

Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau
Structural Materials and Engineering Series

Heft 4
No. 4

**Untersuchungen zur Modellierung des Frisch- und
Festbetonverhaltens erdfeuchter Betone**

Roland Bornemann

Diese Arbeit entstand am Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens als eine vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel genehmigte Dissertation

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Schmidt

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert

Dritter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Januar 2005

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2005

ISBN 3-89958-132-6

URN urn:nbn:de:0002-1328

© 2005, kassel university press GmbH, Kassel
www.upress.uni-kassel.de

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmidt
Universität Kassel
Fachbereich Bauingenieurwesen
Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens
Mönchebergstr. 7
34125 Kassel
Tel. +49 (561) 804 2601
Fax +49 (561) 804 2662
baustk@uni-kassel.de
www.uni-kassel.de/fb14/baustoffkunde

Prof. Dr.-Ing. E. Fehling
Universität Kassel
Fachbereich Bauingenieurwesen
Fachgebiet Massivbau
Mönchebergstr. 7
34125 Kassel
Tel. +49 (561) 804 2656
Fax +49 (561) 804 2803
bauing.massivbau@uni-kassel.de
www.uni-kassel.de/fb14/massivbau

Druck und Verarbeitung: Unidruckerei der Universität Kassel
Printed in Germany

Vorwort der Herausgeber

Erdfeuchter Beton ist ein technologischer "Zwitter": Im frischen und jungen (grünen) Zustand verhält er sich zunächst ähnlich wie ein gemischkörniger Boden. Durch die hohe innere Reibung und den kohäsiven Zusammenhalt der Partikel kann er unmittelbar nach dem Verdichten entformt, transportiert und gelagert werden, ohne dass er zerfällt oder dass er sich unzulässig verformt. Mit zunehmender Erhärtung wird er zu einem sehr festen und widerstandsfähigen Beton, der z.B. als Pflasterstein jahrzehntelang starke Verkehrsbelastungen ebenso dauerhaft erträgt wie die scharfe Beanspruchung durch Frost- und Tausalz.

Der vorliegende 4. Band der *Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau* enthält die umfangreichen Untersuchungen und theoretischen Betrachtungen, mit denen es dem Verfasser gelungen ist, im Rahmen seiner am Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens der Universität Kassel angefertigten Dissertation, die systemischen Beziehungen aufzuzeigen, die zwischen der Zusammensetzung und Verdichtung des frischen erdfeuchten Betons, seiner Grünstandfestigkeit und der Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Festbeton bestehen.

Die Arbeit enthält nicht nur neue, wissenschaftlich abgesicherte Erkenntnisse über die besonderen geotechnischen und betontechnologischen Grundlagen erdfeuchter Betone. Es wird auch sehr praktisch aufgezeigt, wie der Beton im Einzelfall optimiert und auf die bestehenden Verdichtungseinrichtungen abgestimmt werden kann, um die Produktqualität, die Produktionssicherheit und die Wirtschaftlichkeit zu verbessern.

Es bleibt zu hoffen, dass diese Erkenntnisse genutzt werden.

Kassel, im März 2005

Die Herausgeber

Inhaltsverzeichnis

1 Vorwort.....	6
2 Einleitung.....	6
3. Ziele der Arbeit.....	8
4 Stand der Kenntnis.....	10
4.1 Wichtige Eigenschaften erdfeuchter Betone.....	10
4.2 Prüfverfahren für erdfeuchte Betone.....	11
4.3 Modelle und Verfahren der Bodenmechanik zur Beschreibung und Berechnung des Tragverhaltens von Feinststoffen und Böden.....	13
4.3.1 Beschreibung der physikalischen Bindungsmechanismen.....	15
4.3.2 Methoden der Geotechnik zur Beurteilung von Böden.....	20
4.3.3 Grünstandfestigkeit erdfeuchter Betone.....	23
4.4 Festbetoneigenschaften.....	26
4.4.1 Einfluss des Bindemittels auf die Festbetoneigenschaften.....	28
4.4.2 Einfluss der Packungsdichte auf die Festbetoneigenschaften.....	30
4.4.2.1 Packungsdichte von Gesteinskörnungen.....	30
4.4.2.2 Der Füllungsgrad der Gesteinskörnung mit Feinleim: Auswirkung auf die Betonfestigkeit.....	32
4.4.2.3 Packungsdichte von Feinststoffen.....	33
4.4.3 Dauerhaftigkeitsaspekte.....	36
5 Ein Prüfverfahren für erdfeuchte Betone.....	37
5.1 Aufbau des Prüfgeräts.....	39
5.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisauswertung.....	40
5.3 Quantifizierung der Verdichtungsarbeit des Schlagproctors nach DIN 18127 und des Rüttelproctors.....	43
5.4 Wiederholgenauigkeit des Prüfsystems.....	45

6 Hauptversuche	47
6.1 Verwendete Ausgangsstoffe.....	47
6.1.1 Gesteinskörnungen.....	47
6.1.2 Zemente.....	47
6.1.3 Inerte/reaktive Füllstoffe.....	48
6.1.4 Zusammensetzung der untersuchten erdfeuchten Gemische.....	50
6.1.5 Zusatzmittel.....	51
6.1.6 Prüfverfahren.....	51
6.2 Modellierung der Eigenschaften erdfeuchter Betone.....	52
6.3 Das Tragverhalten erdfeuchter Betone im grünen Zustand.....	58
6.3.1 Analyse des Tragverhaltens mittels bodenmechanischer Messmethoden.....	58
6.3.2 Einfluss von Feinststoff und Gesteinskörnung auf die Tragfähigkeit im grünen Zustand.....	63
6.4 Ein dreidimensionales Ingenieurmodell auf Basis von w/f-Wert und Packungsdichte.....	71
6.4.1 Grundlagen.....	71
6.4.2 Der gravimetrische Wasser-Feinststoffwert (w/f) als beschreibende Größe für Gefügehomoenität und die Wirkung von Adhäsionskräften....	73
6.4.3 Umsetzung.....	75
6.5 Festbetoneigenschaften.....	77
6.6 Ausweitung des Modells auf erdfeuchte Betone mit Zusatzstoffen- und Zusatzmitteln.....	84
6.6.1 Einfluss der Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung und Feinststoffe auf Wasseranspruch und Packungsdichte.....	85
6.6.2 Übertragung der Erkenntnisse auf zementgebundene Systeme.....	92
6.6.2.1 <i>Materialien und Sieblinien der Gesteinskörnungen und Feinststoffe</i>	93
6.6.2.2 <i>Wirkung von Fließmittel und feinststofflicher Optimierung auf Packungsdichte und Wasseranspruch erdfeuchter Betongemische</i>	94

6.6.2.3 <i>Wirkung von Fließmittel und feinststofflicher Optimierung auf Gründruckfestigkeit und Robustheit erdfeuchter Betongemische.....</i>	96
6.6.2.4 <i>Anwendung des dreidimensionalen Zusammenhangs zwischen Packungsdichte, w/f-Wert und Gründruckfestigkeit auf modifizierte erdfeuchte Betone.....</i>	101
6.6.3 <i>Anwendung des dreidimensionalen Zusammenhangs zwischen Packungsdichte, w/f-Wert und 28-Tagefestigkeit auf modifizierte erdfeuchte Betone.....</i>	102
6.6.3.1 <i>Probenauswahl.....</i>	102
6.6.3.2 <i>Einordnung optimierter erdfeuchter Betone in den dreidimensionalen Zusammenhang</i>	105
6.6.4 <i>Ausweitung des Modells auf die Dauerhaftigkeit erdfeuchter Betone.....</i>	108
6.6.4.1 <i>Schädigungsmechanismus bei einem Frostangriff.....</i>	108
6.6.4.2 <i>Einfluss von w/z-Wert und Packungsdichte auf die Dauerhaftigkeit.....</i>	109
7 Zusammenfassung.....	112
7.1 <i>Veranlassung und Ziele der Arbeit.....</i>	112
7.2 <i>Vorgehensweise.....</i>	112
7.3 <i>Wesentliche Ergebnisse.....</i>	113
7.3.1 <i>Analysen erdfeuchter Betone mittels Rüttelproctor.....</i>	113
7.3.2 <i>Tragfähigkeit im sofortentschalten „grünen“ Zustand.....</i>	114
7.3.3 <i>Festbetoneigenschaften.....</i>	116
7.3.4 <i>Optimierte erdfeuchte Betone.....</i>	117
8 Ausblick.....	118
9 Literatur.....	120

Anhänge

Anhang A.....	128
1 Chemische Zusammensetzung der Feinststoffe.....	128
2 Gesteinskörnung.....	129
Anhang B.....	132
1 Überlagerung der Betoneigenschaften am Punkt der optimalen Packungsdichte.....	132
2 Entwicklung der Gründruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Feinleimgehalt.....	133
3 Zusammenhang zwischen w/f-Wert und Feinleimgehalt.....	136
4 Packungsdichte der Gesteinskörnung.....	136
5 Rahmenscherversuche.....	137
6 Einfluss von Feinststoff und Gesteinskörnung auf die Tragfähigkeit im grünen Zustand.....	141
7 Rücktrocknungsversuche.....	142
8 Dreidimensionales Ingenieurmodell der Gründruckfestigkeit.....	143
9 Rechengang zur Bestimmung der Flächenfunktion.....	144
10 Fehlerabschätzung.....	145
Anhang C.....	146
1 Kapillarporosität des Zementsteins.....	146
2 Packungsdichte, Feinleimgehalt und Festigkeit.....	146
3 Dreidimensionales Ingenieurmodell auf Basis von w/z-Wert und Packungsdichte.....	148
4 Regressionsgleichungen.....	150
5 Fehlerabschätzung der Ebenengleichung.....	154
6 Festigkeitssteigerung durch die Verwendung von CEM I 52,5 R und/oder gebrochener Gesteinskörnung.....	156

Anhang D	158
1 Zusammensetzung des Feinststoffs und Proctorwerte der Feinstquarz“betone“.....	158
2 Packungsdichten und Mischungszusammensetzung der Ausfallsieblinien an W_{opt}	162
3 Rheologische Messungen an Quarzmehlgemischen mit Ausfallkörnung und Fließmittelzugabe.(FM 1254 der Fa. Woermann – Zugabemenge 7 M.-% v. Zementgewicht).....	162
4 Packungsdichten der stetigen Sieblinien an W_{opt}	163
5 Übertragung der Erkenntnisse auf zementgebundene Systeme.....	164
6 Feinststoffliche Optimierung erdfeuchter Betongemische.....	165
6.1 Gemische mit Flugaschezugabe (Flugasche FA).....	165
6.2 Gemische mit Feinstquarzzugabe (Feinstquarz FQ800).....	166
6.3 Gemische mit Kalksteinmehlzugabe (KSM BG).....	167
6.4 Gemische mit stetiger Sieblinie mit Zugabe zweier Kalksteinmehle (KSM C und BG).....	168
7 Gezielt auf Höhe gerüttelte Betone für die Festbetonuntersuchungen.....	169
7.1 Ausgangsmischungen ohne Zusatz von Fließmittel.....	169
7.2 Mischungen Typ 1.....	172
7.3 Mischungen Typ 2.....	174
7.4 Mischungen Typ 3.....	177
7.5 Mischungen Typ 4.....	180
8 Berechnung des Feststoffvolumens der Feinststoffe und des durch Hydratation chemisch und physikalisch gebundenen Wassers.....	182
9 Quecksilberdruckporosimetrie.....	183
Anhang E	187
1 Liste häufig verwendeter Bezeichnungen und Symbole.....	187

Untersuchungen zur Modellierung des Frisch- und Festbetonverhaltens erdfeuchter Betone

1 Vorwort

Nach ersten Vorüberlegungen und –untersuchungen erwies sich die Beantragung und nachfolgende Bewilligung eines Aif-Forschungsvorhabens als Glücksfall für die Bearbeitung der hier vorgestellten Dissertation. Durch die personellen Möglichkeiten war eine detaillierte und umfassende Betrachtung des Themas „erdfeuchter Beton“ möglich geworden. Ein so vielschichtiges Projekt lebt nicht nur von immer neuen Ideen, sondern auch vom unermüdlichen und umsichtigen Einsatz aller Beteiligten. An dieser Stelle sei stellvertretend für eine Vielzahl von Personen den Herren Dipl.-Ing. Gerd Beier, Dipl.-Ing. Christoph Oswald und Sascha Momberg – die über einen Zeitraum von rd. anderthalb Jahren unzählige Experimente durchführten - aufrichtig gedankt.

Den Anstoß zu dieser Arbeit gab Herr Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmidt. Durch sein beharrliches Drängen erdfeuchte Betone aus dem Blickwinkel der Bodenmechanik zu betrachten, trug er maßgeblich zum Gelingen bei. Für begleitende Diskussionen sei sowohl Ihm, Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert und Herrn Prof. H. Budelmann gedankt. Ebenso einen Dank an Herrn Prof. E. Fehling und Herrn Prof. Seim für die stets angenehme Zusammenarbeit.

2 Einleitung

„Ein Körper ist flüssig, wenn er in viele kleinere Teile aufgeteilt ist, die sich unabhängig voneinander bewegen und er ist fest, wenn alle seine Teile in Berührung miteinander stehen“

René Descartes, Prinzipien der Philosophie

Durch Ihre Standfestigkeit im sofortentschaltem Zustand sind erdfeuchte Betone im frischen Zustand der Bodenmechanik, durch ihre anschließende Erhärtung der Betontechnologie zuzuordnen. Im frischen Zustand entspricht der dann sogenannte „grünen Beton“ einem schwach bindigen Boden [Wierig 28]. Entsprechend sind die Eigenschaften, wenn ein solcher Beton bereits kurz nach seiner Herstellung entschalt und Belastungen durch

Transport und Lagerung unterworfen wird. An dieser Stelle wirken dann Größen wie innere Reibung und Kohäsion, wie sie aus der klassischen Bodenmechanik bekannt sind und für die Berechnung der Standfestigkeit von Böden Anwendung finden. Die Bodenmechanik hat zur Beurteilung und rechnerischen Prognose der Eigenschaften von Böden vielfältige Methoden entwickelt. Hierzu gehören u.a. Proctor- und Rahmenscherversuche, aber auch Rechenansätze für die Standfestigkeit unter Berücksichtigung des Wassergehalts, der Feinheit und der Menge des Füllstoffs/Feinststoffs.

Die sehr steife Konsistenz erdfeuchter Betongemische infolge geringer Wasser/Zement- bzw. Wasser/Feinststoffwerte und hoher innerer Reibung der groben Gesteinskörnung erfordert eine hohe Verdichtungsintensität. Hierfür sind leistungsstarke Verdichtungsgeräte, wie z.B. Pflastersteinfertiger und Rohrfertiger erforderlich. Vor dem Hintergrund des großen maschinentechnischen Aufwands wird häufig übersehen, dass auch in der stofflichen Optimierung des Betons noch erhebliche Potenziale stecken.

Für die Optimierung eines erdfeuchten Betons stellen die Prüfverfahren für Beton nach DIN EN 12350 nur unzureichende Hilfsmittel dar. Ein Beispiel ist der in dieser Norm beschriebene Verdichtungskastenversuch. Er unterteilt den Beton in 5 Konsistenzklassen (C0 – C5), wovon einzig die Konsistenzklasse C0 annähernd auf erdfeuchte Betone zutrifft, ohne eine genauere Differenzierung vorzunehmen. Alternativen bieten sich in der Bodenmechanik. Die hier standardisiert eingesetzten Verdichtungsversuche für nicht bindige bis bindige Böden beschreiben die Verdichtungswilligkeit bei konstantem Energieeintrag über die Dichte des Bodens bei unterschiedlichen Wassergehalten. Die innerhalb der europäischen Normung zulässigen Verfahren unterscheiden sich dabei in der Art des Energieeintrags. Grob kann unterschieden werden in stampfende, schlagende und Rüttelpress -Verfahren [48, 49, 50, 51]. Die Ideen und Ansätze dieser Verfahren wurden im Rahmen dieser Arbeit zur Entwicklung eines eigenständigen Prüfgeräts für erdfeuchte Betone genutzt.

Das Prüfgerät half dabei, ein Gesamtmodell für das Verhalten erdfeuchter Betone sowohl im nicht erhärteten „grünen“ als auch im erhärteten Zustand bilden zu können und Optimierungspotenziale durch die Verwendung von Feinststoffen und Zusatzmitteln aufzuzeigen. Die Ergebnisse dieser Arbeit können dazu dienen, die Eigenschaften im sofortentschalteten und erhärteten Zustand schon während der Beprobung prognostizieren zu können.

Der Einsatz von leistungsfähigen Fließmitteln in erdfeuchten Betonen stellt dabei keinen Widerspruch zum Wunsch nach hoher Grünstandfestigkeit dar. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass insbesondere die Verzahnung von grober Gesteinskörnung und Feinststoffen zur Tragfähigkeit im „grünen“ Zustand führt. Hierzu tragen leistungsfähige Fließmittel und Feinststoffe in besonderer Weise bei.

3 Ziele der Arbeit

Ziel der Arbeit war es, systematisch Wirkzusammenhänge zwischen der Gesteinskörnung (Sieblinie, Kornform) und den Eigenschaften der Feinststoffe (Reaktivität, Kornform und Menge) zu erkennen und so die Festigkeit erdfeuchter Betone sowohl im sofortentschalteten frischen als auch erhärteten Zustand prognostizieren zu können.

Die Modellierung und Beschreibung des Frisch- und Festbetonsverhaltens erdfeuchter Betone erforderte zunächst die Entwicklung eines reproduzierbar arbeitenden Prüfverfahrens, um die vielfältigen Faktoren erfassen zu können, die auf den Verdichtungsfortschritt und auf das Verdichtungsergebnis Einfluss nehmen. Bild 1 gibt hierzu einen Überblick. Aus diesem Grund wurde das Rüttelproctorverfahren entwickelt. Die Funktionsweise wird in Kapitel 5 beschrieben.

Die mit dem neuentwickelten Prüfverfahren erzielten Ergebnisse ermöglichten es, die Funktionsweise des erdfeuchten Betons im frischen („grünen“) und erhärteten Zustand zu verstehen, zu modellieren und zu prognostizieren.

Um die Prognose der Festigkeit von erdfeuchten Betonen sowohl im grünen wie im erhärteten Zustand zu ermöglichen, ist ein vertieftes Verständnis des Tragverhaltens notwendig. Aus diesem Grund wurden bodenmechanische Versuche (Rahmenscherversuche) und Festigkeitsuntersuchungen in Abhängigkeit von Wassergehalt und Packungsdichte der Feststoffe erdfeuchter Betone durchgeführt. Durch diese Versuche konnten Ansätze für ein geschlossenes Ingenieurmodell erarbeitet werden.

Auf Basis des vertieften Verständnisses der Zusammenhänge wurden im Anschluss erdfeuchte Betone stofflich optimiert und in das Ingenieurmodell integriert. Die Optimierung zielte dabei in erster Linie auf die Steigerung der Packungsdichte durch die Verbesserung der Kornzusammensetzung der Feinststoffe.

Last but not least sollte nach Möglichkeiten gesucht werden, auch die Dauerhaftigkeit von Betonen durch die für die Festigkeit wichtigen Kenngrößen zu prognostizieren. Daraus könnte sich die Möglichkeit ergeben, sowohl die Gründruckfestigkeit des frischen als auch die Festigkeit des erhärteten Betons mit der Prognose der Dauerhaftigkeit zu kombinieren.

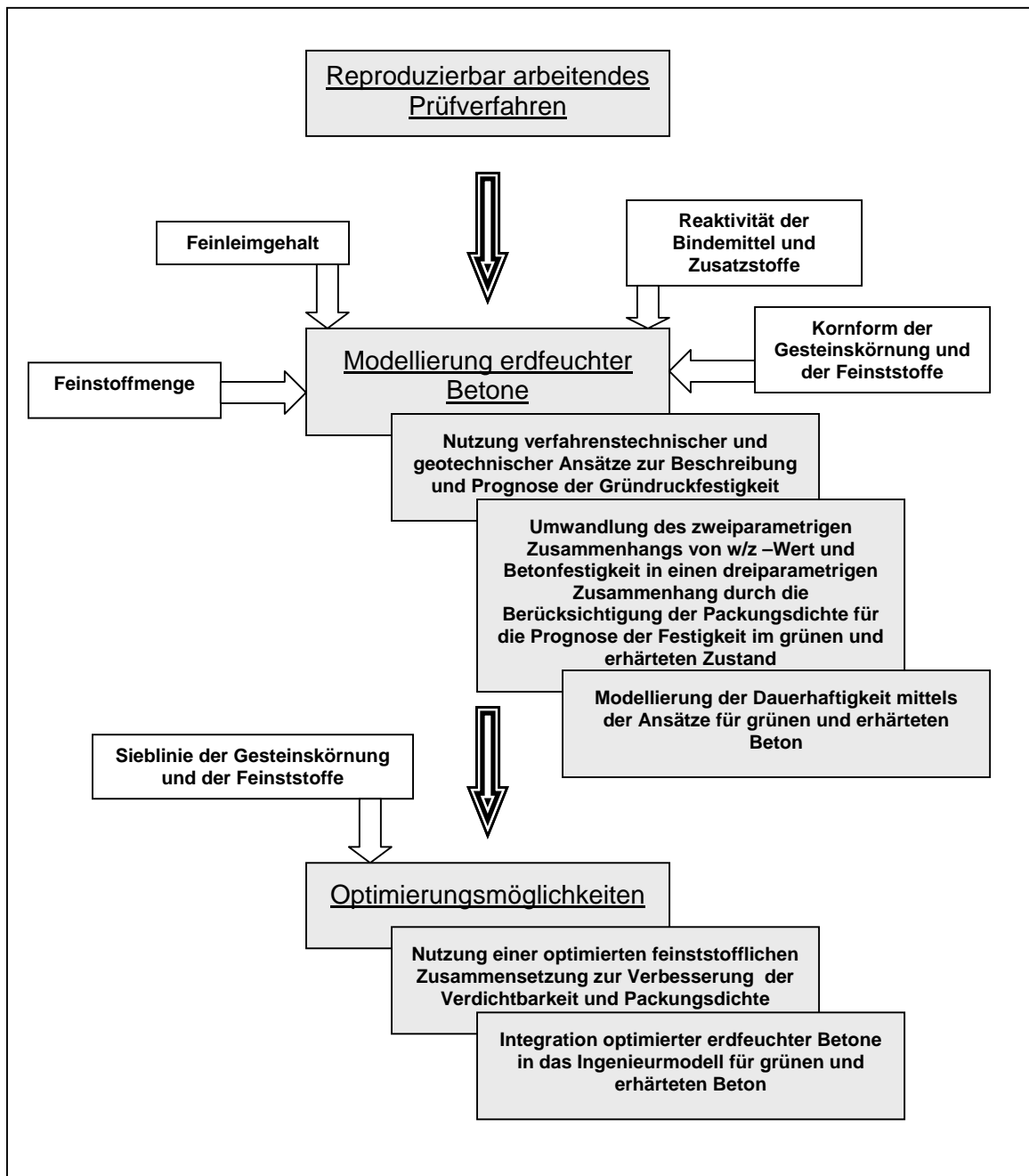


Bild 1: Ablaufschema der Arbeit

4 Stand der Kenntnis

Das stoffliche Verhalten erdfeuchter Betone lässt sich – wie schon zuvor erwähnt – in zwei Abschnitte gliedern: den sofortentschalten, frischen, ungebundenen Zustand, in dem der Beton in seinem Verhalten geotechnischen Grundsätzen folgt und den erhärteten Zustand, in dem er Festbetoneigenschaften besitzt. Mit dem ersten Lebensabschnitt befassten sich nur sehr wenige Autoren. Hinweise zum Einfluss von Kornform, Sieblinie, aber auch der Rütteldauer auf Tragfähigkeit, Verformungsverhalten und Dichte gab [Wierig 28, 39]. Gleichzeitig wurden erste Ansätze zu einem bodenmechanisch basierten Erklärungsmodell auf Basis des Mohr–Coulombschen Versagensmodells für die Tragfähigkeit des „grünen“ Betons geliefert.

Zur Detaillierung der von [Wierig 28, 39] aufgestellten Erklärungsansätze bietet sich umfangreiche Sekundärliteratur aus der Bodenmechanik [Korfiatis 15; Voss 18] und der Suspensions- und Pulvertechnologie [Duran 6; Funk 7; Schubert 26] an.

Im erhärteten Zustand folgt der erdfeucht hergestellte Beton dann betontechnologischen Grundsätzen, wobei die Verdichtungsqualität und somit die erzielte Packungsdichte der groben und feinen Körnung, von wesentlich größerem Einfluss auf die Festbetoneigenschaften ist, als bei weichem Normalbeton.

4.1 Wichtige Eigenschaften erdfeuchter Betone

In der Literatur tauchen erdfeuchte Betone unter verschiedenen Begriffen auf. Werden sie für die Betonage großer Betonflächen eingesetzt, so werden sie auch als Walzbetone bezeichnet (Roller compacted concretes) [Schmidt 31; Cannon 36; ACI 37]. Wird der Bindemittelgehalt herabgesetzt um Magerbetonqualitäten zu erzeugen, so wurde der Begriff der Hydraulisch Gebundenen Tragschicht (HGT) [Schmidt 1, 2] geprägt. Alle diese Betone weisen das gleiche Grundprinzip auf: Sie werden mit sehr trockener Konsistenz eingebaut und mit hoher Rüttelenergie verdichtet. Wichtige Ziele bei der Herstellung erdfeuchter Betone sind:

- die Sofortentschalbarkeit und Begehbarkeit durch eine ausreichend hohe Gründruckfestigkeit und Verformungssteifigkeit sicherzustellen [Wierig 28; Voss 18]
- das optische Erscheinungsbild durch geschlossene Oberflächen zu verbessern
- die Festigkeit und Dauerhaftigkeit durch die Begrenzung des Porenvolumens (Kapillar- und Luftporosität) zu sichern.

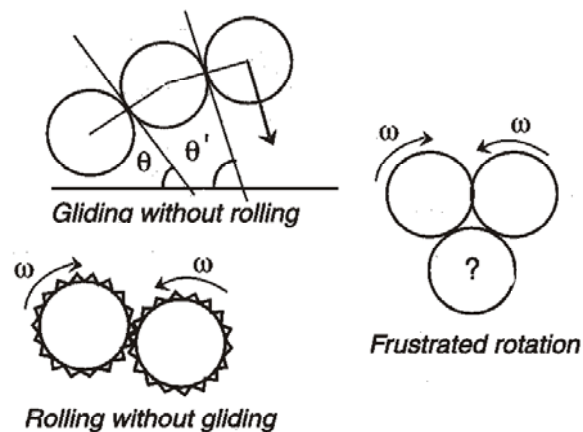


Bild 2:
Arten der Reibung
[Duran 6]

Im „grünen“ Zustand sollen dazu Parameter wie innere Reibung (Bild 2) [Wierig 28, 39; Altmann 53 ; Duran 6], Kohäsion und Adhäsion [Wierig 28, 39] und die Dichte des Betons beitragen. Beim Übergang zum Festbeton treten durch Erhärtung dann die aus der Normalbetontechnologie bekannten Prinzipien in den Vordergrund [Schmidt 1; Wierig 28]. Hierzu zählen:

- der Hydratationsgrad [Reschke 5] und die Reaktivität/Puzzolanität [Reschke 5; Rendchen 4] des verklebenden Bindemittelleims, beeinflussbar durch die Feinheit [Day 55] und den chemisch/mineralogischen Aufbau der Bindemittel/Zusatzstoffe
- die Dichte der Betonmatrix, insbesondere in den Übergangszonen von Zuschlag und Bindemittel. Hierauf Einfluss genommen werden kann durch den w/z-Wert, die Senkung des Calciumhydroxidgehalts durch die Zugabe von puzzolanischen Stoffen und der Beeinflussung des Verlaufs der Sieblinien der Feinststoffe [Funk 7; Lange 13; Bentur 38].
- die Verbesserung der Verzahnung zwischen Zuschlägen und Bindemittelmatrix durch die Steigerung der Kornrauigkeit [Schneider 32, 33].

4.2 Prüfverfahren für erdfeuchte Betone

Spezielle Prüfverfahren für erdfeuchte Betone sind im deutschsprachigen Raum nicht entwickelt worden. Die bekannten Prüfverfahren Verdichtungsmaß und Setzmaß (Slump), eignen sich nur für plastische, das Ausbreitmaß auch für fließfähige Konsistenz. Um erdfeuchte Betone unterschiedlicher Zusammensetzung dennoch miteinander vergleichen zu können, wurde ersatzweise das geotechnische Proctorverfahren nach DIN 18127 eingesetzt

und erdfeuchte Betone wurden nur am Punkt ihrer optimalen Verdichtung miteinander verglichen (Schmidt 31). Der Verdichtungsgrad kann dabei ersatzweise als Konsistenzmaß - oder besser als Maß für die „Verdichtbarkeit“ eines erdfeuchten Gemischs - dienen. Die Verdichtungsenergie wird aber beim „klassischen“ Proctorversuch im Gegensatz zu den üblichen, auf Vibration basierenden Herstellverfahren erdfeuchter Betone schlagend eingebracht. Dieses Verdichtungsprinzip wurde von [Häring 46] auf ein leicht zu handhabendes Prüfgerät für direkt ausschaltbare Probekörper übertragen. Wie auch beim Proctorversuch, wird die Qualität des Betons über die Lagerungsdichte beurteilt. Bei Hydraulisch Gebundenen Tragschichten (HGT) und bei Bodenverfestigungen mit Zement ist der Proctorversuch nach DIN 18127 ebenfalls das maßgebende Verfahren zur Festlegung des für die Verarbeitbarkeit optimalen Wassergehalts individueller Gemische.

In [ACI 37] wird der – auch in Deutschland bekannte – Vebe–Test als Testverfahren erwähnt. Bei diesem Testverfahren bildet die Zeit das Bewertungskriterium, die ein leicht verdichteter Frischbetonkegelstumpf unter definierter Verdichtung und Auflast benötigt, um sich aus der Kegelform in eine Zylinderform mit 24 cm Durchmesser umzuformen. Auch in [Bonzel 42, 43] wird berichtet, dass sich der Vebe–Test dazu eignet auch sehr trockene Betone in ihrer Konsistenz zu beurteilen.

Technisch aufwändigere Wege gehen finnische und französische Prüfverfahren, die in ihren Herkunftsländern z.T. Eingang in die nationalen Normen gefunden haben. In Finnland findet der IC –Tester [52] sowohl bei der Beurteilung der Verdichtbarkeit von ungebundenen wie hydraulisch gebundenen Mineralgemischen Anwendung. Die Verdichtung des Probekörpers erfolgt unter scherender und pressender Beanspruchung. Sich mehr an der realen Verdichtung von Betonen orientierend, präsentiert sich das französische Testsystem VCEC (Compacteur d'éprouvettes par vibrocompression) mit dem sofort entschaltbare Probekörper mittels intensiver Vibrationsverdichtung und Auflast hergestellt werden (Bild 3). In [Nguyen 44] wird die Funktionsweise beschrieben und der Vorteil dieser Verdichtungsmethode herausgestellt. Die intensive Vibrationsverdichtung mit leichtem Auflastdruck soll zu sehr homogenen Prüfkörpern und reproduzierbaren Prüfergebnissen führen.

Eine Verfeinerung dieses Verdichtungs- und Messprinzips stellt der VCPC –Tester dar (Vibrocompression a paramètres controles). Neben einer nochmals gesteigerten Vibrationsverdichtungsleistung, die über 3 radial angeordnete Vibratoren eingetragen wird, kann zudem der Verdichtungsverlauf über die Messung der Absenkgeschwindigkeit des Auflastkolbens bestimmt werden [Nguyen 47]. Dieses Prüfverfahren hat, neben dem bereits

erwähnten schlagend verdichtenden Proctorprüfverfahren, Eingang in die europäische Normung gefunden (prEN 13286-3) [49]. Neben diesen Verfahren werden dort für die Prüfung von ungebundenen und gebundenen Mischungen zusätzlich der sogenannte „Vibrationshammer“ (prEN 13286-4) [50] und ein Vibrationstischverfahren (prEN 13286-5) [51], das aus einer auf einem Vibrationstisch fixierbaren Form mit Auflastgewicht besteht, erwähnt.

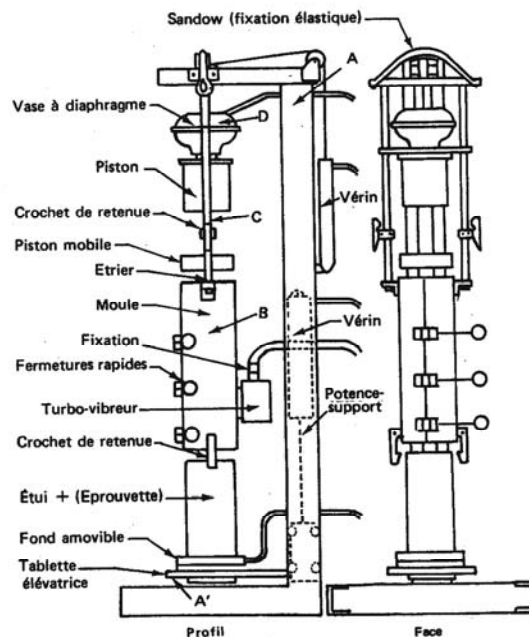


Bild 3:
VCEC - Testsystem
nach [Nguyen 44]

Als eine weitere Variante wird in [Hugot 45] ein kombiniertes System aus Proctorverdichtung und Luftporenmessung zur Mischungsoptimierung vorgeschlagen. Nach Meinung der Autoren führt dies zu einer größeren Genauigkeit bei der Bestimmung der Porosität des erdfuchten Betons.

4.3 Modelle und Verfahren der Bodenmechanik zur Beschreibung und Berechnung des Tragverhaltens von Feinststoffen und Böden

Zur Beschreibung des Tragverhaltens von Böden wird in der Bodenmechanik üblicherweise die Grenzbedingung nach Mohr–Coulomb verwendet (Gleichung 1). Mit ihrer Hilfe lässt sich die maximale vom Bodestoff aufnehmbare Schubspannung (τ) berechnen. Eingangsparameter bilden die innere Reibung φ und die Kohäsion c des Bodens, die sogenannten „Scherparameter“.

$$\tau = \sigma \cdot \tan \varphi + c \quad (\text{Gleichung 1})$$

τ = Schubspannung
 σ = Druckspannung in der Trennfläche
 $\tan \varphi$ = Koeffizient der inneren Reibung
 c = „Kohäsion“

Die in diesem Ansatz enthaltene innere Reibung φ kann erst durch eine äußere Kraft – die Auflast - aktiviert werden. Dies erklärt, warum die äußere Belastung und die Tragfähigkeit eines Bodenkörpers in Beziehung zueinander stehen. Unberührt davon wirkt die Kohäsion. Bei bekannten Scherparametern φ und c , die durch Scher- oder Triaxialversuche ermittelt werden können, lassen sich über den Mohrschen Spannungskreis (Bild 4) die in der Scherebene wirkenden Schub- und Druckspannungen berechnen. Die sich ausbildende Schergerade (Bild 4) folgt der Mohr–Coulombschen Grenzbedingung (Gleichung 1) und ermöglicht so die Tragfähigkeitsberechnung von Erdstoffen. Die Steigung der Schergeraden entspricht dem Reibungswinkel φ (Bild 4).

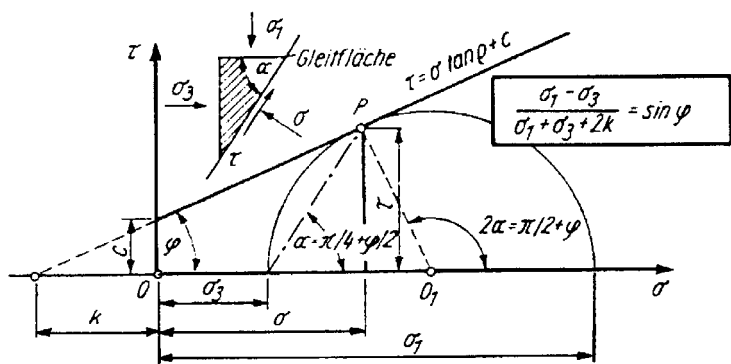


Bild 4:
Mohrscher
Spannungskreis

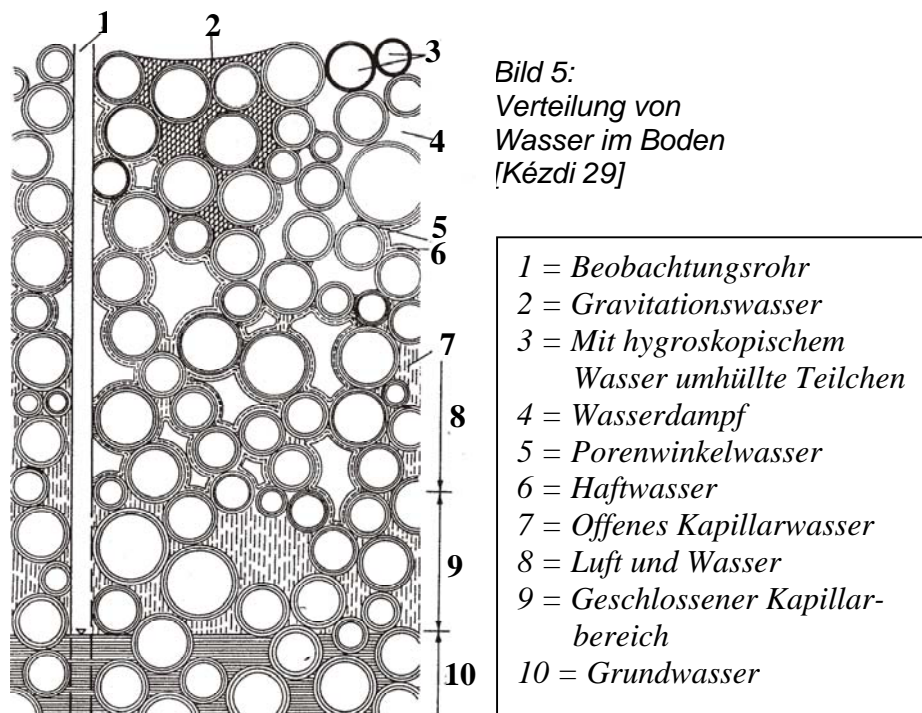
Von [Wierig 28] wird die Mohr–Coulombsche Grenzbedingung zur Bestimmung der Tragfähigkeit erdfeuchter Betone herangezogen. Eine Besonderheit des Ansatzes bildet die Abschätzung des Kohäsionsanteils c über die im Feinststoff wirkenden Kapillarkräfte nach [Verslys 60; Schiel 24]. Die Richtigkeit dieses Ansatzes soll im Rahmen dieser Arbeit geprüft werden. Eine genauere Beschreibung der physikalischen Bindungsmechanismen zwischen Feinststoffen ist deshalb Thema des nun folgenden Abschnitts.

4.3.1 Beschreibung der physikalischen Bindungsmechanismen

Nach [Rumpf 22] entstehen die wichtigsten physikalischen Haftmechanismen zwischen Partikeln durch:

- Flüssigkeitsbrücken/Kapillarität
- van der Waals –Kräfte und
- elektrostatische Wechselwirkungen.

Ein Boden zeigt schematisch den in Bild 5 dargestellten Aufbau. Man erkennt, dass innerhalb eines Bodens eine ungleichmäßige Verteilung des Wassers vorliegt. Es ergeben sich Bereiche mit vollständiger Wasserfüllung, mit nur teilweiser Füllung und vollständig unbenetzte Bereiche. In allen diesen Bereichen können die eingangs beschriebenen Haftmechanismen wirken. Im unbenetzten Bereich Adhäsions- und elektrostatische Kräfte, in teilbenetzten Bereichen insbesondere Flüssigkeitsbrücken. Die Wirkung der genannten Kräfte ist somit in starkem Maße vom Sättigungsgrad des Bodens mit Wasser abhängig. Wie sich in den weiteren Ausführungen zeigen wird, stehen die physikalischen Kräfte zudem in erheblichem Maß mit der Feinheit der Bodenpartikel in Beziehung.



Flüssigkeitsbrücken/Kapillarität

Die Kapillarbrückenbildung zwischen Partikeln lässt sich anhand des Mechanismus der kapillaren Steighöhe erklären. Innerhalb einer Kapillare steigt eine Wassersäule entgegen der Schwerkraft auf (Bild 6). Grund hierfür ist die Wirkung von Adhäsions- (Anhangskräften) [Dobrinski 59] und Kohäsionskräften (Zusammenhangskräften). Die Adhäsionskräfte bewirken die Haftung und die Benetzung der Kapillarwandung mit Wasser, die Kohäsionskräfte den Zusammenhalt des sich an der Oberfläche formenden Meniskus. Durch die Benetzung der Kapillarwandung mit Wasser kommt es zu einem Aufsteigen des Wasserfilms an der hydrophilen Wandung. Diese ist aber über die Kohäsionskraft (Oberflächenspannung des Wasser rd. 0,073 N/m) mit der Wasseroberfläche verbunden. Die äußersten Wassermoleküle der Wasseroberfläche bilden eine Membran, die Zugspannungen aufnehmen kann. Unterhalb der Membran entsteht eine Sogkraft, welche die Wassersäule entgegen der Schwerkraft nach oben zieht. In Bild 6 sind die dabei entstehenden Kräfte eingezeichnet. Sie stehen im Gleichgewicht miteinander. In Abhängigkeit vom Kapillardurchmesser ergibt sich für Wasser eine Steighöhe von (Gleichung 2):

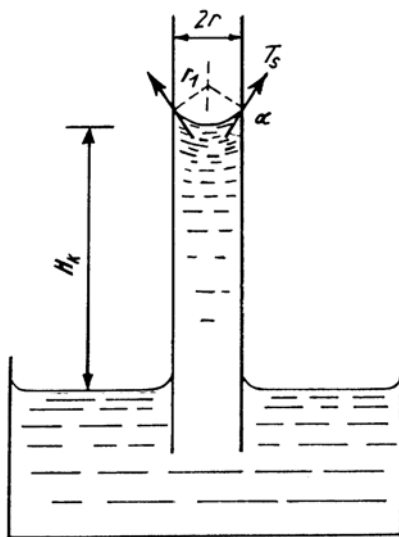


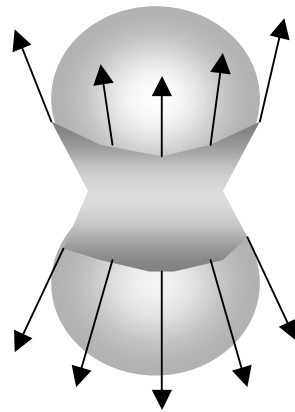
Bild 6:
Kapillare Steighöhe
[Kézdi 29]

H_k = kapillare Steighöhe
 γ = Oberflächenspannung
 Wasser (20°C = 0,073 N/m)
 ρ = Dichte Wasser
 r = Kapillarradius

$$H_k = \frac{2 \cdot \gamma}{\rho \cdot g \cdot r} \quad (\text{Gleichung 2})$$

Dieser Mechanismus bewirkt auch den Zusammenhalt zweier teilweise benetzter Körper, in Bild 7 als Kugeln dargestellt. Der sich ausbildende Flüssigkeitsmeniskus bewirkt innerhalb der Flüssigkeit die Ausbildung eines Unterdrucks, der die Körper zusammenhält.

Nach [Schubert 21; Arquíé 23; Rumpf 22] ist die Meniskenform mit einer Laplace-Gleichung beschreibbar. Auf Basis dieser Ansätze lassen sich dann die innerhalb eines granularen Gemisches/Bodens wirkenden Kapillarkräfte näherungsweise berechnen. Ansätze hierzu sind in [Schiel 24; Versluys 60; Wierig 28, Schubert 21] zu finden. Die einfachste Form stellt dabei der Ansatz von [Versluys 60] und [Wierig 28] dar. Für den Zustand des fast ausgetrockneten Zwickelwassers am Berührungspunkt zweier Kugeln lässt sich nach [Versluys 60] eine Grenzbedingung definieren (Gleichung 3):



$F = \text{Haftkraft zwischen zwei Kugeln}$
 $\gamma = \text{Oberflächenspannung Wasser}$
 $x = \text{Kugeldurchmesser}$

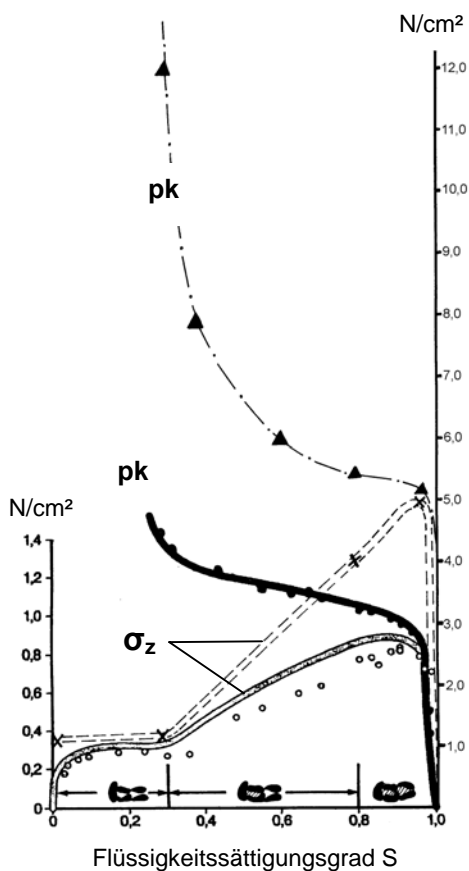
Bild 7:
Wirkung von
Kapillarmeniskens

$$F = \pi \cdot \gamma \cdot x \quad (\text{Gleichung 3})$$

[Wierig 28] verknüpft die Haftkraft an der Berührungsstelle zweier Kugeln mit der mittleren Korngröße des enthaltenen Feinstoffs (Zement). Dabei wurde die Anzahl der Berührungspunkte von Kugeln unter Annahme der mittleren Korngröße in einer Flächeneinheit bestimmt und diese mit der Haftkraft multipliziert. Als Ergebnis erhält man die aufnehmbare Kraft pro Flächeneinheit (Spannung).

Dass diese Annahme eine grobe Vereinfachung darstellt, machen die Untersuchungen von [Schubert 21, 26] deutlich. In Abhängigkeit vom Flüssigkeitssättigungsgrad wurden feuchte Schüttgüter Zugfestigkeitsuntersuchungen unterworfen (Bild 8). Der Flüssigkeitssättigungsgrad S beschreibt, in welchem Umfang die in einer losen Schüttung der Feinstoffe vorhandenen Hohlräume mit Wasser gefüllt sind. Die folgenden Ausführungen sind somit vor dem Hintergrund zu sehen, dass für übliche erdfeuchte Betone mit w/z -Werten zwischen 0,30 – 0,50 anzunehmen ist, dass der Sättigungsgrad sehr hoch ist (im flüssigen Feinleim >100%).

