand der Verdichtungsstufen zum Sollbruchbereich ≈ 15 mm ist. In der praktischen Anwendung ist dieser Spielraum beim Einbringen der Lagen zu gering, da nicht immer eine gleiche Menge Zementleim abgeschätzt werden kann. Das Abwiegen jeder einzelnen Lage würde den Versuchsablauf zu sehr verzögern. Daher kann es vorkommen, dass die Verdichtungsstufe zu nah an der Sollbruch-

stelle liegt. Es ist deshalb empfehlenswert, den Zementleim in 5 Lagen zu verdichten. Die Steigerung des Verdichtungsgrads zwischen 5 und 7 Lagen um lediglich 0,5 % rechtfertigt diese Vorgehensweise. Die Verdichtung in fünf Lagen wurde aufgrund der Ergebnisse für alle folgenden Versuche angewendet.

4. Versuche

4.1 Vorversuche

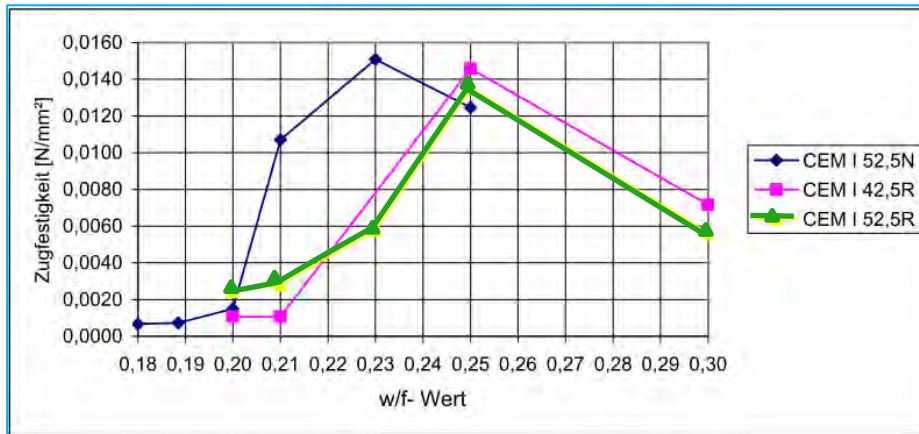
Die Vorversuche wurden während der Erprobungs- und Entwicklungsphasen des Prüfverfahrens durchgeführt mit dem Ziel, den Versuchsaufbau weiter zu verbessern wie in Kap. 3 beschrieben. Weiterhin wurde im Rahmen der Vorversuche überprüft, ob ergänzende Kenngrößen wie z.B. der Wasseranspruch für die Normsteife und die Fließgrenze bei den eingesetzten Zementen zusätzlich ermittelt werden sollten sowie das Verhalten von Flugasche und Mikrosilika. Diese Versuche wurden zum Teil mit der Versuchsvariante 1 durchgeführt.

Weil bei den späteren Versuchen neben Zement auch weitere Feststoffe verwendet wurden, wird im Folgenden das Wasser-Feststoff-Verhältnis (w/f-Wert) zur Beschreibung verwendet. Im Falle von Leimen, die ausschließlich aus Wasser und Zement bestehen, ist der w/f-Wert gleichbedeutend mit dem w/z-Wert.

4.1.1 Zement

Die mit dem Versuchsaufbau gemessene Grünzugfestigkeit reagiert sehr empfindlich auf Änderungen im Wassergehalt des Zementleims. Bereits geringe Änderungen des w/f-Werts haben große Auswirkungen auf das Verhalten des Zementleims während der Prüfung. Eine generelle Festlegung, in welchen w/f-Wert Bereichen die Durchführung des Versuchs möglich ist, ist nicht möglich. Die obere und untere Grenze des w/f-Werts ist abhängig vom Wasseranspruch und Wasserrückhaltevermögen des Zements und muss versuchstechnisch ermittelt werden. Die verwendeten Zemente haben alle einen unterschiedlichen Wasseranspruch, bedingt durch ihre Mahlfineinheit und die Kornzusammensetzung. Das hat zur Folge, dass die w/f- Bereiche, bei denen eine Zugfestigkeitsprüfung möglich ist, schwanken. Bei Zementen mit geringerem Wasseranspruch können geringere w/f-Werten geprüft werden als bei Zementen mit höherem Wasseranspruch.

Die Auswertung der Ergebnisse in Abhängigkeit des w/f-Werts sind in Abbildung 100 dargestellt. Dabei wurden die Maximalwerte der Zugkraft –dargestellt als Zugfestigkeit– miteinander verglichen. Es bestätigte sich, dass der Zement mit dem geringsten Wasseranspruch bei Normsteife mit den niedrigsten w/f-Werten herstell- und prüfbar ist. Die Beurteilung der Prüfbarkeit erfolgt durch optische Prüfung des frisch angemischten, erdfeuchten Zementleims. Ist ein Zementleim schlecht durchmischt und weist trockene Zementteilchen auf, wird von einer Prüfung abgesehen.



	w/f Normsteife	w/f Fließgrenze
CEM I 42,5 R	0,35	0,46
CEM I 52,5 R	0,34	0,44
CEM I 52,5 N	0,31	0,42

Abbildung 100: Maximalwerte der Grünzugfestigkeiten (nach Variante 1, jeweils ein Versuch) verschiedener Zemente in Abhängigkeit des w/f-Werts; jeweilige Normsteife und massenbezogener β_p -Wert (als w/f-Fließgrenze angegeben) [132]

Bei dem Zement CEM I 52,5N (Werk 1) konnten Zementleime bis $w/f=0,18$ hergestellt und geprüft werden. Die Konsistenz war an diesem Punkt rieselfähig, gut durchmischt und ohne trockene Stellen. Der w/f -Wert wurde auf Grund der geringen Zugkräfte nicht weiter abgesenkt. Der maximal hergestellte und geprüfte w/f -Wert lag bei diesem Zement bei 0,25. Die Konsistenz war bei diesem Wert bereits plastisch, aber nicht fließfähig. Ab einem w/f -Wert von 0,21 tritt bei diesem Zement beim Verdichten Zementleim im Bereich des Adapterrings aus. Dessen Konsistenz ist sehr wässrig und bildet einen Gleitfilm im Bereich des Adapterrings, sodass angenommen wird, dass keine zusätzliche Reibung auftritt. Mit steigendem w/f -Wert wird die Menge des austretenden Zementleims größer und es wird schwieriger, das obere Rohr beim Verdichten gegen Aufschwimmen zu sichern. Wegen des Festigkeitsabfalls und des zunehmend stärker austretenden Zementleims wurde kein höherer w/f -Wert als 0,25 geprüft. Der Zement CEM I 42,5R (Werk 2) verhält sich beim Wasseranspruch ganz anders als der zuvor geprüfte Zement. Der erste hergestellte Zementleim mit einem w/f -Wert von 0,18 war so trocken und stellenweise schlecht durchmischt, dass von einer Zugprüfung abgesehen wurde. Die Konsistenz war nicht vergleichbar mit der des CEM I 52,5N bei gleichem w/f -Wert. Der niedrigste geprüfte w/f -Wert für den CEM I 42,5R war 0,20. In diesem Bereich war die Konsistenz des Zementleims rieselfähig und gut durchmischt. Der maximal hergestellte und geprüfte w/f -Wert lag bei 0,30.

Im Gegensatz zu dem Zement CEM I 52,5 N zeigt der CEM I 42,5R ein besseres Wasserrückhaltevermögen. Dadurch tritt auch bei den hohen w/f -Werten bis 0,30 beim Verdichten kein Zementleim aus. Einen vergleichbaren Wasseranspruch wie der CEM I 42,5R hat der zuletzt geprüfte Zement CEM I 52,5R. Der niedrigste hergestellte und geprüfte w/f -Wert lag ebenfalls bei 0,20. Die Konsistenz war auffällig trocken und die Zugkräfte gering, sodass auf ein weiteres Absenken des w/f -Werts verzichtet wurde. Der maximal hergestellte und geprüfte w/f -Wert war wegen des eintretenden Kraftabfalls 0,30. Das Wasserrückhaltevermögen ist schlechter als das des CEM I 42,5R. Es tritt zwar während

des Verdichtens kein Zementleim am Adapterring aus, aber nach der Prüfung ist am oberen Rohr ein geringer Austritt an Zementleim zu erkennen.

Anhand der Abbildung 100 zeigt sich, dass die geprüften w/f-Werte weit unterhalb der w/f-Werte der durch den β_p -Wert beschriebenen Fließgrenze liegen. Bei der Durchführung der Versuche stellte sich heraus, dass Zementleime mit hohen Wassergehalten mit dieser Versuchseinrichtung nicht prüfbar sind. Versuche an Zementleimen mit w/f-Werten von über 0,40 wurden daher nicht durchgeführt. Ein möglicher Zusammenhang zwischen dem w/z-Wert der Fließgrenze und den prüfbaren w/f-Werten wurde nicht weiter verfolgt und ist auch nicht zu erwarten. Wie in Kap. 2.2 erläutert, werden erdfeuchte Betone im Amerikanischen auch als „zero-slump-concrete“ bezeichnet. Der Begriff erläutert besser als der Deutsche Begriff „erdfeuchte Betone“, dass es sich um einen Konsistenzbereich handelt, der so steif ist, dass er mit einem Slumptest nicht weiter unterschieden werden kann. Das Wesen des β_p -Wertes ist jedoch eine Approximation des gerade so nicht beweglichen, verschiebbaren Betons/Leimes durch das gemessene Bewegungsverhalten von drei bzw. mehr weichen Leimen und deren Verformungsverhalten. Somit stellt der Schnittpunkt auf der y-Achse als β_p -Wert lediglich den maximal möglichen Wasser-Feststoff-Wert dar, bei dem keine Verformung mehr eintritt, jedoch nicht den minimal möglichen, siehe Abbildung 101. Es ist bekannt, dass der β_p -Wert ca. 30 % höher liegt als das wirkliche Wasser-Feststoffverhältnis, das zu einer Hohlräumfüllung benötigt wird, weil der Wert durch lineare Extrapolation gewonnen wird, die wirkliche Kurve jedoch nicht linear verläuft. Auch bei einer Verringerung der β_p -Werte um 30% liegen diese reduzierten Werte immer noch oberhalb der w/f-Werte der maximalen Zugkräfte in Abbildung 100.

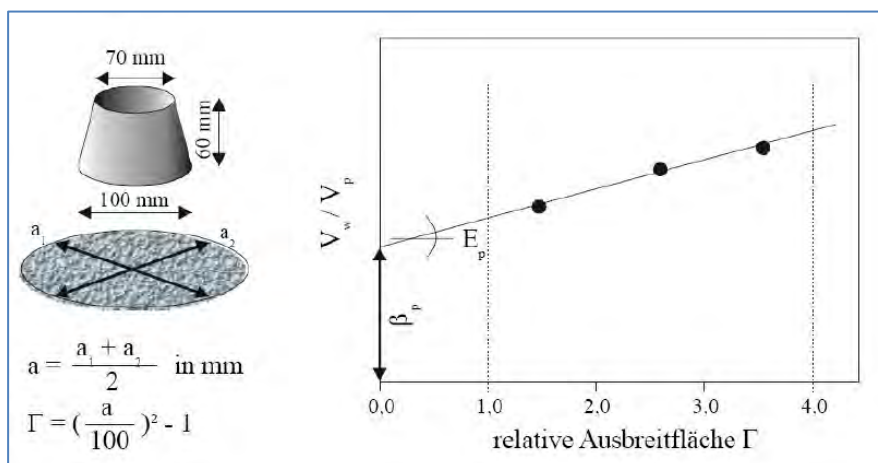


Abbildung 101: Ermittlung der relativen Ausbreitfläche Γ und Auswertung zur Bestimmung des β_p -Wertes [28]

Der w/z-Wert bei Normsteife der einzelnen Zemente liegt hingegen näher am Maximum der hergestellten und prüfbaren w/f-Werte. Die maximal hergestellten und geprüften w/f-Werte liegen dennoch unter den w/z-Werten bei Normsteife. Der Wasseranspruch bei Normsteife ist daher nicht der maximal prüfbare Grenzwert, jedoch kann er als Orientierung bei der Auswahl des ersten zu prüfenden w/f-Werts verwendet werden. Die maximalen Zugfestigkeiten wurden bei w/f-Werten erreicht, die bei ca. 25-29% unter den w/z-Werten bei Normsteife lagen. Als Einstiegswert eignet sich daher ein w/f-Wert, der ca. 30% unter dem Wasseranspruch bei Normsteife liegt. Da dies nur eine Orientierungshilfe ist, reichen hierfür die allgemeinen Herstellerangaben aus, ohne dass eine separate Prüfung erfolgen muss. Um das Maximum der Zugfestigkeit des jeweiligen Zements ver-

suchstechnisch zu ermitteln, wird ausgehend von diesem w/f-Wert der Wassergehalt schrittweise erhöht und verringert.

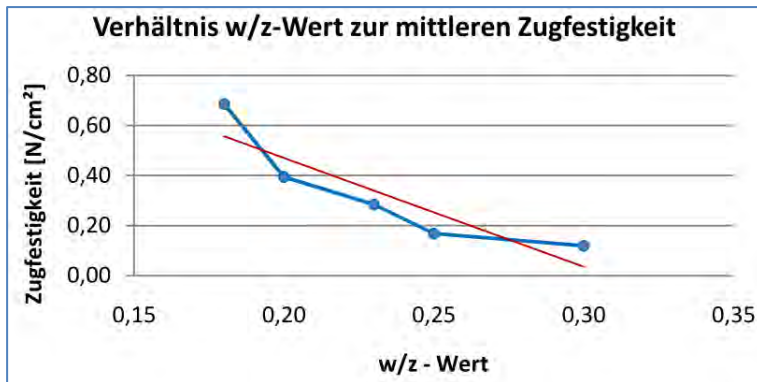


Abbildung 102: Zusammenhang zwischen mittlerer Grünzugfestigkeit aus jeweils 5 Versuchen und w/z-Wert (blaue Linie), Trendlinie (rot), Zement: CEM I 42,5 R (Variante 3) [134]

Der Wasseranteil, ausgedrückt durch den w/z- bzw. w/f-Wert beeinflusst unmittelbar die Partikelentfernung und damit die Verzahnung der Zementkörner untereinander. Beides ist bei geringem w/z-Wert höher als bei höherem w/z-Wert, weil sie von einer geringeren Wasserfilmdicke umgeben sind. Wird Zugkraft auf die Probekörper aufgebracht, lösen sich die Zementkörner mit einem dickeren Wasserfilm leichter voneinander als diejenigen mit einem dünneren Wasserfilm, die Zugfestigkeit in Abbildung 102 zeigt diesen Zusammenhang. Weil die Verdichtungswilligkeit mit stark sinkendem Wassergehalt abnimmt, da der Leim sich immer schwerer verformen lässt, verringert sich auch der erreichbare Verdichtungsgrad, es kommt zu einem Abfall der Zugfestigkeit. Dieser w/z-Bereich ist in Abbildung 102 noch nicht enthalten, jedoch in Abbildung 100 bei allen drei Zementen erkennbar. Der Zusammenhang zwischen Verdichtungsgrad und Zugfestigkeit ist in Abbildung 86 exemplarisch dargestellt.

Anhand erster vollständiger Versuchsergebnisse der Zug-Dehnungsmessung zeigte sich, dass mit dem Versuchsaufbau Unterschiede bei den w/z-Werten dargestellt werden können, siehe Abbildung 103.

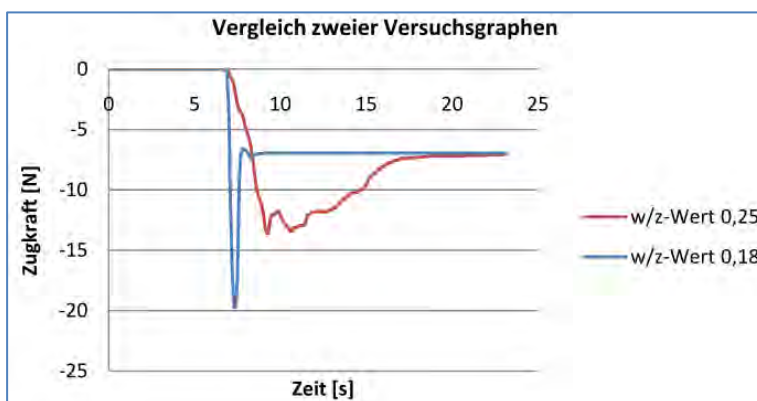


Abbildung 103: Zugkraft-Zeit-Diagramme bei zwei w/z-Werten [134]

Darin enthält die x-Achse noch die Belastungszeit, in den Hauptversuchen wurde sie wie in Kap. 3.1 beschrieben, als Weg aufgetragen, entsprechend $0,1 \text{ s} = 0,3 \text{ mm}$ (vergl. Abbildung 92). Alle durchgeführten Zugversuche sind dadurch gekennzeichnet, dass ein Trennriss an der Sollrissstelle zwischen oberer und unterer Probekörperhälfte entsteht, siehe Abbildung 89. Am Ende des Versuches hängt der obere Teil der Schalung einschließlich Leimfüllung an der Messapparatur. Dadurch entsteht am Ende der Versuchs-

kurven die asymptotische Annäherung an eine Kraft bei sehr großen Wegen, im Beispiel von Abbildung 103 an eine Kraft von ca. 7 N. Diese Kraft entspricht der Gewichtskraft des frei hängenden, oberen gefüllten Versuchskörpers. Weil der untere und der obere Schalungskörper zu Beginn des Versuches aufeinander stehen, übt die Gewichtskraft des oberen Teiles des gefüllten Probekörpers keine Druckbeanspruchung auf den Leimquerschnitt in der Sollrissfuge aus. An dem Punkt der maximalen Zugkraft ist die Gewichtskraft des oberen Abschnittes jedoch von dieser abzuziehen, um die effektive Zugkraft Z_{ef} zu erhalten, die für den Bruch des Zementleimes überschritten werden muss. Für die dargestellten Versuche betragen die effektive Zugkräfte

(20 N-7 N) = 13 N (bei w/z-Wert 0,18) und

(13 N-7 N) = 6 N (bei w/z-Wert 0,25).

Der weniger feuchte Zementleim besitzt Eigenschaften eines spröden Werkstoffs. Der Bruch geschieht plötzlich und die auftretenden Spannungen sind bei ausreichender Verdichtung auf eine annähernd ebene Querschnittsfläche verteilt. Feuchterer Zementleim hat im Gegensatz dazu duktile Eigenschaften. Feuchter Zementleim ist klebrig und leichter formbar wie bei den Betrachtungen der Probekörper erkannt wurde. Probekörper mit einem w/z-Wert von 0,18 waren hart und trocken, beim Reinigen musste der Zementleim aus dem Schalkörper gekratzt werden. Bei Probekörpern mit einem w/z-Wert von z.B. 0,25 hat es ausgereicht, das Schalrohr zu schütteln, um den Haftverbund zur Mantelinnenfläche zu stören und der Probekörper glitt heraus. Dieser herausgeglittene Probekörper war verformbar. Dies führt zu der Erkenntnis, dass sich der feuchtere Probekörper auch vor dem Bruch verformt. Im Gegensatz zu trockenen Zementleimen geschieht der Abriss bei feuchteren Zementleimproben nicht kurz nach Erreichen der höchsten Zugkraft, sondern erst nach einer Restverformung. Der feuchtere Zementleim besitzt also eine größere Restzugfestigkeit. Einen Beleg hierfür liefert ein Vergleich zweier Versuchsglyphen mit unterschiedlichen w/z-Werten, siehe Abbildung 103. Darin wird Z_{ef} bei w/z-Wert 0,25 bei 9 s erreicht (\cong 3 mm Weg), und ist erst bei ca. 17 s (\cong 5,66 mm Weg) Null.

Nach dem Überschreiten der maximalen Grünzugkraft treten bereits Störungen in der frischen Zementleimmatrix auf, die Bindungen der Partikel untereinander lösen sich und verringern dadurch die Größe der verbleibenden Haftkräfte zwischen den Partikeln. Die Restzugfestigkeit fällt daher in einen Verformungsbereich, der bereits Schädigungen im Gefüge aufweist. Daher sind die zur Grünzugfestigkeit zählenden Kenngrößen die Kraft Z_{ef} und der Weg, bei dem sie erreicht wird, w_{ef} .

4.1.2 Flugasche und Mikrosilika

Die Korngrößenverteilung der Flugasche ist vergleichbar mit der von Zement, siehe Analysen der Ausgangsstoffe in Anhang 1.

Die Oberfläche der Flugascheteilchen ist glatt und glasig, deshalb ist eine geringere Menge an Wasser nötig, um die Flugascheteilchen mit Wasser zu benetzen. Die kugelige Form der Flugasche vermindert zusätzlich die innere Reibung des Frischbetons, insbesondere in den Konsistenzbereichen F2-F4, sodass sich die Verarbeitbarkeit verbessert. Um eine gleiche Verarbeitbarkeit zu erreichen, muss weniger Wasser zugeführt werden oder die Verarbeitbarkeit verbessert sich bei gleichem Wassergehalt.

Die Zugfestigkeiten der Flugasche bei unterschiedlichen w/f-Werten sowie die Auswirkungen durch die Zugabe von Flugasche auf die Zugfestigkeit des erdfeuchten Zementleims

wurden versuchstechnisch geprüft. Die Dosierung der Flugasche erfolgte in Massenprozent des Feststoffgehalts mit den Gehalten 100%, 25% und 5%.

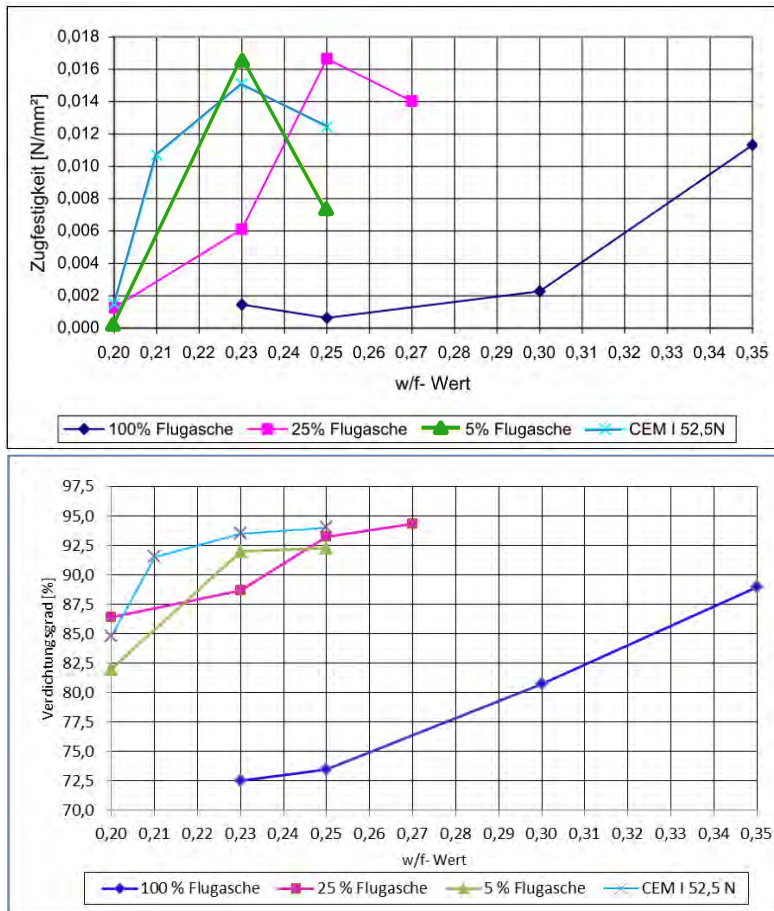


Abbildung 104: Einfluss verschiedener Flugaschegehalte (mit CEM I 52,5 N) auf die Grünzugfestigkeit (oben) und den Verdichtungsgrad (unten) [132]

Bei den Versuchen an 100%-igen Flugascheleimen wurden bei den niedrigen w/f-Werten nur geringe Zugfestigkeiten ermittelt, diese stiegen mit größer werdenden w/f-Werten deutlich an, ebenso wie der Verdichtungsgrad (vgl. Abbildung 104). Der Wassergehalt, der für die Herstellung eines optisch guten erdfeuchten Leims notwendig ist, war bei den 100%-igen Flugascheleimen höher als der von reinen Zementleimen.

Eine mögliche Erklärung besteht darin, dass die Haftkräfte infolge van-der-Waals- und elektrostatischen Kräfte bei der kugligen Form der Flugasche geringer sind als bei der gebrochenen Form des Zements. Die Kontaktpunkte der Teilchen untereinander sind bei ideal runden Formen kleiner als bei den gebrochenen Formen. Die Mikrorauigkeit der Oberfläche der Zementteilchen ist erheblich kleiner als die Partikel selbst und bewirkt einen erheblichen Zuwachs der Kontaktfläche der Partikel untereinander. Daher sind die Bindungskräfte infolge van-der-Waals- und elektrostatischer Kräfte bei 100%-igen Flugascheleimen geringer. Bei steigendem w/f-Wert erhöht sich durch die Entstehung von Flüssigkeitsbrücken der Anteil an kapillaren Bindungsmechanismen, die Zugfestigkeit steigt an. Bei einem Flugascheanteil von 25% des Feststoffgehalts zeigte sich weiterhin ein höherer Wassergehalt für die Herstellung eines erdfeuchten Leims. Die maximale Zugfestigkeit war etwas höher als die des Zementleimes ohne Zusatzstoffe. Die Wasserrückhaltung der Zementleime mit Flugascheanteilen war schlechter als die von reinen Zementleimen. Es tritt ab w/f-Werten von 0,25 Leim aus mit sandiger Konsistenz, so dass darauf verzichtet wurde, höhere w/f-Werte als 0,27 zu prüfen.

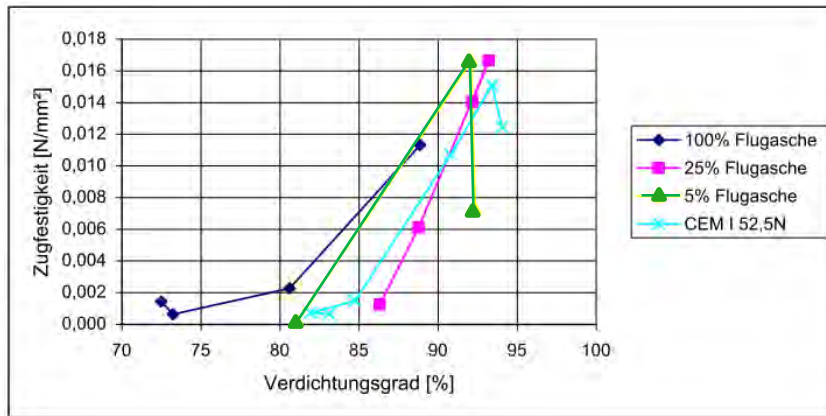


Abbildung 105: Einfluss verschiedener Flugaschegehalte auf Grünzugfestigkeit und Verdichtungsgrad [132]

In Abbildung 105 wurde der Zusammenhang zwischen den ermittelten Verdichtungsgraden und den gemessenen Zugfestigkeiten dargestellt. Die Verdichtungsgrade beziehen sich dabei auf die rechnerische Rohdichte der frischen Leime im Vergleich zu den durch Wiegen errechneten tatsächlichen Frischleimrohdsichten. Die Verdichtungsgrade nehmen bei allen dargestellten Leimen mit steigendem w/f-Wert zu, siehe Abbildung 104.

Eine wesentliche Erhöhung des Verdichtungsgrads durch die Zugabe der Flugasche konnte nicht festgestellt werden, obwohl durch die Zugabe von Flugasche eine verbesserte Verarbeitbarkeit und höhere Verdichtungsgrade erwartet wurden, siehe Abbildung 105. Diese Erscheinung lässt sich darauf zurückführen, dass bereits bei geringer Verdichtungsenergie Leim im Bereich des Adapterringes austrat, besonders bei FA-Anteilen von 25%. Die Verdichtung wurde dann nicht fortgeführt. Es ist daher möglich, dass mit einer weiteren Verdichtung ein höherer Verdichtungsgrad herzustellen ist als bei reinen Zementleimen. Da die Konsistenz des austretenden Leims bei der Zugabe von Flugasche eine sandigere Konsistenz aufweist als bei reinen Zementleimen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass dadurch auch eine zusätzliche Reibung auftritt, die Einfluss auf die Ergebnisse der Zugfestigkeit nimmt.

Es wurde daher versucht, den Leimaustritt so gering wie möglich zu halten, sodass die Verdichtung nicht immer soweit fortgeführt werden konnte, bis kein Einsinken des Stößels mehr festzustellen war.

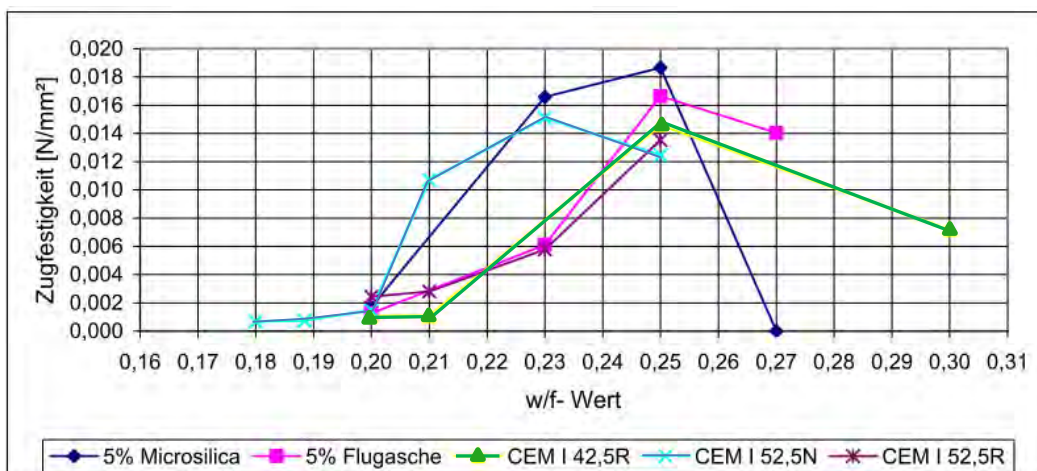


Abbildung 106: Grünzugfestigkeiten von CEM I 52,5 N mit 5% Microsilica und 5% Flugasche im Vergleich zu CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 N und CEM I 52,5 R [132]

Bei Einsatz von Mikrosilika konnten ebenfalls Zugfestigkeiten gemessen werden, siehe Abbildung 106. Diese lagen höher als bei Einsatz von Flugasche bei identischen w/f -Werten.

4.1.3 Zugversuche an trockenen Ausgangsstoffen

In Kap. 2.3.3 (Abbildung 36) wurde die von Bornemann [22] aufgestellte Schlussfolgerung erläutert, dass zurückgetrocknete Kalkstein-Feststoffsuspensionen eine höhere Festigkeit haben als feuchte, und daher die Kapillarkräfte keine Rolle spielen bei dem Kräftesystem erdfeuchter Betone. Um dies zu überprüfen, wurden an den trockenen, verwendeten Ausgangsstoffen Zugversuche ohne Zugabe von Wasser durchgeführt. Die Vorgehensweise der Probenvorbereitung und Verdichtung erfolgte dabei wie in Kap. 3 beschrieben. Außerdem soll überprüft werden, ob damit der Anteil der Kräfte, die nicht auf der Wirkung von Adsorptions- oder Zwickelwasser beruhen, d.h. die durch Van-der-Waals-Kräfte übertragen werden, ermittelt werden kann. Ebenso der Anteil der sog. Interlocking Kräfte durch mechanische Verzahnung, Verdrehung und Anhebung der Partikel während des Lastweges, deren Anteil erst bei höheren Wegen aktiviert wird.



Abbildung 107: trockener Zement nach dem Zugversuch, links hängend ohne Entleerung, rechts: oberes Teilstück mit erkennbarem Bruchbild



Abbildung 108: trockener Zement nach dem Zugversuch, unteres Teilstück: erkennbarer Zusammenhalt der einzelnen Partikel in größeren Agglomeraten

Die Abbildung 107 und Abbildung 108 zeigen den Bruchquerschnitt einer Zementprobe CEM I 42,5 R. Auch in hängendem Zustand verharrt der trocken verdichtete Zement im oberen Probekörper ohne herauszurieseln oder stückweise herauszufallen. Das Relief des Bruchverlaufes im Bruchquerschnitt, der Höhenunterschied, betrug punktuell bis zu 6 mm.

Nach der Durchführung der Versuche war auffällig, dass alle drei Zemente sehr stark in beiden Probekörperhälften verfestigt waren, und ein Reinigen nur durch stocherndes Lösen mit einem Schraubendreher möglich war. Demgegenüber reichte es bei Flugasche und Metacaolin aus, gegen den Versuchskörper zu klopfen, und das Probegut rieselte eigenständig heraus. Siliziumcarbid verhielt sich bei dieser Beobachtung vergleichbar wie Zement. Mikrosilika wurde nicht trocken untersucht, weil die in den Hauptversuchen verwendeten Bestände zwischenzeitlich aufgebraucht wurden und eine Rückstellprobe in ausreichender Menge nicht zur Verfügung stand.

Die Messwertaufnahme wurde im Vergleich zu den Hauptversuchen von 10 auf 40 Werte/Sekunde erhöht, da bereits im Vorfeld ein sehr sprödes und daher schnelles Bruchverhalten vermutet wurde. Dabei wurde zunächst die Belastungsgeschwindigkeit aus den Hauptversuchen mit 3 mm/sec. beibehalten.

Alle Versuchen gemeinsam war der geringe Verdichtungsgrad, der bei ermittelten Dichten von 1,74 bzw. 1,81 kg/dm³ bei 0,56 bzw. 0,58 lag. Dennoch ließ sich der Zement auch in trockenem Zustand durch die angewendete schlagende Verdichtung umlagern und nahm eine dichtere Packung an als unmittelbar nach dem Einfüllen, wie auch die Abbildung 107 und Abbildung 108 den sehr kompakten Zustand darstellen. Der Verdichtungsgrad V_R stellt die Packungsdichte der trockenen, verdichteten Probekörper im Vergleich zur Rohdichte dar. Im Allgemeinen wird die lose Schüttdichte von Zement mit 1,30-1,45 kg/dm³ angegeben [138]. Gegenüber der losen Schüttdichte nahmen die Proben im Mittel eine ca. 30% höhere Packungsdichte ein, dargestellt als V_S . Auch für die weiteren verwendeten Stoffe trifft dies zu, eine Übersicht ist in Tabelle 6 wiedergegeben. Hierfür wurde auf die Ermittlung der Schüttdichten der verwendeten Stoffe durch Versuche verzichtet, die wiedergegebenen Werte beziehen sich auf Mittelwerte der Stoffe aus der Literatur [138].

Tabelle 6: mittlere Verdichtungsgrade der trockenen Ausgangsstoffe bezogen auf die Rohdichte und auf die Schüttdichte der jeweiligen Stoffe

Alle Dichten [kg/dm ³]	CEM I 42,5 R	CEM II-A/LL 42,5 R	CEM III/A 42,5 R	Flugasche	Siliciumcarbid	Metakaolin
Mittlere Dichte der Probekörper	1,80	1,87	1,77	1,42	1,46	0,90
Rohdichte	3,1	3,1	3,1	2,24	3,21	2,1
Mittlere Schüttdichte	1,38	1,38	1,38	0,48	0,90	0,44
Verdichtungsgrad V_R bezogen auf die Rohdichte	0,58	0,60	0,57	0,63	0,45	0,43
Verdichtungsgrad V_S bezogen auf die Schüttdichte	1,30	1,36	1,28	2,96	1,62	2,04

Auffällig ist, dass Flugasche, Siliciumcarbid und Metakaolin deutlich höhere Verdichtungsgrade bezogen auf die Schüttdichte aufwiesen als die drei Zemente. Insbesondere Flugasche mit ca. 300 % oberhalb der Schüttdichte ist sehr auffällig. Dieser Effekt kann dadurch bedingt sein, dass Flugaschepartikel durch ihre kugelige Gestalt während der Verdichtung leichter aneinander vorbei gleiten in freie Hohlräume hinein, ohne zu blockieren. Ein plastisches Verformen, das mit verstärkten Van-Der-Waals-Haftkräften einhergeht, kann ausgeschlossen werden, weil insbesondere die Flugasche beim Reinigen der Probekörper bereits durch leichtes Klopfen an den Wandungen entfernt werden konnte, ohne in Klumpen oder kleineren oder größeren Agglomeraten herauszufallen, wohingegen die Zemente und auch Siliciumcarbid durch Stochern mit einem Schraubendreher entfernt werden mussten und dabei jeweils ca. erbsengroße Agglomerate beibehalten wurden.

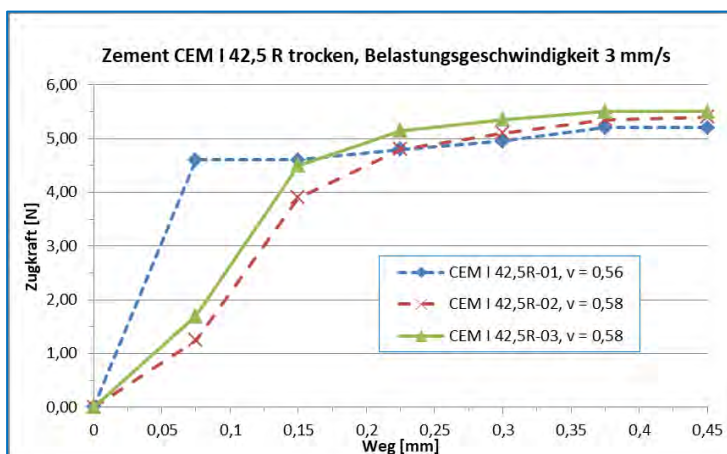


Abbildung 109: Zugversuche (-01, -02, -03) an trockenem Zement CEM I 42,5 R, v = Verdichtungsgrad

Bei den drei durchgeführten Versuchen in Abbildung 109 zeigte sich, dass grundsätzlich ein Zugdehnungsverhalten des trockenen Zementes gemessen werden konnte, jedoch wurden nur wenige Messwerte aufgenommen, bevor der Abriss des oberen Probeteils erfolgte und dessen Masse als Eigengewichtskraft konstant als Messwert angezeigt wurde, in Abbildung 109 ab 0,375 mm Weg. Damit bei den sehr geringen Zugwegen mehr Messwerte gewonnen werden konnten, wurde die Belastungsgeschwindigkeit bei den fol-

genden Versuchen deutlich reduziert auf 0,375 mm/s, entsprechend einer Kurbelumdrehung in acht Sekunden des mechanischen Versuchsstandes. Hierbei muss darauf hingewiesen werden, dass damit Wege widergegeben werden, die so klein sind, dass die manuelle Genauigkeit der Prüfgeschwindigkeit durch Kurbeln an die reproduzierbaren Grenzen der Genauigkeit gelangt.

Bei der Probe mit dem geringeren Verdichtungsgrad wurde das Eigengewicht deutlich eher erreicht als bei den beiden anderen Kurven. Der geringfügige Anstieg der blau gestrichelten Linie im hinteren Bereich ist auf Störeinflüsse während der Prüfung in Form von geringfügigen Pendelbewegungen des oberen Probekörpers zurückzuführen. Eine Erklärung der Kurvenverläufe im Allgemeinen liefern die Kurven 1 und 2 in Abbildung 110. Bei Kurve 2 wurden die beiden noch gefüllten Probekörperhälften aus dem dritten Versuch der Abbildung 109 (grüne Kurve mit Dreiecken) erneut und in der ursprünglichen Orientierung übereinander aufgestellt (ohne neue Verdichtung), und der Zugversuch durchgeführt. Anschließend wurde für den Versuch der Kurve 1 aus beiden Probekörperhälften soviel Zement entfernt, dass der verbleibende Zement keinen Kontakt beim erneuten Aufeinandersetzen der Probekörperhälften bekommen konnte. Entsprechend ist bei Kurve 1 zu erkennen, dass bereits der erste Messwert, aufgenommen bei 0,01 mm Weg, die Gewichtskraft der oberen Probekörpermasse anzeigt. Demgegenüber verhält sich die Kurve 2 der bereits gerissenen Probe mit Zementkontakt deutlich anders. Obwohl die Probe bereits geprüft wurde und gerissen war, weist sie eine langsame Kraftsteigerung auf und erreicht die Eigengewichtskraft erst bei 0,07 mm Weg. Die Messwerte, die bis dahin gewonnen wurden, sind auf Kraftmechanismen wie Reibung, Verzahnung und Haftkräfte zurückzuführen, die sich bedingt durch den erneuten Zementkontakt, wieder eingestellt haben und die überwunden werden müssen, bevor die beiden Probekörperhälften erneut den Kontakt verlieren und das Gewicht des oberen Teilabschnittes messtechnisch erfasst wird. Jedoch ist die Summe der Kraftmechanismen in der trockenen Zementprobe nicht größer als diese verbleibende Gewichtskraft. Ansonsten wäre die Kurve wie z.B. in Abbildung 128 ausgeprägt mit einem Maximum, von dem aus die Werte abfallen auf die verbleibende Gewichtskraft.

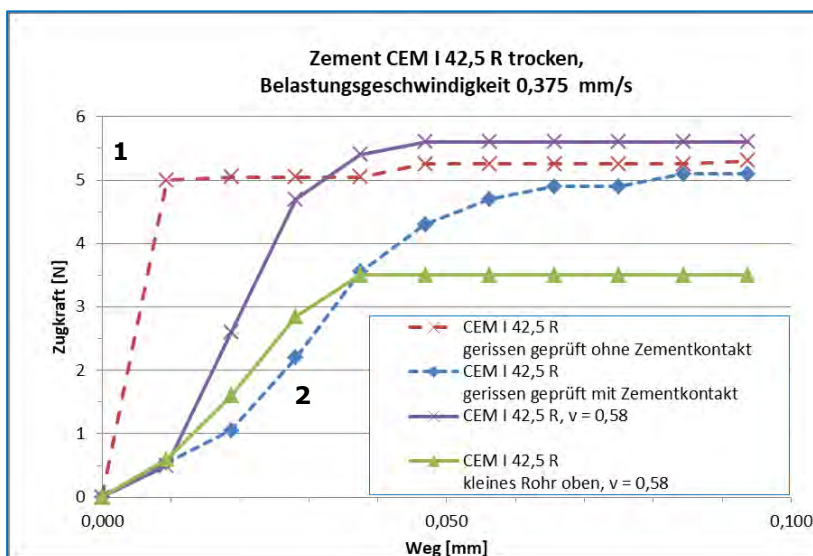


Abbildung 110: Zugversuche an trockenem Zement CEM I 42,5 R, v = Verdichtungsgrad; Vergleich von bereits gerissenen Proben und kleinem Probekörper oben mit normaler Versuchsdurchführung

Weiterhin zeigte sich, dass bei der Verwendung eines kleineren oberen Probekörpers (grüne Kurve mit Dreiecken) die gemessenen Zugkräfte nicht mit denen bei einem großen, d.h. normalerweise verwendeten Probekörper, übereinstimmen. Hierbei wird der Bereich bis zum Erreichen der Eigengewichtskraft betrachtet, der sich in den Absolutwerten unterscheidet. Jedoch ist die relative Kraftentwicklung in diesem Bereich, bezogen auf die jeweilige Eigengewichtskraft, nahezu identisch, wie Abbildung 111 zeigt.

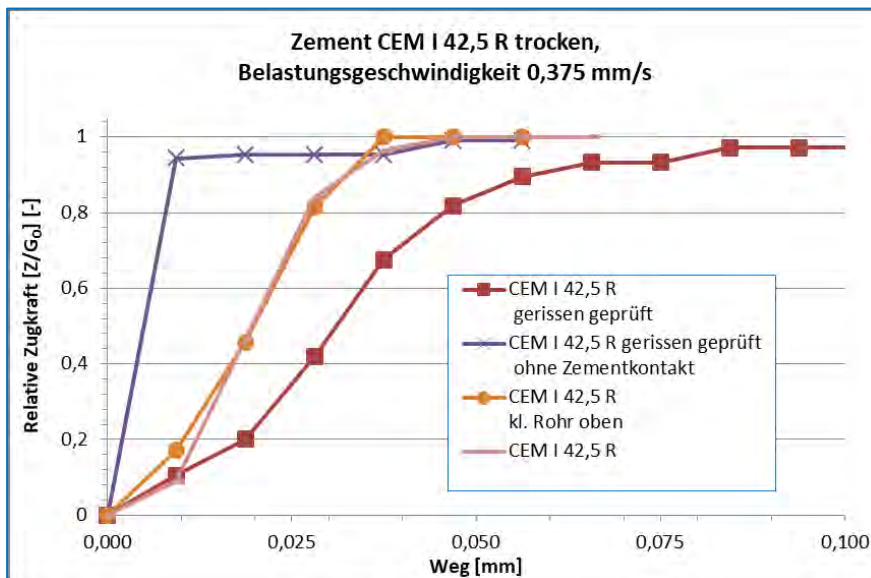


Abbildung 111: Darstellung der gemessenen Zugkraft im Verhältnis zur Gewichtskraft G_o des oberen Probekörpers als relative Zugkraft, Versuche identisch mit Abbildung 110

Die Prüfungen an trockenen Pulvern sind starken Schwankungsbreiten unterworfen, und sehr anfällig für Fehler während der Versuchsdurchführung. Abbildung 112 zeigt drei Versuche an CEM II/A-LL 42,5 R, die sich in der Kurvenausprägung stark unterscheiden. Während bei Versuch 01 das Maximum der Zugkraft sogar oberhalb der Gewichtskraft lag, verhalten sich alle drei Kurven im ansteigenden Ast der Zugkraft sehr unterschiedlich, obwohl die Verdichtungsgrade nahezu gleich sind.

Der Versuch -02 mit CEM III schlug fehl, bereits der erste Messwert ergab das Eigengewicht. Bei diesem Versuch zeigte sich kurz vor Beginn, dass die beiden Halbschalen, mit der die beiden Probekörperhälften während der Verdichtung und des Transportes unter die Prüfeinrichtung zusammengehalten werden, unzureichend fixiert waren, eine der Schellen war locker, woraufhin es zu einer geringfügigen gegenseitigen Verdrehung beider Hälften vor Versuchsbeginn kam. Dennoch wurde die Probe geprüft, das Resultat ist identisch mit Kurve 1 in Abbildung 110, bei der kein Zementkontakt bestand. In diesem Fall wurde der Kontakt durch die bereits während der Verdichtung erfolgte, gegenseitige Verdrehung so stark gestört, dass durch den Zement keine Kräfte übertragen werden konnten.