Die Wirkung der Kapillarität wird in zwei Bereiche unterteilt. Einerseits in den Bereich eines Flüssigkeitssättigungsgrades $< 0,30$, in dem Kapillarmenissen an den Kornberührungstellen für Zusammenhalt sorgen und den Bereich eines Flüssigkeitssättigung $> 0,80$ in dem die Kapillarkräfte wie eine äußere Haut wirken, die das Haufwerk umspannen. Im Zwischenbereich überlagern sich die jeweiligen Mechanismen. Der Bereich sehr hoher Sättigung zeigt dabei die höchsten aufnehmbaren Zugkräfte, die dann mit abnehmender Sättigung abfallen. Nach [Schubert 21, 26] lässt sich aus der messtechnisch zu ermittelnden Kapillardruckkurve und bei Sättigungsgraden $> 0,8$ die Zugfestigkeit eines Haufwerks direkt errechnen (Gleichung 4):



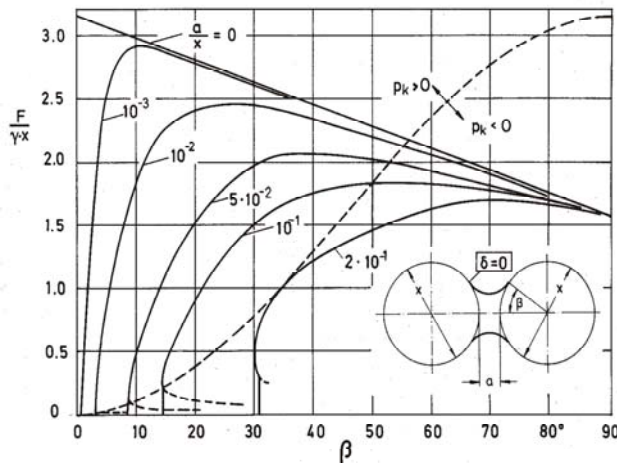
σ_z = Zugfestigkeit des feuchten Schüttgutes
 pk = Kapillardruck
 S = Sättigungsgrad des Schüttgutes mit Wasser

$$\sigma_z = pk \cdot S (S > 0,8) \quad \text{(Gleichung 4)}$$

Bild 8:
 Kapillardruckkurven (pk) und Zugfestigkeit
 granularer Haufwerke mit eigenen Ergänzungen
 [Borho 27].

Durchgezogene Linie: Mittlere Korngröße = $71 \mu m$
 Gestrichelte Linie: Mittlere Korngröße = $20 \mu m$

Nur unterhalb von Sättigungsgraden von $0,30$ lässt sich die Zugfestigkeit – analog der Vorgehensweise von [Wierig 28] – über die Berührungspunkanzahl des Haufwerks mit Hilfe von Nomogrammen (Bild 9) von [Schubert 26; Borho 27] bestimmen. Die darin dargestellte bezogene Haftkraft ($F/(\gamma \cdot x)$) zeigt, dass die Haftkraft linear mit dem Korndurchmesser abnimmt. Gleiches gilt für den Bereich von $S > 0,80$. Auch hier ist die mittlere Korngröße die kennzeichnende Größe für die aufnehmbare Zugkraft.



F = Haftkraft zwischen zwei Kugeln
 γ = Oberflächenspannung Wasser
 x = Kugeldurchmesser

$$\frac{F}{\gamma \cdot x} \quad (\text{Ablesewert})$$

Bild 9:
 Kapillarsogkraft in
 Abhängigkeit vom
 Füllgrad [Schubert 26]

Van der Waals Kräfte und Elektrostatik

Van der Waals und elektrostatische Kräfte stellen zusätzliche Kräfte dar, die zu einer Steigerung des Bindungsvermögens von Feinstoffteilchen durch Polarisierung der Oberflächen beitragen können. Van der Waals Kräfte können nach einer Formeln von Lifshitz abschätzend berechnet werden. Für zwei ideal kugelförmige Körper geben [Rumpf 22; Borho 27] folgende Beziehung an (Gleichung 5):

$$F = \frac{h\varpi}{32 \cdot \pi \cdot a^2} \cdot x \quad (\text{Gleichung 5})$$

F = Haftkraft zwischen zwei Kugeln
 $h\varpi$ = Lifshitz-van-der-Waals-Konstante
 a = Partikelabstand
 x = Kugeldurchmesser

In [Rumpf 22] wird darauf hingewiesen, dass die enthaltene Lifshitz - Van der Waals Konstante in weiten Bereichen schwanken kann. Sie beträgt je nach Dielektrizitätskonstante zwischen 0,1 – 10 eV. Eine direkte Berechnung der wirkenden Kräfte ist nur als grobe Abschätzung möglich. [Borho 27] berechnete die Wirkung von van der Waals, elektrostatischen und Erdanziehungs- Kräften von mineralischen Stoffen über die Partikelgröße zweier sich berührender Körper. Es ergab sich der in Bild 10 dargestellte Zusammenhang. Es zeigt sich auch hier, dass nennenswerte Haftkräfte erst bei sehr kleinen Partikeldurchmessern von Feinstoffen auftreten können.

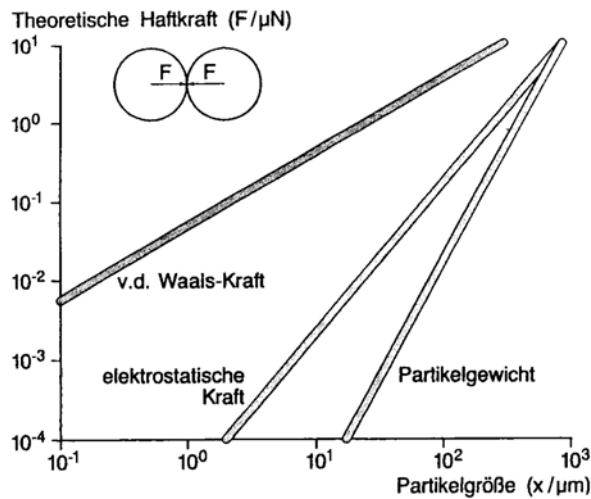


Bild 10:
Stärke
interpartikulärer
Anziehungskräfte
[Borho 27]

Diese Zusammenhänge gelten für unverdichtete Systeme. Presst man feine Partikel aneinander, z.B. durch Vibrations- und/oder Schlagkräfte, wie sie während des Verdichtungsvorgangs wirken, so können Adhäsionskräfte sehr stark ansteigen und einen stärkeren Beitrag zur Tragfähigkeit liefern. [Schütz 25] zeigte dies durch Versuche mit mineralischen Partikeln in einer metallischen Zentrifuge.

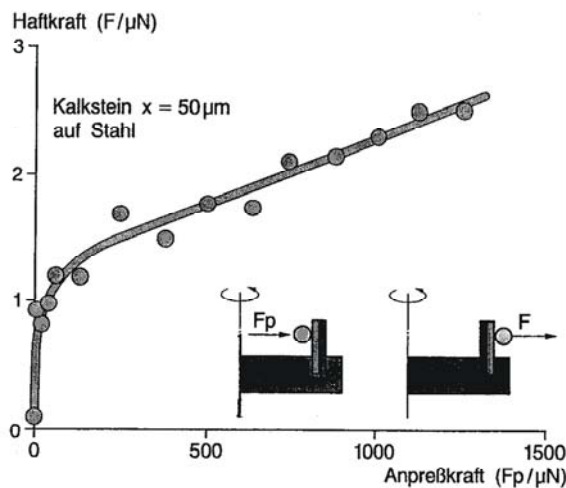


Bild 11:
Haftverstärkung
durch
Anpressdruck
[Schütz 25]

4.3.2 Methoden der Bodenmechanik zur Beurteilung von Böden

Boden wird i.d.R. aus einer Vielzahl unterschiedlicher Körner gebildet, die sich in Form und Größe unterscheiden. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen bindigen und nicht bindigen Böden (Klassifizierung nach DIN 18196, Benennung nach DIN 4022). Mit abnehmender Korngröße und einer Zunahme des Anteils von Feinststoffen, können die zuvor

beschriebenen physikalischen Bindungsmechanismen einen steigenden Einfluss auf das Verhalten des Kornhaufwerks ausüben. Nach [Voss 18] ist der Verdichtungsgrad des Bodens von entscheidender Bedeutung. Er beeinflusst sowohl die Festigkeit als auch die Verformbarkeit. Wesentliche Einflussgröße ist insbesondere die Kornverteilung (Bild 13). Sie wird in der Bodenmechanik abschätzend durch die Ungleichförmigkeitszahl U erfasst. Sie beurteilt diese anhand der Korngröße bei 60 und 10 Vol.-% Siebdurchgang ($U = d_{60}/d_{10}$). Untersuchungen hierzu liegen von [Voss 18; Ulrich 20; Schellenberg 19; Korfiatis 15] vor. Zur Bestimmung der Verdichtbarkeit von Böden wird im Allgemeinen der Proctorversuch verwendet. Durch eine schrittweise Steigerung der Wasserzugabe erhält man die in Bild 12 dargestellten Dichtekurven in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Es zeigt sich, dass die Zugabe von Feinststoffen die Trockendichte ansteigen lässt. Dies ist ein erster Hinweis auf eine weitere positive Wirkung von Feinststoffen: die Steigerung der Packungsdichte des Materials. Ein Begriff, der im weiteren Verlauf der Arbeit eine wichtige Rolle spielen wird.

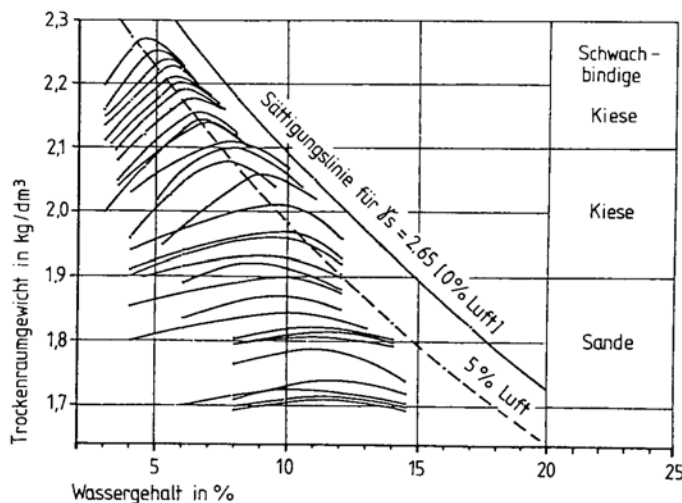


Bild 12:
Trockenraumgewicht
(heutige Definition:
Trockendichte) und
Wassergehalt bei
einfacher Proctordichte
[Voss 18]

Neben dem Verdichtungsgrad und der Packungsdichte interessiert bei der Beurteilung von Böden auch deren Entwässerungsverhalten, in der Bodenmechanik als Konsolidation bezeichnet. Die Berechnungsansätze und Modellvorstellungen lieferte [Terzaghi 61]. Stellt man sich eine dreidimensionale Kugelpackung vor, so sind zwischen den Kugeln Hohlräume – auch Kornzwickel genannt – vorhanden. Die Aneinanderreihung dieser Zwickel kann man sich als Röhrensystem vorstellen, mit variablen Rohrdurchmessern. Warum bei zunehmendem Feinststoffgehalt eines Bodens die Durchlässigkeit abnimmt, zeigt anschaulich eine genauere Betrachtung des Gefüges eines Bodens. Ein höherer Feinststoffgehalt verfeinert die Porenstruktur. Die kommunizierenden Zwischenräume (Zwickel) zwischen den Bodenteilchen – zuvor als Rohrsystem mit variablem Rohrdurchmesser bezeichnet – werden

kleiner. Der Rohr bzw. Kapillarradius beeinflusst die Durchflussmenge (Volumenstrom) in der vierten Potenz (Gleichung 6).

$$Q = \frac{\pi \cdot (p_1 - p_2) \cdot R^4}{8 \cdot \eta \cdot l} \quad (\text{Gleichung 6})$$

Q = Volumenstrom im Rohr
 $p_1 - p_2$ = Druckverlust im Rohr
 R = Rohrradius
 η = Viskosität (Wasser rd. 1 mPas)
 l = Rohrlänge

Zum Entwässern einer feinkörnigen Bodenprobe wird somit ein deutlich höherer Druck, oder im Fall gleichen Drucks, eine deutlich längere Zeit benötigt als zum Entwässern einer grobkörnigeren Vergleichsprobe. [Terzaghi 61] gibt die Zunahme bzw. Abnahme der Entwässerungszeit im Rahmen seiner Konsolidationstheorie über den dimensionslosen Zeitfaktor T_v an (Gleichung 7). Die Feinheit des Bodens wird über den k -Wert erfasst.

$$T_v = \frac{k \cdot E_s \cdot t}{H^2 \cdot \gamma_w} \quad (\text{Gleichung 7})$$

T_v = dimensionsloser Zeitfaktor
 k = Durchlässigkeitsbeiwert
 E_s = Steifemodul des Bodens
 t = Konsolidationszeit
 H = maximaler Entwässerungsweg
 γ_w = Wichte (Wasser)

Der Durchlässigkeitsbeiwert k ist ein Messwert. Zur rechnerischen Abschätzung der realen Durchlässigkeit eines Bodens kann die in Gleichung 8 dargestellte Beziehung von [Jáky 29] herangezogen werden, welche die Durchlässigkeit vereinfacht über den mittleren Korndurchmesser erfasst:

$$k = 100 \cdot d^2 \quad (\text{Gleichung 8})$$

k = Durchlässigkeitsbeiwert
 d = mittlerer Korndurchmesser

Das Entwässerungsverhalten, die geringe Komprimierbarkeit von Flüssigkeiten (ein Druck von rd. 200 bar bewirkt bei Wasser eine Volumenverringerung von nur rd. 1%) und die Eigenschaft, Drücke gleichmäßig zu verteilen, hat direkte Auswirkungen auf das Tragverhalten. Ist ein Haufwerk am oder kurz vor dem Punkt der vollständigen Sättigung mit Wasser, so kann infolge einer von außen einwirkenden Kraft ein Porenwasserüberdruck innerhalb des Haufwerks entstehen. Die äußere Belastung des Haufwerks wird über das Korngerüst abgetragen und drückt dieses so weit zusammen, bis entweder kein Ausweichraum mehr für das Wasser zur Verfügung steht, oder der sich einstellende

Strömungswiderstand für das abfließende Wasser zu groß wird. Von diesem Zeitpunkt an kann das Kornhaufwerk nicht weiter belastet werden. Das Wasser als quasi nicht komprimierbares, hochsteifes Medium übernimmt Lastanteile.

Betrachtet man dies vor dem Hintergrund der Mohr-Coulombschen Grenzbedingung von Kornhaufwerken (Gleichung 1), so wird deutlich, dass es durch den Aufbau eines Porenwasserüberdrucks unmöglich wird, die volle Reibung des Kornhaufwerks zu aktivieren - die Tragfähigkeit sinkt.

4.3.3 Grünstandfestigkeit erdfeuchter Betone

Die Grünstandfestigkeit beschreibt die Standfestigkeit des unmittelbar nach der Herstellung ausgeschalteten erdfeuchten Betons. Durch welche Faktoren die Grünstandfestigkeit ausgelöst und beeinflusst werden kann, wird nachfolgend dargestellt.

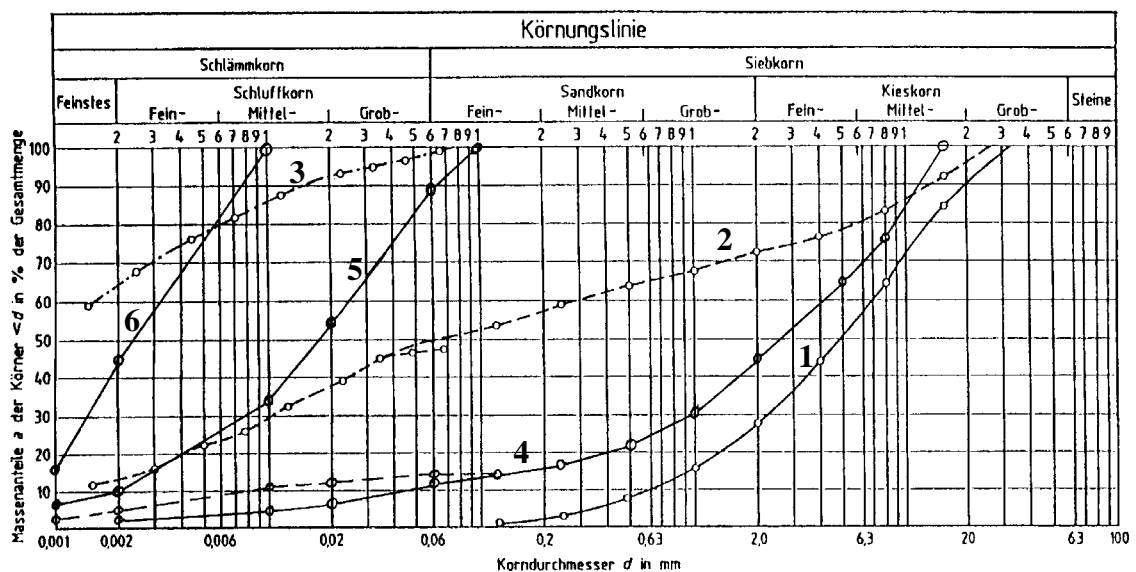


Bild 13: Vergleich der Körnungslinie von Böden und zwei in den Versuchsreihen verwendeten Gesteinskörnung-Feinststoffgemischen (1 = Kies, sandig; 2 = Ton, sandig, kiesig; 3 = Ton; 4 = Sieblinie Gesteinskörnung und Zement [durchgezogene Linie] bzw. Zement + Kalksteinmehl KSM BG [gestrichelte Linie]; 5 = Sieblinie CEM I 32,5 R Werk B; 6 = Sieblinie Kalksteinmehl KSM BG)

Im geotechnischen Sprachgebrauch stellen erdfeuchte Betone mit üblicherweise eingesetzten Zementgehalten/Feinststoffgehalten von 270 bis 350 kg/m³ weit gestufte Körnungslinien dar (GU). Die in der Bodenmechanik gebräuchliche Darstellung der Kornverteilung zeigt Bild 13.

In dieser Darstellung sind sowohl die Bandbreiten der Sieblinien der Betone (4) als auch eines Teils der in den Versuchsreihen verwendeten Feinststoffe eingezeichnet worden (Sieblinie 5, 6). Zum Vergleich dazu sind auch die Kornverteilungen eines sandigen Kieses (1), eines sandig/kiesigen Tons (2) und eines reinen Tons (3) dargestellt worden.

Modellbildung auf Basis bodenmechanischer Rechenansätze

Ansätze der Bodenmechanik nutzt [Wierig 28] zur Herleitung eines Modells für die Berechnung der Tragfähigkeit von „grünem“ Beton. Auch hier bildet die bereits erwähnte Mohr-Coulombsche Grenzbedingung (Gleichung 1) die Grundlage, die Kohäsionskräfte wurden theoretisch auf Basis der Modelle von [Verslys 60 und Schiel 24] aus der kapillaren Haftkraft der Feinstbestandteile hergeleitet. Mit Hilfe des mittleren Kornradius (d_{50}) wurde die Partikelanzahl pro Flächeneinheit bestimmt und mit der zuvor ermittelten theoretischen Haftkraft pro Berührungspunkt multipliziert. Daraus ergibt sich nach Wierig dann die „theoretische“ Zugfestigkeit des erdfeuchten Betons. Verlängert man die Hüllkurve des Mohr'schen Spannungskreises (Bild 2) in Richtung der Schubspannungsachse, so fällt auf, dass diese in kohäsiven Systemen nicht den Nullpunkt schneidet. An diesem Punkt ist die Vorspannung des Systems ablesbar.

[Wierig 28] setzt hier die theoretische Zugfestigkeit als Kohäsionswert c ein und berechnet mit dieser inneren Vorspannung und einem abgeschätzten Gleitwinkel der Scherfuge im Bruchzustand die Tragfähigkeit des Systems in der Form (Gleichung 9 und 10):

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1}{\sigma_1 + 2 \cdot c} \quad (\text{Gleichung 9})$$

$$\sigma_1 = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (\text{Gleichung 10})$$

φ = Reibungswinkel
 σ_1 = vertikale Hauptspannung
 c = Kohäsion

Die genaue Analyse der Versuchsreihen zeigte, dass in Abhängigkeit von der Kornform des Zuschlags und der gewählten Sieblinie erhebliche Differenzen zu den berechneten Gründruckfestigkeiten auftreten. Dies führt zu dem Schluss, dass die Abschätzung der Kohäsion c über die Anzahl der Kornberührungspunkte des Feinststoffs die wahren Gegebenheiten in einem erdfeuchten Beton nicht ausreichend genau erfasst.

In weiteren Versuchsreihen wurde die Standfestigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Menge und Feinheit des Zements untersucht. Der Vergleich der Kurvenverläufe bei unterschiedlicher Zementfeinheit zeigt, dass eine größere Feinheit eine höhere Gründruckfestigkeit bewirkte, was wiederum den kapillaren Kräften zugeschrieben wurde. In gleicher Weise wird der Anstieg der Gründruckfestigkeit durch die Erhöhung des Zementgehalts begründet.

Die Kurvenverläufe der Gründruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt, die formal an Proctorkurven erinnern, lassen sich lt. [Wierig 28] in zwei Bereiche jeweils links und rechts vom Tragfähigkeitsoptimum unterteilen. Auf der linken Seite führt der zu geringe Wassergehalt verdichtungsunwilliger Gemische zu geringerer Packungsdichte und erhöhtem Luftporengehalt und dadurch zu einer verringerten Tragfähigkeit. Für die rechte Seite der Kurve wird der Abfall der kapillaren Bindungskräfte durch die Zunahme des Wassergehalts als Begründung für den Tragfähigkeitsverlust genannt.

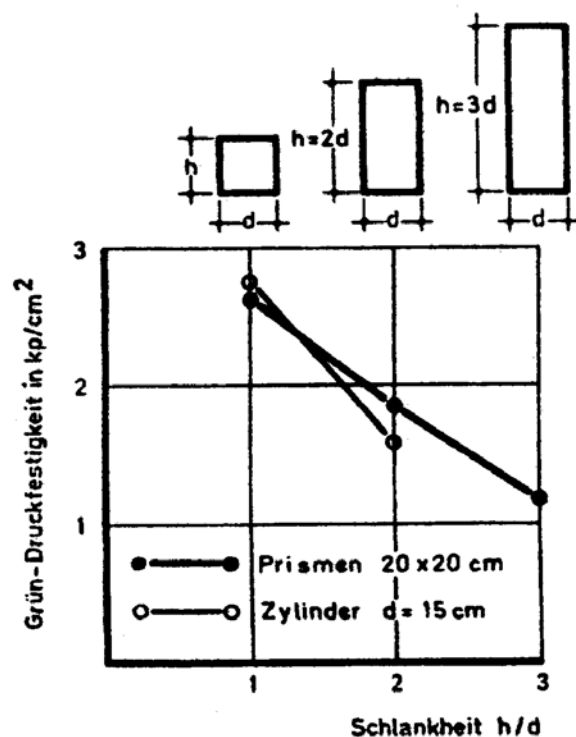
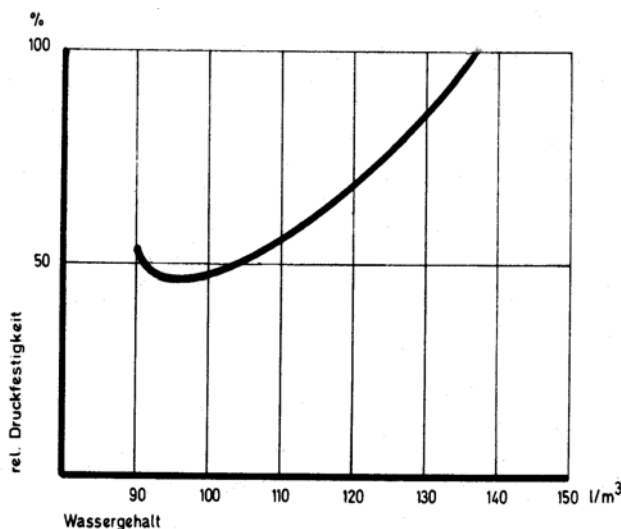


Bild 14:
Einfluss der Probekörper-
geometrie auf die Gründruck-
festigkeit [Wierig 28]

Die Verformungsempfindlichkeit (d.h. die Größe der Verformung unter Einwirkung einer äußeren Last) der erdfeuchten Betone folgt nach [Wierig 28] dem Verlauf der Gründruckfestigkeit. Die Standfestigkeit ist somit ein direkter Indikator für die Verformungsempfindlichkeit. Neben den rein stofflichen Einflussgrößen ist auch die Probekörpergeometrie bei geringen Wassergehalten von Bedeutung. In Bild 14 und 15 sind

die Ergebnisse von [Wierig 28] hierzu dargestellt. Der Einfluss der Probekörpergeometrie auf die Druckfestigkeitsergebnisse ist auch aus der Festbetonprüfung bekannt. Einen neuen Aspekt stellt der Einfluss des Wassergehalts dar. Hohe Wassergehalte senken demzufolge den Einfluss der Probekörpergeometrie. Begründet wird die starke Abhängigkeit damit, dass Betone mit sehr hohen Wassergehalten dazu neigen, frühzeitig örtlich Porenwasserüberdrücke aufzubauen und somit generell – also unabhängig von ihrer Probekörperform – an Grünstandfestigkeit zu verlieren.



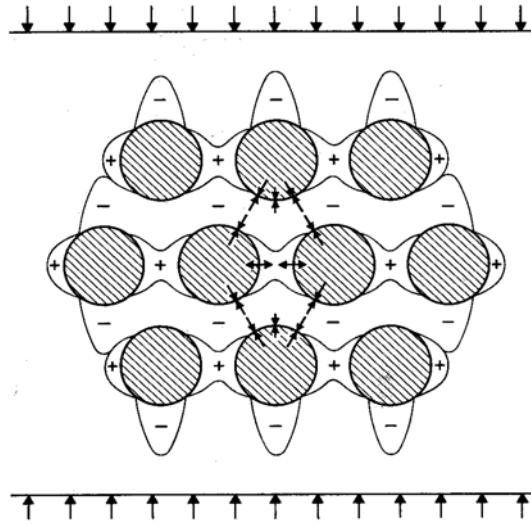
*Bild 15:
Einfluss des Wassergehalts
auf die geometrieabhängige
Probenfestigkeit [Wierig 28]*

4.4 Festbetoneigenschaften

Beton in seiner einfachsten Form stellt ein Dreistoffsystem dar. Es besteht aus grober Gesteinskörnung, feinkörnigem Bindemittel und Wasser. Das Bindemittel reagiert mit dem Wasser und hydratisiert, das führt zur Festigkeitsbildung und bewirkt die Dauerhaftigkeit. Die Gesteinskörnung spielt in diesem System die Rolle des Füllstoffs, um die Menge an Zementleim reduzieren zu können. Die Festigkeit wird außerdem durch äußere Einflüsse wie Verdichtungsenergie und Temperatur beeinflusst.

Die unterschiedliche Steifigkeit der verschiedenen Gesteinskörnungen, aber auch die im Allgemeinen geringe Steifigkeit des Zementsteins führt zu einer für den Beton typischen Spannungsverteilung bei äußerer Druck- oder Zugbeanspruchung, die von [Wischers 62, 63] mittels spannungsoptischer Messmethoden visualisiert werden konnte. Bild 16 zeigt, dass sich in Folge der Steifigkeitsunterschiede ein Druckstrebenmodell innerhalb des Betons ausbildet, das die Matrix nicht nur auf Druck, sondern auch auf Zug belastet. In Folge der geringen Zugfestigkeit des Betons bilden sich bei vertikaler Druckbelastung vertikale Risse, bevorzugt im Bereich der Übergangszone von Zuschlag und Zementsteinmatrix, aus. Senkt

man den Gehalt an Zementstein durch die Erhöhung des Anteils an Gesteinskörnung, so kann der Einfluss der Zementsteinmatrix auf die Druckfestigkeit gemindert werden. Diese steigt dann bei abnehmendem Zementsteingehalt an. In [Bonzel 34] wird hierfür stellvertretend der Begriff der „Zementsteinschichtdicke“ eingeführt. Der Einfluss der inhomogenen Steifigkeitsverteilung innerhalb einer Betonmatrix auf die Betondruckfestigkeit bleibt aber bestehen.



*Bild 16:
Spannungsverteilung
in einer Betonmatrix
[Wischers 62]*

Sowohl die Kornform als auch die Sieblinie eines Betons zeigten in spannungsoptischen Untersuchungen von [Wischers 62, 63] einen Einfluss auf die Spannungsverteilung innerhalb eines Betons. Runde Kornformen erzeugten geringere Spannungsspitzen, wohingegen splittige, gebrochene Körner an den vorhandenen Ecken und Kanten deutliche Spannungskonzentrationen erzeugten. Neben der Kornform wurde die Wirkung von Füllkörnern in Einkornmischungen auf die Spannungsverteilung geprüft und eine Abnahme der Spannungen im Bereich der Gesteinkörnungen festgestellt.

Die zuvor festgestellten möglichen negativen Effekte gebrochener Gesteinskörnungen überlagern sich nach [Schneider 32, 33] mit positiven Effekten aus der Verzahnungswirkung, der oft höheren Festigkeit und der größeren Oberflächenrauigkeit. In Versuchen von [Rüsch 68] wurde außerdem gezeigt, dass die Verwendung von Gesteinskörnungen unterschiedlicher Festigkeit einen Einfluss auf die Betondruckfestigkeit ausübt. Nach [Schneider 32, 33; Brnic 65] ist durch den Einsatz gebrochener Basaltzuschläge eine Druckfestigkeitssteigerung von 10 – 20% und eine Biegezugfestigkeitssteigerung von rd. 30% gegenüber Kiesbetonen erzielbar.

4.4.1 Einfluss des Bindemittels auf die Festbetoneigenschaften

Direkt nach dem Anmischen sind alle Zementpartikel von einer Wasserschicht umgeben, deren Dicke vom Wassergehalt abhängt. Mit Einsetzen der Zementhydratation wird zunehmend Wasser chemisch und physikalisch durch die Bildung von Calicumsilicathydrat- und Calciumaluminathydratphasen gebunden. Die dabei entstehenden Kristalle wachsen in den wassergefüllten Porenraum hinein und verzahnen sich miteinander. Das Wachstum der CSH-Phasen findet dann ein Ende, wenn entweder der Zementklinker vollständig hydratisiert oder das Wasser vollständig verbraucht ist. Der Gehalt an Wasser stellt in diesem System im Allgemeinen die begrenzende Größe dar, da es im Laufe der Zeit bei unzureichendem Schutz aus dem Beton herausdiffundiert und verdunsten kann und somit nicht mehr für die weitere Hydratation des Zementsteins zur Verfügung steht. Der dadurch verursachte Stop der Hydratation verhindert eine weitergehende Ausfüllung der durch das Wasser hinterlassenen vernetzten Hohlräume. Es verbleiben Kapillarporen mit Porenradien von 0,03 – 10 µm. Das Maß der CSH-Phasenbildung ist demnach eine der bestimmenden festigkeitsbildenden und gefügesteuernden Größen.

Dieser Zusammenhang wurde von [Locher 40, 41] analytisch in der in Gleichung 11 dargestellten Form erfasst, um die Festigkeit des Zementsteins über die Kapillarporosität ausdrücken zu können.

$$\beta_{zs} = D_0 \cdot \left(1 - \frac{P_K}{100}\right)^n \quad (\text{Gleichung 11})$$

β_{zs} = Druckfestigkeit des Zementsteins
 D_0 = rd. 200 N/mm² (Konstante)
 P_K = Kapillarporositätsanteil in %
 n = rd. 4,67 (Konstante)

Locher weist ergänzend darauf hin, dass auch der Gehalt an nicht hydratisiertem Zementklinker festigkeitsbeeinflussend sein kann. [Stark 69] beweist dies durch die in Bild 17 dargestellten Versuche mit reinen Zementleimen. Demnach kann vollständig hydratisierter Zementklinker mit w/z-Werten > 0,40 die gleiche Festigkeit wie unvollständig hydratisierter mit w/z-Werten < 0,40 haben. Der unhydratisierte Zementklinker muss somit zur Festigkeit beitragen. Übersteigt der Wassergehalt den zur vollständigen Hydratation des Zementklinkers notwendigen, so steigt die Kapillarporosität an. Die zuvor beschriebenen Zusammenhänge führen dann zu einer sinkenden Druckfestigkeit.

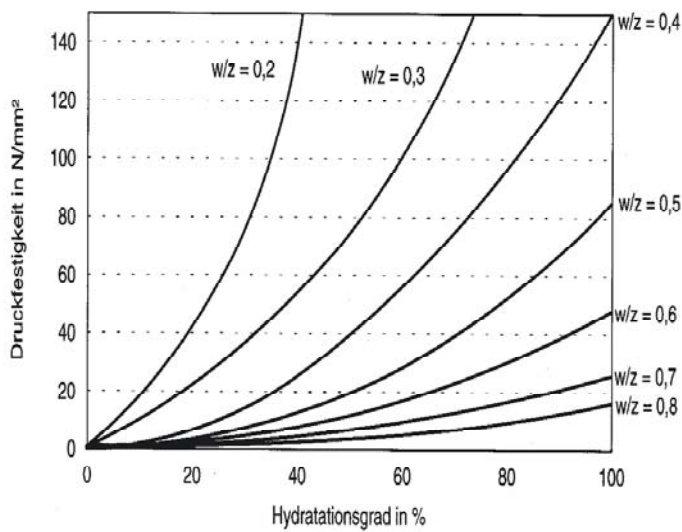


Bild 17:
Festigkeit des Zementsteins
in Abhängigkeit vom
Hydratationsgrad und w/z –
Wert [Stark 69]

Neben der positiven Wirkung erhöhter Feinheit von Bindemitteln und Zusatzstoffen auf Reaktivität und Packungsdichte, kann eine höhere Feinheit außerdem zu einer Senkung der rechnerischen Wasserschichtdicken auf den Partikeloberflächen beitragen. Die Verfestigung wird durch den Kraftschluss sich verfilzender CSH-Phasen bewirkt. Eine Senkung der Wasserschichtdicken bedeutet, dass die CSH-Phasen einen geringeren Raum zu überbrücken haben. Hierauf weist [Reschke 5] hin. Dieser Mechanismus kann - neben den im weiteren Verlauf noch detaillierter diskutierten Packungseffekten - zu der in Bild 18 dargestellten Festigkeitssteigerung durch die Zugabe eines sehr feinen Kalksteinmehls beigetragen haben.

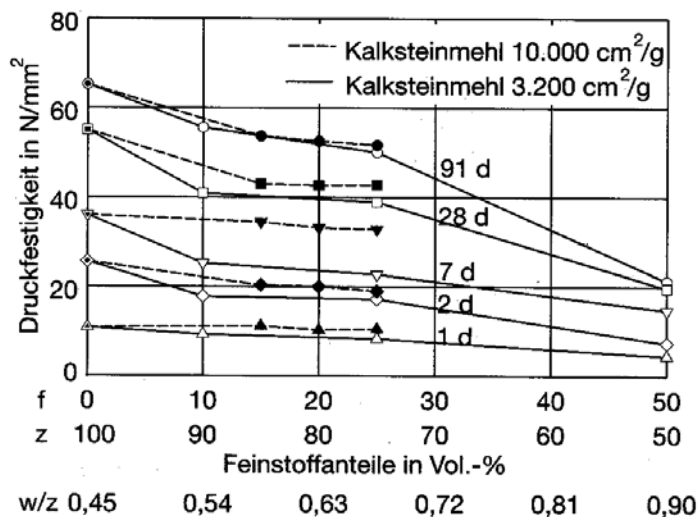


Bild 18: Einfluss
unterschiedlicher
Kalksteinmehlanteile und
-feinheiten auf die
Festigkeitsentwicklung
von Mörteln.
 $Z_0 = 480\text{kg/m}^3$
Wassergehalt = 216kg/m^3
Leimgehalt = 370l/m^3
[Reschke 5]

Passend hierzu ergänzt [Wierig 28, 39], dass die Qualität erdfeuchter Betone nicht nur vereinfacht über den w/z-Wert und den durch diesen gesteuerten Anteil der Kapillarporosität zu beurteilen sei, wie dies üblicherweise bei Normalbetonen erfolgt. Es sei vielmehr ein ausreichender Wassergehalt anzustreben, der es ermöglicht, erdfeuchte Betone durch die Senkung der inneren Reibung so zu verdichten, dass eine möglichst optimale Packungsdichte und als Folge dann dauerhafte und ökonomische Produkte entstehen. Die Packungsdichte der Feststoffe und der w/z-Wert stellen somit die Steuerungsgrößen für die Festigkeit erdfeuchter Betone dar. [Schmidt 76] griff diesen Gedanken auf und stellte die Festigkeit erdfeuchter Betone in einem dreidimensionalen Zusammenhang aus w/z-Wert, Hohlraumgehalt und 28-Tage Druckfestigkeit dar (Bild 19). Der Hohlraumgehalt von erdfeuchten Betonen lässt sich gezielt vermindern. Darauf soll im Folgenden genauer eingegangen werden.

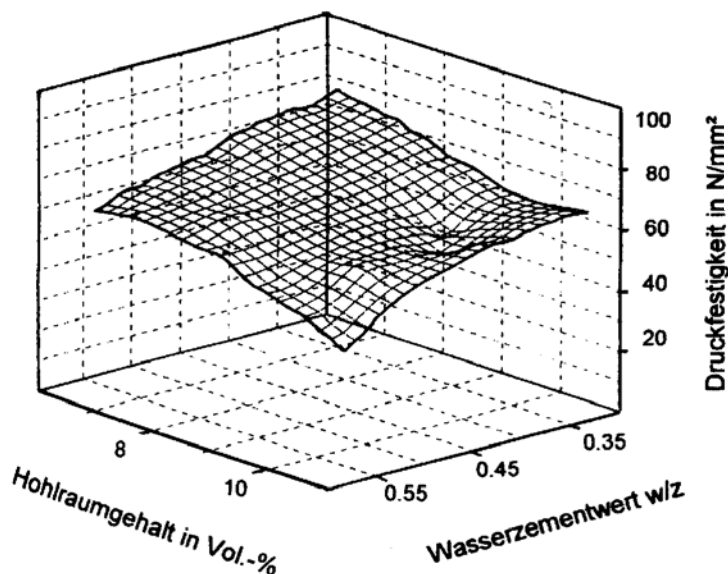


Bild 19: Veränderung der Druckfestigkeit erdfeuchter Betone in Abhängigkeit von Hohlraumgehalt und w/z-Wert [Schmidt 76]

4.4.2 Einfluss der Packungsdichte auf die Festbetoneigenschaften

4.4.2.1 Packungsdichte von Gesteinskörnungen

Unterschiedliche Ansätze zur Optimierung und Senkung des Hohlraumgehalts von Gesteinskörnungen werden in der Literatur diskutiert [Schwanda 10, 11, 12; Andreasen 9; Hummel 66; Funk 7; Westman 77, Fuller 8]. Zumeist bieten die Autoren Berechnungsansätze für stetige Sieblinien an. Die bekannteste und fälschlicherweise [Fuller 8] zugeschriebene Methode ist von [Andreasen 9] entwickelt worden (Gleichung 12).

$$K_{PD} = \left(\frac{D}{D_G}\right)^n \cdot 100 \quad (\text{Gleichung 12})$$

K_{PD} = Kumulierter Prozentualer
Durchgang
 D = betrachteter Korndurchmesser
 D_G = Größtkorndurchmesser
 n = Verteilungsmodul

Dieser Ansatz wurde von [Hummel 66] aufgegriffen und um eine Begrenzung des Kleinstkorndurchmessers (0,1 mm) ergänzt. Diese Formel ist Grundlage für die in der DIN 1045–2 dargestellten Sieblinienverläufe der Gesteinskörnungen. Die Sieblinie A entspricht einem Verteilungsmodul n von 0,70, die Sieblinie B von 0,22 und die Sieblinie C von 0,01. Abnehmende n -Werte signalisieren somit einen zunehmenden Sandgehalt und eine zunehmende Feinheit des Materials. In Verdichtungsversuchen ergaben sich die in Bild 20 dargestellten Zusammenhänge zwischen Sieblinienverlauf und Packungsdichte (Dichtigkeitsgrad) der Gesteinskörnungen. Als veränderliche Größe wurde der in Gleichung 12 bereits erwähnte Verteilungsmodul n benutzt. Dieser steuert den Verlauf der stetigen Sieblinie. Es zeigte sich, dass sich optimale Packungsdichten mit Verteilungsmodulen von 0,2 – 0,3 für gebrochene Körnung und 0,3 – 0,4 für runde Körnung einstellten. Sieblinien mit gebrochenem Material benötigten demzufolge einen größeren Anteil feineren Kornes, um die höchst mögliche Packungsdichte zu erzielen.

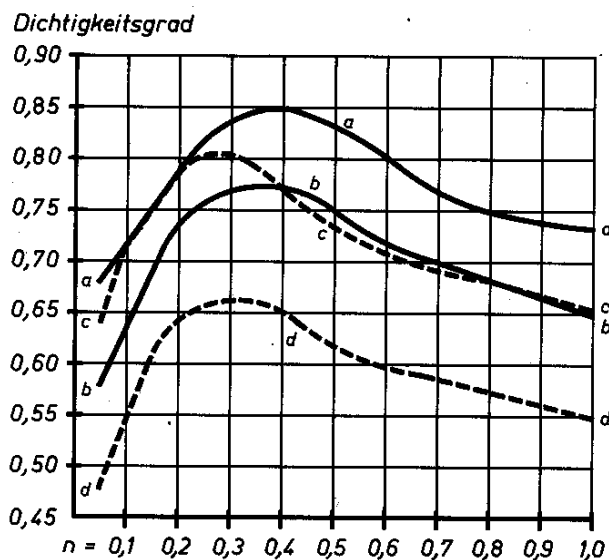


Bild 20:
Dichtigkeitsgrade von
Gesteinskörnungen

a = gerüttelter Kiessand
 b = loser Kiessand
 c = gerüttelter Basaltsplitt
 d = loser Basaltsplitt
 [Hummel 66]

4.4.2.2 Der Füllungsgrad der Gesteinskörnung mit Feinleim: Auswirkung auf die Betonfestigkeit

In [Schmidt 1] wird der Begriff des „Mörtelsättigungsgrades“ eingeführt. Dieser beschreibt bei Hdraulisch Gebundenen Tragschichten (HGT) den Grad der Füllung des von der Gesteinskörnung vorgegebenen Hohlraums mit Feinmörtel (Bindemittel und Feinstoffe < 0,25 mm und Wasser). Ein deutlicher Anstieg der Festigkeit im erhärteten Zustand ist durch die Verbesserung des Mörtelsättigungsgrades = Füllungsgrades der Gesteinkörnung zu erzielen. Ab Mörtelsättigungsgraden von 120% kommt es nach diesen Untersuchungen zu keiner weiteren Festigkeitszunahme, von da an bestimmt die Festigkeit des Feinmörtels die Festigkeit des Gesamtgemisches (Bild 21). Dies entspricht weitgehend dem Verhalten von Beton. Nach [Schmidt 1] wird durch den Überschuss des Feinmörtels die tragende Korn-zu-Kornstruktur aufgelöst. Dass nach Erreichen des optimalen Mörtelsättigungsgrades von rd. 120% (Bild 21) bei HGT's kein weiterer Festigkeitsanstieg festzustellen ist, muss auch vor dem Hintergrund von üblicherweise sehr hohen w/z-Werten hydraulisch gebundener Tragschichten gesehen werden. Sie liegen im Allgemeinen um 1,00. Der Bindemittelleim besitzt somit keine hohe Eigenfestigkeit und die positiven Einflüsse einer direkten Korn- zu Kornlastabtragung treten so stärker in den Vordergrund. Es ist somit zu prüfen, ob dieses Phänomen bei hohen Leimsättigungsgraden (> 100 %) auch bei erdfeuchten Betonen eintritt, da hier die w/z-Werte niedriger und die Zementsteinfestigkeiten höher liegen.

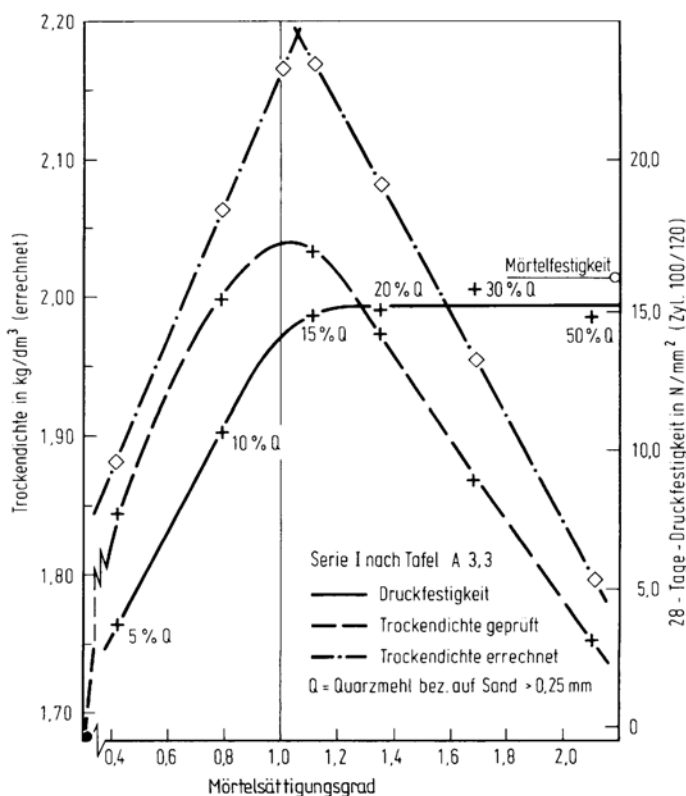


Bild 21: Abhängigkeit der Druckfestigkeit einer HGT vom Feinmörtelgehalt [Schmidt 1]

4.4.2.3 Packungsdichte von Feinststoffen

Die Gefügestruktur hydraulisch gebundener Mischungen lässt sich durch zwei Maßnahmen maßgeblich verbessern: durch die Steigerung des Hydratationsgrades des Bindemittels oder ggf. eines reaktiven Zusatzstoffs und durch die Verbesserung der Packungsdichte der Feinststoffe < 0,25 mm.

Durch die Erhöhung der Packungsdichte der Feinststoffe wird die Porosität vermindert. Für die nachfolgende Füllung und Vernetzung der fein- und grobgranularen Struktur mit Reaktionsprodukten wird eine verbesserte Ausgangslage geschaffen. Die Hydratationsprodukte haben weniger Hohlraum auszufüllen.

Warum dies ein effizientes Mittel zur Steigerung der Festigkeit insbesondere von spröden Materialien ist, zeigt die lineare Bruchmechanik. In [Shah 30] wird das Bruchversagen im Bereich von Poren u.a. mittels linear-elastischer und linear-elastisch-plastischer Theorien beschrieben. Für den einfachsten Fall eines spröden Materials ergibt sich der in Bild 22 dargestellte Spannungsverlauf im Bereich von Poren.

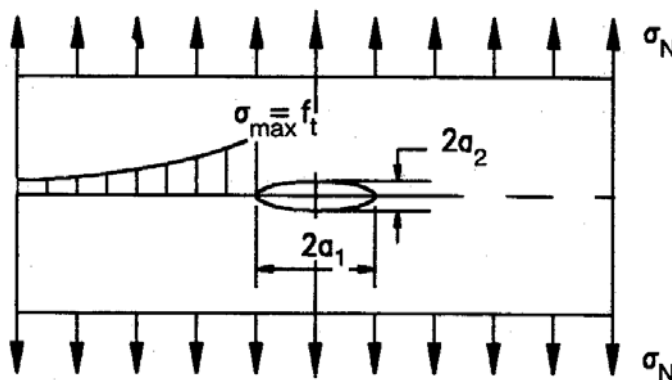


Bild 22:
Spannungsverlauf
im Bereich einer
Pore eines spröden
Materials [Shah 30]

Die dabei auftretenden Spannungsspitzen im Bereich von Poren können nach Gleichung 13 abgeschätzt werden.

$$\sigma_{\max} = \left(1 + \frac{2a_1}{a_2}\right) \cdot \sigma_N \quad (\text{Gleichung 13})$$

σ_{\max} = Spannungsspitze an der Risswurzel
 σ_N = Normalspannung
 a_1 = langer Radius der elliptischen Pore
 a_2 = kurzer Radius der elliptischen Pore

Beton weist, wie unter Punkt 4.4 beschrieben, eine heterogene Matrix auf, die durch Querzug versagt. Im Mikrobereich müssen unter Einwirkung von Querzugspannungen im Bereich von Poren unzählige Spannungsspitzen auftreten. Die Folge ist das Entstehen von Mikrorissen, die ein allmähliches Versagen hervorrufen. Ist man in der Lage, die Porosität durch Verbesserung der Packungsdichte zu senken, so kann dies ein Mittel sein, um die allmähliche Rissbildung zu verlangsamen und dadurch das Versagen zu verzögern. Aus diesem Grund sollen nachfolgend Möglichkeiten der Packungsdichteoptimierung durch Feinststoffe genauer behandelt werden.

Theorien und Modellbildung

Die Kornzusammensetzung für die Herstellung von Betonen beschäftigte schon früh die Wissenschaft. Schon 1907 veröffentlichte [Fuller 8] Untersuchungen zum Aufbau von Sieblinien und gab Gleichungen für den Kornaufbau an. Weitere Untersuchungen von [Andreasen 9] folgten, die zu der Angabe sehr einfacher Regeln für den Kornaufbau der groben Gesteinskörnung führten (Gleichung 12). Lange Zeit unbearbeitet blieb die Frage des Kornaufbaues der Feinststoffe. Untersuchungen von [Korfiatis 15], aber auch die schon seit langem in der Bodenmechanik gebräuchliche Ungleichförmigkeitszahl U zeigen, dass die Packungsdichte von Böden auch durch den granulometrischen Aufbau der Feinststoffe beeinflussbar ist.

[Rendchen 4] untersuchte den Einfluss der Granulometrie von Zement auf die Eigenschaften des Frisch- und Festbetons und stellte fest, dass Kornverteilungen, die ein größeres Steigungsmaß (n) besitzen, bei ähnlicher Feinheit eine größere Festigkeit aufwiesen. [Krell 3] wiederum zeigte, dass Zemente mit geringerer Steilheit der Kornverteilung (geringes Steigungsmaß (n)) einen geringeren Wasseranspruch besitzen (Bild 23). Um diese Sachverhalte besser erklären zu können, modellierte [Reschke 5] mittels eines für die grobe Gesteinskörnung entwickelten Berechnungsansatzes von [Schwanda 10, 11, 12] die Packungsdichte und die Festigkeitsentwicklung in Abhängigkeit von Feinheit und Sieblinienverlauf. Die Simulationsrechnungen bestätigten, dass Körnungen mit einem flacheren Sieblinienverlauf weniger Hohlraum aufweisen.

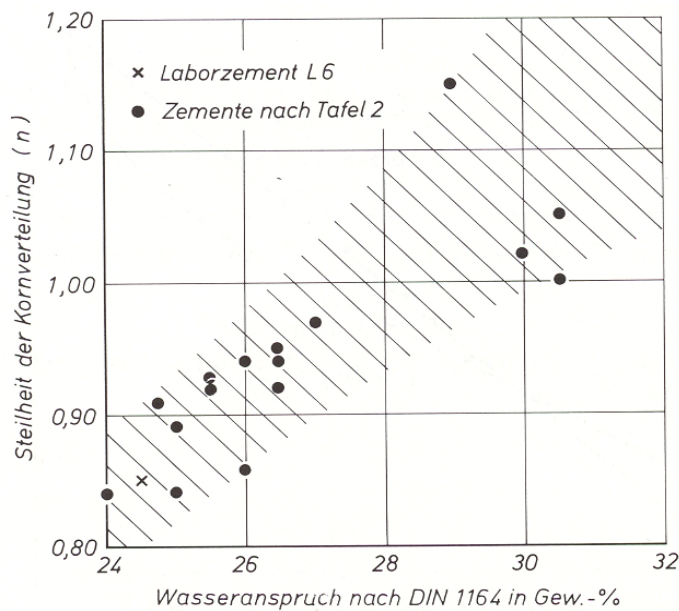


Bild 23:
Zusammenhang
zwischen Steilheit der
Kornverteilung und
dem Wasseranspruch
[Krell 3]

Um die Rheologie von Kohlesuspensionen zu verbessern [Funk 67], entwickelten die Autoren [Dinger und Funk 7] eine Funktion auf Basis des Rechenansatzes von [Andreasen 9] (Gleichung 14), mit der sich zwischen beliebig wählbarem Kleinst- und Größtkorn optimierte stetige Sieblinien aufbauen lassen. Die Vorgehensweise erinnert dabei formal an den Ansatz von Hummel für grobe Gesteinskörnungen [Hummel 66]. Eine Optimierung der feinstofflichen Zusammensetzung zur Steigerung der Packungsdichte zeigt somit auch in rheologischer Hinsicht Möglichkeiten auf, die zu qualitativ besseren Betonen führen können. Weitere Hinweise, die eine Verbesserung der rheologischen Eigenschaften durch Sieblinienoptimierungen stützen, sind in [Nehdi 17; Gallias 16; Kalb 58] zu finden.

$$K_{PD} = \left(\frac{D^n - D_K^n}{D_G^n - D_K^n} \right) \cdot 100 \quad (\text{Gleichung 14})$$

K_{PD} = Kumulierter Prozentualer Durchgang
 D = betrachteter Korndurchmesser
 D_G = Größtkorndurchmesser
 D_K = Kleinstkorndurchmesser
 n = Verteilungsmodul

In Simulationsrechnungen von [Dinger und Funk 7] wurde der günstigste Sieblinienverlauf bei einem Verteilungsmodul n von 0,37 bestimmt. Dieses Ergebnis wurde von [Lange 14] auf Betone übertragen und bestätigt. Hierzu wurden Normzemente (d_{50} rd. 20 μm) mit Mikrozetementen (maximale Korngrößen < 9 μm bzw. < 3 μm) gemischt und eine Kornverteilungskurve entsprechend den Vorgaben von Dinger und Funk gebildet. Die Rohdichte des Frischmörtels konnte gesteigert werden. Die Analyse der Porosität des Zementsteins zeigte außerdem eine Verminderung der Porosität. Dies hatte einen Anstieg der Festigkeit des Festbetons zur Folge.

4.4.3 Dauerhaftigkeitsaspekte

Neben den mechanischen Eigenschaften ist die Dauerhaftigkeit zementgebundener Baustoffe von großer Bedeutung. Man versteht darunter den Widerstand gegen einen äußeren Angriff durch schädliche Gase und Flüssigkeiten sowie gegen einen Frost- und Frost-Tausalz-Angriff aber auch die Abriebfestigkeit. Dieser Widerstand wird maßgeblich von der Porosität des Bindemittelsteins bestimmt.

Die Saugfähigkeit des Bindemittelsteins wird insbesondere durch den Anteil von Kapillarporen gesteuert. Den Hintergrund bildet das unterschiedliche Saugverhalten in Abhängigkeit vom Porenradius und dem Vernetzungsgrad der Poren. Luftporen (Größe $> 0,1\text{mm}$) liegen unvernetzt innerhalb des Zementsteingefüges vor. Kapillar- und Gelporen ($< 33\mu\text{m}$) hingegen sind vernetzt. Kapillarporen führen zu einem mit kleiner werdendem Durchmesser zunehmenden Saugen. Die Erläuterungen zur kapillaren Steighöhe erklären dieses Verhalten (Abschnitt 4.3.1 - Gleichung 2).

Die Vernetzung und die starke Saugfähigkeit von Kapillarporen ermöglichen es Flüssigkeiten in den Beton zu gelangen. Unter Frosteinwirkung kann ein zu hoher Anteil saugender Poren dazu führen, dass kritische Sättigungsgrade des Porenvolumens erreicht werden und die Volumenzunahme des Wassers beim Phasenübergang von flüssig zu fest zu Frostsprengungen führt [Stark 64; Krenkler 56]. Folgt man den Angaben von Powers oder Bouge [Krenkler 56], so sollte ein Kapillarporengehalt des Zementsteins von rd. 20 Vol.-% nicht überschritten werden. Einen ähnlichen Weg gibt [Bentrup 54] für Ziegel vor.

Die Kapillarporosität des Zement- bzw. Bindemittelsteins wird durch den w/z-Wert beeinflusst [Stark 64]. Darüber hinaus ist aber auch der Verdichtungseinfluss auf das Saugverhalten erdfeuchter Betone zu beachten. [Wierig 28] stellte in Versuchsreihen erdfeuchte Betone mit unterschiedlichen Wassergehalten (und somit w/z-Werten) bei sonst gleicher Zusammensetzung her. Bei gleicher Verdichtungsdauer ließen sich Proben mit geringem w/z-Wert schlechter verdichten. Trotz des geringen w/z-Werts wiesen diese Proben - infolge der schlechteren Verdichtung - eine deutlich gestiegene kapillare Wasseraufnahme auf. Die Kapillarporosität wird somit nicht nur durch den w/z-Wert, sondern auch durch die Verdichtung (und somit durch die Lagerungsdichte der Feststoffe) gesteuert.

5 Ein Prüfverfahren für erdfeuchte Betone

Normalbeton und erdfeuchter Beton unterscheiden sich in erster Linie durch ihre Verdichtbarkeit. Grund hierfür ist, dass erdfeuchte Betone im Gegensatz zu Normalbetonen im Allgemeinen einen geringeren w/z-Wert und einen niedrigeren Leimgehalt aufweisen. Übliche w/z-Werte schwanken zwischen 0,35 – 0,45 , der Zementgehalt zwischen 270 und 350 kg/m³ (Leimgehalt rd. 210 und 240 l/m³) . Feinleim ist somit in geringerem Umfang innerhalb des granularen Skeletts vorhanden. Der Leim weist gleichzeitig wegen des im Vergleich zu Normalbetonen mit gleichem Zementgehalt geringeren w/z-Werts eine höhere Viskosität auf, er ist steifer. Ein solches Gemisch ist nur unter erheblichem Energieeintrag ausreichend zu verdichten. Die steifere Konsistenz bedeutet auch, dass die für Normalbeton üblichen Konsistenzprüfverfahren untauglich sind. Dies gilt auch für die Bestimmung des Verdichtungsmaßes, das nur für steifplastische, nicht aber für erdfeuchte Betone geeignet ist. Es war deshalb notwendig ein eigenes stoffgerechtes Prüfverfahren zu entwickeln.

Anleihen wurden bei der Bodenmechanik genommen. Das mit schlagender Verdichtung arbeitende Proctorverfahren empfahl sich durch die Übertragbarkeit der auch für die Beurteilung erdfeuchter Betone charakteristischen Kenngrößen Lagerungsdichte und Wassergehalt. Sie werden durch vielfältige Parameter beeinflusst, wie z.B. die Kornform und die Kornzusammensetzung der Gesteinskörnungen, dem Wasseranspruch der Feinststoffe, aber auch durch die Verdichtungsintensität. Außerdem stellt die Proctorkurve (Bild 24) den Zusammenhang zwischen der Dichteentwicklung und dem Wassergehalt dar. Weitere Information zur Verdichtungswilligkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt liefert der Verlauf (die Steigung) der Proctorkurve.

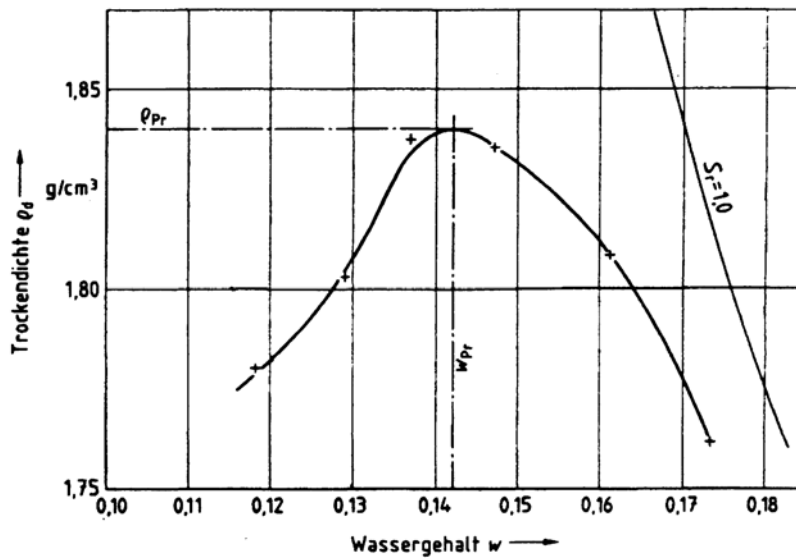


Bild 24: Übliche Darstellung einer Proctoranalyse eines Bodens nach DIN 18127

Das Proctorprüfverfahren arbeitet schlagend, wobei die Schlagzahl pro Proctorversuch konstant und somit der Energieeintrag gleich gehalten wird. Die übliche Verdichtungsweise für erdfeuchte Betone ist hingegen die Rüttel- bzw. Rüttelpressverdichtung, d.h. die Gemische werden gleichzeitig gerüttelt und gepresst. Für den nötigen Auflastdruck sorgt ein hydraulisch betriebener Stempel. Für die Herstellung von Pflastersteinen werden leistungsstarke und zumeist vollautomatisch arbeitende Pflastersteinfertiger eingesetzt. Leistungsfähige Verdichtungsaggregate in Kombination mit hydraulisch betriebenen Auflaststempeln sorgen trotz kurzer Taktzeiten für die notwendige Verdichtung. In der Rohrfertigung werden ähnliche Wege beschritten, die es ermöglichen großformatige Rohre sofort zu entschalen. Um sicherzustellen, dass die Versuchsergebnisse die Wirklichkeit des Verdichtungs Vorgangs möglichst genau widerspiegeln, wurde ein neues, bezüglich des Versuchsablaufs an den schlagenden Proctorversuch nach DIN 18127 angelehntes Verfahren entwickelt. Der beim Proctorversuch nach DIN 18127 lagenweise vorzunehmende Einbau des zu prüfenden Materials, entsprechend der in Bild 25 dargestellten Art und Weise, führt in der Regel zu einer inhomogenen Dichteverteilung im Probekörper und sollte vermieden werden. Unter der Einwirkung einer schlagenden Verdichtung kann es zudem zur Zerkleinerung grober Partikel kommen. Ebenso ist die Ausbildung von hydrostatischen Teilsystemen in stark verdichteten Probenregionen nicht auszuschließen. Ein Messsystem, das mit Vibrationsverdichtung und einer Auflast arbeitet und in welches das gesamte zu prüfende Gemisch auf einmal eingefüllt wird, kann helfen diese Probleme zu vermeiden.

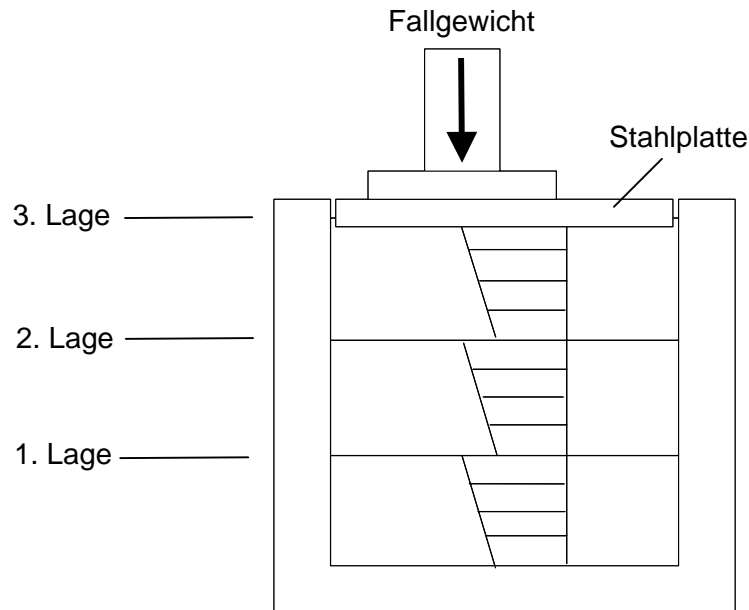


Bild 25: Lagenbildung und inhomogene Dichteverteilung im Schlagproctorversuch nach DIN 18127

5.1 Aufbau des Prüfgeräts

Das Prüfgeräts besteht aus einer gusseisernen oder stählernen Zylinderschalung (Höhe: 300 mm; Durchmesser 150 mm). Ist die Form teilbar und können die Zylinderwandungen entfernt werden, so steht ein Probekörper für Gründruckfestigkeitsversuche (Prüfung der Druckfestigkeit des frischen Probekörpers) im sofortentschalteten Zustand zur Verfügung.

Auf die eingefüllte Probe aus Frischbeton wird ein 28 kg schwerer, frei beweglicher Auflastkolben aufgesetzt. Er verhindert nicht nur das Wandern grober Gesteinskörnungen innerhalb der Probe in feinststoffarmen Mischungen, sondern simuliert mit einer Auflast von rd. $0,016 \text{ N/mm}^2$ (rd. $1,6 \text{ t/m}^2$) gleichzeitig die in industriellen Pflastersteinfertigern üblichen Auflastspannungen von $0,01 - 0,02 \text{ N/mm}^2$. Um ein Austreten von Wasser bzw. Feinststoffleim während der Verdichtung zu vermeiden, muss nach eigenen Erfahrungen die Spaltbreite zwischen Zylinderformwandung und Auflastkolben auf maximal $0,1 \text{ mm}$ beschränkt werden. Das Prüfgerät wird fest auf einem Rütteltisch fixiert.

Den Aufbau des Prüfgeräts zeigt Bild 26. Die dem geotechnischen Proctorversuch entsprechende Versuchsdurchführung trug zum Namen „Rüttelproctorversuch“ bei. Neben der Lagerungsdichte durch Messen und Wiegen der Probe, kann mittels Messaufnehmer zusätzlich der Verdichtungsverlauf in Abhängigkeit von der Rüttelzeit erfasst werden.



Bild 26: Rüttelproctor mit Laptop und Messaufnehmer zur Erfassung des Verdichtungsverhaltens

5.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisauswertung

Der Rüttelproctorversuch lehnt sich an die in DIN 18127 für den Proctorversuch beschriebene Vorgehensweise an. Dem zunächst trockenen Feststoff wird sukzessive Wasser zugemischt und die unter konstanter Verdichtungsintensität (Frequenz = 60 Hz, Schwingbreite = 0,75 mm) und –zeit (90 Sekunden) erzielte Feuchtrohdichte des Gemisches ermittelt. Sie ergibt sich aus dem Gewicht des eingefüllten Frischbetons und dem gemessenen Volumen nach der Verdichtung (Definition in Bild 28). Aus diesen Messwerten wird nachfolgend die Packungsdichte berechnet (Bild 28). Anstelle der sonst üblichen Angabe des Wassergehalts der Probe in Masseprozent wird diese volumetrisch angegeben. Dies ermöglicht den Wasseranspruch verschiedener Gemische miteinander zu vergleichen und den Wassergehalt direkt aus der grafischen Darstellung des Proctors entnehmen zu können. Neben dieser Angabe finden auch der w/z- und w/f-Wert (Definition Bild 27) als beschreibende Größen des Wassergehalts der Probe Anwendung.

$\text{gravimetrischer Wasser / Feinststoff - Wert [-]} = \frac{w}{f}$	
$\text{gravimetrischer Wasser / Zement - Wert [-]} = \frac{w}{z}$	
$\text{volumetrischer Wassergehalt [Vol. - \%]} = \frac{V_w}{\Sigma V_i + V_w + V_{LP}}$	
$\Sigma V_i = \Sigma \text{Volumen Feststoffe}$	$V_w = \text{Volumen Wasser}$
$z = \text{Gewicht Zement}$	$V_{LP} = \text{Volumen Luftporen}$
$f = \text{Gewicht Feinststoffe}$	$w = \text{Gewicht Wasser}$

Bild 27: Definition von Variablen und Parametern

Neben dem Wassergehalt der Probe, stellt die bereits angesprochene Packungsdichte im weiteren Verlauf der Arbeit eine wichtige Kenngröße dar. Sie wurde der sonst in der Bodenmechanik üblichen Kenngröße der Trockendichte vorgezogen, da diese von der Dichte der Inhaltsstoffe abhängig ist. Eine verbindlichere Aussage gibt die Packungsdichte. Diese Größe gibt Auskunft über den volumetrischen Feststoffgehalt der Probe. Die Angabe einer Packungsdichte von beispielsweise 84 Vol.-% bei einem Probenvolumen von 1000 dm³ bedeutet, dass 840 dm³ der Probe aus Feststoff bestehen. Das restliche Volumen wird von Wasser und Luft eingenommen. Eine weitere wichtige Kenngröße dient zur Kontrolle der Ergebnisse im Rahmen der Rüttelproctoranalyse. Sie wird im weiteren Verlauf als Grenzpackungsdichte $S_r(pk)$ bezeichnet und beschreibt die maximal mögliche Packungsdichte des Materials bei gleichbleibender Zusammensetzung ohne Luftporen (Definition Bild 28). Überschreitet die gemessene Packungsdichte diesen Kontrollwert, so muss Wasser oder Zementleim ausgetreten sein. Der Versuch ist dann fehlerhaft.

$$\text{Grenzpackungsdichte } Sr(pk) [\text{Vol.} - \%] = \frac{\rho_{\text{Dichte Beton}}}{\rho_{\text{Dichte Feststoffe}}} * 100$$

$$\text{Packungsdichte } Pk [\text{Vol.} - \%] = \frac{\sum V_i}{V_{\text{Frischbeton}}} * 100$$

$$\rho_{\text{Dichte Beton}} = \frac{\sum G_i + w}{\sum V_i + V_w}$$

$$\rho_{\text{Dichte Feststoffe}} = \frac{\sum G_i}{\sum V_i}$$

$$\sum V_i = \sum \text{Volumen Feststoffe} = \sum \frac{G_i}{\rho_i} \quad \sum G_i = \sum \text{Gewicht Feststoffe}$$

$$V_{\text{Frischbeton}} = \text{Messwert} \quad G_{\text{Frischbeton}} = \text{Messwert}$$

$$w = \text{Gewicht Wasser} \quad V_w = \text{Volumen Wasser}$$

Bild 28: Definition der für die Rüttelproctorauswertung wichtigen Größen

Die für die Rohdichtebestimmung notwendige Bestimmung der Höhe des verdichteten Probekörpers kann mittels Schieblehre oder Messaufnehmer erfolgen. Die Messung mittels Messaufnehmer bietet den Vorteil, dass sich zusätzlich der Verdichtungsverlauf und somit die Verdichtungswilligkeit des beprobten Materials messen lässt. Der in Bild 26 abgebildete Messaufnehmer registriert die Bewegung des Auflastgewichts. Typische Verdichtungsverläufe eines Korngemisches im Rüttelproctorversuch mit 5 verschiedenen Wassergehalten sind in Bild 29 dargestellt. Dort zeigt sich, dass sich die Verdichtungswilligkeit und Packungsdichte bis zu einem Wassergehalt von rd. 11,5 Vol.-% (115 l/m³) verbessert und bei weiter zunehmendem Wassergehalt abfällt. Die Kurvenverläufe der Proben mit einem Wassergehalt über 11,5 Vol.-% zeigen dabei einen charakteristischen Verlauf. Nach einer anfänglich schnellen Zunahme der Packungsdichte, weisen Proben mit einem zu hohen Wassergehalt keine langsame Nachverdichtung auf, wie sie üblicherweise bei Proben mit geringeren Wassergehalten auftreten. Dieses charakteristische hydrostatische Verhalten wird im weiteren Verlauf der Arbeit wiederholt genutzt, um einzelne Phänomene zu erklären.

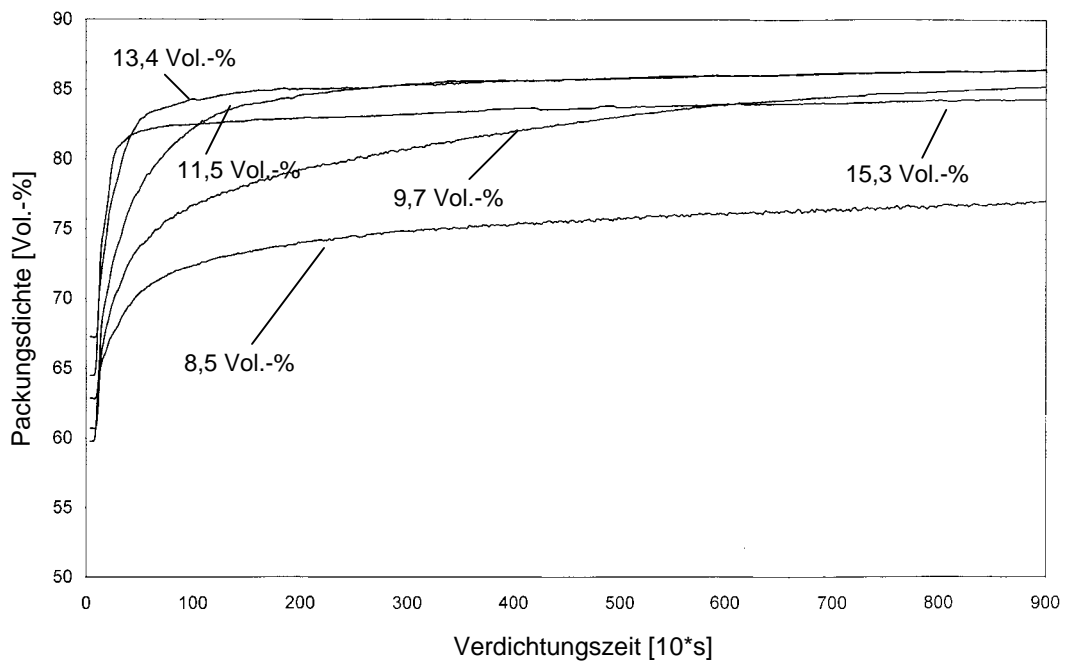


Bild 29: Verdichtungsverhalten eines erdfuchten Betons in Abhängigkeit vom Wassergehalt (B16 – 0/2 Rundkorn – 2/16 gebrochenes Korn – Zementgehalt 325 kg/m³ an w_{opt})

5.3 Quantifizierung der Verdichtungsarbeit des Schlagproctors nach DIN 18127 und des Rüttelproctors

Die Verdichtungsarbeit des Schlagproctors nach DIN 18127 kann über die Beschleunigungsarbeit des Systems abgeschätzt werden (Gleichung 15). Dabei wird davon ausgegangen, dass Energieverluste durch Reibung vernachlässigbar sind.

$$W_B = F \cdot s = m \cdot \dot{a} \cdot s \quad (\text{Gleichung 15})$$

W_B = Beschleunigungsarbeit [Nm]
 m = Masse [kg]
 \dot{a} = Erdbeschleunigung [9,81 m/s²]
 s = Fallstrecke [m]

Für schluffigen Kiessand empfiehlt sich die Wahl eines Versuchszylinders von 150 mm Durchmesser und einer Höhe von 125 mm. Die Fallhöhe des Schlaggewichts beträgt 4,5 kg. Für die Durchführung des Proctorversuchs wird das Probematerial in drei Lagen eingebaut und jede Lage mit 22 Schlägen verdichtet. Wählt man den modifizierten Proctorversuch, so

wird das Probematerial in 5 Lagen eingebaut und jede Lage mit 59 Schlägen verdichtet. Die in das Probematerial eingebrachte Energie kann auf das Probenvolumen bezogen werden. Das Probenvolumen beträgt rd. 2,2 dm³. Die Rechnungen 1 - 4 zeigen den Berechnungsgang. Im Rahmen des normalen Proctorversuchs wird eine Verdichtungsenergie von 1311 Nm in den Probekörper eingetragen (Volumenbezogen rd. 596 Nm/dm³). Für den modifizierten Proctorversuch ergibt sich bei analoger Vorgehensweise ein Energieeintrag von 5860 Nm (Volumenbezogen rd. 2664 Nm/dm³).

Proctorversuch:

$$W_B = 4,5\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,45\text{m} \cdot 3 \text{ (Lagen)} \cdot 22 \text{ (Schläge)} = 1311 \text{ Nm} \quad \text{(Rechnung 1)}$$

$$\text{Volumenbezogen} = \frac{1311 \text{ Nm}}{2,2 \text{ dm}^3} = 596 \frac{\text{Nm}}{\text{dm}^3} \quad \text{(Rechnung 2)}$$

Modifizierter Proctorversuch:

$$W_B = 4,5\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,45\text{m} \cdot 5 \text{ (Lagen)} \cdot 59 \text{ (Schläge)} = 5860 \text{ Nm} \quad \text{(Rechnung 3)}$$

$$\text{Volumenbezogen} = \frac{5860 \text{ Nm}}{2,2 \text{ dm}^3} = 2664 \frac{\text{Nm}}{\text{dm}^3} \quad \text{(Rechnung 4)}$$

Überträgt man die gleiche Vorgehensweise auf den dynamischen Rüttelproctorversuch, so lässt sich auch hier der Energieeintrag über das Energieangebot abschätzen.

$$W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad \text{(Gleichung 16)}$$

$$v = \frac{a}{\omega} \quad \text{(Gleichung 17)}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f' \quad \text{(Gleichung 18)}$$

W_{kin} = kinetische Energie [Nm]
 v = Geschwindigkeit [m/s]
 a = Beschleunigung [m/s²]
 ω = Winkelgeschwindigkeit [rad/s]
 f' = Frequenz [1/s = Hz]

Der in Bild 26 dargestellte Versuchsaufbau ist fest mit einem Rütteltisch verbunden. Die am Tisch gemessene Beschleunigung bei einer Frequenz von 60Hz und einer Auflast von 50 kg (Zylinderform, Auflastgewicht und Betonfüllung (5,5 kg)) betrug rd. 47 m/s². Die Verdichtungszeit beträgt maximal 90 Sekunden. Auf Basis dieser Werte ergibt sich abgeschätzt ein maximaler Energieeintrag von rd. 2810 Nm und volumenbezogen von rd. 1222 Nm/dm³.

$$W_{kin} = 0,5 \cdot 33,5 \text{ kg} \cdot \left(\frac{47 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2 \cdot \pi \cdot 60 \frac{1}{\text{s}}} \right)^2 \cdot 60 \frac{1}{\text{s}} \cdot 90 \text{ s} \cdot 2 = 2810 \text{ Nm} \quad (\text{Rechnung 5})$$

$$\text{Volumenbezogen} = \frac{2810 \text{ Nm}}{2,3 \text{ dm}^3} = 1222 \frac{\text{Nm}}{\text{dm}^3} \quad (\text{Rechnung 6})$$

In Untersuchungen von [Reisner 78] wurden erdfeuchte Betone sowohl durch das Rüttelproctorverfahren als auch durch den modifizierten Schlagproctorversuch verdichtet. Es zeigte sich, dass sich vergleichbare Packungsdichten bzw. Trockenrohdichten bei gleichen optimalen Wassergehalten einstellten. Diese Ergebnisse sind ein Hinweis darauf, dass die kombinierte Rüttelpressverdichtung das Korngerüst effektiver verdichtet, als der schlagend arbeitende modifizierte Proctorversuch.

5.4 Wiederholgenauigkeit des Prüfverfahrens

Zur Festlegung der Wiederholungsgenauigkeit des Prüfsystems wurden zwei unterschiedlich zusammengesetzte erdfeuchte Betone von jeweils drei Prüfern wiederholt geprüft. Diese Vorgehensweise sollte sowohl Ergebnisse zur Wiederhol- als auch Vergleichspräzision liefern. Anhand der in Bild 30 dargestellten Werte kann auf eine hohe Präzision des Systems geschlossen werden. Im Rahmen der Wiederholpräzision der einzelnen Prüfer zeigten sich Abweichungen von maximal rd. 0,4 Vol.-%, bezogen auf die Vergleichspräzision der verschiedenen Prüfer maximale Abweichungen von rd. 0,7 Vol.-%. Die beprobten Betonzusammensetzungen mit rd. 273 und rd. 325 kg/m³ Zementgehalt und einer Sieblinie B16 – 0/2 rundes Korn – 2/16 gebrochenes Korn stellten die stoffliche Basis für einen Grossteil der in dieser Arbeit präsentierten Versuche dar. Ihre Zusammensetzung ist in Tabelle 1 am Punkt des optimalen Wassergehalts dargestellt.

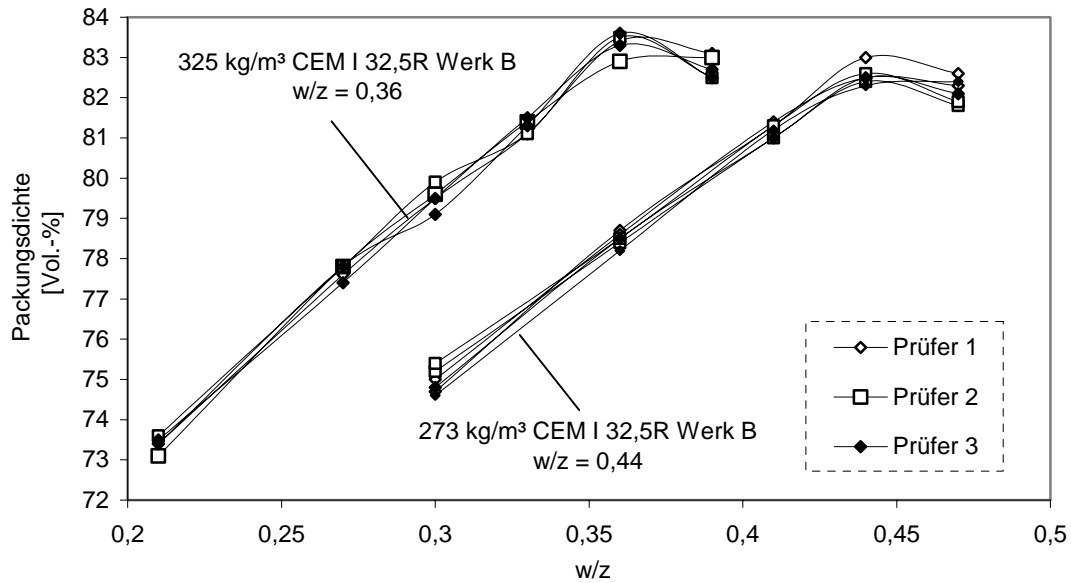


Bild 30: Vergleichs- und Wiederholpräzision von Mischungen mit 273/325 kg/m³ Zementgehalt, Sieblinie B16 – 0/2 Rundkorn – 2/16 gebrochenes Korn

		273 kg/m ³ Sieblinie B16**	325 kg/m ³ Sieblinie B16**
CEM I 32,5 R Werk B	kg/m ³	273	325
Wasser	kg/m ³	119	116
Sand 0/2r (rund)	kg/m ³	823	808
Basalt 2/5g (gebrochen)	kg/m ³	455	448
Basalt 5/8g	kg/m ³	319	314
Basalt 8/11g	kg/m ³	251	247
Basalt 11/16g	kg/m ³	295	291
w/z	-	0,44	0,36
Luftporengehalt	Vol.-%	rd. 4,9	rd. 4,6
Leimgehalt <0,125 mm*	dm ³	208	222
Feinststoffvolumen <0,125 mm	dm ³	88	105

*ohne Berücksichtigung des Luftporengehalts

**Angaben beziehen sich auf die im Anhang D – Tabellen D12 und D13 dargestellten Ergebnisse

Tabelle 1: Mischungszusammensetzung der in Bild 30 dargestellten Basismischungen am Punkt des optimalen Wassergehalts (w_{opt})

6 Hauptversuche

6.1 Verwendete Ausgangsstoffe

6.1.1 Gesteinskörnungen

Lokaler Ederkies und gebrochener Basalt nach DIN 4226-1 kamen zum Einsatz. Die Sieblinien der Gesteinskörnungen sind im Anhang A - Tabelle A4 und A6 - zu finden. Um speziell abgestufte Sieblinien bilden zu können, wurden für einige Versuchsreihen Teilfraktionen der Gesteinskörnungen abgesiebt. Die abgesiebten Kornfraktionen sowohl des Sandes, des Kieses, als auch des Basalts umfassen die Körnungsbereiche: 0,125/0,71 mm, 0,71/2,00 mm, 2/5 mm, 5/8 mm, 8/11 mm und 11/16 mm. Die Dichten wurden pyknometrisch nach DIN EN 1097 T6 ermittelt. Es ergaben sich für die verschiedenen Kornfraktionen (0,125 – 16mm) des Basalts durchschnittliche Dichten von rd. 3,06 kg/dm³. Der verwendete Sand 0/2 wies eine Dichte von 2,63 kg/dm³ und das Kiesmaterial 2/16 von 2,55 kg/dm³ auf.

Alle grafischen Darstellungen von Versuchsergebnissen enthalten Hinweise zur Sieblinie, Körnung und Kornform der jeweils verwendeten Kornzusammensetzung. Hinsichtlich der Kornform wird nach gebrochener (g) und runder (r) Körnung unterschieden. Eine genauere Erläuterung liefern die folgenden Zeilen:

Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16g ⇒ 0/2 Rundkorn – 2/16 gebrochenes Korn

Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16r ⇒ 0/2 Rundkorn – 2/16 Rundkorn

6.1.2 Zemente

Im Rahmen der Versuchsreihen kamen drei Zemente zum Einsatz:

- CEM I 32,5 R und CEM I 52,5 R des Werks B
- CEM III/A 32,5 des Werks A

Alle Zement entsprachen der DIN EN 197. Die Zemente des Werks B basieren auf dem selben Zementklinker und unterscheiden sich nur durch ihre Mahlfineheit. Sie sind nach DIN EN 197 als schnellerhärtend (R) eingestuft. Als Gegenstück wurde ein langsamer erhärtender Zement CEM III/A 32,5 des Werks A ausgewählt.

Die Angaben der Hersteller über die chemische Zusammensetzung der Zemente sowie zu den physikalischen und mechanischen Eigenschaften sind Anhang A – Tabelle A1 und A2 - zu entnehmen. Zusätzlich wurde die Kornverteilung mittels Lasergranulometer (Beckman Coulter LS230) bestimmt. Die Verteilungen sind in Bild 31 dargestellt.

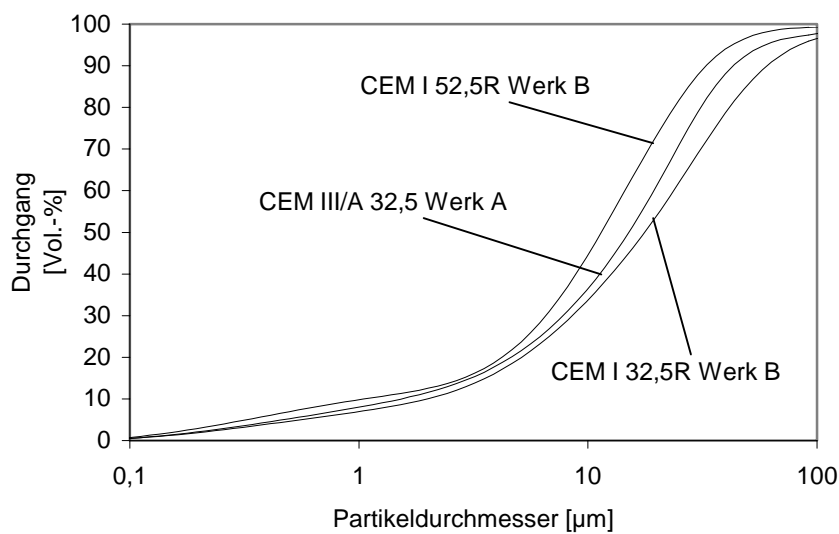


Bild 31: Sieblinienverlauf Zemente

6.1.3 Inerte/reaktive Füllstoffe

In die Untersuchungen wurden als Füllstoffe Steinkohlenflugasche nach DIN EN 450, Kalksteinmehl- und Quarzmehl nach DIN 4226-1 einbezogen. Bei der Auswahl der Feinststoffe interessierte insbesondere, dass die jeweilige Stoffgruppe in unterschiedlichen Feinheiten bezogen werden konnte. Die Kombination von Zusatzstoffen, aber auch Zusatzstoffen mit den zuvor beschriebenen Zementen, ermöglicht die gezielte Beeinflussung der feinstofflichen Kornzusammensetzung. Wie zuvor für die Zemente, sind in den Bildern 32 und 33 die Sieblinienverläufe der Zusatzstoffe dargestellt.

Abgesehen vom granulometrischen Aufbau (Bilder 32 und 33) interessierte die chemische Reaktivität. Sie wurde in Anlehnung an einen Versuchsvorschlag von [Fernandes 70]

bestimmt. Dazu wurden jeweils 25g der untersuchten Stoffe in 100 ml NaOH –Lösung (3,5 Mol; pH 13,5) gegeben und für 5 Tage bei 100°C gelagert, die Lösung anschließend titriert (Salzsäure - 1,0 molar). Die Reaktivität wurde anhand des Natriumhydroxidverbrauchs festgelegt. In Tabelle 2 ist neben der Angabe weiterer Stoffkennwerte, der prozentuale Natriumhydroxidverbrauch bezogen auf die unverbrauchte Lösung angegeben. Die Flugaschen FA und FFA sind als teilreaktiv einzustufen. Ergänzende Hinweise zur chemischen Zusammensetzung der Flugaschen gibt Anhang A – Tabelle A3.

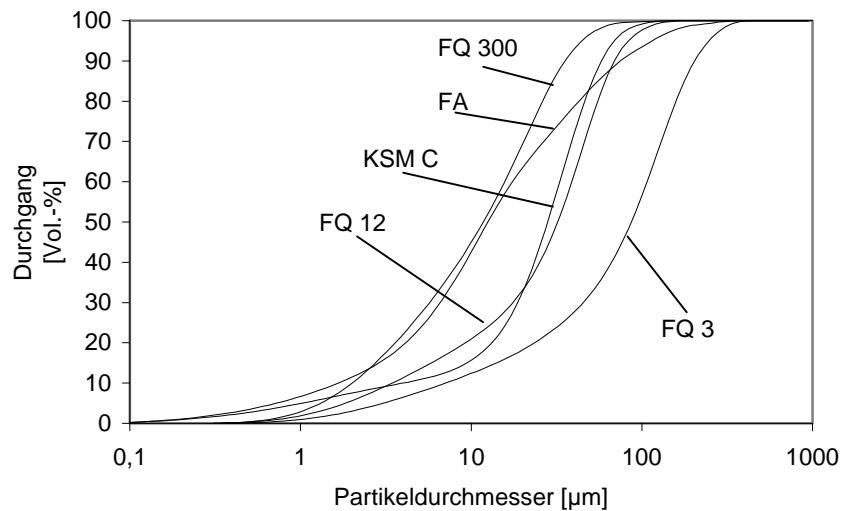


Bild 32: Sieblinienverlauf Stoffe mittlerer Feinheit

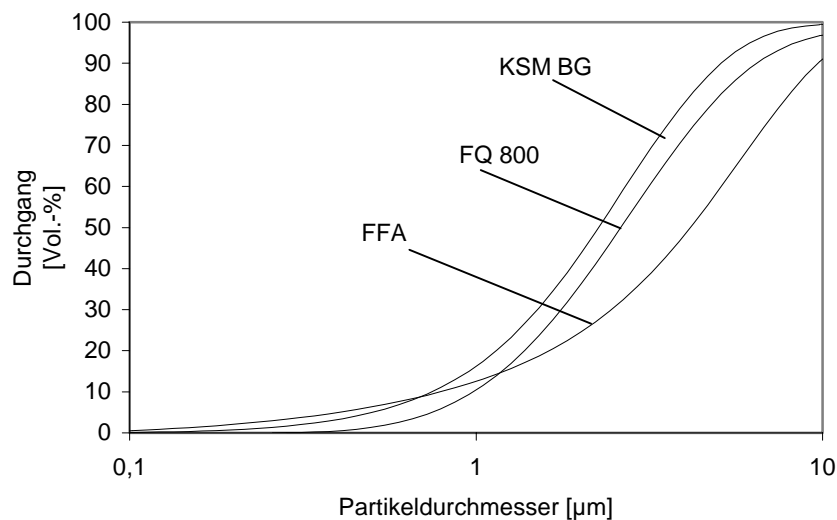


Bild 33: Sieblinienverlauf Stoffe hoher Feinheit

Bezeichnung Kurzform	Dichte	Parameter RRSB		Blaine	Chem. Hauptkomponente	Stoff	Reaktivität
		Steigungsmaß (n)	Lageparameter x' / d_{50}				Verbrauch Na(OH) ₂
	kg/dm ³	-	μm	cm ² /g	-	-	M.-%
CEM I 32,5 R Werk B	3,1	0,97	25 / 18	3.700	s. Anhang A	Zement**	n.b.
CEM I 52,5 R Werk B	3,1	1,10	15 / 11	4.600	s. Anhang A	Zement**	n.b.
CEM III/A 32,5 Werk A	3,1	1,00	19 / 16	3.971	s. Anhang A	Zement**	n.b.
Feinquarz FQ3	2,65	0,80	110 / 90	1.270	99,9 % SiO ₂	Quarzmehl	0%
Feinquarz FQ12	2,65	1,18	40 / 32	4.220	99,9 % SiO ₂	Quarzmehl	0%
Feinquarz FQ300	2,65	1,00	17 / 11,8	6.390	99,9 % SiO ₂	Quarzmehl	0%
Feinquarz FQ800	2,65	1,50	3,3 / 2,6	17.000*	99,9 % SiO ₂	Quarzmehl	4,5%
Kalksteinmehl KSM C	2,70	1,65	34 / 2,8	2.800	>99% CaCO ₃	Kalksteinmehl	0%
Kalksteinmehl KSM BG	2,70	1,45	2,8 / 2,3	22.000*	98% CaCO ₃	Kalksteinmehl	0%
Flugasche FA	2,38	0,70	19 / 13	3.140	>50 % SiO ₂	Flugasche**	27%
Feinstflugasche FFA	2,38	1,30	6 / 4,2	11.000*	>55,3 % SiO ₂	Flugasche**	38%

*) nur abschätzende Ermittlung mittels Blaineverfahren möglich **) genaue chemische Zusammensetzung Anhang A

Tabelle 2: Granulometrie und chemische Hauptbestandteile der Feinststoffe

6.1.4 Zusammensetzungen der untersuchten erdfeuchten Gemische

Als Ausgangsmischungen wurden industrieübliche Mischungen mit Zementgehalten zwischen 273 – 325 kg/m³ Beton gewählt. Die genaue Darstellung der Mischungszusammensetzung ist bei erdfeuchten Betonen nur schwer möglich, da variierende Wassergehalte im Rahmen der bereits beschriebenen Rüttelproctorversuche immer auch eine Veränderung des Gehalts der übrigen Inhaltsstoffe nach sich ziehen. Aus diesem Grund beziehen sich alle Angaben hinsichtlich der Mischungszusammensetzung von Betonen (z.B. in Grafiken) in dieser Arbeit auf den Punkt der größten Packungsdichte. Die hierfür erforderliche Wassermenge wird als optimale Wassermenge w_{opt} bezeichnet.