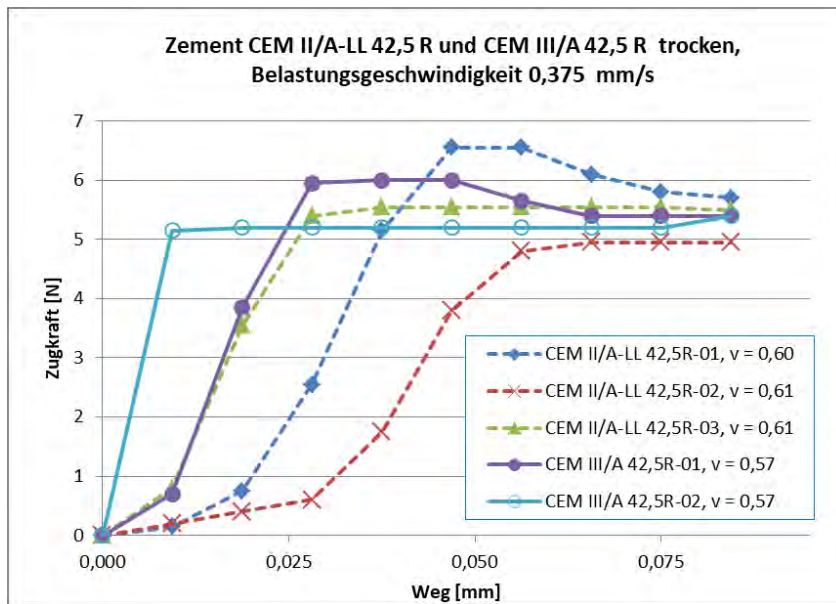


Abbildung 112: Zugversuche an trockenen Zementen, v = Verdichtungsgrad

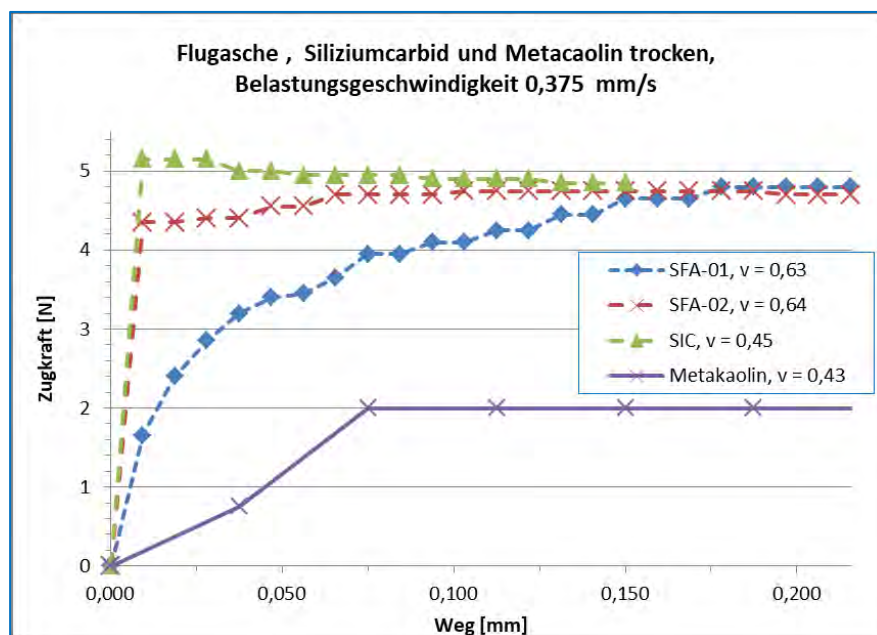


Abbildung 113: Zugversuche an trockenen Stoffen, v = Verdichtungsgrad

Als Ergebnis der trockenen Zugversuche konnte bestätigt werden, dass die Zugfestigkeit trockener Materialien wie Zement und Flugasche nicht größer ist als die der mit Wasser zu erdfeuchten Leimen angemischten Materialien. Mit der vorhandenen Versuchsaapparatur konnten keine Kräfte gemessen werden, die über die Gewichtskraft des oberen Probekörperteiles hinaus gehen. Damit stehen die Ergebnisse im Widerspruch zu der Einschätzung von Bornemann [22], dass Reibung und Verzahnung die wesentlichen Kraftmechnismen ausmachen. Weil dort Rücktrocknungsversuche durchgeführt wurden, bis keine Feuchtigkeit mehr vorlag, können die Ergebnisse möglicherweise durch Rekristallisation/Ablagerung von Stoffen, die vor der Wasserzugabe an den Partikeloberflächen vorhanden waren, beeinflusst worden sein. Diese Stoffe können sich während der Rücktrocknung an den Partikelkontaktpunkten angesammelt haben, und dadurch die übertragenen Haftkräfte vergrößern bzw. eine der Sinterung ähnlichen, verstärkenden Effekt

verursachen. Eine pH-Wert Bestimmung der hier verwendeten Flugasche, die mit Wasser angemischt wurde, ergab unmittelbar nach Wasserzugabe einen Wert von oberhalb 12,5. Damit bestätigt sich die in Kap. 2.3.4 formulierte Vermutung der Kalkrückstände.

Weiterhin zeigen die Kurvenverläufe der Messdaten, dass auch trockene Materialien im Stande sind, Haftkräfte zu übertragen. Da Kräfte aus Adsorptionsfilmen und aus Kapillarbrücken hierbei nicht in Frage kommen, weil kein Wasser vorhanden ist, bleiben hierfür Van-der-Waals-Kräfte einschließlich ihrer plastischen Komponente, sowie Kräfte durch Reibung und Verzahnung möglich. Einige der Kurven weisen im linken Ast der Kraftzunahme Änderungen in der Steigung auf bei zunehmenden Wegen. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass eine Umverteilung bzw. Umlagerung der wirkenden Haftkraftmechanismen stattgefunden hat. So ist die Reichweite von plastischen und normalen Van-der-Waals-Kräften geringer als die Reichweite, während der Reibungs- und Verzahnungskräfte aktiviert werden. Diese sind nicht sofort vorhanden, sondern werden erst durch eine Verschiebung der Partikel voneinander weg, aktiviert. Sie benötigen also zunächst einen Weg, um auftreten zu können. Somit sind Kraftanteile bei sehr geringen Wegen eher den Van-der-Waals-Kräften zuzuordnen, die dann bereits sehr rasch mit fortschreitend zunehmendem Weg ihre Wirkung verlieren.

Insgesamt zeigte sich jedoch, dass in den trockenen Materialien keine bzw. nur sehr geringe Haftkräfte vorhanden sind. Auch ist die verwendete Messtechnik für diese Bereiche nicht hinreichend sensibel genug, um sicher zu gehen, dass die Unterschiede in den Ausprägungen der Kurven nicht auf Schwankungen während der Versuchsdurchführung wie z.B. Justierung der Probekörper unter der Messzelle, Gefügestörungen während der Demontage der Transportsicherung, zurückzuführen sind.

Abschließend ist zu erwähnen, dass die Staubbelastung bei den durchgeführten, trockenen Versuchen erheblich war und daher überwiegend mit Staubmaske gearbeitet wurde. Auch beim Wiegen der gefüllten Probekörper verblieben trotz sorgfältigem Abfegen geringfügige Reste der pulverförmigen Materialien an den Außenseiten der Form, wodurch die gemessenen Gewichte eine Ungenauigkeit von ca. 10 g beinhalten, die jedoch die angegebenen Verdichtungsgrade nur geringfügig beeinflussen.

4.1.4 Bruchflächenanalyse

Die tatsächliche Bruchfläche an zentrischen Zugversuchen erdfeuchter Zementleime wurde durch Bommes [134] untersucht. Er stellte fest, dass es zu relativ konstanten Abweichungen von der idealen geringsten Bruchfläche kommt.



Abbildung 114: Ermittlung der tatsächlichen Bruchflächen beim zentrischen Zug an erdfeuchten Zementleimen durch Frischhaltefolie und anschließender manueller Flächenauszählung nach Bommes [134].

Dabei wurde Frischhaltefolie eng auf die Bruchfläche aufgelegt. Sie bildete so näherungsweise das Höhenprofil, das Relief der tatsächlichen Bruchfläche ab. Mit einem geeigneten Marker wurde der Umriss des PVC-Rohres an der Innenseite markiert, anschließend die markierte Frischhaltefolie auf Millimeterpapier gelegt, und die genaue Bruchfläche manuell abgelesen werden. Diese manuelle Auswertung unter Zuhilfenahme von Millimeterpapier wurde gewählt, da keine geeignete Auswertung mittels EDV zur Verfügung stand [134].

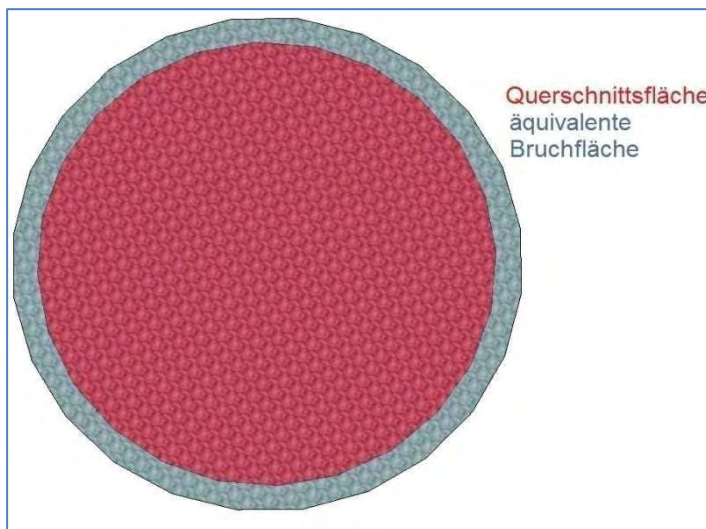


Abbildung 115: Vergleich der Querschnittsfläche des Schalrohres (rot) mit der durchschnittlichen äquivalenten Bruchfläche der Probekörper (grau) [134]

Der Nettoquerschnitt der Bruchfläche betrug $23,76 \text{ cm}^2$ (55 mm Probendurchmesser) und der Mittelwert aller ca. 50 Versuche lag mit $28,81 \text{ cm}^2$ ca. 21 % über dem Nettoquerschnitt. Die Standardabweichung der tatsächlichen Bruchflächen betrug 1,21, es lagen

90 % aller Ergebnisse innerhalb der Standardabweichung. Kusche beobachtete, dass die Höhenunterschiede der Bruchfläche von der Ebene weniger als 10 mm betragen [132]. Die allgemein auftretende Erhöhung des Bruchquerschnittes ist somit recht konstant und deutet darauf hin, dass innerhalb einer vertikalen Zone von mehreren Millimetern der Bruch jeweils entlang der schwächsten Partikelbindungen erfolgt. Weil es bei den Versuchen mit unterschiedlichen Zementleimen nur zu diesen geringen Unterschieden in der tatsächlichen Bruchfläche kommt, wurde auf die Ermittlung der jeweiligen Bruchfläche in den Hauptversuchen verzichtet, die Angabe der gemessenen Versuchsergebnisse erfolgt nicht wie in Kap. 4.1 in der Darstellung der Zugspannung, sondern als Zugkraft-Dehnungsdiagramme ohne die Umrechnung auf die Zugspannung.

4.2 Hauptversuche

Bei den Hauptversuchen wurde mit der vorhandenen Zugeinrichtung ausschließlich in der Variation 3 des Versuchsaufbaus gearbeitet. Über das Kraftmessgerät wurden die Zugkräfte gemessen und anhand des aufgezeichneten, zeitlichen Verlaufes die Dehnungen näherungsweise ermittelt.

Der Schwerpunkt lag darin, die Auswirkungen der einzelnen Feststoffe auf die Grünzugfestigkeit und die Grünzugdehnung zu bestimmen. Ergänzend wurde der Verdichtungsgrad jeweils für den gesamten Probekörper bestimmt, auch wenn der Verdichtungsgrad bei diesem Versuchsaufbau nicht gezielt eingestellt werden kann. In den Hauptversuchen soll überprüft werden, ob und wie die Haftkräfte und die Zugdehnungen in erdfeuchten Leimgemischen durch unterschiedliche Zementarten, die Zugabe von Zusatzstoffen und den Wasser-Feststoffgehalt beeinflusst werden.

Insgesamt wurden 73 Versuche durchgeführt mit unterschiedlichen Kombinationen von Zementen, Zusatzstoffen und Wassergehalten. Die Analysen der Ausgangsstoffe erfolgten bei Cugla BV, Breda.

4.2.1 Ausgangsstoffe, Leimrezepturen und verwendete Kenngrößen

An den eingesetzten Feststoffen wurde mittels Lasergranulometrie jeweils die Partikelgrößenverteilung festgestellt, die Ergebnisse sind im Anhang 1 wiedergegeben.

Die Zemente beschränken sich auf einen Vergleich von unterschiedlichen Zementarten in der Festigkeitsklasse 42,5. Diese wurde gewählt, weil sie in der Praxisanwendung von sofort entschalten Betonteilen die größte Bedeutung hat. Zemente der Festigkeitsklassen 32,5 und 52,5 werden hingegen nur sehr selten eingesetzt.

Zusätzlich wurde mit Flugasche ein Zusatzstoff verwendet, der sehr häufig bei Produktionsverfahren mit erdfeuchten Betonen zum Einsatz kommt, sowie mit Mikrosilika und Metkaolin auch zwei Stoffe, die in der Praxis erdfeuchter Betone bislang nur sehr begrenzt erprobt wurden. Ebenfalls wurde Siliziumcarbid (SiC) bei den Untersuchungen eingesetzt. Hierbei handelt es sich um einen Reststaub aus der Metallbearbeitung, der bei der Betonherstellung bislang nicht zum Einsatz kommt. Mikrosilika, Metakaolin und Siliziumcarbid wurden ausgewählt, weil sich die Partikelgeometrien dieser drei Stoffe untereinander, und auch von den verwendeten Zementen, deutlich unterscheiden.

Die theoretischen Betrachtungen zu den interpartikulären Kräften aus Kap. 2.4 zeigen, dass von den Korngrößen, Kornformen sowie den Oberflächenbeschaffenheiten der Partikel die übertragenen Haftkraftmechanismen beeinflusst werden.

Um eine Einschätzung über die äußere Beschaffenheit der verwendeten Feststoffe zu erhalten, wurden von allen verwendeten Feststoffen mit einem Rasterelektronenmikroskop Tescan Vega3 SBH REM-Aufnahmen am Lehrstuhl für Neue Fertigungstechnologien und Werkstoffe der Bergischen Universität Wuppertal, Solingen, angefertigt.

Die verwendeten Zusatzstoffe unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Partikelgeometrie, Oberflächengestalt und Reaktivität und werden folgend anhand der REM-Aufnahmen vorgestellt. Je Stoff zeigen die Aufnahmen einen skalierten Bereich von 50 µm, 10 µm und 5 µm.

CEM I 42,5 R:

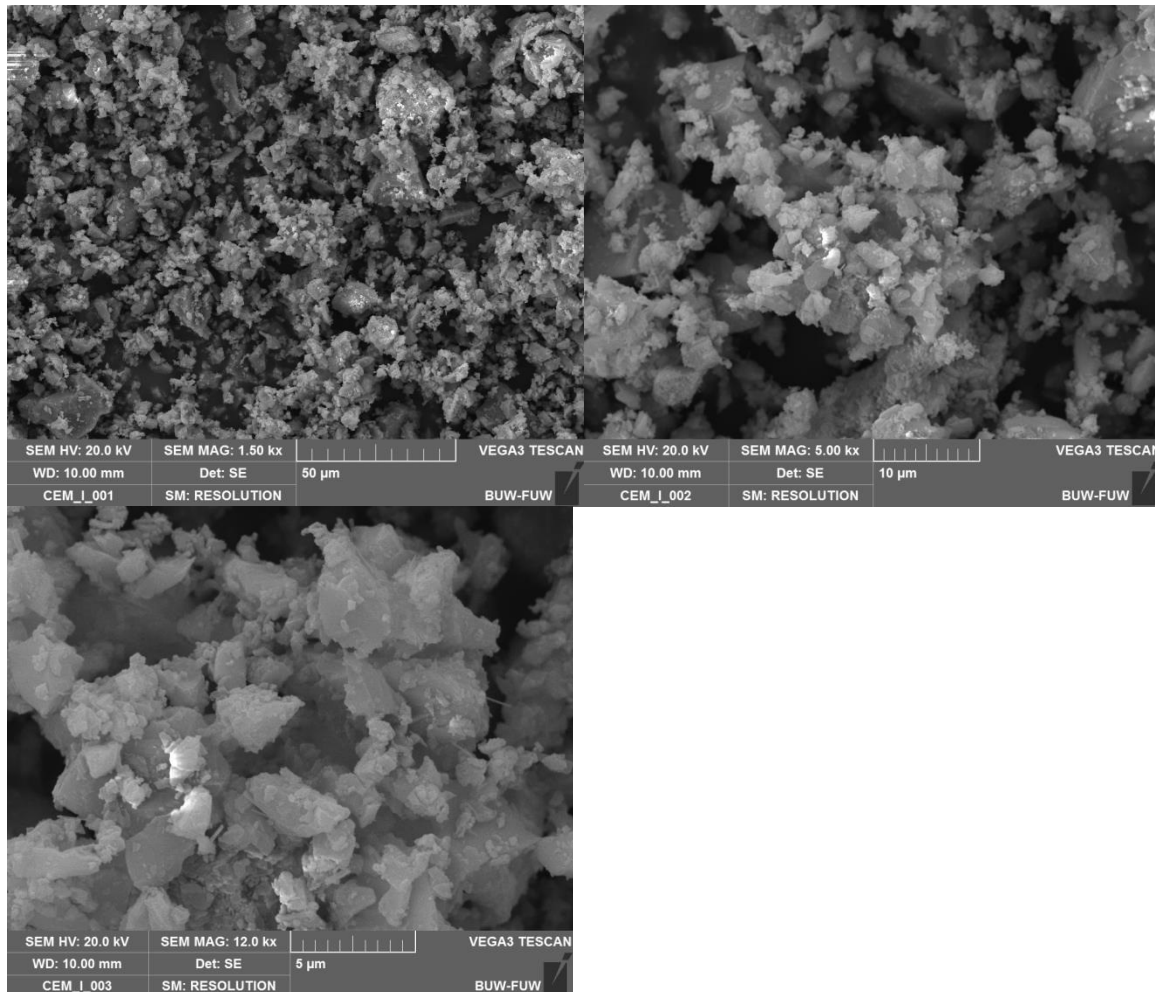
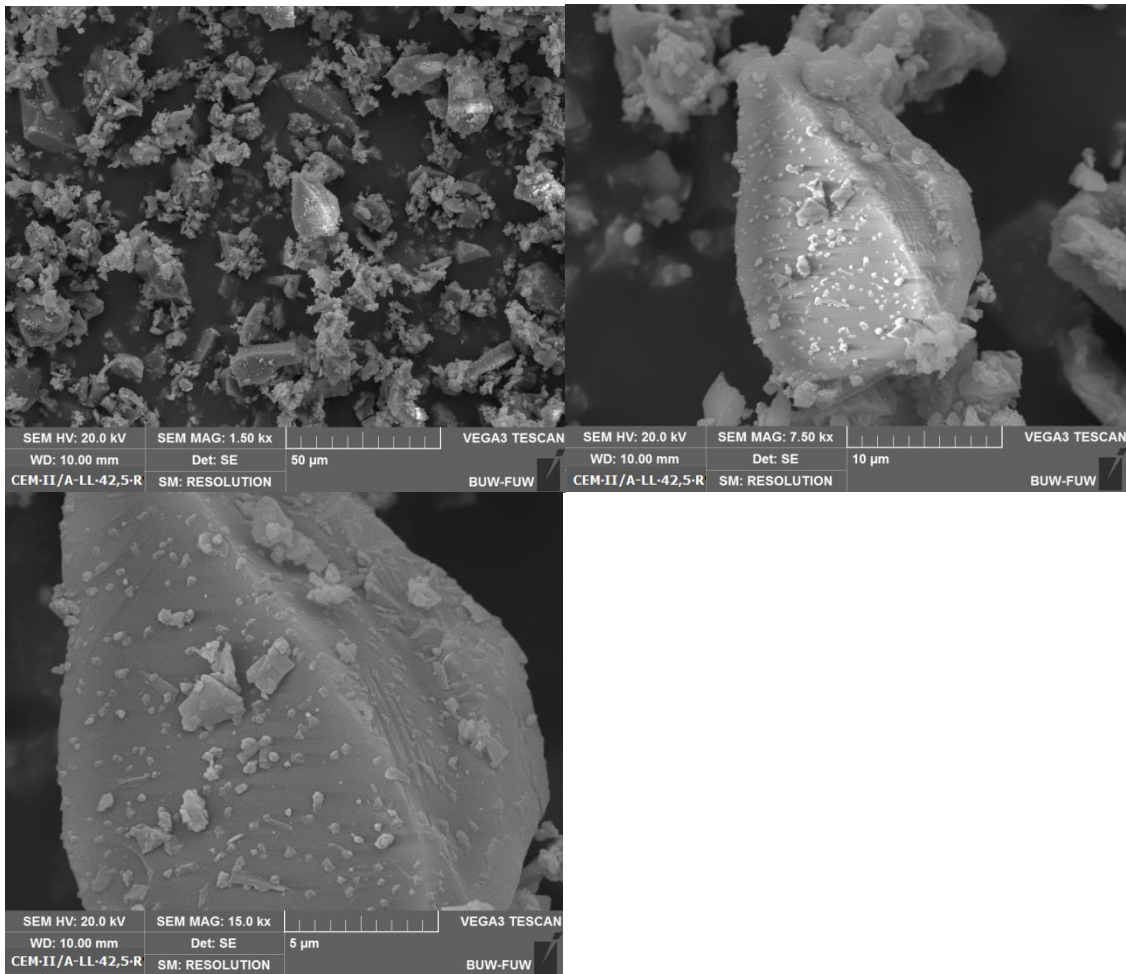


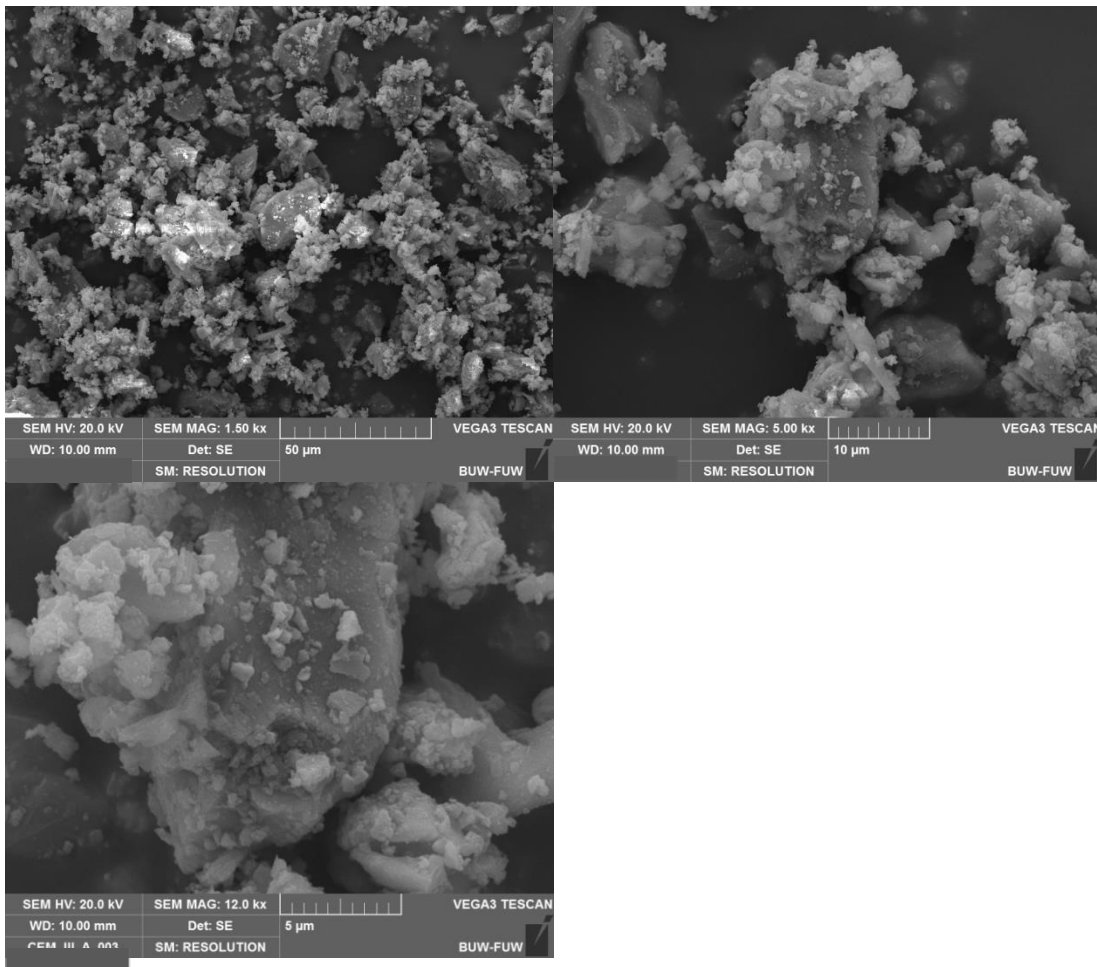
Abbildung 116: REM-Aufnahmen von CEM I 42,5 R, reiner Portlandzement

CEM II/A-LL 42,5 R:



**Abbildung 117: REM-Aufnahme von CEM II/A-LL 42,5 R, Portlandkalksteinzement;
Bildmitte: Kalksteinmehl-Partikel**

CEM III/A 42,5 R:



**Abbildung 118: REM-Aufnahmen von CEM III/A 42,5 R, Hochofenzement;
Bildmitte: Hüttensand-Partikel**

Die optische Beschaffenheit von Hüttensand ist sowohl in Reinform als auch in Kompositzementen starken Schwankungen unterworfen. Die Partikelgröße und die Kornformen bleiben im Allgemeinen relativ gleich. Je nachdem, welchen Ursprungs der Hüttensand ist und auch je nachdem, wie lange er bereits an der Luft lagerte, unterscheidet sich die Ausbildung der Partikeloberflächen. Sie können bereits vollständig mit kleinen Reaktionsprodukten belegt sein, oder vollständig bis teilweise glatt ohne Reaktionsprodukte [139].

Flugasche:

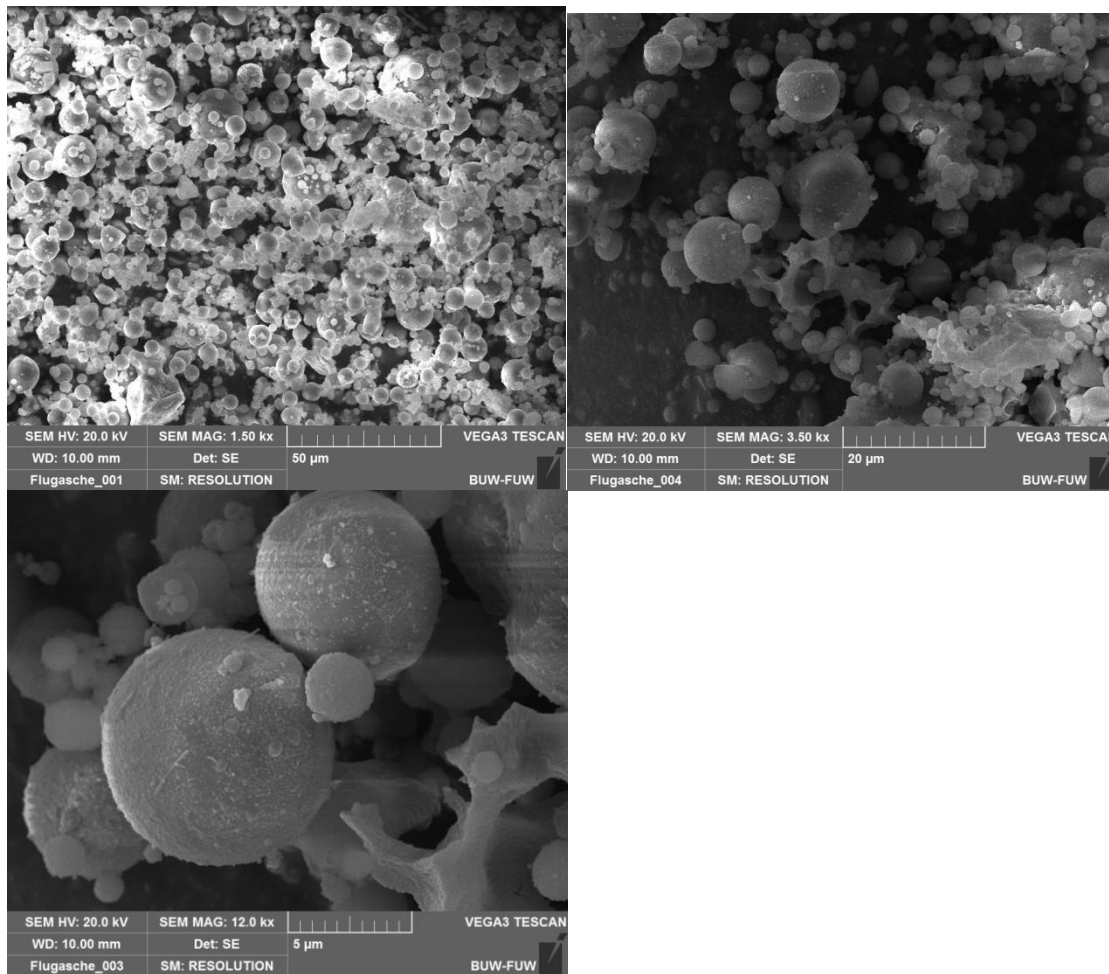
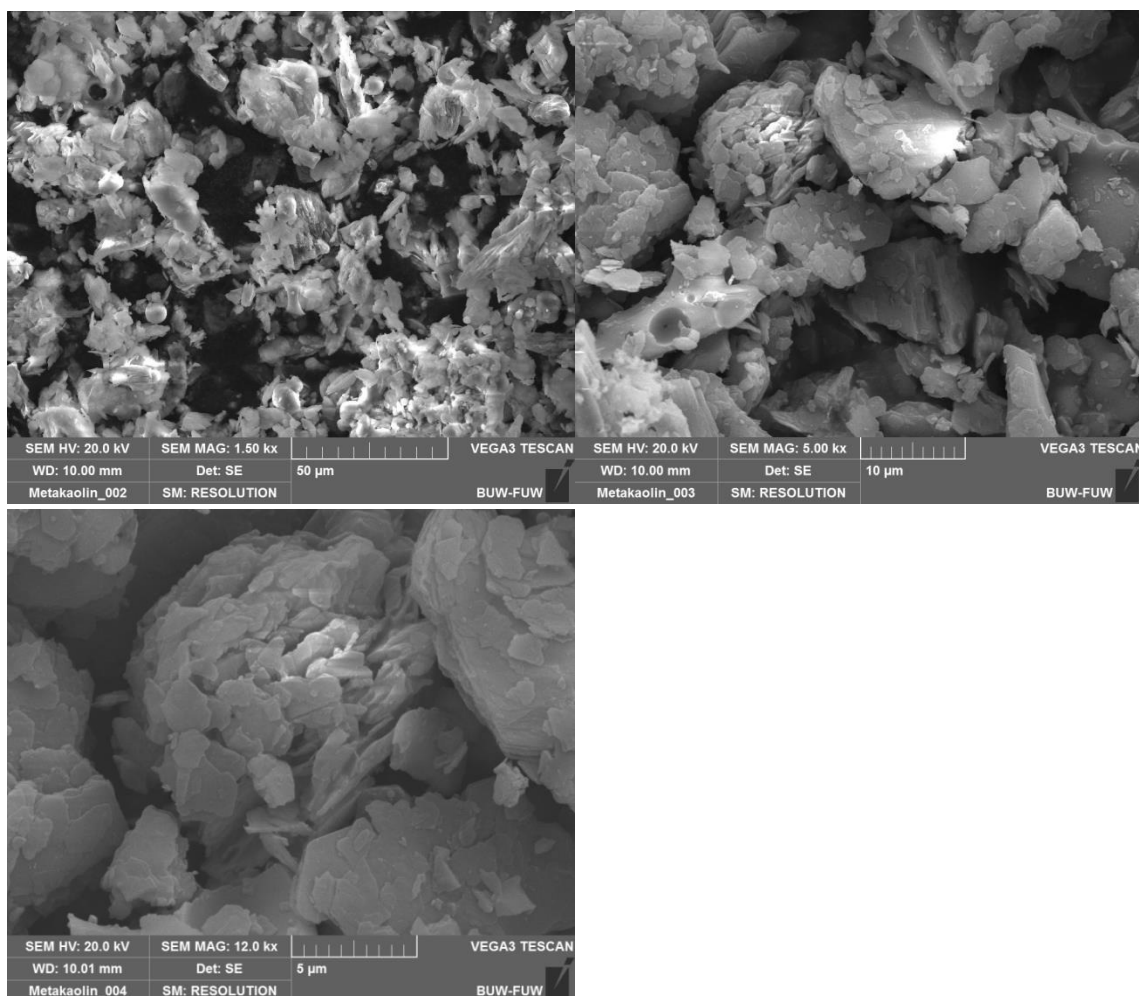


Abbildung 119: REM-Aufnahmen von Flugasche

Flugasche ist überwiegend kugelig, dazwischen größere Partikel mit kratiger Beschaffenheit. Auf der Oberfläche sind flächendeckend Strukturen zu erkennen, die deutlich unter 1 µm Größe liegen. Flugasche ist puzzolanisch reaktiv jedoch nicht in den ersten Minuten nach Wasserzugabe.

Metakaolin:

In diesem Fall handelt es sich um ein fein aufgemahlenes, gebranntes (calciniertes) Kaolin, hier aus künstlicher Herstellung von Blähglasgranulat. Es besteht überwiegend aus Siliziumdioxid und Aluminiumtrioxid [140] und ist puzzolanisch reaktiv, jedoch nicht in den ersten Minuten. Die Struktur der Partikel ist kubisch kantig gebrochen, mit extrem rauher, zerklüfteter Oberfläche und dabei dabei sehr plattig. Metakaolin wurde untersucht, weil dieser Zusatzstoff erst seit ca. 10 Jahren zur Verfügung steht, und mittlerweile vereinzelt bei der Herstellung erdfeuchter Betone eingesetzt wird. Außerdem unterscheidet sich seine Form erheblich von Flugasche, die bereits seit den 1960-er Jahren eingesetzt wird, wie ein Vergleich der Abbildung 119 und Abbildung 120 zeigt.

**Abbildung 120: REM-Aufnahmen von Metakaolin**

Siliziumcarbid:

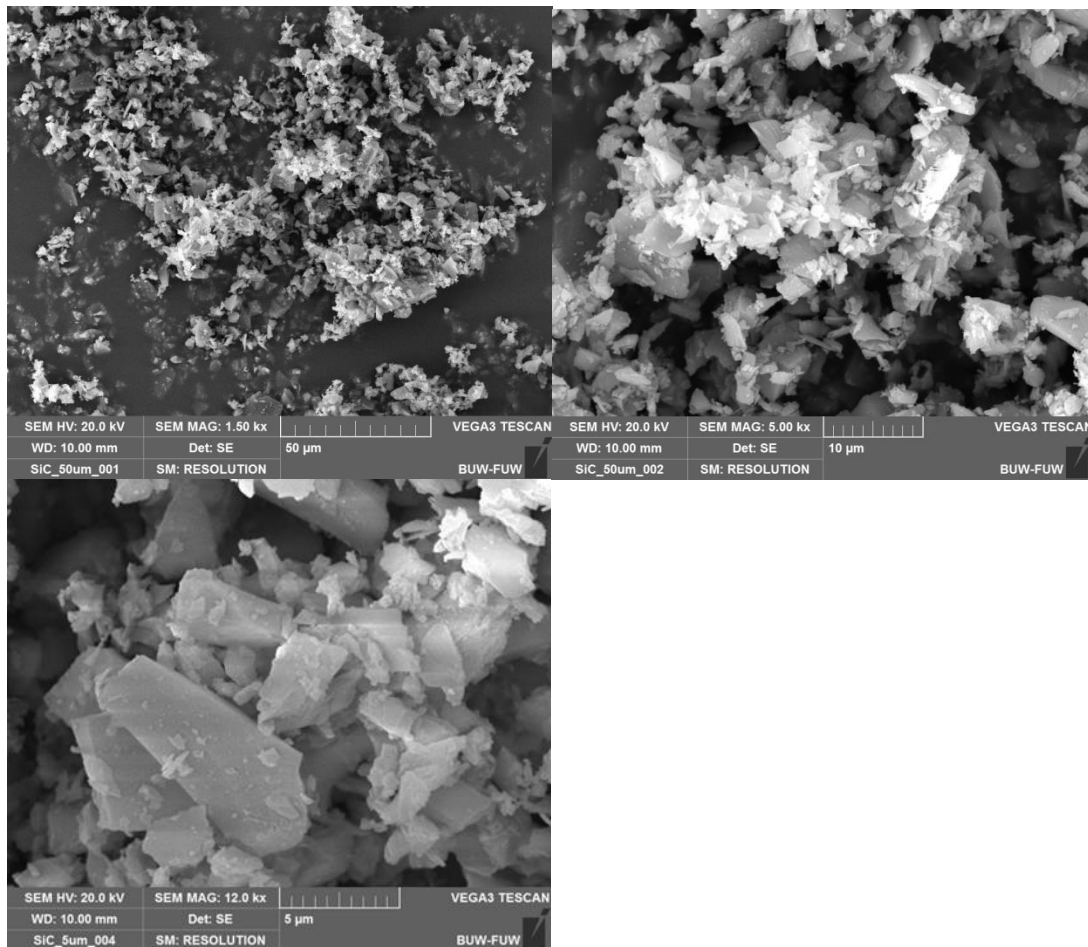


Abbildung 121: REM-Aufnahmen von Siliziumcarbid (SiC)

SiC (umgangssprachlich Karborund) stellt sich in den REM-Aufnahmen plattig dar mit klar definierten Bruchflächen ohne Abrundungen und sehr scharfkantig. Abgesehen von Anhaftungen kleinerer Partikel sind die Oberflächen glatt ohne erkennbare Rauigkeitserhebungen. SiC ist ein Stoff, der bislang bei der Betonherstellung nicht verwendet wird, er wird aufgrund seiner Härte als Schleifmittel bei der Metallbearbeitung und als Hartstoff verwendet. Dieser Stoff wurde ausgewählt, weil er sich in Partikelform und Beschaffenheit der Oberfläche deutlich von den anderen Ausgangsstoffen unterscheidet.

Von dem verwendeten Mikrosilika konnten keine separaten REM-Aufnahmen gefertigt werden, weil die Mikroskopkammer nur mit vier Objektivträgern bestückt werden konnte. Daher wird für den optischen Vergleich auf Aufnahmen aus der Literatur zurückgegriffen [141]. Dabei ist die dargestellte Skalierung in Abbildung 122 mit 0,5 µm den Faktor zehn kleiner als bei den übrigen Ausgangsstoffen. Soweit erkennbar, wirken die Oberflächen glatter als bei Flugasche.

Mikrosilika:

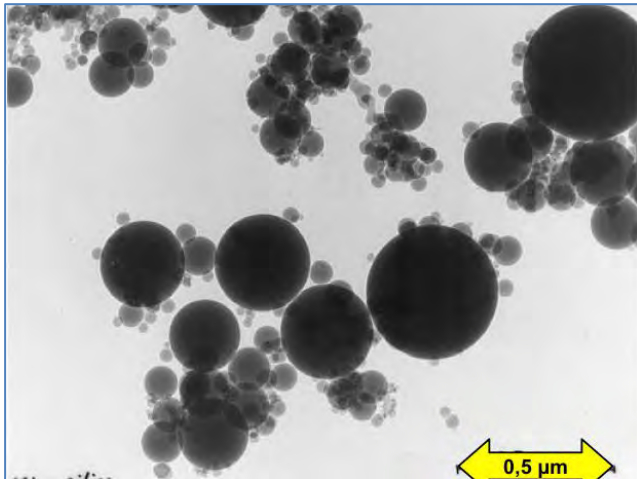


Abbildung 122: Aufnahme von Mikrosilika der Fa. Elkem [141].

Eine Zusammenstellung der verwendeten Ausgangsstoffe enthält Tabelle 7.

Die theoretischen Betrachtungen zu den interpartikulären Kräften aus Kap. 2.4 zeigen, dass von den Korngrößen, Kornformen sowie den Oberflächenbeschaffenheiten der Partikel die übertragenen Haftkraftmechanismen beeinflusst werden

Tabelle 7: Kenngrößen der bei den Hauptversuchen verwendeten Ausgangsstoffe

Zementart		CEM I 42,5 R	CEM II/A-LL 42,5 R	CEM III/A 42,5 R
Hersteller		Fa. Spenner Zement	Fa. Spenner Zement	Fa. Spenner Zement
Rohdichte	[g/cm ³]	3,10	3,10	3,10
Spez. Oberfläche	[cm ² /g]	4846,18	7010,91	6607,57
Raumbeständigkeit	[mm]	0,7	0,8	0,5
Wasseranspruch	[M-%]	27,1	28,4	31
Erstarrungsbeginn	[Min]	184	174	211

Material		Flugasche	Metakaolin
Hersteller		Baumineral GmbH	Dennert Poraver GmbH
Rohdichte	[g/cm ³]	2,24	2,1
Spez. Oberfläche	[cm ² /g]	5242,98	5095,25
Glühverlust	[%]		1,2
Feuchtegehalt	[M-%]	< 5	< 1

Material		Silikastaub	Siliciumcarbid
Hersteller		Elkem AS	Keibeton GmbH
Rohdichte	[g/cm ³]	2,25	3,21
Spez. Oberfläche	[cm ² /g]	5093,97	10055,6
Äquivalentdurchmesser	[µm]	0,15	2,7

Die spezifischen Oberflächen wurden nicht aus dem Blaine-Wert ermittelt, sondern kumulativ aus den Ergebnissen der Partikelgrößenanalysen gem. Anhang 1. Bei einem Vergleich der spezifischen Oberflächen fällt auf, dass von den drei Zementen der CEM I die mit Abstand geringste Oberfläche aufweist. Ehrenberg [142] verweist bezüglich der Mahlfineinheit darauf, dass Kompositzemente der Kategorie CEM II und CEM III bei der Herstellung in der Regel feiner gemahlen werden als reine CEM I-Portlandzemente, um eine bessere Aussteuerung der zu erwartenden Festigkeiten zu erzielen. Dabei spielt auch noch die verfahrenstechnische Frage eine Rolle, ob die einzelnen Hauptbestandteile gemeinsam gemahlen werden, oder ob eine getrennte Mahlung mit anschließender Mischung der gemahlten Bestandteile erfolgt.

In den Versuchsauswertungen wurde jeweils der Wasser-Feststoffwert (w/f) angegeben sowie die Gesamtoberfläche in [cm²/g]. Diese wurden aus der prozentualen Kombination der Durchgänge der Einzelkornfraktionen berechnet. Beispielhaft wurden in Tabelle 8 und Tabelle 9 anhand der Partikelgrößenanalysen im Anhang 1 die Partikeloberfläche jeder Kornfraktion berechnet, deren Summe die gesamte Oberfläche des pulverförmigen Feststoffes darstellt. Dabei liegt allen Berechnungen der Oberfläche und des Volumens die Annahme zugrunde, dass es sich um ideal kugelige, glatte Partikel handelt. Formfaktoren für die geometrische Abweichung von der Kugelform sowie für Rauigkeiten an der Ober-

fläche wurden nicht berücksichtigt.

Für z.B. eine Kombination von 85 % CEM I 42,5 R mit 15 % SiC (gem. Abbildung 135) wurden die kumulative Gesamtoberfläche dieser Mischung aus den anteiligen Gesamtoberflächen (jeweils rechts unten in Tabelle 8 und Tabelle 9)

wie folgt berechnet:

$$O_{P,I42,5R+15\%SiC} = 4.846,31 \cdot 0,85 + 10.046,14 \cdot 0,15 = 5626 \text{ [cm}^2\text{/g]},$$

entsprechend der Angabe in Abbildung 135.