Im Verlauf der Arbeit wurde eine Vielzahl von Rezepturen untersucht, die sich hinsichtlich der Gesteinskörnung und der Art der Feinststoffe unterscheiden. Die Zusammensetzungen aller Gemische sind in den Kapitelanhängen B – D zusammengestellt. In den jeweiligen Kapiteln wird auf diese verwiesen.

6.1.5 Zusatzmittel

Zur Verbesserung der Dispergierung wurden im Rahmen der Betonoptimierung (Abschnitt 6.6.2) ein Fließmittel auf Polycarboxylatetherbasis (FM 1254) zugegeben. Angaben zum Fließmittelgehalt sind in den Grafiken durch den Zusatz (FM 1254) und der Zusatzangabe des Gehalts in kg/m^3 zu finden.

6.1.6 Prüfverfahren

Die zur Beurteilung der Festigkeit und des Witterungswiderstandes erdfeuchter Betone herangezogenen Prüfverfahren waren:

- Lasergranulometrische Messung der Zusammensetzung der Feinstoffe. Zur Messung wurde ein Beckman Coulter LS230 Lasergranulometer verwendet.
- Rüttelproctorprüfung zur Bestimmung der Packungsdichte und des Wasseranspruchs.
- Festigkeitsprüfung im grünen (Gründruckfestigkeitsprüfung in Anlehnung an DIN EN 12390-3 mit einer Spannungszunahme von $0,1 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$) und im erhärteten Zustand (Druck- und Spaltzugprüfung nach DIN EN 12390-3 bzw. DIN EN 12390-6) von mittels Rüttelproctor hergestellten Probekörpern.
- Rheologische Untersuchungen von Zement- und Feinststoffleimen. Zum Einsatz kam ein Rheometer des Typs Haake VT 550 mit Zylindermesssystem.
- Der Frosttausalz widerstand wurde mit dem CDF-Verfahren nach DIN EN 12390-9 (Entwurf) in 3% -Natriumchloridlösung geprüft.
- Das Porenvolumen und die Porenradienverteilung des Festbetons wurde mit einem Quecksilberdruckporosimeter (Typ Micromeritics Autopore II 9220) gemessen.

Zusätzlich wurde ein Teil der Feinststoffe mittels Okamura- [Okamura 71] und Puntkeversuch [Puntke 72] analysiert.

6.2 Modellierung der Eigenschaften erdfeuchter Betone

Die Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Normalbeton wird im wesentlichen über die Festigkeitsklasse des Zements, den w/z-Wert und die Dichte des Betons gesteuert. Diese Regel gilt auch für erdfeuchte Betone. Infolge der im Vergleich zu Betonen üblicher Konsistenz viel geringeren Wassergehalte und der dadurch steiferen Konsistenz sind sie aber nur mit erheblicher Verdichtungsenergie ausreichend zu verdichten. Zudem ist es erforderlich, den Wassergehalt so zu wählen und auf die zur Verfügung stehende Rüttelenergie abzustimmen, dass die optimale Dichte eines Betons möglichst erreicht wird. Dies ist nur in einem eng begrenzten Bereich, um den (verdichtungs)optimalen Wassergehalt eines Gemisches der Fall, wie Bild 34 zeigt.

Einen Gradmesser für den Verdichtungserfolg stellt die in Kapitel 5.2 eingeführte Packungsdichte der Feststoffe des erdfeuchten Betons dar. Bestimmt man diese mittels des Rüttelproctorversuchs und ermittelt begleitend die Gründruck- und die 28-Tage-Druckfestigkeit eines erdfeuchten Betons, so stellt man eine große Übereinstimmung in den Verläufen der offensichtlich voneinander abhängigen Größen fest (Bild 34). Nur in einem engeren Bereich um die höchste Packungsdichte, in Bild 34 schraffiert dargestellt, ist ein erdfeuchter Beton in der Summe seiner Eigenschaften (Festbetondruckfestigkeit – Gründruckfestigkeit – optisches Erscheinungsbild) als optimal zu bezeichnen. Packungsdichte und w/z-Wert sind somit die Kenngrößen, die bereits am frisch hergestellten erdfeuchten Beton eine Vorausbestimmung seiner späteren Eigenschaften erlauben.

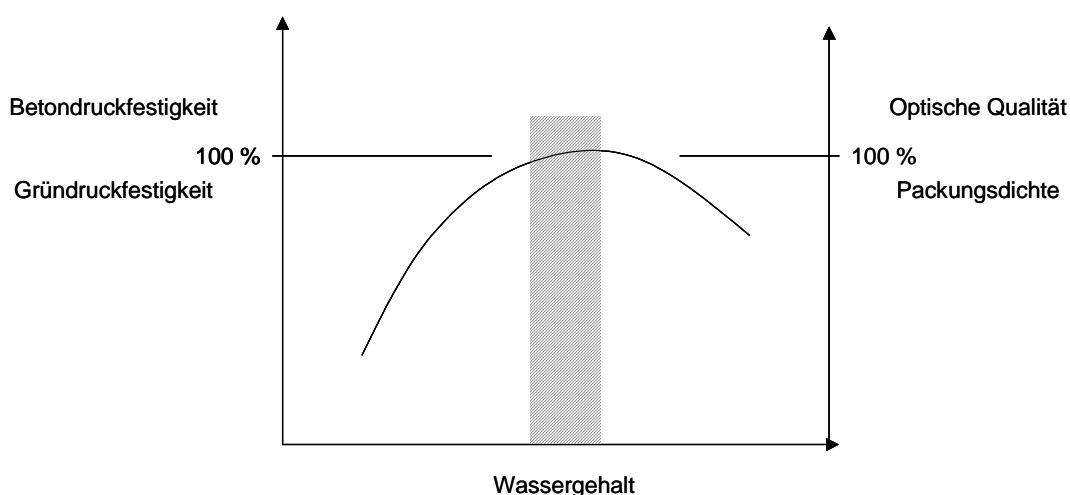


Bild 34: Die Überlagerung der Betoneigenschaften am Punkt der optimalen Packungsdichte (Anhang B, Bilder B1 – B2)

Die optimale Zusammensetzung erdfeuchter Betone ist schwierig zu berechnen. Hauptgrund hierfür ist die sehr individuelle, immer variierende Verdichtungswilligkeit der Gemische, aber auch Unterschiede in der zur Verfügung stehenden Maschinenteknik und der Verdichtungsenergie. Die Verdichtungsenergie steigert dabei nicht nur die Packungsdichte, sondern beeinflusst auch den notwendigen Wassergehalt eines Gemischs.

In Bild 35 sind die Ergebnisse einer Versuchsreihe mit veränderter Verdichtungsintensität dargestellt. Die Verdichtungszeit betrug konstant 90 Sekunden, die Frequenz wurde von 40 bis auf 80 Hz gesteigert. Dies entspricht einer Vervierfachung der eingetragenen Verdichtungsenergie. Die Packungsdichte der Feststoffe wurde von rd. 82 auf über 85 Vol.-% gesteigert. Gleichzeitig wurde die höhere Packungsdichte bei einem niedrigerem optimalen Wassergehalt erreicht. Der indirekt den Wassergehalt ausdrückende w/f -Wert sank dadurch von rd. 0,60 auf unter 0,50. Der Zementleim innerhalb eines erdfeuchten Betongemisches darf somit augenscheinlich bei höheren Verdichtungsenergien eine größere Viskosität aufweisen. Der Anstieg der Viskosität wird dabei durch die höhere Feststoffkonzentration des Zementleims ausgelöst. Berechnet man den optimalen Wassergehalt der in Bild 35 dargestellten Mischung, so sank dieser von rd. 120 l/m³ bei einer Frequenz von 40 Hz auf rd. 80 l/m³ bei 80 Hz. Die Abnahme des Wassergehalts um 40 l/m³ entspricht dabei in etwa der Zunahme der Packungsdichte der Feststoffe. Die ebenfalls eingezeichnete Sättigungspackungsdichte $S_r(pk)$ gibt die obere theoretische Grenze der Packungsdichte vor. Wird sie erreicht, verhält sich ein erdfeuchter Beton unter der Einwirkung einer verdichtenden Auflast zumeist hydrostatisch, wenn dem Wasser keine Möglichkeit zum Entweichen gegeben wird. Wie sich im weiteren Verlauf noch zeigen wird, ist dies eine rein theoretische Betrachtung, denn übliche erdfeuchte Betone erreichen optimal verdichtet rund 95 – 97 Vol.-% der Sättigungspackungsdichte, das Restvolumen wird von Luftporen ausgefüllt. In Realität kann der erdfeuchte Beton somit schon vor Erreichen der optimalen Packungsdichte hydrostatisches Verhalten zeigen. Dies erklärt auch, warum von diesem Punkt an die Packungsdichte zwangsläufig sinken muss, wenn man den Wassergehalt weiter erhöht. Das Wasser nimmt im erdfeuchten Beton ein immer größeres Volumen ein und ersetzt Feststoff. Dieses Verhalten entspricht dem von Böden im konventionellen Proctorversuch und wurde im Rahmen der Literaturrecherche bereits dargestellt (Bild 12).

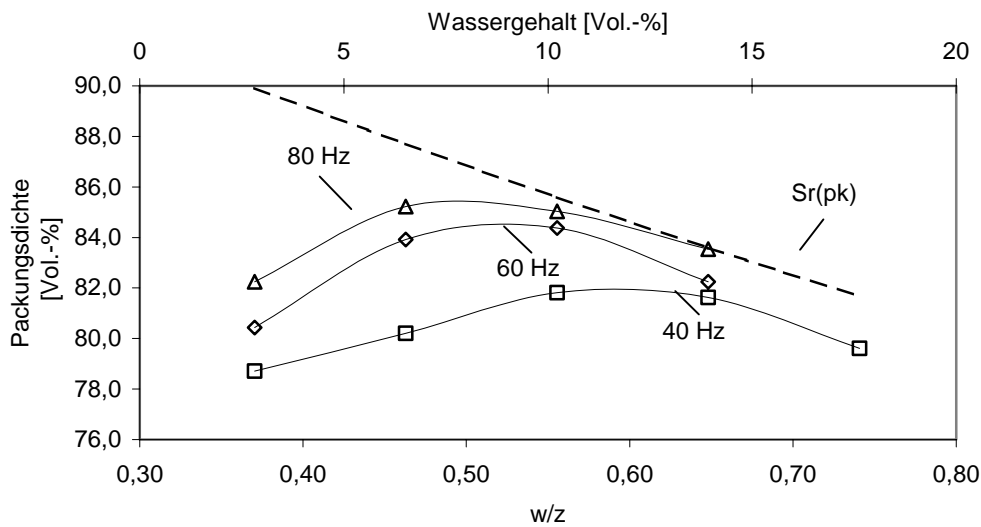


Bild 35: Einfluss der Verdichtungsintensität auf Packungsdichte und Wassergehalt (Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16r)

Einen anderen Weg, die Packungsdichte von erdfeuchten Betonen zu erhöhen, stellt die Ausweitung der Leimmenge dar. Vor dem Hintergrund des bereits geschilderten Proctorversuchs wird verständlich, dass dies nicht durch die Erhöhung des Wassergehalts erfolgen kann. Dies würde die Packungsdichte vielmehr abfallen lassen. Eine Erhöhung der Leimmenge kann deshalb nur mit einer gleichzeitigen Senkung des w/f-Wertes (d.h. einer Erhöhung des Feststoffgehalts des Leims) und der Steigerung der Viskosität des Feinleims einhergehen. Bild 36 stellt hierzu den Verlauf der Packungsdichte über den Zementleimgehalt verschiedener Sieblinien (A, B und C16) und im Fall der Sieblinie B16 auch unterschiedlicher Kornform dar. In allen Versuchsserien wurde mit konstanter Verdichtungsenergie gearbeitet, die dargestellten Messwerte beziehen sich nur auf den Punkt der optimalen Packungsdichte (Detailangaben Anhang B Tabelle B1). Dieses Vorgehen garantiert die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Man beobachtet in allen Versuchsreihen eine anfängliche Zunahme der Packungsdichte, wobei sich die Werte je nach Sieblinie unterscheiden. Wie auch aus der Normalbetontechnologie bekannt, zeigen insbesondere C-Sieblinien einen erhöhten Feinleimbedarf, ohne dabei die Packungsdichten der A und B-Sieblinien zu erreichen. Bild 36 zeigt auch, dass eine Verringerung des w/f-Werts zu einer exponentiellen Zunahme des Feinleimbedarfs führt (Anmerkung: Basis für diese Auswertung bildeten die gleichen Versuchsergebnisse, die zur Bestimmung der Packungsdichte in Abhängigkeit vom Feinleimgehalt dienten und ebenfalls in Bild 36 dargestellt sind). Grund hierfür ist die steigende Viskosität des Feinleims. Der erhöhte Gehalt an Feinststoffen macht diesen zäher, die Befüllung von Hohlräumen innerhalb der Gesteinskörnung unter Vibrationseinfluss wird schwieriger. Durch eine deutliche Erhöhung

der Feinleimmenge kann hierauf reagiert werden. Die in Bild 36 dargestellten Fälle zeigen aber auch, dass die Sieblinien A und B16 bis zu Feinleimgehalten von rd. 250 l/m³ und im Fall der Sieblinie C16 bis zu rd. 280 l/m³ eine Steigerung der Dichte aufweisen. Überschreitet man diese Werte, ist mit sinkenden Packungsdichten zu rechnen.

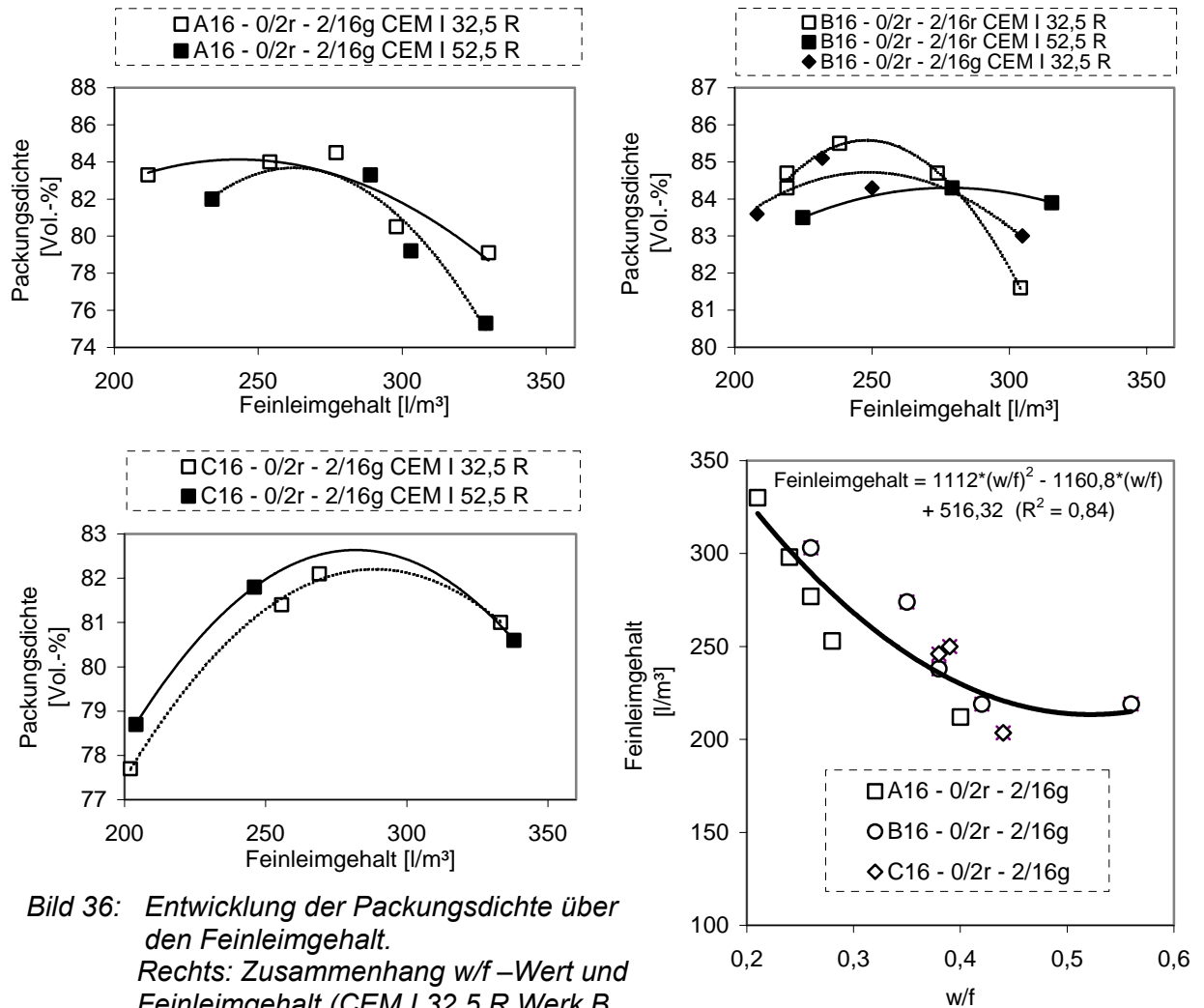


Bild 36: Entwicklung der Packungsdichte über den Feinleimgehalt.
Rechts: Zusammenhang w/f – Wert und Feinleimgehalt (CEM I 32,5 R Werk B. Details Anhang B – Tabellen B1 – B2)

Dies führt auch zur Abnahme der Grünfestigkeit des verdichteten Betons. Die in Anhang B – Bild B3 - B5 dargestellten korrespondierenden Gründruckfestigkeitsverläufe zeigen dies. Sucht man nach Erklärungen für dieses Verhalten, so ist eine Betrachtung der Packungsdichte trocken eingerüttelter Gesteinskörnungen und des absoluten Gehaltes an Feinleim hilfreich. Hinweise hierzu liefern Bild 20 der Literaturrecherche sowie eigene Untersuchungen (Anhang B – Tabelle B3). Diese Untersuchungen weisen einerseits darauf hin, dass runde Gesteinskörnungen zu einer höheren Packungsdichte tendieren, andererseits Sieblinien mit hohem Sandgehalt - unabhängig von der Kornform - eine

geringere Packungsdichte aufweisen. Hummel [66] zeigt dies in Bild 20 anhand des Verteilungsmoduls n der Andreasengleichung (Gleichung 12). Der durch den hohen Sandgehalt erzeugte Hohlraum, kann demzufolge den notwendigen Feinleimbedarf erhöhen (rd. 30 Liter Mehrbedarf gegenüber den Sieblinien A16 und B16) und verhindert eine Packungsdichte, die denen der Sieblinien mit geringerem Sandgehalt entspricht. Auffällig ist, dass Sieblinien mit geringem Sandgehalt im trocken eingerüttelten Zustand ein anderes Verhalten zeigen als in Kombination mit Feinststoffen. Trocken eingerüttelt ergeben sich hohe Hohlraumgehalte. Diese erfordern aber im erdfeuchten Zustand keine erhöhten Feinleimgehalte. Dies lässt darauf schließen, dass neben dem absoluten Gehalt an Hohlraum der Gesteinskörnung, auch die Befüllbarkeit des vorhandenen Hohlräume durch Feinleim eine Rolle spielen könnte.

Legt man die von [Hummel 66] und in eigenen Versuchen ermittelten Werte zugrunde, so weisen die Sieblinien A16 – 0/2r – 2/16g rd. 25 Vol.-%, B 16 – 0/2r – 2/16g rd. 20 - 22 Vol.-% und die Sieblinie C16 – 0/2r – 2/16g einen Hohlraumgehalt > 22 Vol.-% auf. Die Hohlraumgehalte schwanken in Abhängigkeit von der Verdichtungsintensität, stimmen aber größenordnungsmäßig mit den für eine optimale Packungsdichte notwendigen Feinleimgehalten überein. Die Packungsdichte erdfeuchter Betone scheint somit dann abzufallen, wenn der zwischen der Gesteinskörnung vorhandene Hohlraum befüllt worden ist und der Feinleim beginnt, den Platz der Gesteinskörnung einzunehmen. Dieser Vorgang wird durch die Bilder 37a) – 37d) illustriert. Bild 37a) zeigt Leimgehalte deutlich unterhalb der durch das Korngerüst vorgegebenen Porosität. Der Leimgehalt ist nicht ausreichend, um alle Hohlräume zu füllen. Steigert man den Leimgehalt (Bild 37b), wird die Füllung des Hohlräume verbessert, die Packungsdichte steigt. Dieses Modell muss in einem Punkt detailliert werden: Mit sinkendem w/f -Wert (und damit verbundenem steigenden Feinststoffgehalt) steigt zusätzlich die Feststoffdichte der Suspension an (Bild 36 zeigte bereits den Zusammenhang). Dieses Verhalten unterstützt die Steigerung der Packungsdichte. In den Bildern 37b und c wird dies durch die Zunahme der Feinstpartikelzahl in den Detaildarstellungen illustriert. Ab einem gewissen Punkt drängt der weiter steigende Leimgehalt die durch die Gesteinkörnung gebildete Tragstruktur des erdfeuchten Betons auseinander (Bild 37c und d). Die Packungsdichte muss sinken, da eine homogene Gesteinkörnung gegen eine hohlraumreiche Feinststoffsuspension ausgetauscht wird.

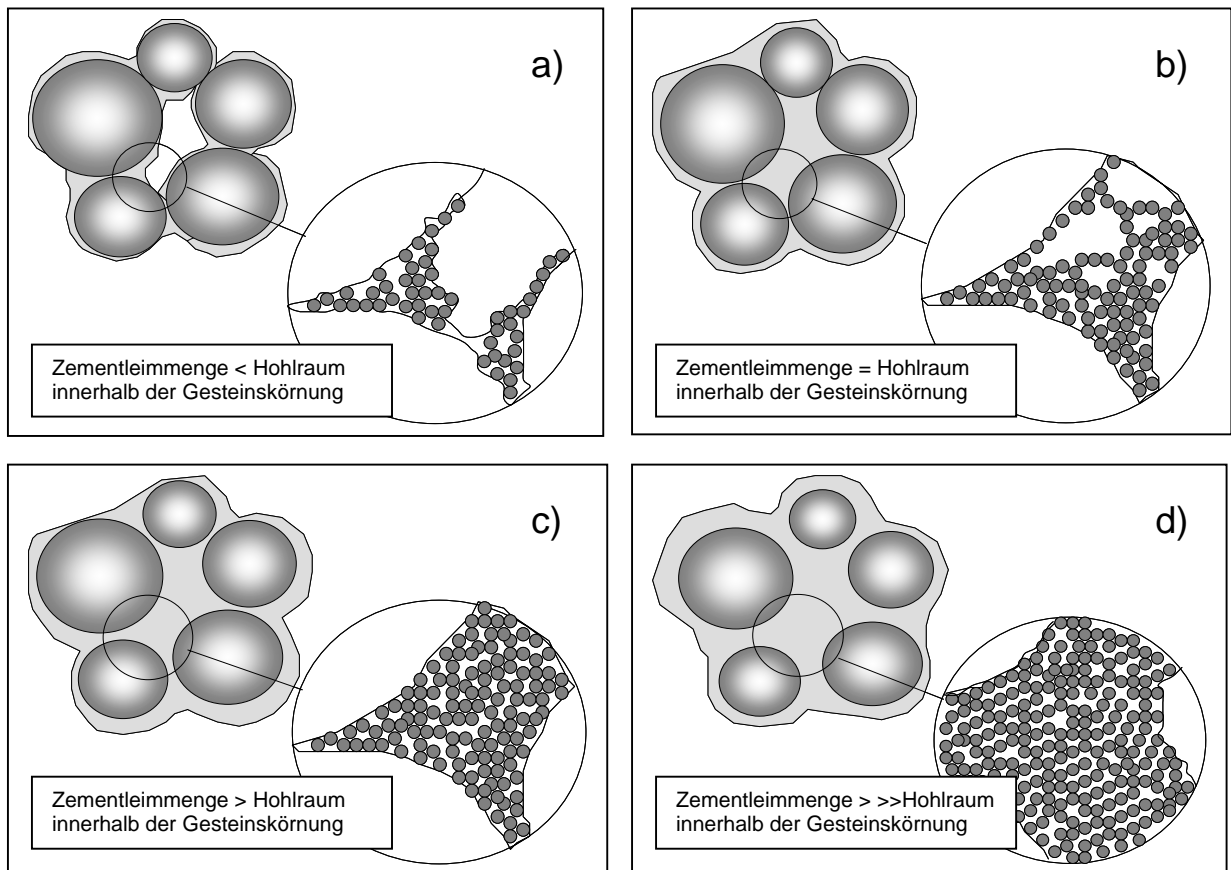


Bild 37: Einfluss der Erhöhung des Feinleimgehalts

Fasst man die Ergebnisse zusammen, so kann die Packungsdichte über die Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung und bei einer bestimmten Kornzusammensetzung über die Menge des Feinleims und die Verdichtungsintensität beeinflusst werden. Die Packungsdichte ist wiederum ein Gradmesser für die Festigkeit erdfeuchter Betone im grünen und erhärteten Zustand. Bild 38 stellt diesen Zusammenhang nochmals grafisch dar. Der schraffierte Bereich bildet die Schnittmenge, in der erdfeuchte Betone mit normgerechter Festigkeit herstellbar sind. Folgt man der Darstellung, so kann durch eine intensivere Verdichtung der Feinleim stärker angeregt werden, die Befüllung der Hohlräume erfolgt dadurch schneller und vollständiger. Will man dies zur stofflichen/wirtschaftlichen Optimierung nutzen, können wahlweise der Feinleimgehalt reduziert oder die Packungsdichte gesteigert werden. In gleicher Weise kann die Erhöhung der Feinleimmenge dazu benutzt werden, die für eine angestrebte Packungsdichte notwendige Verdichtungsintensität zu reduzieren.

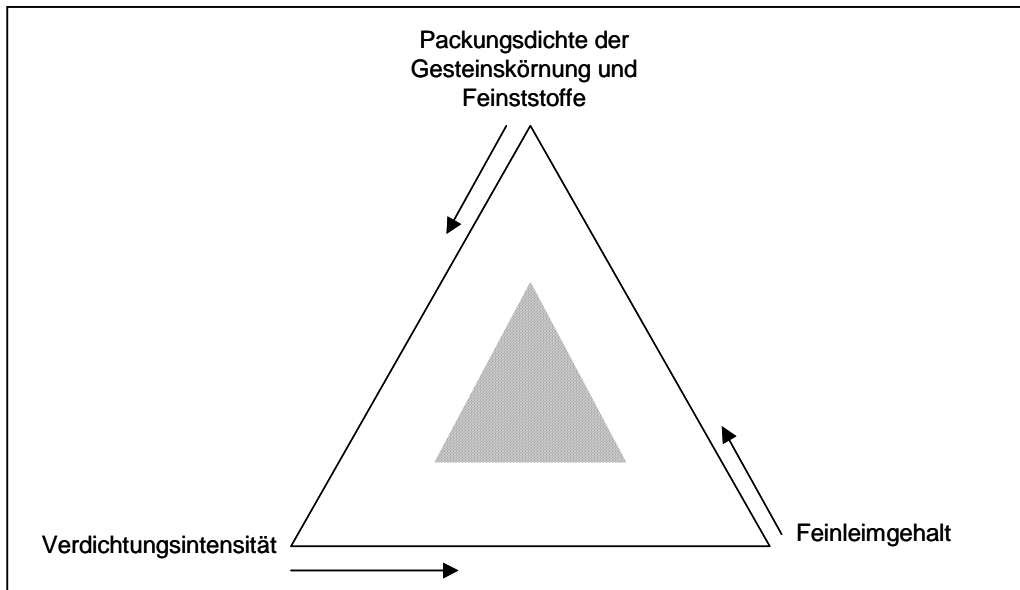


Bild 38: Die Abhängigkeit zwischen Verdichtungsintensität, Feinstoffgehalt und Packungsdichte (schraffierter Bereich = Betone gleicher Qualität)

Neben den angesprochenen Möglichkeiten, sollte auch über eine feinststoffliche Optimierung zur Verbesserung der Packungsdichte und somit der Festigkeits- und Verarbeitungseigenschaften nachgedacht werden. Unter Punkt 6.6 werden diese Möglichkeiten intensiver diskutiert.

6.3 Das Tragverhalten erdfeuchter Betone im grünen Zustand

6.3.1 Analyse des Tragverhalten mittels bodenmechanischer Messmethoden

Übliche erdfeuchte Betone sind nach der üblichen Bodenklassifikation der DIN 4022 als kiesig/sandige Böden mit nur sehr geringen schluffigen Anteilen einzuordnen. Die in Bild 13 dargestellte Kornverteilungskurve eines erdfeuchten Betons mit rd. 330 kg/m³ Feinststoffgehalt macht dies deutlich (Kurve 4). Die Geotechnik hat verschiedene Methoden entwickelt, Böden genauer hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit zu beurteilen. Die für einen Boden wichtigen mechanischen Kennwerte sind die sogenannten Scherparameter Reibungsbeiwert φ und Kohäsionswert c . Sie können mittels Rahmenscherversuch nach DIN 18137-3 ermittelt und für die Berechnung der Tragfähigkeit eines Bodens genutzt werden. Die Grundlage der Tragfähigkeitsberechnung von Böden bildet der Mohrsche Spannungskreis (Bild 4) und die Mohr-Coulombsche Grenzbedingung (Gleichung 1).

Um zu untersuchen, inwieweit diese Parameter auch bei erdfeuchten Betonen eine Rolle spielen, wurden zunächst Vorversuche an Gemischen mit Quarzmehl (Typ FQ 300, Tabelle 2) statt Zement durchgeführt. Dadurch wurde die Bildung von Hydratationsprodukten vermieden. Für die Ermittlung der Scherparameter standen zwei Versuchseinrichtungen zur Verfügung. Ein Scherrahmen nach DIN 18137-3 (10x10 cm Scherfläche) wie in Anhang B (Bilder B6 - B7) abgebildet und ein Triaxialgerät nach DIN 18137-2 zur Durchführung von Triaxialversuchen. In Vorversuchen wurden beide Geräte hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für die Untersuchung von erdfeuchten Quarzmehl-„betonen“ geprüft. Es zeigte sich, dass der Triaxialversuch für die Prüfung feinststoffarmer Gemische untauglich ist. Um die Dichtigkeit der Probe zu garantieren, ist ein stramm sitzender Gummistrumpf über die Probe zu stülpen. Dies führte in allen Versuchen zur Zerstörung der Proben. Der Rahmenscherversuch erwies sich als geeigneter, die Proben ließen sich problemlos einbauen. Die Messapparatur wurde durch die Einlage zweier mit Stahlrippen versehener Filterplatten modifiziert (Bild B7, Anhang B). Diese Modifikation wurde notwendig, um die üblicherweise verwendeten keramischen Filterplatten während des Einbaus des Probenmaterials nicht zu zerstören. Die optimale Packungsdichte der beprobten Gemische wurde mittels Rüttelproctorversuch vorbestimmt. Das Material wurde anschließend in die Rahmenschersform in 3 Lagen mittels Handstamper mit der im Rüttelproctorversuch bestimmten Packungsdichte eingebaut. Die Größe des Schergeräts erlaubte nur die Verwendung eines Größtkorns von 8 mm. Die Abschergeschwindigkeit betrug 0,5 mm/min. und war nach Vorversuchen festgelegt worden und entspricht wie die gesamte übrige Versuchsdurchführung den Vorgaben der DIN 18137-3.

Ziel war es, die in der Einleitung genannten Phänomene auf Basis geotechnischer Messmethoden zu klären. So sollte:

- die Überlagerung der qualitativen Verläufe von Packungsdichte und Gründruckfestigkeit im sofortentschalteten „grünen“ Zustand (Bild 34) begründet
- und die Theorie zur Wirkung hoher Feinleimgehalte (Bild 36) erhärtet werden.

Zur Klärung des letztgenannten Punkts, wurde der Feinleimgehalt in weiten Bereichen variiert. Er begann bei rd. 250 l/m³ und endete bei über 580 l/m³. Die Ergebnisse der Rahmenscherversuche für Packungsdichte, Kohäsion und inneren Reibungswerte der Mischungszusammensetzungen sind in den Bildern 39 – 41 dargestellt. Erläuterungen zur Mischungszusammensetzung können Anhang B – Tabelle B5 entnommen werden.

Wird der Feinleimgehalt erhöht, wird die maßgeblich zur Tragfähigkeit beitragende Gesteinskörnung durch den zunehmenden Feinleimgehalt auseinandergedrängt (Bild 37). Folglich muss die innere Reibung – ausgedrückt durch den Reibungswinkel φ - sinken, da die Verzahnung der groben Partikel gesenkt wird. Diesen Zusammenhang deutet Bild 41 bereits an, noch deutlicher zeigt sich dies bei der rein gebrochenen Gesteinskörnung A8 – 0/2 g – 2/8g, die im Anhang B (Bilder B8 – B10) zu finden ist. Die Wirkung der Kohäsion steigert sich hingegen augenscheinlich durch Zunahme der Leimmenge, dargestellt in Bild 40 und im Anhang B in Bild B9. Sehr hohe Feinleimgehalte tragen somit zu einer erheblichen Steigerung der kohäsiven Bindungskräfte bei. Wie in der Literaturobwertung geschildert, können dies nur sehr geringe Wasser- und hohe Feinststoffgehalte ermöglichen, die eine Ausbildung von Kapillarmeniskn und/oder starken adhäsiven Kräften bewirken. Von wo an kohäsive Bindungskräfte zu erwarten sind, lässt sich abschätzen. In [Reschke 5] wurde der Hohlraumgehalt trocken verdichteter Zemente mittels Stampfvolumeter nach DIN ISO 787-11 und Pulverpenetrometern untersucht. Es ergaben sich Hohlraumgehalte der verdichteten Feinststoffe von 40 - 45 Vol.-%. Will man einen Zement/Feinststoff verflüssigen, so ist nach [Krell 3] dieses Hohlraumvolumen zuerst mit Wasser zu füllen. Erst im Folgeschritt steht Wasser auf den Partikeloberflächen zur Verfügung, dass den Abstand zwischen den Partikeln erhöhen und somit zu einer Verflüssigung beitragen kann. Legt man die genannten Werte für eine Abschätzung des Wassergehalt zur Füllung aller interpartikulären Hohlräume zugrunde, so ergibt sich für das in dieser Versuchsreihe verwendete Quarzmehl FQ 300 ein notwendiger w/f-Wert von rd.:

$$\frac{\text{Volumen}_{\text{Wasser}} \cdot \rho_{\text{Wasser}}}{\text{Volumen}_{\text{Feinquarz}} \cdot \rho_{\text{Feinquarz}}} = \frac{w}{f} \quad (\text{Gleichung 19})$$
$$\frac{40 - 45 \text{ Vol.} - \% \cdot 1,00 \text{ kg} / \text{dm}^3}{55 - 60 \text{ Vol.} - \% \cdot 2,65 \text{ kg} / \text{dm}^3} = 0,25 - 0,30 \quad (\text{Rechnung 7})$$

Dieser Wert stellt abgeschätzt in verdichteten erdfeuchten Gemischen den Übergang vom flüssigen Feinleimen zu zähen/wasseruntersättigten Systemen dar, in denen kohäsive Kräfte zwischen den Feinststoffen zu wirken beginnen können. Das Ergebnis überschätzt den Wirkbeginn dieser Kräfte, wenn man die Versuchsergebnisse als Grundlage nimmt (Anhang B, Tabelle B5). Eine deutliche Steigerung der kohäsiven Kräfte ist im Allgemeinen erst bei einem sehr geringen w/f-Wert von 0,17 festzustellen.

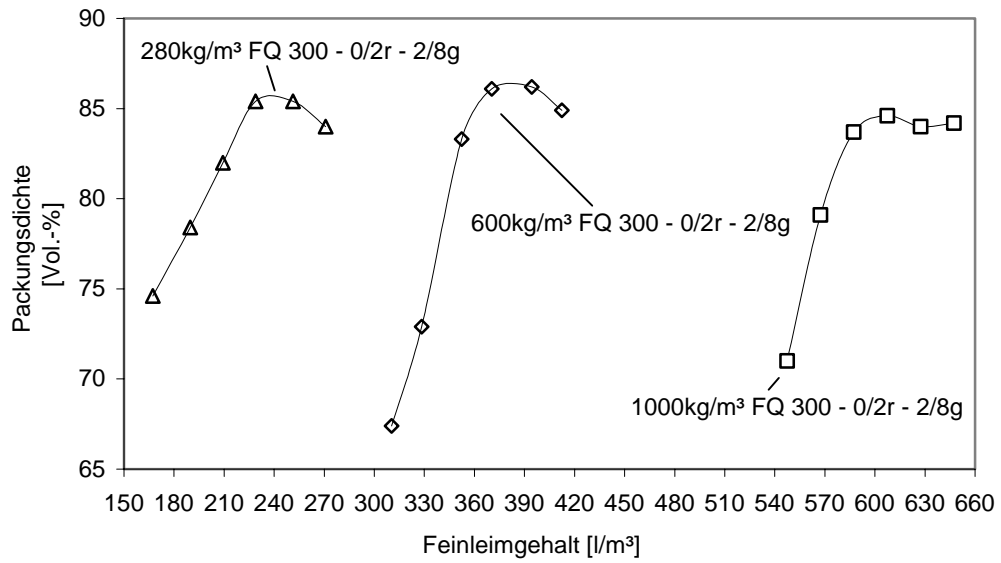


Bild 39: Packungsdichte A8 – 0/2r – 2/8g (Feinquarzgehalt bezogen auf w_{opt})

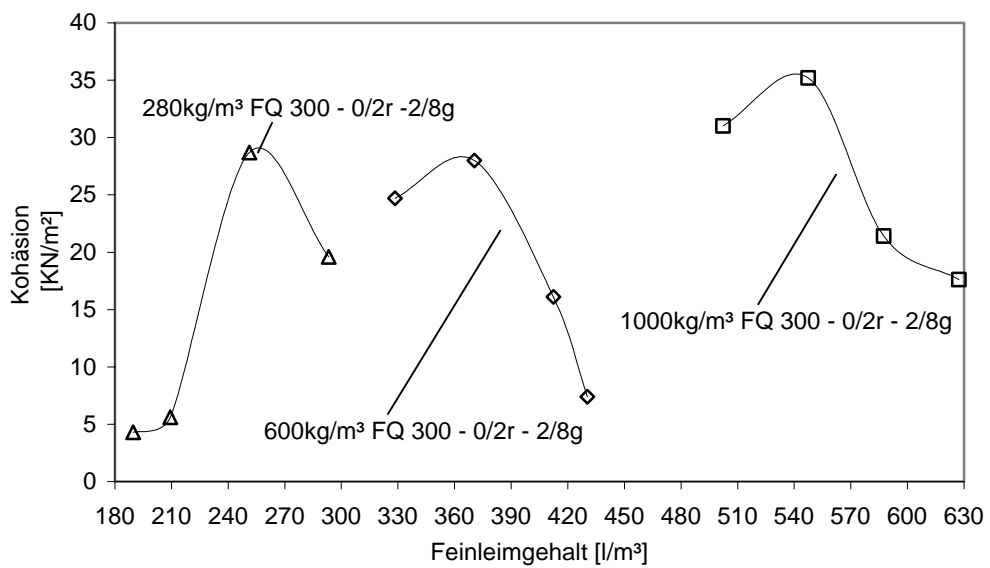


Bild 40: Kohäsion A8 – 0/2r – 2/8g (Feinquarzgehalt bezogen auf w_{opt})

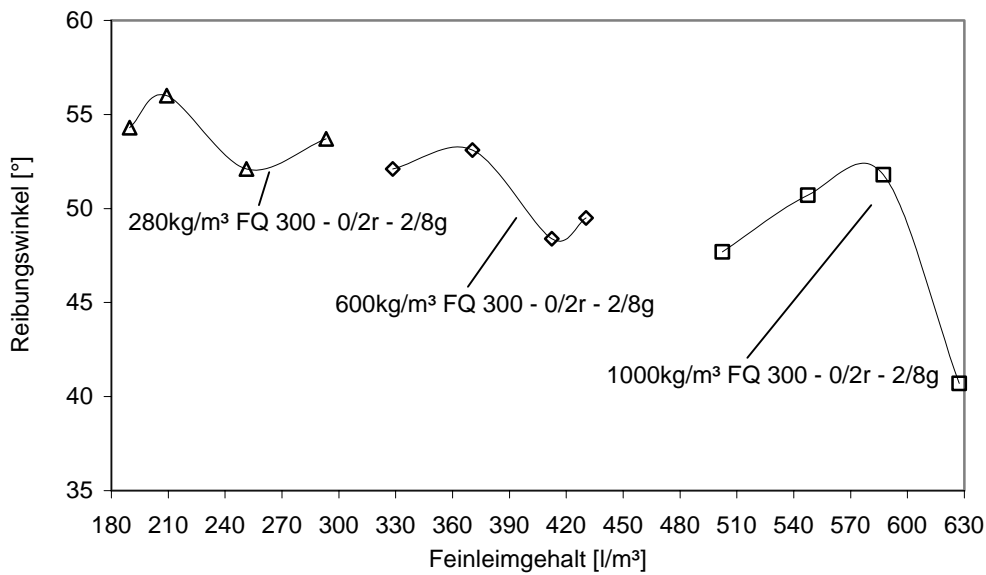


Bild 41: Reibungswinkel A8 – 0/2r – 2/8g (Feinquarzgehalt bezogen auf w_{opt})

Der Vergleich der Werte für die Packungsdichte, die Kohäsion und den Reibungswinkel zeigt die relative Übereinstimmung der qualitativen Verläufe. Die Packungsdichte beeinflusst somit die bodenmechanischen Scherparameter. Die Tragfähigkeitsberechnung eines erdfeuchten Betons als freistehenden Bodenkörper ohne seitliche Abstützung nach Rankine zeigt als Konsequenz wieder die qualitative Überlagerung der rechnerischen Grenztragfähigkeit mit der Packungsdichte. Hierzu wurden die horizontale „Stütz“-Spannung σ_3 (Gleichung 20) durch die Kohäsionsspannung (Gleichung 21) ersetzt. Durch Gleichsetzung ergibt sich der in Gleichung 22 dargestellte Zusammenhang.

$$\sigma_3 = \sigma_1 \cdot \tan^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) - 2 \cdot c \cdot \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (\text{Gleichung 20})$$

$$\sigma_3 = 0 = \sigma_1 \cdot \tan^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) - 2 \cdot c \cdot \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (\text{Gleichung 21})$$

$$\sigma_1 = \frac{2 \cdot c}{\tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (\text{Gleichung 22})$$

φ = Reibungswinkel [°]
 σ_1 = vertikale Hauptspannung
 σ_3 = horizontale Hauptspannung
 c = Kohäsion

Die rechnerisch ermittelten Gründruckfestigkeiten (Bild 42 und Anhang B, Bild B11) liegen erheblich unter den versuchstechnisch bestimmten, wie die Messergebnisse der Gründruckfestigkeit erdfeuchter Betone im weiteren Verlauf zeigen werden (Bild 49 und 50). In [Wierig 28] wurde hierzu bereits eine Erklärung geliefert. Erdfeuchte Gemische weisen

demnach eine erhebliche Abhängigkeit zwischen Probekörpergeometrie und Gründruckfestigkeit auf (Bild 14), die durch die verformungsbehindernde Wirkung der Lasteinleitungsplatten im Gründruckversuch ausgelöst wird. Bei der rechnerischen Ermittlung der Tragfähigkeit ist dieser Einfluss nicht berücksichtigt worden. Da die im Rahmen dieser Arbeit beprobten erdfeuchten Betone Probekörperhöhen zwischen 120 – 130 mm und einen Durchmesser von 150 mm aufwiesen, erklärt dies die durchweg höheren Gründruckfestigkeiten. Die berechneten Werte würden demzufolge nur für sehr schlanke Proben gelten.

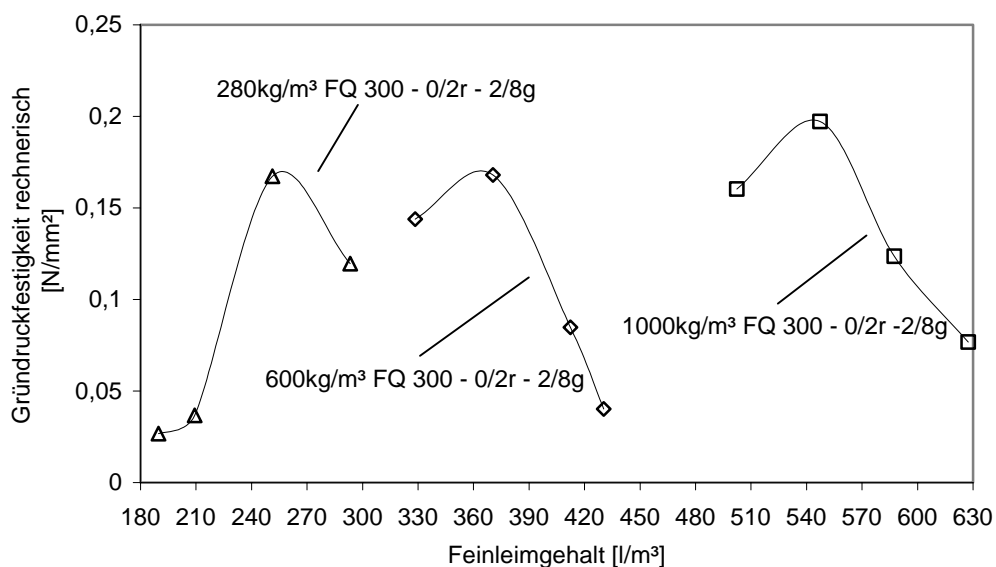


Bild 42: Rechnerische Gründruckfestigkeit A8 – 0/2r – 2/8g (Feinquarzgehalt bezogen auf w_{opt})

6.3.2 Einfluss von Feinststoff und Gesteinskörnung auf die Tragfähigkeit im grünen Zustand

In den bisherigen Ausführungen wurde die Tragfähigkeit erdfeuchter Betone zumeist aus dem Blickwinkel der Packungsdichte betrachtet, ohne dass systematisch nach weiteren Einflussgrößen gesucht wurde. Hierzu können u.U. Kornformeinflüsse der Gesteinskörnung und des Feinststoffs, aber auch Kapillarität und weitere physikalische Bindungsmechanismen – wie z.B. Adhäsionskräfte – gehören.

Um dies systematisch zu prüfen, wurden im ersten Schritt rheologische Untersuchungen durchgeführt und die rheologischen Kennwerte Viskosität und Fließgrenze des Zements CEM I

32,5 R des Werks B bei verschiedenen praxisrelevanten w/f–Werten bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 43 dargestellt und zeigen, dass bis zu w/f–Werten von 0,40 ein quasi linearer Anstieg der rheologischen Kennwerte festzustellen ist. Unterhalb dieses Wertes setzt eine deutliche Zunahme der Viskosität und Fließgrenzwerte ein. Interpartikuläre Anziehungskräfte zeigen erste Wirkung. Die Fließgrenze beschreibt den Strukturwiderstand der Suspension und kann sich auf die Tragfähigkeit von erdfeuchten Gemischen auswirken. Die gemessenen Werte sind aber als sehr niedrig einzustufen. Bezieht man sich auf den geringsten in Bild 43 dargestellten w/f–Wert von 0,32, so ergibt sich eine Schubspannung an der Fließgrenze von rd. 140 Pa. = 0,00014 N/mm². Im Vergleich zu den gemessenen Werten der Kohäsion in Rahmenscherversuchen von rd. 25 – 50 KN/m² = 0,025 – 0,050 N/mm² am Punkt der optimalen Packungsdichte kann die Schubspannungsaufnahmefähigkeit des Feinleims selbst bei diesem geringen w/f-Wert nur wenig zur Tragfähigkeit beitragen. Unterhalb von w/f–Werten von 0,32 war keine Messung mehr möglich. Die Feinststoffsuspension agglomerierte zusehens, da der Wassergehalt sich dem Hohlraumgehalt des Partikelgemisches, wie durch Gleichung 19 bereits erläutert, annähert. Dadurch ist dann ein höherer Beitrag zur Tragfähigkeit möglich. Die Kohäsionswerte sehr feinststoffreicher Gemische deuteten dies bereits in den Rahmenscherversuchen an (Bild 40 und Anhang B - Bild B9). Berücksichtigt man, dass übliche erdfeuchte Betone z.T. deutlich höhere w/f-Werte als 0,32 aufweisen, so muss davon ausgegangen werden, dass der durch die Fließgrenze ausgedrückte Strukturwiderstand des flüssigen Feinststoffs sich nicht auf die Grüntragfähigkeit auswirkt. Dies führt zu der grundsätzlichen Frage der Wirkungsweise von Feinststoffen, insbesondere in Systemen mit höheren w/f–Werten.

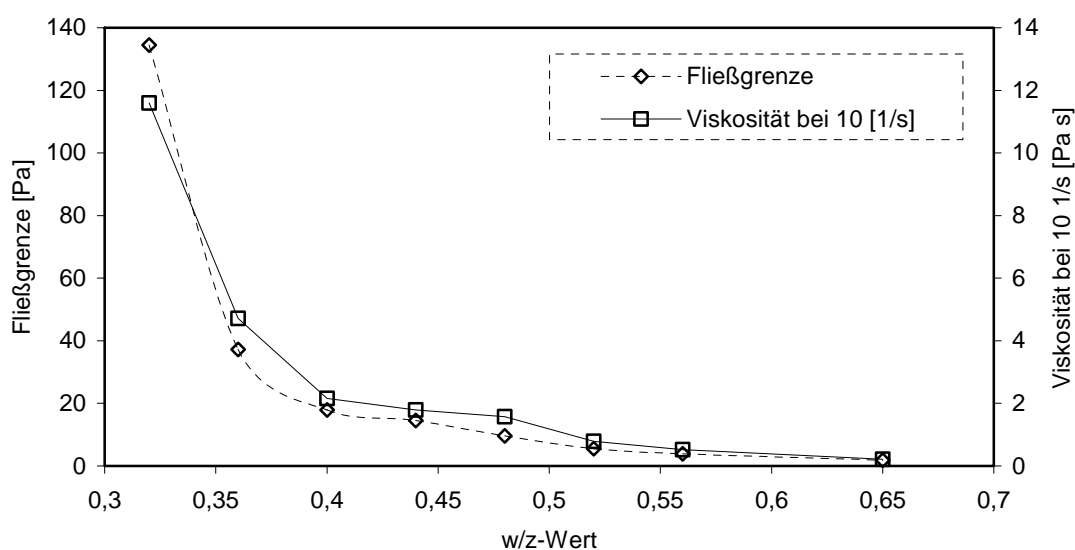
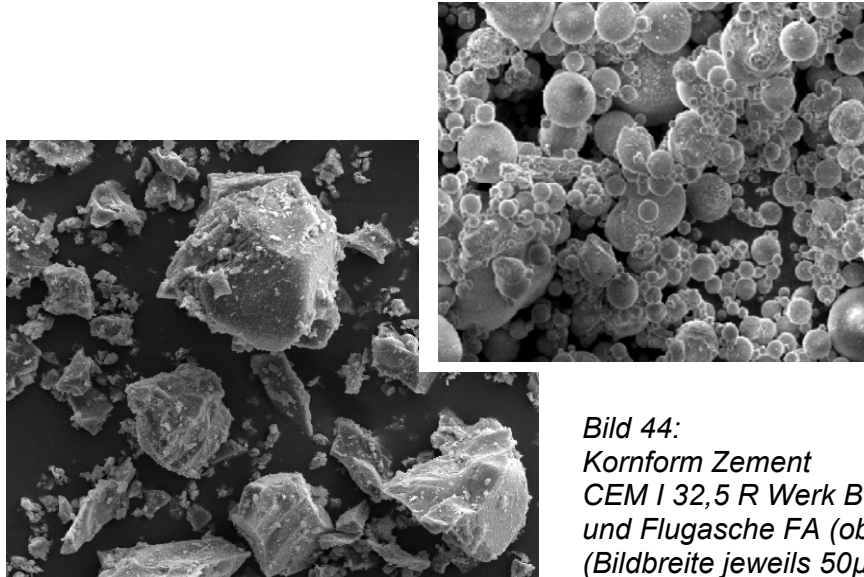


Bild 43: Vergleich von Fließgrenze und Viskosität von Zementleimen (CEM I 32,5R Werk B) bei unterschiedlichen w/f-Werten

Um den Einfluss des Feinststoffs auf die Tragfähigkeit des erdfeuchten Betons im grünen Zustand zu klären, wurde der gebrochenkörnige „Feinststoff“ Zement (CEM I 32,5 R Werk B) sukzessive durch eine kugelige Flugasche ersetzt. Bild 44 zeigt repräsentative Kornformen der beiden Feinststoffe. Ziel war es, den Einfluss der inneren Reibung und Verzahnung auf die Tragfähigkeit abzuschätzen.



*Bild 44:
Kornform Zement
CEM I 32,5 R Werk B (links)
und Flugasche FA (oben)
(Bildbreite jeweils 50µm)*

Um nur diesen einen Parameter zu verändern, wies die eingesetzte Flugasche (FA) eine dem Zement (CEM I 32,5 R Werk B) ähnliche Feinheit und einen vergleichbaren mittleren Korndurchmesser auf (Tabelle 2). Dies sollte garantieren, dass ggf. vorhandene Adhäsions- und Kapillarkräfte die gleiche Wirkung entfalten können. Es zeigte sich (Bild 45), dass mit zunehmendem Flugaschegehalt die Packungsdichte des Betons anstieg. Dies sollte nach dem bisher vorgestellten Modell eine Steigerung der Tragfähigkeit nach sich ziehen, führte aber in den hier gezeigten Fällen zu einem Abfall der Tragfähigkeit. In einem Wiederholungsversuch wurde zusätzlich Fließmittel zugegeben. Es zeigten sich wieder die gleiche Tendenz. Die Packungsdichte stieg mit zunehmendem Flugaschegehalt an, die Grüntragfähigkeit sank. Die Ergebnisse zeigen, dass Feinststoffe im erdfeuchten Beton maßgeblich durch Reibung und Verzahnung wirken müssen, ähnlich der Gesteinskörnung. Der Feinststoff wirkt demzufolge auch als Mikrozuschlag und beeinflusst die Scherparameter.

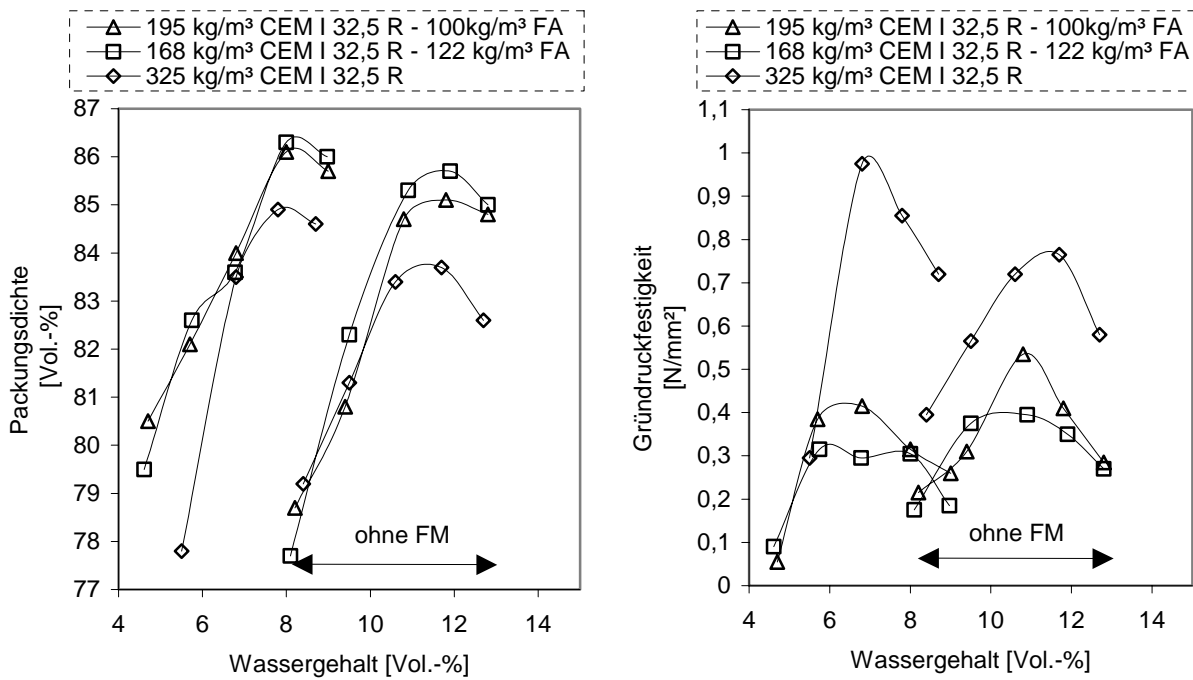


Bild 45: Packungsdichte und Gründruckfestigkeit von erdfeuchten Betonen mit Flugasche- und Fließmittelzugabe (Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16g; Angaben zur Beton-zusammensetzung Anhang B – Tabelle B6)

In der Scherfuge eines erdfeuchten Betons wird durch die Verwendung gebrochener Grob- und Feinststoffe die Verzahnung und innere Reibung erhöht (Bild 46). Dieser Ansatz erklärt auch, warum nur die Kombination gebrochener Feinststoffe mit gebrochener Gesteinskörnung > 2mm in Bild 47 zu höherer Gründruckfestigkeit führte. Bei Verwendung runder Gesteinskörnung und gebrochen körnigem Feinststoff kann keine ausreichende Verzahnung eintreten. Gleiches gilt bei Verwendung von kugelige Flugasche und gebrochener Gesteinskörnung (Bild 45).

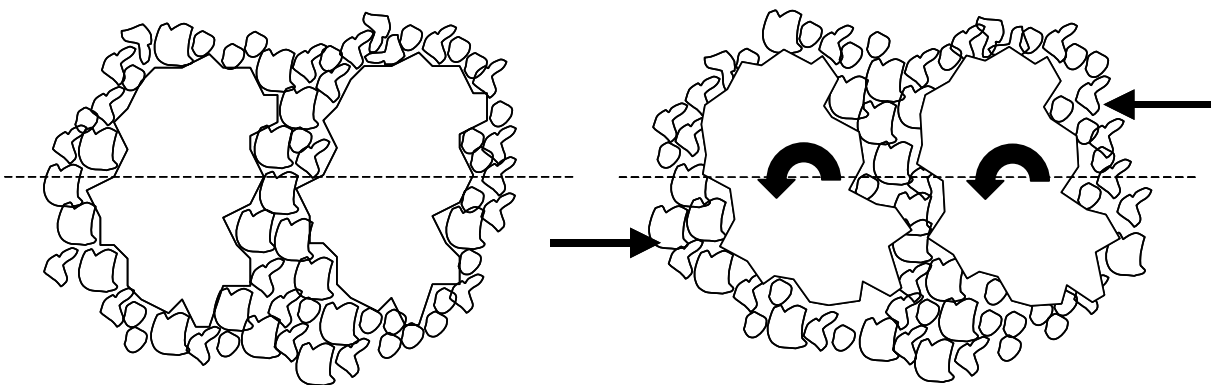


Bild 46: Behinderung der Verdrehung grober und feiner Bestandteile durch die Reibungs- und Verzahnungswirkung von Grob- und Feinststoffen in der Scherfuge

Wie stark bereits geringe Änderungen der inneren Reibung φ und Kohäsion c in erdfeuchten Betonen zu deutlichen Tragfähigkeitsverlusten führen, lässt sich auch durch eine Simulationsrechnung auf Basis des Mohr-Coulombschen Tragmodells zeigen (Gleichung 22). Die gewählten Werte für innere Reibung und Kohäsion orientieren sich an den Ergebnissen der Rahmenscherversuche für eine Mischung mit 280 kg/m^3 Feinquarz.

$$\begin{aligned} \varphi = 55^\circ; C = 30 \text{ KN/m}^2 &\Rightarrow \text{rech. Gründruckfestigkeit} = \text{rd. } 190 \text{ KN/m}^2 \text{ (Rechnung 8)} \\ \varphi = 45^\circ; C = 25 \text{ KN/m}^2 &\Rightarrow \text{rech. Gründruckfestigkeit} = \text{rd. } 120 \text{ KN/m}^2 \text{ (Rechnung 9)} \end{aligned}$$

Das Beispiel zeigt, dass bereits eine Senkung der Eingangsparameter um nur rd. 20% die Tragfähigkeit um rd. 40% senkt. Erdfeuchte Gemische reagieren somit empfindlich auf die Veränderung der Scherparameter.

Der Anteil von kapillaren und adhäsiven Bindungsmechanismen an der Tragfähigkeit erdfeuchter Betone wurde bisher nicht diskutiert. Vor dem Hintergrund der rheologischen Messungen (Bild 43), scheinen kapillare Einflüsse bei w/f -Werten deutlich über 0,30 ausgeschlossen zu sein und sich nicht auf die Tragfähigkeit einzuwirken. Dennoch wird von [Wierig 28] vermutet, dass Kapillarkräfte maßgeblich zur Tragfähigkeit erdfeuchter Betone beitragen. Um diese Frage abschließend zu klären, wurden Trocknungsversuche durchgeführt (Bild 47). Hierzu wurde die optimale Packungsdichte und der zugehörige Wassergehalt unterschiedlicher Gemische in Rüttelproctoruntersuchungen bestimmt. Die Probekörperherstellung erfolgte mit den so bestimmten Wassergehalten und Packungsdichten. Um Hydratationseinflüsse auf die Messergebnisse auszuschließen, wurden anstelle von Zement ein Kalksteinmehl (KSM C) und eine Flugasche (FA) als inerte Ersatzfeinststoffe gewählt. Neben den Feinststoffen wurde auch die Gesteinskörnung variiert. Es kam sowohl rundes als auch gebrochenes Gestein in der Fraktion 2/16 zum Einsatz. Die Mischungen mit rd. 270 kg/m^3 Kalksteinmehl als Feinststoff wiesen in etwa gleiche Feinleimgehalte (rd. 270 l/m^3) und Packungsdichten auf (Detailergebnisse Anhang B - Tabelle B7). Die höhere Packungsdichte der Mischung mit runder Gesteinskörnung 2/16 war offenbar auf die leichtere Verdichtbarkeit zurückzuführen. Die gleiche Tendenz ist bei der Mischung mit Flugasche als Feinststoff festzustellen. Infolge der guten Verdichtungswilligkeit der rundkörnigen, überwiegend glasigen Flugasche, konnte die Packungsdichte erheblich gesteigert werden.

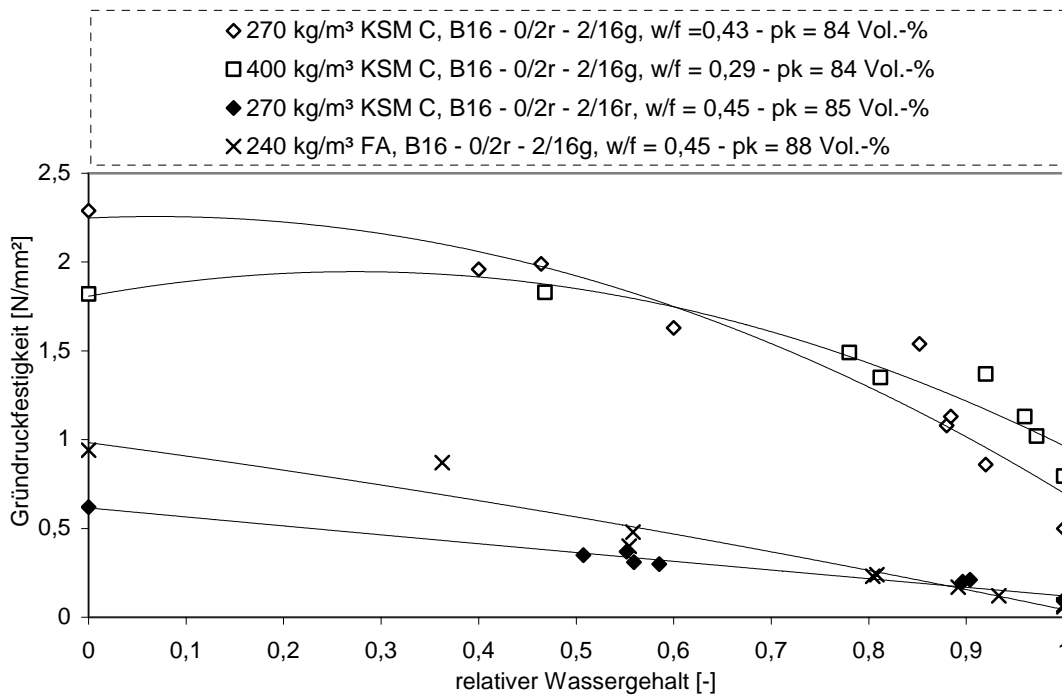


Bild 47: Trocknungskurven – Feinleimgehalt der Proben mit 270 kg/m³ Kalksteinmehl KSM C und 240 kg/m³ Flugasche FA rd. 210 l/m³. Leimgehalt der Probe mit 400 kg/m³ Kalksteinmehl KSM C rd. 260 l/m³ (Mischungszusammensetzungen Anhang B – Tabelle B7. Kurvenverläufe: Polynomische Regression. Relativer Wassergehalt von 1 entspricht w_{opt}).

Zur Absicherung der Ergebnisse wurde zusätzlich eine Mischung mit einem deutlich höheren Kalksteinmehlgehalt in die Betrachtung einbezogen. Die Trocknung erfolgte bei Raumtemperatur. Bei unterschiedlichen Austrocknungsgraden wurden die Prüfkörper hinsichtlich ihrer Gründruckfestigkeit geprüft.

Um trockene Proben ohne Wasser (relativer Wassergehalt = 0) zu erhalten, wurden Prüfkörper im Ofen bei 180°C vollständig getrocknet und direkt nach der Entnahme aus dem Ofen die Druckfestigkeit geprüft. Diese Maßnahme sollte die in [Schubert 26] beschriebene Rekondensation von Wasser in der Probe verhindern. Die in Bild 47 gewählte Achsenbezeichnung des relativen Wassergehalts beschreibt den Gehalt an Restwasser bezogen auf die Ausgangswassermenge.

Analysiert man die qualitativen Verläufe der Gründruckfestigkeit der verschiedenen Proben bei unterschiedlichen relativen Wassergehalten, so fallen die gleichen Gesetzmäßigkeiten ins Auge, die schon bei der Analyse der Ergebnisse in Bild 45 angesprochen wurden. Mischungen mit gebrochener Gesteinskörnung weisen bei allen Wassergehalten höhere Gründruckfestigkeiten auf als mit runder Körnung. Die Zugabe eines rundkörnigen

Feinststoffs senkte die Tragfähigkeit ebenso nachhaltig. Bei der Analyse der Festigkeitsverläufe ist der Austrocknungsfortschritt zu beachten. Unterstellt man, dass die Austrocknung mit konstanter Geschwindigkeit über den Querschnitt voranschreitet, so trocknet zu Beginn ein größeres Volumen aus – in Bild 48 durch die Fläche A 1 angedeutet. Mit voranschreitender Trocknungszeit nimmt der Austrocknungsfortschritt ab. Auch diesen Zusammenhang zeigt Bild 48.

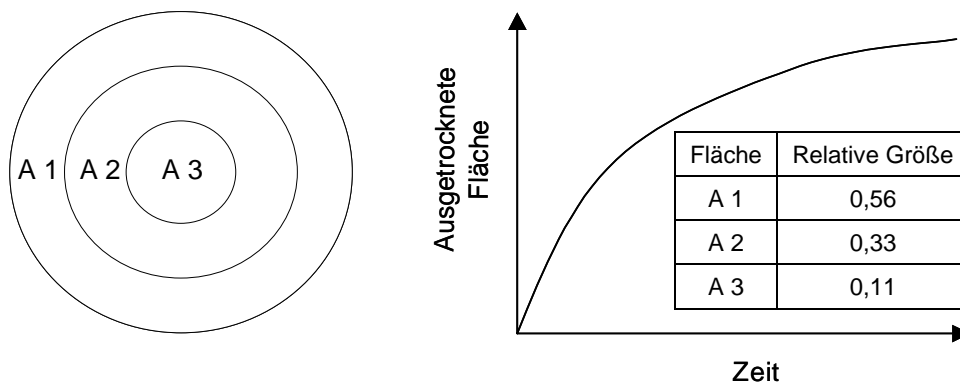


Bild 48: Austrocknungsverlauf über die Zeit bei konstanter Austrocknungsgeschwindigkeit

Nach der Herstellung mit dem am Punkt der optimalen Packungsdichte ermittelten Wassergehalt, wiesen alle Proben mit Feinststoffgehalten zwischen 240 – 270 kg/m³ fast gleich hohe w/f-Werte auf. Orientiert man sich an den Ergebnissen der rheologischen Messungen (Bild 43), so ist eine Wirkung der Kapillarität zu diesem Zeitpunkt (relativer Wassergehalt = 1,0 - Bild 47) auszuschließen. Gleiches gilt für den Zeitpunkt des vollständigen Wasserverlusts (relativer Wassergehalt = 0). Die Probe behält ihre hohe Festigkeit. Die Kapillarität scheint demzufolge für die Gründruckfestigkeit keine Rolle zu spielen.

Hinter der Zunahme der Tragfähigkeit muss demzufolge ein anderer Mechanismus stehen. Der vollständig ausgetrocknete Zustand scheint die wahre Tragfähigkeit des Systems durch innere Reibung und Verzahnung, aber auch Adhäsionskräfte darzustellen. Auch hier können bodenmechanische Modelle Erklärungen liefern. Zu Beginn der Trocknung wiesen alle Probekörper eine optimale Packungsdichte auf, die sich in der Nähe der Sättigungspackungsdichte bewegte. Wurde der Probekörper durch eine Auflast belastet, so reagierte der noch weiche grüne Beton auf die Belastung mit einer erheblichen Stauchung. Hierbei kann es zur Ausbildung hydrostatischer Bereiche infolge der Nähe zur

Sättigungspackungsdichte kommen. Dem enthaltenden Wasser wird durch das geringe Porenvolumen keine Ausweichmöglichkeit geboten. Dies kann die Tragfähigkeit reduzieren. Trocknete der Probekörper in der zuvor beschriebenen Weise weiter aus, nahm der Bereich, in dem sich hydrostatische Systeme ausbilden können, entsprechend dem Austrocknungsfortschritt ab. Der in Bild 47 erkennbare parabelförmige Tragfähigkeitsverlauf in Abhängigkeit vom relativen Wassergehalt wird dadurch verständlich.

Fasst man die Ergebnisse zusammen, so zeigt sich:

- dass die Tragfähigkeit erdfeuchter Betone in erster Linie durch die Kornform der Feinststoffe und Gesteinskörnungen gesteuert wird,
- dass dabei insbesondere die innere Reibung und Verzahnung gesteigert wird,
- dass Kapillarkräfte bei üblichen erdfeuchten Betonen mit w/f -Werten über 0,30 nicht zur Tragfähigkeit beitragen,
- dass Kapillarkräfte bei sehr hohen Feinleimgehalten und damit verbundenen sehr geringen w/f -Werten - insbesondere bei Mischungen mit runder Gesteinskörnung bzw. rundkörnigen Feinststoffen - zu einer Traglaststeigerung beitragen können und
- dass eine festigkeitssteigernde Wirkung von Adhäsionskräften nicht auszuschließen ist.

Die geschilderten Zusammenhänge in zusammengefasster Form zeigt Bild 49 sowohl für eine runde (a) als auch eine gebrochene (b) Gesteinskörnung und einem gebrochenen Feinststoff. Die den Feinleimgehalten zugehörigen Zementgehalte können mit der in Bild 36 angegebenen Gleichung abgeschätzt werden.

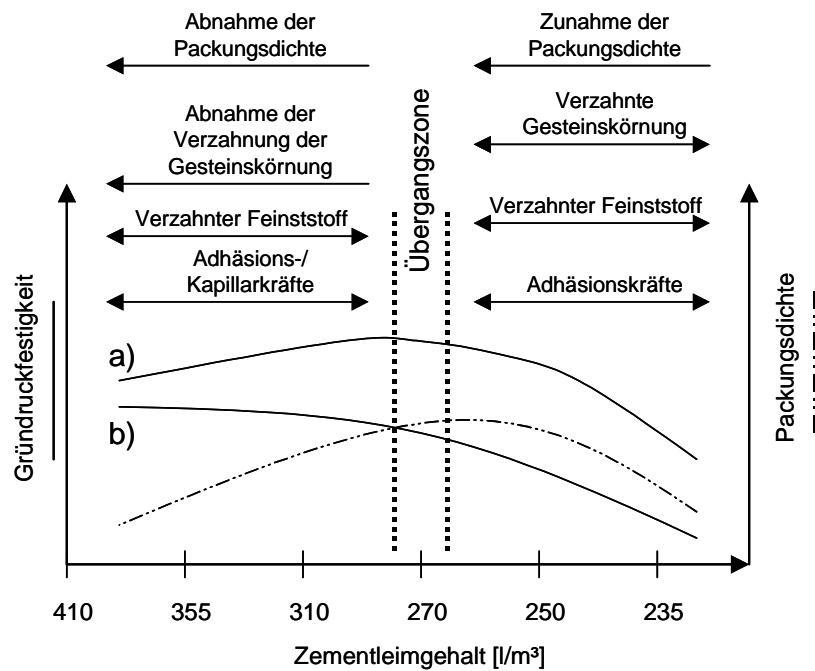


Bild 49: Verlauf der Grunddruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Packungsdichte und der Kornform (a = gebrochene Gesteinskörnung b = runde Gesteinskörnung)

6.4 Ein dreidimensionales Ingenieurmodell auf Basis von w/f-Wert und Packungsdichte

6.4.1 Grundlagen

Bild 49 gab einen schematischen Überblick über die diskutierten, die Grunddruckfestigkeit beeinflussenden Parameter. Für eine gezielte Rezepturerstellung erdfeuchter Betonprodukte sind diese Angaben aber nur z.T. hilfreich. Auch die bereits erläuterte Bestimmung der Scherparameter φ und c unter Beachtung der von [Wierig 28] angegebenen Maßstabseffekte (Bild 14), ist nur bedingt praxistauglich. Besser geeignet wäre eine einfache und von der Verdichtungsintensität unabhängige Darstellungs-/Berechnungsweise. Die von [Schmidt 76] gewählte dreidimensionale Darstellung (Bild 19) für die Betonfestigkeit in Abhängigkeit von Packungsdichte und w/f-Wert entspricht diesen Forderungen. Sie ist einfach anwendbar und soll nachstehend auf den sofortentschalteten Zustand übertragen werden. Um sowohl den Einfluss der Packungsdichte als auch des Wassergehalts, ausgedrückt durch den w/f-Wert, auf die Tragfähigkeit des grünen Betons zu prüfen, wurden Versuche mit unterschiedlichen w/f-Werten/Feinststoffgehalten und Packungsdichten durchgeführt und die Möglichkeit einer

rechnerischen Erfassung des Zusammenhangs dieser Größen geprüft (Bild 50). Es zeigte sich, dass Packungsdichte und Gründruckfestigkeit für übliche erdfeuchte Betone durch eine lineare Regression gut korrelierbar sind. Gleichzeitig zeigte sich auch, dass sinkende w/f-Werte bei gleicher Packungsdichte höhere Gründruckfestigkeiten bewirken. Das bedeutet, dass auch der Wassergehalt für die Beschreibung der Festigkeit im grünen Zustand zu berücksichtigen ist. Eine genauere Analyse der Zusammenhänge soll unter Punkt 6.4.2 zur Klärung des Sachverhalts beitragen.

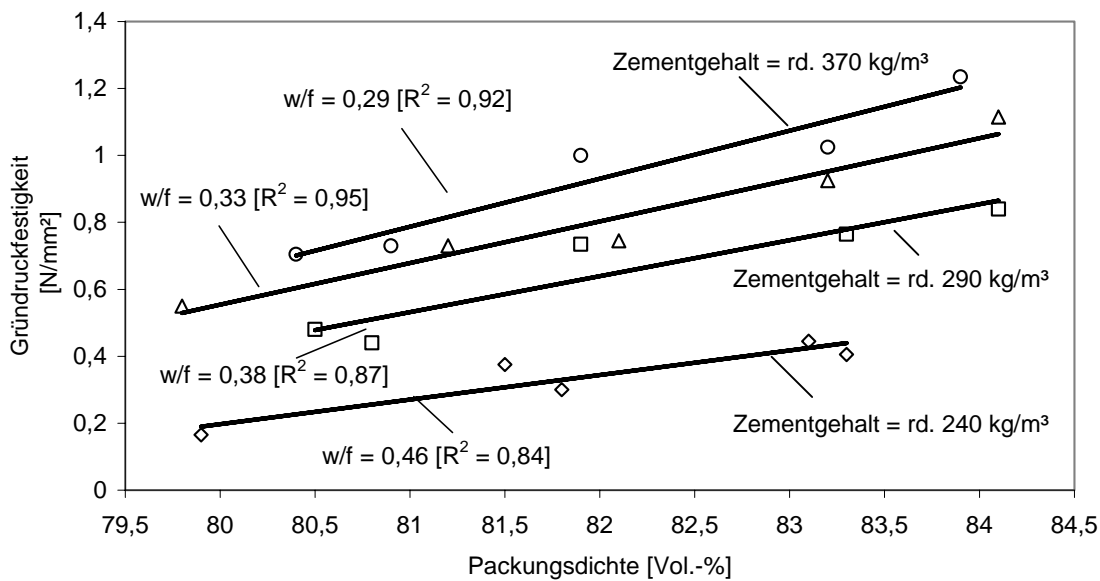


Bild 50: Zweidimensionale Darstellung des Zusammenhangs zwischen Packungsdichte, Wasser-Feinststoffwert und Grünstandfestigkeit (Details siehe Anhang B – Tabelle B8)

6.4.2 Der gravimetrische Wasser-Feinststoffwert (w/f) als beschreibende Größe für die Gefügehomo­genität und die Wirkung von Adhäsionskräften

Eine Erklärung für die Wirkung des w/f-Werts (= gravimetrisches Verhältnis von Wasser zu Feinststoffen < 0,25 mm) auf die Gründruckfestigkeit kann Bild 36 liefern. Der dort dargestellte Zusammenhang zwischen Feinleimgehalt und w/f-Wert konnte näherungsweise durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden. Nimmt demzufolge der Feinleimgehalt einer Probe zu, weil der Feinststoffgehalt erhöht wird, so sinkt der w/f-Wert und die Viskosität steigt an. Proben mit geringeren w/f-Werten gleichen somit einen Anstieg der Viskosität durch eine Erhöhung des Feinleimgehalts aus. Die rheologischen Eigenschaften des Feinleims – insbesondere dessen Fließgrenze – wurden in bezug auf ihre Wirkung auf die Gründruckfestigkeit bewertet (Bild 43). Die gemessenen Werte erwiesen sich – bezogen auf die w/f-Werte üblicher erdfeuchter Betone - als zu gering. In Kapitel 6.3.2 wurden zudem die über den Wassergehalt wirkenden Kapillarkräfte als Tragmechanismus ausgeschlossen (Bild 47). Beide Mechanismen würden eine einfache Erklärung für den Anstieg der Gründruckfestigkeit bieten, sind aber – wie festgestellt wurde – nicht ausschlaggebend.

Bisher nicht in die Betrachtung mit einbezogen wurde der Verdichtungseinfluss auf den Zementleim. Befindet sich der Zementleim nach dem Anmischen des Betons auf den Oberflächen der Gesteinkörnung, so beginnt er unter Vibrationseinfluss zu fließen. Die Gesteinskörnung des Betons bildet ein poröses Stützgerüst. Zwischen den Körnern der Gesteinskörnungen befinden sich Durchlässe (Zwickel) in denen sich die Feinststoffe je nach Korngröße verfangen und durch die Verdichtungsenergie in den Hohlräumen zwischen den Körnern aneinander gepresst werden. Dieser Vorgang führt zur Steigerung der Adhäsionskräfte, wie Bild 11 der Literaturrecherche bereits zeigte. Bild 37b) illustriert diesen Vorgang am Beispiel eines Kornzwickels. In der angesprochenen Darstellung ist eine gerade ausreichende Feinleimmenge vorhanden, die alle durch die Gesteinskörnung vorgegebenen Hohlräume füllt. Unter der Einwirkung der Verdichtungsenergie fallen Feinstpartikel aus der Suspension aus, der Zementleim zeigt eine Art „Mikrobluten“. Bild 37b) zeigt dies anhand der ungleichmäßigen Verteilung der Feststoffpartikel. Auch sind sogenannte „Brückeneffekte“ vorstellbar, weil sich benachbarte Partikel aneinander abstützen. In [Duran 6] wird dieses Phänomen für trockene Schüttgüter beschrieben. Auch dies kann zur Verzahnung bzw. Zunahme der Adhäsionskräfte beitragen. Senkt man den w/f-Wert durch weitere Feinststoffzugabe, so nimmt die Feinleimmenge entsprechend der in Bild 36 angegebenen quadratischen Funktion zu. Dadurch wird die Gesteinskörnung weiter auseinandergedrängt. Bild 37c) zeigt diesen Vorgang. Gleichzeitig bewirkt der höhere Gehalt an Feinststoffen in

der Suspension (geringerer w/f -Wert = hoher Feinststoffgehalt des Feinleims), dass die Ungleichverteilung der Feinststoffe im Bereich der Kornzwickel abnimmt, da die Suspension homogener und sedimentationsstabiler wird, wobei gleichzeitig die Viskosität ansteigt. Unter Vibrationseinfluss ist der vorab als „Mikrobluten“ bezeichnete Ausfall der Feinstpartikel dann weniger ausgeprägt. Diese Tendenz verstärkt sich mit weiter zunehmendem Leim- und Feinststoffgehalt (Bild 37d). Die Grenze der Steigerung der Gründruckfestigkeit ist dann erreicht, wenn die Zunahme der Festigkeit durch die Verbesserung der Gefügehomoogenität und die Zunahme der Adhäsionskräfte des Feinststoffs, durch die Abnahme der Kornverzahnung des Tragkorngerüsts übertroffen wird. Dies erklärt, warum sehr hohe Feinleimgehalte insbesondere in Systemen mit gebrochener Gesteinskörnung zu abnehmender Tragfähigkeit führen.

Zusammengefasst kann die Zunahme der Tragfähigkeit infolge abnehmender w/f -Werte und einer zunehmenden Feinleimmenge somit der homogeneren feinststofflichen Struktur des erdfeuchten Betons zugeschrieben werden. Diese führt zu einer besseren Verzahnung der Feinststoffe, mehr Kornberührungspunkten und in Folge zu mehr Tragfähigkeit. Den Pressdruck, den die größeren Körner während der Verdichtung auf das in den Zwickeln vorhandene Feinstkorn ausüben, bewirkt zusätzliche Adhäsionskräfte (Bild 11 und Bild 37). Diese Einflüsse durch Rahmenscherversuche nachzuweisen ist schwierig. Rechnung 8 und 9 (Kapitel 6.3.2) verdeutlichen den Hintergrund. Erdfeuchte Betone weisen im Allgemeinen einen hohen inneren Reibungswinkel und hohe Kohäsionskräfte auf. Verändert man diese Werte – wie gezeigt – nur leicht, so sinkt die Tragfähigkeit stark ab. Rahmenscherversuche sind somit für sehr empfindliche Systeme zu ungenau, um geringe Abweichungen messtechnisch erfassen zu können.

Als Zusammenfassung aller beschriebenen Einflussgrößen zeigt die dreidimensionale Darstellung (Bild 51) den schematischen Zusammenhang zwischen w/f -Wert, Packungsdichte (= Gehalt an Feststoffen in Vol.-%) und Gründruckfestigkeit. Im Gegensatz zur in Bild 50 gezeigten zweidimensionalen Darstellung ist sie anschaulicher, aber bei der Bestimmung von Einzelwerten ungenauer. Die beste Lösung für eine einfache Anwendung bietet eine funktionale Beschreibung. Dies soll abschließend erfolgen.

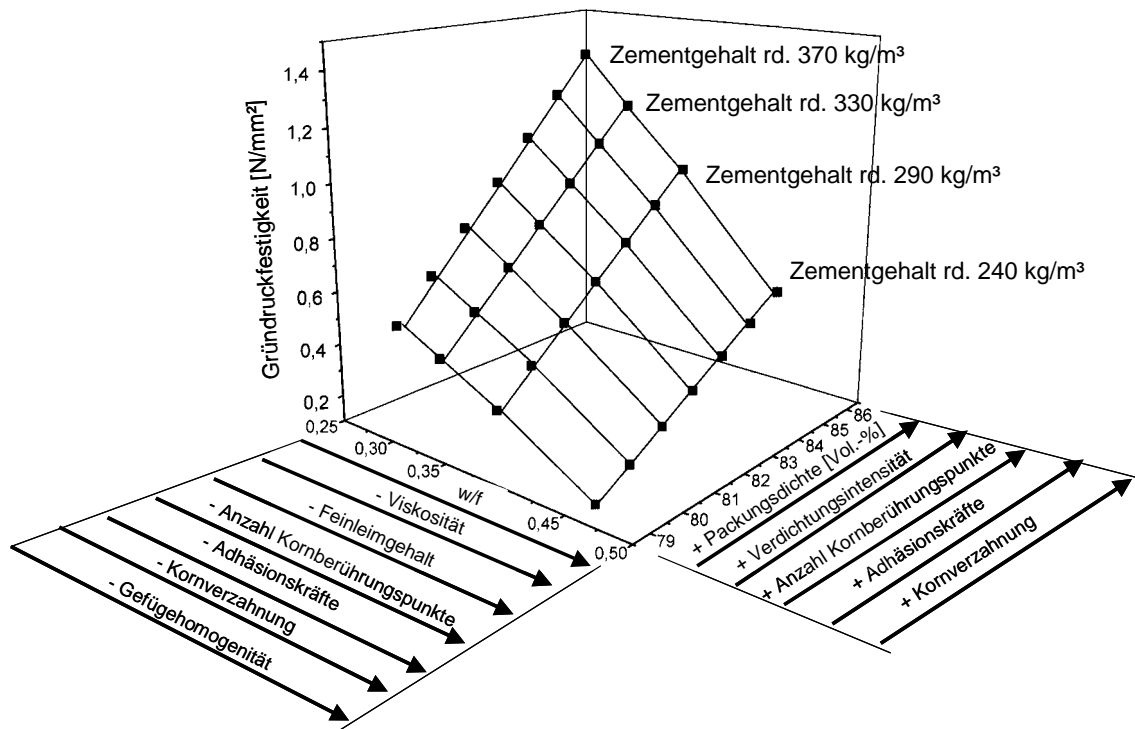


Bild 51: Der dreidimensionale Zusammenhang zwischen Packungsdichte, Wasser – Feinststoffwert und Gründruckfestigkeit (Die Zementgehalte beziehen sich auf die jeweils höchste Packungsdichte. Werte siehe Anhang B – Tabelle B8 und Bilder B12 – B13)

6.4.3 Umsetzung

Keht man zu der in Bild 50 gezeigten zweidimensionalen Darstellung der Versuchsergebnisse zurück, so zeigt sich, dass die jeweiligen Verläufe der Regressionsgraden eine ähnliche Steigung aufwiesen. Überträgt man die Verläufe aus der Zweidimensionalität in die Dreidimensionalität, so ergibt sich mit guter Näherung eine Ebene, wie in Bild 51 gezeigt. Eine solche Ebene lässt sich sehr einfach durch eine lineare Funktion in Abhängigkeit von Packungsdichte und w/f-Wert beschreiben, die Gründruckfestigkeit dadurch abschätzen. Hierzu wurden die Regressionsgraden sowohl der Gründruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Packungsdichte als auch in Abhängigkeit vom w/f-Wert bestimmt (Bilder B12 und B13 – Anhang B). Die unterste Grenze der Packungsdichte wurde auf 79 Vol.-%, die des w/f-Werts auf 0,46 festgelegt. Die Packungsdichten üblicher erdfeuchter Betone liegen zumeist darüber, die w/f-Werte darunter.

Die diese untere Grenze beschreibenden Regressionsgleichungen lauten für die Beschreibung der Gründruckfestigkeit über die Packungsdichte:

$$f(pk) = 0,0736 \cdot pk - 5,6934 \quad (\text{Gleichung 23 Gültigkeitsbereich } pk = 79 - 86 \text{ Vol.-%})$$

und über den w/f-Wert:

$$f(w/f) = -2,2447 \cdot w/f + 1,1607 \quad (\text{Gleichung 24 Gültigkeitsbereich } w/f = 0,29 - 0,46)$$

Setzt man Gleichung 24 bei einer Packungsdichte von 79 Vol.-% und einem w/f-Wert von 0,46 gleich Null, so ergibt sich:

$$f(w/f) = -2,2447 \cdot 0,46 + 1,0397 \quad (\text{Gleichung 25})$$

Die Gleichung 23 wird als Grundgleichung angenommen. Durch Addition der Grundgleichung 23 mit Gleichung 25 erhält man die Ebenengleichung:

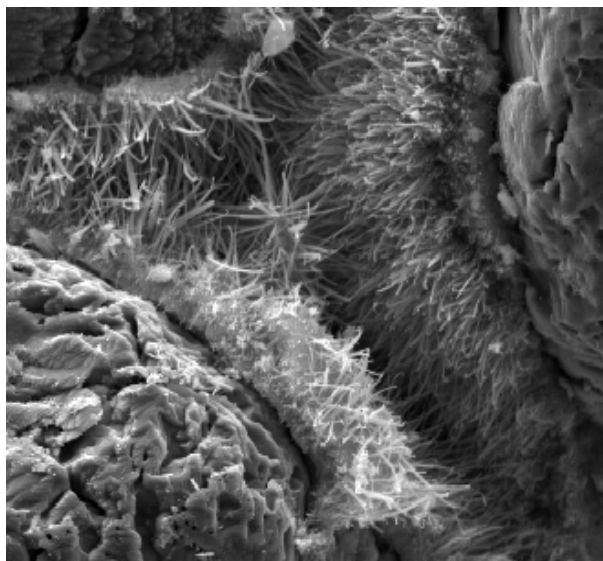
$$f(pk; w/f) = 0,0736 \cdot pk - 2,2447 \cdot w/f - 4,6537 \quad (\text{Gleichung 26})$$

In Tabelle B11, Anhang B, ist die Genauigkeit der Funktion im Vergleich zu den Messergebnissen angegeben. Vor dem Hintergrund der im Vergleich zu Festbetonmessungen größeren Schwankungsbreite der Gründruckfestigkeitsergebnisse, ist die Übereinstimmung zufriedenstellend.

Die Nutzung der Extrapolationsfunktion ermöglicht es, ohne die Zuhilfenahme grafischer Hilfsmittel die Gründruckfestigkeit erdfeuchter Betonprodukte mit gebrochener Körnung vorherzusagen. Sie gilt in dem hier gezeigten Fall für kleinformatige Erzeugnisse, mit Verhältniswerten von Höhe zu Breite von rd. 1,00. Werden größere Produkte hergestellt, so empfiehlt sich die Anwendung der Abminderungswerte die [Wierig 28] vorschlug und die in Bild 14 dargestellt sind.

6.5 Festbetoneigenschaften

Der Übergang vom grünen Beton zum Festbeton vollzieht sich durch die Hydratation des Bindemittels. Der im grünen Beton als Mikrozuschlag wirkende Feinststoff Zement bildet durch die Reaktion mit Wasser Calciumsilikathydratphasen. Diese nadeligen Hydratationsprodukte wachsen ineinander und erzeugen durch Verzahnung und Reibung einen innigen Verbund. Bild 52 macht dies deutlich. Die Geschwindigkeit des Wachstums der Calciumsilikathydratphasen bzw. der Umsetzungsgrad des Zements ist von der Umgebungstemperatur, der chemischen Zusammensetzung, dem Angebot an Wasser, aber auch von der Feinheit und der Kornzusammensetzung des Zements [Reschke 5] abhängig. Der Verfestigungsgrad wird dabei besonders durch den Partikelabstand/-verteilung innerhalb des Zementleims geprägt. Als kennzeichnende Größe wird hierfür der Begriff der „Wasserfilmdicke“ verwendet [Krell 3; Reschke 5]. Vergleicht man sonst gleiche Zementleime mit höherem und geringerem w/f-Wert, so muss in der Suspension mit höherem Wassergehalt ein größerer Abstand zwischen den Partikeln vorliegen. Verfestigt sich der Leim durch die einsetzende Hydratation der Zementpartikel, so müssen die Calciumsilikathydratphasen im System mit höherem Wassergehalt einen größeren Raum durchqueren, um entsprechend der in Bild 52 dargestellten Form miteinander verfilzen zu können. Dies ist eine sehr anschauliche Erklärung dafür, warum höhere Wassergehalte = w/z-Werte zu geringeren Festigkeiten und höheren Zementsteinporositäten führen müssen.