Tabelle 8: Berechnung der Oberfläche je Kornfraktion [cm²/g] sowie der Gesamtoberfläche [cm²/g] am Beispiel CEM I 42,5 R (gem. Anhang 1, Tabelle 11)

Partikelgröße d	kumulative Verteilung Q3 (Anhang 1)	mittlerer Korndurchmesser d _{i,m}	Anteil an der Verteilung Q3	Massenanteil m _i je Gramm Feststoff	Oberfläche je d _{i,m}	Volumen V _{d,i} jedes d _{i,m}	Volumen V _i je Massenanteil m _i	Partikelanzahl P _i	Oberfläche je m _i	Kumulierte Oberfläche je Gramm Feststoff
		d _{i,m} = (d _i +d _{i+1})/2	q _i = Q3 _{i+1} - Q3 _i	m _i = q _i /100	o _i = d _{i,m} ² * π * 10 ⁻⁰⁸	v _i = (d _{i,m} ³ * π / 6) * 10 ⁻¹²	V _i = m _i / ρ	P _i = V _i / v _i	O _i = P _i * o _i	O = Σ(O _i)
[μm]	[%]	[μm]	[%]	[g]	[cm ²]	[cm ³]	[cm ³]	[-]	[cm ² /g]	[cm ² /g]
0,50	0,00	0,70	5,82	0,0582	1,5386E-08	1,7950E-13	1,8476E-02	1,0293E+11	1583,67	1583,67
0,90	5,82	1,00	2,40	0,0240	3,1400E-08	5,2333E-13	7,6190E-03	1,4559E+10	457,14	2040,82
1,10	8,22	1,20	2,13	0,0213	4,5216E-08	9,0432E-13	6,7619E-03	7,4773E+09	338,10	2378,91
1,30	10,35	1,40	1,90	0,0190	6,1544E-08	1,4360E-12	6,0317E-03	4,2003E+09	258,50	2637,41
1,50	12,25	1,65	2,52	0,0252	8,5487E-08	2,3509E-12	8,0000E-03	3,4030E+09	290,91	2928,32
1,80	14,77	2,00	2,90	0,0290	1,2560E-07	4,1867E-12	9,2063E-03	2,1990E+09	276,19	3204,51
2,20	17,67	2,40	2,49	0,0249	1,8086E-07	7,2346E-12	7,9048E-03	1,0926E+09	197,62	3402,13
2,60	20,16	2,85	2,72	0,0272	2,5505E-07	1,2115E-11	8,6349E-03	7,1276E+08	181,79	3583,92
3,10	22,88	3,40	2,91	0,0291	3,6298E-07	2,0569E-11	9,2381E-03	4,4913E+08	163,03	3746,95
3,70	25,79	4,00	2,65	0,0265	5,0240E-07	3,3493E-11	8,4127E-03	2,5118E+08	126,19	3873,14
4,30	28,44	4,65	2,88	0,0288	6,7895E-07	5,2618E-11	9,1429E-03	1,7376E+08	117,97	3991,11
5,00	31,32	5,50	3,78	0,0378	9,4985E-07	8,7070E-11	1,2000E-02	1,3782E+08	130,91	4122,02
6,00	35,10	6,75	4,98	0,0498	1,4307E-06	1,6095E-10	1,5810E-02	9,8227E+07	140,53	4262,55
7,50	40,08	8,25	4,26	0,0426	2,1372E-06	2,9386E-10	1,3524E-02	4,6021E+07	98,35	4360,90
9,00	44,34	9,75	3,74	0,0374	2,9850E-06	4,8506E-10	1,1873E-02	2,4478E+07	73,06	4433,97
10,50	48,08	11,50	4,51	0,0451	4,1527E-06	7,9592E-10	1,4317E-02	1,7988E+07	74,70	4508,67
12,50	52,59	13,75	5,02	0,0502	5,9366E-06	1,3605E-09	1,5937E-02	1,1714E+07	69,54	4578,21
15,00	57,61	16,50	5,21	0,0521	8,5487E-06	2,3509E-09	1,6540E-02	7,0355E+06	60,14	4638,35
18,00	62,82	19,50	4,38	0,0438	1,1940E-05	3,8805E-09	1,3905E-02	3,5833E+06	42,78	4681,14
21,00	67,20	23,00	4,79	0,0479	1,6611E-05	6,3674E-09	1,5206E-02	2,3882E+06	39,67	4720,81
25,00	71,99	27,50	4,86	0,0486	2,3746E-05	1,0884E-08	1,5429E-02	1,4176E+06	33,66	4754,47
30,00	76,85	33,00	4,71	0,0471	3,4195E-05	1,8807E-08	1,4952E-02	7,9504E+05	27,19	4781,65
36,00	81,56	39,50	4,35	0,0435	4,8992E-05	3,2253E-08	1,3810E-02	4,2816E+05	20,98	4802,63
43,00	85,91	47,00	3,80	0,0380	6,9363E-05	5,4334E-08	1,2063E-02	2,2202E+05	15,40	4818,03
51,00	89,71	56,00	3,46	0,0346	9,8470E-05	9,1906E-08	1,0984E-02	1,1952E+05	11,77	4829,80
61,00	93,17	67,00	2,81	0,0281	1,4095E-04	1,5740E-07	8,9206E-03	5,6675E+04	7,99	4837,79
73,00	95,98	80,00	2,01	0,0201	2,0096E-04	2,6795E-07	6,3810E-03	2,3814E+04	4,79	4842,57
87,00	97,99	95,00	1,23	0,0123	2,8339E-04	4,4869E-07	3,9048E-03	8,7025E+03	2,47	4845,04
103,00	99,22	113,00	0,61	0,0061	4,0095E-04	7,5512E-07	1,9365E-03	2,5645E+03	1,03	4846,07
123,00	99,83	135,00	0,17	0,0017	5,7227E-04	1,2876E-06	5,3968E-04	4,1914E+02	0,24	4846,31
147,00	100,00	161,00	0,00	0,0000	8,1392E-04	2,1840E-06	0,0000E+00	0,0000E+00	0,00	4846,31

Tabelle 9: Berechnung der Oberfläche je Kornfraktion [cm²/g] sowie der Gesamtoberfläche [cm²/g] am Beispiel Siliziumcarbid (gem. Anhang 1, Tabelle 17)

Partikelgröße d	kumulative Verteilung Q3 (Anhang 1)	mittlerer Korndurchmesser d _{i,m}	Anteil an der Verteilung Q3	Massenanteil m _i je Gramm Feststoff	Oberfläche je d _{i,m}	Volumen V _{d,i} jedes d _{i,m}	Volumen V _i je Massenanteil m _i	Partikelanzahl P _i	Oberfläche je m _i	Kumulierte Oberfläche je Gramm Feststoff
		d _{i,m} = (d _i +d _{i+1})/2	q _i = Q3 _{i+1} - Q3 _i	m _i = q _i /100	o _i = d _{i,m} ² * π * 10 ⁻⁰⁸	v _i = (d _{i,m} ³ * π / 6) * 10 ⁻¹²	V _i = m _i / ρ	P _i = V _i / v _i	O _i = P _i * o _i	O = Σ(O _i)
[μm]	[%]	[μm]	[%]	[g]	[cm ²]	[cm ³]	[cm ³]	[-]	[cm ² /g]	[cm ² /g]
0,50	0,00	0,70	12,32	0,1232	1,5386E-08	1,7950E-13	3,8261E-02	2,1315E+11	3279,50	3279,50
0,90	12,32	1,00	5,51	0,0551	3,1400E-08	5,2333E-13	1,7112E-02	3,2698E+10	1026,71	4306,21
1,10	17,83	1,20	5,20	0,0520	4,5216E-08	9,0432E-13	1,6149E-02	1,7858E+10	807,45	5113,66
1,30	23,03	1,40	4,91	0,0491	6,1544E-08	1,4360E-12	1,5248E-02	1,0618E+10	653,50	5767,17
1,50	27,94	1,65	6,87	0,0687	8,5487E-08	2,3509E-12	2,1335E-02	9,0755E+09	775,83	6543,00
1,80	34,81	2,00	8,37	0,0837	1,2560E-07	4,1867E-12	2,5994E-02	6,2087E+09	779,81	7322,82
2,20	43,18	2,40	7,51	0,0751	1,8086E-07	7,2346E-12	2,3323E-02	3,2238E+09	583,07	7905,89
2,60	50,69	2,85	8,32	0,0832	2,5505E-07	1,2115E-11	2,5839E-02	2,1328E+09	543,97	8449,86
3,10	59,01	3,40	8,56	0,0856	3,6298E-07	2,0569E-11	2,6584E-02	1,2924E+09	469,13	8918,99
3,70	67,57	4,00	7,12	0,0712	5,0240E-07	3,3493E-11	2,2112E-02	6,6019E+08	331,68	9250,66
4,30	74,69	4,65	6,71	0,0671	6,7895E-07	5,2618E-11	2,0839E-02	3,9603E+08	268,88	9519,55
5,00	81,40	5,50	7,16	0,0716	9,4985E-07	8,7070E-11	2,2236E-02	2,5538E+08	242,57	9762,12
6,00	88,56	6,75	6,62	0,0662	1,4307E-06	1,6095E-10	2,0559E-02	1,2774E+08	182,75	9944,87
7,50	95,18	8,25	3,10	0,0310	2,1372E-06	2,9386E-10	9,6273E-03	3,2762E+07	70,02	10014,89
9,00	98,28	9,75	1,20	0,0120	2,9850E-06	4,8506E-10	3,7267E-03	7,6830E+06	22,93	10037,82
10,50	99,48	11,50	0,48	0,0048	4,1527E-06	7,9592E-10	1,4907E-03	1,8729E+06	7,78	10045,60
12,50	99,96	13,75	0,04	0,0004	5,9366E-06	1,3605E-09	1,2422E-04	9,1310E+04	0,54	10046,14

Als Kenngröße der Zementleime bzw. der Feststoffleime wurde zusätzlich die Feststoffoberfläche im frischen Leim [cm²/g Leim] gemäß Formel 38 berechnet:

$$O_L = O_P * \left(\frac{1}{1 + \frac{w}{f}} \right) \left[\frac{cm^2}{g} \right] \quad \text{Formel 38}$$

O_L = Feststoffoberfläche im Leim [cm²/g]

O_P = Oberfläche des trockenen Feststoffes [cm²/g].

In einem Gramm Leim hängt die vorhandene Oberfläche vom zugegebenen Wassergehalt ab. Aus einem vorgegebenen w/f-Wert ((w/f) = W/F) errechnen sich die Anteile an Zement und Wasser je Gramm Leim (F + W = 1g) wie folgt:

$$W = \left(\frac{1}{1 + \frac{w}{f}} \right) [g] \quad \text{Formel 39}$$

und

$$Z = 1 - W [g] \quad \text{Formel 40}$$

Zum Beispiel hat der verwendete CEM I 42,5 R (vergl. Anhang 1, Tabelle 11) eine Oberfläche O_P = 4.846 cm²/g Trockensubstanz Pulver. Bei einem w/f-Wert von 0,21 befinden sich in einem Gramm Leim

$$W = \left(\frac{1}{1+0,21} \right) = 0,174 [g] \quad \text{Gramm Wasser (=0,174 cm}^3\text{) und}$$

$$Z = 1 - 0,174 = 0,826 [g] \quad \text{Gramm Zement.}$$

Die Gesamtpartikeloberfläche pro Gramm Leim beträgt

$$O_L = 4.846 * \left(\frac{1}{1 + 0,21} \right) = 4.003 \left[\frac{cm^2}{g} \right]$$

Somit reduziert sich die Partikeloberfläche im Leim mit der Zunahme des Wassergehaltes. Aus dem w/f -Wert und der Gesamtpartikeloberfläche O_L wurde zusätzlich die mittlere Wasserfilmdicke F_w je cm^2 Feststoffoberfläche wie folgt berechnet:

$$F_w = \frac{1 - \left(\frac{1}{1 + \frac{w}{f}} \right)}{O_L} * 10.000 \quad \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{cm}^2} \right] \quad \text{Formel 41}$$

F_w = Wasserfilmdicke in μm je cm^2 Feststoffoberfläche

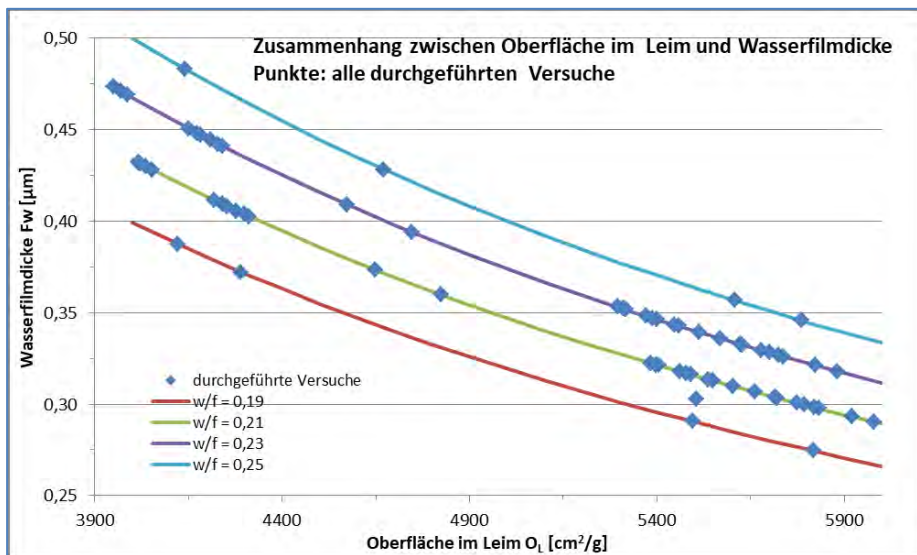


Abbildung 123: Zusammenhang zwischen der Partikeloberfläche im Leim und der Wasserfilmdicke eines Quadratzentimeters Partikeloberfläche, Punkte = durchgeführte Versuche, Linien = rechnerischer Zusammenhang gem. Formel 38

Die effektiv vorhandene Partikeloberfläche in einem Gramm Leim hängt vom w/f -Wert ab, genauso wie die Wasserfilmdicke, die sich auf einem Quadratzentimeter Partikeloberfläche befindet. An der Anordnung der einzelnen Punkte in Abbildung 123 ist zu erkennen, in welchen Bereichen der Leimoberflächen Versuche durchgeführt worden sind.

Die Werte der Oberfläche im Leim und der Wasserfilmdicke je Quadratzentimeter Oberfläche werden darauf hin überprüft, ob sie als Kenngröße zur Abschätzung der Zugfestigkeit oder des Weges bei der Auswertung der gewonnenen Ergebnisse geeignet sein können.

Es handelt sich dabei nicht um die mittlere Wasserfilmdicke eines Feststoffpartikels. Hierfür hatte Reschke [63] die Größe eines mittleren Partikeldurchmessers definiert und an diesem die mittlere Wasserfilmdicke berechnet. Bei dieser Vorgehensweise bleibt die Verteilungsfunktion der Partikelgrößen und ihre jeweiligen Partikelanzahlen unberücksichtigt.

Als Bezugsgröße für die Oberfläche ist die Angabe in cm^2 je Gramm bei pulverförmigen Stoffen wie Zement, Flugasche usw. bekannt.

Insbesondere wenn Feststoffe mit unterschiedlichen Rohdichten miteinander kombiniert werden, ist die volumetrische Verteilung der vorhandenen Oberflächen idealerweise nicht auf eine gravimetrische Einheit, Gramm, in Bezug zu setzen, sondern auf ein Volumenelement, Kubikzentimeter. Die spezifische Feststoffoberfläche je Kubikzentimeter Leim O_{LS} kann wie folgt berechnet werden:

$$O_{LS} = O_P * \left(\frac{1}{1 + \frac{w}{f}} \right) \left[\frac{cm^2}{cm^3} \right]$$

Formel 42

O_{LS} = spezifische Feststoffoberfläche in cm^2 je cm^3 Leim

Weil die Angabe der Oberflächenfeinheiten an Trockensubstanzen jedoch generell in cm^2/g erfolgt, wird für eine bessere Vergleichbarkeit auf die Einführung der Angabe in cm^2/cm^3 verzichtet.

Der Verdichtungsgrad aller Probekörper wurde ebenfalls mit dokumentiert, die Istgewichte der Probekörper wurden den rechnerischen Sollgewichten gegenübergestellt und prozentual mit erfasst. Wie bereits bei den Vorversuchen erläutert, können definierte Verdichtungsgrade mit der Versuchseinrichtung nicht erzeugt werden.

Als Ergebnisse der Zugversuche wurden für jede Mischung der Verlauf der Zugkraft und der aus der Versuchsdauer errechnete Weg aufgezeichnet und grafisch dargestellt

4.2.2 Erläuterung der Kurvenverläufe nach Überschreiten der Maximalkräfte

Die in Abbildung 125 bis Abbildung 139 wiedergegebenen Versuchsergebnisse enthalten die Zugkraft-Wegkurven aller durchgeführten Versuche. Sie zeigen Verläufe, die teilweise ausgeprägte Maxima aufweisen, sowie auch flachere Verläufe mit geringer ausgeprägten Maxima bzw. mit keinen erkennbaren Hochpunkten. Nach Überschreiten der Maximalkraft treten anschließend sofortige oder auch langsame Rückgänge der gemessenen Kräfte auf. Abbildung 124 skizziert diese gemessenen Verläufe (2 bis 4), denen der theoretische Kurvenverlauf (1) gegenübergestellt wurde. Dieser stellt rechts des Maximums den theoretischen Verlauf dar, wenn das Messgerät unmittelbar nach erfolgtem Bruch der Leimprobe bei maximaler Zugkraft anschließend lediglich die Gewichtskraft des oberen Teiles des mit Leim gefüllten Probekörpers anzeigt (entspricht 5).

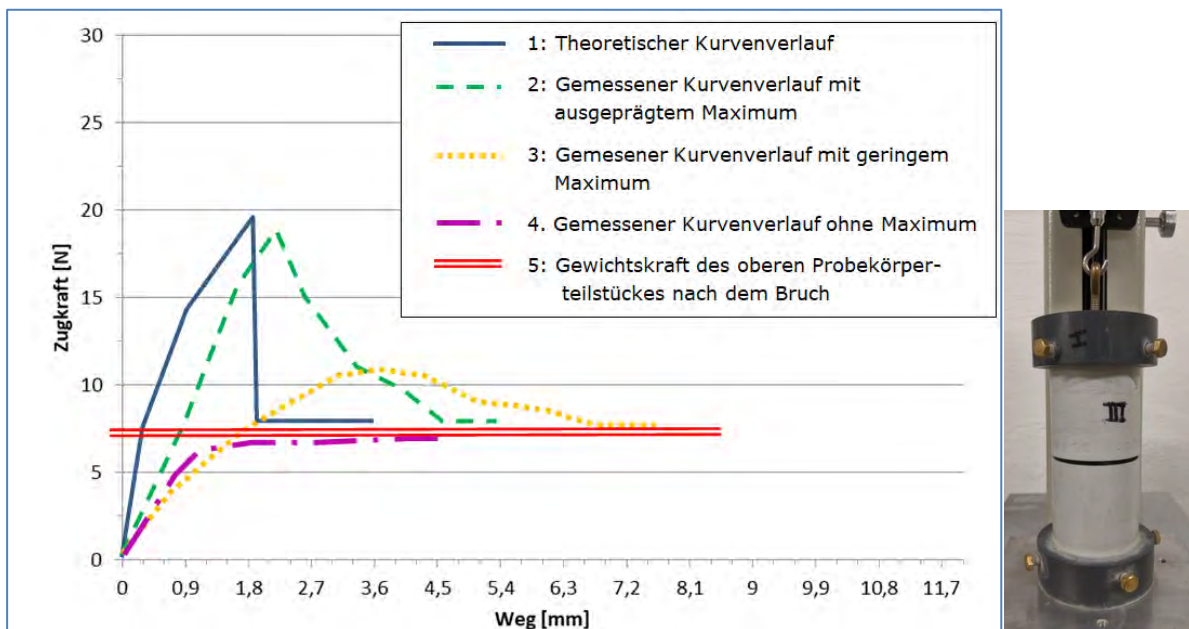


Abbildung 124: Gegenüberstellung von theoretischem Kurvenverlauf (1), gemessenen Kurven (2), (3), (4), sowie dem Eigengewicht des oberen Probekörperteilstückes nach dem Bruch ((5), dargestellt im Foto rechts).

Nach dem Überschreiten der Maximalkräfte findet in den Bereichen der abfallenden Zugkräfte der jeweilige Trennbruch statt. Die daran anschließenden waagerechten Verläufe

entsprechen dem Eigengewicht des oberen Probekörperteilstückes nach erfolgtem Trennbruch, das nach dem Versuch frei an dem Haken der Zugmaschine hängt, siehe Foto rechts in Abbildung 124. Diese waagerechten Kurvenverläufe stellen daher keine Materialkennwerte dar. Auf eine Kenntlichmachung in den einzelnen Abbildungen wurde aus Gründen der Übersicht verzichtet. Dennoch wurden auch diese erhaltenen Messwerte grafisch dargestellt, weil sie zur Charakterisierung der erhaltenen Ergebnisse beitragen. Die abfallenden Verläufe rechts der Maxima sind von unterschiedlichen Mechanismen beeinflusst, deren eindeutige Abgrenzung grundsätzlich nicht möglich ist, da sich die verschiedenen Einflüsse überlagern. Dazu zählen Haftkräfte, die auf der interpartikulären Ebene noch solange nach dem Überschreiten der Höchstkraft wirken, bis der fortschreitende Weg die Partikelbindungen endgültig voneinander getrennt hat. Ebenso können Verzahnungseffekte sowie Reibung an den Rissufern des oberen und des unteren Probekörperabschnittes auftreten, bis sie sich weit genug voneinander entfernt haben. Auch Messungenauigkeiten, hervorgerufen durch geringe Pendelbewegungen des oberen, frei hängenden Probekörperteilstückes, können nicht ausgeschlossen werden.

Für die Auswertung und die gegenüberstellenden Vergleiche der Ergebnisse wurden ausschließlich die Materialeigenschaften bis zum Erreichen der Maximalkraft verwendet. Unter den grafischen Darstellungen wurden jeweils tabellarisch die Kenngrößen der Oberfläche, die erreichte Maximalzugkraft und der dazugehörige Weg sowie die Zugkraft bei einem Weg von 0,6 mm aufgelistet. Letztere wurde hierbei im Vorfeld mit ausgewiesen, damit sie bei der Auswertung ergänzend herangezogen werden kann als Kenngröße für die Zugkraft bei sehr geringen Wegen.

4.2.3 Leime aus unterschiedlichen Zementen

Die verwendeten Zemente unterscheiden sich in ihrer Oberfläche, im reaktiven Klinkeranteil und in den während des Mahlvorganges im Zementwerk zugegebenen Stoffen Kalksteinmehl und Hüttensand.

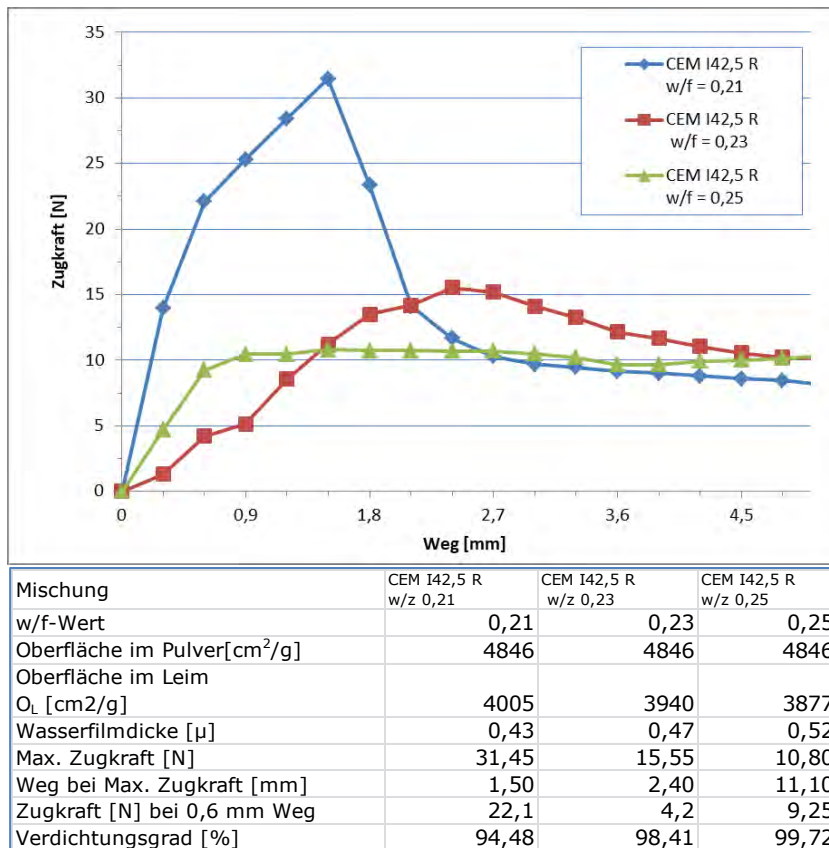


Abbildung 125: Zugdehnungen von CEM I 42,5 R

Am Beispiel von Abbildung 125 ist erkennbar, dass unterschiedliche w/f-Werte zu unterschiedlichen Ausprägungen der Zug-Dehnungsverläufe führen.

Der w/f-Wert von 0,21 zeigt einen sehr steilen Anstieg, bei geringen Dehnungen werden bereits große Kräfte aufgenommen. Nach Überschreiten des Maximums ist eine Resttragfähigkeit vorhanden, die in etwa symmetrisch zum Lastanstieg abnimmt. Demgegenüber ist bei w/f = 0,25 nach einem zügigen Lastanstieg keine Zunahme erkennbar. Ein deutlich definierter Bruch mit anschließendem Kraftabfall stellt sich nicht ein, es findet ein Abriss der oberen Probenhälfte bereits beim Erreichen ihres Eigengewichtes statt. Hier ist so viel Wasser in der Leimmischung enthalten, dass der Abstand der Partikel untereinander größer ist als die sehr kurze Reichweite der van-der-Waals-Kräfte. Diese größeren Flüssigkeitsbrücken können sich unter dem Einfluss äußerer Zugkräfte stärker dehnen, jedoch nehmen sie dabei geringere Zugkräfte auf und der Abriss tritt bei geringer Kraft früher ein. Weil die Oberfläche im Leim sehr gering ist, liegen je Flächeneinheit auch weniger Partikelkontakte vor, zwischen denen die einzelnen Zugkräfte der gedehnten Flüssigkeitsbrücken wirksam werden können. Somit wird in der Summe nur eine geringe Zugkraft übertragen, es erfolgt der Abriss bei Überschreitung des Eigengewichtes der oberen Probekörpervorrichtung.

Der Verlauf w/f = 0,23 weist bei größerem Zugweg ein Maximum auf. Ebenso ist der Anstieg weniger stetig als bei w/f = 0,21. Dieser ansteigende Ast deutet darauf hin, dass während der Belastung Umlagerungen der kraftübertragenden Mechanismen stattfinden, hierzu zählt auch die Wirkung der Dilatation, d.h. der physischen Verzahnungswirkung der Partikel, die der Dehnrichtung durch Verdrehung folgen. Auch können lokale, strukturelle Defizite im Leim vorhanden sein, die Änderungen im Anstieg der Zugkraft verursa-

chen. Bei $w/f = 0,21$ und $0,23$ finden mit Zunahme der Zugkraft Veränderungen beim Anstieg, d.h. Wechsel der Steigung statt.

Insgesamt zeigen sich bei der Auswertung aller Versuche Unterschiede in den Verläufen der Zugdehnungen, wie sie exemplarisch anhand von Abbildung 125 zu erkennen sind.

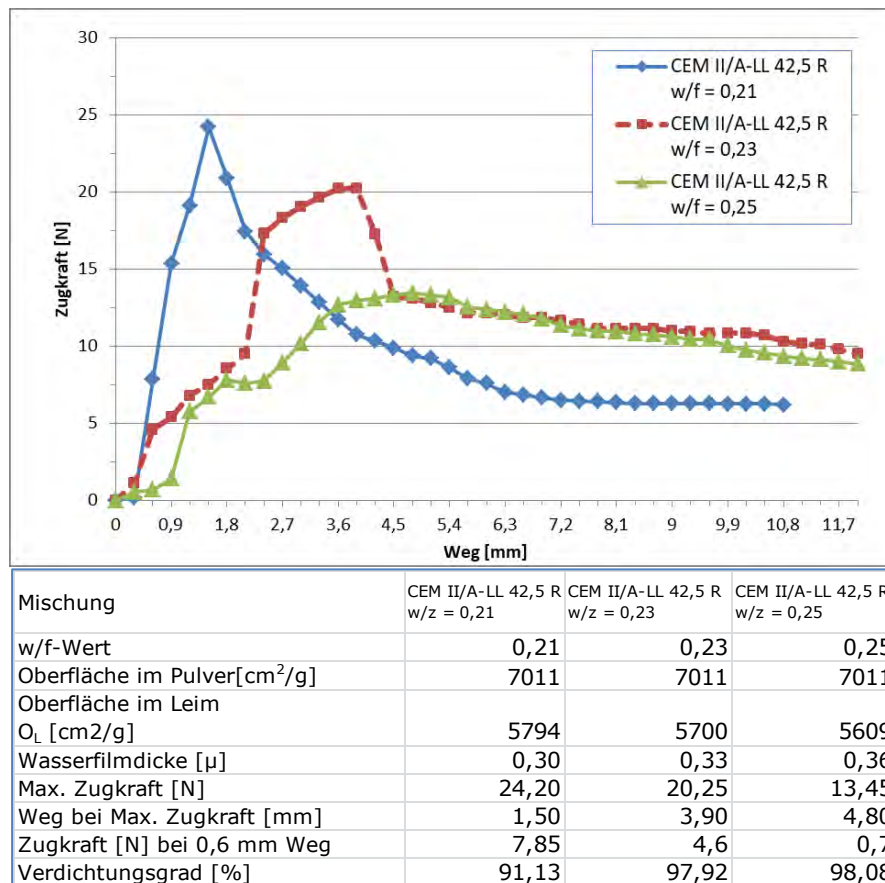


Abbildung 126: Zugdehnungen von CEM II/A-LL 42,5 R

In Abbildung 126 weist der Leim mit CEM II bei w/f -Werten $0,23$ und $0,25$ deutlich flachere Anstiege der Zugfestigkeit auf als bei $0,21$. Bedingt durch die Zunahme an Wasser im Leim reduziert sich die für Bindungskräfte zur Verfügung stehende Partikeloberfläche O_L je Gramm Leim von 5794 auf 5700 bzw. 5609 cm^2/g .

Die Geometrie der beiden Kurven $w/z = 0,23$ und $w/z = 0,25$ unterscheidet sich erheblich von der $w/z = 0,21$ -Kurve. Hier ist das Maximum der Zugkraft sehr ausgeprägt, es erfolgt danach ein starker Abfall und die Kurve konvergiert nach ca. 6 mm gegen das Eigengewicht der oberen, losgelösten Probekörperereinrichtung samt Leim.

Je weiter der Wassergehalt steigt, desto geringer ausgeprägt fällt das Zugkraftmaximum aus und desto höher werden die Wege. Generell muss davon ausgegangen werden, dass es sich nicht alleine um Dehnungen innerhalb der Leimmatrix handelt, sondern auch eine Relativbewegung, d.h. ein Gleiten des Leimkörpers entlang der Wandungen der Hüllrohre, handelt. Dieser Effekt tritt mit zunehmendem Wassergehalt immer stärker in den Vordergrund.

Übertragen auf die Praxisanwendung bei sofortiger Entschalung handelt es sich hierbei um Leime, die an der Schalung haften bleiben können, sobald diese nach oben weggleitet, weil sich eine Haftkraft zwischen Leim und Schalung ausbildet, die höher ist als die

Kraft innerhalb der Leimmatrix. Die gemessene Kraft stellt sich nicht an der Sollbruchstelle ein, sondern entlang der Mantelreibung zwischen den beiden Schalkörpern und dem Leim. Ein Bruch kann nicht stattfinden, da die Zugkraft sich umlagert und bei hohen Wegen oberhalb von 3 mm immer noch weiter zunimmt. Erst bei mehr als 4 mm beginnt sie, langsam zu sinken.

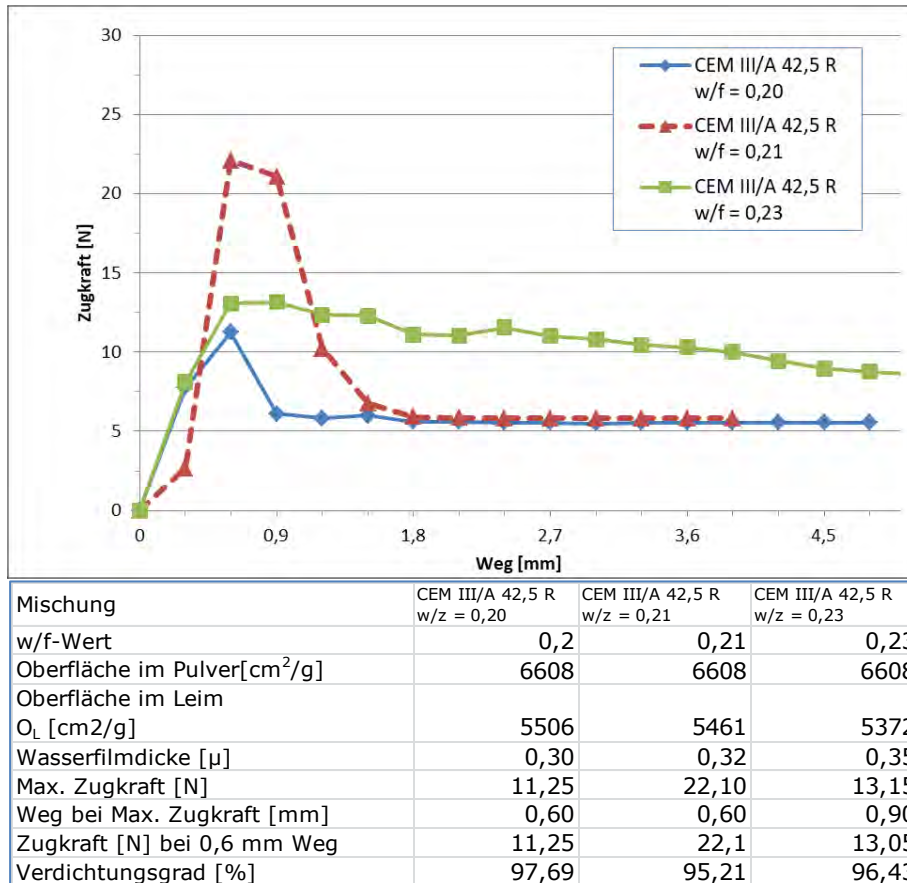


Abbildung 127: Zugdehnungen von Zement CEM III/A 42,5 R

In Abbildung 127 weisen die Kurven mit $w/f = 0,20$ und $0,21$ ausgeprägte Maxima auf, im Vergleich zur Kurve mit $w/f = 0,23$. Die Höhe der Maxima unterscheidet sich deutlich, wohingegen der zugehörige Weg identisch ist. Der steilere Anstieg bei $w/f = 0,20$ spricht für die frühe Aktivierung von Haftkräften kurzer Reichweite, doch ist die Mischung so trocken, dass für ausgeprägte Flüssigkeitsbrücken zu wenig Wasser zur Verfügung steht und daher ein frühes Versagen bei kurzen Wegen auftritt.

Abbildung 128 stellt von allen drei Zementen jeweils die Kurven mit $w/f = 0,21$ vergleichend gegenüber. Der Zement mit der geringsten Oberfläche im Leim erzielt die höchste Zugkraft, ebenso weist er als CEM I den höchsten Klinkergehalt auf. Der direkte Vergleich in Abbildung 128 zeigt, dass der Einfluss der Gesamtoberfläche, über die die Summe der Haftkräfte ausgebildet wird, geringer ist als der Einfluss des Klinkergehaltes, da der Zement mit dem geringsten Klinkergehalt (CEM III) auch die geringste Zugkraft aufweist.

Der Zement CEM I besteht vollständig aus reaktiven Klinkerpartikeln, er reagiert unmittelbar und am schnellsten von den drei dargestellten Zementen mit Wasser. Erste Hydrat- und Ettringitbildungen setzen unmittelbar nach Wasserzugabe ein. Das bedeutet, dass jeder Partikel mit einem Reaktionssaum versehen ist, und auch ebensolche Partikel

als unmittelbare Kontaktpartner hat. Dadurch verstärkt sich der Kraftanteil im Nahbereich der Partikelbindungen.

Von den Reaktionsprodukten geht innerhalb der ersten Minuten keine messbare Druckfestigkeit aus. Es findet jedoch eine sofortige Erhöhung der Partikeloberflächen statt, da diese Reaktionsprodukte die Zementpartikel mit einem Saum von ca. 1-10 μm belegen. Außerdem sind diese Reaktionsprodukte weich und werden sich bei auftretenden Bindungskräften aufgrund von Flüssigkeitsbrücken und van-der-Waals-Kräften deformieren. Es kommt zur Bildung von deformierten Nahbereichen zwischen einzelnen Partikeln, in denen die van-der-Waals-Kräfte deutlich höher sind als in steifen Partikelkontaktpunkten mit punktueller Wirkung. In dieser frühen Phase liegen noch keine chemischen Bindungen vor, die Druckfestigkeiten so übertragen können, wie beim jungen Beton oder beim Festbeton, vergleiche Abbildung 13.

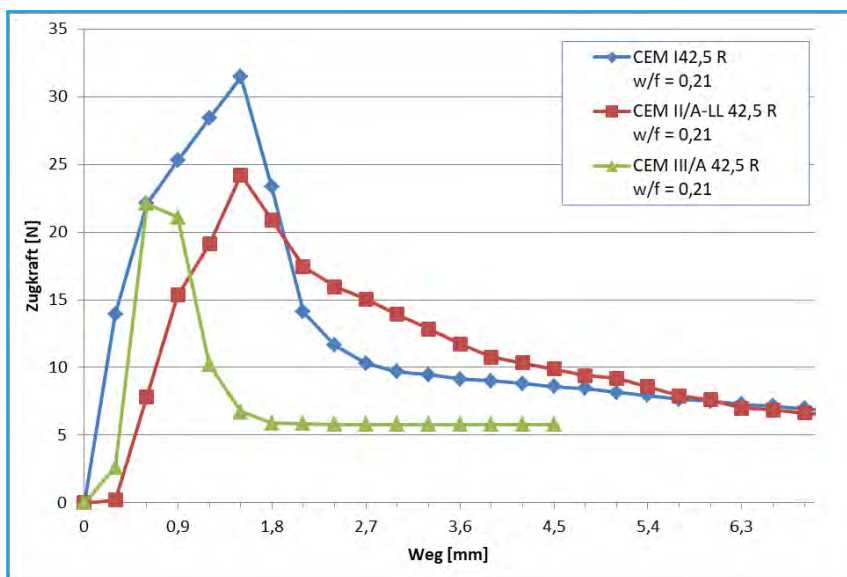


Abbildung 128: Zugdehnungen bei $w/f = 0,21$ und drei unterschiedlichen Zementen

Außerdem ist die Wasserfilmdicke je cm^2 Partikeloberfläche bei dem CEM I mit $w/z=0,21$ am Größten. Sie beträgt $0,43 \mu\text{m}$, bei CEM II/A-LL und CEM III jeweils $0,30 \mu\text{m}$. Dieser Einfluss kann zu zwei Effekten führen: zum Einen können kapillare Bindungskräfte über eine größere Reichweite hinweg wirken, da die Wasserbrücken zwischen den Partikeln ein höheres Volumen aufweisen und dadurch auch bei größeren Dehnungen noch Kräfte übertragen können, bevor sie abreißen. Zum Anderen dazu, dass Kraftkomponenten, die aus Reibung und Dilatation bestehen, und auch noch nach dem Überschreiten der Maximalkraft kurzzeitig auftreten können, in den Hintergrund treten, weil ein verhältnismäßig großer Wasserfilm die Oberflächen umgibt und die Reibungskomponenten wie ein Schmierfilm reduziert. Diese beiden gegenläufigen Effekte können dazu führen, dass der Weg bis zum Erreichen der Maximalkraft zunimmt, weil sich die ausgeprägten Wasserbrücken stark dehnen, bevor sie zerreißen. Nach dem Überschreiten der Maximallast, d.h. auf dem rechten Kurvenast, fällt die Kraft rasch ab, weil Reibung und Dilatation geringer ausgeprägt sind.

Der CEM II-Leim hat die größte Oberfläche im Leim. Die Reaktionsprodukte innerhalb der ersten Minuten werden aufgrund des niedrigeren Klinkeranteils geringer ausfallen, bzw. wird der Partikelanteil, der aus Kalkstein besteht, keine Reaktionsprodukte aufweisen. Der bei gleicher Zugkraft längere Weg weist auf einen höheren Anteil an Zugkräften durch Flüssigkeitsbrücken hin. Die Partikel des enthaltenen Kalksteinmehls weisen eine

raue Oberfläche und gebrochene Kornform auf. Dadurch kann während des Lastanstieges ein Teil der aufgenommenen Zugkräfte auch durch die Umlagerung und Verkantung der Körner untereinander während des Weges erfolgen. Die Aufnahme von Kräften durch Dilatation bedingt generell einen größeren Weg, der sich ebenfalls nach dem Maximum der Zugkraft fortsetzt bei relativ langsam abfallender Zugkraft.

Dieser Mechanismus ist beim CEM III weniger ausgeprägt, der Weg bis zum Erreichen der Maximalkraft ist deutlich geringer, ebenso erfolgt der Krafrückgang unmittelbar nach der Maximalkraft. Der Anteil der Partikel aus dem gebrochenen Hüttensand weist glasige, glatte Oberflächen und scharfkantige Partikelformen auf. Diese Hüttensandpartikel bilden, ebenso wie die Kalksteinpartikel des CEM II, keinen sofortigen Reaktionssaum aus. Daher ist der Anteil an Haftkräften mit kurzer Reichweite geringer. Bereits bei einem geringen Weg versagen diese Haftmechanismen. Bedingt durch die sehr scharfkantigen Partikel können die Flüssigkeitsbrücken sich nicht in ihrer optimalen, gedrungenen Form ausbilden und bilden sich zwischen Partikeln aus, deren Relief dafür ungünstig geformt ist. Bedingt durch die sehr glatten Partikeloberflächen werden Reibung und Dilatation ebenfalls geringer ausfallen als bei dem CEM II, dessen Kalksteinpartikel durch den Mahlvorgang in der Zementmühle mikrorauhe Oberflächen aufweisen.

4.2.4 Leime aus unterschiedlichen Zementen und jeweils einem Zusatzstoff

In den folgenden Versuchen wurden die in Kap. 4.2.3 verwendeten Zemente jeweils mit einem Zusatzstoff in variierenden Massenanteilen von Zementgewicht und Wasser gemischt.

Von den dabei verwendeten Zusatzstoffen ist Flugasche der bislang mit Abstand am häufigsten bei der Herstellung von erdfeuchten Betonteilen in der Praxis verwendete. Metakaolin wird vereinzelt, Mikrosilika sowie Siliziumcarbid gar nicht eingesetzt. Der k-Wert Ansatz aus DIN EN 206-1 für den äquivalenten Wasserzementwert als Kenngröße der Festbetondruckfestigkeit und der Dauerhaftigkeit wird hierbei nicht verwendet, weil es in dieser Arbeit ausschließlich um das Verhalten der Summe aller Feststoffpartikel mit Wasser in Bezug auf die Zugfestigkeit und das Dehnverhalten in frischen Leimzustand geht. Daher ist der hier verwendete Wasser-Feststoffwert (w/f) bezogen auf das gravimetrische Verhältnis aller verwendeten Stoffe ohne Abminderungsfaktoren.

In Abbildung 129 zeigen die drei Kurven mit CEM I 42,5 R mit 15 M.-% Flugasche deutliche Unterschiede in Abhängigkeit des w/f -Wertes.

Bei $w/f = 0,19$ ist die Wasserfilmdicke so gering, dass zu wenig kapillare Kräfte in Flüssigkeitsbrücken aktiviert werden. Die Leimmischung ist zu trocken. Das Gegenteil ist bei dem Leim mit $w/f = 0,23$ der Fall. Die Zugkraft nimmt nur langsam zu, und die Maximalkraft wird erst bei großer Dehnung von 2,70 mm erreicht und nimmt anschließend langsam ab. Dieser Leim ist zu feucht, er gleitet an dem Schalkkörper entlang ohne einen deutlichen Abriss in der Matrix.

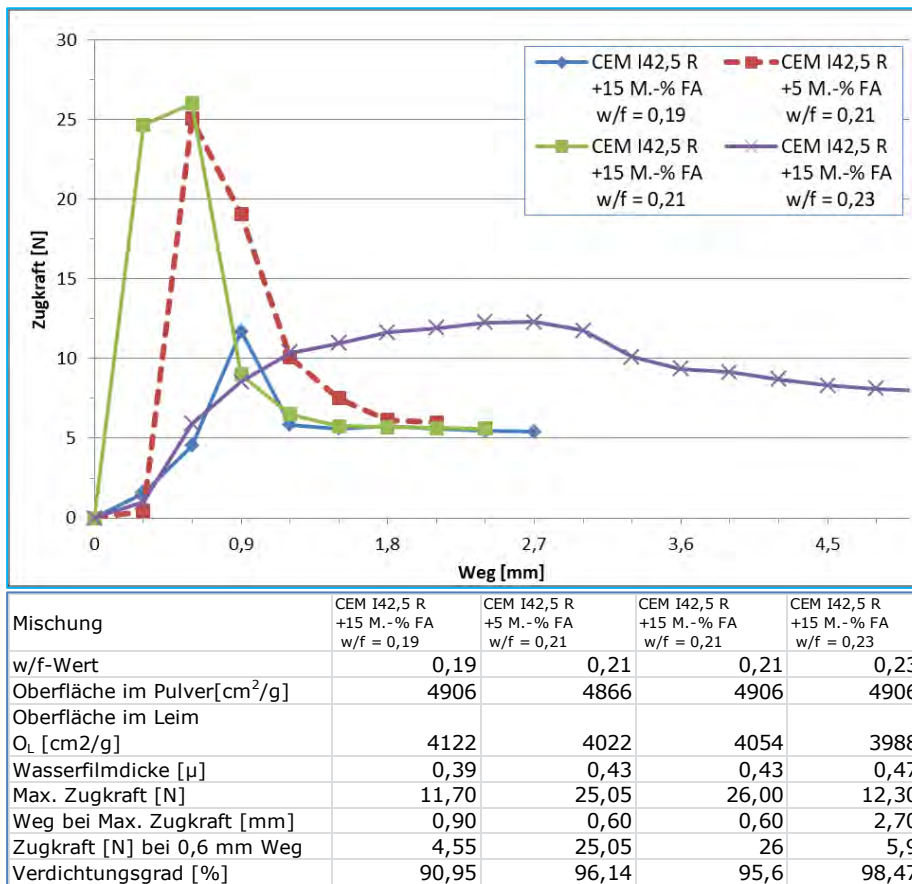


Abbildung 129: Zugdehnungen von Zement CEM I 42,5 R mit Flugasche

Das Maximum der Zugkraft liegt bei $w/f = 0,21$, für eine Dosierung von 5 M.-% Flugasche, ebenso wie für 15 M.-% Flugasche. Beide Kurven verlaufen mit ausgeprägtem Abriss bei kurzer Dehnung und hoher Zugkraft.

Im direkten Vergleich zu den Ergebnissen aus Abbildung 125 (CEM I) der w/f -Werte 0,21 sind hier die Maximalkräfte deutlich geringer und treten bereits bei geringeren Wegen auf als beim reinen CEM I. Die kugeligen Flugaschepartikel mit ihren glatten Oberflächen werden die rein mechanischen Widerstände innerhalb der Feststoffmatrix reduzieren. Ebenso sorgen sie mit ihren Oberflächen ohne primäre Reaktionsprodukte für eine Erhöhung der Anzahl an steifen Partikelkontakten im Sinne der Erläuterungen aus Kap. 2.4.2 zu Haftkräften und Verformungen. Hierfür spricht, dass die grüne Kurve (15 M.-% Flugasche) einen noch steileren Anstieg aufweist, d.h. eine noch geringere Aktivierung von Haftkräften durch Distanzvergrößerung der Partikeloberflächen voneinander.