*Bild 52:
CSH-Phasen in
Kalksandstein
(Bildbreite 30µm)*

Diese Erklärung ist natürlich eine Idealisierung der realen Vorgänge. Von reinen Zementleimen ist bekannt, dass sie insbesondere bei höheren w/z -Werten zur Sedimentation neigen. Es ist somit vorstellbar, dass sich dieser Vorgang auch im erdfeuchten Beton insbesondere unter starkem Rütteleinfluss auswirkt. In Kapitel 6.4.2 wurde die Ungleichverteilung der Zementpartikel im Bereich der Kornzwickel der Gesteinkörnung bereits dazu herangezogen, den Einfluss des w/f -Werts auf die Gründruckfestigkeit zu erklären. Demnach kommt es im Bereich der Verengungsstellen der Kornzwickel zu einer Agglomeration der Feinststoffe. Diese wirken als Mikrozuschläge, die durch Verzahnung und adhäsive Kräfte die Gründruckfestigkeit ganz maßgeblich erhöhen können. Kommt es zu der beschriebenen Anhäufung der Feinstpartikel im Bereich der Kornzwickel, so nimmt hier die Feststoffdichte zu, Überschusswasser muß verdrängt werden. In Bild 37/b führt dieser Vorgang zur Ausbildung von örtlichen Wasserlinsen mit hohem Wassergehalten und entsprechend höheren w/z -Werten. Diese Hohlräume werden durch CSH-Phasen in geringerem Maße vernetzt, lokal steigt die (Kapillar-)Porosität an. Diese Fehlstellen führen zu geringerer Festigkeit des Zementsteins. Ein Indikator für die Zementsteinfestigkeit ist nach [Locher 40] in besonderem Maße der Gehalt an Kapillarporen (Gleichung 11). Um den Zusammenhang zwischen w/z -Wert und Kapillarporosität genauer zu untersuchen, wurden Mörtelproben mit unterschiedlichen Wassergehalten hergestellt (Mischungszusammensetzung Anhang C, Tabelle C1) und mittels Quecksilberdruckporosimetrie untersucht. Es zeigte sich ein quasi linearer Zusammenhang zwischen w/z -Wert und Kapillarporosität. Nimmt man die von Locher hergeleitete Gleichung 11 für übliche erdfeuchte Betone mit w/z -Werten zwischen 0,30 – 0,50 als Basis für die Berechnung der Zementsteinfestigkeit, so lassen sich die Rechenergebnisse in dem beschriebenen engen Betrachtungsbereich auch hier vereinfacht auf einen quasi linearen Zusammenhang zwischen Festigkeit und w/z -Wert von Betonen reduzieren (Bild 53). Auf Basis der Mörteluntersuchungen ist somit zu vermuten, dass sich das Verhalten grüner und erhärteter erdfeuchter Betone somit in diesem Punkt gleicht. Der w/f bzw. w/z -Wert gehen linear in die Prognose der Festigkeit erdfeuchter Betone ein.

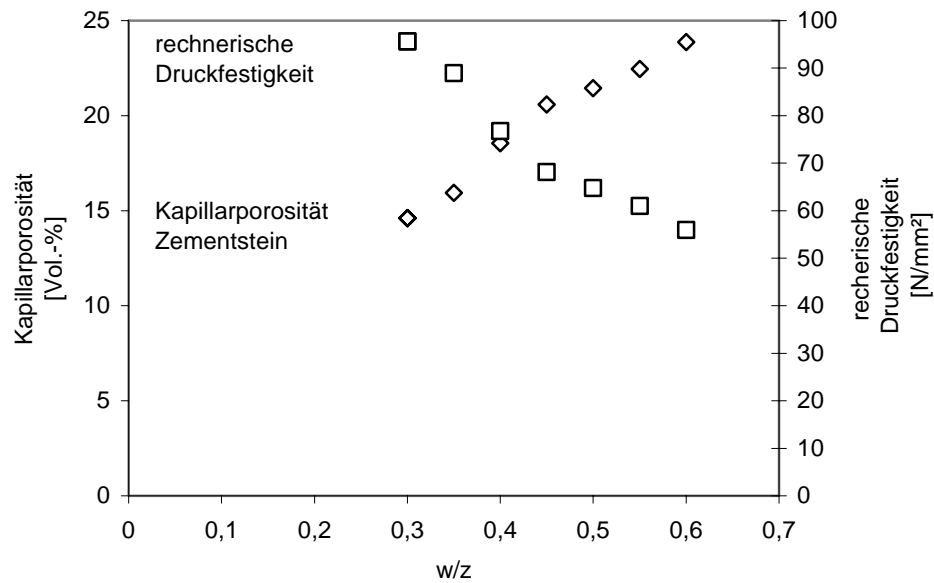


Bild 53: Entwicklung von Kapillarporosität und rechnerischer Druckfestigkeit des Zementsteins (CEM I 52,5 R Werk B)

Weitere Übereinstimmungen sind in Bezug auf die Tragwirkung der Gesteinskörnung und den Beitrag der Packungsdichte feststellbar (Bild 54). Wie auch im grünen Zustand, wirkt sich der Feinleimgehalt des erdfeuchten Betons auf die Packungsdichte und somit die Festigkeitsentwicklung aus. Hohe Feinleimgehalte führen zur sukzessiven Verdrängung quasi hohlraumfreier Gesteinskörnung durch die Feinststoffsuspension. In Bild 37 wurde der Verdrängungsmechanismus bereits beschrieben. Die dadurch bedingte Abnahme der Packungsdichte wird durch die Verwendung eines feineren Zementes (CEM I 52,5 R Werk B) augenscheinlich weiter verstärkt. Der feinere Zement weist ein größeres Steigungsmaß (n) auf (Tabelle 2). Nach [Reschke 5] führt dies zu einem höheren inneren Hohlraumgehalt des Zements. Da der Zement – wie bereits dargestellt – auch als Mikrozuschlag wirkt, muss eine verringerte Packungsdichte des Feinststoffs auch zu einer Abnahme der Packungsdichte des erdfeuchten Betons führen.

Bei konstant gehaltenen Rüttelparametern beginnt im Bereich von Feinleimgehalten von rd. 270 l/m^3 für die in Bild 54 dargestellten Sieblinien A16 und B16 die Packungsdichte zu sinken. Es ist zu vermuten, dass insbesondere die abnehmende Verzahnung der Gesteinskörnung verhindert, dass eine dem w/z -Wertgesetz folgende Steigerung der Festigkeit des Zementsteins zu einer weiteren Zunahme der Betonfestigkeit führt. Dieses Verhalten erinnert dabei an die Festigkeitsentwicklung hydraulisch gebundener Tragschichten (HGT) nach [Schmidt 1], die durch Bild 19 illustriert wird. Es sind somit die Einflussgrößen auf die Festigkeitseigenschaften des grünen und des erhärteten Betons

gleich. Die erneute Herleitung des dreidimensionalen Zusammenhangs zwischen w/f - bzw. w/z -Wert, Packungsdichte und Festigkeit des erhärteten Betons erscheint somit möglich.

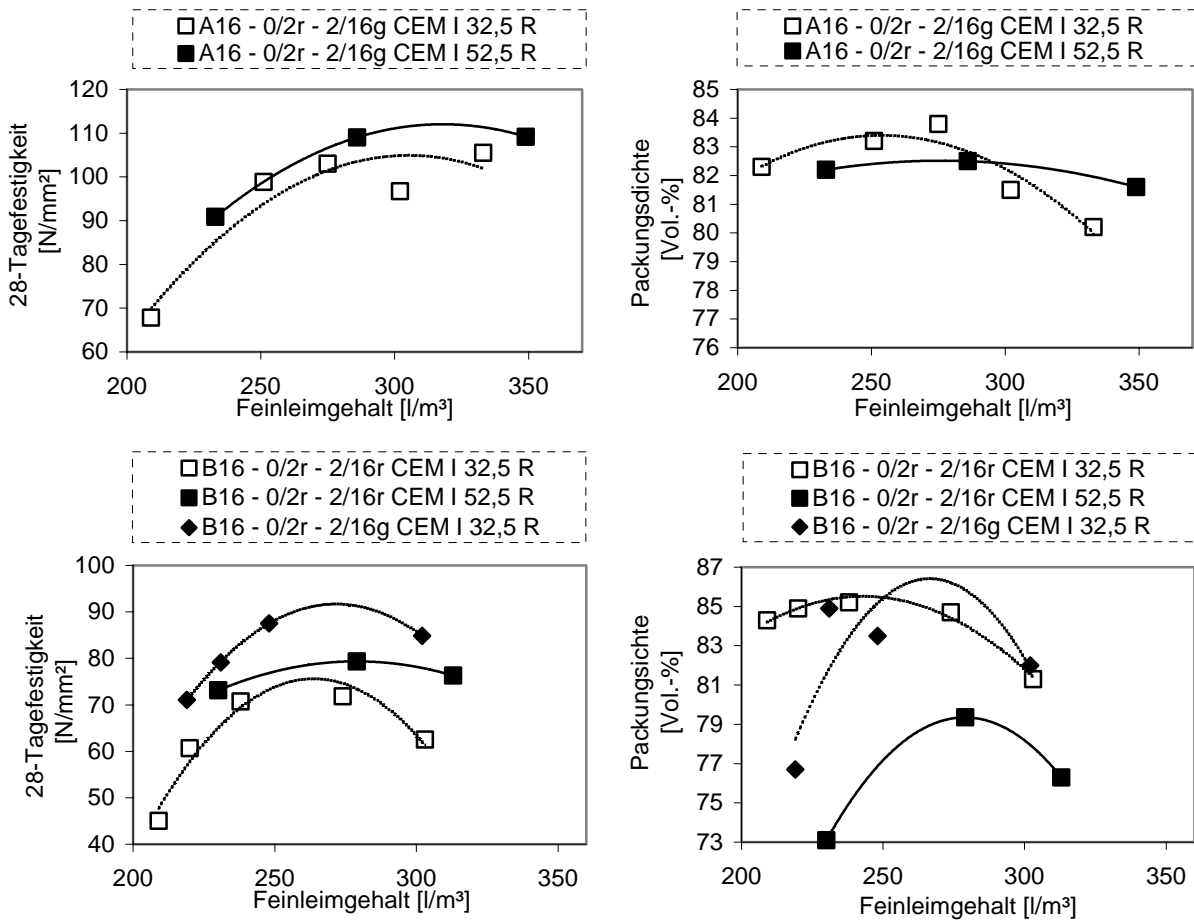


Bild 54: Einfluss von Packungsdichte und Feinleimgehalt auf die Festigkeit erdfeuchter Betone (Detailwerte Anhang C – Tabellen C2/1 und C2/2)

Ein dreidimensionales Ingenieurmodell auf Basis von w/z -Wert und Packungsdichte

Für die Herleitung des dreidimensionalen Zusammenhangs wurden Betone unterschiedlicher Zusammensetzung und w/z -Werte bei variierten Packungsdichten hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit nach 28 Tagen geprüft. Die Mischungszusammensetzungen sind Anhang C, Tabellen C3 – C7 zu entnehmen. Für die mathematische Beschreibung des Zusammenhangs wurden Mischungen mit gebrochener Gesteinskörnung 2/16 – wie schon bei der Gründruckfestigkeit – verwendet. Bild 55 zeigt, wie die Druckfestigkeit bei einem Anstieg der Packungsdichte von rd. 74 Vol.-% auf rd. 83 Vol.-% größer wird. Die mittels linearer Regressionsgleichungen beschriebenen Graden (Anhang C, Bilder C1 und C2)

wiesen zudem weitgehend unabhängig von der Zusammensetzung des Betons etwa die gleiche Steigung auf.

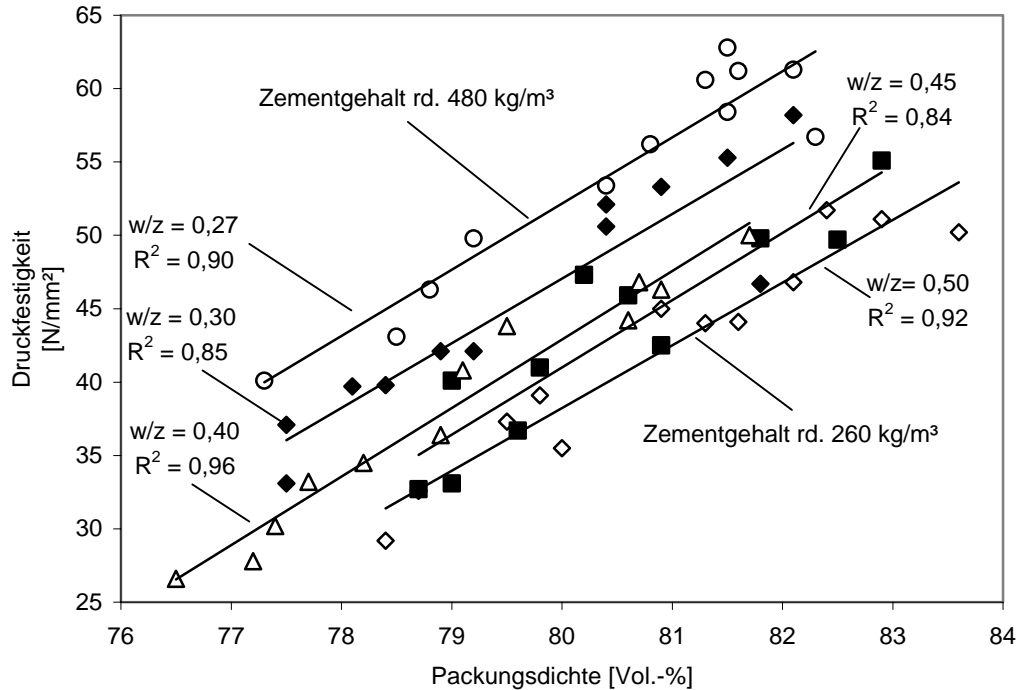


Bild 55: Zusammenhang zwischen Packungsdichte, w/z-Wert und 28-Tagefestigkeit (In diesem Beispiel: Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16g CEM I 32,5 R Werk B. Festigkeitsergebnisse Tabellen C8 – C12, Anhang C)

Stellt man die Ergebnisse dreidimensional dar, so ergibt sich – wie schon bei der Grunddruckfestigkeit - wiederum eine Ebene, die mathematisch einfach zu beschreiben ist (Bild 56). Wie schon unter Punkt 6.4.3 beschrieben, wurde als Beispiel für den Gesamtzusammenhang bei einer Packungsdichte von 79 Vol.-% und einem w/z-Wert von 0,50 aus den zugeordneten Regressionsgleichungen die Ebenengleichung gebildet. Die untere Grenze der Betonfestigkeit in Abhängigkeit von der Packungsdichte beschreibt dabei nach Bild C1 in Anhang C die Gleichung:

$$f(pk) = 4,2733 \cdot pk - 303,64 \quad (\text{Gleichung 27 Gültigkeitsbereich } > 79 \text{ Vol.-%})$$

und über den w/z-Wert Gleichung:

$$f(w/z) = -54,09 \cdot w/z + 60,553 \quad (\text{Gleichung 28 Gültigbereich } > 0,27)$$

Setzt man Gleichung 28 bei einer Packungsdichte von 79 Vol.-% und einem w/z-Wert von 0,50 gleich Null, so ergibt sich:

$$f(w/z) = -54,09 \cdot w/z + 27,045 \quad (\text{Gleichung 29})$$

Die Gleichung 27 wird als Grundgleichung angenommen. Durch die Addition der Grundgleichung 27 mit Gleichung 29 erhält man die Ebenengleichung:

$$f(pk; w/z) = 4,2733 \cdot pk - 54,09 \cdot w/z - 276,595 \quad (\text{Gleichung 30})$$

Will man die Ergebnisse rechnergestützt erfassen, um z.B. in Produktionsprozessen schnelle Festigkeitsprognosen errechnen zu können, so ist die mathematische Erfassung des Zusammenhangs notwendig. Welche Möglichkeiten sich dadurch innerhalb der Produktion von erdfeuchten Betonprodukten bieten, wird in Kapitel 8 ausführlicher diskutiert werden.

Neben dem rein mathematischen Zusammenhang zwischen Packungsdichte, w/z-Wert und Festigkeit des Festbetons interessieren außerdem der Einfluss der Gesteinskörnung und der Zementfestigkeitsklasse. Hierzu wurden wiederum erdfeuchte Betone auf definierte Packungsdichten gerüttelt. Anstelle von gebrochener Gesteinskörnung 2/16 wurde alternativ eine runde Gesteinskörnung verwendet (Tabellen C4 und C5, Bilder C5 – C6, Anhang C). Außerdem wurden zwei weitere Zemente eingesetzt. Ein CEM III/A 32,5 des Werks A und ein CEM I 52,5 R des Werks B (Tabellen C6 – C7, Bilder C3 – C4 und C7 – C8).

Der Vergleich des Einflusses der Gesteinskörnung zeigt, dass bei Verwendung runder Gesteinskörnung 2/16 mit einem Festigkeitsabfall von rd. 20 % gegenüber einer gebrochenen Körnung 2/16 zu rechnen ist. Dies kann anhand des Vergleichs der Messreihen mit CEM I 32,5 R Werk B mit runder Gesteinskörnung B16 – 0/2r – 2/16r und gebrochener Gesteinskörnung B16 – 0/2r – 2/16g gefolgert werden (Bild C9, Anhang C). Dieses Ergebnis stimmt somit mit Messreihen von [Schneider 32, 33] überein. Ebenso zeigte sich erwartungsgemäß, dass durch einen Zement CEM I 52,5 R höherer Mahlfeinheit die Festigkeit des erdfeuchten Betons um mindestens 20% im Vergleich zu einem Zement CEM I 32,5 R gesteigert werden kann (Bild C10, Anhang C). Ebenfalls erwartungsgemäß waren die Ergebnisse des Betons mit einem CEM III/A 32,5 des Werks A mit runder Gesteinskörnung 2/16 und des CEM I 32,5 R des Werks B mit ebenfalls runder Gesteinskörnung 2/16 nicht signifikant verschieden.

Zusammengefasst lassen die hier und im Anhang C (Bilder C1 – C10) dargestellten Ergebnisse die Schlussfolgerung zu, dass mit Hilfe des in Gleichung 30 dargestellten linearen Zusammenhangs für alle Mischungszusammensetzungen die Festigkeit mit ausreichender Genauigkeit vorhergesagt werden kann. Der in den Bildern 55 und 56 dargestellte zwei- bzw. dreidimensionale Zusammenhang kann universell bei Anwendung der zuvor beschriebenen Abminderungs- und Erhöhungswerte auch auf andere Mischungszusammensetzungen und Zementqualitäten angewendet werden.

Die Zusammenfassung aller Einflussgrößen in der in Bild 56 gezeigten dreidimensionalen Darstellung aus w/z-Wert, Packungsdichte und 28-Tage-Druckfestigkeit zeigt, wie schon bei der Beschreibung der Gründruckfestigkeit, dass insbesondere der w/z-Wert eine integrale Größe darstellt. Hinter den Einflussgrößen w/z-Wert (bzw. w/f-Wert) und Packungsdichte steht eine Vielzahl von Mechanismen, die im Rahmen dieser Arbeit ausführlich diskutiert wurden.

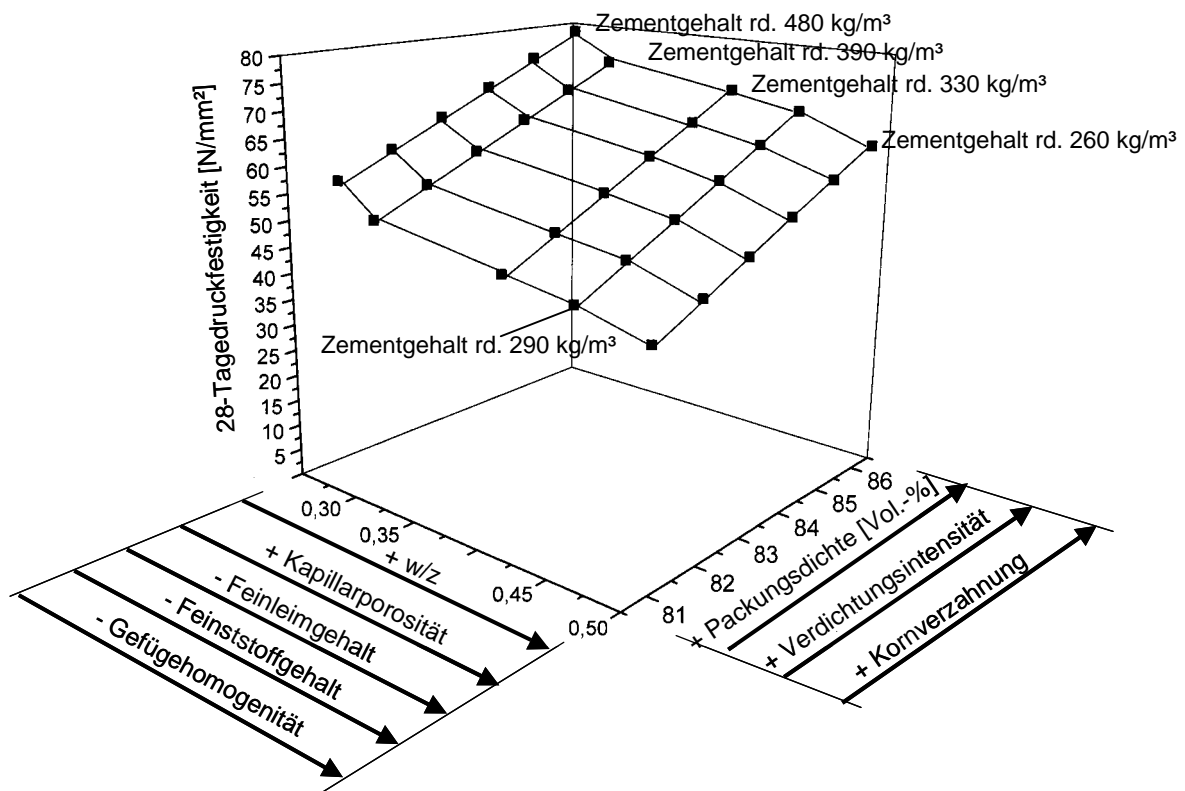


Bild 56: Der dreidimensionale Zusammenhang zwischen Packungsdichte, w/z-Wert, 28-Tagefestigkeit und deren Einflussgrößen (Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16g CEM I 32,5R Werk B. Festigkeitsergebnisse Tabellen C8 – C12, Anhang C)

6.6 Ausweitung des Modells auf erdfeuchte Betone mit Zusatzstoffen- und Zusatzmitteln

Im vorangegangenen Kapitel wurde ein Modell entwickelt, dass über die Kenngrößen Packungsdichte und Wasser-/Feinteilwert (w/f) bzw. Wasser-/Zementwert eines erdfeuchten Betons aus Gesteinskörnung, Zement und Wasser die Prognose seiner Druckfestigkeit erlaubt. In den letzten Jahren werden in immer stärkerem Maße auch Zusatzstoffe- und -mittel verwendet. Der erdfeuchte Beton verwandelt sich zunehmend in ein Fünfstoffsystem. Bevorzugt eingesetzt werden Steinkohlenflugaschen nach DIN EN 450, aber auch Basalt- und Kalksteinmehle [Bilgeri 35]. Die Zugabemengen bewegen sich dabei zwischen rd. 60 – 100 kg/m³. Um eine bessere Verdichtungswilligkeit zu erzielen, werden außerdem geringe Mengen an Fließmitteln - zumeist auf Melaminsulfonatbasis - hinzugegeben. Diesen Zusammenhang gibt Bild 57 wieder. Dies wirft die Frage auf, wie sich ein solches Mehrstoffsystem in das in den vorangegangenen Kapitel erarbeitete Modell einfügt. Außerdem sollte geklärt werden, ob sich durch die gezielte Zugabe von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln verbesserte Betone herstellen lassen.

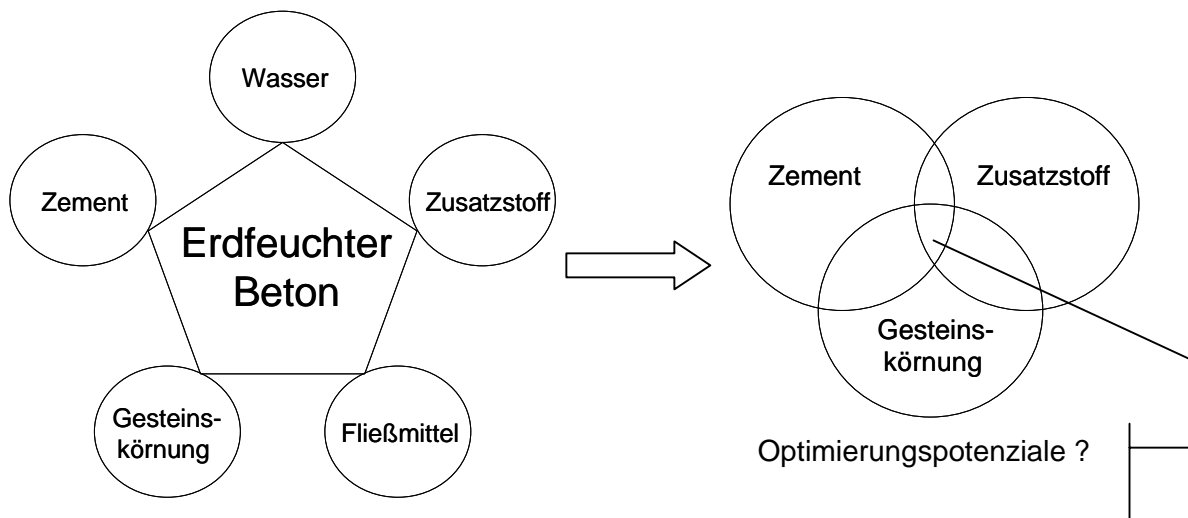


Bild 57: Das Fünfstoffmodell des erdfeuchten Betons und mögliche Optimierungspotenziale

Die Festigkeit erdfeuchter Betone wird durch die Packungsdichte und den w/z- bzw. w/f-Wert maßgeblich gesteuert. Eine Optimierung sollte hier ansetzen. Die Optimierung des granulometrischen Aufbaus der Feststoffe eines erdfeuchten Betons könnte eine Möglichkeit bieten, die Packungsdichte und den Wassergehalt zu beeinflussen und somit die Festigkeit zu steigern (Bild 57). Eine weitere Möglichkeit bietet der Einsatz sehr leistungsfähiger

Fließmittel, um den Wassergehalt nachhaltig zu senken. Diese Maßnahmen werden nachfolgend untersucht.

6.6.1 Einfluss der Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung und der Feinstoffe auf den Wasseranspruch und die Packungsdichte

Am Beginn einer Packungsdichteoptimierung steht die Auswahl eines geeigneten Sieblinien- bzw. Optimierungsmodells, mit dessen Hilfe die granulometrische Zusammensetzung der Feinstoffe rechnerisch erfasst und angepasst werden kann. Für stetige Sieblinien bietet sich das Modell nach [Dinger und Funk 7, 67] an, das bereits im Rahmen der Literaturrecherche (Abschnitt 4.4.2.3) beschrieben wurde. Vorteil des Modells ist dessen einfache Handhabung. Der Verlauf der Sieblinien kann allein durch die Veränderung des Verteilungsmoduls n bewirkt werden (Gleichung 14). Abnehmende n -Werte stehen innerhalb der betrachteten Sieblinien für einen zunehmenden Gehalt an sehr feinen Partikeln innerhalb der Feinstoffe. Mit Hilfe dieses Modells lassen sich auch die Sieblinien der Gesteinskörnung nach DIN 1045–2 beschreiben. Die Sieblinie A entspricht z.B. einem Verteilungsmodul von $n = 0,70$, die Sieblinie B von $n = 0,22$ und die Sieblinie C von $n = 0,01$. Neben der verständlichen Darstellung bietet das Sieblinienmodell nach Dinger und Funk weiterhin den Vorteil, dass insbesondere der Bereich von Feinststoffsieblinien mit hohem bis sehr hohem Anteil sehr feiner Partikel ausreichend genau beschrieben werden kann. Tabelle 3 zeigt dagegen, dass die üblicherweise verwendete Beschreibung mittels der RRSB-Verteilung [Reschke 5] bei zunehmender Feinheit der Sieblinien keine deutliche Unterscheidung zulässt, sich somit hierfür nicht eignet.

Verteilungsmodul n	0,01	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,70	1,00
Steigungsmaß (n) RRSB	0,52	0,52	0,54	0,62	0,67	0,74	0,88	1,115

Tabelle 3: Gegenüberstellung von Verteilungsmodul n und Steigungsmaß (n)

Neben stetigen Sieblinien wurden auch Ausfallsieblinien im Feinststoffbereich ($< 0,25$ mm) untersucht. Den Anstoß hierzu gaben Untersuchungen von [Reschke 5]. Mittels Modellrechnungen wurde dort nachgewiesen, dass insbesondere die Befüllung von Hohlräumen zwischen den jeweils größeren Partikeln die Packungsdichte von Feinststoffen ansteigen lässt. Demzufolge sollte ein besonders großer Unterschied der mittleren Korngröße d_{50} (Tabelle 2, Abschnitt 6.1.3) zweier Feinststoffsieblinien zu einem besonders gutem Packungsergebnis erdfeuchter Betone führen. Auch das wurde nachfolgend untersucht.

Im ersten Untersuchungsschritt wurden Sieblinien der Feinststoffe rechnerisch ermittelt (Verteilungsmoduln $n = 0,01 - 0,35$ und $0,60$). Anschließend wurde durch Kombinationen der Quarzmehle FQ3, FQ12, FQ300 und FQ800 eine weitest mögliche Annäherung an die rechnerischen Verläufe angestrebt (Tabellen D1 – D7 und Bilder D1 – D3 in Anhang D).

Die Wirkung einer Feinststoffoptimierung im ersten Schritt nur an Gemischen ohne Bindemittel zu untersuchen, sollte einen Einfluss der Hydratation auf die Packungsdichteergebnisse ausschließen.

Im ersten Versuchsschritt wurden Mischungen mit gebrochener Körnung 2/16 untersucht (Mischungszusammensetzung Anhang D - Tabelle D5 – D7). Die Sieblinie der Gesteinskörnung wies in diesem ersten Untersuchungsschritt einen Verteilungsmodul von $n = 0,35$ auf. Der Feinststoffgehalt ($< 0,25$ mm) wurde mit rd. 400 kg/m^3 bewusst hoch gewählt. Treten durch die feinststoffliche Veränderung Verbesserungen hinsichtlich Wasseranspruch und Packungsdichte bzw. Luftporengehalt auf, so müsste sich dies bei hohen Feinststoffgehalten besonders deutlich zeigen. Die in Bild 58 dargestellten Rüttelproctorkurven der untersuchten Mischungen zeigen eine einheitliche Tendenz. Mit zunehmender Feinheit der Sieblinie (entspricht einem sinkenden n -Wert des Verteilungsmoduls) steigt die Packungsdichte und fällt der Wasseranspruch des Systems ab. Besonders ausgeprägt tritt dies zwischen den Feinststoffsieblinien mit den Verteilungsmoduln $n = 0,60$ und $n = 0,35$ zutage. Die sehr flachen Kurvenverläufe nach Überschreiten des optimalen Wassergehalts erklären sich durch ein Entwässern der Proben. Dies war bei inerten Quarzmehl“betonen“ besonders ausgeprägt (siehe hierzu auch Anhang D – Tabelle D2 – D7)

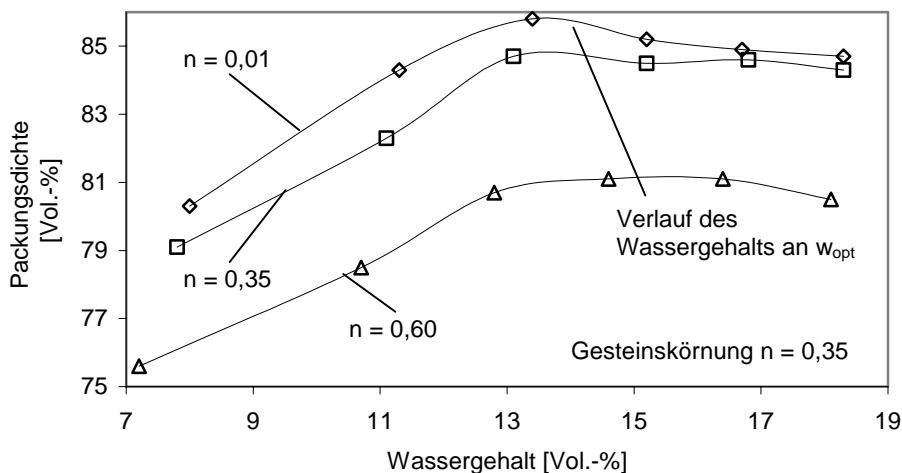


Bild 58: Auswirkung der feinststofflichen Optimierung auf die Packungsdichte und den Wasseranspruch (Gesteinskörnung 0/2r – 2/16g; Feinststoff: Feinuarze, Sieblinie der Gesteinskörnung $n = 0,35$)

Zur Verifizierung der Ergebnisse wurde die Versuchsreihe in gleicher Weise mit einer runden Gesteinskörnung 2/16 (0/2r – 2/16r - Sieblinienverlauf $n = 0,35$) wiederholt. Die volumetrische Mischungszusammensetzung wurde beibehalten. Durch die Verwendung runder Gesteinskörnung 2/16 stieg die Packungsdichte durch die leichtere Verdichtbarkeit erwartungsgemäß insgesamt leicht an. Die zunehmende Feinheit der Feinststoffe führt auch in diesem Fall zu einem Anstieg der Packungsdichte und sinkenden Wassergehalten (Darstellung in Anhang D – Bild D4 und Tabellen D2 – D4). Der ermittelte Zusammenhang deckt sich mit Erfahrungen von [Dinger und Funk 7; 67] aus theoretischen und praktischen Untersuchungen zur Optimierung von Kohlestaub suspensionen und Untersuchungen von [Lange 13; 14] an Betonen mit Feinstzement. Die optimale Kornzusammensetzung des Feinstkorns wurde dort jeweils bei einem Verteilungsmodul von $n = 0,37$ erreicht. Berücksichtigt man, dass Rüttelproctorergebnisse in Wiederholungsversuchen eine Abweichung von bis zu 0,7 Vol.-% aufwiesen (siehe Abschnitt 5.4), so kann der Aussage auch auf Basis der eigenen Ergebnisse zugestimmt werden. Ergänzend muss aber hinzugefügt werden, dass kleinere Verteilungsmodul des Feinststoffs nicht zwangsläufig zu deutlich schlechteren Ergebnissen führen müssen.

Neben der Ausbildung stetiger Kornzusammensetzungen, ist auch eine Optimierung der feinststofflichen Zusammensetzung durch die Bildung von Ausfallkörnungen denkbar. Nach theoretischen Berechnungen von [Reschke 5] ist dann mit besonders hohen Packungsdichten zu rechnen, je ausgeprägter sich die mittlere Korngröße d_{50} bzw. der Lageparameter x' der miteinander kombinierten Feinststoffkörnungen unterscheiden. Der optimale Anteil des feineren Stoffes am volumetrischen Gesamtfeinststoffgehalt wird mit rd. 30 Vol.-% angegeben. Um dies zu überprüfen, wurde in zwei Versuchsreihen ein Feinststoff mittlerer Feinheit (FQ300) und ein Feinststoff sehr hoher Feinheit (FQ800) in variierten Anteilen zu einem groben Quarzmehl (FQ3) gegeben. In Bild 59 sind jeweils nur die maximal erzielten Packungsdichten und die zugehörigen Wassergehalte aus Rüttelproctorer Untersuchungen dargestellt (Detailergebnisse und Mischungszusammensetzungen Anhang D – Tabellen D8 – D9). Es zeigte sich, dass die Zugabe des besonders feinen Füllstoffs FQ800 zu einer deutlich Steigerung der Packungsdichte und einer Abnahme des zugehörigen Wassergehaltes führte. Die zu Vergleichszwecken durchgeführte Versuchsreihe mit der Zugabe eines Quarzmehls mittlerer Feinheit (FQ300) erbrachte hingegen keine deutliche Steigerung der Packungsdichte und keine Senkung des Wassergehalts. Die von [Reschke 5] theoretisch hergeleitete Feststellung, dass nur Feinststoffe sehr hoher Feinheit zu einer nachhaltigen Steigerung der Packungsdichte des Feinststoffs beitragen können, bestätigt sich durch die Versuchsreihe. Das Optimum der Zugabemenge des feineren Stoffes

bewegt sich nach eigenen Untersuchungen im Bereich von 50 – 70 Vol.-% (Bild 59). In diesem Punkt unterscheiden sich die hier dargestellten Laborergebnisse von den theoretisch ermittelten von [Reschke 5]. Hintergrund hierfür könnte die Agglomerationsneigung des zugegebenen sehr feinen Feinststoffs FQ800 sein. Auf diesen Aspekt wird im weiteren Verlauf eingegangen.

Fasst man die Ergebnisse der ersten Versuchsreihen zusammen, so scheint in erster Linie der Anteil sehr feiner Stoffe für den Erfolg einer Packungsoptimierung verantwortlich zu sein. Mit zunehmender Packdichte nimmt aber zudem der für eine dichteste Packung optimale Wassergehalt der Proben ab. In Bild 58 und Bild D4 (Anhang D) wurde die Abnahme durch die Markierung der optimalen Wassergehalte angedeutet, in Bild 59 zeigt dies eine separate Kurve.

Die optimale Packungsdichte bzw. Trockenrohdichte stellt sich zumeist im Bereich knapp unterhalb der maximal möglichen Packungsdichte ($Sr(pk)$) ein. Ein abnehmender Wassergehalt ermöglicht so scheinbar erst die deutliche Zunahme der Packungsdichte. Ist eine optimale Verdichtung – z.B. durch eine Feinstkornoptimierung - mit weniger Wasser möglich, so kann der freiwerdende Raum durch Feststoff aufgefüllt werden, die Packungsdichte steigt an.

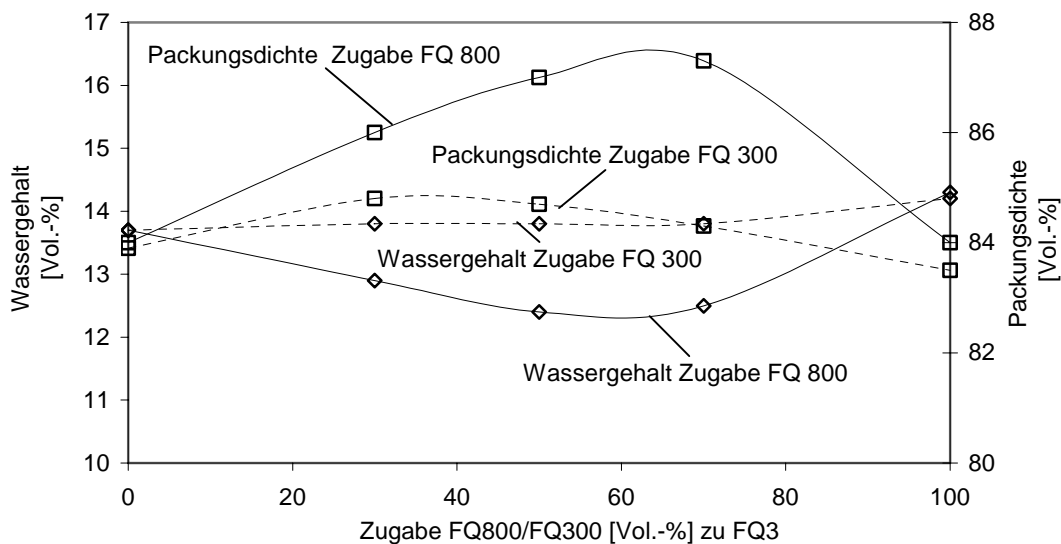


Bild 59: Wirkung von variierten Feinststoffzugabemengen (Feinstquarz) auf die Packungsdichte und den Wasseranspruch (Gesteinskörnung 0/2r – 2/16g, Sieblinie n = 0,35)

Die geschilderten Zusammenhänge führen zu der Frage nach den Wirkanteilen, die zu einer Packungsdichtesteigerung des erdfeuchten Betons führen. Wirkt eine Optimierung der feinststofflichen Zusammensetzung deshalb packungsdichtesteigernd, weil über eine

Verbesserung (Senkung) der Viskosität die Befüllung von Hohlräumen erleichtert wird, oder weil in Feinleimen geringer Viskosität der Feststoffgehalt höher ist, oder ist eine Interaktion mit der Gesteinskörnung $> 0,25$ mm gegeben und wird durch den höheren Anteil sehr feiner Partikel die Hohlraumgängigkeit des Feinleims erhöht und kann der Hohlraum innerhalb der Gesteinskörnung so leichter befüllt werden? Diese Fragen stellt Bild 60 dar.

Will man die Frage klären, so gilt es zunächst zu berücksichtigen, dass der volumetrische Feinstoffgehalt in üblichen erdfeuchten Betonen nur rd. $100 - 130 \text{ l/m}^3$ beträgt, in dem hier dargestellten Fall 170 l/m^3 . Es ist offensichtlich, dass dieser geringe Anteil am Gesamtvolumen des Betons die im Rüttelproctorversuch gemessene Packungsdichte des Betons nur wenig beeinflussen kann. Folgt man den Ausführungen von [Krell 3] und [Reschke 5], so beträgt der Hohlraum eines Zementes rd. 40 Vol.-%. Daraus folgt, dass bei einem volumetrischen Zementgehalt von 100 l/m^3 der Hohlraumgehalt im Feinstoff rd. 70 l/m^3 beträgt. Durch gezielte Optimierung des Hohlraumgehalts des Partikelgemisches kann nach [Reschke 5] der Hohlraumgehalt im Feinstoff realistischweise um rd. 15% reduziert werden. So ergibt sich eine Abnahme der Gesamtporosität des Beton um maximal nur rd. 9 l/m^3 (0,9 Vol.-%). Ein geringer Wert.

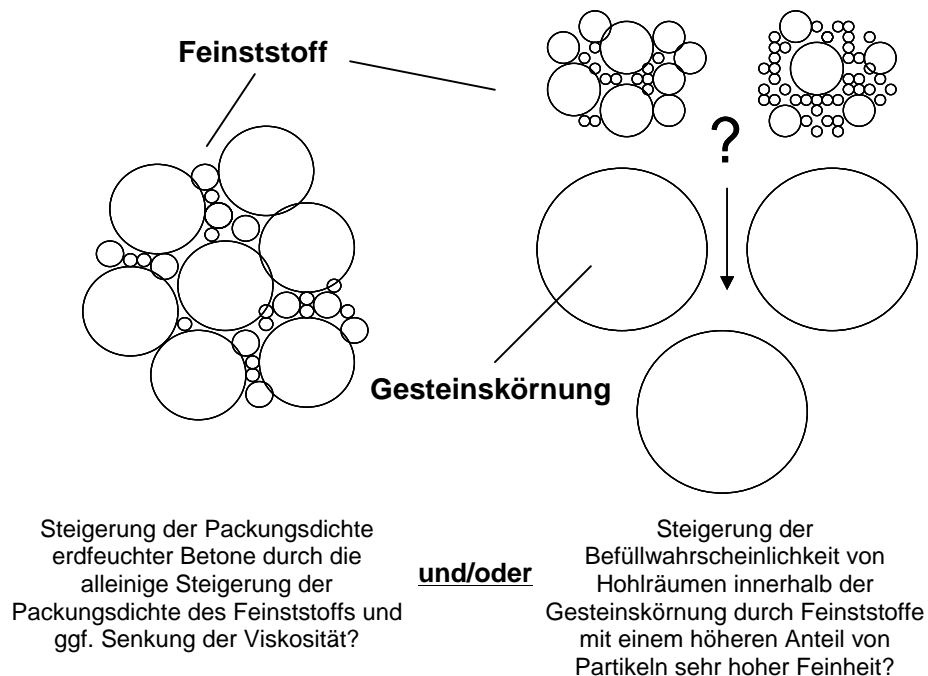


Bild 60: Mögliche Ursachen für den Anstieg der Packungsdichte infolge einer optimierten feinststofflichen Zusammensetzung

Um den Einfluss der Viskosität des Feinleims zu prüfen, wurden im nächsten Schritt rheologische Untersuchungen an Feinquarzgemischen durchgeführt. Ausfallkörnungen des Feinquarzes FQ3 und den Feinquarzen FQ300 und FQ800 wurden gebildet (Anhang D – Bild D5). Die Zusammensetzung des Feinststoffs entspricht den in Rüttelproctorversuchen untersuchten Gemischen (Bild 59). Eine feinststoffliche Optimierung soll nach [Dinger und Funk 7, 67] zu einer Verringerung der Viskosität beitragen. Der w/f-Wert von 0,29 in allen rheologischen Versuchsreihen entspricht dem der in Bild 59 dargestellten Quarz“betone“. Um eine für rheometrische Messungen ausreichende Fließfähigkeit des Wasser-/Feinstquarzgemisches zu erzeugen, musste eine große Menge an Fließmittel zugegeben werden (7 M.-% FM 1254 der Fa. Woermann). Die hohe Dosierung war aufgrund der geringen Wirksamkeit des Fließmittels in Kombination mit Quarzmehlen notwendig. Es zeigte sich, dass sich bei einer Zugabemenge von rd. 20 - 25 Vol.-% sowohl des Feinquarzmehls FQ300 als auch FQ800 ein Optimum der Fließfähigkeit einstellte (Anhang D – Bild D5). Diese Ergebnisse decken sich in etwa mit den Aussagen von [Reschke 5] bezüglich der optimalen Zugabemenge eines Feinststoffs zu einem Stoff geringerer Feinheit. Im Gegensatz dazu bewirkte die Zugabe von FQ300 in der Rüttelproctoruntersuchung (Bild 59) keine Verbesserung der Packungsdichte. Anders verhielt es sich dagegen bei der Zugabe des Feinquarzes FQ800, obwohl die Viskositäten der suspendierten Stoffe annähernd gleich waren (Anhang D – Bild 5). Dies kann als Indiz dafür gewertet werden, dass die Steigerung der Fließfähigkeit des Feinleims nicht zur Steigerung der Packungsdichte beiträgt. Die positivere Wirkung des feineren Materials FQ800 deutet darauf hin, dass eine feinststoffliche Optimierung in erster Linie über den vereinfachten Zugang sehr feiner Partikel zu Hohlräumen wirkt.