In Abbildung 130 sind die Versuchskurven der Zemente CEM II/A-LL 42,5 R und CEM III/A 42,5 R jeweils mit 5 M.-% Flugasche dargestellt.

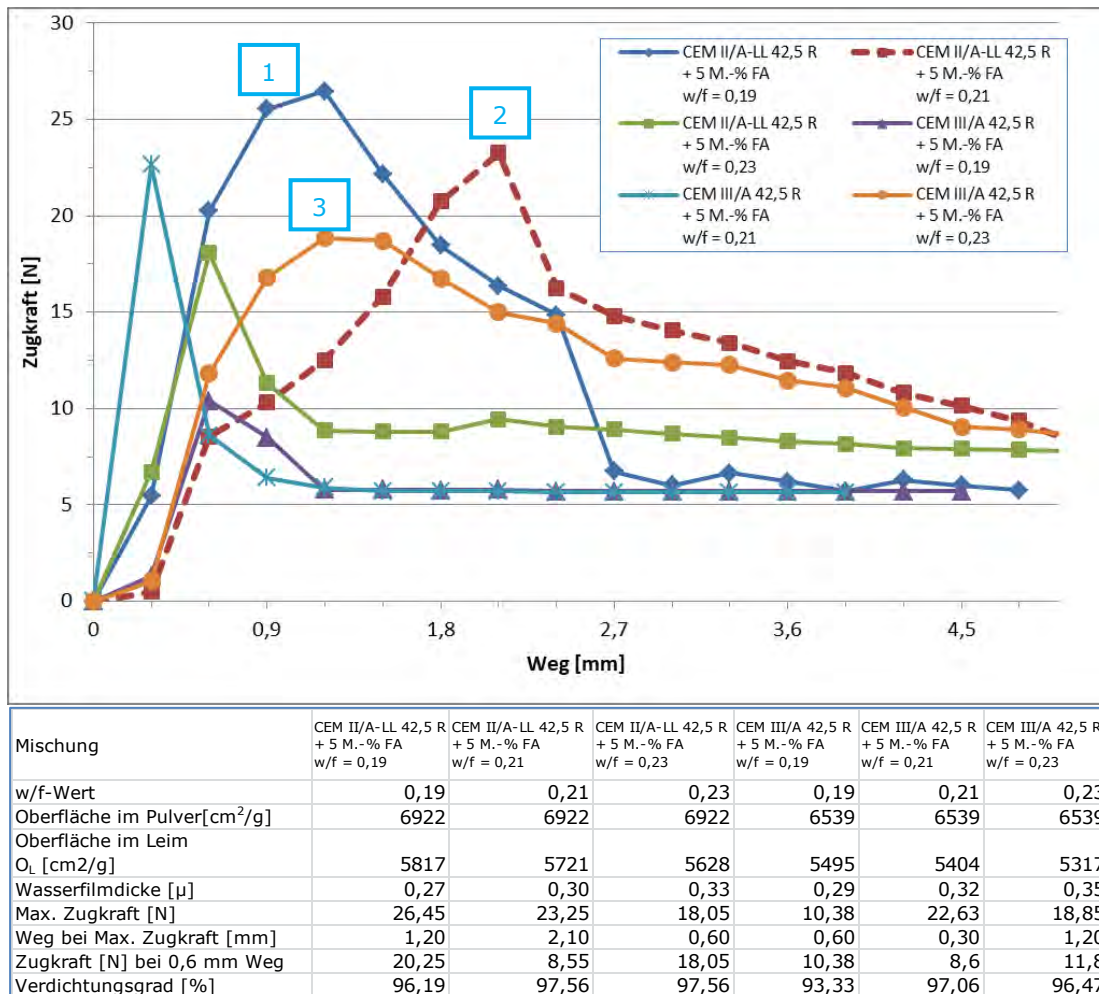


Abbildung 130: Zugdehnungen von CEM II/A-LL 42,5 und CEM III/A 42,5 R mit Flugasche

Drei Kurven weisen auch nach Überschreiten der maximalen Zugkraft noch sehr lange Wege aufweisen, bevor die Kraft vollständig zurückgeht (gekennzeichnet mit 1-3)

Der Verlauf des Versuches mit $w/f = 0,19$ und CEM III/A-42,5 R mit Flugasche weist mit seiner sehr geringen Zugkraft und dem schnellen Abfall auf eine sehr trockene Leimmischung hin. Im Vergleich der beiden Zemente jeweils ohne Flugasche, wie er in der Abbildung 126 und Abbildung 127 enthalten ist, sind die Zugkräfte etwas höher (ca. 2-6 N/mm²) bei geringfügig größeren Wegen.

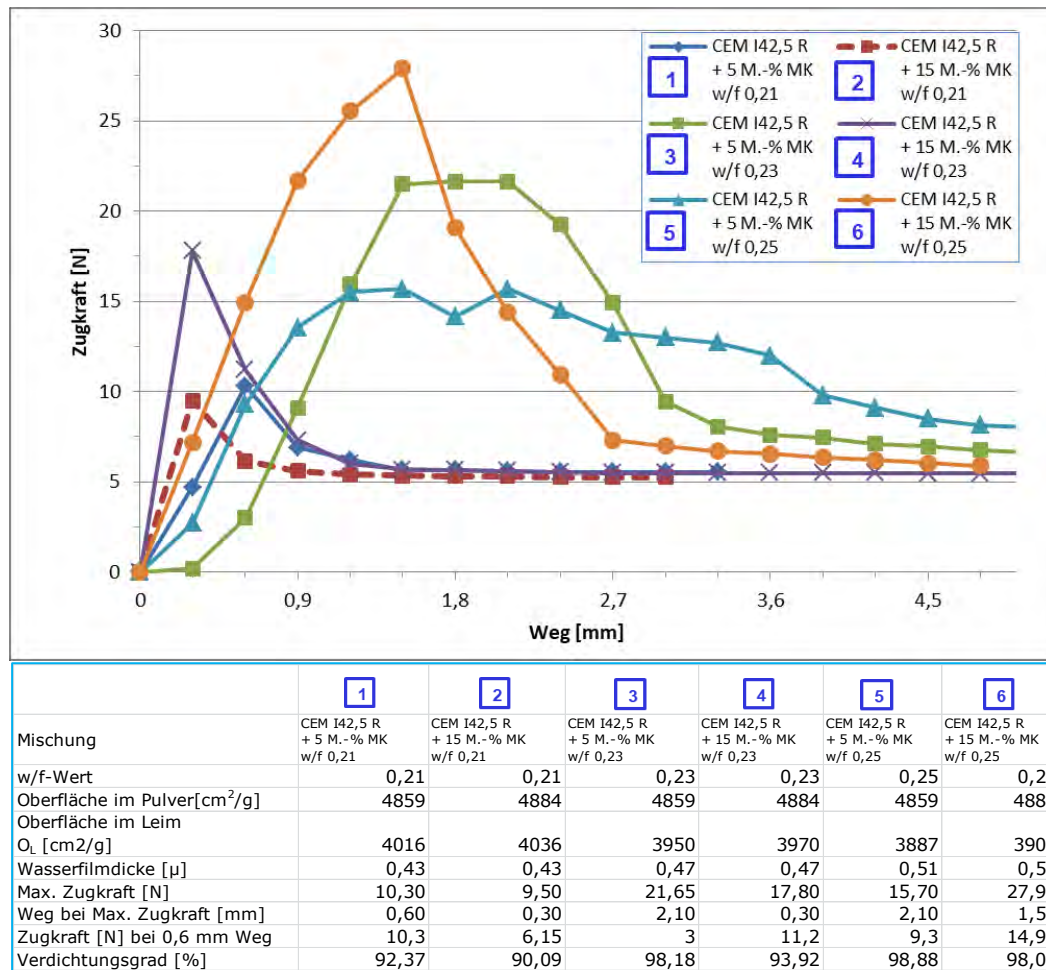


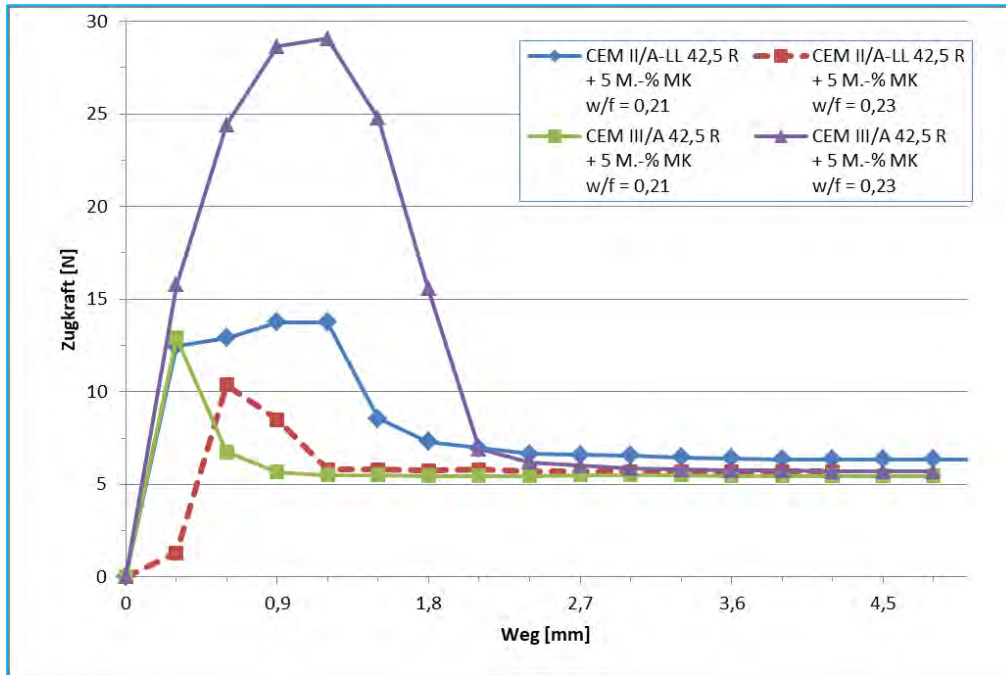
Abbildung 131: Zugdehnungen von CEM I 42,5 R mit Metakaolin

Die Kurven der Abbildung 131 zeigen jeweils drei Versuche mit ähnlichem Verhalten, bei zwei unterschiedlichen Ausprägungen. Die erste Gruppe weist ein Maximum bei geringen Wegen auf, die Verläufe steigen stark an und fallen ebenso stark wieder ab. Hierzu zählen der w/f-Wert mit 0,21 bei 5 % und bei 15 % Metakaolinzugabe sowie der w/f-Wert 0,23 bei 15 M.-% Metakaolin, dessen Maximum mit 17,8 N/mm² am höchsten ausfällt (Versuche 1, 2, 4).

In der zweiten Gruppe liegen die Maxima im Mittel höher, und das Duktilitätsverhalten ist stark ausgeprägt. Darin sind der w/f-Wert von 0,25 mit jeweils 5 M.-% und 15 M.% Metakaolin, und w/f-Wert mit 0,23 und 5 M.-% Metakaolin (Versuche 3, 5, 6).

Das in Abbildung 120 erkennbare Metakaolin weist stark zerklüftete, kantige und unsymmetrische Kornformen auf. Kleinere Partikel wirken schichtig, mit Linien und Furchen durchzogen. Somit wird die Oberfläche eines gleich großen Partikels bei Metakaolin deutlich höher sein als bei Flugasche, ebenso wie im Vergleich mit den Partikeln der drei verwendeten Zemente ohne Wasserzugabe und Reaktionsprodukte.

Insgesamt sind die prüfbaren w/f-Werte mit Metakaolin im Bereich von 0,21 – 0,25 und damit erkennbar höher als bei den vorher geschilderten Versuchen. Wird Metakaolin bei Leimen mit CEM II/A-LL oder mit CEM III kombiniert, wie in Abbildung 132 dargestellt, unterscheidet sich das Dehnverhalten erkennbar. Die Anstiege verlaufen steiler, die Maxima der Zugkraft werden bei geringeren Wegen erreicht, und auch bei geringeren w/f-Werten.



Mischung	CEM II/A-LL 42,5 R + 5 M.-% MK w/f = 0,21	CEM II/A-LL 42,5 R + 5 M.-% MK w/f = 0,23	CEM III/A 42,5 R + 5 M.-% MK w/f = 0,21	CEM III/A 42,5 R + 5 M.-% MK w/f = 0,23
w/f-Wert	0,21	0,23	0,21	0,23
Oberfläche im Pulver[cm ² /g]	6915	6915	6532	6532
Oberfläche im Leim				
O _L [cm ² /g]	5715	5622	5398	5311
Wasserfilmdicke [μ]	0,30	0,33	0,32	0,35
Max. Zugkraft [N]	13,75	10,38	12,90	29,05
Weg bei Max. Zugkraft [mm]	1,20	0,60	0,30	1,20
Zugkraft [N] bei 0,6 mm Weg	12,9	10,38	6,75	24,4
Verdichtungsgrad [%]	97,05	97,11	91,68	95,15

Abbildung 132: CEM II und CEM III jeweils mit Metakaolin

w/f-Werte mit 0,25 konnten nicht geprüft werden, da sie zu verformbar waren und während der Prüfung aus der Form herausglitten. Wie bereits bei den Versuchen mit den einzelnen Zementen beschrieben, ist der unmittelbare Reaktionssaum der hier verwendeten Zemente geringer als bei CEM I. Daher wird weniger Wasser benötigt, um als umgebende Adsoptionsschicht die gesamte Oberfläche der Partikel zu umhüllen.

Im Vergleich der beiden CEM II/A-LL Kurven ist erkennbar, dass der w/f-Wert von 0,23 bereits ein deutlich geringeres Maximum der Zugkraft aufweist als bei w/f = 0,21. Somit ist der w/f-Wert von 0,23 bereits als zu feucht anzusehen, obwohl die Verdichtungsgrade nahezu gleich sind.

Abbildung 133 enthält die Ergebnisse von Mischungen aus CEM I und Mikrosilika, Abbildung 134 die Ergebnisse mit CEM II, CEM III und Mikrosilika. Obwohl Mikrosilika sehr kleine Partikel im Vergleich zur Flugasche aufweist, erhöht sich die Oberfläche im Pulver bzw. im Leim nur gering. Auch die prüfbaren w/f-Werte liegen mit 0,21-0,25 in dem bereits bekannten Bereich.

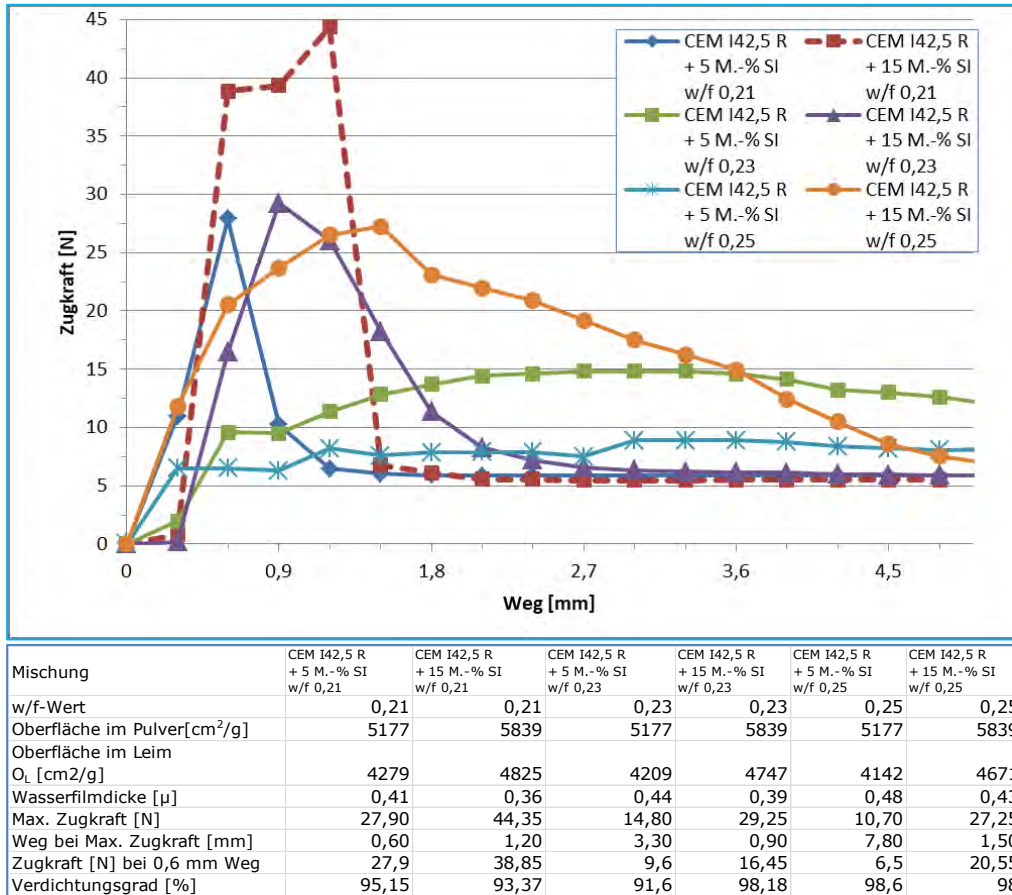


Abbildung 133: CEM I mit Mikrosilika

Bei w/f = 0,21 reagieren die Mischungen mit 5 M.-% und 15 M.-% Mikrosilika spröde mit hohen Zugkraftmaxima bei kurzen Wegen und sofortigem Abfallen. Demgegenüber führen die w/f-Werte von 0,23 und 0,25 bereits zu Gleiterscheinungen und keiner bzw. sehr geringer Zugkraft.

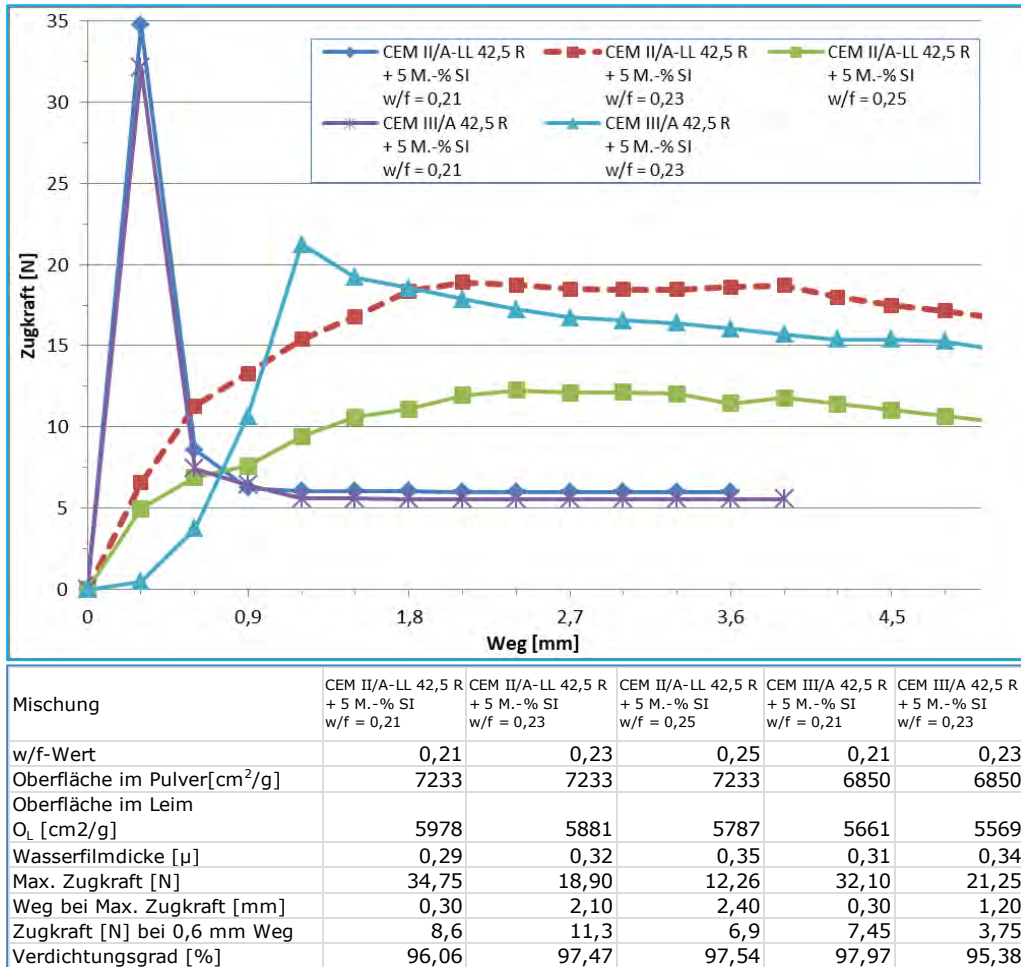
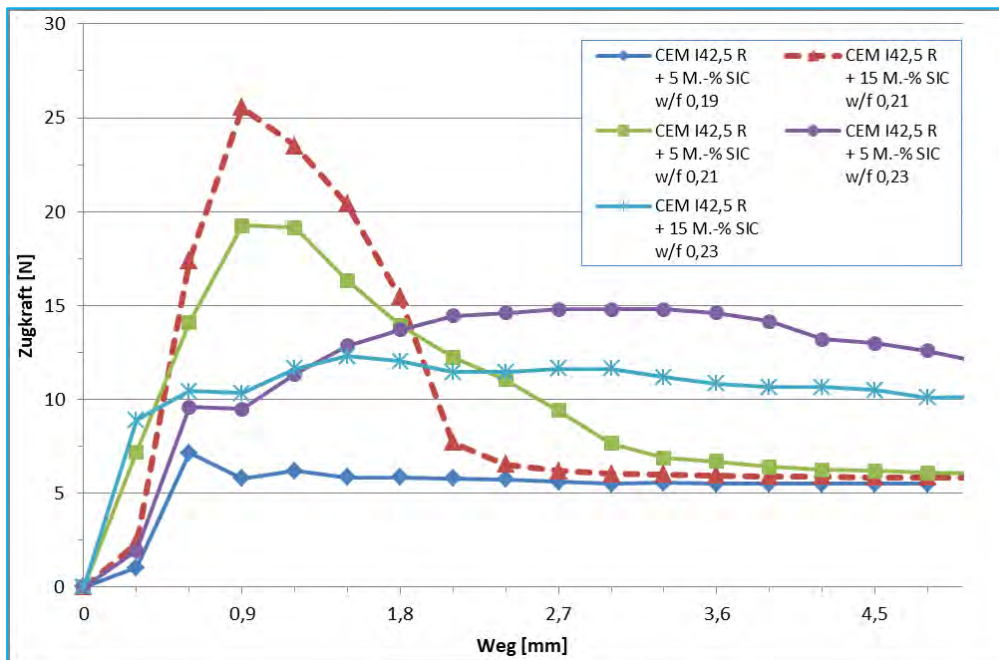


Abbildung 134: CEM II und CEM III mit Mikrosilika

Der Zusatzstoff Siliziumcarbid (SiC) ist sehr scharfkantig bis splittrig geformt und dabei plattig-länglich, mit glatten Oberflächen. Bei der Zugabe von Siliziumcarbid weisen die Leime unter Zugbeanspruchung generell höhere Wege bis zum Maximum auf, und auch der Kraftabfall danach erfolgt bei hohen Dehnungen, siehe Abbildung 135 und Abbildung 136. Lediglich die Kombination von CEM III mit SiC bei $w/f = 0,21$ (grüne Linie) führt zu einem ausgeprägten Maximum bei extrem kurzen Dehnungen.



Mischung	CEM I42,5 R + 5 M.-% SIC w/f 0,19	CEM I42,5 R + 15 M.-% SIC w/f 0,21	CEM I42,5 R + 5 M.-% SIC w/f 0,21	CEM I42,5 R + 5 M.-% SIC w/f 0,23	CEM I42,5 R + 15 M.-% SIC w/f 0,23
w/f-Wert	0,19	0,21	0,21	0,23	0,23
Oberfläche im Pulver[cm ² /g]	5106	5626	5106	5106	5626
Oberfläche im Leim					
O _L [cm ² /g]	4291	4650	4220	4151	4574
Wasserfilmdicke [μ]	0,37	0,37	0,41	0,45	0,41
Max. Zugkraft [N]	7,15	25,55	19,25	14,80	12,30
Weg bei Max. Zugkraft [mm]	0,60	0,90	0,90	3,30	1,50
Zugkraft [N] bei 0,6 mm Weg	7,15	17,4	14,1	9,6	10,45
Verdichtungsgrad [%]	91,6	96,15	96,97	98,01	98,68

Abbildung 135: CEM I und Siliziumcarbid

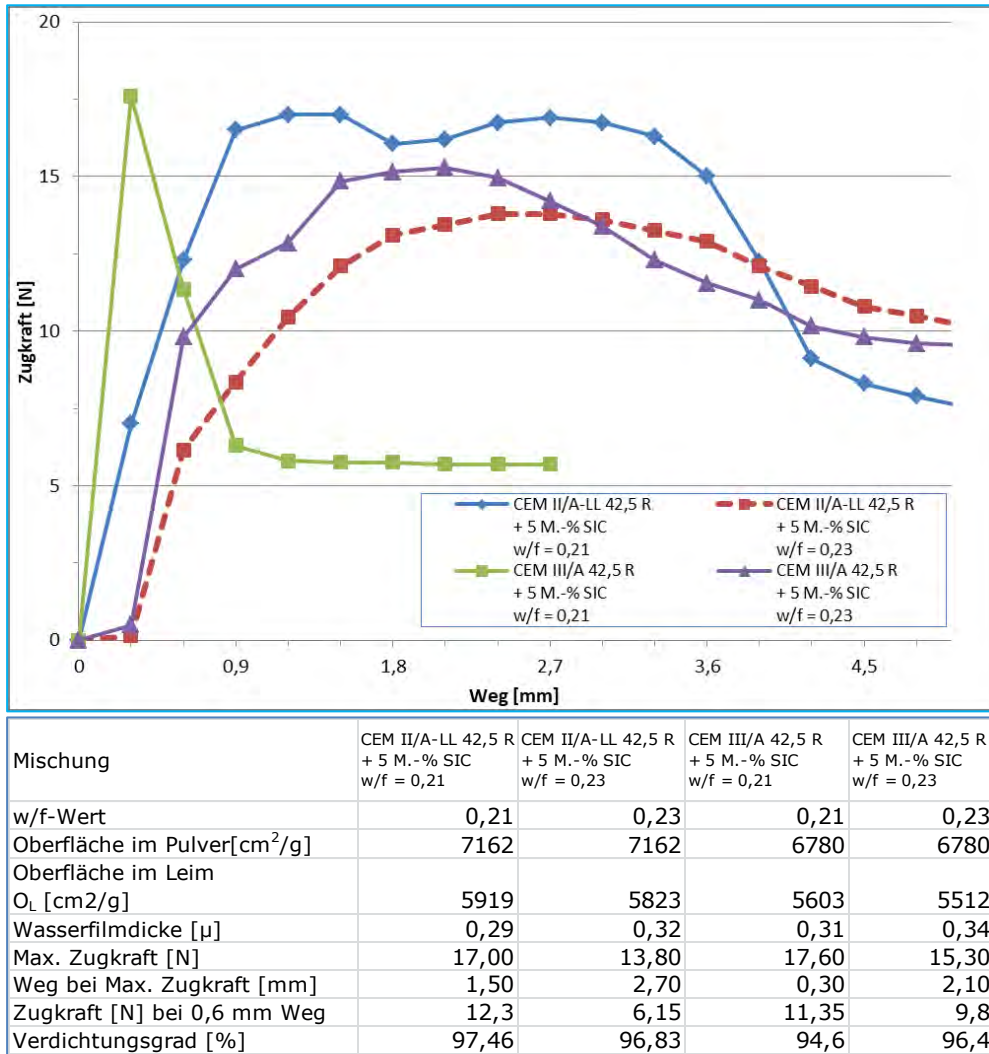


Abbildung 136: CEM II und CEM III mit Siliziumcarbid

4.2.5 Leime aus unterschiedlichen Zementen und jeweils zwei Zusatzstoffen

Die Variation der einzelnen Zemente mit jeweils zwei Zusatzstoffen in unterschiedlichen Kombinationen erfolgte, um zu überprüfen, ob und wie sich geringfügige Änderungen der Ausgangsstoffe in den Versuchsergebnissen widerspiegeln.

Die Resultate sind in der Abbildung 137 (CEM I), Abbildung 138 (CEM II) und Abbildung 139 (CEM III) enthalten. Alle Versuche wurden bei w/f-Werten von 0,21 und 0,23 durchgeführt, um eine direkte Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Weitere w/f-Werte, die zu einer optimierten, höheren Zugkraft führen könnten, wurden nicht untersucht, weil hierfür je Serie mindestens drei weitere Versuche erforderlich wären und die gesamte Versuchszahl erheblich zunimmt.

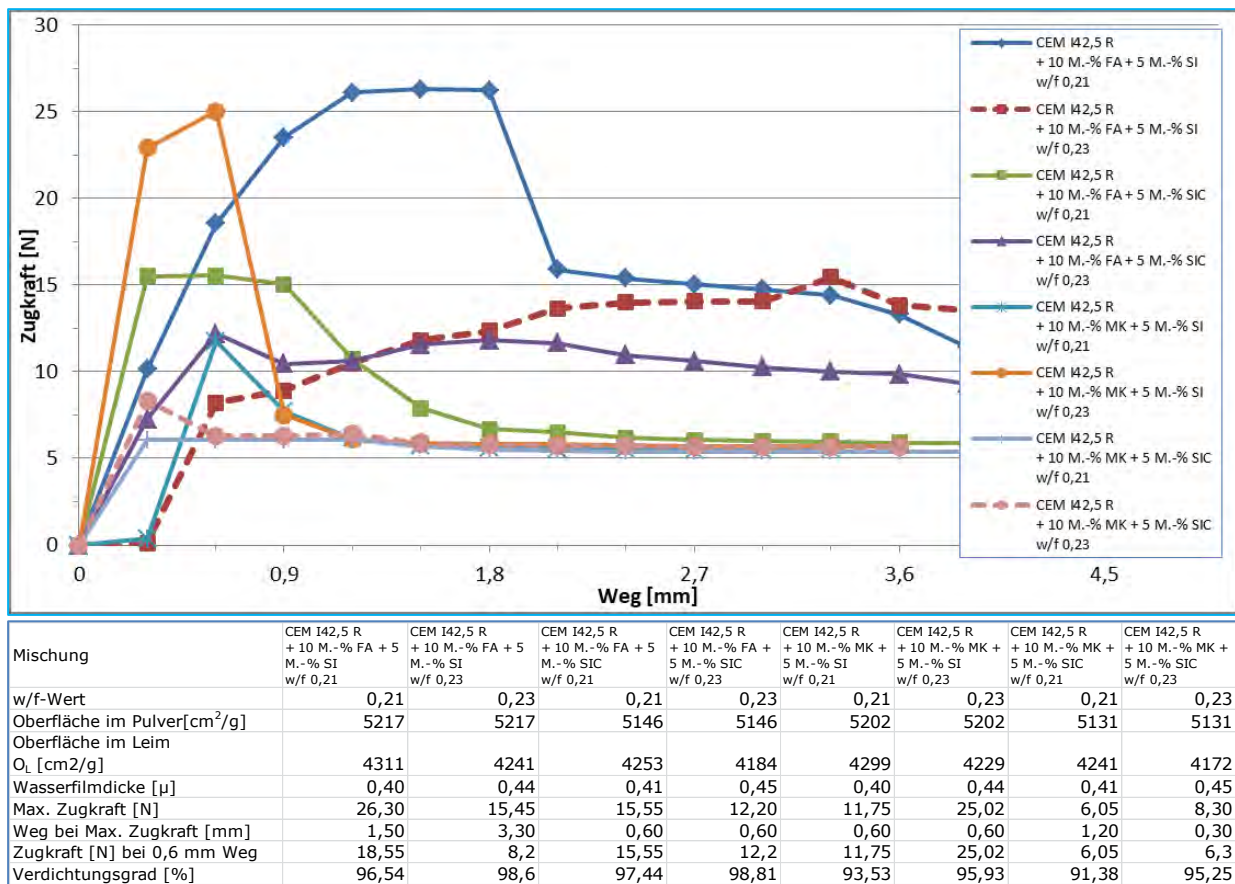


Abbildung 137: CEM I mit je zwei Zusatzstoffen bei w/f-Werten von 0,21 und 0,23

In den Kombinationen der Abbildung 137 mit jeweils zwei Zusatzstoffen neigt der CEM I überwiegend zu gering ausgebildeter Zugkraft sowie zu duktilerem Verhalten. Lediglich der w/f-Wert von 0,23 mit der Kombination von 10 M.-% Metakaolin und 5 M.-% Silicium zeigt ein ausgeprägtes Maximum bei einem geringen Weg von 0,6 mm.

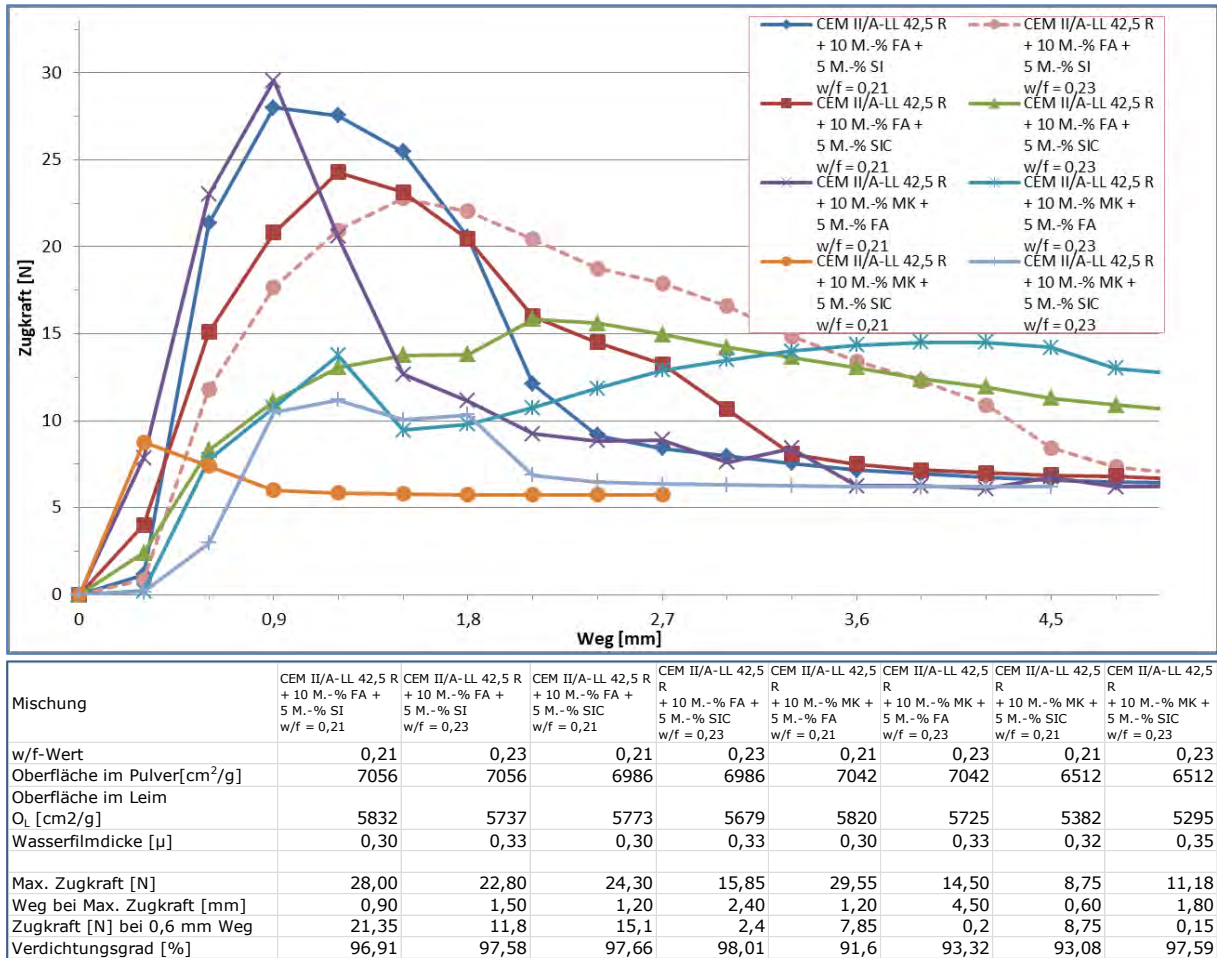


Abbildung 138: CEM II mit je zwei Zusatzstoffen bei w/f-Werten von 0,21 und 0,23

In Abbildung 138 zeigen sehr viele Kurven einen ausgeprägten und langgezogenen Abfall der Zugkraft nach dem Überschreiten des Maximums, die vereinzelt beobachtete Zunahme der Zugkraft bei bereits großen Wegen von über 2 mm ist kritisch zu sehen und ist eher durch versuchstechnische Einflüsse zu erklären als durch das Materialverhalten.

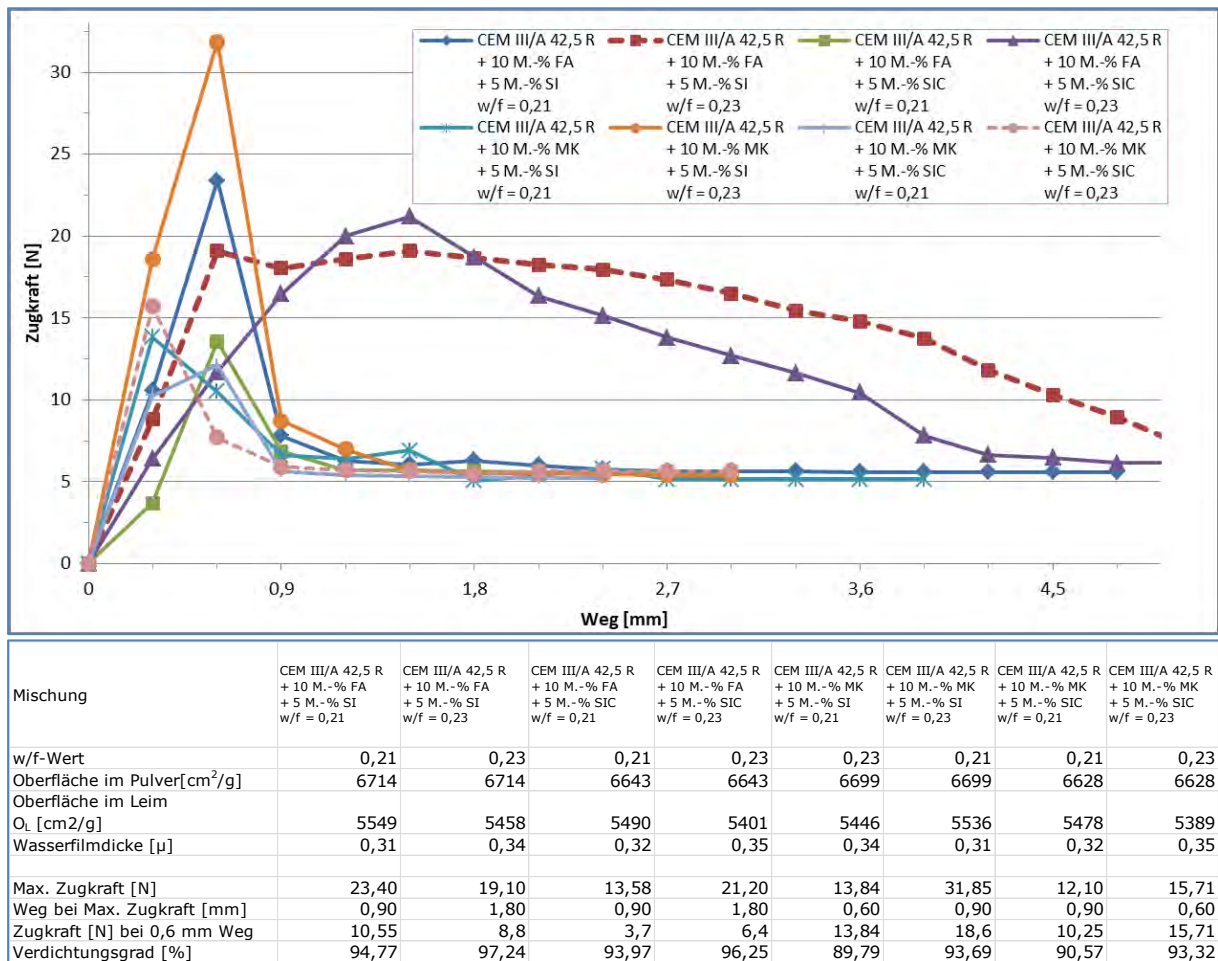


Abbildung 139: CEM III mit je zwei Zusatzstoffen bei w/f-Werten von 0,21 und 0,23

Bei allen drei Zementarten wurden Kurvenverläufe aufgenommen, die Ähnlichkeiten zueinander aufweisen, sowie weitere Kurven, die sich stark unterscheiden. Die Serien der Abbildung 139 mit CEM III weisen überwiegend Maxima bei geringen Dehnungen auf, gleitende, duktile Verläufe kommen nicht vor.

4.3 Versuche an erdfeuchtem Beton für die Herstellung von Betonpflastersteinen

Den Abschluss der Versuche bildet eine Erprobung der Versuchseinrichtung auf Eignung für die Prüfung erdfeuchter Betone. Die Versuche wurden im Labor der Universität Wuppertal durchgeführt, um in der Phase der Erprobung der Versuchseinrichtung umfangreiche Störungen während der laufenden Produktion bei Herstellern zu vermeiden. Bedingt durch die dortige Herstellung des Betons mit anschließender, automatischer Übergabe in eine Kübelbahn und weiterer Übergabe in die Steinfertigungsmaschine kann nur dann per Hand eine Frischbetonprobe erhalten werden, wenn die gesamte Produktionskette nach dem Mischende unterbrochen und danach manuell beendet wird.

Statt dessen wurden im Labor Versuche an einer Betonrezeptur durchgeführt, wie sie bei der Produktion von Kernbeton für Betonpflastersteine verwendet wird. Der dafür vorgesehene w/z-Wert von 0,34 ließ sich mit der vorhandenen Gesteinskörnung nicht als verdichtbare erdfeuchte Betonrezeptur einstellen, weil die im Labor vorhandene Körnung bedingt durch die Lagerzeit im Labor vollständig ausgetrocknet war. Auf ein Vornässen und anschließendes langsames Rücktrocknen wurde verzichtet und eine verdichtungsfähige

hige, erdfeuchte Konsistenz durch erhöhte Wasserzugabe eingestellt, da ausschließlich die Funktionalität des Prüfverfahrens bei erdfeuchtem Beton überprüft werden sollte und nicht die Zugfestigkeit einer exakten vorgegebenen Betonmischung. Ebenso kann durch übliche Labormischer (Ringtellerischer) die Mischintensität von Großmischern für erdfeuchten Beton (Gegenstrommischer) nicht erreicht werden, weil Drehzahl und gegenläufige Schaufelrotation mittels Planeten nicht gegeben sind, was zu einer schlechteren Durchmischung und damit zu erhöhtem Wasserbedarf führt.

Tabelle 10 enthält die verwendeten Rezepturen ohne eine Berücksichtigung von Luft. Die ergänzend angegebenen Wasser-Feststoff-Werte (w/f) beziehen sich auf das Verhältnis Wasser zu Zement und Flugasche. Unter Berücksichtigung aller zugegebenen Feststoffe, d.h. auch der Gesteinskörnungen, liegen die (w/z+f+GK)-Werte bei 0,0383 für Rezeptur 1 und bei 0,0474 für Rezeptur 2. Eine Angabe dieses Wasser-Gesamtfeststoff-Verhältnisses ist in der Betontechnologie jedoch bislang nicht üblich, daher liegen hierfür auch keine Vergleichsmöglichkeiten und Erfahrungswerte vor.

Tabelle 10: Verwendete Rezepturen für erdfeuchten Beton mit Größtkorn 8 mm [1 m³]

Rezept 1, w/z = 0,428 (w/f = 0,363)			
	Gewicht [kg]	Rohdichte[kg/dm ³]	Volumen [dm ³]
Zement	216	3,1	70
Wasser	92,5	1	93
Flugasche	39	2,4	16
Sand 0/2	1.081	2,63	411
Kies 2/8	1.081	2,63	411
Gesamt:	2509,5		1000
Rezept 2, w/z = 0,53 (w/f = 0,449)			
	Gewicht [kg]	Rohdichte[kg/dm ³]	Volumen [dm ³]
Zement	211	3,1	68
Wasser	112	1	112
Flugasche	38,4	2,4	16
Sand 0/2	1.057	2,63	402
Kies 2/8	1.057	2,63	402
Gesamt:	2475,4		1000

Verwendet wurde ein CEM I 42,5 R (Spenner), Flugasche (Baumineral), Rheinsand und Rheinkies. Für die Versuche wurden 10 Liter Beton angemischt mit einem 50 l Labormischer.

Aus jeder Mischung wurden jeweils drei Probekörperformen zunächst befüllt und anschließend unmittelbar nacheinander geprüft, um eine verlässlichere Aussage über die Tauglichkeit des Prüfverfahrens zu gewinnen als mit nur einem Probekörper. Obwohl die w/z-Werte beider Rezepturen deutlich voneinander abweichen, weist der frische erdfeuchte Beton beider Rezepturen optisch keine erkennbaren Unterschiede auf. Auch der verdichtete Beton nach erfolgter Zugprüfung an der Bruchstelle zeigte keine erkennbaren Unterschiede, beides ist in Abbildung 140 und Abbildung 141 dokumentiert.



Abbildung 140: Rezeptur 1 rechts nach dem Mischen, links nach dem Prüfen



Abbildung 141: Rezeptur 2 rechts nach dem Mischen, links nach dem Prüfen

Anhand dieser beiden Rezepturen zeigt sich, dass keine optischen Unterschiede zu erkennen sind, somit auch keine Zuordnung der Rezeptur zum Beton möglich ist. Es handelt sich in beiden Fällen um Betone, die lediglich mit allgemeinen Begriffen wie „erdfeucht“, „zero-slump concrete“ (vgl. Kap. 2.2) oder „negative slump concrete“ bezeichnet werden. Insbesondere letzterer umschreibt, dass eine weitere Zugabe von Wasser noch möglich ist, und es sich danach immer noch um einen zero-slump-Beton handelt. Auch können beide Beton nicht über die begriffliche Umschreibung, dass der Eine „trockener“ als der Andere sei, differenziert werden, weil diese Feststellung auch mit z.B. dem Kellenstrich bzw. dem Glätten am Rande des Transportgefäßes nicht getroffen werden konnte.

In Abbildung 142 und Abbildung 143 sind die Zugdehnungskurven der beiden Rezepturen dargestellt. Die Verdichtungsgrade v der einzelnen Proben sind in den Diagrammen mit angegeben.

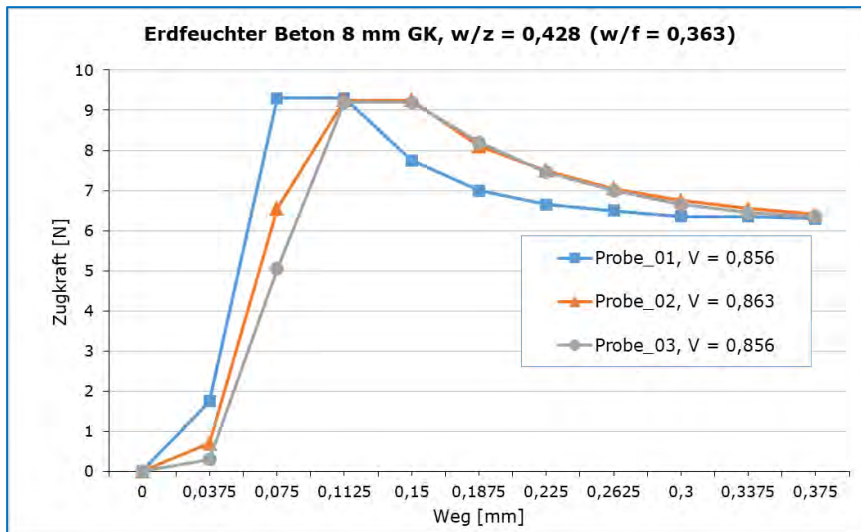


Abbildung 142: Zugkraft von drei Probekörpern aus einer Mischung erdfeuchten Betons mit w/z = 0,428 (Rezeptur 1)

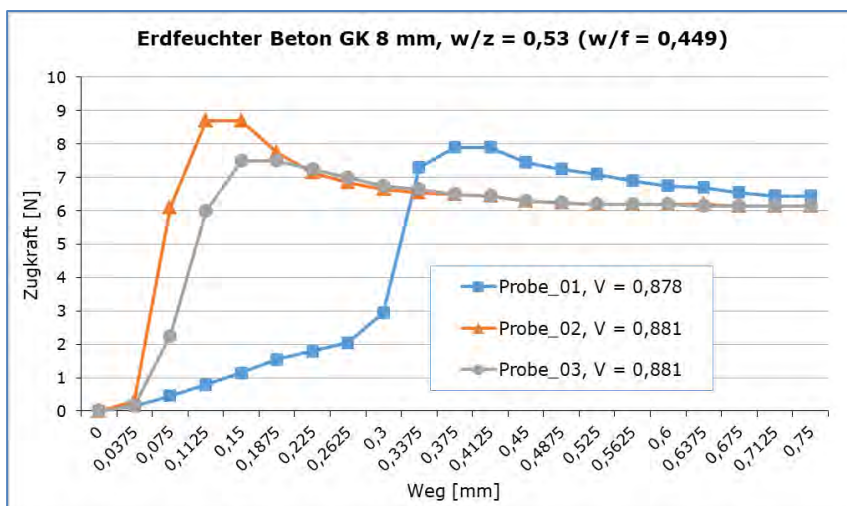


Abbildung 143: Zugkraft von drei Probekörpern aus einer Mischung erdfeuchten Betons mit w/z = 0,53 (Rezeptur 2)

Entgegen der optischen Erscheinung beider Betone ist das gemessene Zugdehnungsverhalten unterschiedlich. Bei Rezeptur 1 liegen die maximalen Zugkräfte bei 9,2 N bzw. 9,3 N, bei Rezeptur 2 zwischen 7,5 N und 8,7 N. Dabei nimmt der Weg, bei dem die Maximalkraft erreicht wird, bei Rezeptur 2 leicht zu. Der vollständige Abfall der Zugkraft tritt bei Rezept 1 bereits bei 0,375 mm ein, bei Rezept 2 erst oberhalb von 0,675 mm. Während bei Rezeptur 1 alle drei Versuchskurven relativ nah zusammen liegen, weicht Probe 1 bei Rezeptur 2 deutlich von den beiden anderen ab.

Insgesamt zeigt sich, dass alle drei Werte der maximalen Zugkraft von Rezept 1 über denen der Rezeptur 2 liegen, i.M. +15 %, so dass die Ergebnisse eine erkennbare Unterscheidung aufweisen. Die Verdichtungsgrade der jeweils drei rezepturgleichen Probekörper liegen dicht beieinander, dabei sind die Verdichtungsgrade der Rezeptur 2 ca. 3 % höher. Die Verdichtungsgrade sind insgesamt deutlich geringer als bei den Versuchen die ausschließlich an Leimen durchgeführt wurden. Abbildung 129 korrespondiert mit dem hier verwendeten Zement CEM I 42,5 R und 15 M.-% Flugasche am ehesten. Im Vergleich zeigt sich, dass Verdichtungsgrade und Zugkräfte am Leim mit annähernd identi-

schen Ausgangsstoffen deutlich höher sind als am erdfeuchten Beton. Bei den verwendeten gravimetrischem w/f-Wert von 0,19 beträgt der volumetrische w/f-Wert 0,53. Demgegenüber liegt bei der hier verwendeten Betonrezeptur 1 der volumetrische w/f-Wert unter Einbeziehung der Gesteinskörnung bei 0,10 (bei einem w/z-Wert von 0,428). Diese verringerte Wasserverteilung bezogen auf das gesamte Feststoffvolumen trägt dazu bei, dass sich die Gleitwirkung durch Flüssigkeit bei dem Beton gegenüber einem Leim verringert. Daher setzt die Betonmatrix dem Verdichten einen höheren Widerstand entgegen. Auch die Haftkräfte zwischen den Partikeln werden durch das Vorhandensein der Gesteinskörnung beeinflusst. Das für die Flüssigkeitsbrücken und Adsorptionsfilme zur Verfügung stehende Wasser an den Partikeloberflächen verringert sich ebenfalls im Vergleich zu einem Leim. Haftkräfte durch van-der-Waals-Kräfte verringern sich, weil die Oberflächenrauigkeiten, von denen gem. Abbildung 66 bei einer Größe von unter 0,1 μm der dominierende Einfluss ausgeht, bei Gesteinskörnungen generell gröber sind als bei pulverförmigen Stoffen aus einem Mahlprozess. Ebenfalls verringert sich der Anteil der plastischen Komponente der van-der-Waals-Kräfte an der Gesamthaftkraft, weil sich das Volumenerhältnis (und das Oberflächenverhältnis auch, Verhältnis Oberfläche zu Volumen = 3 bei idealen Kugeln) des Zementes am gesamten Feststoffvolumen verringert und insgesamt weniger deformierbare Feststoffoberfläche zur Verfügung steht.

Aus den Leimeigenschaften und dem Zugdehnungsverhalten der Leime in Abbildung 129 können keine Prognosen über das zu erwartende Verhalten oder die Zusammensetzung eines daraus bestehenden erdfeuchten Betons abgeleitet werden. Das Gesamtverhältnis Wasser-Feststoff zwischen Leim und Beton ist generell nicht vergleichbar, ebenso wie die prozentuale Verteilung der Haftkraftkomponenten auf der Partikelebene unterschiedlich sein muss, weil quarzische Grobkörner aus natürlichem, ungebrochenem Sand und Kies z.B. keine bzw. wesentlich geringere plastische Deformationen erfahren werden als Zement mit Hydratationsprodukten der ersten Minuten bzw. Zement ohne Hydratationsprodukte, jedoch mit deformierten Mikrorauigkeiten auf der Oberfläche.

Anhand der x-Achsen beider Diagramme ist zu erkennen, dass bei diesen abschließenden Versuchen bereits eine neue Messzelle eingesetzt wurde, die eine Messfrequenz von 80 Herz ermöglicht. Die Prüfgeschwindigkeit betrug auch in diesen Fällen 3 mm/s.

4.4 Versagensarten im zentrischen Zugversuch

Bei der Analyse der Versuchsergebnisse aus den Hauptversuchen stellen sich Unterschiede in den Kurvenverläufen heraus, die sich auf das Verhalten vor dem Erreichen der maximalen Zugkraft und das Verhalten nach dem Überschreiten der maximalen Zugkraft bis zum vollständigen Kraftabfall beziehen (lediglich die Gewichtskraft aus Eigengewicht des oberen Probekörperteiles bleibt bestehen).

Ein Teil der Kurven, die eine hohe Zugkraft bei kurzen Wegen aufweisen, ähneln der Skizze in Abbildung 144, die das sogenannte „strain-softening“ bei erhärteten Betonen, als Folge einer Lokalisierung der fortschreitenden Mikrorissbildung, darstellt [143]. Dieser Begriff beschreibt die Begründung für den steilen Abfall der σ - ε -Kurve.

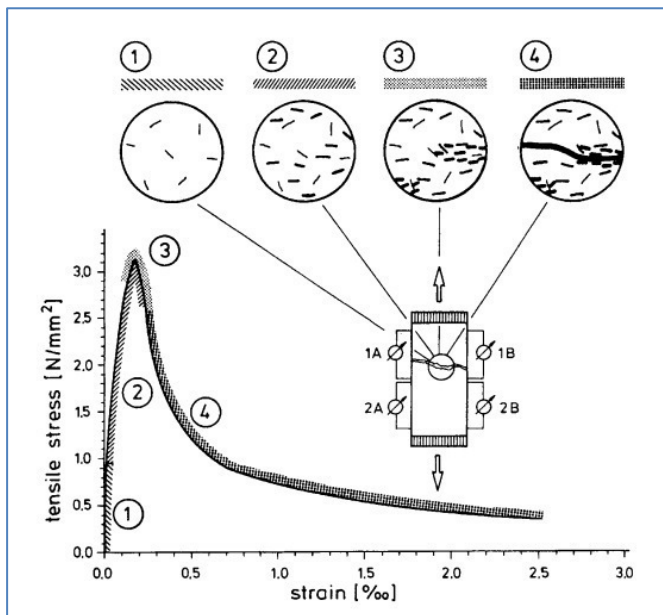


Abbildung 144 Darstellung des „strain-softening“ als Schadens- und Bruchmechanismus bei der zentrischen Zugfestigkeit von erhärtetem Beton nach [144], entnommen aus [143]

Es handelt sich um eine Entfestigung, bei der das Versagen auf einen schmalen Bereich konzentriert wird. Nach Abschluss der Bildung eines Systems von Mesorissen flacht die σ - ε -Kurve ab. Das Phänomen des „strain-softening“ - das Vermögen des Betons, auch nach Überschreiten der Festigkeit trotz steigender Verformungen noch Spannungen zu übertragen, kann mit einer Rissuferverzahnung zwischen Gesteinskörnung und Matrix erklärt werden, wie sie in Abbildung 145 schematisch bei Festbeton dargestellt ist. Die erforderlichen Kräfte entstehen aus Reibung zwischen den Rissufern. Nachdem Rissbrücken und Verzahnung langsam durchbrochen wurden, bildet sich ausgehend von einzelnen Mikrorissen ein durchgehender Makroriss, entsprechend Zone 4 in Abbildung 144. Die Anzahl der Mikrorisse, die an der Ausbildung des makroskopischen Risses beteiligt sind, wird nach Kustermann von der maximalen Größe der Gesteinskörnung bestimmt [143] und nimmt mit der Größe der Gesteinskörnung zu.

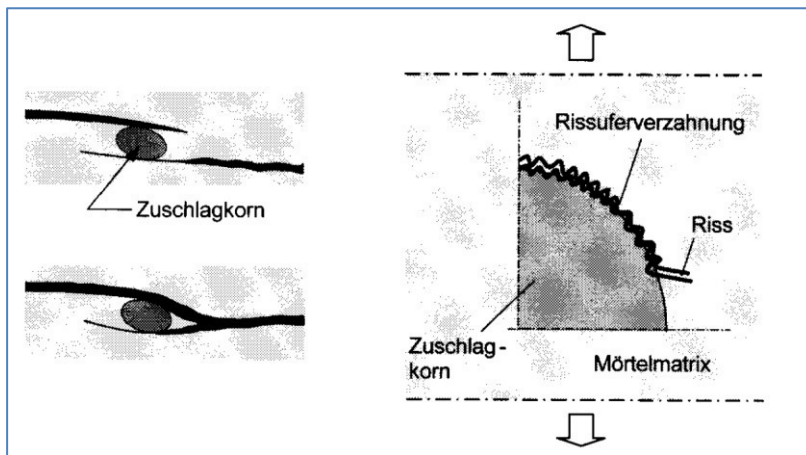


Abbildung 145: Phänomen der Rissüberbrückung bei Festbeton nach [143]

Auch bei erdfeuchten Zementleimen kann eine Erklärung für das Verhalten nach Überschreiten der maximalen Zugkraft darin bestehen, dass eine Rissuferverzahnung z.B. an größeren Partikeln entlang stattfindet. So sind bei Zementen Partikel mit einer Größe zwischen 40-80µm als grob zu betrachten und in der Unterzahl, wohingegen die meisten Partikel in einer Größe von 0,1-10 µm vorhanden sind (siehe Abbildung 51).

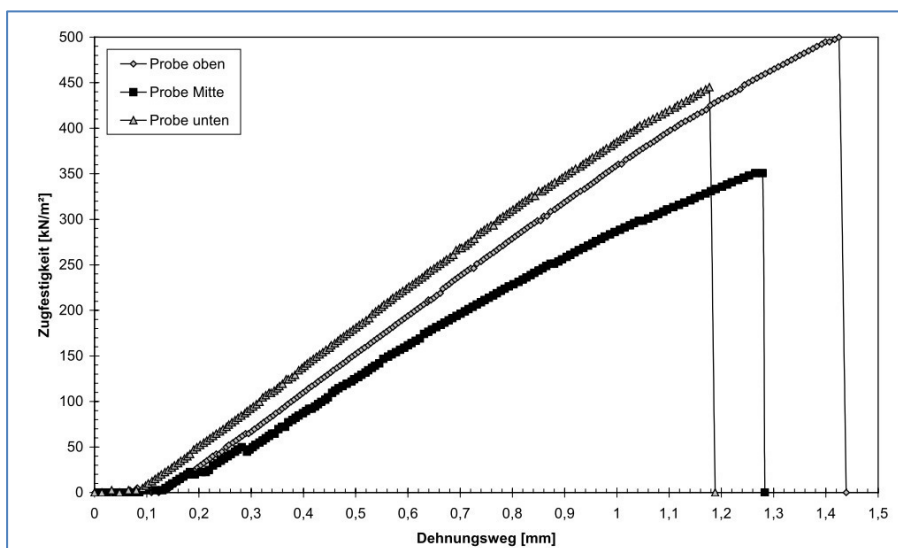


Abbildung 146: Zugfestigkeits-Dehnungsverlauf bei der Ermittlung der zentrischen Zugfestigkeit an einem Ton [123], Belastung bei konstanter Zuggeschwindigkeit von 0,001 mm/s bis zum Bruch.

Im Gegensatz zu dem Effekt des strain-softening verliefen zentrische Zugversuche an Ton bei Zeh [123] in Abbildung 146 mit einem abrupten Abfall der Zugfestigkeit, ohne dass weitere Lasten aufgenommen werden konnten. Hier wird der Unterschied der Oberflächenstruktur von Ton und von nicht hydratisiertem Zement sehr deutlich: während sich bei Zement die Rauigkeiten der Oberflächen gegenseitig verzahnen können, reißen bei Ton alle Bindungen abrupt ab, nachdem die Zugfestigkeit überschritten wurde. Abbildung 147 zeigt die plattige Form der Partikel, und glatte Oberfläche eines Kaolinit-Tones, dessen Partikel keinen Verzahnungswiderstand aufweisen [145]. Auch sind Tonpartikel deutlich anders beschaffen als Zementpartikel, Tonpartikel sind sehr plattig, ihre Dicke liegt insgesamt unter 1 µm. Die Zugkräfte lagen bei den Untersuchungen, die Zeh in Ab-

bildung 146 wiedergibt, im Mittel bei ca. $0,4 \text{ N/mm}^2$ bei einem Weg von ca. $1,3 \text{ mm}$. Damit liegen die zentrischen Zugkräfte bei Ton erheblich über denen an erdfeuchten Zementleimen in dieser Arbeit, die ca. $0,01 \text{ N/mm}^2$ betragen. Die Dehnungen sind mit $1,5 \text{ mm}$ in etwa in dem gleichen Bereich, in dem auch die Maxima der Zugkräfte der erdfeuchten Zementleimversuche liegen.

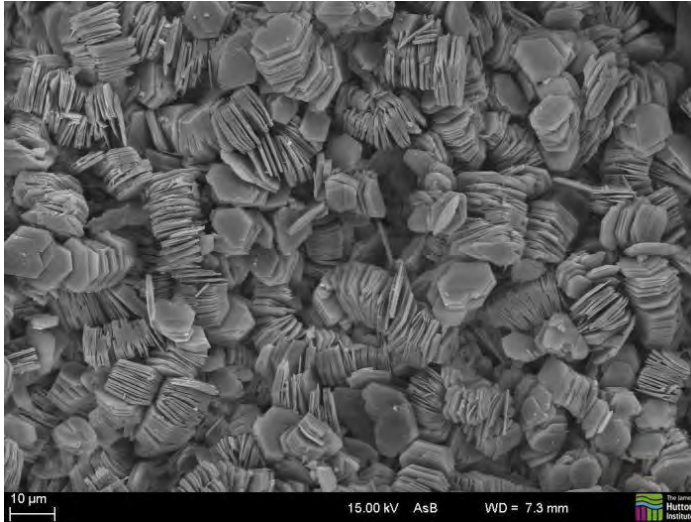


Abbildung 147: REM-Aufnahme von Kaolinit [145].

Eine qualitative Darstellung der wesentlichen Versagensarten erdfeuchter Zementleime im zentrischen Zugversuch ist in Abbildung 148 aufgeführt. Zunächst ist eine der wesentlichen Unterscheidungen die Ausprägung und der Ort der maximalen Zugkraft. Ein Teil der Versuche (Kategorie Maximum, Fall 1) weist jeweils ein deutliches und stark ausgeprägtes Maximum bei den Zugkraftverläufen auf, teils mit einer konstanten (Fall 1) oder auch mit einer veränderlichen Steigung der Geraden, sowie mit einem konstanten oder veränderlichen Abfall (Fall 2). Ein weiterer Teil (Kategorie Plateau, Fall 3) weist das Maximum als Plateau auf, teils über einen längeren Weg, dabei fällt die Kraft meistens langsamer ab und das Zugdehnungsverhalten kann als duktiler als in den Fällen 1 und 2 bezeichnet werden. Fall 4 zeigt einen typischen Verlauf, bei dem sich ein Bruch bereits beim Überschreiten des Eigengewichtes des oberen Probenteiles einstellt bzw. ein Herausgleiten der Leimprobe aus dem Probekörper erfolgt. Zugkräfte, die von der Leimmatrix aufgenommen werden können, sind nicht messbar bzw. größer als die durch Haftreibung übertragbaren Kräfte.

Bezogen auf die Resultate der Zugversuche deuten sehr abrupt abfallende Kurvenverläufe nach dem Überschreiten der maximalen Zugfestigkeit darauf hin, dass es sich um Partikel mit glatten Oberflächen handelt und einer Kubatur, die eine geringe Verzahnung der Partikel untereinander bewirkt (Fall 1). Dem entgegengesetzte Ausprägungen der Oberflächen und Partikelformen (rauer bzw. kantiger) bewirken flacher abfallenden Zugfestigkeiten mit stärker hervortretenden Effekten in Analogie der Rissuferverzahnung (Fall 2).

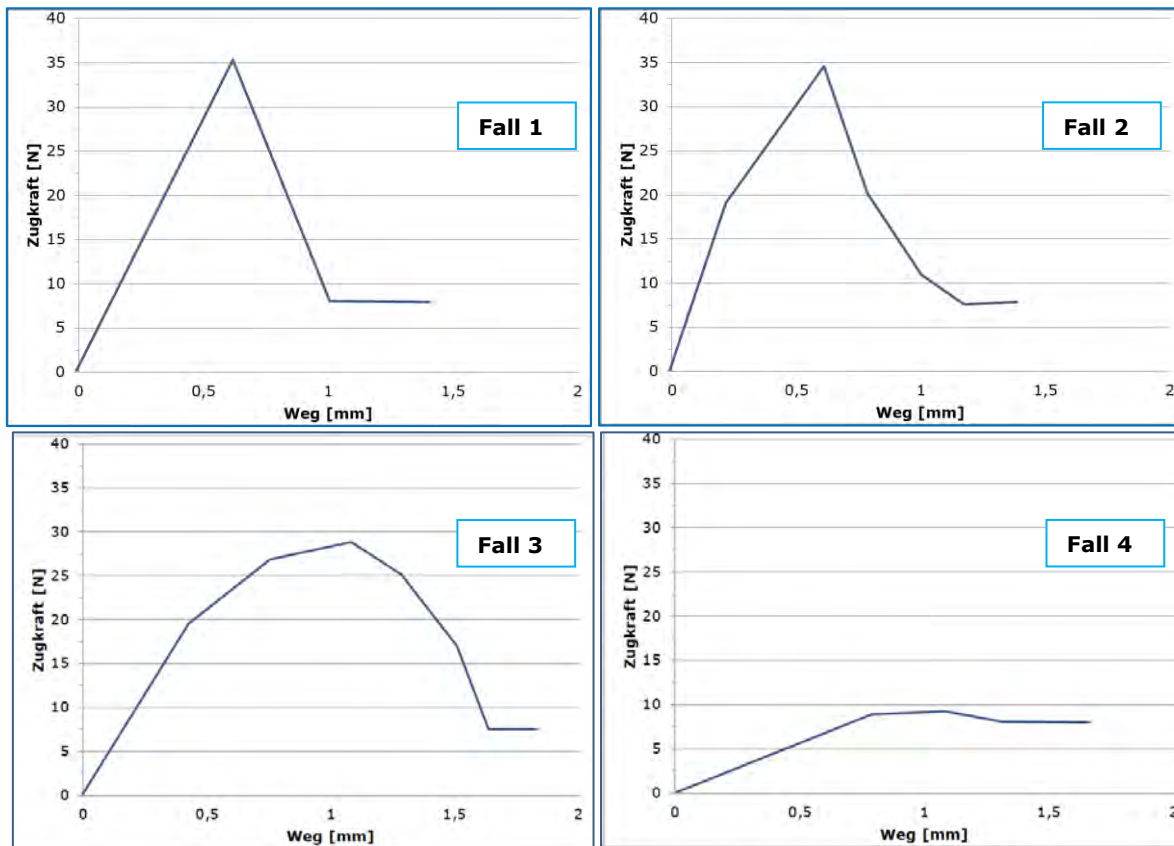


Abbildung 148: Qualitative Darstellung der Versagensarten erdfeuchter Zementleime im zentrischen Zugversuch; waagerechte Verläufe rechts der Maximalkraft entsprechen dem Eigengewicht des oberen Probekörperteilstückes (gem. Abbildung 124).

Knicke in den aufsteigenden Ästen (Fall 2 und 3) deuten auf eine Umlagerung der kraftaufnehmenden Mechanismen hin. Wie in Kap. 2.4.2 dargestellt, sind die Reichweiten der einzelnen Kräfte zwischen Partikeln unterschiedlich, sie liegen zwischen 50 nm (Van-der-Waals-Kräfte) und 500 nm (Adsorptionsfilme), bei Kapillarkräften beträgt die Reichweite ca. das doppelte der Dicke der Flüssigkeitsbrücke. Wenn die Reichweite der van-der-Waals-Kräfte oder der Adsorptionskräfte überschritten wird, dann können nur noch diejenigen Haftkräfte einen Widerstand gegen die Verformung aufbringen, die über längere Distanzen hinweg wirken können, d.h. Kapillarkräfte der Flüssigkeitsbrücken. Auch werden die kurzreichenden Kräfte früher aktiviert als die mit längerer Reichweite, die erst bei einer größeren Verformung auch einen größeren Kraftwiderstand entgegensetzen. Die Reichweiten der Kräfte werden maßgeblich durch den Kontaktabstand der Partikeloberflächen zueinander beeinflusst. Dieser wiederum hängt von der Wassermenge, d.h. der Wasserfilmdicke um die Partikel, sowie deren Rauigkeiten ab. Dadurch werden auch die Haftkräfte der Partikel aufgrund von Kapillardruck und Oberflächenspannung maßgeblich bestimmt, weil die Geometrie der Flüssigkeitsbrücken zwischen den Partikeln dadurch beeinflusst wird. Die Brückengeometrie ist abhängig von der Verteilung der vorhandenen Flüssigkeit zwischen den einzelnen Partikeln. Die Annahme von isoliert vorliegenden Brücken an den Kontaktpunkten der Partikel, in denen sich die gesamte vorhandene Flüssigkeit aufhält, erscheint aus folgenden Überlegungen nicht zutreffend:

In erdfeuchten Betonen mit z.B. $w/z = 0,35$, Gesteinskörnung = 1850 kg/m^3 , Zement = 260 kg/m^3 , Flugasche = 120 kg/m^3 liegt das feststoffbezogene Flüssigkeitsvolumen V_l/V_s (Volumen Wasser/Volumen Feststoffe, entsprechend V_l/V_s aus Abbildung 59) mit ca. 0,11 in den oberen Bereichen der in Abbildung 59 vergleichend gegenübergestellt-

ten Verhältnisse. Bezogen auf eine isolierte Flüssigkeitsbrücke liegen bei erdfeuchten Betonen relativ hohe V_l/V_s -Anteile vor. Damit ist die zu erwartende Kraft im unteren Bereich der Abbildung 59.

Der Mischvorgang bei erdfeuchten Betonen sorgt für eine homogene Durchmischung und Verteilung aller vorhandenen Ausgangsstoffe. Während der Mischphase werden Flüssigkeitsbrücken durch Relativbewegungen der Feststoffpartikel kontinuierlich gelöst und neu gebildet und das vorhandene Flüssigkeitsvolumen verteilt sich über die gesamte vorhandene Feststoffoberfläche. Feststoffe, die durch Mahlprozesse zerkleinert wurden, wie z.B. Zement oder Kalksteinmehl, weisen außerdem Mikrorisse auf [146], die bei Kontakt mit Flüssigkeit zu Kapillareffekten führen können und dadurch die Anlagerung von Flüssigkeit infolge Ladungsausgleich verstärken. Dadurch werden sämtliche Feststoffoberflächen mit Wasser umhüllt, auch in Mikrorissen und Mikrotälern (siehe Abbildung 46) sammelt.

Generell zeigten sich durch die Auswertungen der Versuche keine Zusammenhänge, die eine zielsichere Prognose der zu erwartenden Zugkräfte und oder Wege eines Leimes möglich machen.

Dennoch hat sich gezeigt, dass das Last-Verformungsverhalten, abgebildet als Kurvenverläufe, sehr unterschiedlich sein kann. Die Versuchseinrichtung ist geeignet, mit sehr geringem Aufwand Leimversuche durchzuführen und aufzuzeichnen.

Eine Feststoffkombination aus Zement bzw. Zement mit verschiedenen Zusatzstoffen kann bezogen auf den Wassergehalt daraufhin optimiert werden, dass sich ausgeprägte Bruchverläufe bei möglichst hohen Kräften und geringen Wegen einstellen. Wie auch während der gesamten Versuchsdurchführungen erkennbar war, sind manche Leime nicht prüfbar, weil sie so feucht sind, dass sie aus dem oberen Schalkkörper herausgleiten, ohne dass Kräfte gemessen werden können. Auch unter Berücksichtigung dieser phänomenologischen Beobachtungen wird je Leim bei drei bis vier unterschiedlichen Wassergehalten ein optimaler Gehalt gefunden werden können, der weder zu trocken noch zu feucht ist, und über ausgewogene Bindemechnismen von kurzer und mittlerer Reichweite verfügt. Mit diesem Wassergehalt stellt sich eine korrespondierende Oberfläche im Leim sowie eine Wasserfilmdicke je cm^2 Oberfläche ein. Erst durch das Leimverhalten bei dem jeweils optimalen Wassergehalt können dann einzelne Leime in ihren Eigenschaften untereinander verglichen werden.

4.5 Zusammenfassung der Hauptversuche

Die Ergebnisse der Hauptversuche zeigen, dass die zentrische Zugfestigkeit und das Dehnungsverhalten erdfeuchter Zementleimgemische mit dem entwickelten Prüfungsverfahren ermittelt werden können. Die Last-Verformungskurven zeigen deutliche Unterschiede. Ein Teil der Verläufe weist ausgeprägte Maxima auf, dabei verlaufen Steigung und Kraftabfall annähernd symmetrisch. Ein weiterer Teil der Versuche zeigt ein ausgeprägtes Dehnverhalten, teils bereits vor dem Auftreten der Maximalkraft, und vor allem auch noch danach. Schließlich konnte bei einem dritten Teil der Versuche keine nennenswerte Zugkraft gemessen werden, der Abriss der oberen Probekörperhälfte erfolgte bereits bei Überschreitung des Eigengewichtes.

Änderungen der w/f -Werte, bei ansonsten gleicher Feststoffzusammensetzung, führen, ebenso wie die Leimvariationen im Feststoffbereich, auch zu unterschiedlichen Last-Verformungskurven. Obwohl die Oberfläche im Leim nur in einer geringen Bandbreite variiert, unterscheiden sich die Kurvenverläufe der einzelnen Mischungen zum Teil deut-

lich. Dennoch ist die Zuordnung eines bestimmten Zementleimes zu einem Kurvenverlauf zunächst nicht eindeutig möglich. In den Untersuchungen konnten nur wenige w/f-Werte überprüft werden, weil die Gesamtanzahl der Versuche ansonsten stark zugenommen hätte. Dennoch zeigte sich, dass die Kurvenverläufe verwendet werden können, um eine bestimmte Feststoffzusammensetzung daraufhin zu überprüfen, welcher w/f-Wert die maximale Zugkraft und /oder die geringsten Wege aufweist. Hierfür müssen jedoch drei bis fünf w/f-Variationen gegenübergestellt werden.

Abschließend ist bei allen durchgeführten Versuchsreihen darauf hinzuweisen, dass die Messwerte in einem engen Wegbereich lagen, und die einstellbare Messfrequenz demgegenüber relativ grob war. Dadurch wurde der wesentliche Messbereich bis zur maximalen Zugkraft überwiegend nur durch sechs Messwerte abgebildet. Ebenso weisen einige Ergebniskurven einen plateauartigen Verlauf auf, bei dem das absolute Maximum möglicherweise nicht erfasst wurde, weil es zwischen den aufgenommenen Messwerten liegt, z.B. Abbildung 127, rote gestrichelte Kurve.

5. Optimierungsansätze für das Zugdehnungsverhalten erdfeuchter Zementleime

Bei der Auswertung der Zugversuche zeigten sich deutlich unterschiedliche Ausprägungen der Zug-Verformungs-Kurven. Im Wesentlichen bestehen Unterschiede bei dem Anstieg der Zugkraft, der maximalen Zugkraft und dem zugehörigen Weg sowie bei dem Verlauf nach dem Erreichen des Maximums.

Für eine Optimierung sind Leimeigenschaften auszuwählen, von denen bei einer Anwendung in einer tatsächlichen Produktion davon ausgegangen werden kann, dass sie Vorteile mit sich bringen. Ein Vorteil im Falle der überwiegend horizontalen Betonwarenproduktion ist das Vermeiden von Anhaftungen an den Auflaststempeln. Nachdem die Auflaststempel den Beton unter Vibration und Auflast verdichtet haben, fährt zunächst die Kastenform hoch, danach werden die Stempel mit hoher Geschwindigkeit von der frischen Oberfläche gelöst und hochgefahren.

Bei der vertikalen Fertigung von stehenden Beton- und Stahlbetonrohren mit zwei bis drei Meter Länge muss der frische erdfeuchte Beton den Haftkräften der nach oben weggleitenden Stahlform standhalten können, ohne dabei in der Form haften zu bleiben.

Für beide Produktionsverfahren gilt, dass der Zusammenhalt der verdichteten, erdfeuchten Frischbetonmatrix bereits gegenüber sehr kleinen Verschiebungen sehr stark sein muss, da ansonsten ein Zugbruch stattfindet und die hergestellten Produkte fehlerhaft sind. Daher muss die maximale Zugkraft bereits bei sehr geringen Verschiebungen vollständig aktiviert werden können. Im Falle der Rohrproduktion kann es günstig sein, wenn die maximale Zugkraft nicht schlagartig abfällt, sondern das Materialverhalten eine langsam abfallende Resttragfähigkeit aufweist, weil die Gesamtdehnungen bezogen auf die Baulänge größer sind als bei Betonpflastersteinen. Auch ist bekannt, dass frisch produzierte Rohre sich in der Baulänge um bis zu fünf Zentimeter verkürzen können in der Zeit, die zwischen dem Ende des Produktionszyklus und dem senkrechten Transport zum Aushärtelagerplatz liegt, dies ist ein Zeitraum von ca. zwei Minuten.

Weiterhin ist es günstig, wenn hohe Verdichtungsgrade erreicht werden können. Im Frischbeton liegt der Vorteil darin, dass es sich um Mischungen handelt, die mit geringem Energieaufwand verdichtet und verarbeitet werden können. Im Festbeton ist eine hohe Dichte optimal für Eigenschaften der Wasserdichtheit bei Rohren bzw. dem Frost-Taumittelwiderstand bei Betonpflastersteinen.

Somit sind Rezepturen, die bei hohen Verdichtungsgraden hohe Zugkräfte bei geringen Dehnungen aufweisen, optimaler als Rezepturen mit niedrigen Verdichtungsgraden, niedrigen Zugkräften oder hohen Dehnungen.

5.1 Mögliche Parameter

Die für erdfeuchte, frische Betonprodukte maßgebende Festigkeit hängt vom Herstellverfahren und der Produktgeometrie ab. Kann sich die frische Betonmatrix verformen, wirken Schubspannungen und die Scherfestigkeit ist die maßgebliche Festigkeitsgröße. Bricht die Betonmatrix spröde, sind Zugspannungen bruchauslösend und die Zugfestigkeit ist maßgeblich [119].

Die Leimmatrix der frischen Produkte sollte eine hohe Zugfestigkeit aufweisen bei nur sehr geringen Wegen. Wenn die maximale Zugfestigkeit erst bei einem langen Weg von z.B. 2 mm aktiviert wird, dann ist zu vermuten, dass es eher zu Ablösungen aus der Matrix kommt als wenn bereits bei sehr geringen Wegen hohe Kräfte aufgenommen werden können.

Eine zu optimierende Leimeigenschaft kann also darin bestehen, bei einem Weg von z.B. 0,5 mm eine höchstmögliche Zugkraft zu aktivieren.

Diese Eigenschaft kann als Zug-Dehnungsmodul bezeichnet werden, der anhand der durchgeführten Versuche als $Z_{0,6}$ ausgewertet werden kann. Dabei ist der Weg von 0,6 mm der Frequenz der Messwertaufnahme geschuldet, mit der die Messzelle eingestellt werden konnte.

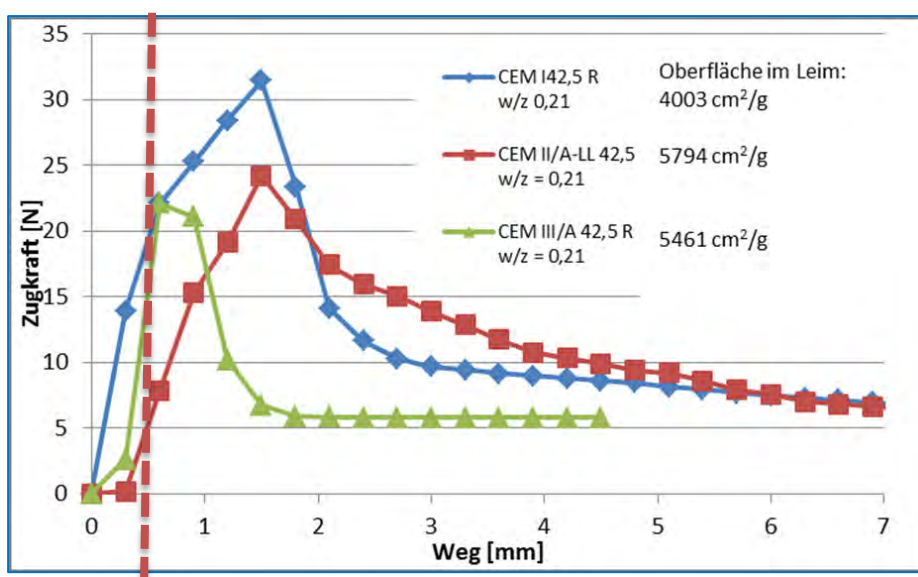


Abbildung 149: Abbildung 128 mit gestrichelter Linie bei 0,6 mm Weg

Anhand der in Abbildung 149 eingefügten Linie bei 0,6 mm Verformung ist zu erkennen, dass $Z_{0,6}$ bei zwei Kurven identisch ist, obwohl sich die maximalen Zugkräfte deutlich unterscheiden. In diesem Fall ist die Rezeptur mit CEM III (grüne Linie) mit einer hohen Zugkraft, die zugleich das Maximum bei einem geringen Weg darstellt, für Betonpflastersteine besser geeignet als mit CEM II (rote Linie). Der Zugdehnmodul bei CEM II ist weniger als halb so groß bei vergleichbar hoher Zugfestigkeit. Die Rezeptur mit CEM I (blaue Linie) weist bei geringen Wegen keinen Vorteil auf gegenüber CEM III, da ihre deutlich höhere maximale Zugkraft erst bei größeren Wegen erreicht wird. In der Praxis kann dieses höhere Maximum erst dann erreicht werden, wenn auch höhere Wege auftreten, z.B. bei der Rohrproduktion, wobei auch dort eine maximale Zugkraft bei geringeren Wegen vorteilhafter ist, um die beschriebenen Verformungen nach dem Produktionsprozess zu verhindern.

Weiterhin ist es für die Festbetoneigenschaften der erhärteten Erzeugnisse gut, einen möglichst hohen Wassergehalt in der frischen Rezeptur aufzuweisen. Weil sofort entschaltete Betonprodukte in einem w/z-Wert-Bereich von 0,32 – 0,38 hergestellt werden, steht für eine ausreichende Hydratation zum Teil zu wenig Wasser zur Verfügung. Dieser Effekt wirkt sich unmittelbar auf alle relevanten Festbetoneigenschaften wie Spaltzug, Biegezug, Frost-/ Taumittelbeständigkeit aus.

Bezogen auf die in dieser Arbeit diskutierten Kenngröße des Wasser-Feststoffverhältnisses ist es also eine Optimierung, eine frühe Zugfestigkeit bei möglichst hohem Wassergehalt, d.h. hohem w/f-Wert, zu erzielen.

Ebenfalls kann es bereits als Optimierung angesehen werden, wenn die Ergebnisse über denen des Leimes mit CEM I 42,5 R liegen, da dieser Leim bereits gute Resultate aufweist und in der Praxis entweder alleine als CEM I 42,5 R in erdfeuchten Betonrezepturen verwendet wird oder zusammen mit Flugasche.

Zusammenfassend sind folgende Parameter als optimal zu betrachten, wenn sie gemeinsam auftreten:

1. Hohe Zugkraft bei geringen Wegen
2. Maximale Zugkraft bei geringen Wegen
3. Hoher Verdichtungsgrad
4. Hoher w/f-Wert

5.2 Auswertung der Laborergebnisse

Anhand der vorgestellten Versuchsergebnisse wird überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen den Kenngrößen der Oberfläche, Wasserfilmdicke, dem Verdichtungsgrad und der Zugfestigkeit sowie den Bruchwegen erkennbar ist.

Abbildung 150 zeigt, dass trotz der vergleichsweise behelfsmäßigen, jedoch immer gleich praktizierten, Art der Verdichtung mit Hilfe eines Stößels und Hammers, die Verdichtungsgrade alle über 90 % liegen. Höher als 98 % lassen sich nur wenige Leime verdichten. Ein Zusammenhang zwischen Verdichtungsgraden und der Oberfläche im Leim ist nicht erkennbar. Leime mit hohen Oberflächen liegen ebenso zwischen 91 und 98 % Verdichtungsgraden wie Leime in den unteren Oberflächenbereichen.

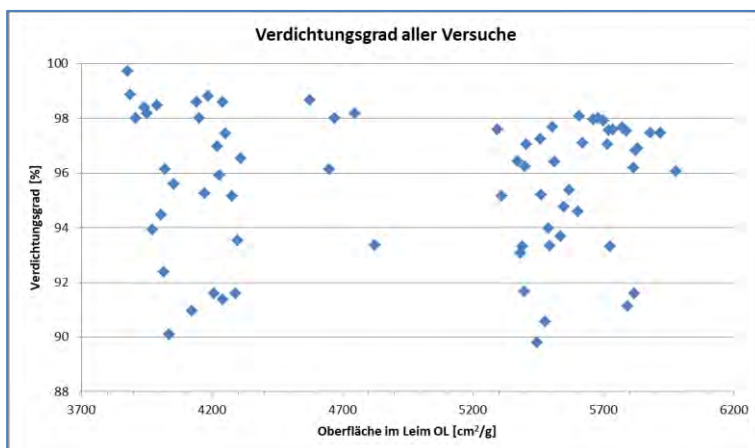


Abbildung 150: erreichte Verdichtungsgrade in Abhängigkeit der Oberfläche im Leim

In dieser Darstellung ist nicht berücksichtigt, dass die auf der x-Achse aufgetragene Oberfläche im Leim einen rechnerischen Verdichtungsgrad von 100 % voraussetzt. Somit ist, wenn der Verdichtungsgrad lediglich 95 % beträgt, OL um 5 % zu reduzieren, da diese 5 % kein Feststoff, sondern Verdichtungsporen, d.h. Luft sind.

Zwischen den maximalen Zugkräften und den Verdichtungsgraden besteht ebenfalls kein Zusammenhang, siehe Abbildung 151. Hohe Zugkräfte werden bei Verdichtungsgraden von 91 % ebenso gemessen wie bei 98 %.

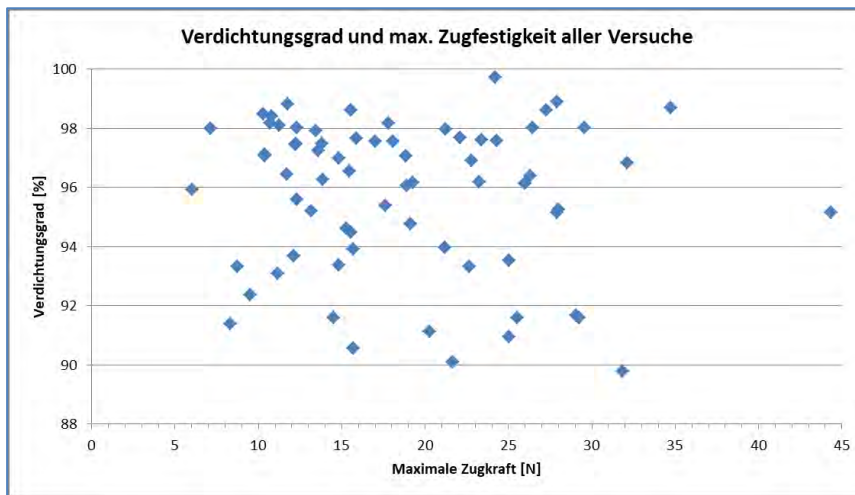


Abbildung 151: maximalen Zugkräfte in Abhängigkeit der erreichten Verdichtungsgrade

Ein hoher Verdichtungsgrad ist daher keine Voraussetzung für hohe maximale Zugkräfte. Außerdem führen Leime mit einem höheren w/f-Wert eher zu hohen Verdichtungsgraden als trockenere. Jedoch ist gerade bei den feuchteren Leimgemischen häufig ein duktileres Verhalten zu beobachten, das auf Gleiterscheinungen entlang der Wandungen hindeutet und zu geringeren Zugkräften führt.

Der in Abbildung 86 dargestellte Zusammenhang, der einen annähernd linearen Festigkeitsabfall um die Hälfte bei sehr geringen Unterschieden im Verdichtungsgrad von ca. 2% darstellt, basiert auf nur sechs Versuchen bei der fehleranfälligen Versuchsaufbauvariante 1 und einer Rezeptur, bei der lediglich der w/f-Wert variiert wurde. Angesichts der in Abbildung 151 dargestellten Resultate, die auf deutlich mehr Versuchen hervorgegangen sind, und die keinen erkennbaren Zusammenhang belegen, kann die Darstellung in Abbildung 86 jedoch nicht mehr als allgemein gültiger Zusammenhang bestätigt werden.

Der Verdichtungsgrad bei erdfeuchtem Leim hat zudem eine andere Bedeutung als z.B. im Grundbau. Wierig stellte Analogien zu den Proctorkurven aus dem Grundbau auf. Erdfeuchte Betone und Leime stellen generell disperse Partikelsysteme dar, die ungesättigt sind. Es ist immer auch Luft in den Systemen enthalten, damit die Flüssigkeitsbrücken an den Oberflächen der Partikel Haftkräfte ausüben können. Ohne Luft wäre der Verdichtungsgrad bei 100 % bzw. zumindestens sehr hoch in Bereichen von 99-100 %. Gleichzeitig fallen die kapillaren Bindemechanismen dann jedoch aus, weil sich keine Menisken ausbilden können aufgrund fehlender Luft an den Grenzflächen. Auch die weiteren Bindemechanismen der Adsorptionsfilme und der van-der-Waals-Kräfte können dann nicht mehr wirken, weil die hohen Wassergehalte zu größeren Partikelabständen führen. Daher handelt es sich bei erdfeuchten Zementleimen und Betonen generell um ungesättigte Systeme. Genau der Grenzbereich zum Übergang in ein solches System wird bei der Projektierung von Selbstverdichtenden Betonen durch den Punkte-Versuch und den Beta-P-Wert angenähert, siehe hierzu Kap.3.3. Im erdfeuchten, ungesättigten Bereichen müssen daher die Verdichtungsgrade zwangsläufig geringer sein, weil keine Sättigung der Gesamtporen in der Matrix existieren kann.