Um diese Vermutung weiter zu erhärten, wurde neben der feinststofflichen Sieblinie auch die der Gesteinskörnung verändert (Bilder 61 und 62). Anders als in den vorangegangenen Versuchen wird hierbei aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Darstellung der Proctorkurve verzichtet. Anstelle dessen werden nur die optimalen Packungsdichten und die zugeordneten optimalen Wassergehalte dargestellt. Zwei unabhängige Versuchsreihen wurden durchgeführt, einmal mit runder und einmal mit gebrochener Gesteinskörnung 2/16. Unterschiedliche Kornzusammensetzungen des Feinststoffs $< 0,25$ mm (Verteilungsmodule $n = 0,60$; $n = 0,35$ und $n = 0,01$) und der Gesteinskörnung $> 0,25$ mm (Verteilungsmodule $n = 0,70$; $n = 0,35$ und $n = 0,01$) miteinander kombiniert. In den Bildern 61 und 62 sind die maximal erzielte Packungsdichte und der jeweils zugeordnete Wassergehalt aus Rüttelproctorversuchen eingetragen worden (Detailwerte sind den Tabellen D10 – D11 im Anhang D zu entnehmen). Es zeigten sich in allen Versuchsreihen die gleichen, schon zuvor

beschriebenen Tendenzen. Mit zunehmender Feinheit der Feinststoffe (F) steigt die Packungsdichte des Gesamtgemisches unabhängig von der Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung (G) an. Sandreiche Gesteinskörnungen (G) (Verteilungsmodul $n = 0,01$) zeigen dabei generell eine deutlich geringere Packungsdichte als sandärmere (Verteilungsmodul $n = 0,35 - 0,70$). Fragt man nach den Hintergründen, so geben Untersuchungen von [Hummel 66] an Gesteinskörnungen mit hohem Sandanteil einen Hinweis (Bild 20). Demnach lässt eine Erhöhung des Anteils hohlraumreichen Sandes die Porosität im Tragkorngerüst insgesamt ansteigen. Kombiniert man solche sandreiche Gesteinskörnungen mit Feinststoffen, die einen geringen Anteil sehr feiner Partikel aufweisen, so steigt hier der Wasseranspruch besonders stark an, die Packdichte fällt ab (Bild 61 und 62, Verteilungsmodul der Gesteinskörnung (G) = 0,01 und des Feinststoffs (F) = 0,60). Dies ist das dritte Indiz dafür, dass nicht nur die Menge an Hohlraum innerhalb der Gesteinskörnung, sondern auch die Befüllbarkeit des Hohlrums den Wasseranspruch des Gemischs steuert. Gemische mit geringerem Sandgehalt (Verteilungsmodul Gesteinskörnung (G) $n = 0,70$) und somit guter Befüllbarkeit benötigen hingegen geringere Wassergehalte und können scheinbar auch mit grobkörnigen Feinststoffen (Verteilungsmodul Feinststoff (F) = 0,60) hohe Packungsdichten erzielen (Bilder 61 und 62). Auffällig ist auch, dass sandreichere Gemische (Verteilungsmodul Gesteinskörnung (G) = 0,01 – 0,35) durch Zugabe von Feinststoffen (Verteilungsmodul Feinststoff (F) = 0,01 – 0,35) deutlichere Packungsdichtezugewinne verzeichnen. Für die Praxis bedeutet dies, dass bei Verwendung sandreicherer Gesteinskörnungen, z.B. aus optischen Überlegungen, die Optimierung der feinststofflichen Zusammensetzung zu einer besonders nachhaltigen Reduzierung des Wasseranspruchs und Steigerung der Packungsdichte beitragen kann.

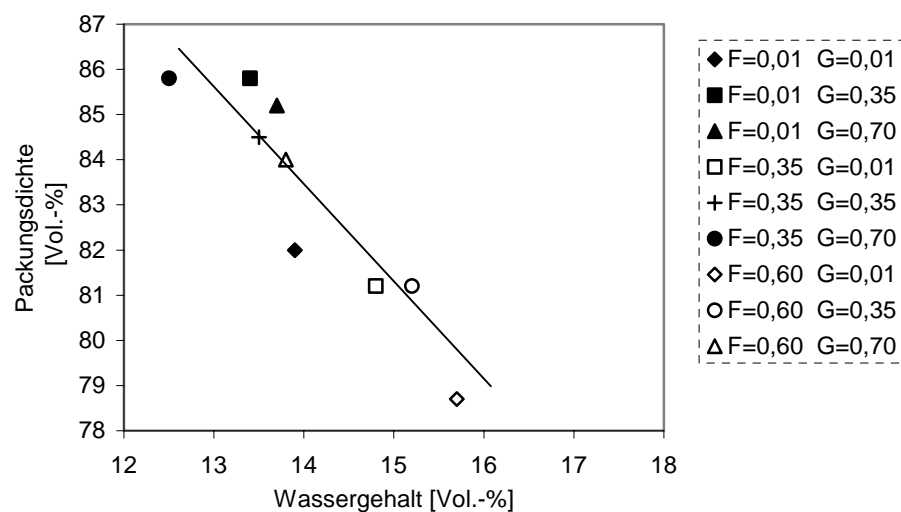


Bild 61: Variation der Sieblinien der Gesteinskörnung und des Feinststoffs (Gesteinskörnung $0/2r - 2/16g$; Feinststoff: Feinstquarz – Detail siehe Anhang D – Tabelle D11)

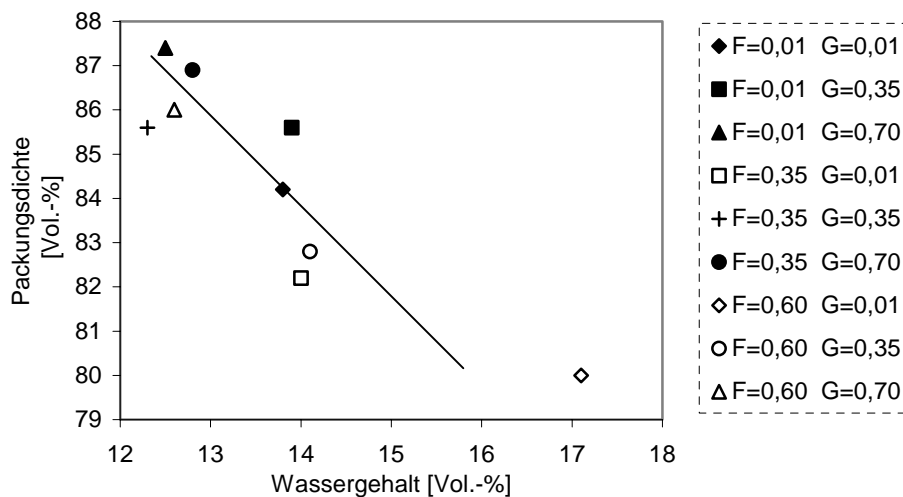


Bild 62: Variation der Sieblinien der Gesteinskörnung und des Feinststoffs (Gesteinskörnung 0/2r – 2/16r; Feinststoff: Feinstquarz – Details siehe Anhang D – Tabelle D10)

6.6.2 Übertragung der Erkenntnisse auf zementgebundene Systeme

Vor der Übertragung der Optimierungsmöglichkeiten auf zementgebundene Systeme stellt sich die Frage, wie sinnvoll der Einsatz eines leistungsfähigen Fließmittels auf Polycarboxylatetherbasis in erdfeuchten Betonen ist. Hierzu wurden an Feinleimen Untersuchungen des Wasserrückhaltevermögens nach [Okamura 71] und des Wasseranspruch nach [Puntke 72] durchgeführt. Das Wasserrückhaltevermögen beschreibt den Wassergehalt des Systems im agglomerierten, der Wasseranspruch den im deagglomerierten, vollständig verdichteten Zustand. Gibt man Fließmittel zu den Stoffen, so ist die Veränderung des Wasserrückhaltevermögens nach Okamura ein Indikator für die Wirksamkeit eines Fließmittels den Stoff zu deagglomerieren. Die in Bild 63 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass Zemente nicht nur das höchste Wasserrückhaltevermögen aufweisen, sondern auch besonders stark auf Fließmittel ansprechen. Das Wasserrückhaltevermögen nach Okamura entsprach nach der Zugabe von 2 M.-% Fließmittel (bezogen auf das Feinststoffgewicht) dem Wasseranspruch nach Puntke. Das Fließmittel war somit in der Lage, den Stoff quasi vollständig zu deagglomerieren. Die übrigen Stoffe sprachen geringer auf das Fließmittel an, zeigten aber auch eine deutlich geringere Agglomeration. Der Einsatz von Fließmittel in zementgebundenen Systemen ist somit sinnvoll und kann die Wirkung einer feinststofflichen Optimierung fördern.

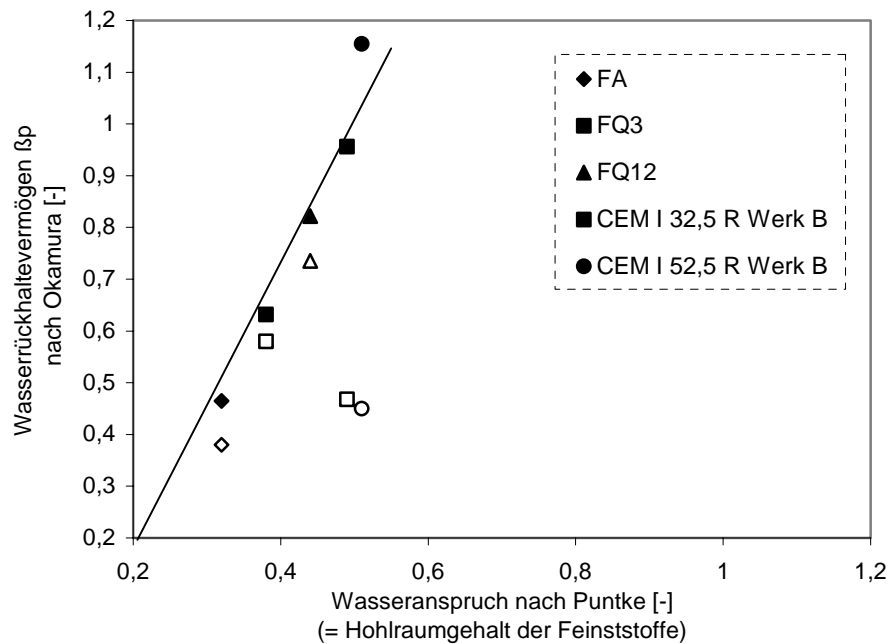


Bild 63: Ausgewählte Okamura- und Punkte-Werte der untersuchten Zemente und Zusatzstoffe (offene Symbole = mit Fließmittelzugabe (2 M.-% v. Feinststoff FM 1254 der Fa. Woermann))

6.6.2.1 Materialien und Sieblinien der Gesteinskörnungen und Feinststoffe

Die dargestellten Ergebnisse zeigten, dass Sieblinien von Gesteinskörnungen mit höherem Sandanteil und niedrigem Feinststoffanteil des Sandes stärker auf eine feinststoffliche Optimierung reagieren. Dies führte zur Auswahl einer Sieblinie B16 (Verteilungsmodul $n = 0,22$) mit rundkörnigem Sand 0/2 und gebrochener Körnung 2/16. Außerdem zeigten Vorversuche, dass sandreichere Gemische gegenüber A16 und A/B16 Sieblinien ein durchgängig besseres optisches Erscheinungsbild der Probekörper (Pflastersteine) lieferten. Diese zeichneten sich durch glattere und geschlosseneren Seitenwandungen aus.

Auch der Einfluss der Kornzusammensetzung und der Kornform des Feinststoffs sollte im Rahmen der nachfolgenden Versuche Berücksichtigung finden. Die Untersuchung des Einflusses der Kornform erfolgte durch die Verwendung einer sehr kugeligen Flugasche (Typ FA) in Kombination mit dem Zement CEM I 32,5 R des Werks B (Anhang D – Tabelle D17 und Bilder D7 und D8). Um den Einfluss der Kornzusammensetzung des Feinststoffs zu untersuchen, wurden stetige und Ausfall- Körnungen entworfen (Anhang D – Tabellen D19 -

D23 und Bilder D9 - D11). Die angestrebte Ausfallsieblinie des Feinststoffs wurde durch die Zugabe größerer Mengen der sehr feinen Stoffe KSM BG und FQ800 erzeugt. Für die stetige Sieblinie des Feinststoffs wurde ein Sieblinienverlauf mit dem Verteilungsmodul $n = 0,35$ angestrebt. Hintergrund war der in den zuvor diskutierten Vorversuchen festgestellte positive Effekt auf den Wasseranspruch erdfeuchter Gemische. Zusätzlich sollen Packungsdichteeffekte die Festigkeit und Dichtigkeit des Zementsteins erhöhen. Die Autoren [Dinger und Funk 7, 67; Lange 13, 14] gaben in ihren Untersuchungen an, dass sich bei einem Verteilungsmodul von $n = \text{rd. } 0,37$ die höchste Dichte und Festigkeit des Zementsteins einstellen sollte. Dieser mögliche positive Einfluss wird im Rahmen der Festbetonuntersuchungen mittels Quecksilberdruckporosimetrie untersucht und nochmals diskutiert werden.

6.6.2.2 Wirkung von Fließmittel und feinststofflicher Optimierung auf die Packungsdichte und den Wasseranspruch erdfeuchter Betongemische

In den Bildern 64 – 66 sind die Ergebnisse der Betonoptimierung durch die Zugabe eines leistungsfähigen Fließmittels auf Polycarboxylatbasis (FM 1254) und durch feinststoffliche Optimierung durch die Zugabe von Flugasche (Bild 64) und einer verbesserten Feinststoffsieblinie (Bild 65) dargestellt. Ausgangsmischung war ein Beton mit 325 kg/m^3 CEM I 32,5 R des Werks B (Details Anhang D – Tabellen D13 – D15). Durch die Zugabe von Fließmittel kommt es zu einem leichten Anstieg der Packungsdichte, durch die Zugabe des Fließmittels sank aber auch der Wassergehalt von rd. 11 Vol.-% auf rd. 8 Vol.-%. Das Fließmittel ist somit in der Lage den zum Erreichen der optimalen Packungsdichte notwendigen Wassergehalt zu senken, ohne zu einer deutlichen Steigerung der Packungsdichte beitragen zu können. Erst durch die Zugabe kugeligter Flugasche (Bild 64) oder eines kornoptimierten Feinststoffs (Bild 65 - Verteilungsmodul $n = 0,35$) in Kombination mit Fließmittel kommt es zu einem deutlichen Anstieg der Packungsdichte (Weitere Details siehe Anhang D – Bilder D7 und D8 bzw. Bild D11 – Tabellen D17 und D18 bzw. Tabellen D22 und D23). Dieses Verhalten der Betonmischungen entspricht den durch Untersuchungen an Quarzmehl“betonen“ gewonnenen Erkenntnissen in Abschnitt 6.6.1, dass nur gut korngestufte Feinststoffe zu einer deutlich wahrnehmbaren Steigerung der Packungsdichte beitragen können. Aufgrund der in Bild 64 dargestellten Ergebnisse kann ergänzt werden, dass eine kugelige Kornform ebenfalls zu einer deutlichen Zunahme der Packungsdichte beitragen kann, obwohl die Sieblinie des Feinststoffs nicht mit der angestrebten Idealsieblinie (Verteilungsmodul $n = 0,35$) übereinstimmt.

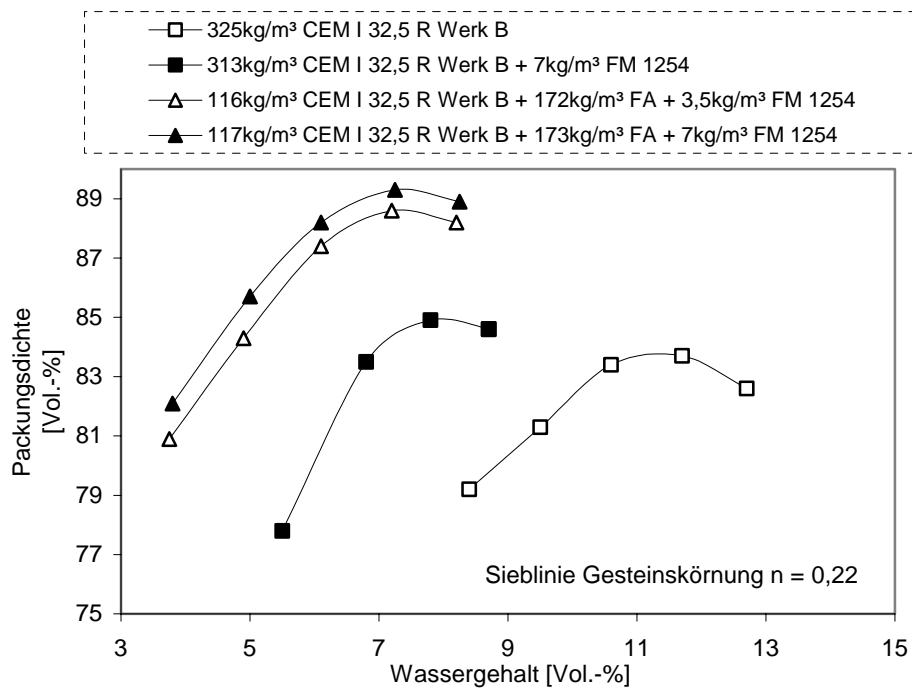


Bild 64: Die Wirkung von Fließmittel und Flugasche in erdfeuchtem Beton (Gesteinskörnung B16 – 0/2r – 2/16g; Details Anhang D – Tabellen D13 – D15 und D17 – D18, Bilder D7 – D8)

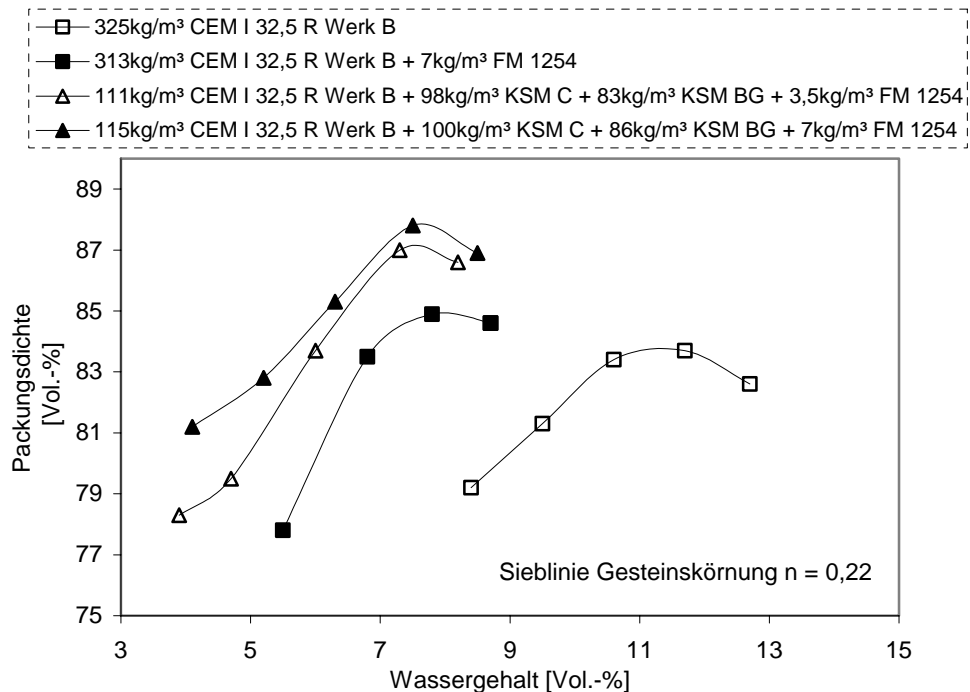


Bild 65: Die Wirkung von optimierten Sieblinien ($n = 0,35$) des Feinststoffs (Kalksteinmehl) und Fließmittel in erdfeuchtem Beton (Gesteinskörnung B16 – 0/2r – 2/16g; Details Anhang D – Tabellen D13 – D15 und D22 – D23, Bild D11)

Feinststoffliche Ausfallsieblinien wurden durch die Zugabe großer Mengen des Kalksteinmehls KSM BG und des Feinquarzes FQ800 erzeugt (Bild 66). Die Zugabemengen schwankten zwischen 185 – 196 kg/m³. Es zeigten sich die gleichen Tendenzen, wie sie schon bei der Beschreibung der Bilder 64 und 65 dargestellt wurden. Durch die hohe Feinheit der verwendeten Feinststoffe, zeigte die Steigerung der Fließmittelzugabe von 3,5 auf 7,0 kg/m³ in diesem Fall eine deutlichere Wirkung, als es in Bild 64 und 65 der Fall war. Die große Feinheit des Kalksteinmehls KSM BG (Blainewert rd. 22.000 cm²/g – siehe Tabelle 2, Abschnitt 6.1.3) erforderte eine größere Fließmittelzugabemenge, um eine ausreichende Dispergierung zu gewährleisten.

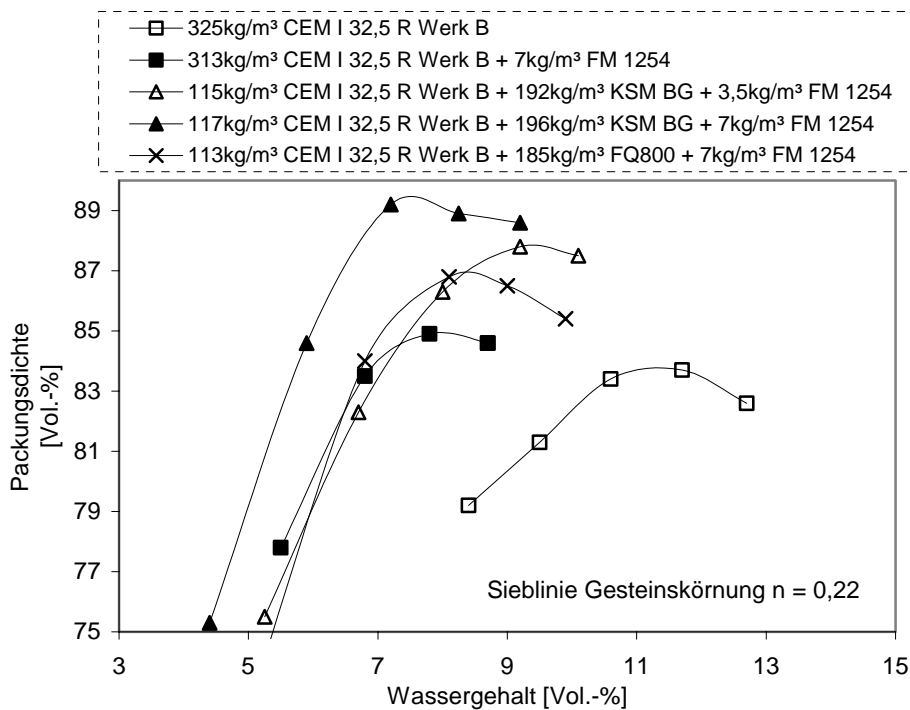


Bild 66: Wirkung von Ausfallsieblinien des Feinststoffs (Feinstquarz FQ800 und Kalksteinmehl KSM BG) und Fließmittel in erdfeuchtem Beton (Gesteinskörnung B16 – 0/2r – 2/16g; Details Anhang D – Tabellen D13 – D15 und D19 – D21, Bilder D9 – D10)

6.6.2.3 Wirkung von Fließmittel und feinststofflicher Optimierung auf Gründruckfestigkeit und Robustheit erdfeuchter Betongemische

Am Beispiel des Dreistoffsystems – der einfachsten Form des erdfeuchten Betons – aus Zement, Wasser und Gesteinskörnung wurden in Abschnitt 6.4 und 6.5 grundlegende Zusammenhänge für erdfeuchte Betone dargestellt. Hierzu zählten die Überlagerung von

optimaler Gründruck- und 28-Tage-Druckfestigkeit im Bereich der optimalen Packungsdichte aber auch die Möglichkeit die Gründruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Packungsdichte und dem w/f-Wert abschätzen und vorherbestimmen zu können. Es bleibt zu prüfen, ob diese Zusammenhänge auch auf das Fünfstoffsystem aus Zement, Gesteinskörnung, Zusatzstoff, Fließmittel und Wasser übertragbar sind.

In einem ersten Schritt wurde der Einfluss eines Fließmittels (FM 1254) in zwei unterschiedlichen Dosierungen auf die Gründruckfestigkeit geprüft (Bild 67). Wie zuvor geschildert, führte die Zugabe eines leistungsstarken Fließmittels zu einem deutlichen Rückgang des für eine optimale Packungsdichte und Gründruckfestigkeit erforderlichen Wassergehalts. Dies ging mit einem leichten Anstieg der Packungsdichte einher. In Abschnitt 6.4.2 zeigt Bild 51 den dreidimensionalen Zusammenhang von w/f-Wert, Packungsdichte und Gründruckfestigkeit. Nach diesem Modell müsste der erdfeuchte Beton mit einer Fließmittelzugabe von 7 kg/m^3 in Bild 67 eine höhere Gründruckfestigkeit aufweisen, weil sein Wassergehalt um rd. 20% unter dem des erdfeuchten Betons mit nur $3,5 \text{ kg/m}^3$ Fließmittelzugabe liegt. Dies müsste nach den in Abschnitt 6.4 diskutierten und in Bild 51 dargestellten Wirkmechanismen zu einer Steigerung der inneren Reibung und Verzahnung, aber auch der adhäsiven Kräfte im erdfeuchten Beton führen. Das Wirkprinzip der Fließmittel, Abstoßungsreaktionen zwischen den durch Verzahnung und Adhäsionskräften (Abschnitt 6.3.2) zur Tragfähigkeit beitragenden Feinstpartikeln hervorzurufen, scheint dem abträglich zu sein und führt in Folge bei zunehmender Dosierung zu keiner weiteren Zunahme der Gründruckfestigkeit.

Abgesehen von der Festigkeit sind die Verläufe der Gründruckfestigkeits- und Packungsdichteentwicklung von Interesse (Bild 67). Es ist auffällig, dass mit abnehmendem Wassergehalt und zunehmender Packungsdichte die Kurvenverläufe auf der trockenen Seite der Rüttelproctor- und Gründruckfestigkeitskurve steiler werden. Berücksichtigt man die in Anhang D in den Tabellen D13 – D15 dargestellten erdfeuchten Betone, so weist der Beton mit 7 kg/m^3 Fließmittelgehalt zu Beginn des Rüttelproctorversuchs einen w/z-Wert von nur 0,19 auf. Die schlechte Verarbeitbarkeit wird dadurch verständlich. Durch die Wirkung des Fließmittels setzt dann bei zunehmendem Wassergehalt eine sehr schnelle Zunahme der Verdichtungswilligkeit ein. Dieses Verhalten ist auch von üblichen Konsistenzbetonen und von selbstverdichtenden Betonen bekannt. Die höchste Packungsdichte und Gründruckfestigkeit sind nur innerhalb eines verhältnismäßig schmalen Korridors bezüglich des Wassergehalts zu erreichen. Da bedeutet, dass die Betone empfindlich auf gewollte und ungewollte Änderungen des Wassergehalts reagieren.

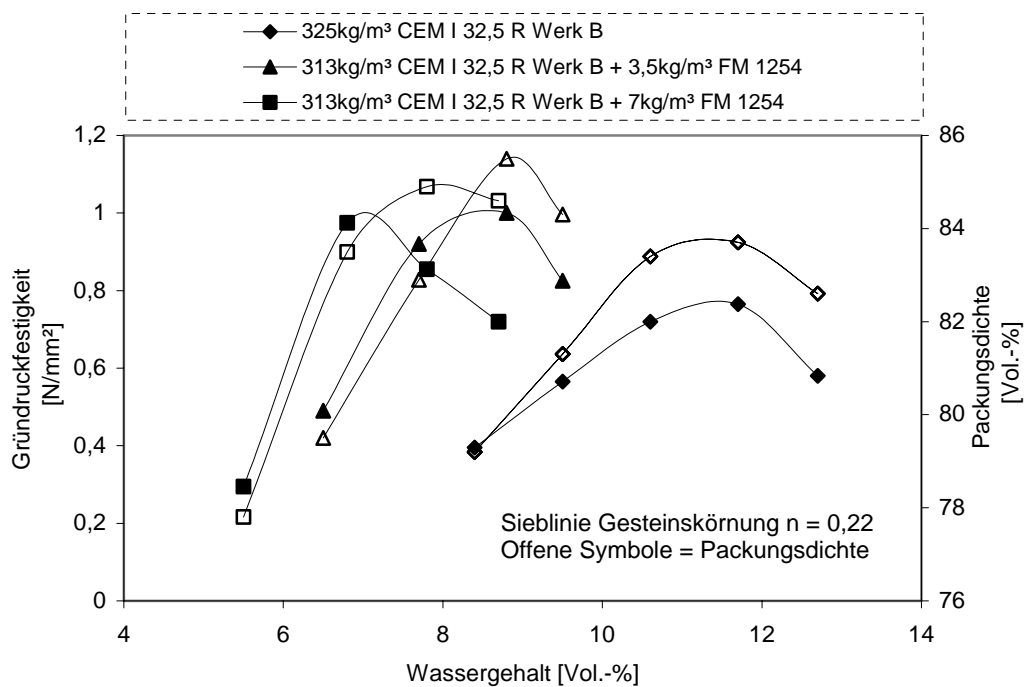


Bild 67: Verschiebung der Punkte von optimaler Packungsdichte und optimaler Grundstandfestigkeit durch die Zugabe von Fließmittel (Gesteinskörnung B16 – 0/2r – 2/16g; Details Anhang D – Tabelle D13 – D15)

Auffällig ist auch der Unterschied zwischen den optimalen Wassergehalten für die höchste Packungsdichte und Grunddruckfestigkeit. Die optimale Grunddruckfestigkeit tritt bereits vor Erreichen der optimalen Packungsdichte ein.

Diese Effekte verstärken sich, wenn der Fließmittelgehalt hoch und gleichzeitig auch der Gehalte an sehr feinen Feinststoffen erhöht wird (Bild 68). Steigert man den Wassergehalt, so kommt es in Verbindung mit einer hohen Fließmittelmenge zu einer schlagartigen Verflüssigung unter Vibrationseinfluss. Dies ist ein Effekt, der auch bei selbstverdichtenden Betonen beobachtet werden kann. [Schmidt 57] zeigte dies durch Versuche mit selbstverdichtenden Betonen mit einem hohen Gehalt eines Stoffes sehr hoher Feinheit (FQ800). So zusammengesetzte selbstverdichtende Betone sind bei nur geringfügig zu geringem Wassergehalt plastisch, bei weiterer Wasserzugabe verflüssigen sie sich plötzlich und stark.

Die in Bild 68 zu beobachtende starke Abnahme der Tragfähigkeit nach Überschreiten der optimalen Grüntragfähigkeit kann mit geotechnischen Ansätzen gedeutet werden. Nimmt man das Konsolidationsmodell nach [Terzaghi 61] zur Hilfe, so kann die zunehmende Empfindlichkeit des Gemisches durch die starke Abnahme der mittleren Korngröße des

Feinststoffs erklärt werden. Die Gemische in Bild 67 und 68 weisen in etwa gleiche Feinststoffgehalte auf. Der Zement CEM I 32,5 R des Werks B besitzt nach Tabelle 2 einen mittleren Korndurchmesser von rd. 18 µm. Der in Bild 68 dargestellte erdfeuchte Beton wurde durch die Zugabe von 196 kg/m³ (Volumetrischer Anteil im Feinststoff = 66 Vol.-%) des sehr feinen Kalksteinmehls KSM BG, mit einem mittleren Korndurchmesser von nur rd. 2,3 µm, modifiziert. Vergleicht man auf Basis der Formel von [Jáky 29] (Gleichung 8 – Abschnitt 4.3.2) die Durchlässigkeit des Feinststoffs, so ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\left(\frac{100 \cdot (1,00 \cdot 18\mu\text{m})}{100 \cdot (0,34 \cdot 18\mu\text{m} + 0,66 \cdot 2,3\mu\text{m})} \right)^2 = \text{rd.} 5,5 \quad (\text{Rechnung 10})$$

Die Durchlässigkeit nimmt nach dieser abschätzenden Berechnung um den Faktor 5,5 ab. Die Konsolidationszeit, d.h. die Zeit die das System unter einer von außen einwirkenden Belastung benötigt, um den Porenwasserüberdruck abzubauen, muss dann nach Gleichung 7 (Abschnitt 4.3.2) um den Zeitfaktor 5,5 zunehmen. Dies kann als Erklärung dafür dienen, warum in sehr feinststoffreichen erdfeuchten Systemen die Gründruckfestigkeit so abrupt abnimmt.

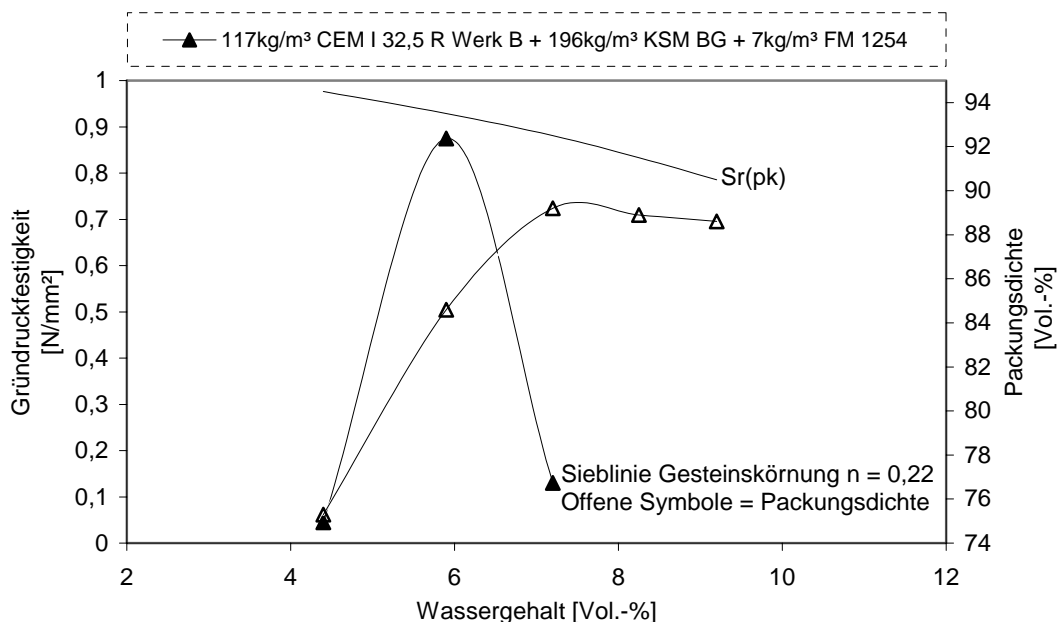


Bild 68: Empfindlichkeit eines erdfeuchten Betons gegen Wassergehaltsschwankungen durch die Zugabe von Fließmitteln und die Verwendung von Füllstoffen sehr hoher Feinheit (Kalksteinmehl KSM BG; Gesteinskörnung B16 – 0/2r – 2/16g; Details Anhang D – Tabelle D21)

Um in optimierten Betonen die Empfindlichkeit und die Verschiebung zwischen dem zur Erzielung der optimalen Packungsdichte und Grüntragfähigkeit notwendigen Wassergehalt zu begrenzen, ergeben sich aus diesen Feststellungen zwei Lösungsansätze. Einerseits sollte die Fließmittelmenge auf das minimal notwendige Maß reduziert und andererseits der Gehalt an sehr feinen Stoffen begrenzt werden. In Bild 69 sind die Verläufe von Gründruckfestigkeit und Packungsdichte solch modifizierter Systeme eingezeichnet. Die Empfindlichkeit konnte so begrenzt und die Kurvenläufe der Packungsdichte und der Gründruckfestigkeit wieder stärker angenähert werden. Erreicht wurde dies durch zwei Maßnahmen:

- die Ausbildung einer stetigen Kornzusammensetzung mit einem Verteilungsmodul n von 0,35 des Feinststoffs (Zugabe der Kalksteinmehle KSM C und KSM BG). Diese Zusammensetzung garantiert hohe Packungsdichten und gleichzeitig eine Begrenzung des Gehalts an sehr feinen Füllstoffen. Sowohl die Empfindlichkeit als auch der Fließmittelbedarf konnte so begrenzt werden.
- Verwendung einer Flugasche (Typ FA) mit hohen Anteilen glasig/kugeliger Bestandteile. Auch dies förderte die Packungsdichte und begrenzte den Fließmittelanspruch.

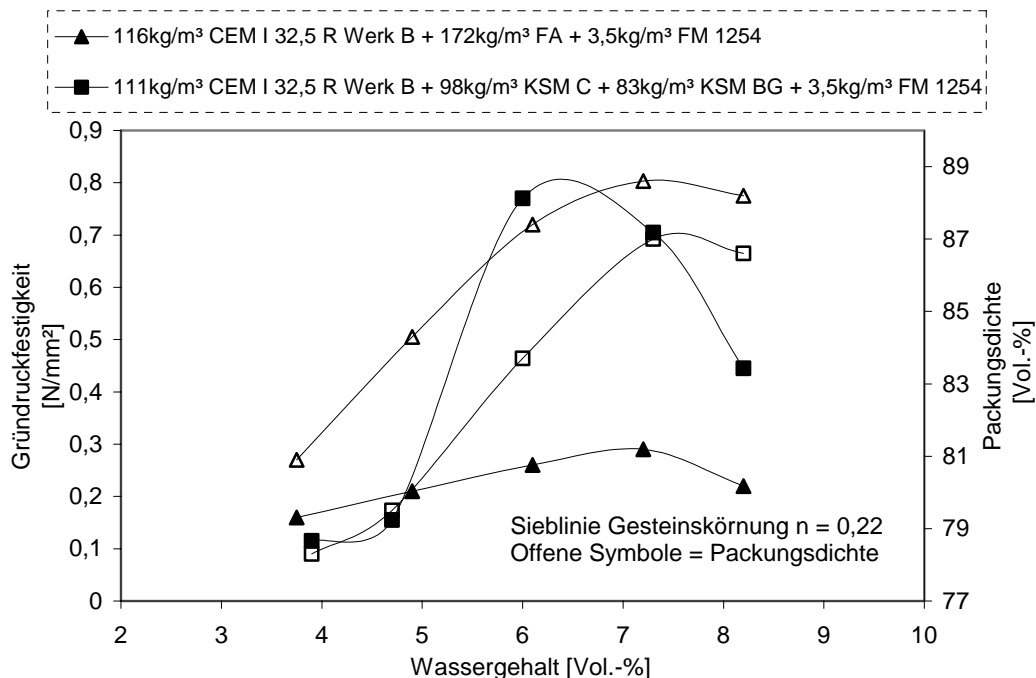


Bild 69: Begrenzung der Empfindlichkeit optimierter erdfeuchter Betone durch die Begrenzung der Feinheit der Zusatzstoffe und der Fließmittelmenge (Gesteinskörnung B16 – 0/2r – 2/16g - Details Anhang D – Tabellen D17 und D22)

6.6.2.4 Anwendung des dreidimensionalen Zusammenhangs zwischen Packungsdichte, w/f-Wert und Gründruckfestigkeit auf modifizierte erdfeuchte Betone

Um die Anwendbarkeit des unter Punkt 6.4.2 hergeleiteten dreidimensionalen Zusammenhangs zwischen w/f-Wert, Packungsdichte und Gründruckfestigkeit auf Systeme zu untersuchen, die aus mehr als drei Grundstoffen bestehen, wurden die maximalen Gründruckfestigkeiten von Betonen, die mit Zusatzstoffen (Kalksteinmehl KSM C) oder Fließmittel (FM 1254) modifiziert worden waren, in das System eingetragen (Bild 70). Die dargestellten Graden entsprechen den Verläufen der Regressionsgraden in Bild 49. Es zeigte sich, dass die Modifikation eines erdfeuchten Betons mit gebrochenkörnigen Zusatzstoff (Kalksteinmehl KSM C, w/f-Wert = 0,30) sich gut in den dreidimensionalen Zusammenhang einfügt (Detailwerte Anhang D – Tabelle D16). Es zeigte sich wieder, dass die Gründruckfestigkeit besonders durch die Kornform geprägt wird. Die Ergebnisse aus Versuchen mit Flugaschen in Abschnitt 6.3.2 (Bild 45) deuteten diesen Sachverhalt bereits an. Gibt man Fließmittel zu erdfeuchten Betonen, so wandelt sich das Bild. Die in Bild 70 eingetragenen Betone mit 3,5 und 7,0 kg/m³ Zugabe des Fließmittels FM 1254 belegen dies (Detailwerte Anhang D – Tabelle D13 – D15). Die w/f-Werte der Mischungen liegen zwischen 0,25 und 0,28. Eine deutliche Zunahme der Grüntragfähigkeit wäre aufgrund der geringen Wassergehalte zu erwarten gewesen. Dies war nicht der Fall, wie die Ergebnisse zeigen. Die Gründruckfestigkeit war nicht höher als bei dem ebenfalls dargestellten gleichen Beton ohne Fließmittel mit einem w/f-Wert von 0,36.

Will man die geringe Zunahme der Gründruckfestigkeit erklären, so kann einerseits auf die Wirkungsweise von Fließmitteln verwiesen werden. Hochdosiert können die durch sie ausgelösten Abstoßungseffekte auf den Partikeloberflächen zu einer geringeren Festigkeitssteigerung beitragen, als es die Senkung des w/f-Werts vermuten lässt. Andererseits muss man sich in diesem Zusammenhang wieder daran erinnern, dass bei üblichen erdfeuchten Betonen der w/f-Wert über den Feinststoff- bzw. Feinleimgehalt gesteuert wird (Bild 36 – Abschnitt 6.2). Niedrige w/f-Werte erfordern ohne die Zugabe von Fließmitteln normalerweise hohe Feinststoffgehalte. Die Menge des Feinststoffs steuert in erdfeuchten Betonen über die Steigerung der Gefügehomoogenität und der Anzahl der Kornberührungspunkte die innere Reibung, Verzahnung und auch die Wirkung von interpartikulären Adhäsionskräften. Deshalb kann die Verwendung von Fließmitteln zur Steuerung des Wassergehalts erdfeuchter Betone zu keiner so bedeutenden Tragfähigkeitssteigerungen beitragen, wie dies durch die Erhöhung des Feinststoffgehalts allein der Fall wäre. Für erdfeuchte Betone, die sowohl durch Fließmittel als auch durch Zusatzstoffe modifiziert wurden, ist die Prognose der Gründruckfestigkeit deshalb aufgrund

der jetzigen Datenbasis noch nicht ausreichend sicher möglich. Zu vielfältig sind die Einflüsse aus Kornform, Feinheit des Feinststoffs und Fließmittelwirkung.

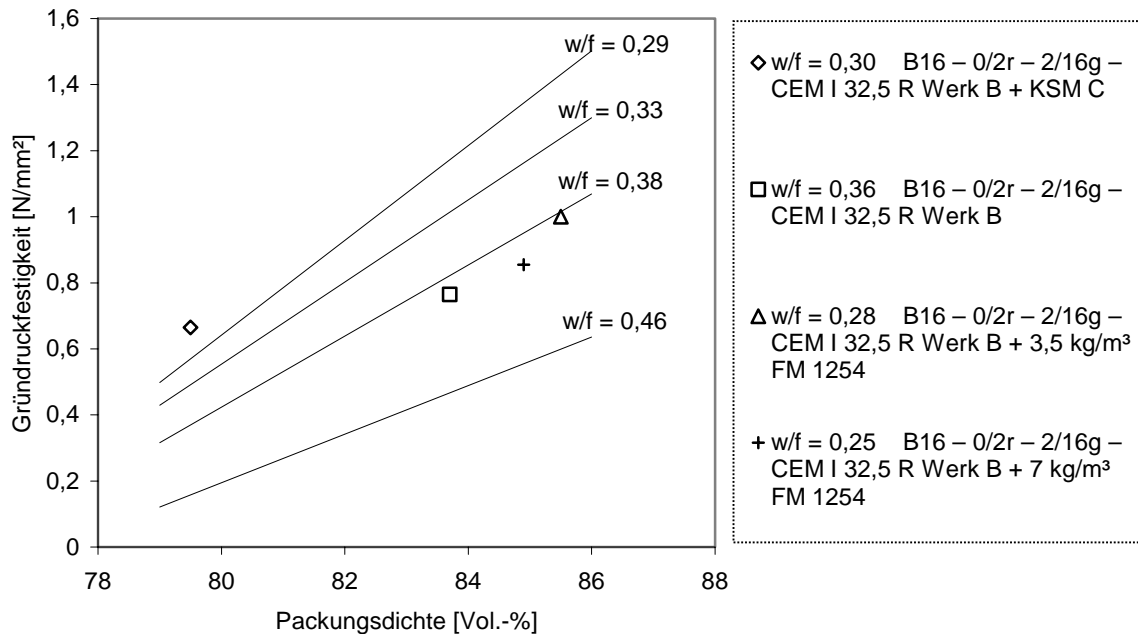


Bild 70: Einordnung optimierter erdfeuchter Betone in den in Bild 50 dargestellten Zusammenhang aus w/f-Wert, Packungsdichte und Gründruckfestigkeit (Gesteinskörnung B16 – 0/2r – 2/16g; Details Anhang D – Tabellen D13 – D16)

6.6.3 Anwendung des dreidimensionalen Zusammenhangs zwischen Packungsdichte, w/f-Wert und 28-Tage-Druckfestigkeit auf modifizierte erdfeuchte Betone

6.6.3.1 Probenauswahl

Für die Untersuchung der Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften optimierter erdfeuchter Betone, wurden 4 Laborbetone ausgewählt und mit industrieüblichen, hinsichtlich Festigkeit und Dauerhaftigkeit bewährten Mischungen – in Tabelle 4 als Referenz 1 und 2 bezeichnet - verglichen. Die Referenzmischungen geben hinsichtlich ihrer mechanischen und Dauerhaftigkeits- Eigenschaften den Rahmen vor, in dem sich optimierte erdfeuchte Betone bewegen sollten.

In Voruntersuchungen mit dem Rüttelproctorverfahren wurden die maximal erzielbaren Packungsdichten und die zugehörigen Wassergehalte ermittelt. Die für die Festbetonuntersuchungen hergestellten Probekörper wurden ebenfalls mit dem Rüttelproctorgerät gezielt auf diese vorermittelte Packungsdichte eingestellt, indem die Prüfkörper auf eine vorher festgelegte Höhe gerüttelt wurden. Die festgelegte Höhe konnte nur mit einer Genauigkeit von rd. 1 mm eingehalten werden. Deshalb ergeben sich in den Packungsdichten der Probekörper leichte Schwankungen (Tabelle 4). Im Anhang D in den Tabellen D24 – D38 sind die jeweiligen Mischungen und ihre Packungsdichten aufgelistet. Die optimierten Mischungen wurden in vier Kategorien/Typen unterteilt. Typ 1 stellt nur eine Annäherung an die in Vorversuchen ermittelte optimale Sieblinie für die feinststoffliche Zusammensetzung mit $n = 0,35$ dar. Der Anteil sehr feinen Füllstoffs am gesamten Feinststoffgehalt $< 0,25$ mm wurde auf höchstens 17 Vol.-% begrenzt. Ziel war es, die Empfindlichkeit des Gemisches gegenüber Wassergehaltsschwankungen zu begrenzen. Ein weiterer Hintergrund war die Beobachtung, dass Mischungen mit zunehmendem Feinststoffgehalt zu kleben beginnen. Dieser Begriff beschreibt die Neigung des Gemisches während des Formgebungsprozesses an den Wandungen der Formen adhäsiv anzuhaften.