Ausgehend von den dargestellten Kontaktgeometrien kugeligter Partikel in Kap. 2.4.2 kann der erforderliche Luftgehalt, der vorhanden sein muss, um die kapillaren Kraftmechanismen einer Flüssigkeitsbrücke vollständig zu aktivieren, überschlägig berechnet werden. Das Wasserfilmvolumen errechnet sich dabei aus der Volumendifferenz der Partikel mit Wasserfilm und ohne Wasserfilm. Für den Kontaktfall zweier Partikel mit jeweils

10 µm Durchmesser und einem massenbezogenen w/f-Verhältnis von 0,20 liegt der erforderliche Luftgehalt bei ca. 2 Vol.-%. Wenn weniger Luft vorhanden ist, verringert sich die Kontaktzone Wasser-Luft entlang des Wassermeniskus und die Haftkraft infolge kapillarer Wirkung der Flüssigkeitsbrücke nimmt ab. Höhere Luftvolumina führen nicht zu einer Erhöhung der Haftkraft, weil nicht mehr Luft für die Ausbildung der Kontaktzone benötigt wird. Eine Luftzunahme über die erforderlichen 2 Vol.-% hinaus verringert die Packungsdichte und damit die Partikelbindungen je Volumeneinheit.

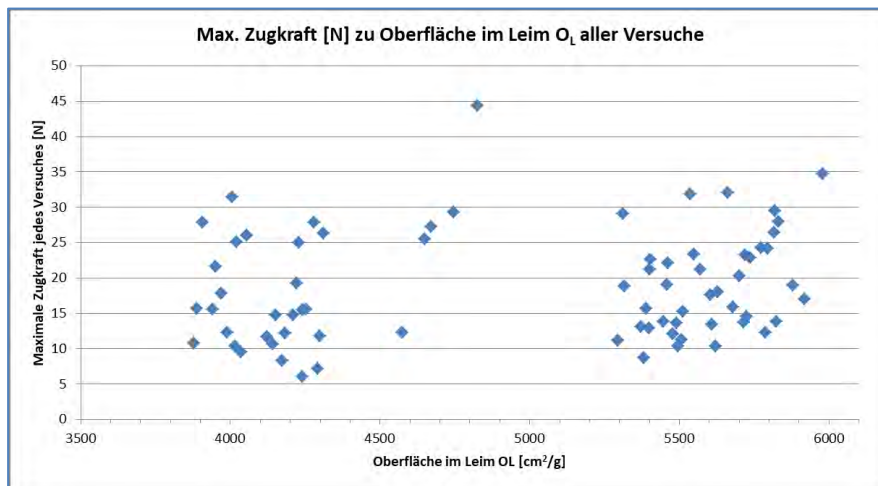


Abbildung 152: Maximalwerte der Zugkraft aller Versuche bei der jeweiligen Oberfläche im Leim

In Abbildung 99 war bereits erkennbar, dass die Versuche überwiegend in den Bereichen der Leimoberflächen von 3.900 bis 4.300 und von 5.300 bis 5.900 cm²/g durchgeführt wurden. Diese Verteilung der beiden Bereiche findet sich auch in anderen Darstellungsbereichen wieder, wie z.B. in Abbildung 152.

Es ist daran erkennbar, dass ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der maximalen Zugkraft und der Oberfläche im Leim nicht existiert. Die Punkte streuen in den genannten Bereichen erheblich. Es zeigt sich lediglich, dass nur sehr wenige Werte oberhalb von 30 N liegen. Werte der Zugfestigkeiten unter 10 N deuten auf ein duktilen Bruchbild hin, siehe auch Abbildung 158. Innerhalb dieses Korridors von 10 N bis 30 N befinden sich ca. 90 % der Resultate.

Der Bruchweg bei maximaler Zugkraft, der in Abbildung 153 der Oberfläche im Leim gegenübergestellt ist, zeigt ebenfalls nur generelle Tendenzen. So ist er bei ca. 80 % aller Versuche geringer als 2 mm und nur in Ausnahmen größer als 4 mm.

Jedoch ist die Oberfläche im Leim keine Größe, aus der sich eine Prognose über den zu erwartenden Bruchweg ableiten lässt.

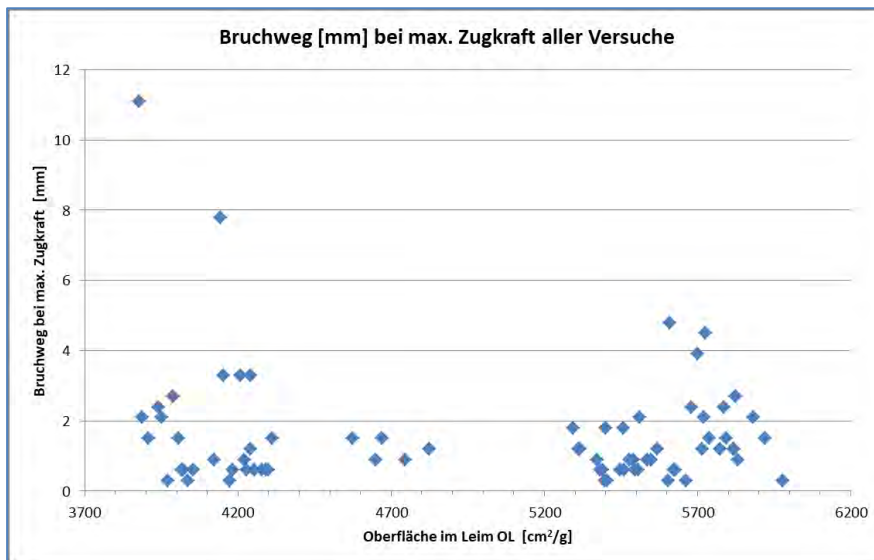


Abbildung 153: Bruchweg bei maximaler Zugkraft aller Versuche in Abhängigkeit der Oberfläche im Leim

Ähnlich verhält es sich bei der Wasserfilmdicke in Abbildung 154. Der bereits genannte Bereich, in dem sich alle maximalen Zugfestigkeiten befinden, ist auch hier erkennbar. Darüber hinaus ist ein leichter Schwerpunkt der Werte in dem Bereich von 0,30 bis 0,35 μm erkennbar. Als alleinige Prognosegröße für die maximale Zugfestigkeit ist die Wasserfilmdicke jedoch zu gering mit der Zugfestigkeit korrelierend.

Ein Zusammenhang mit einer guten Übereinstimmung besteht auch nicht zwischen den Bruchwegen und den Maximalkräften wie sie in Abbildung 155 dargestellt sind.

In Abbildung 156 ist die Bruchkraft bei dem kurzen Weg von 0,6 mm gegen die Oberfläche im Leim aufgetragen, doch auch hierbei ist kein eindeutiger Zusammenhang zu erkennen.

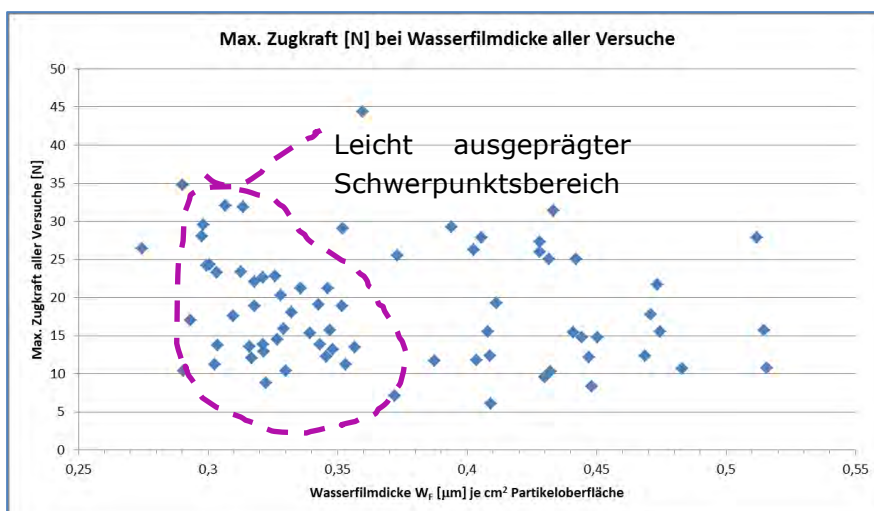


Abbildung 154: Maximale Zugkraft aller Versuche in Abhängigkeit der Wasserfilmdicke

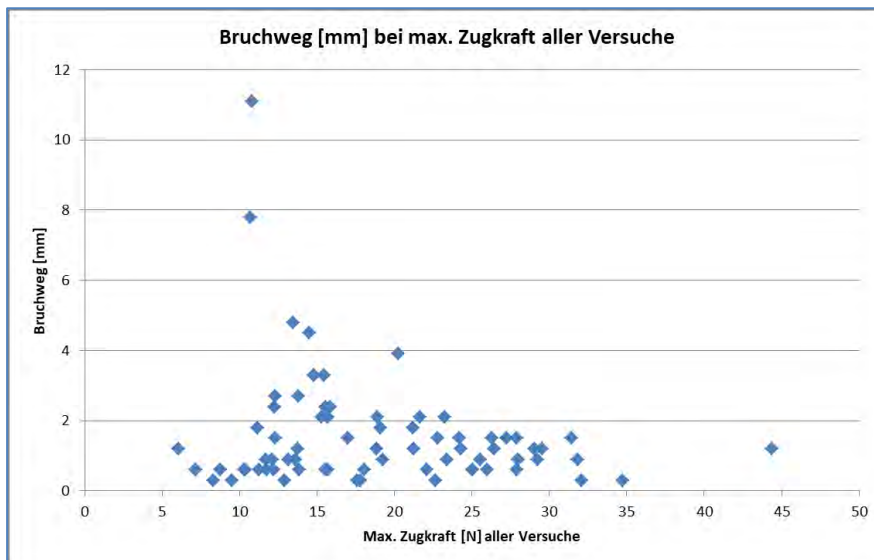


Abbildung 155: Bruchwege aller Versuche in Abhängigkeit der max. Zugkraft

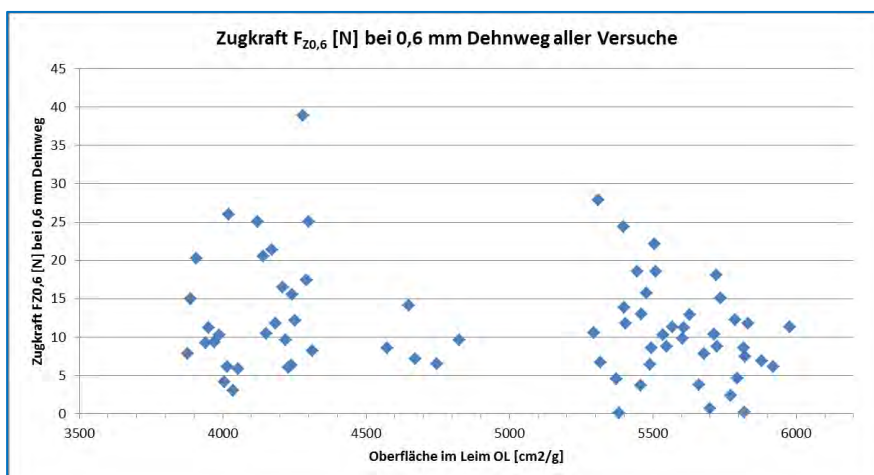


Abbildung 156: Zugkraft $F_{20,6}$ bei 0,6 mm Weg in Abhängigkeit der Oberfläche im Leim

Ob bei einzelnen Versuchen ein Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung der Leime, der w/f-Werte, den Kurvenverläufen oder den hier genannten Parametern besteht, lässt sich anhand der vorgestellten Grafiken nicht erkennen.

Daher folgt ergänzend eine Analyse der Versuchsdaten mit Hilfe der Tabellenfunktionen von Excel. Über die Sortier- und Suchfunktion wurden für die Zugkraft die jeweils fünf höchsten Werte herausgesucht um zu prüfen, ob anhand der Zusammensetzung Tendenzen zu erkennen sind, sowie die Rezepturen mit den fünf niedrigsten Werten (Abbildung 157 und Abbildung 158).

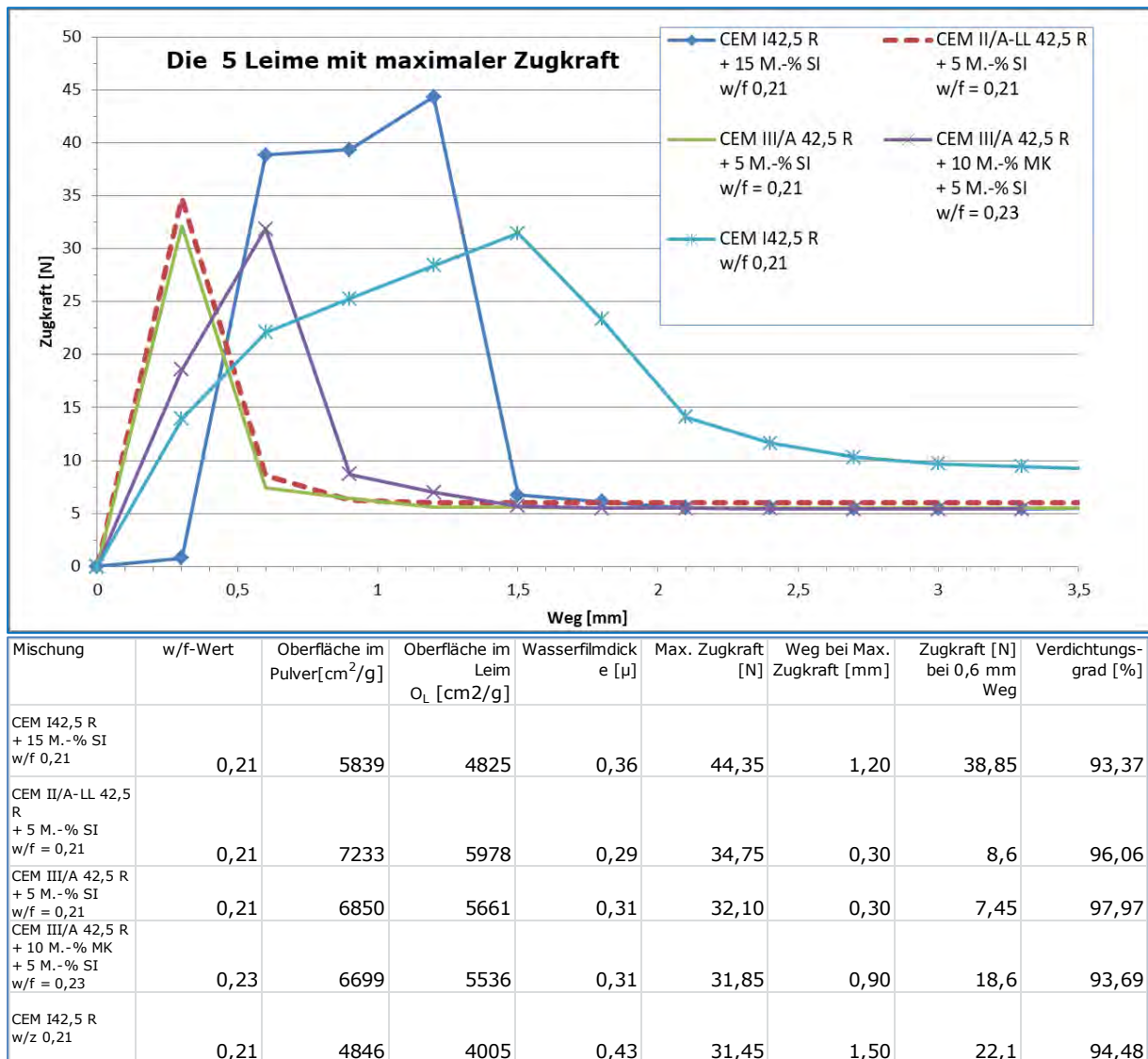


Abbildung 157: Verläufe und Kenndaten der Rezepturen mit den fünf höchsten maximalen Zugkräften

Hier zeigt sich, dass vier Leime einen w/f-Wert von 0,21 aufweisen, davon drei unter Zugabe von Mikrosilika. Alle drei Leime versagen gem. Fall 1. Bei Verwendung von Metakaolin in Verbindung mit Mikrosilika beträgt der w/f-Wert 0,23 (Fall 2). Alle fünf Kurven weisen nach dem Erreichen der Höchstkraft einen deutlichen Abfall auf, d.h. der Bruch hat in der Matrix ohne Kraftumlagerung stattgefunden. CEM II und CEM III mit jeweils 5 % Mikrosilika erreichen die Maximallast bei so geringem Weg, dass die Zugkraft bei 0,6 mm Weg bereits wieder deutlich gesunken ist. In diesem Vergleich ist der reine CEM I-Leim mit w/z=0,21 deutlich in der Versagensart Fall 3.

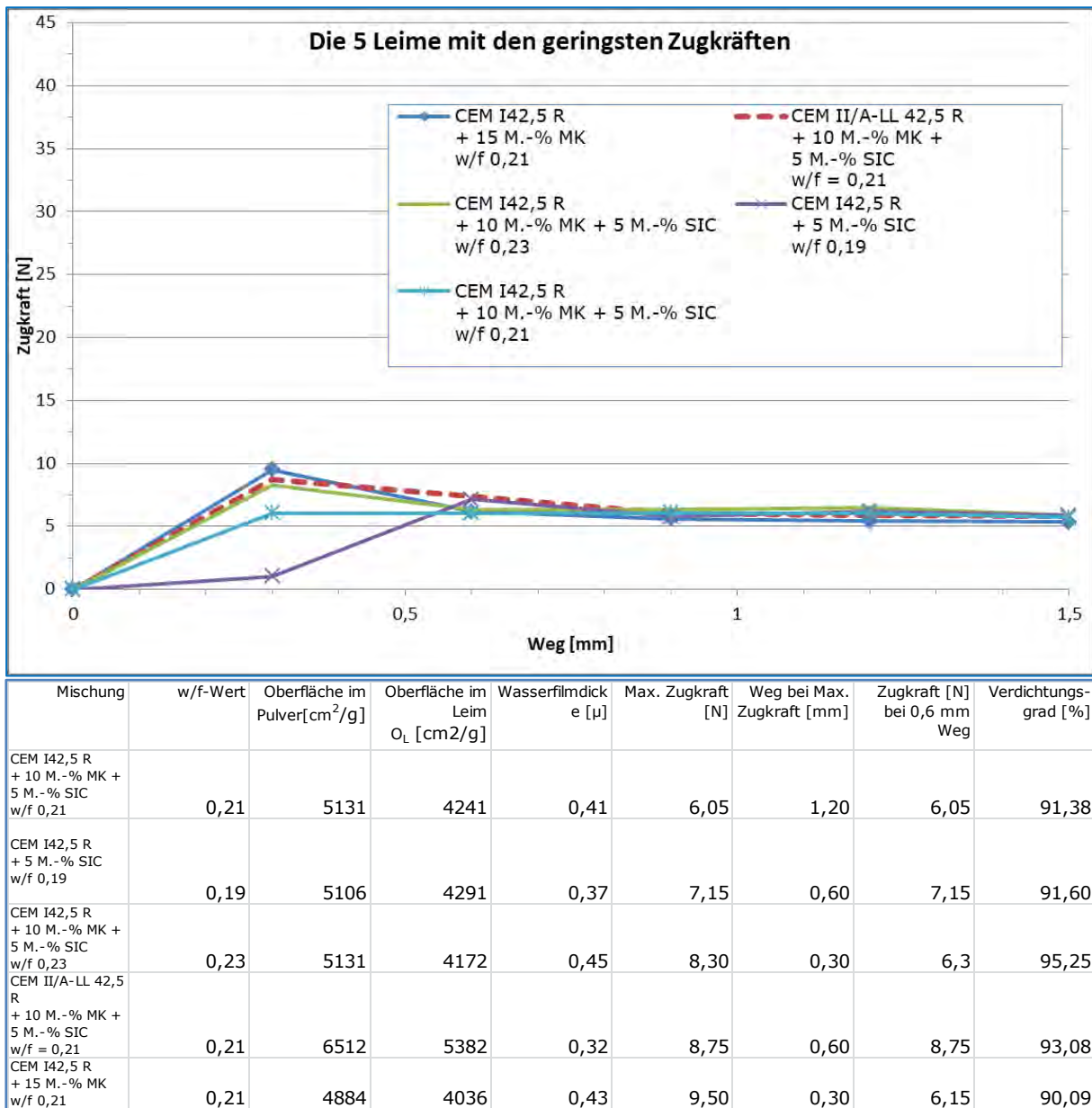


Abbildung 158: Verläufe und Kenndaten der Rezepturen mit den fünf niedrigsten Werten der Max. Zugkraft

Alle Kurven in Abbildung 158 verlaufen sehr flach ohne ausgeprägte Maxima, die Absolutwerte der Zugfestigkeit sind sehr gering. Das Versagen tritt unmittelbar nach Überschreiten des Eigengewichtes des oberen Probekörperteiles auf (Fall 4). Alle fünf Leime wurde mit Siliziumcarbid oder Metakaolin bzw. Kombinationen beider Stoffe hergestellt. Der Vergleich der Kenndaten der zehn Leime bestätigt, dass eine Zuordnung der Leime anhand der tabellierten Parameter (w/f-Werte, Oberflächen, Wasserfilmdicken und Verdichtungsgrade) nicht möglich ist.

Jedoch fällt bei der Gegenüberstellung der jeweiligen fünf Leime aus der Abbildung 157 und Abbildung 158 auf, dass die Leime innerhalb einer Gruppe jeweils Ähnlichkeiten in der Zusammensetzung aufweisen und sich deutlich von der jeweils anderen Gruppe unterscheiden.

Metakaolin und Siliziumcarbid sind beide extrem kantig und gebrochen. Die Mikrostruktur des Metakaolin ist offen und porös, die Partikel wirken in der REM-Darstellung schichtig und zweidimensional-plattig. SiC hat extrem glatte Oberflächen und sehr scharfe Ränder.

Eine Verzahnung der SiC-Partikeloberfläche mit Zement ist daher nur sehr schwierig im Vergleich zu Metakaolin. Demgegenüber sind die Leime der maximalen Zugkräfte mit Mikrosilika (in einem Fall in Kombination mit Metakaolin) hergestellt bzw. ohne Zusatzstoffe. In der Maximalgruppe sind alle drei verwendeten Zemente vertreten, wohingegen in der Minimalgruppe CEM I dominiert und CEM III gar nicht vertreten ist.

Auch sind die Kurvenverläufe innerhalb beider Gruppen klar unterschiedlich. Maximale Zugkräfte weisen Verläufe der Fälle 1, 2 und 3 gem. Abbildung 148 auf, minimale Zugkräfte verlaufen alle entsprechend Fall 4.

Abbildung 159 und Abbildung 160 zeigen die Sortierungen der Leime mit den höchsten bzw. den niedrigsten Zugkräften bei 0,6 mm Weg.

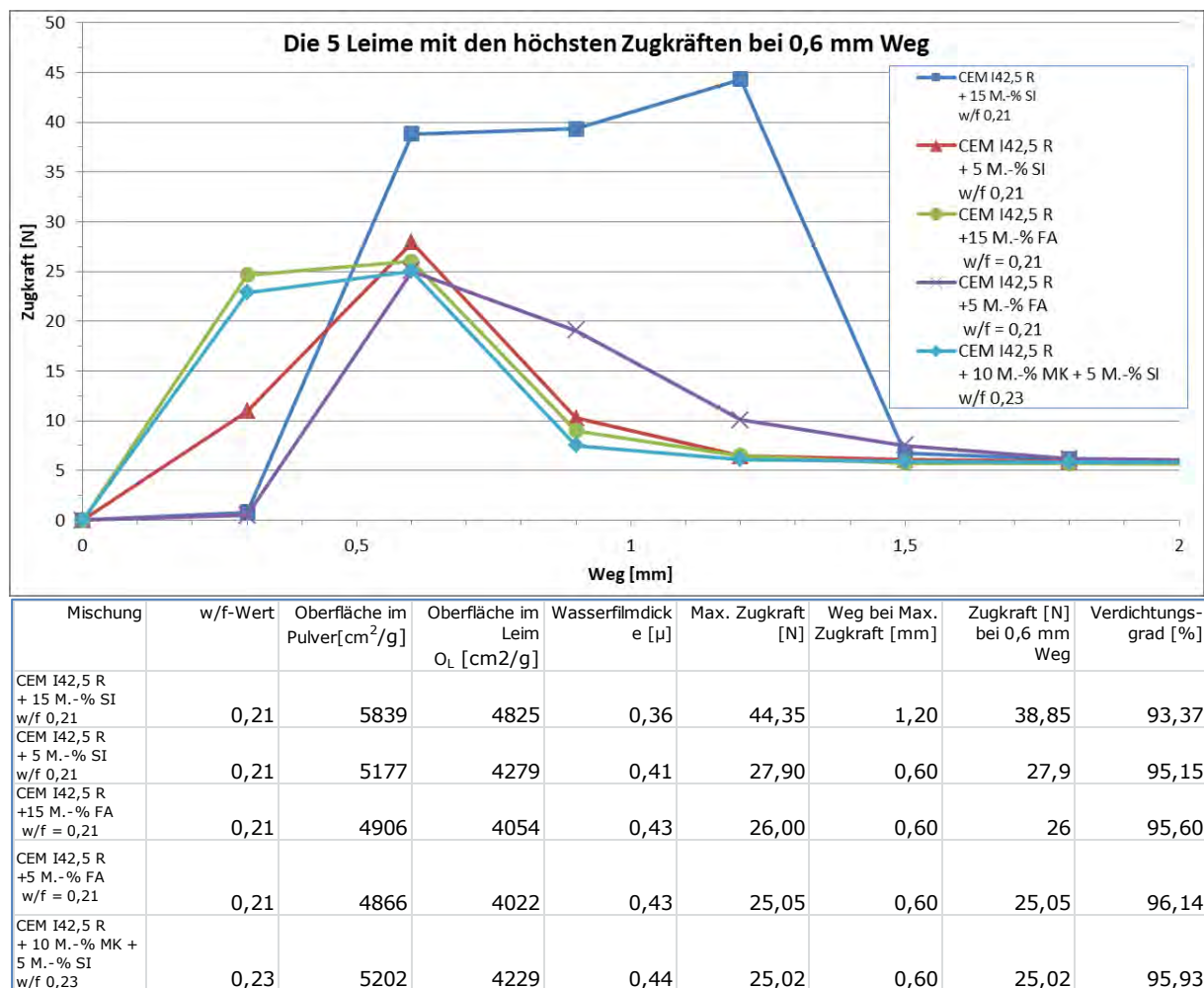


Abbildung 159: Verläufe und Kenndaten der Rezepturen mit den höchsten Zugkräften bei 0,6 mm Weg

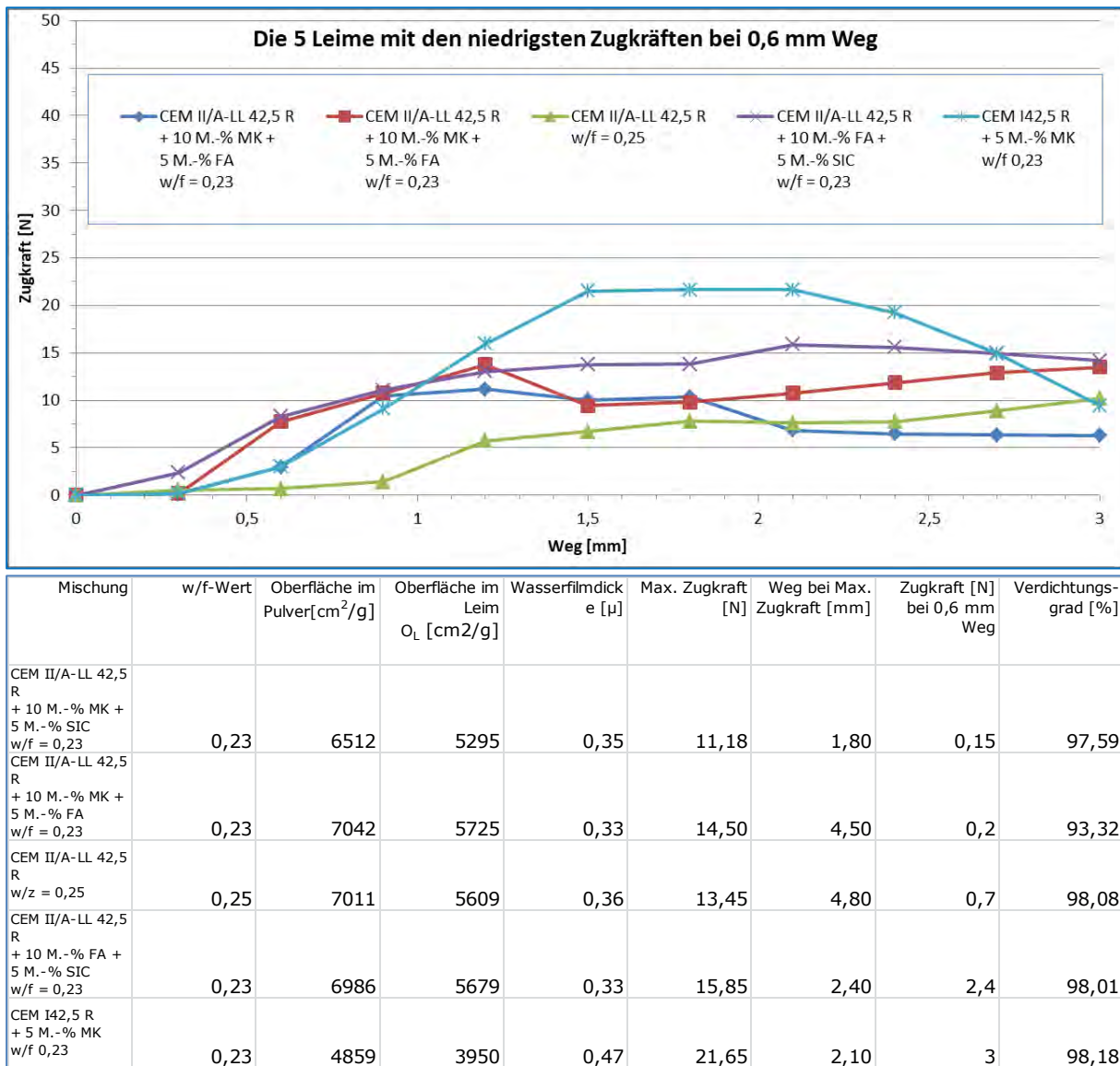


Abbildung 160: Verläufe und Kenndaten der Rezepturen mit den fünf niedrigsten Zugkräften bei 0,6 mm Weg

Auch bei dieser Gegenüberstellung bestehen erkennbare Unterschiede lediglich in der Zusammensetzung innerhalb der beiden Gruppen. In der Minimalgruppe zeigen alle fünf Kurven duktile Verläufe mit sehr langen Wegen, die w/f-Werte liegen alle bei 0,23 bzw. 0,25 und damit deutlich höher als in der Maximalgruppe. In drei Fällen handelt es sich um Rezepturen mit zwei Zusatzstoffen, darunter Metakaolin (einzeln oder in Kombination mit FA bzw. SiC). Mit einer Ausnahme sind die Verdichtungsgrade zwischen 97,6 und 98,2. Im Vergleich zu Abbildung 157 zeigt sich, dass diese höheren Verdichtungsgrade nicht zu hohen Zugkräften führen. Auch zeigen die Kurven einen stark verspäteten Kraftanstieg, der ausgeprägter ist als bei der Minimalgruppe der Abbildung 158, jedoch ebenfalls zu Fall 4 zählt. Weil die einzelnen Partikelbindungen keine derart großen Wege überbrücken können, ohne dass die Partikel die Bindung zueinander verlieren, werden hierbei Gleiteffekte entlang der Wandung der Probekörper ursächlich für die große Wege sein, bevor dann ein Bruch eintritt. Hierfür sprechen auch die hohen w/z-Werte, die für insgesamt feuchtere Leime und damit erhöhte Gleiteffekte sorgen. Die Maximalgruppe weist ebenfalls stark ähnliche Verläufe auf, die überwiegend den Fällen 1 und 2 entsprechen.

Auffällig ist, dass alle fünf Leime mit CEM I hergestellt wurden, in Verbindung mit Mikrosilika bzw. Flugasche (in einem Fall in Kombination von Mikrosilika und Metakaolin).

Bei einer Sortierung nach den Leimen mit den geringsten Wegen bei maximaler Zugkraft ist CEM I innerhalb der ersten zwölf Plätze mit jeweils einem Weg von 0,3 mm nur dreimal vertreten, dabei mit Zugkräften im Bereich von 8-9 N. Die ersten fünf Plätze werden belegt von den Zementen CEM II und CEM III jeweils in Verbindung mit Mikrosilika, Metakaolin bzw. Siliziumcarbid.

Die letzte Gegenüberstellung in der Abbildung 161 und Abbildung 162 enthält die maximalen und die minimalen Verdichtungsgrade.

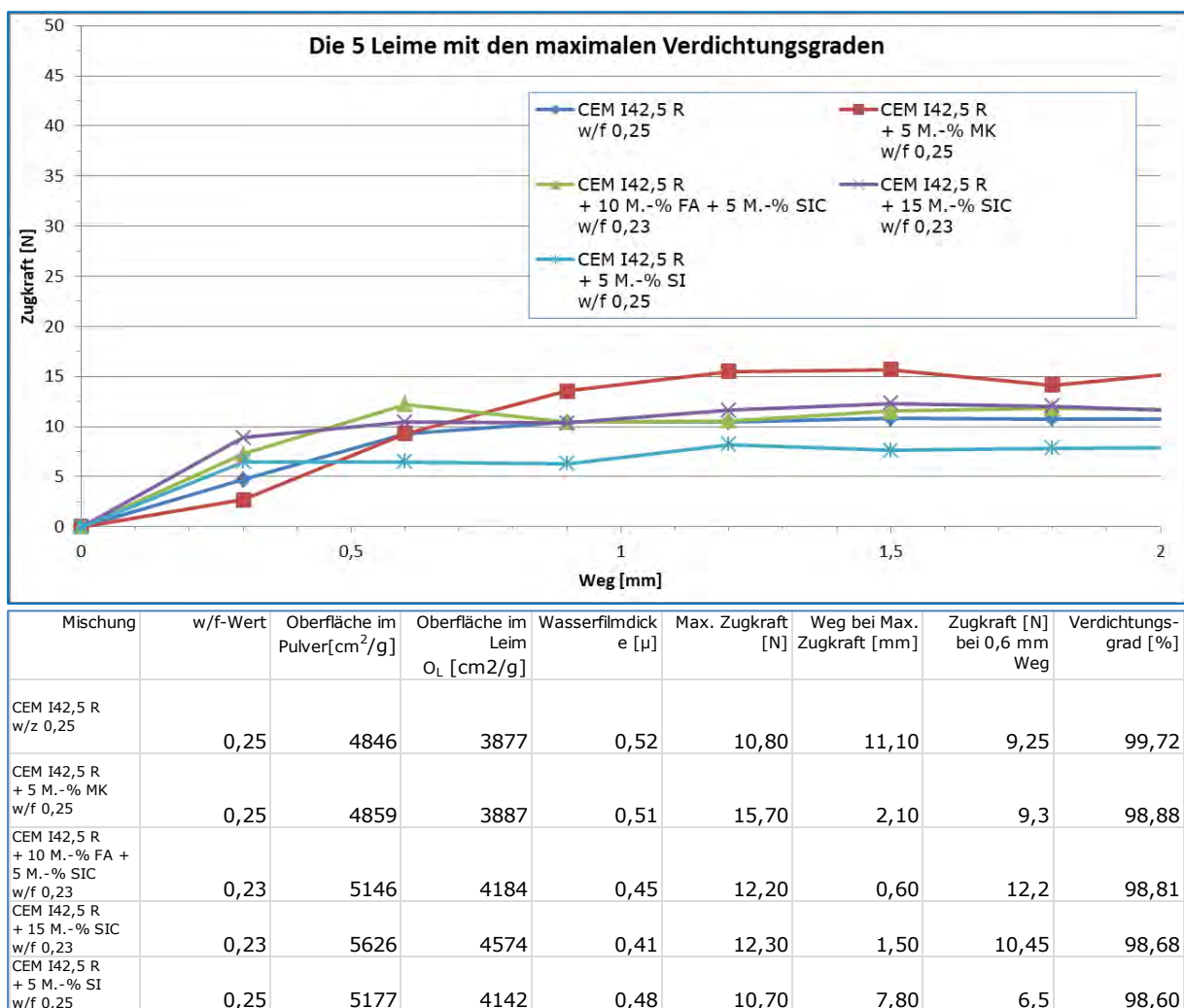


Abbildung 161: Verläufe und Kenndaten der Rezepturen mit den fünf maximalen Verdichtungsgraden

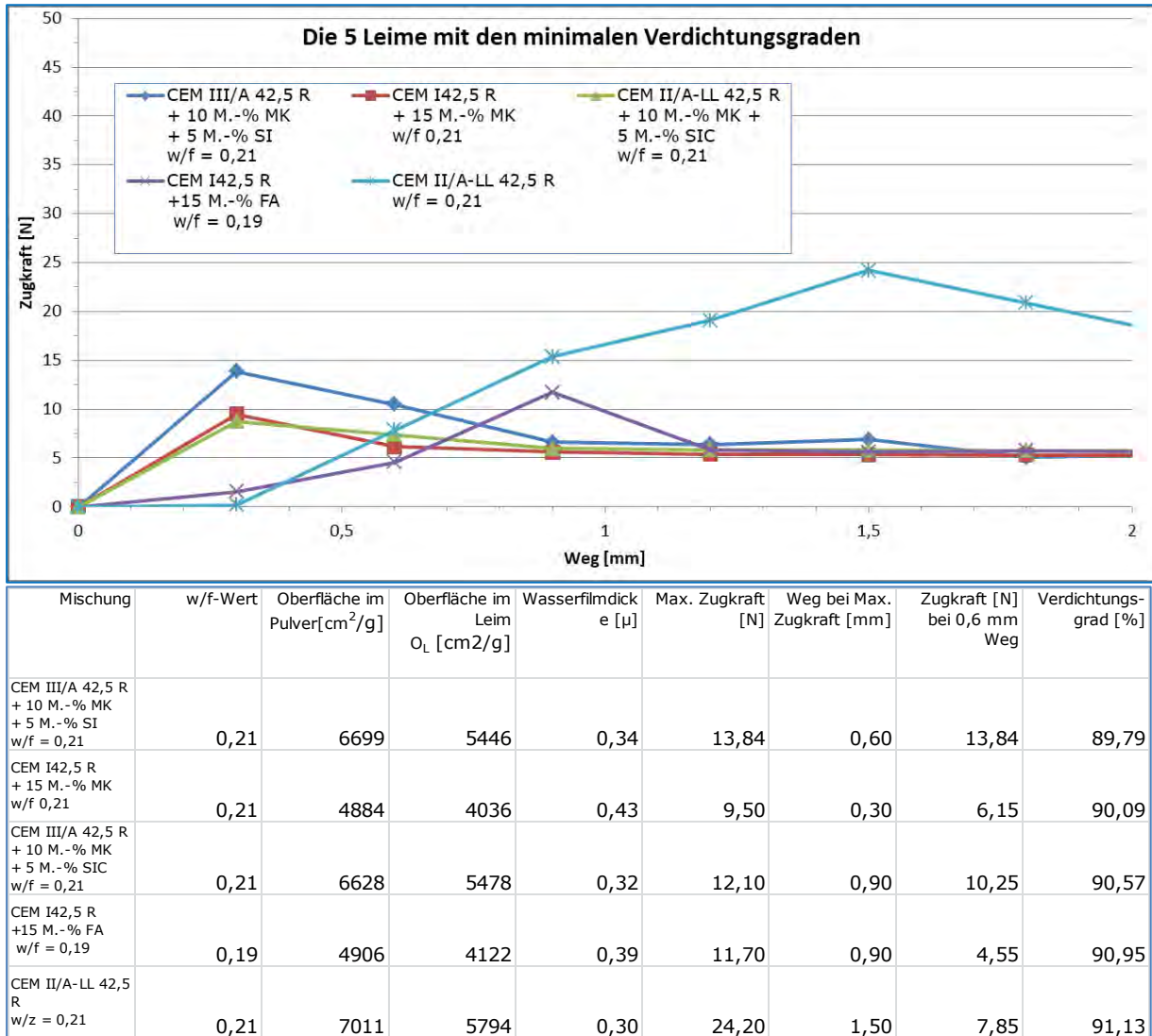


Abbildung 162: Verläufe und Kenndaten der Rezepturen mit den fünf minimalen Verdichtungsgraden

Die Maximalgruppe der Abbildung 161 zeigt extrem ähnliche Verläufe der Kurven, die alle dem Fall 4 entsprechen. Auch hierbei werden Zugkräfte erst bei großen Wegen aufgebaut und halten über vergleichsweise lange Distanzen an, ein Verhalten, das wiederum dem Bereich der Gleiterscheinungen entlang der Wandungen zugeordnet werden kann, bevor der Bruch in der Feststoffmatrix einsetzt. Die w/f-Werte betragen 0,23 bzw. 0,25 und sind am oberen Ende der beprobten w/f-Werte im Rahmen dieser Arbeit. In der Minimalgruppe liegen die w/z-Werte in vier Fällen bei 0,21 und in einem Fall bei 0,19 und damit im unteren Bereich. Niedrige w/f-Werte bei gleichzeitig niedrigen Verdichtungsgraden belegen einen zu trockenen Leim, dessen Partikel während der Verdichtung schlechter aneinander vorbeigleiten, um eine dichte Lage einzunehmen. Jedoch ist auch hierfür die mit in den Tabellen enthaltene Wasserfilmdicke keine Kenngröße. Diese Leime enthalten im Zugversuch ein Maximum, das zwar gering, jedoch deutlich ausgeprägt ist. Darin unterscheiden sich die Verläufe dieser Minimalgruppe eindeutig von denen der Maximalgruppe. Es kommt ohne Gleiterscheinungen an den Wandungen zu einem Bruch in der Matrix bei meist geringen Zugkräften.

In der Maximalgruppe beträgt der Mittelwert des Verdichtungsgrades 98,94, in der Minimalgruppe nur 90,51. Demgegenüber liegen die mittleren Verdichtungsgrade der maximalen Zugkräfte in der Abbildung 157 und Abbildung 159 bei 95,11 bzw. 95,24.

In diesem Vergleich charakterisiert ein Verdichtungsgrad von ca. 90 % zu trockene Mischungen und ein Verdichtungsgrad von ca. 99 % zu feuchte Mischungen.

Für eine Übersicht der Verteilung der einzelnen Leimzusammensetzungen in Abhängigkeit der Zugkraft sind in Anhang 2 die Resultate aller Versuche enthalten, sortiert nach der Höhe der Zugkraft. Anhand dieser Auflistung ist erkennbar, dass die Höhe der Zugkraft nicht von der Zementart beeinflusst wird. Alle drei Zemente sind in den Leimvarianten ohne Zusatzstoffe ebenso wie mit einem oder zwei Zusatzstoffen nicht auffällig konzentriert in einem Bereich der Zugkraft enthalten, sondern zufällig verteilt.

Kürzere Wege bis zur maximalen Zugkraft erzielen Zemente CEM II und CEM III, teils in Kombination mit verschiedenen Zusatzstoffen.

Wie bereits Abbildung 157 darstellt, zeigen Leime mit Mikrosilika als Bestandteil hohe Zugkräfte bei allen drei Zementen. Siliziumcarbid führt zu sehr geringen Zugkräften, diese Leime sind auf den hinteren Plätzen enthalten. Leime mit Metakaolin variieren stark, ebenso wie mit Flugasche. In beiden Fällen ist keine eindeutige Zuordnung zu der Höhe der Zugkraft vorhanden.

Der Einfluss der Oberfläche im Leim auf die Zugkraft ist gering. Die mittlere Zugkraft der zehn Leime mit den größten Oberflächen im Leim liegt bei 22,9 N bei einem Mittelwert der Oberfläche im Leim von 5.842 cm²/g. Die mittlere Zugkraft der zehn Leime mit den geringsten Oberflächen im Leim beträgt 18,9 N bei einem Mittelwert der Oberfläche im Leim von 3.956 cm²/g. Ein großer Unterschied von ca. 1.900 cm²/g (entsprechend einer Zunahme von ca. 48 %) führt lediglich zu einer Zunahme der Zugkraft von 21 %. Wie auch in der Übersicht in Abbildung 152 bereits ersichtlich, besteht dieser Zusammenhang jedoch auch nicht erkennbar über alle Größen der Leimoberfläche hinweg.

6. Zusammenfassung

Ein großes Spektrum unterschiedlicher Betonwaren und Betonteile wird in Produktionsverfahren mit sofortiger Entschalung hergestellt. Die Grundlage hierfür sind erdfeuchte Betone, die unmittelbar nach dem Verdichten in der Lage sind, den Prozess der Entschalung ohne Schäden wie z.B. Ausbrüche und Risse zu überstehen und anschließend formstabil zu erhärten. Weil in dieser sehr frühen Phase noch keine Festigkeit durch die Hydratation des Zementes entwickelt werden kann, muss alleine durch Haftkräfte zwischen den Feststoffen wie z.B. Zement, Flugasche, Sand und Kies eine ausreichende Standfestigkeit der frischen Betonteile erreicht werden. Im Vergleich zu hochfesten oder selbstverdichtenden Betonen, deren Grundlagen erst in den vergangenen ca. 30 Jahren entwickelt wurden, liegen über erdfeuchte Betone, die bereits seit ca. 100 Jahren eingesetzt werden, nur wenige Forschungsarbeiten vor. Diese Arbeiten beschränkten sich auf die Betrachtung der Kapillarkräfte und Reibungskräfte als Grundlagen für die Technologie erdfeuchter Betone. Auch liegen bislang keine geeigneten Prüfverfahren vor, mit denen die Konsistenz erdfeuchter Betone in einem für die Produktion aussagekräftigem Unterscheidungsbereich gemessen und verglichen werden können.

In der vorliegenden Arbeit erfolgte eine umfangreiche Analyse der Haftkräfte zwischen feuchten Feststoffpartikeln, deren Größe weniger als 100 μm beträgt, und deren bei denen die Gewichtskraft der einzelnen Partikel gegenüber den interpartikulären Haftkräften vernachlässigt werden kann [30]. Diese Größenklasse macht in erdfeuchten Leimen, und auch in erdfeuchten Betonen, den zahlenmäßig größten Anteil aus und ist daher maßgebend für die Übertragung von Haftkräften auf gröbere Fraktionen. Es zeigte sich, dass die Haftkraft zwischen Partikeln Anteile enthält, die aus Kräften aus adsorbierte Wasserfilmen, Flüssigkeitsbrücken, Van-der-Waals-Kräften, plastischen Van-der-Waals-Kräften sowie Reibung und Verzahnung besteht. Dabei werden die einzelnen Komponenten stark beeinflusst von den Rauigkeiten auf den Partikeloberflächen, der Partikelform und dem Wassergehalt. Dabei zählen die unmittelbar nach der Wasserzugabe auftretenden Hydratationsprodukte ebenfalls zu den Rauigkeiten. Es zeigte sich, dass alle Komponenten zahlenmäßige Anteile an der Gesamthaftkraft haben, wobei die Größenordnung der Komponenten aus Reibung und Verzahnung rechnerisch nicht erfasst werden können. Eine rechnerische Prognose über die zu erwartenden Zugspannungen in einer feuchten Partikelmatrix wie erdfeuchtem Zementleim ist bislang nicht möglich, weil zu wenige exakte Informationen auf der Ebene der Partikelformen und der Oberflächenbeschaffenheiten vorliegen und hierdurch die Haftkräfte über mehrere Größenordnungen hinweg beeinflusst werden.

Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit nach einer Möglichkeit gesucht, durch ein geeignetes Prüfverfahren Unterschiede in erdfeuchten Zementleimen dadurch zu ermitteln, dass die Zugkraft der Leime gemessen werden kann, ebenso wie der Weg, der für den Zugbruch aufgebracht werden muss.

Das Verfahren zur Ermittlung des zentrischen Zugkraft-Dehnungsverhaltens (Zugdehnung) wurde in den vergangenen acht Jahren an der Bergischen Universität Wuppertal entwickelt und fortlaufend verbessert. Die durchgeführten Versuche an Zementleimen mit verschiedenen Ausgangsstoffen zeigten, dass Unterschiede der Zugdehnung vorhanden sind und gemessen werden können. Auch Zusammensetzungen, die optisch nicht unterschieden werden können, verhalten sich während der Prüfung erkennbar anders in

der Höhe der Zugkraft und/oder in ihrem Dehnungsverhalten. Die Prüfung an erdfeuchtem Beton mit 8 mm Größtkorn ergab ebenfalls erkennbare Unterschiede in den Verläufen der Zugdehnungskurven.

Die Variationen der untersuchten Feststoff-Gemische erfolgten unter dem Aspekt, dass die Eignung des Verfahrens bei einer weiten Bandbreite von möglichen Stoffen überprüft werden sollte. Eine weitere, detailliertere Betrachtung der Auswirkungen von z.B. der Zugabemenge bezogen auf den Zementgehalt, ebenso wie die Einbeziehung von Zementen mehrerer Hersteller erfordert einen noch weitaus größeren Probenumfang.

6.1 Erfahrungen mit dem Prüfverfahren

Das Prüfverfahren wurde im Laufe der Anwendung bereits immer weiter optimiert, um eine einfache Handhabung und Reinigung zu ermöglichen, ebenso wie eine große Genauigkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

Das Prüfverfahren ist in der Stufe 3, die bei den Hauptversuchen angewendet wurde, bereits geeignet, um Unterschiede in erdfeuchten, frischen Zementleimgemischen zu erkennen und die Unterschiede in Zugkraft und Bruchdehnung darzustellen. Hierbei ist es wichtig, dass es sich nicht um ein Prüfverfahren handelt, das einem Einpunktversuch (nur eine Messgröße, z.B. Ausbreitmaß)- oder Zweipunktversuch (zwei Messgrößen, z.B. Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit) entspricht, sondern kontinuierlich Messdaten für die Auswertung herangezogen werden können.

Die Zugkräfte sind insgesamt sehr gering, auch im Verhältnis der Gewichtskräfte der Zementleimproben. Dadurch ist das Verfahren wenig robust gegenüber Fehlern bei der Anwendung, wie z.B. der geringfügig ausmittigen Platzierung der Probe während der Zugprüfung, die sich erst nach erfolgter Trennung der beiden Probekörperteile erkennen lässt, und dem Verkanten der Aufhängeösen, siehe Abbildung 163.

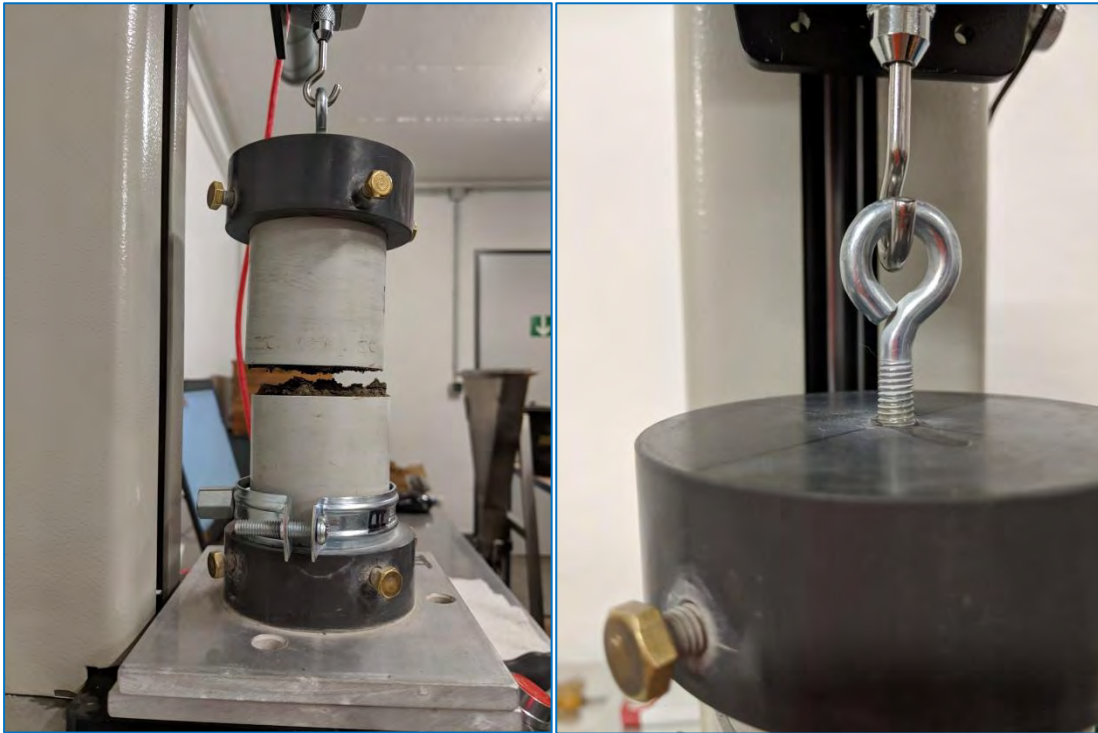


Abbildung 163: links Probe nach dem Bruch mit erkennbarer Exzentrizität der beiden Hälften, rechts Aufhängevorrichtung mit geringfügiger Verkantung vor dem Lasteintrag

Bei der verwendeten Variante als manuell gesteuerter Wegversuch wurde festgestellt, dass ein motorbetriebener Versuchsstand die Genauigkeit und die Handhabbarkeit deutlich verbessern kann. Durch die Ausführung der Versuche mit einer Sollbruchstelle besteht ferner eine Unsicherheit, weil der mögliche Bruchbereich nur auf 0,5 - 1,0 mm begrenzt ist, und keine Zone von z.B. 10 mm zur Verfügung steht, innerhalb derer sich eine Bruchzone entlang der schwächsten Partikelbindungen einstellen kann. Dieser Punkt ist bei Partikelgrößen von maximal 80 μm , wie sie in den Hauptversuchen vorlagen, akzeptabel. Auch bis zu einem Größtkorn von 8 mm, das bei den Versuchen an erdfeuchten Betonen eingesetzt wurde, ist das Prüfverfahren und der Versuchsaufbau noch geeignet. Jedoch sollte bei gröber skalierten Gemischen mit 16 mm Größtkorn die Erfordernis eines breiteren Sollbruchbereiches überprüft werden.

Die manuelle Verdichtung mit Hilfe eines Stößels und Hammers ist trotz fehlender, exakter Erfassung der eingetragenen Verdichtungsenergie geeignet, unter der Voraussetzung, dass das Bedienpersonal identisch ist. Es stellt sich während der Verdichtung durch die Zunahme des Widerstandes die Erfahrung dafür ein, wann eine Steigerung des Verdichtungsgrades nicht weiter erreicht werden kann. Die Verdichtungsgrade wurden bei jedem Versuch mit erfasst.

Außerdem ist auch bei einer automatischen Verdichtung der exakte Verdichtungsgrad an der Sollbruchstelle unbekannt, sobald lagenweise verdichtet wird. Die unteren, bereits verdichteten Schichten werden durch die über ihnen folgenden Lagen immer auch eine geringe Nachverdichtung erfahren. Hierbei ist hervorzuheben, dass es wichtiger ist, zügig und immer in annähernd gleicher Zeit das Befüllen und das Verdichten der Probekörper zu beenden, weil die Hydratationsprodukte der ersten Minuten einen großen Einfluss auf den Versuchsverlauf ausüben, wie der Vergleich der drei Zemente mit unterschiedlichen Klinkeranteilen bereits gezeigt hat.

Das Verfahren wurde während der Arbeit fortlaufend weiter verbessert, so dass die Handhabung und auch die Auswertung der Versuche relativ einfach und schnell erfolgen kann. Auch das Reinigen der Probekörper nach Abschluss der einzelnen Versuche trägt zu einer phänomenologischen Einschätzung der Eigenschaften der geprüften Leime bei, weil anhand des Reinigungsaufwandes ein empirischer Zusammenhang zwischen der Reinigungsintensität und der Zug-Bruchdehnung besteht. Leime, die ein eher duktiler Zugdehnungsverhalten aufweisen, lassen sich leichter aus den beiden Formhälften entfernen als solche Leime, die ein eher sprödes Verhalten mit hoher Zugkraft aufweisen. Da der Energieaufwand für das Reinigen nicht qualitativ erfasst werden kann, handelt es sich um rein empirische Beobachtungen.

6.2 Ergebnisse

Erdfeuchte Betonrezepturen werden dauerhaft bei der Herstellung von sofort entschlachten Betonteilen unverzichtbar sein. Die in dieser Arbeit aufgezeigten Ergebnisse können als Grundlage dienen, um eine Optimierung der Rezepturen in der Zukunft zu ermöglichen.

Dabei geht es nicht vorrangig um eine technische Verbesserung auf einem bereits vorhandenen, hohen Niveau, wie die geringe Rate von ca. 1 % Fehlproduktion durch Ausschuss belegt. Im Fokus sollte vielmehr eine wirtschaftliche Optimierung bei gleichbleibender Leistungsfähigkeit der Rezepturen stehen. Zusatzstoffe wie z.B. Mikrosilika, die von 20 Jahren so gut wie nicht bekannt waren, stehen zur Verfügung, ebenso wie Metakaolin und mögliche weitere, die in Zukunft noch entwickelt werden. Auch bei Zementen werden neue Zemente hinzukommen, die bereits vor dem Einsatz auf großtechnischen Anlagen mit den bislang verwendeten Zementen verglichen werden können. Ebenso werden in Zukunft natürliche Gesteinskörnungen zunehmend weniger zur Verfügung stehen, weil die natürlichen Ressourcen erschöpfen, folglich müssen Materialien anderen geologischen Ursprunges, andere Korngrößen oder rezyklierte Gesteinskörnungen auf ihre Eignung für erdfeuchte Betone hin überprüft werden, bevor Großversuche in den Produktionseinrichtungen erfolgen.

Das Einsatzgebiet des Prüfverfahrens kann darin liegen, eine Rezeptur auszuwählen, deren Zugdehnungsverhalten hoch, d.h. spröde ist, jedoch nicht unbedingt das absolute Maximum erreicht, dafür aber wirtschaftlich aufgrund der Zusammensetzung deutlich vorteilhafter ist als bisher verwendete Rezepturen.

Optisch gleich erdfeuchte bzw. trocken anmutende Zementleime können in ihrem Zugdehnungsverhalten durch die Zugkraft-Wegdiagramme recht deutlich unterschieden werden. In Kombination mit den Verdichtungsgraden und den w/f-Werten ist eine sichere Einstufung dahingehend möglich, ob es sich um einen Leim mit spröden Eigenschaften und hoher oder niedriger Zugkraft handelt, oder um einen duktilen Leim mit hoher oder niedriger Zugkraft handelt. Das Prüfverfahren ist geeignet, Unterschiede bei Rezepturen erdfeuchter Zementleimgemische zu erkennen und dadurch eine Optimierung der Zugdehnungseigenschaften zu erreichen. Somit schließt das Prüfverfahren die in Kap. 2.2 beschriebene Lücke bei den konsistenzunterscheidenden Prüfverfahren. Es ist ein dreipunkte-Prüfverfahren (Zugkraft, Weg, Verdichtungsgrad), bei dem die Veränderungen zweier Parameter (Zugkraft und Weg) kontinuierlich aufgezeichnet werden. Auch zeigte sich, dass erdfeuchte Betone mit einem Größtkorn von 8 mm ebenfalls geprüft werden können, auch hierbei konnten unterschiedliche w/z-Werte identifiziert werden.

Eine Prognose der Leimeigenschaften anhand der verwendeten Ausgangsstoffe ist lediglich bedingt möglich. Während Mikrosilika sich als positiv für die Zugkraft herausgestellt hat, führt Siliziumcarbid zu einer durchgehenden Verringerung der Zugkraft. Bei Einsatz von CEM II/A-LL und CEM III wurde die maximale Zugkraft bei geringeren Wegen erreicht als bei CEM I. Leime mit Metakaolin verhielten sich überwiegend duktiler.

Für die Versuchsserien im Rahmen dieser Arbeit wurden von allen verwendeten Feststoffen die granulometrischen Kenngrößen ermittelt, um anhand der Partikeloberflächen unter der Annahme runder, ideal glatter Partikel die Oberfläche im Leim sowie die Wasserschichtdicke zu berechnen. Es zeigte sich, dass diese Kenngrößen in keinem erkennbaren Zusammenhang zu Zugkraft und Bruchweg stehen. Damit kann für weitere Arbeiten, sowie für den Einsatz des Prüfverfahrens bei der Produktionsoptimierung, auf die relativ aufwändige Untersuchung der Feststoffe mittels Lasergranulometrie verzichtet werden.

Die früheren Forschungen an erdfeuchten Betonen durch Wierig und Bornemann konzentrierten sich auf die Gründruckfestigkeit und nannten als entscheidende Bindemechanismen der Partikel Flüssigkeitsbrücken (Wierig) oder Reibungseffekte (Bornemann). Reibungseffekte können sich immer erst dann einstellen, wenn eine Relativbewegung der Feststoffpartikel vorhanden ist, hierbei müssten hohe Zugkräfte bei höheren Wegen gemessen werden. Wie in Abbildung 157 ersichtlich, besteht kein Zusammenhang zwischen hohen Zugkräften und hohen Wegen.

Die theoretische Analyse der interpartikulären Bindemechanismen in Kap. 2.4.2 zeigte, dass neben der Kapillarkraft durch Flüssigkeitsbrücken auch von Adsorptionsfilmen, van-der-Waals-Kräften und plastischen van-der-Waals-Kräften interpartikuläre Haftkräfte ausgehen. Diese Kraftmechanismen werden stark von den Mikrorauigkeiten der Partikel in Größenordnungen unter 1 μm beeinflusst. Die Reichweiten dieser Kräfte sind unterschiedlich. Ein Teil der erhaltenen Zugdehnungslinien zeigt Veränderungen in den Steigungen während der Kraftzunahme und auch während der Kraftabnahme. Diese können darauf hinweisen, dass mehrere Haftkraftmechanismen gemeinsam wirken und mit zunehmendem Weg die Reichweite ihrer Wirkung nacheinander überschritten wird, bevor die maximale Zugkraft erreicht wird. Eine eindeutige Zuordnung war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Es konnte nachgewiesen werden, dass unterschiedliche Ausgangsstoffe, auch in Kombination, das Zugdehnungsverhalten beeinflussen bei gleichen Wasser-Feststoffgehalten. Dieses Verhalten weist darauf hin, dass nicht alleine kapillare Haftkräfte der Flüssigkeitsbrücken zwischen Partikeln für die Zugkraft verantwortlich sein können. Kapillare Haftkräfte durch Flüssigkeitsbrücken werden nicht von den chemischen oder physikalischen Eigenschaften der hier verwendeten Feststoffpartikel beeinflusst, sondern lediglich von der Phasengrenze Wasser-Feststoff-Luft, daher können von ihnen keine Unterschiede des Zugdehnungsverhaltens der verschiedenen Feststoffe in Verbindung mit Wasser ausgehen.

Zusammenfassend steht mit dem entwickelten und verwendeten Prüfverfahren eine Methode zur Verfügung, mit der durch praktische, kleinskalierte Versuche Unterschiede in dem Zugdehnungsverhalten erdfeuchter Leimgemische und erdfeuchter Betone identifiziert werden können. Es ist daher grundsätzlich dafür geeignet, die werkseigene Produktionskontrolle während der laufenden Herstellung erdfeuchter Betonteile zu ergänzen und bei der Entwicklung neuer Betonrezepturen eingesetzt zu werden.

7. Ausblick

Die Resultate dieser Arbeit haben gezeigt, dass mit der verwendeten Versuchsmethodik zur Ermittlung der Grünzugfestigkeit erdfeuchter Zementleimgemische Unterschiede in der Zugkraft und dem Weg bei den überprüften Rezepturen festgestellt werden können.

Bewusst wurden die Versuche mit einem sehr geringen finanziellen Rahmen und unter stark vereinfachten Bedingungen mit einem manuell geführten Versuchsstand durchgeführt, weil der Ausgang und die Eignung nicht von Beginn an sicher erwartet werden konnten. Nach Abschluss der Arbeiten wurde aufgrund der positiven Ergebnisse bereits ein motorbetriebener Versuchsstand mit mechanischer Steuerung sowie eine modernere Messzelle mit feinerer Messfrequenz und USB-Schnittstelle angeschafft und in Betrieb genommen, um an die erhaltenen Ergebnisse anzuknüpfen und das Prüfverfahren in der Handhabung weiter zu verbessern und es in Richtung der praktischen Nutzung bei Betonherstellern einer Anwendung zuzuführen. Auch wird bei zukünftigen Messungen eine Zelle zur Verfügung stehen, die es erlaubt, eine feinere Messfrequenz einzustellen und damit das Dehnungsverhalten bei den geringen Wegen besser reproduzierbar wiederzugeben. Damit wird dann ein verlässliches und robustes Prüfverfahren zur Verfügung stehen, mit dem weitere Fragestellungen reproduzierbar untersucht werden können wie z.B. der Einfluss von Zusatzmitteln auf das Zugdehnungsverhalten [147].

Weiterhin sollte die Überprüfung auf Zemente verschiedener Hersteller in jeweils einer Sorte ausgedehnt werden um zu prüfen, ob für jeden Zement eine eigene, reproduzierbare Zugdehnungs-Charakteristik existiert, sowie die Einbeziehung von erdfeuchten Betonen mit unterschiedlichen Zementen und Gesteinskörnungen. Auch bei dem zu erwartenden, zunehmendem Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen kann das Prüfverfahren für eine Prognose der Eigenschaften erdfeuchter Betone verwendet werden. Ebenfalls noch offen ist der Einfluss von Pigmenten. Hier ist zu erwarten, dass sie aufgrund ihrer wesentlich geringeren Partikelgröße die Zwischenräume um die Zementkörner belegen werden. Aus der Praxis ist durch die Verwendung von Pigmenten kein erhöhter Wasserbedarf der Rezepturen bekannt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf die Verwendung von Pigmenten verzichtet, da der Reinigungsaufwand der Laborgeräte dadurch erheblich ansteigt, ebenso wie die Staubentwicklung beim Dosieren und Mischen in der Versuchshalle.

In neueren Arbeiten des VDZ [148] zur granulometrischen Optimierung von Kompositzementen wurde festgestellt, dass die Packungsdichte der Zemente in trockenem Zustand einen anderen Einfluss auf Festbetoneigenschaften hat als vermutet. Geringere Packungsdichten führten zu höheren Festigkeiten und verbessertem Verhalten der Wasseraufnahme sowie bei Frost-Taumittelprüfungen. Dies wird darauf zurückgeführt, dass sich die Partikel bei Wasserzugabe weniger weit durch das Wasser voneinander entfernen, weil durch eine geringere Packungsdichte Retentionsräume für Wasser entstehen. Dadurch ist die Festbetondichte höher als bei einer größeren Packungsdichte der trockenen Zemente.

In weiteren Arbeiten zu erdfeuchten Betonen kann daher ergänzend untersucht werden, ob die trockenen Packungsdichten der Feststoffgemische in Zusammenhang mit den gemessenen Zugdehnungsverhalten der erdfeuchten Gemische gebracht werden können. Auf diese Untersuchung wurde im Zuge der Arbeit verzichtet, weil Versuche an getrockneten Ausgangsstoffen in der Praxis aufwändig sind und dadurch keine direkte Vergleich-

barkeit von Variationen frischer Mischungen möglich ist. Dennoch kann darin ein Ansatz bestehen, das beobachtete Verhalten besser vorherzusagen.

Für eine weitere Verbesserung des Prüfverfahrens sollten zunächst die beschriebenen Fehlermöglichkeiten bei der Krafteinleitung infolge Aufhängung und Platzierung der Probekörper verringert werden, bevor eine kostenintensive automatische Wegsteuerung in Erwägung gezogen wird. Weiterhin sollten Probekörper mit größeren Durchmesser überprüft werden im Hinblick auf ihre Eignung für den Bereich erdfeuchter Betone mit Größtkorn bis 16 mm. Auch stellt die Sollrissfuge zwischen oberem und unterem Schalungskörper eine potentielle Fehlerquelle dar. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Zementleim sich in der Fuge ansammelt und dadurch über den Querschnitt der Wanddicke der Schalungskörper zusätzliche Haftkräfte aktiviert werden, insbesondere bei Rezepturen die durch höhere Wassergehalte, d.h. durch höhere w/f -Werte, ein plastischeres, beweglicheres Verformungsverhalten aufweisen. Ebenfalls können die Probekörper aus PVC-Rohren durch weniger verschleißanfällige Probekörper aus Metall ersetzt werden.

8. Anhang

Anhang 1: Partikelgrößenanalysen der verwendeten Ausgangsstoffe der Hauptversuche

Tabelle 11: Partikelgrößenanalyse des CEM I 42,5 R

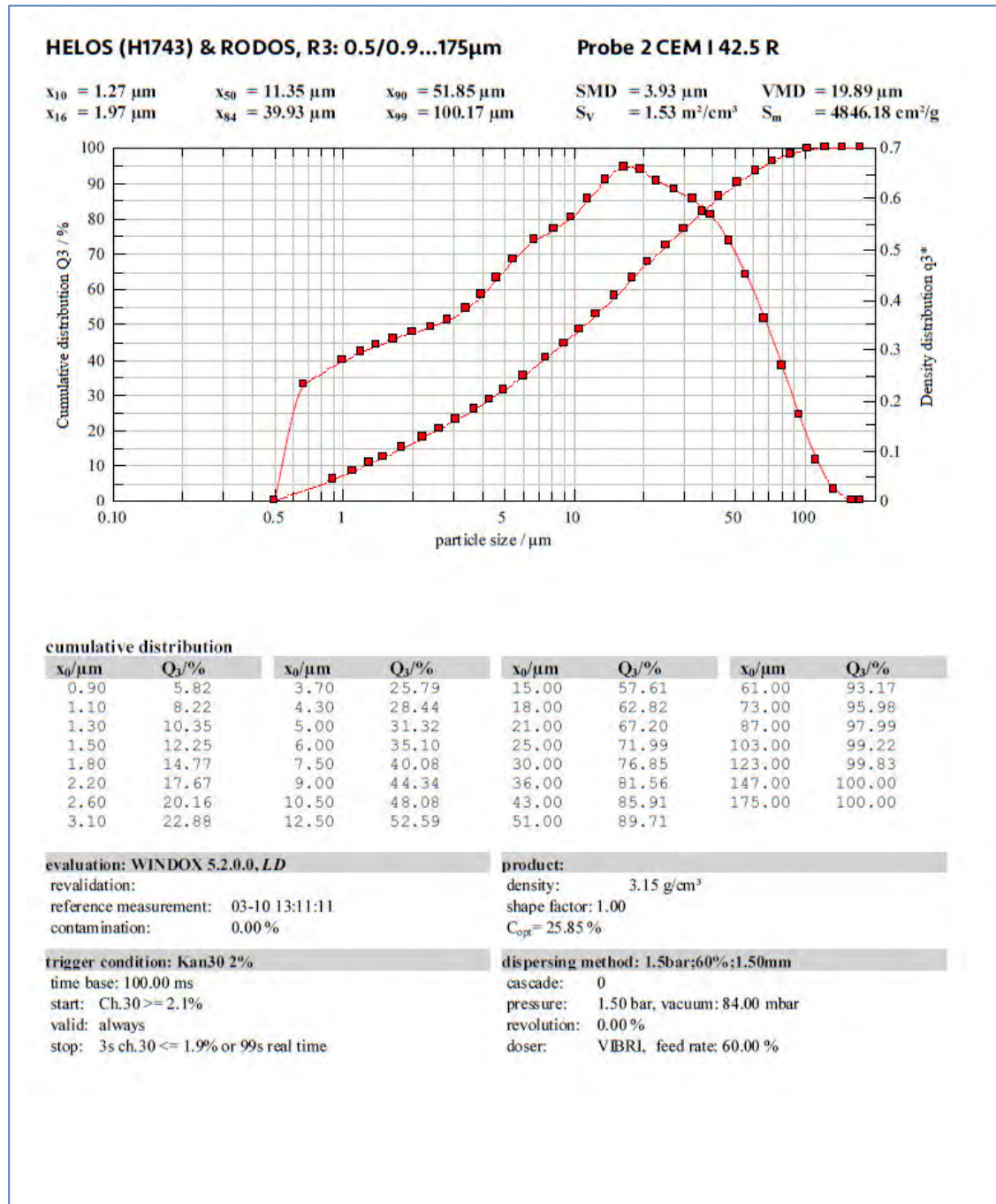


Tabelle 12: Partikelgrößenanalyse des CEM II/A-LL 42,5 R

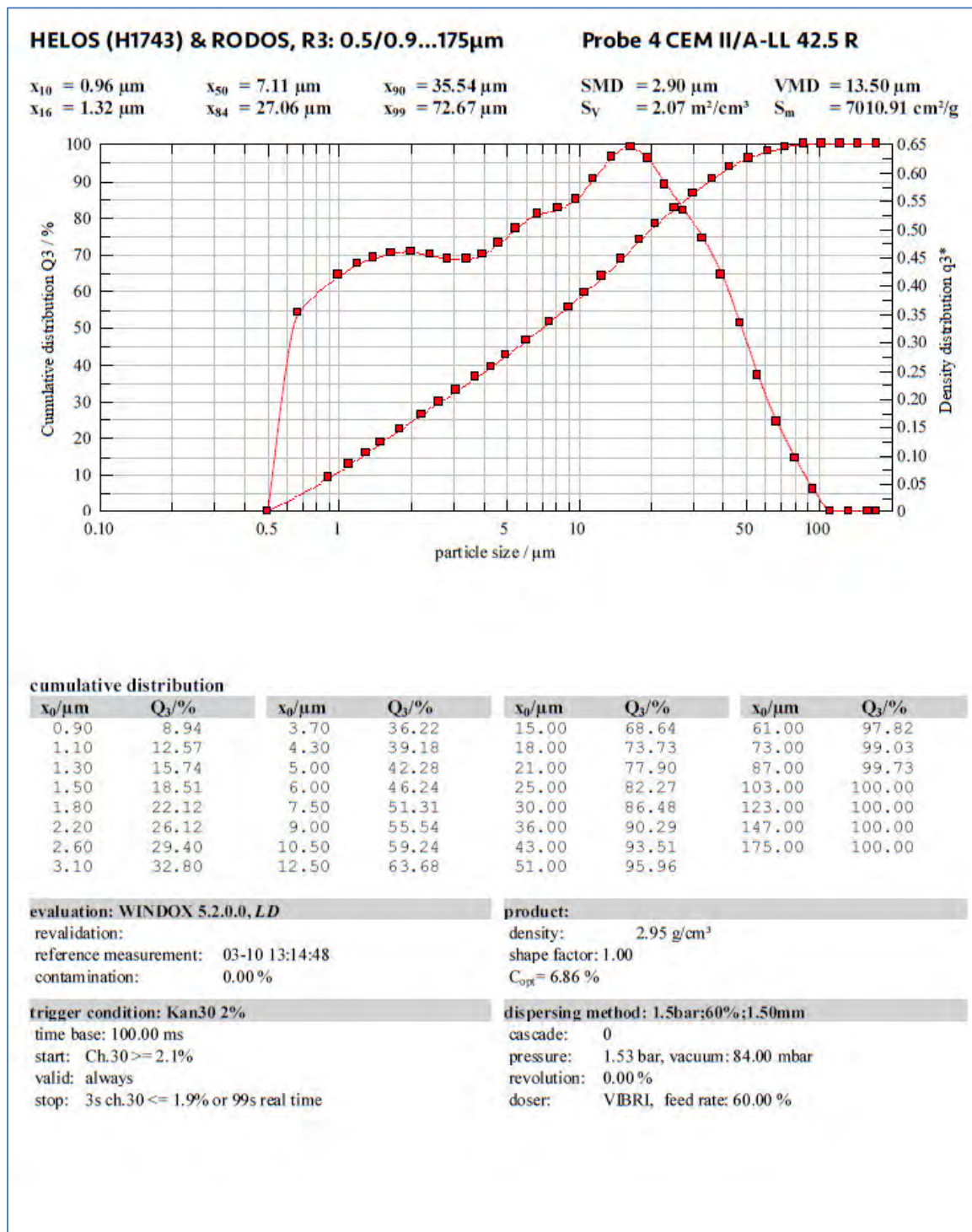


Tabelle 13: Partikelgrößenanalyse des CEM III/A 42,5 R

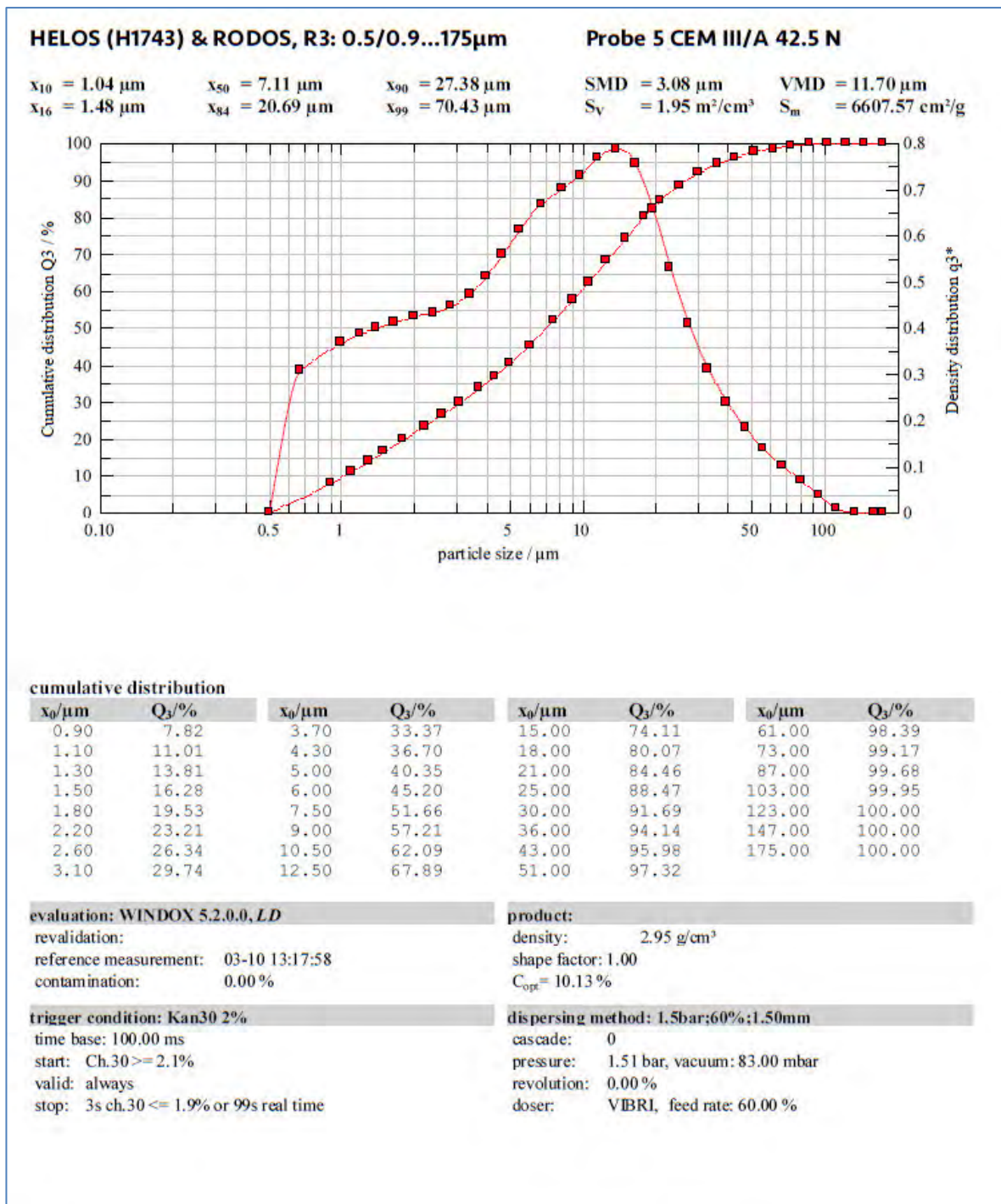


Tabelle 14: Partikelgrößenanalyse der Flugasche

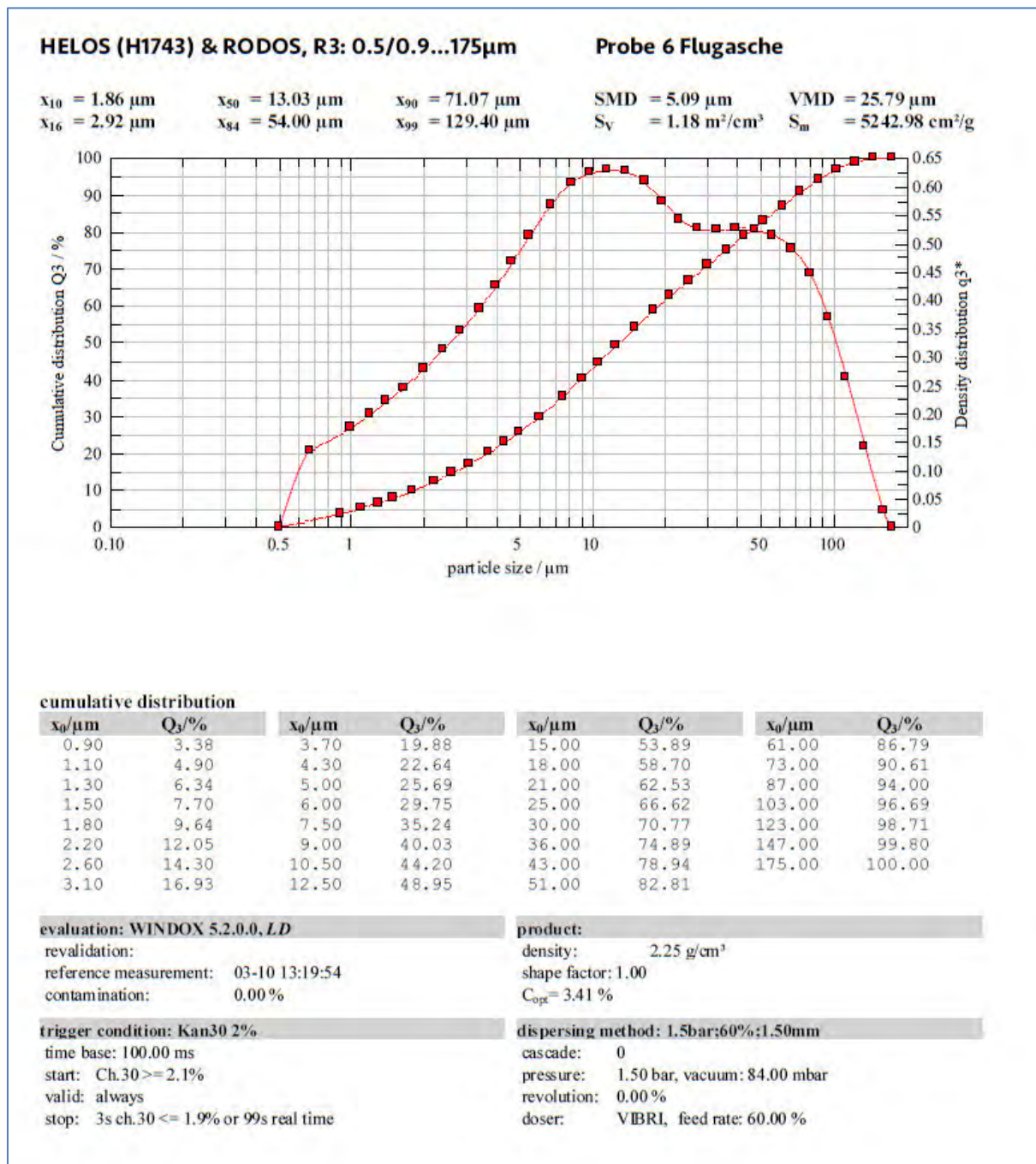


Tabelle 15: Partikelgrößenanalyse des Mikrosilika

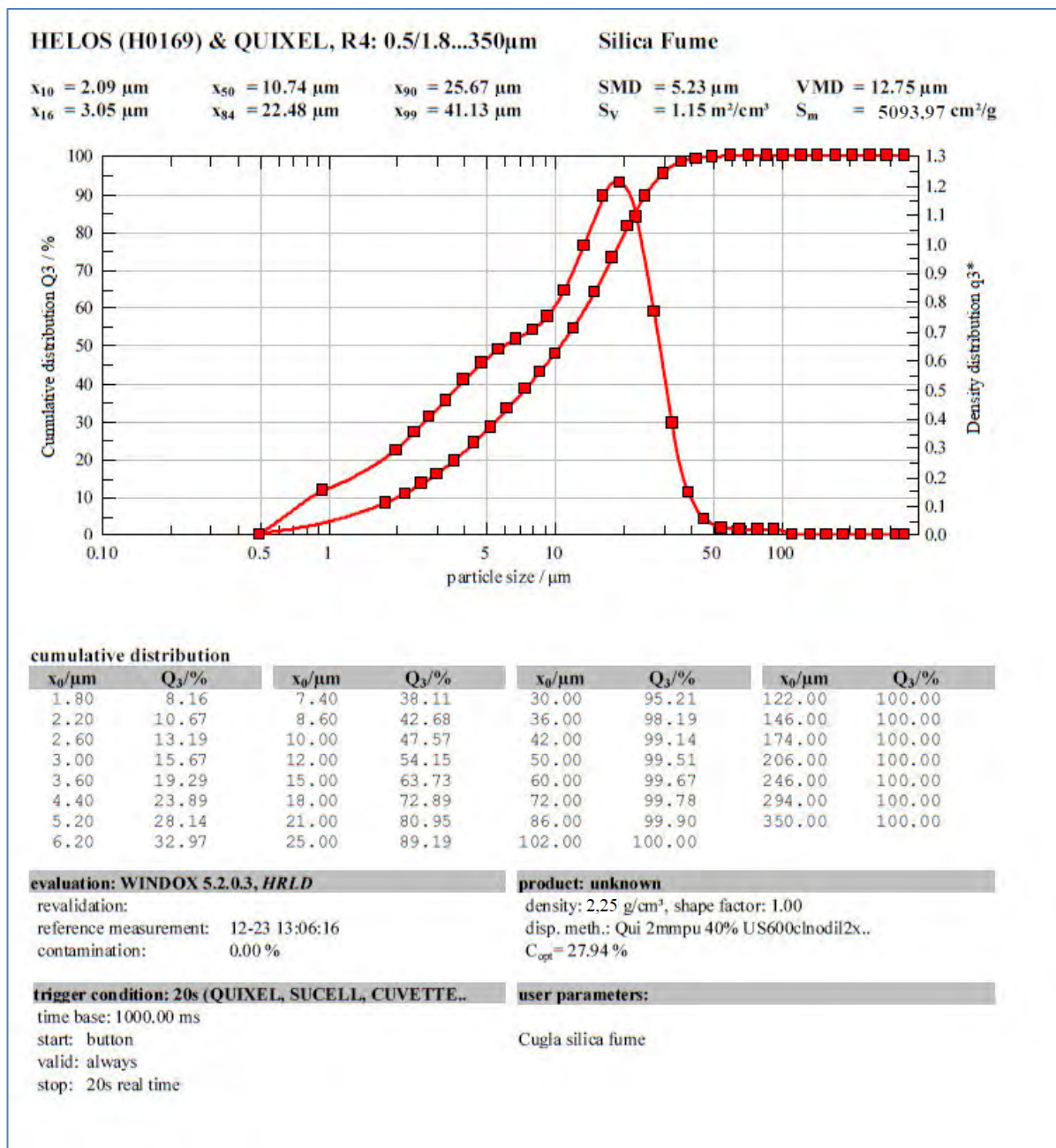


Tabelle 16: Partikelgrößenanalyse des Metakaolin

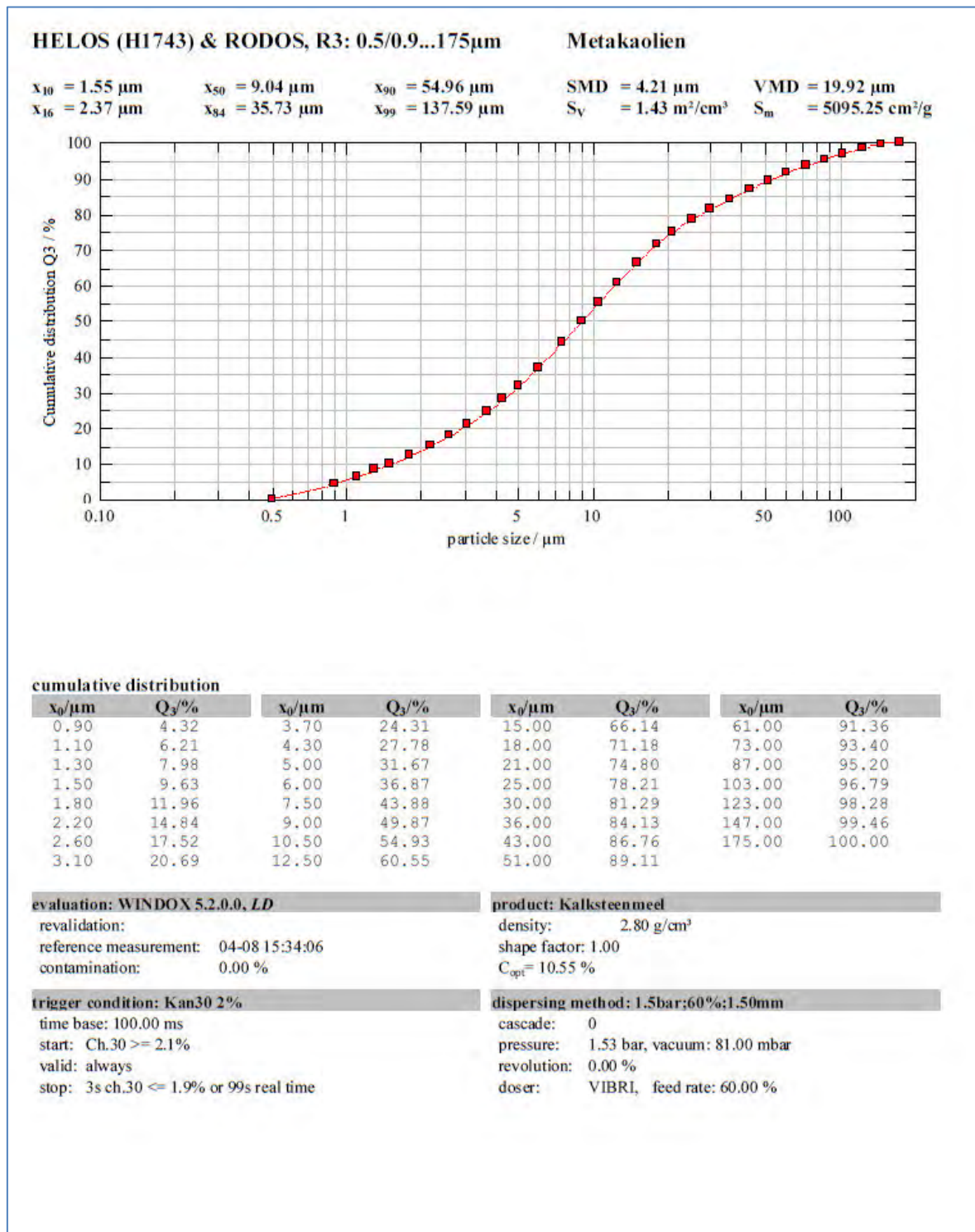
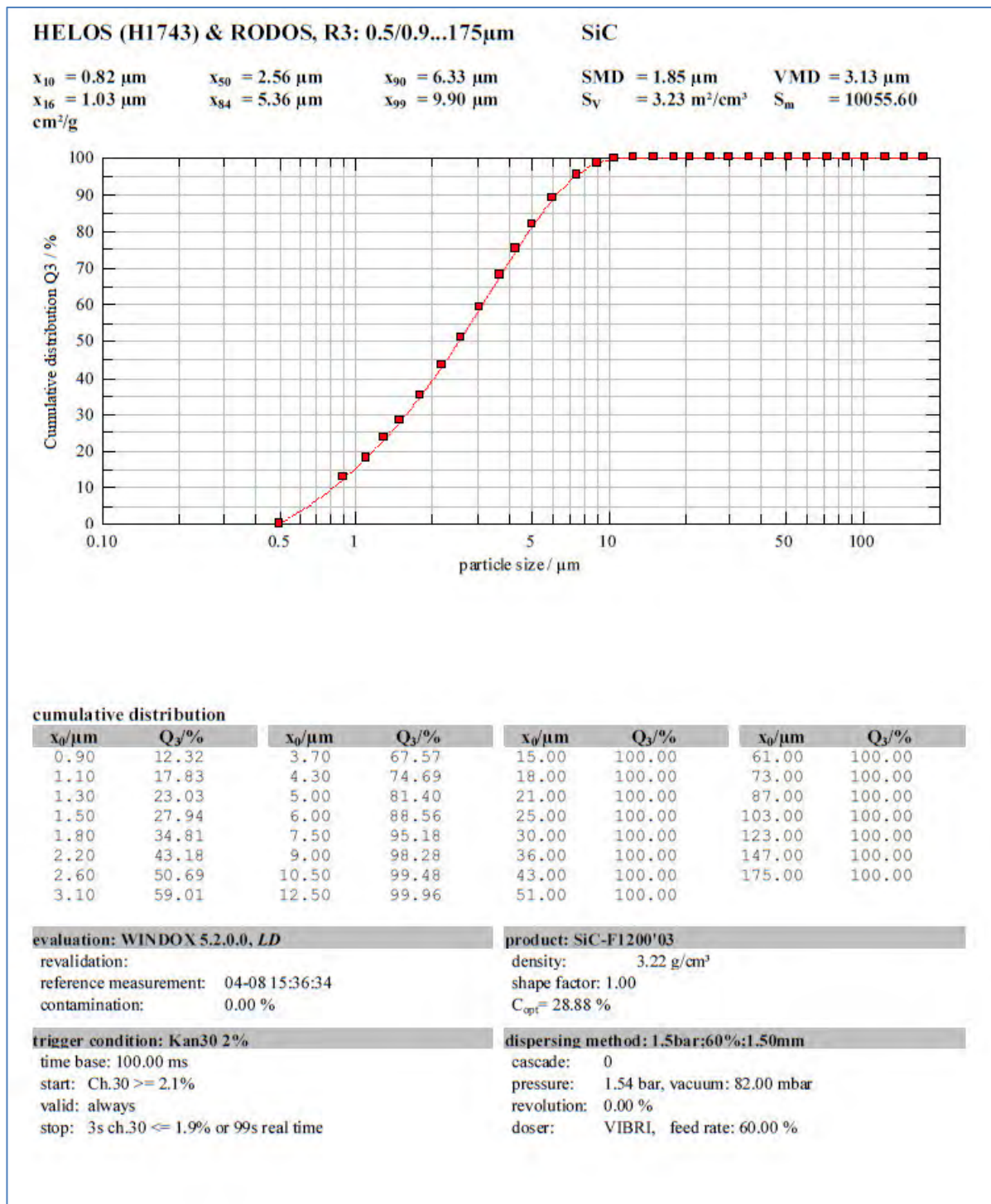


Tabelle 17: Partikelgrößenanalyse des Siliciumcarbids



Anhang 2: Tabelle der Versuchsergebnisse, sortiert nach maximaler Zugkraft

Mischung	w/f-Wert	Oberfläche im Pulver [cm ² /g]	Oberfläche im Leim O _L [cm ² /g]	Wasserfilm- dicke [µm]	Max. Zugkraft [N]	Weg bei Max. Zugkraft [mm]	Zugkraft [N] bei 0,6 mm Weg	Verdichtungs- grad [%]
CEM 142,5 R + 15 M.-% SI w/f = 0,21	0,21	5839	4825	0,36	44,35	1,20	38,85	93,37
CEM II/A-LL 42,5 R + 5 M.-% SI w/f = 0,21	0,21	7233	5978	0,29	34,75	0,30	8,6	96,06
CEM III/A 42,5 R + 5 M.-% SI w/f = 0,21	0,21	6850	5661	0,31	32,10	0,30	7,45	97,97
CEM III/A 42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SI w/f = 0,23	0,23	6699	5536	0,31	31,85	0,90	18,6	93,69
CEM 142,5 R w/z = 0,21	0,21	4846	4005	0,43	31,45	1,50	22,1	94,48
CEM II/A-LL 42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% FA w/f = 0,21	0,21	7042	5820	0,30	29,55	1,20	7,85	91,60
CEM 142,5 R + 15 M.-% SI w/f = 0,23	0,23	5839	4747	0,39	29,25	0,90	16,45	98,18
CEM III/A 42,5 R + 5 M.-% MK w/f = 0,23	0,23	6532	5311	0,35	29,05	1,20	24,4	95,15
CEM II/A-LL 42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SI w/f = 0,21	0,21	7056	5832	0,30	28,00	0,90	21,35	96,91
CEM 142,5 R + 15 M.-% MK w/f = 0,25	0,25	4884	3907	0,51	27,90	1,50	14,95	98,01
CEM 142,5 R + 5 M.-% SI w/f = 0,21	0,21	5177	4279	0,41	27,90	0,60	27,9	95,15
CEM 142,5 R + 15 M.-% SI w/f = 0,25	0,25	5839	4671	0,43	27,25	1,50	20,55	98,00
CEM II/A-LL 42,5 R + 5 M.-% FA w/f = 0,19	0,19	6922	5817	0,27	26,45	1,20	20,25	96,19
CEM 142,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SI w/f = 0,21	0,21	5217	4311	0,40	26,30	1,50	18,55	96,54
CEM 142,5 R + 15 M.-% FA w/f = 0,21	0,21	4906	4054	0,43	26,00	0,60	26	95,60
CEM 142,5 R + 15 M.-% SIC w/f = 0,21	0,21	5626	4650	0,37	25,55	0,90	17,4	96,15
CEM 142,5 R + 5 M.-% FA w/f = 0,21	0,21	4866	4022	0,43	25,05	0,60	25,05	96,14
CEM 142,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SI w/f = 0,23	0,23	5202	4229	0,44	25,02	0,60	25,02	95,93
CEM II/A-LL 42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SIC w/f = 0,21	0,21	6986	5773	0,30	24,30	1,20	15,1	97,66
CEM II/A-LL 42,5 R w/z = 0,21	0,21	7011	5794	0,30	24,20	1,50	7,85	91,13
CEM III/A 42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SI w/f = 0,21	0,21	6714	5549	0,31	23,40	0,90	10,55	94,77
CEM II/A-LL 42,5 R + 5 M.-% FA w/f = 0,21	0,21	6922	5721	0,30	23,25	2,10	8,55	97,56
CEM II/A-LL 42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SI w/f = 0,23	0,23	7056	5737	0,33	22,80	1,50	11,8	97,58
CEM III/A 42,5 R + 5 M.-% FA w/f = 0,21	0,21	6539	5404	0,32	22,63	0,30	8,6	97,06
CEM III/A 42,5 R w/z = 0,21	0,21	6608	5461	0,32	22,10	0,60	22,1	95,21

Mischung	w/f-Wert	Oberfläche im Pulver [cm ² /g]	Oberfläche im Leim O _L [cm ² /g]	Wasserfilmdicke [µm]	Max. Zugkraft [N]	Weg bei Max. Zugkraft [mm]	Zugkraft [N] bei 0,6 mm Weg	Verdichtungsgrad [%]
CEM I42,5 R + 5 M.-% MK w/f 0,23	0,23	4859	3950	0,47	21,65	2,10	3	98,18
CEM III/A 42,5 R + 5 M.-% SI w/f = 0,23	0,23	6850	5569	0,34	21,25	1,20	3,75	95,38
CEM III/A 42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SIC w/f = 0,23	0,23	6643	5401	0,35	21,20	1,80	6,4	96,25
CEM II/A-LL 42,5 R w/z = 0,23	0,23	7011	5700	0,33	20,25	3,90	4,6	97,92
CEM I42,5 R + 5 M.-% SIC w/f 0,21	0,21	5106	4220	0,41	19,25	0,90	14,1	96,97
CEM III/A 42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SI w/f = 0,23	0,23	6714	5458	0,34	19,10	1,80	8,8	97,24
CEM II/A-LL 42,5 R + 5 M.-% SI w/f = 0,23	0,23	7233	5881	0,32	18,90	2,10	11,3	97,47
CEM III/A 42,5 R + 5 M.-% FA w/f = 0,23	0,23	6539	5317	0,35	18,85	1,20	11,8	96,47
CEM II/A-LL 42,5 R + 5 M.-% FA w/f = 0,23	0,23	6922	5628	0,33	18,05	0,60	18,05	97,36
CEM I42,5 R + 15 M.-% MK w/f 0,23	0,23	4884	3970	0,47	17,80	0,30	11,2	93,92
CEM III/A 42,5 R + 5 M.-% SIC w/f = 0,21	0,21	6780	5603	0,31	17,60	0,30	11,35	94,60
CEM II/A-LL 42,5 R + 5 M.-% SIC w/f = 0,21	0,21	7162	5919	0,29	17,00	1,50	12,3	97,46
CEM II/A-LL 42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SIC w/f = 0,23	0,23	6986	5679	0,33	15,85	2,40	2,4	98,01
CEM III/A 42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SIC w/f = 0,23	0,23	6628	5389	0,35	15,71	0,60	15,71	93,32
CEM I42,5 R + 5 M.-% MK w/f 0,25	0,25	4859	3887	0,51	15,70	2,10	9,3	98,88
CEM I42,5 R w/z 0,23	0,23	4846	3940	0,47	15,55	2,40	4,2	98,41
CEM I42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SIC w/f 0,21	0,21	5146	4253	0,41	15,55	0,60	15,55	97,44
CEM I42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SI w/f 0,23	0,23	5217	4241	0,44	15,45	3,30	8,2	98,60
CEM III/A 42,5 R + 5 M.-% SIC w/f = 0,23	0,23	6780	5512	0,34	15,30	2,10	9,8	96,40
CEM I42,5 R + 5 M.-% SIC w/f 0,23	0,23	5106	4151	0,45	14,80	3,30	9,6	98,01
CEM I42,5 R + 5 M.-% SI w/f 0,23	0,23	5177	4209	0,44	14,80	3,30	9,6	91,60
CEM II/A-LL 42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% FA w/f = 0,23	0,23	7042	5725	0,33	14,50	4,50	0,2	93,32
CEM III/A 42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SI w/f = 0,21	0,21	6699	5446	0,34	13,84	0,60	13,84	89,79
CEM II/A-LL 42,5 R + 5 M.-% SIC w/f = 0,23	0,23	7162	5823	0,32	13,80	2,70	6,15	96,83
CEM II/A-LL 42,5 R + 5 M.-% MK w/f = 0,21	0,21	6915	5715	0,30	13,75	1,20	12,9	97,05

Mischung	w/f-Wert	Oberfläche im Pulver [cm ² /g]	Oberfläche im Leim O _L [cm ² /g]	Wasserfilmdicke [µm]	Max. Zugkraft [N]	Weg bei Max. Zugkraft [mm]	Zugkraft [N] bei 0,6 mm Weg	Verdichtungsgrad [%]
CEM III/A 42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SIC w/f = 0,21	0,21	6643	5490	0,32	13,58	0,90	3,7	93,97
CEM II/A-LL 42,5 R w/z = 0,25	0,25	7011	5609	0,36	13,45	4,80	0,7	98,08
CEM III/A 42,5 R w/z = 0,23	0,23	6608	5372	0,35	13,15	0,90	13,05	96,43
CEM III/A 42,5 R + 5 M.-% MK w/f = 0,21	0,21	6532	5398	0,32	12,90	0,30	6,75	91,68
CEM I42,5 R +15 M.-% FA w/f = 0,23	0,23	4906	3988	0,47	12,30	2,70	5,9	98,47
CEM I42,5 R + 15 M.-% SIC w/f 0,23	0,23	5626	4574	0,41	12,30	1,50	10,45	98,68
CEM II/A-LL 42,5 R + 5 M.-% SI w/f = 0,25	0,25	7233	5787	0,35	12,26	2,40	6,9	97,54
CEM I42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SIC w/f 0,23	0,23	5146	4184	0,45	12,20	0,60	12,2	98,81
CEM III/A 42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SIC w/f = 0,21	0,21	6628	5478	0,32	12,10	0,90	10,25	90,57
CEM I42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SI w/f 0,21	0,21	5202	4299	0,40	11,75	0,60	11,75	93,53
CEM I42,5 R +15 M.-% FA w/f = 0,19	0,19	4906	4122	0,39	11,70	0,90	4,55	90,95
CEM III/A 42,5 R w/z = 0,20	0,2	6608	5506	0,30	11,25	0,60	11,25	97,69
CEM II/A-LL 42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SIC w/f = 0,23	0,23	6512	5295	0,35	11,18	1,80	0,15	97,59
CEM I42,5 R w/z 0,25	0,25	4846	3877	0,52	10,80	11,10	9,25	99,72
CEM I42,5 R + 5 M.-% SI w/f 0,25	0,25	5177	4142	0,48	10,70	7,80	6,5	98,60
CEM II/A-LL 42,5 R + 5 M.-% MK w/f = 0,23	0,21	6915	5622	0,33	10,38	0,60	10,38	97,11
CEM III/A 42,5 R + 5 M.-% FA w/f = 0,19	0,19	6539	5495	0,29	10,38	0,60	10,38	93,33
CEM I42,5 R + 5 M.-% MK w/f 0,21	0,21	4859	4016	0,43	10,30	0,60	10,3	92,37
CEM I42,5 R + 15 M.-% MK w/f 0,21	0,21	4884	4036	0,43	9,50	0,30	6,15	90,09
CEM II/A-LL 42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SIC w/f = 0,21	0,21	6512	5382	0,32	8,75	0,60	8,75	93,08
CEM I42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SIC w/f 0,23	0,23	5131	4172	0,45	8,30	0,30	6,3	95,25
CEM I42,5 R + 5 M.-% SIC w/f 0,19	0,19	5106	4291	0,37	7,15	0,60	7,15	91,60
CEM I42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SIC w/f 0,21	0,21	5131	4241	0,41	6,05	1,20	6,05	91,38

9. Literatur

- 1 Shackel, Brian:
Handbuch Betonsteinpflaster: Bemessung, Konstruktion, Ausführung
Düsseldorf, Beton-Verlag 1996
- 2 Verzeichnis Betonteile, Güteschutz Beton Düsseldorf:
<http://gueteschutz-beton.de/neues-verzeichnis-betonteile>
- 3 DIN EN 1338: 2003-08 Pflastersteine aus Beton
- 4 DIN EN 1339: 2003-08 Platten aus Beton
- 5 DIN EN 1340: 2003-08 Bordsteine aus Beton
- 6 DIN EN 13198: 2003-09 Betonfertigteile–
Straßenmöbel und Gartengestaltungselemente
- 7 DIN EN 771-3: 20145-11 Mauersteine aus Beton
- 8 DIN EN 490: 2005-03 Dach- und Formsteine aus Beton
für Dächer und Wandbekleidungen - Produkthanforderungen
- 9 DIN EN 1916: 2003-04 Rohre und Formstücke aus Beton,
Stahlfaserbeton und Stahlbeton
- 10 DIN EN 1917: 2003-04 Einstieg- und Kontrollschächte aus Beton,
Stahlfaserbeton und Stahlbeton
- 11 DIN EN 1168: 2011-12 Betonfertigteile - Hohlplatten
- 12 DIN EN 12737:2008-02 Betonfertigteile - Spaltenböden für die Tierhaltung
- 13 Kuch, H., Schwabe, J.-H., Palzer, U.:
Herstellung von Betonwaren und Betonfertigteilen
Verlag Bau+Technik GmbH 2009
- 14 Peckworth, Howard F.:
Concrete Pipe Handbook
American Concrete Pipe Association, Virginia 1967
- 15 Kuch, Helmut; Schwabe, Jörg-Henry; Palzer, Ulrich:
Formgebung und Verdichtung von Gemengen Beton-Keramik-Asphalt
Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH 2012
- 16 Unterlechner, G.:
Betonsteinpflaster – Produktion;Verlegung
Beton- und Fertigteil-Jahrbuch 1985
Bauverlag Wiesbaden-Berlin
- 17 Lichtmann, Michael:
Maßgeschneiderte Betonqualitäten im Schnelltest
BWI Betonwerk International Nr. 2/1999, S. 151-152

- 18 Lichtmann, M.; Heinz, D.; Hugot, A. :
Optimierung erdfeuchter Betone mit Steinkohlenflugasche
Teil II – Stoffe, Verfahren, Dauerhaftigkeit
14. Internationale Baustofftagung September 2000
Ibausil Bauhaus-universität Weimar
Tagungsbericht – Band 2
- 19 Lichtmann, Michael; Groß, Andreas:
Praxisgerechte Bestimmung des optimalen Wassergehaltes von
selbstverdichtendem Beton
VDB Information 93/05
Verband Deutscher Betoningenieure e.V., Düsseldorf
- 20 Wierig, Hans-Joachim:
Untersuchungen an grünen Betonen
Bericht Nr. 71
Zement- und Betonlaboratorium Beckum 1972
- 21 Hillebrand, Karlheinz:
Wechselwirkung zwischen Beton und Vibration bei der Herstellung von
Stahlbetonrohren im Gleitverfahren
Dissertation Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität
Karlsruhe 1983
- 22 Bornemann, Roland:
Untersuchungen zur Modellierung des Frisch- und Festbetonverhaltens
erdfeuchter Betone
Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft Nr.4,
Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel 2005
- 23 Firmeninformation der Fa. Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH
Gewerbestr. 4, D-84428 Buchbach
www.schleibinger.com
- 24 Masuch, Gabriele:
Zeitabhängige Konsistenzänderungen bei zementgebundenen Mörtelmischungen
Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen der Ruhr Universität Bochum 1990
- 25 Lowke, Dirk:
Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone
Optimierung auf Basis der Modellierung der interpartikulären Wechselwirkungen in
zementbasierten Suspensionen
Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität München, 2013
- 26 Breitenbücher, Rolf et. al.:
Selbstverdichtender Beton mit hoher Grünstandandsfestigkeit für den
Einsatz in Gleitschalungsfertigern im Betonstraßenbau
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 1068, 2012

- 27 Türk, M.; Schmidt, H.; Dähre, D.:
Rotationsviskosimeter für landwirtschaftliche fluide Fördermedien
Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft
Schlieben/Bornim der AdL der DDR
Agrartechnik, Berlin 37 (1987)
- 28 Kordts, Stefan:
Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften
selbstverdichtender Betone
Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 66
Verlag Bau und Technik GmbH 2005
- 29 DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton
Ausgabe November 2003
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin
- 30 Kézdi, Árpád E.h.:
Handbuch der Bodenmechanik
Band I: Bodenphysik
VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1969
- 31 DIN EN 206-1: 2001-07
Beton – Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- 32 DIN EN 12350-1:2009-08 Prüfung von Frischbeton - Teil 1: Probenahme
- 33 DIN EN 12350-2:2009-08 Prüfung von Frischbeton - Teil 2: Setzmaß
- 34 DIN EN 12350-3:2009-08 Prüfung von Frischbeton - Teil 3: Vébé-Prüfung
- 35 DIN EN 12350-4:2009-08 Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß
- 36 DIN EN 12350-5:2009-08 Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß
- 37 Venuat, Michel ; Papadakis, Michel:
Contrôle et Essais des Ciments, Mortieres, Bétons
Édition Eyrolles, Paris 1961
- 38 Tattershall, G. H.:
Workability and Quality Control of Concrete
E & FN Spon, 1991
- 39 Wesche, vom Berg:
Rheologische Eigenschaften von Zementleim und Frischbeton
Betontechnische Berichte 1973
- 40 Wierig, Hans-Joachim:
Verfahren zur Prüfung der Konsistenz von Frischmörtel und Frischbeton
Schriftenreihe des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie
1984
- 41 Bartos:
Fresh Concrete- Properties and Tests
Departement of Civil Engineering, Paisley College, Scotland UK
ELSEVIER 1992

- 42 Biscopig, Michaela; Richter, Thomas:
Frischbeton Eigenschaften und Prüfungen
Zement-Merkblatt Betontechnik B4, 3.2013
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- 43 Beyer, Edwin; Klose, Norbert:
Beton-Prüfung nach Norm
Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Köln
9. Auflage-Düsseldorf: Beton-Verlag 1994
- 44 Recommended practise for selecting proportions for non-slump concrete
ACI Journal April 1974
- 45 Rebut, P.:
Guide Pratique de la Vibration des Betons
Editeur Eyrolles, Paris 1962
- 46 Paakinen, Ilmari:
Intensive Compaction tester
Nordic Concrete Research No.5, 1986
- 47 Hüsken, Götz:
A Multifunctional Design Approach for Sustainable Concrete -
With Application to Concrete Mass Products
Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, The Netherlands 2010
ISBN 978-90-6814-631-8
- 48 Güteschutz Beton, Düsseldorf:
Interne Auswertung von Überwachungsberichten,2015
- 49 Wierig, Hans-Joachim:
Technologie der Betone aus erdfeuchten Mischungen
FBF-Betondienst Sonderausgabe 1995
zum 39. Ulmer Beton-und Fertigteiltag
Fachvereinigung der Beton- und Fertigteilindustrie Baden- Württemberg
- 50 Wierig, Hans-Joachim:
Einige Beziehungen zwischen den Eigenschaften von
grünen und jungen Betonen und denen des Fesbetons
in: Betontechnische Berichte 1971
Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf
- 51 Bobe, Rolf; Hubacek, Helga:
Bodenmechanik
Bauverlag Berlin, 1984
- 52 VDZ-Tätigkeitsbericht 2005-2007, S. 118
- 53 Höveling, Holger:
Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB)
Dissertation, Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 4
Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Universität Hannover 2006

- 54 Splittgerber, Frank:
Identifizierung der Zementart in Zementsteinen und die Übertragbarkeit auf
Mörtel und Betone
Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar 2012
- 55 Segment November 2009
Ein weiterer Baustein für die Entsorgungssicherheit der Kraftwirtschaft
Evonik Power Minerals GmbH, Duisburger Straße 170, 46535 Dinslaken
- 56 STEAG Power Minerals GmbH, Dinslaken
- 57 Fuchs, Christian:
Schadstoffminderung für Abgase aus Abfallverbrennungsanlagen
in: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Löschau, M. (Hrsg.):
Immissionsschutz, Band 4
Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 119-132
- 58 Bönsch, Carola:
Auswirkungen der Saugspannung auf physikalische und mechanische
Eigenschaften von überkonsolidierten Tonen und Tonsteinen im
Verwitterungsprozess
Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- 59 Rump, Hermann Arnold:
Untersuchung und Beschreibung physikalischer Mechanismen von Adhäsion in
mikromechanischen Inertialsensoren
Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
(Ingenieurwissenschaftlicher Bereich) der Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg; Dissertation 2001
- 60 Voth, Berthold:
Boden, Baugrund und Baustoff
Bautechnische Eigenschaften und Kenngrößen
Bauverlag GmbH Wiesbaden, Berlin 1978
- 61 Schaafsma, Stefan H.; Vonk, Pieter; Segers, Pythia; Kossen, Nico W. F.:
Description of agglomerate growth
Powder technology 97 (1998), S. 183-190
- 62 Halsley, Thomas C.; Levine, Alex J.:
How Sandcastles Fall
Physical Review Letters 6. April 1998, Volume 80,
Number 14 page 3141-4144 The American Physical Society
- 63 Reschke, Thorsten:
Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung
und die Festigkeit von Beton
Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 62
Verlag Bau + Technik 2001, Düsseldorf

- 64 Krell, Jürgen:
Die Konsistenz von Zementleim, Mörtel und Beton und ihre zeitliche Veränderung
Beton-Verlag 1985, Düsseldorf
- 65 Hunger, M.; Brouwers, H.J.H.:
Flow analysis of water–powder mixtures: Application to
specific surface area and shape factor
Cement & Concrete Composites 31 (2009) 39–59, Elsevier
- 66 Geisenhanslücke, Carsten:
Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen
Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft Nr. 13
Kassel University Press 2009
- 67 Stieß, M.:
Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1 ,
3. überarbeitete Auflage(2009), Springer Verlag
- 68 Keil, Fritz:
Zement- Herstellung und Eigenschaften
Springer Verlag 1971
- 69 Lowke, Dirk:
Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 611,
Beuth Verlag 2015
- 70 Zingg, Anatol:
Cement-Superplasticizer Interaction: link between macroscopic phenomena
and microstructural data of the early cement hydration
Swiss Federal institute of Technology Zurich
Dissertation 2008, Diss. ETH No. 17645
- 71 Zement- Taschenbuch 2000
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
Verlag Bau + Technik, 2000
- 72 Czernin, Wolfgang:
Zementchemie für Bauingenieure
Bauverlag GmbH Wiesbaden, 1960
- 73 Rößler, Christiane:
Hydratation, Fließfähigkeit und Festigkeitsentwicklung von Portlandzement -
Einfluss von Fließmitteln, Alkalisulfaten und des Abbinderegler
Dissertation am F.A. Finger Institut für Baustoffkunde
(Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar) 2006
- 74 Breughel van, Klaas:
Simulation of Hydration and Formation of Structure in Hardening Cement-Based
Materials; Second Edition Revised version of the author' s PhD-Thesis
Delft University Press 1997

- 75 Seemann, Stefan:
Einfluss des Mahlsystems und der Mühlenatmosphäre auf die Zementeigenschaften
Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 75/ 2010,
Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf
- 76 Igwe, Godwin J. I.:
Powder technology and miltiphase systems
Ellis Horwood Limited 1991, ISBN 0-13-680885-9
- 77 Shinohara, Kunio:
Fundamental Properties of Powders
Part 1: Rheological Property of Particulate Solids
in: Handbook of Powder Science and Technology , edited by M.E. Fayed, L.Otten
Van Norstrand Reinhold Company VNR 1983
- 78 Iwadate, Yuki; Horio, Masayuki:
Prediction of agglomerate sizes in bubbling fluidized beds of Group C powders
Powder Technology 100 (1998), 223-236
- 79 Suzuki, Michitaka; Oshima, Toshio:
Estimation of the Co-ordination Number in a Multi-Component Mixture of Spheres
Powder Technology 35 (1983), S. 159-166
- 80 Randall, M. German:
Coordination number changes during powder densification
Powder Technology 253 (2014) 368–376, Elsevier
- 81 Teichmann, Thomas:
Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein
Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12
Kassel University press 2008
- 82 Wright, Phillip C.; Raper, Judy A.:
Examination of dispersed liquid- phase three-phase fluidized beds
Part 1. Non-porous, uniform particle systems
Powder Technology 97 (1998), Elsevier
- 83 Schumann, Matthias:
Einfluss von Adsorptionsschichten auf die Fließfähigkeit feiner Schüttgüter
Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik der
Technischen Universität Bergakademie Freiberg
Dissertation 2005
- 84 Keil, F. :
Gedanken zur Theorie der hydraulischen Erhärtung
Zement-Kalk-Gips, Heft 5, 1967
Bauverlag, Wiesbaden
- 85 Coelho, M.C.; Harnby, N.:
Moisture Bonding in Powders
Powder Techonlogy 20 (1978), Elsevier

- 86 Flühler, Hannes:
Physik der Ungesättigten Zone
Skript Wintersemester 2003/04
ETH Zürich und Kurt Roth, Universität Heidelberg
- 87 Schubert, Helmar:
Grundlagen des Agglomerierens
Chem.-Ing.-Tech. 51 (1979) Nr.4, S.266 - 277
- 88 Schubert, Heinrich:
Aufbereitung mineralischer Rohstoffe
Band III, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1984
- 89 Kohlrausch, Friedrich:
Praktische Physik I
B.G. Teubner, Stuttgart 1996
- 90 Hartmüller, Jürgen; Ripperger, Siegfried:
Berechnung der Haftung von Pulverpartikeln an strukturierten Oberflächen
Chem. Ing. Tech.2014, 86, No.8, 1260-1268
Wiley-VCH Verlag, Weinheim
- 91 Day, R.; Hedley, A.B.:
Modelling the flow characteristics of moist particulate materials
European Symposium Particle Technology (Amsterdam)1980 Part B
European Federation of Chemical Engineering, Publ.-Ser. No. 7
- 92 Mehrotra, V.P., Sastry, K.V.S.:
Pendular Bond Strength Between Unequal-Sized Spherical Particles
Powder Technology 25 (1980), S. 203-214
Elsevier
- 93 Schubert, H.; Herrmann, W.; Rumpf, H.:
Deformation Behaviour of Agglomerates under Tensile Stress
Powder Technology 11(1975), 121-131
- 94 Locher, Friedrich W.:
Zement – Grundlagen der Herstellung und Verwendung
Verlag Bau + Technik, Düsseldorf 2000
- 95 Föll, Helmut:
http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_7/illustr/t7_1_2.html
Einführung in die Materialwissenschaft I online-skript
Christian-Albrechts-Universität Kiel Technische Fakultät
Allgemeine Materialwissenschaften AMAT
- 96 Lan, G.; Thornton, C.; Adams, M.J.:
A theoretical Study of the Liquid Bridge Forces between
Two Rigid Spherical Bodies
Journal of Colloid Interface Science 1993, 161, S. 138-147
- 97 Schubert, H.:
Mechanische Verfahrenstechnik
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1986

- 98 Baumer, Doris:
Zwischenmolekulare Wechselwirkungen an Flüssig/Gas und Flüssig/Flüssig-
Grenzflächen: Messung der Adsorption von Dämpfen auf Flüssigkeitsoberflächen
durch Bestimmung der Oberflächenspannung
Dissertation Universität Bochum, 1978
- 99 Zhou, Tao; Li, Hongzhong:
Estimation of agglomerate size for cohesive particles during fluidization
Powder Technology 101 (1999), Elsevier
- 100 Massimilla, L., Donsì, G.:
Cohesive Forces Between Particles of Fluid-Bed Catalysts
Powder Technology 15 (1976), S. 253-260, Elsevier
- 101 Krupp, H.:
Particle Adhesion- Theorie and Experiment
Advanced Colloid Interface Science 1 (1967)
- 102 Molerus, O.:
Schüttgutmechanik
Grundlagen und Anwendungen in der Verfahrenstechnik
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1985
- 103 Meyer, Kathrin:
Nanomaterialien als Fließregulierungsmittel
Fakultät für Chemie und Pharmazie der
Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Dissertation 2003
- 104 Ahmadi, Goodarz:
London-Van-der-Waals-force
in: Course ME 437 Particle Transport, Deposition and Removal
Clarkson University
http://webspaces.clarkson.edu/projects/crcd/me437/downloads/5_vanderWaals.pdf
- 105 Haist, Michael:
Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen
Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH) Dissertation 2009
- 106 Kohler, Hans-Helmut:
Physikalische Chemie der Grenzflächen und Strukturen
Vorlesungsmanuskript Physikalische Chemie WS 2007/2008
Institut für Analytische Chemie, Chemo- und Biosensorik UNI Regensburg
- 107 Tomas, Jürgen:
Partikelmechanik und Schüttguttechnik, Kontakt- und Kontinuumsmechanik
Skript 2014
Lehrstuhl für mechanische Verfahrenstechnik,
Otto von Guericke Universität, Magdeburg
www.mvt.ovgu.de/mvt_media/Vorlesungen/VO_PM_SGT/Schuettec_3.pdf

- 108 Kadlecek, VladisJav; Dohnalek, Jiri:
Mikrohärteprüfung von Beton
Betontechnischer Bericht 1982-1983, S. 41-60
Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf
- 109 Railsback, L. Bruce:
Some Fundamentals of Mineralogy and Geochemistry
<http://www.gly.uga.edu/railsback/Fundamentals/HardnessTrends29IL.pdf>
Department of Geology, University of Georgia, Athens,
Georgia 30602-2501 U.S.A. , 2016-12
- 110 Englert, Markus:
Einfluss mechanischer Dispergiervverfahren auf Struktur und Eigenschaften
duroplastischer Nanoverbundwerkstoffe
Fachbereich für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der
Technischen Universität Kaiserslautern, 2009
- 111 Weber, Stefanie:
Untersuchungen zum Einfluss der Mischintensität auf die Potenz
nanostrukturierter Fließregulierungsmittel
Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Dissertation 2009
- 112 Linsenbühler, Marcus:
Herstellung und Charakterisierung funktionalisierter Composite-Partikel
Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg
Dissertation 2005
- 113 Atkins, Peter W.:
Physikalische Chemie
VCH Verlagsgesellschaft Weinheim, 1990
- 114 Nägele, E., Schneider, U.:
Das Zeta- Potential mineralischer Baustoffe- Theorie, Eigenschaften und
Anwendungen
TIZ International Vol. 112, No. 7 1988
- 115 Schubert, H.:
Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe
Band II, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1967
- 116 Keck, Hans-Joachim:
Untersuchung des Fließverhaltens von Zementleim anhand rheologischer
Messungen
Diss. Univ,-GH Essen 1998, Shaker Verlag
- 117 Jacobasch, Hans-Jörg:
Zeta-Potential-Messung als Mittel zur Optimierung der
Gesteinsbearbeitung und- zerstörung
Baustoffindustrie 1986, Ausgabe Januar
- 118 VDZ-Tätigkeitsbericht 2003-2005, S. 105

- 119 Rumpf, Hans:
Die Wissenschaft des Agglomerierens
Chemie Ingenieur Technik 46. Jahrg. 1974/ Nr. 1, S. 1-11
- 120 Wright, Phillip; Raper, C; Judy, A.:
Examination of dispersed liquid-phase three-phase fluidized beds
Part 1. Non-porous, uniform particle Systems
Powder Technology 97 (1998), 208-226
- 121 Lang, Huder:
Bodenmechanik und Grundbau
Auflage 1985, Springer Verlag
- 122 Kézdi, Árpád:
Fragen der Bodenphysik
Düsseldorf, VDI- Verlag 1976
- 123 Zeh, R.:
Die Zugfestigkeit bindiger Böden als Kriterium für die Rissgefährdung
mineralischer Oberflächenabdichtungen;
Dissertation Fakultät für Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar
- 124 Kézdi, E. H. Árpád:
Handbuch der Bodenmechanik
Band III: Bodenmechanisches Versuchswesen
VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1973
- 125 Rumpf, H.; Pietsch, W.:
Haftkraft, Kapillardruck, Flüssigkeitsvolumen und Grenzwinkel einer
Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln
Chemie Ingenieur Technik 1967, Heft 15, S. 885-936
- 126 Rumpf, H.:
Zur Theorie der Zugfestigkeit von Agglomeraten bei Kraftübertragung an den
Kontaktpunkten
Chemie-Ingenieur-Technik 42. Jahrgang 1970, Nr. 8, S. 538-540
- 127 Turba, E., Rumpf, H.:
Zugfestigkeit von Preßlingen mit vorwiegender Bindung durch
Van-der-Waals-Kräfte und ihre Beeinflussung durch Adsorptionsschichten
Chemie- Ing. Technik 36. Jahrgang 1964, Nr. 3, S. 230-240
- 128 Cheng, D. C. - H.:
The tensile strength of powders
Chemical Engineering Science 1968, Vol.23, S. 1405-1420
- 129 Kocova, Silva; Pilpel, N.:
The tensile Properties of mixtures of cohesive powders
Powder technology 7 (1973), S. 51-67
- 130 Hartley, P. A.; Parfitt, G. D.; Pollack, L. B.:
The role of Van Der Waals Force in the Agglomeration of Powders Containing
Submicron Particles
Powder Technology 42 (1985), 35-46

- 131 Hartmüller, J.; Ripperger, S.:
Die Haftung von Partikeln an Bauteiloberflächen
Teil 2: Theoretische Abschätzung von Haftkräften aufgrund
von Flüssigkeitsbrücken
F & S Filtrieren und Separieren, Jahrgang 28 (2014) Nr. 5, S. 274-277
- 132 Kusche, Nina:
Entwicklung und Erprobung eines Versuchsprogramms zur Ermittlung der
zentrischen Zugfestigkeit von erdfeuchten Zementleimen
Diplomarbeit Bergische Universität Wuppertal Fachbereich D
Abteilung Bauingenieurwesen Lehr- und Forschungsgebiet
Konstruktiver Ingenieurbau, Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Klingsch, 2010
- 133 Aldave, Julianne Karyn Núñez:
Weiterentwicklung eines Versuchsprogramms zur Ermittlung der zentrischen
Zugfestigkeit von erdfeuchten Zementleimen
Studienarbeit am Lehr- und Forschungsgebiet Konstruktiver Ingenieurbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Klingsch, Bergische Universität Wuppertal 2010
- 134 Bommers, Gerd Johannes:
Erprobung und Anwendung einer neuen Versuchseinrichtung zur
Ermittlung der zentrischen Zugfestigkeit erdfeuchter Zementleime
Master-Thesis Bergische Universität Wuppertal Fachbereich D
Bauingenieurwesen, 2012
- 135 Stieß, Matthias:
Mechanische Verfahrenstechnik-Partikeltechnologie 1
3. Auflage 2009, Springer Verlag
- 136 Jenissen, H. P.:
Ultra-hydrophile metallische Biomaterialien
Biomaterialien 2(1),2001
- 137 Springenschmid, R.:
Betontechnologie für die Praxis
Bauwerk Verlag GmbH, Berlin (2007)
- 138 Firmeninformation der MOLLET Füllstandtechnik GmbH,
Industriepark RIO 103 74706 Osterburken
<http://www.mollet.de/info/schuettgutdichte.html>
- 139 Tigges, Vera Elisabeth:
Die Hydratation von Hüttensanden und Möglichkeiten ihrer Beeinflussung zur
Optimierung von Hochofenzementeigenschaften
Dissertation Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften der Technischen
Universität Clausthal 2009
- 140 Technische Informationen Metapor, Dennert Poraver GmbH 10/2012

- 141 Firmeninformation der Fa. Elkem Materials, Norway:
Guidance for the Specification of Silica Fume
C1-05 General Information, 2005-11
[https://www.elkem.com/en/documents/esm/concrete/
concrete-guide-pdfs/concrete-guidance-specification-silica-fume.pdf](https://www.elkem.com/en/documents/esm/concrete/concrete-guide-pdfs/concrete-guidance-specification-silica-fume.pdf)
- 142 Ehrenberg, Andreas:
Hohe Frühfestigkeit bei Zementen mit Hüttensand - (K)ein Widerspruch?
FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.,
Beton-Informationen, Heft 2 2005, 45. Jahrgang,
Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf
- 143 Kustermann, Andrea:
Einflüsse auf die Bildung von Mikrorissen im Betongefüge
Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur-
und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München
Heft 2 2005
- 144 Schorn, H.:
Damage process and fracture mechanism of uniaxially loaded concrete
Proceedings of JMX 13: Micromechanics of Concrete and Cementitious Composites,
C. Huet, Lausanne, 1993
- 145 <https://gsoil.wordpress.com/tag/clay/>
- 146 Seemann, Stefan:
Einfluss des Mahlsystems und der Mahlathmosphäre auf die Zementeigenschaften
Schriftenreihe der Zementindustrie H. 75, Verlag Bau+Technik 2010,
Diss. Technische Universität Clausthal 2008
- 147 Skowronnek, Kai:
Einfluss von Betonzusatzmitteln auf die zentrische Zugfestigkeit erdfeuchter
Zementleimgemische
Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Baustoffkunde der
Bergischen Universität Wuppertal 2018 (noch unveröffentlicht)
- 148 IGF-Vorhaben Nr.: 17853 BG, Kurzbericht
Granulometrie der Zementhauptbestandteile – Auswirkungen auf die
Dauerhaftigkeit von Betonen mit kalksteinhaltigen Zementen
VDZ gGmbH, Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf

Lebenslauf Dipl.-Ing. Stefan Zwolinski

Geboren am: 17.02.1967
In: Gelsenkirchen

Studium:

10/87-04/94 Studium an der Ruhr-Universität Bochum,
Fakultät für Bauingenieurwesen
Vertiefungsrichtung:
Umwelttechnik mit den Fächern Boden/ Deponien/ Altlasten/
Leitungsbau, Bauen und Umweltschutz/ Sanieren und Erhalten,
Bauverfahrenstechnik/ Tunnelbau/ Baubetrieb
Diplomarbeit:
Vergleichende Untersuchungen zu Dichtheitsprüfungen mit
verschiedenen Prüfmedien.

06/91-04/94 Wissenschaftliche Hilfskraft in der Arbeitsgruppe
Leitungsbau und Leitungsinstandhaltung

Beruf:

07/94-02/97 Güteschutz Beton Nordrhein-Westfalen Beton-
und Fertigteilwerke e.V., Düsseldorf
Überwachungsbeauftragter, Stellvertreter des Geschäftsführers

02/95 Nachweis erweiterter betontechnologischer Kenntnisse
(E-Schein)

02/96-04/96 div. Lehrgänge zum Fachauditor Bau für die Zertifizierung
von Qualitätsmanagementsystemen nach DIN EN ISO 9001

1996-2011 als Auditor für QM-Systeme tätig für QMB-Zert Büro Hannover
(ehemals Güteschutz Nord)

seit 2012 als Auditor für QM-Systeme tätig für VDZ/FIZ Düsseldorf

seit 03/97 Geschäftsführer und Leiter der Überwachungs- und
Zertifizierungsstelle (ÜG026) und der notifizierten Stelle
(notified body Nr. 0793) Güteschutz Beton

seit 11/02 Lehrbeauftragter an der Fakultät für Baustofftechnologie und
Brandschutz, Bergische Universität Wuppertal-
Fachgebiet: Betontechnologie Vertiefung
(zur Erlangung des theoretischen Teiles d. E-Scheines)

seit 08/08 Stellvertretender Leiter der Überwachungs- und
Zertifizierungsstelle und der notifizierten Stelle Güteschutz- und
Landesverband Beton- und Bimsindustrie Rheinland-Pfalz e.V. Abt.
Überwachung- und Zertifizierung

seit 01/11 Dozent beim Aus- und Weiterbildungszentrum Kreuztal

seit 01/17 Stellvertretender Leiter der Überwachungs- und
Zertifizierungsstelle und der notifizierten Stelle Güteschutz
Hessenbeton, Wiesbaden

Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau

Bergische Universität Wuppertal

- Heft 1 Andres, M.: Zum Stabilitätsnachweis von Schalentragsystemen aus Hochleistungsbeton, 2004; ISBN 978-3-940795-00-7
- Heft 2 Wörmann, R.: Zur Erfassung hygrothermischer Einflüsse auf das nicht-lineare Trag- und Schädigungsverhalten von Stahlbetonflächentragsystemen, 2004; ISBN 978-3-940795-01-4
- Heft 3 Piel, W.: Zur Erhöhung der Durchstanztragfähigkeit von Flachdecken mit Stahlverbundsystemen, 2004; ISBN 978-3-940795-02-1
- Heft 4 Mahran, E.: Finite-Infinite-Elemente-Modellierung zur Simulation der Boden-Bauwerk-Flüssigkeit-Interaktion unter dynamischer Anregung, 2004; ISBN 978-3-940795-03-8
- Heft 5 Eusani, R.: Zur numerischen Zeitbereichssimulation der Aeroelastischen Instabilität bei Seilbrücken, 2005; ISBN 978-3-940795-04-5
- Heft 6 Stracke, J.: Flachdecken aus Konstruktions - Leichtbeton, 2005; ISBN 978-3-940795-05-2
- Heft 7 Hanswille, G., Porsch, M., Üstündağ, C.: Versuchsbericht SFB 398 - Projekt C8 -Teil 1, 2007; ISBN 978-3-940795-06-9
- Heft 8 Schäfer, M.: Zum Tragverhalten von Flachdecken mit integrierten hohlkastenförmigen Stahlprofilen, 2007; ISBN 978-3-940795-07-6
- Heft 9 Üstündağ, C.: Beitrag zur Bemessung von Verbundträgern unter ermüdungswirksamen Beanspruchungen, 2007; ISBN 978-3-940795-08-3
- Heft 10 Hanswille, G., Porsch, M.: Versuchsbericht über die Durchführung von 36 Push-Out-Versuchen; ISBN 978-3-940795-09-0
- Heft 11 Hanswille, G., Porsch, M.: Metallurgische Untersuchungen an Schweißnahtverbindungen, 2008; ISBN 978-3-940795-10-6
- Heft 12 Jamali, N.: On the Numerical Simulation of Friction-Isolated Structures, 2008; ISBN 978-3-940795-11-3
- Heft 13 Lippes, M.: Zur Bemessung von Hohlprofil – Verbundstützen aus hochfesten Stählen und Betonen, 2008; ISBN 978-3-940795-12-0
- Heft 14 Mihajlov, V.: Numerical Model for Spatial Steel and Composite Frame-Structures Exposed to Fire and Elevated Temperatures, 2009; ISBN 978-3-940795-13-7

Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau

Bergische Universität Wuppertal

- Heft 15 Neuhaus, C.: Zur Identifikation selbsterregter aeroelastischer Kräfte im Zeitbereich, 2010; ISBN 978-3-940795-14-4
- Heft 16 Stopp, K.: Trag- und Verformungsverhalten großflächig gegründeter Stahlbetontragwerke unter Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Interaktion, 2010; ISBN 978-3-940795-15-1
- Heft 17 Porsch, M.: Modellierung von Schädigungsmechanismen zur Beurteilung der Lebensdauer von Verbundkonstruktionen aus Stahl und Beton, 2010; ISBN 978-3-940795-16-8
- Heft 18 Mannsfeld, T.: Tragverhalten von Stahlbetonflächentragwerken unter Berücksichtigung der temperaturbedingten Nichtlinearitäten im Brandfall, 2011; ISBN 978-3-940795-17-5
- Heft 19 Gelien, M.: Ein Beitrag zur Bemessung von Stahlbetonstützen im Brandfall, 2011; ISBN 978-3-940795-18-2
- Heft 20 Festschrift Gerhard Hanswille, 2011; ISBN 978-3-940795-19-9
- Heft 21 Bergmann, M.: Zur Bemessung von Hohlprofilverbundstützen im Brandfall; ISBN 978-3-940795-20-5
- Heft 22 Peter, C.: Tragverhalten von Verkehrstunneln im Brandfall mit einer Innenschale aus PP-Faserbeton, ISBN 978-3-940795-21-2
- Heft 23 Chanou, M.: Zum Tragverhalten von Hohlprofil-Verbundstützen mit Mehrkernquerschnitten, 2018; ISBN 978-3-940795-22-9
- Heft 24 Menkenhagen, P.: Beitrag zum Tragverhalten des Lasteinleitungsbereiches von Hohlprofil-Verbundstützen unter Berücksichtigung der Verformungseigenschaften von Schubringen, 2019; ISBN 978-3-940795-23-6
- Heft 25 Zwolinski, S.: Ermittlung der Grünzugfestigkeit erdfeuchter Zementleimgemische als Grundlage für die Optimierung der Produktion von sofort entschalteten Betonwaren, 2019; ISBN 978-3-940795-24-3