Die nicht optimale Ausbildung der feinststofflichen Sieblinie führte im Vergleich zu den optimalen Sieblinien des Typs 3 und 4 in Tabelle 4 zu vergleichsweise geringeren Packungsdichten (Details siehe Anhang D – Bilder D12 - D13 und Tabellen D29 – D30). Dem dadurch zu befürchtenden Festigkeitsabfall wurde durch die Senkung des w/z -Werts begegnet. Es ergaben sich Betone, die sowohl hinsichtlich der Festigkeit als auch der Dauerhaftigkeit im CDF-Test in den durch die Referenzbetone vorgegebenen Rahmen passten.

Die Mischungen des Typs 3 wurden entsprechend der in Vorversuchen (Abschnitt 6.6.1) als ideal bestimmten Sieblinie mit dem Verteilungsmodul $n = 0,35$ ausgebildet (Details siehe Anhang D – Tabellen D34 – D36 und Bilder D17 – D19). Der Fließmittelgehalt wurde auf 3,5 kg/m³ begrenzt. Infolge des im Vergleich zu Typ 1 hohen Gehalts an sehr feinem Feinststoff (rd. 33 Vol.-% des Gesamtfeinststoffgehalts) führte dies zu einem Anstieg des zum Erreichen der maximalen Packungsdichte notwendigen Wassergehalts. Die äquivalenten w/z -Werte liegen zwischen 0,62 und 0,70. Dementsprechend fiel die Druckfestigkeit - trotz hoher Packungsdichten von bis zu 88,8 Vol.-% - ab. Sie sanken unter den durch die Referenzmischungen vorgegebenen Rahmen. Auffällig ist dabei, dass die Mischung mit hohen Mengen an Kalksteinmehlfüllern des Typs KSM C und BG unter Frosteinwirkung, wie Tabelle 4 zu entnehmen ist, bei Frost-Tausalz-Beanspruchung im CDF-Verfahren mit rd.

2.400 bis rd. 7.000 g/m² äußert hohe Masseverluste aufwiesen. Verantwortlich hierfür dürfte auch der hohe w/z-Wert der Mischungen Typ 3 und 4 sein, der bei 0,63 bis 0,72 lag. Für erdfeuchte Betone mit hohem Frost-Tausalzwidestand ohne LP-Mittel ist in DIN EN 206/DIN 1045-2 ein w/z-Wert von höchstens 0,40 festgelegt.

Gleich hohe Packungsdichten konnten mit feinststofflichen Ausfallkörnungen nach Bild D20 und D21 in Anhang D erzielt werden. Diesen Typ repräsentiert Mischung 4 in Tabelle 4. Durch die Zugabe großer Mengen von Feinstfüllstoffen auf Kalkstein- und Quarzmehlbasis von rd. 72 Vol.-% am Gesamtfeinststoffgehalt, wurde die Verdichtungswilligkeit zunächst verschlechtert. Wurde der Fließmittelanteil von 3,5 auf 7 kg/m³ erhöht, konnte dies ausgeglichen werden. Es ergaben sich Packungsdichten und äquivalente w/z-Werte auf dem Niveau des Mischungstyps 3. Es zeigte sich, dass auch hier die Mischung mit Kalksteinmehl sehr hohe Abwitterungen im CDF-Test aufwies. Die Abwitterungsmengen der Typen 3 und 4 zeigen, dass hohe Packungsdichten und Festigkeiten allein nicht ausreichen, um eine ausreichende Dauerhaftigkeit zu garantieren. Der Einfluss des w/z-Werts ist und bleibt die dauerhaftigkeitsbestimmende Größe.

Um dies zu überprüfen, wurden Mischungen mit deutlich reduzierten w/z- bzw. äquivalenten w/z-Werten hergestellt und geprüft (Tabelle 4 – Typ 2). Bei den Mischungstypen V und W (Details siehe Anhang D – Tabellen D32 – D33 und Bilder D15 – D16) wurde wiederum versucht, sich dem optimalen Sieblinienverlauf anzunähern. Im Fall der Mischung W gelang dies gut. Trotz des im Vergleich zu den anderen Proben des Typs 2 höchsten Wassergehalts von rd. 86 l/m³, konnten sehr hohe Packungsdichten (rd. 88 Vol.-%) erzielt werden. Gleichfalls hohe Packungsdichten wies die Mischung V auf (rd. 87,5 Vol.-%). Als Füllstoffe kamen die Flugasche FA und Feinstflugasche FFA zum Einsatz. Durch die kugelige Kornform erreichte man trotz des etwas ungünstigeren Sieblinienverlaufs gleichfalls hohe Packungsdichten. Zum Vergleich dazu, wurde ein optimierter erdfeuchter Beton nur durch die Zugabe der Flugasche FA hergestellt (Probe U; Anhang D – Tabelle D31). Die günstige kugelige Kornform begünstigt die Entwicklung der Packungsdichte, ohne die der anderen Mischungen zu erreichen. Eine ausreichende Annäherung an die optimale Sieblinie konnte infolge der geringen Feinheit der Flugaschen FA nicht erzielt werden. Auffällig auch hier, dass die Mischung W mit dem höchsten w/z-Wert – trotz sehr hoher Packungsdichtewerte – keine ausreichende Dauerhaftigkeit aufwies. In der Druckfestigkeitsprüfung wiederum erreichte sie die höchsten Werte im Vergleich zu Probe V und U. Dies ist auch an dieser Stelle ein weiteres Indiz dafür, dass Dauerhaftigkeit und Festigkeit getrennt voneinander betrachtet werden müssen.

Einige der optimierten Betone (Typ1 und die Mischungen U und V des Typs 2) zeigten Abwitterungswerte im CDF-Test, die nicht über denen der praxisüblichen Referenzbetone lagen. Auch der in der Praxis als Pflastersteinkernbeton ausreichend dauerhafte Referenzbeton 2 wies eine Abwitterung über dem für das CDF-Verfahren eingeführten Richtwert von 1500 g/m² auf. Bis zu welcher Packungsdichte und welchem äquivalenten w/z-Wert eine vor diesem Hintergrund ausreichende Dauerhaftigkeit erzielt werden kann, wird in Abschnitt 6.6.4 diskutiert werden.

	Einheit	Referenz 1	Referenz 2	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
CEM I 32,5 R	[kg/m ³]	267-271	198-199	124,6-126,2	141-143,3	116,2-119,9	116,0-118,9
Feinststoff mittlerer Feinheit*	[Vol.-%]	-	rd. 37	rd. 53	rd. 55/38,5	rd. 38,5	-
Feinststoff hoher Feinheit*	[Vol.-%]	-	-	rd. 17	rd. - /33	rd. 33	rd. 72
Runder Sand 0/2	[kg/m ³]	826-836	825-829	828-835	824,8-838,3	831,1-857,7	829,9-850,6
2/16 gebrochen	[kg/m ³]	1328-1345	1326-1333	1327-1343	1326-1348	1336-1379	1334-1368
Wasser	[kg/m ³]	119-120	109	64,1-73,8	73,2-74,4	74,2-84,3	75,2-83,6
Fließmittel	[kg/m ³]	-	-	7,00	7,00	3,50	7,00
Packungsdichte	[Vol.-%]	83,8-84,5	85-85,4	85,4 – 86,4	85,3-86,7	86-88,8	85,9-88,0
Luftgehalt	[Vol.-%]	3,50-4,70	3,70-4,10	7,19-7,28	3,40-7,30	2,80-5,80	4,50-5,70
w/z	-	0,44	0,55	0,55-0,63	0,52-0,59	0,70	0,63-0,72
w/z _{eq.}	-	-	0,49	0,49-0,52	0,46-0,59	0,50-0,70	0,63-0,72
Druckfestigkeit f _{d28}	[N/mm ²]	64,4-67,6	59,2-64,4	58,1-66,7	61,8-62,7	50,8-56,7	60,3-80,1
Spaltzugfestigkeit f _{sz28}	[N/mm ²]	4,1-4,8	4,08-4,48	3,47-3,99	4,29-4,61	3,35-4,81	-
Wasseraufnahme Vorsaugen CDF	[g]	9,1-10,1	10,8-11,7	5,6-8,7	6,7-29	5,7-18,8	4,3-13,9
Abwitterung CDF	[g/m ²]	1132,8-1365,4	2262,1-2387,9	1547-1668	825-2439	2390-7179	2826-6737

*) Anteil bezogen auf den Gesamtfeststoffgehalt (Zement + weitere Feinststoffe)

Tabelle 4: Getestete Mischungszusammensetzungen (Details Anhang D – Tabellen D24 – D38)

6.6.3.2 Einordnung optimierter erdfeuchter Betone in den dreidimensionalen Zusammenhang

Überträgt man die in Abschnitt 6.5 entwickelte Extrapolationsfunktion (Gleichung 30) zur Bestimmung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von Packungsdichte und w/z-Wert von Dreistoffsystemen auf die in Tabelle 4 dargestellten optimierten Betone (Typ 1 – 4), so lässt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen den real gemessenen Werten für die Druckfestigkeit und den Ergebnissen der Extrapolationsfunktion feststellen (Tabelle 5 – Details siehe Anhang D, Tabellen D29 – D38 und Bilder D12 – D21). Einzig die Mischung

Aus3/4 überschreitet mit einer gemessenen Druckfestigkeit von 75 - 80 N/mm² die Prognosewerte von nur rd. 53 – 55 N/mm² deutlich. Die Gründe hierfür konnten nicht ermittelt werden.

Probenname	Vor3/4	O5/6	U5/6	V5/6	W5/6	R5/6	P5/6	Q5/6	BG3/6	Aus3/4
Typ	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4
f _{d28} gemessen [N/mm ²]	66,1/66,7	58,1/66,6	62,7/61,8	64/67,1	70,4/68,2	50,8/56,7	51,1/51,4	52,8/56,0	60,3/64,9	74,9/80,1
f _{d28} prognostiziert auf Basis des w/z –Werts [N/mm ²]	62,9/62,9	57,3/57,3	62,8/62,8	68,8/67,5	69,3/67,5	60,3/63,3	53,1/53,1	55,6/52,6	65,4/65,4	53,2/55,0
f _{d28} prognostiziert auf Basis des äquivalenten w/z –Werts [N/mm ²]	66,4/66,4	63,2/63,2	66,0/66,0	72,0/70,7	-/-	64,6/67,6	-/-	-/-	-/-	-/-

Tabelle 5: Vergleich der gemessenen und der (mit Hilfe von Gleichung 30 prognostizierten) Festigkeitswerte erdfechter Betone (Details siehe Anhang D, Tabellen D29 – D38 und Bilder D12 – D21)

Unbeantwortet blieb bis jetzt die Frage nach den Auswirkungen der feinststofflichen Optimierung auf das Gefüge und die Porosität des festigkeitsbildenden Bindemittelsteins. Es wurde lediglich festgestellt, dass Betone mit hohem w/z-Wert und hohem Feinststoffgehalt offenbar einen niedrigen Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen. Verglichen werden nachfolgend ausgewählte optimierte Betone mit der Referenzprobe 1, die in Bezug auf Festigkeit und Feinleimgehalt den optimierten Proben annähernd entspricht. Bei der Interpretation der Ergebnisse wurde neben dem porositätsbestimmenden Feinleimvolumen auch der Feststoffgehalt des Feinleims über die Kenngröße w/f–Wert einbezogen. Dabei fällt der hohe Feststoffgehalt des Feinleims der optimierten Betone mit w/f-Werten von 0,22 – 0,28 auf. Daraus ließe sich die Schlussfolgerung ziehen, dass diese Betone generell eine sehr viel geringere Porosität im Bindemittelstein aufweisen müssten. Berücksichtigt man aber zusätzlich das durch Hydratation gebundene Wasser, so ergeben sich bei allen betrachteten Betonen Feststoffgehalte im Feinleim, die sich sehr stark ähneln. Die Berechnung wurde entsprechend der nachfolgenden Gleichung durchgeführt (Gleichung 31):

$$\text{Feststoffvolumen} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right] = \frac{\text{Zementgehalt} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}{3100 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} + \frac{\text{Zementgehalt} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 0,2}{1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} + \frac{\text{Feinststoffgehalt} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}{\rho_{\text{Feinst.}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}$$

(Gleichung 31)

Der Anteil des chemisch und physikalisch gebundenen Wassers, wurde wiederum nach [Schmidt 31] auf 0,2 festgelegt. Dies entspricht ungefähr einem Hydratationsgrad von 50%. In Anhang D (Gleichungen D1 – D7) sind die durch Gleichung 31 errechneten Werte für den Feststoffgehalt angegeben. Sie unterschreiten den Feststoffgehalt der Referenzmischung 1 von rd. 0,141 m³ mit Werten zwischen 0,130 – 0,138 m³ Feststoff z.T. deutlich. Ein geringeres Porositätsvolumen kann somit nur durch eine verbesserte Packung des Feinststoffs entstanden sein. Mittels Quecksilberdruckporosimetrie, wurde die Porosität der Betonmatrix untersucht. Die Betonproben wurden im Alter von 28 Tagen beprobt, bis zu diesem Zeitpunkt waren sie ständig in Wasser gelagert worden. Es zeigte sich, dass ihre Kapillar- und Gelporositäten z.T. sehr deutlich unter denen der Nullprobe lagen (Anhang D – Tabelle D39 und Bilder D22 – D23). Dieses Ergebnis ist ein Hinweis darauf, dass die feinststoffliche Optimierung zu einer dichteren und homogeneren Feinststoffmatrix beigetragen hat. Dadurch wird wiederum die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems reduziert. Die Anzahl der Spannungspitzen im Bereich von Fehlstellen wird entsprechend des unter Punkt 4.4.2.3 vorgestellten Modells nach [Shah 30] vermindert.

Fasst man die Ergebnisse zusammen, so wirkt sich die feinststoffliche Optimierung auf zweierlei Weise auf die Festigkeit erdfeuchter Betone aus. Durch die Verbesserung der Kornzusammensetzung des Feinststoffs < 0,25 mm kann der Wassergehalt, der zum Erreichen der optimalen Packungsdichte notwendig ist, reduziert werden. Das durch die Gesteinskörnung gebildete grobgranulare Tragkornskelett kann leichter mit Feinststoffen befüllt werden. Dieser für die Verbesserung der Packungsdichte maßgebliche Vorgang konnte mittels Rüttelproctoruntersuchungen in Abschnitt 6.6.1 nachgewiesen werden. Die feinststoffliche Optimierung verbessert aber auch die Dichte der Feinststoffmatrix. Die Nutzung beider Effekte ermöglicht es, optimierte Betone mit geringen Bindemittelgehalten und hohen w/z-Werten zu gestalten, welche die Anforderungen an die Druckfestigkeit (z.B. von Betonpflastersteinen) erfüllen, aber u.U. jedoch keinen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand besitzen. Der weiterhin vorhandene Einfluss von Packungsdichte und w/z-Wert ermöglicht es, die Festigkeit optimierter erdfeuchter Betone in gleicher Weise wie für übliche erdfeuchte Betone in einem dreidimensionalen Festigkeitsmodell darzustellen und zu prognostizieren (Bild 71).

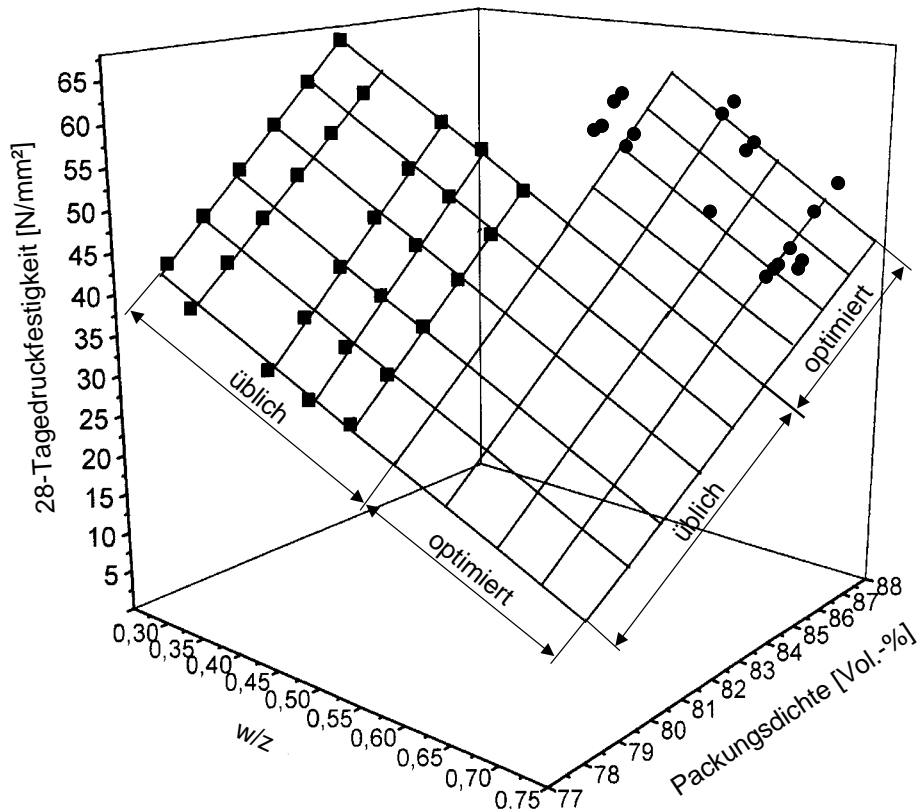


Bild 71: Die Ausweitung des dreidimensionalen Zusammenhangs zwischen w/z-Wert, Packungsdichte und 28-Tagedruckfestigkeit auf optimierte Betone

6.6.4 Ausweitung des Modells auf die Dauerhaftigkeit erdfeuchter Betone

6.6.4.1 Schädigungsmechanismus bei einem Frostangriff

Die Dichteanomalie des Wassers führt zu einer Volumenzunahme beim Phasenübergang vom Wasser zu Eis von rd. 9 Vol.-%. Die Ausdehnung des Eises innerhalb eines umschließenden Mediums muss zum Entstehen von Spannungen führen. Diese Spannungen ähneln dabei dem hydraulischen Verhalten von Flüssigkeiten, eine allseitige gleichmäßige Spannungsverteilung auf die umgebende Matrix ist die Folge.

Zur Generierung von Spannungen durch Eisbildung in Betonen müssen zwei grundsätzliche Bedingungen erfüllt sein: die Möglichkeit von Wasser in den Beton einzudringen und die Möglichkeit eine ausreichende Sättigung zu erreichen. Hauptgrund für eine rasche Wasseraufnahme von Beton ist die Porositätsverteilung. Insbesondere die Kapillarporosität

mit Porendurchmessern von 30 – 10.000 nm ist maßgeblich an der Wasseraufnahme durch Kapillarsogwirkung beteiligt. Die Mechanismen der kapillaren Wasseraufnahme wurden bereits im Rahmen der Literatordiskussion erläutert. Danach ist die Wasseraufnahme bei Vorhandensein sehr geringer Kapillardurchmesser besonders hoch. Große Mengen an Wasser können in ein poröses Medium wie Beton hineingesogen werden und kritische Sättigungsgrade auslösen. Diese liegen im allgemeinen bei rd. 90% und ergeben sich nach [Stark 64, Fagerlund 73] aus der theoretischen Betrachtung der rd. 9%-igen Volumenzunahme des Wassers bei Eisbildung.

Die Senkung der Porosität und insbesondere der Kapillarporosität muss nach [Palecki 74 und Fagerlund 75] nicht zwangsläufig zu einer Verbesserung der Frostbeständigkeit beitragen. Aus Untersuchungen an hochfesten Betonen [Palecki 74] ist bekannt, dass auch hier trotz sehr geringer Gesamt- und Kapillarporosität sehr hohe Sättigungsgrade erzielt wurden, welche die Betonmatrix unter Frosteinfluss sprengten. Dies kann ein Hinweis auf den Schädigungsmechanismus sein, der in optimierten erdfeuchten Betonen wirkt. Vergleicht man die kumulierten und differentiellen Porensummen- und Porenradienverteilungen der optimierten Betone mit denen der Ausgangsmischung (Referenz 1), so fällt die Abnahme der Gesamtporosität, aber auch die Verfeinerung des Porositätsbilds ins Auge (Anhang D – Bilder D24 – D27). Die Verfeinerung der Kapillarradien kann zu einem verstärkten Saugen beigetragen haben, das zu einem höheren Sättigungsgrad führte. Eine schnellere Zerstörung der Matrixstruktur durch Frosttauwechsel ist dann die Folge.

6.6.4.2 Einfluss von w/z-Wert und Packungsdichte auf die Dauerhaftigkeit

Um abschließend zu prüfen, ob eine dreidimensionale Abhängigkeit von w/z-Wert, Packungsdichte und Dauerhaftigkeit herzuleiten sei, wurden zwei Betonmischungen (Tabelle 6, Details siehe Anhang D – Tabellen D24 – D27) gezielt unterverdichtet. Der w/z-Wert mit 0,44 und 0,33 jeweils konstant gehalten. Den Anstoß zu der Versuchsreihe gaben eigene und Beobachtungen von [Wierig 28], dass stark unterverdichtete Pflastersteine aus erdfeuchtem Beton eine sehr hohe und schnelle kapillare Wasseraufnahme zeigen. Die ist ein Hinweis darauf, dass auch durch Unterverdichtung in ganz erheblichem Umfang kapillare (= saugende) Porosität in den Beton eingetragen werden muss.

	Einheit	Referenz 1	Mischung 2	Mischung 3	Mischung 4
CEM I 32,5 R	[kg/m ³]	267-271	266-268	307-312	302-305
Runder Sand 0/2	[kg/m ³]	826-830	821-830	769-781	756-761
2/16 gebrochen	[kg/m ³]	1329-1334	1321-1332	1236-1255	1218-1228
Wasser	[kg/m ³]	117-119	115-117	101-103	100-101
Packungsdichte	[Vol.-%]	83,8-84,5	81,6-82,2	79,5-80,8	78,3-79,8
Luftgehalt	[Vol.-%]	3,5-4,3	5,8-6,6	8,9-10,4	11-11,7
w/z	-	0,44	0,44	0,33	0,33
Druckfestigkeit f_{d28}	[N/mm ²]	64,4-67,6	56,6-57,6	55,4-56,7	46,7-52
Spaltzugfestigkeit f_{sz28}	[N/mm ²]	4,13-4,79	4,37-4,93	4,03-4,29	3,84-3,94
Wasseraufnahme nach CDF	[g]	9,1-10,1	15,6-17,8	19,9-25,9	27,9-32,1
Abwitterung CDF	[g/m ²]	1132,8-1365,4	1801,8-2048,5	771,6-969,1	988,0-1416,0

Tabelle 6: Test erdfechter Betone mit variiertem w/z –Wert und variiertes Packungsdichte (Prüfalter: 28 Tage)

Es zeigt sich, dass auch Betone mit geringen w/z-Werten bei einer infolge unzureichender Verdichtung zu geringen Packungsdichte zu hoher Wasseraufnahme während des für das CDF-Verfahren vorgeschriebenen einwöchigen Vorsaugens neigten und Abwitterungen von über 2000 g/m² auftreten können. Ähnlich war dies bei den Proben mit sehr niedrigem w/z-Wert von 0,33. Trotz des niedrigen w/z-Wertes waren Abwitterungsmengen von bis zu 1400 g/m² festzustellen, die zwar noch unterhalb des Richtwertes von 1500 g/m² lagen, für einen Beton mit derartig niedrigem w/z-Wert aber dennoch sehr hoch erscheinen. Infolge der Unterverdichtung steigen somit sowohl die Wasseraufnahme als auch die Abwitterungsmenge an. Dies bestätigt, dass neben dem w/z-Wert auch die Packungsdichte den Frost-Tausalz-Widerstand von Betonen mitbestimmt.

Bezieht man die Ergebnisse der optimierten Betone in die Betrachtung ein (Anhang D – Tabellen D29 – D38), so kann in Abhängigkeit von der Packungsdichte des Trockenmaterials und dem w/z- bzw. äquivalenten w/z-Wert eine ungefähre Einteilung von dauerhaften und nicht dauerhaften Betonen vorgenommen werden (Bild 72 und 73). Wichtig erscheint dabei, den w/z- bzw. äquivalenten w/z-Wert zu begrenzen, um eine ausreichende Dauerhaftigkeit zu garantieren. Auf Basis der Messergebnisse lässt sich eine Darstellung in Abhängigkeit von Packungsdichte und des w/z- bzw. äquivalenten w/z-Werts finden, bei dem Betone maximale Abwitterungen von rd. < 1500 g/m² - dem Maximum der zulässigen Abwitterungen im CDF-Verfahren nach DIN EN 12390-9 (Entwurf) - aufweisen. Die Darstellung basiert auf einer beschränkten Anzahl von CDF-Prüfungen und muss durch weitere Versuche abgesichert werden. Die so ermittelten Bezugsgraden können bei Verwendung des w/z-Werts mittels Gleichung 32 beschrieben werden.

Erforderliche Packungsdichte für Abwitterung $< 1500 \frac{g}{m^2} = 40 \cdot \frac{w}{z} + 65$ (Gleichung 32)

Bei Verwendung des äquivalenten w/z-Werts gilt Gleichung 33:

Erforderliche Packungsdichte für Abwitterung $< 1500 \frac{g}{m^2} = 50 \cdot \frac{w}{z_{eq}} + 62$ (Gleichung 33)

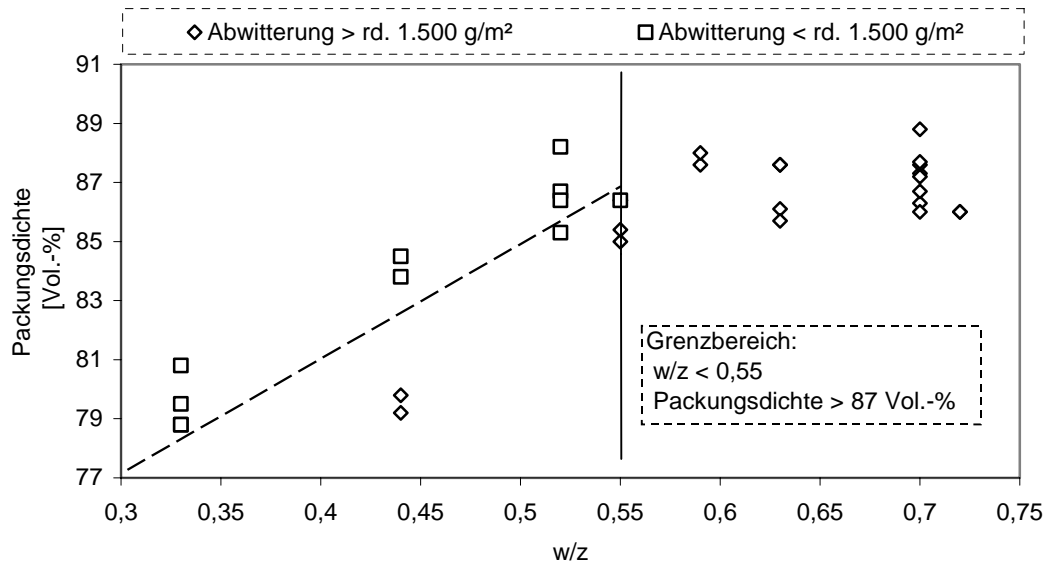


Bild 72: Dreidimensionaler Zusammenhang zwischen w/z-Wert, Packungsdichte und Abwitterungsmenge im CDF-Test (Anhang D – Tabellen D24 – D38)

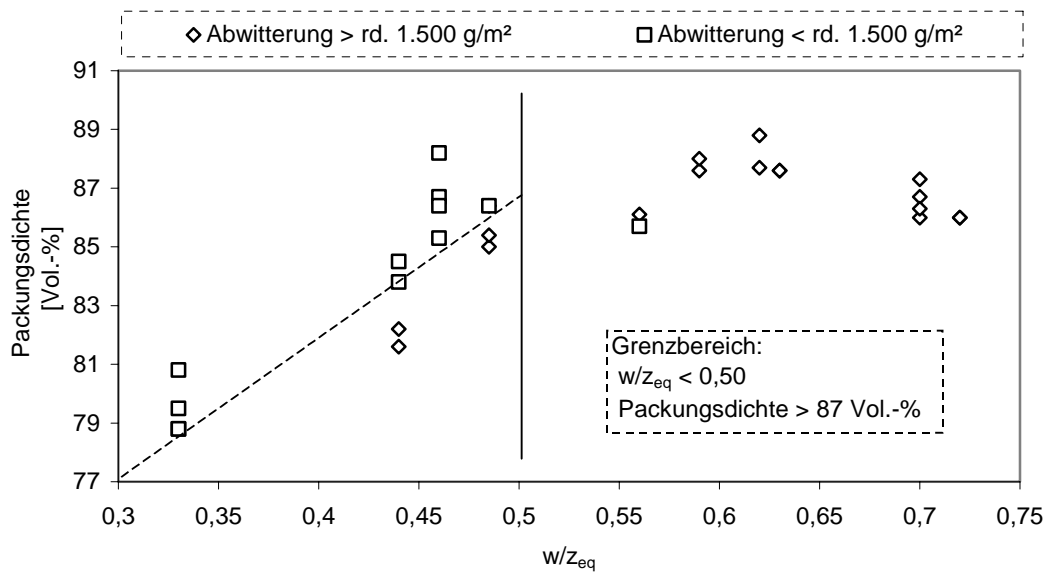


Bild 73: Dreidimensionaler Zusammenhang zwischen äquivalentem w/z-Wert, Packungsdichte und Abwitterungsmenge im CDF-Test (Anhang D – Tabellen D24 – D38)

7 Zusammenfassung

7.1 Veranlassung und Ziele der Arbeit

Erdfeuchte Betone werden vorrangig in Werken der Betonwarenindustrie verarbeitet. Dies erfolgt zumeist in voll- oder teilautomatisierten Anlagen, wie beispielsweise Pflasterstein- oder Rohrfertigern. Vor dem Hintergrund des großen Maschineneinsatzes wird zumeist die Maschinenteknik optimiert, um wirtschaftliche Vorteile und Produktverbesserungen zu erzielen. Dabei wird häufig übersehen, dass auch die Optimierung der stofflichen Zusammensetzung und ein vertieftes Verständnis des Tragverhaltens erdfeuchter Betone im sofortentschalteten „grünen“ und erhärteten Zustand zu wirtschaftlichen Vorteilen und zu einer Verbesserung der Produktqualität beitragen kann.

Um eine stoffliche Verbesserung erdfeuchter Betone zu erreichen, sollte einerseits das Tragverhalten erdfeuchter Betone im grünen und erhärteten Zustand bodenmechanisch und betontechnologisch analysiert und modelliert werden, um es numerisch erfassen und prognostizieren zu können. Dieses Ziel wurde insoweit erreicht, dass die grundsätzlichen stofflichen Zusammenhänge aufgeklärt und beschrieben werden konnten. Durch das Verständnis der die Tragfähigkeit beeinflussenden Mechanismen, konnte auch ein weiteres Ziel erreicht werden, nämlich die erkannten Einflüsse zu nutzen, um erdfeuchte Betone unter Produktionsbedingungen zu optimieren. Dies führte zu völlig neuen Mischungskonzepten, die sich sowohl als wirtschaftlich und ressourcenschonend erwiesen.

7.2 Vorgehensweise

Die Untersuchung der Eigenschaften erdfeuchter Betone erforderte zunächst die Entwicklung einer eigenständigen Prüfmethode, um die vielfältigen Faktoren, die Einfluss auf das Trag- und Verdichtungsverhalten erdfeuchter Betonen nehmen, erfassen zu können.

Dieses Ziel führte zur Entwicklung des Rüttelproctorverfahrens, einer Prüfmethode die den erdfeuchten Beton mittels Rüttelpressverdichtung verdichtet. Der Versuchsablauf orientiert sich an der des geotechnischen Proctorversuchs nach DIN 18127.

Durch Rahmenscherversuche nach DIN 18137-3 und Gründruckversuche an sofortentschalteten zylindrischen Probekörpern wurde das Tragverhalten erdfeuchter Betone analysiert. Die Analysedaten dienen zur Modellierung des Tragverhaltens im sofortentschalteten „grünen“ Zustand.

Durch Druckfestigkeitsprüfungen erhärteter erdfeuchter Betone mit gezielt verändertem w/z-Wert und variiertes Packungsdichte der Feststoffe, wurde das Tragverhalten im erhärteten Zustand untersucht, um dieses modellieren und prognostizieren zu können.

Die Analyse der Feinststoffe hinsichtlich Kornform und Kornzusammensetzung wurde zu einer gezielten Optimierung der feinststofflichen Zusammensetzung (Korngröße < 0,25 mm) genutzt. Der Einsatz eines leistungsfähigen Fließmittels stellte eine zusätzliche Neuerung dar und diente dazu, die Packungsdichte erdfeuchter Betone weiter zu steigern.

Abgesehen von der Festigkeit, ist die Dauerhaftigkeit nach DIN 1045-2 eine bemessungsrelevante Größe. Durch begleitende Frost-Tausalz-Untersuchungen (CDF-Verfahren) wurde der Einfluss einer durch Optimierung gesteigerten Packungsdichte auf die Dauerhaftigkeit geprüft.

7.3 Wesentliche Ergebnisse

7.3.1 Analyse erdfeuchter Betone mittels Rüttelproctor

Gemeinsames Charakteristikum erdfeuchter Betone ist, dass sie – genauso wie grob- und gemischtkörnige Böden - bei konstanter Verdichtungsenergie nur eine individuelle maximale Packungsdichte erreichen können. Dieser Packungsdichte ist ein definierter optimaler Wassergehalt zugeordnet. Die Packungsdichte und der Wassergehalt definieren die individuelle Verdichtungswilligkeit des Gemisches. Außerdem kann die Entwicklung der Packungsdichte bei zunehmendem oder abnehmendem Wassergehalt Aufschluss darüber geben, wie empfindlich ein Gemisch auf Veränderungen des Wassergehalts reagiert. Der Punkt der optimalen Packungsdichte kann über den im Rahmen der Arbeit entwickelten Rüttelproctorversuch bestimmt werden.

Mit den im Rüttelproctorversuch ermittelten Werten lassen sich unterschiedliche Gemische vergleichen. Wie sich im Verlauf der Untersuchungen zeigte, eignet sich die Testmethode

sowohl für die Prüfung der Verdichtungswilligkeit als auch für die Untersuchung der Wirkung von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln im erdfeuchten Beton. Sie bildet somit ein einfaches Hilfsmittel, mit dem im Labor die Qualität von erdfeuchten Betonen optimiert werden kann. Zudem wurde festgestellt, dass die maximale im Rüttelproctorversuch ermittelte Packungsdichte gut mit den maximalen Festigkeiten im grünen wie erhärteten Zustand korreliert. Damit wurde erstmals die Möglichkeit geschaffen, allein auf Basis der Proctorprüfung Aussagen zur späteren Festigkeit erdfeuchter Betone zu machen.

7.3.2 Tragfähigkeit im sofortentschalteten „grünen“ Zustand

Die Tragfähigkeit „grüner“ erdfeuchter Betone nach dem Entformen wird maßgeblich durch die Kornzusammensetzung und – bislang weniger beachtet – von der Kornform sowohl der Gesteinskörnung als auch des Feinststoffs beeinflusst. Es konnte nachgewiesen werden, dass sich frische erdfeuchte Betone hinsichtlich ihrer Verdichtung und Gründruckfestigkeit wie gemischtkörnige Böden verhalten. Durch die Verwendung gebrochener, kantiger Gesteinskörnungen und gebrochener, gemahlener Feinststoffe wird sowohl die innere Reibung als auch die Verzahnung des Systems erhöht. Es konnte außerdem durch Rahmenscherversuche gezeigt werden, dass erdfeuchte Betone im Allgemeinen sehr hohe Reibungswinkel φ aufweisen und dass schon geringe Änderungen dieses Wertes zu einem großen Tragfähigkeitsverlust führen können. Auch der Feinleimgehalt beeinflusst die Gründruckfestigkeit. Bei Feinleimgehalten von über 270 l/m³ nahm in den Untersuchungen die Gründruckfestigkeit ab. Der zunehmende Feinleimgehalt trägt dann nicht mehr zu einer besseren Füllung von Hohlräumen und somit zu einer Steigerung der Gründruckfestigkeit bei, sondern drängt die für die Verzahnung wichtige grobe Gesteinskörnung auseinander.

Neben der inneren Reibung und der Verzahnung des frischen Betons, beeinflussen auch Adhäsionskräfte zwischen den Feinststoffen die Tragfähigkeit. Betone mit gleicher Packungsdichte, aber unterschiedlichem Feinststoffgehalt zeigen deutlich unterschiedliche Gründruckfestigkeiten. Ein zunehmender Feinststoffgehalt steigert offensichtlich die Zahl der Kornberührungspunkte der Mörtelmatrix und trägt so zu einer Zunahme der Reibung-/Berührungspunkte zwischen den Körnern und einer Zunahme von Adhäsionskräften bei. Unter dem Einfluss der Verdichtungsenergie wird die Verzahnung der Feinststoffe weiter verbessert. Die bei der Verdichtung wirkenden Fliehkräfte und der zusätzlich wirkende Auflastdruck steigern den Kornkontakt und die Möglichkeit Zug- und Schubkräfte zu

übertragen, weiter. Außerdem fördert der zunehmende Feinststoffgehalt die Homogenität des Betongefüges. Die Anzahl der Fehlstellen sinkt.

Die Wirkung von kapillaren Kräften als Ursache für die Gründruckfestigkeit erdfeuchter Betongemische konnte für Betone mit üblichen Feinststoff- und Wassergehalten ausgeschlossen werden. Mittels rheometrischer Analysen wurde die Fließgrenze des Feinststoffleims oberhalb von w/f-Werten von 0,30 bestimmt. Es ergaben sich sehr geringe Werte von nur rd. 0,00014 N/mm² bei einem w/f-Wert von 0,32. Ein Einfluss auf die Tragfähigkeit muss daher ausgeschlossen werden. Durch begleitende Rückrocknungsversuche von erdfeuchten Gemischen, bei denen der Zement gegen Kalksteinmehl (KSM C) und Flugasche (FA) ausgetauscht wurde, konnte außerdem gezeigt werden, dass vollständig ausgetrocknete Systeme die höchste Tragfähigkeit aufwiesen.

Betrachtet man die Entwicklung der Gründruckfestigkeit erdfeuchter Betone in einem dreidimensionalen Zusammenhang aus Wasser-/Feinststoffwert (w/f-Wert: Verhältnis von Wasser zu Feinststoffen < 0,25 mm) und Packungsdichte, so liegen die Gründruckfestigkeiten auf einer im Raum verlaufenden Ebene. Wird die Packungsdichte durch intensive Verdichtung oder günstigeren Wassergehalt erhöht, so nimmt die Verzahnung der Feinst- und Grobstoffe zu. Die Tragfähigkeit steigt. Ebenso beeinflusst der w/f-Wert die Tragfähigkeit, denn die zunehmende Viskosität des Feinleims muss durch eine zunehmende Feinststoff- und Feinleimmenge kompensiert werden. Würde man nur den Wassergehalt senken, so ergäben sich geringere Packungsdichten, da man sich von dem für eine maximale Verdichtung notwendigen Wassergehalt entfernt. Die notwendige Ausweitung der Feinststoffmenge führt dazu, dass im erdfeuchten Beton sowohl die Anzahl der Kornberührungspunkte als auch die Gefügehomenität ansteigt. Auch dies führt zu einem Anstieg der Tragfähigkeit.

Die durch den w/f-Wert, die Packungsdichte und Gründruckfestigkeit gebildete Ebene konnte durch eine Ebenengleichung beschrieben werden. Dieser mathematische Ansatz bietet die Möglichkeit die Ergebnisse in Maschinensteuerungen zu implementieren und somit die Produktion genauer steuern zu können.

7.3.3 Festbetoneigenschaften

Die Festigkeit des erhärteten Betons kann in ganz ähnlicher Weise beeinflusst werden wie die des noch grünen Betons. Zu diesen beeinflussenden Faktoren gehören der Feinleimgehalt, die Packungsdichte und die Kornform der Feinststoffe und Gesteinskörnung.

Ebenso wie bei der Gründruckfestigkeit beeinflusst die Kornform der Gesteinskörnung durch die Verzahnung mit der sie umgebenden Matrix die Tragfähigkeit. Wird der Feinleimgehalt gesteigert, so führt dies – wie bereits erwähnt - über einen weiten Bereich zu einer Zunahme der Packungsdichte und der Senkung des w/f-Werts. Die Folge ist ein Anstieg der Druckfestigkeit. Wird auch hier ein Feinleimgehalt von rd. 270 l/m³ überschritten, so fällt durch den gleichen Mechanismus der die Gründruckfestigkeit senkte, die 28-Tage-Druckfestigkeit ab. Die für die Verzahnung wichtige Gesteinskörnung wird auseinandergedrängt.

Die Packungsdichte ist auch für den erhärtenden Beton eine wichtige Kenngröße. Sie beschreibt wie viel Raum zwischen den Körnern der Matrix verbleibt, die noch von den vernetzenden Calciumsilikathydratphasen zu füllen sind. Liegt eine hohe Packungsdichte vor, so ist der Hohlraum schneller und besser von den festigkeitsbildenden Calciumsilikathydratphasen auszufüllen, die Festigkeit des erhärteten erdfeuchten Betons ist höher. Will man den w/z-Wert eines erdfeuchten Betons ohne die Zuhilfenahme von Fließmitteln senken, so muss der Zementgehalt - wie im vorhergehenden Abschnitt 7.3.2 beschrieben - steigen. Die zunehmende Zementmenge führt zu abnehmenden Wasserschichtdicken auf den Partikeloberflächen und zu einer Zunahme des Volumens der Reaktionsprodukte (CSH-Phasen). Beides in Kombination führt zu einer insgesamt dichteren Matrix, die Kapillarporosität sinkt.

Die beschriebenen festigkeitsbeeinflussenden Faktoren ließen sich erneut in einem dreidimensionalen Zusammenhang aus w/z-Wert, Packungsdichte und Betonfestigkeit darstellen. Es ergab sich – wie schon bei der Gründruckfestigkeit - mit guter Näherung eine Ebene, die auch funktional beschrieben werden konnte. Dies bietet auch hier die Möglichkeit die Ergebnisse in Maschinensteuerungen zu implementieren.

7.3.4 Optimierte erdfeuchte Betone

Die Vorversuche zur Wirkung einer feinststofflichen Optimierung wurden mit Quarzmehlen unterschiedlicher Feinheit durchgeführt. Es zeigte sich, dass durch die Steigerung des Anteils sehr feiner Feinststoffe die Packungsdichte der Gemische wesentlich verbessert werden konnte. Die Frage nach der Wirkungsweise der feinststofflichen Optimierung stellte sich im Rahmen der Versuche. Es konnte nachgewiesen werden, dass durch die Steigerung des Anteils sehr feiner Feinststoffe ihre Hohlraumgängigkeit verbessert wird. Sowohl die Packungsdichte der Feinststoffe $< 0,25$ mm wird dadurch gesteigert als auch die Befüllung des durch die Gesteinskörnung gebildeten Hohlraums mit Feinststoffen verbessert. Dies führte insbesondere bei sandreicheren Gesteinskörnungen zu einem deutlichen Anstieg der Packungsdichte.

Zemente neigen zu einer ausgeprägteren Agglomeration als die in den Vorversuchen verwendeten Quarzmehle. Mit einem leistungsfähigen Fließmittel konnte dies bei den zementgebundenen Systemen verhindert werden. Die so optimierten erdfeuchten Betone verhielten sich weitgehend wie die Quarzmehlgemische.

Die Zugabe von Fließmittel zu einem erdfeuchten Beton führt im sofort entschlachten Zustand nicht zum Abfall der Gründruckfestigkeit, wie die Wirkungsweise der Mittel vermuten ließe. Vielmehr wird die Packungsdichte gesteigert, was sich positiv auf die Tragfähigkeit auswirkt. Außerdem beeinflussen Kornform und der Feinststoffgehalt im grünen Zustand die Tragfähigkeit. Ein offenbar sehr komplexes System, das sich einer einfachen Beschreibung durch w/f -Wert und Packungsdichte widersetzt. Die Übertragung der mit Fließmittel optimierten Betone in das dreidimensionale Ingenieurmodell für den sofortentschlachten „grünen“ Zustand gelang aus diesem Grund nicht.

Die Druckfestigkeitsergebnisse der erhärteten optimierten Betone ließen sich dagegen in den zuvor festgestellten dreidimensionalen Zusammenhang einordnen und mittels der Ebenengleichung vorhersagen. Durch die stark gestiegene Packungsdichte der Betone war es möglich, auch mit höheren w/z -Werten Festigkeiten zu erzielen, die denen üblicher erdfeuchter Betone entsprachen.

Die Ergebnisse von Frost-Tausalz-Prüfungen (CDF-Verfahren) zeigten, dass auch die Möglichkeit besteht, die Dauerhaftigkeit mit den gleichen Parametern zu beschreiben und zu prognostizieren, die schon bei der Prognose der Gründruck- und 28-Tage-Druckfestigkeit

Anwendung fanden. Die Ergebnisse wurden wiederum durch eine Gradengleichung beschrieben und stehen somit auch hier für die Implementierung in Maschinensteuerungen zur Verfügung. Es wurde dabei festgestellt, dass die Dauerhaftigkeit durch den w/z -Wert deutlicher beeinflusst wird als die Druckfestigkeit. Nach den bisherigen Erkenntnissen kann davon ausgegangen werden, dass erdfeuchte Betone mit optimierter Feinststoffzusammensetzung bei sachgerechter Herstellung einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand aufweist, wenn der w/z -Wert 0,55 nicht übersteigt. Die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen sollten durch weitere Versuche abgesichert werden.

8 Ausblick

Mit dem Rüttelproctorverfahren ist die reproduzierbare produktionsbegleitende Prüfung von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen möglich. Die Wirkung der Stoffe auf den Wasseranspruch und die Packungsdichte des erdfeuchten Betons können ermittelt und zur weiteren Optimierung der Betonzusammensetzung und der Produktqualität genutzt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Diagramme und Gleichungen erlauben es außerdem, auf Basis von w/z - bzw. w/f -Wert, die Festigkeit im erhärteten bzw. sofort entschalteten Zustand, aber auch die Dauerhaftigkeit erdfeuchter Betone zu prognostizieren. Integriert man dies in die Maschinensteuerung, so kann dies als ein weiteres Mittel zur Qualitätskontrolle genutzt werden. So kann u.U. schon während des Produktionsprozesses entschieden werden, ob ein Produkt den Anforderungen entspricht. Steinformmaschinen entsprechen beispielsweise in ihrer Funktionsweise dem Rüttelproctorgerät. Wäre es möglich die Einfüllmenge und die Steinhöhe zu erfassen, würde dies die Anwendung der Prognosefunktionen ermöglichen.

Neben dieser Anwendungsmöglichkeit kann außerdem der Verdichtungsverlauf des erdfeuchten Betons in Abhängigkeit von der Verdichtungszeit (Bild 29) wichtige Hinweise zur richtigen Wahl der geeigneten Verdichtungsparameter geben. Ist der Wassergehalt eines erdfeuchten Betons zu hoch für die gewählte Verdichtungsintensität, so lässt sich dies aus der Zeit-/Setzungskurve ablesen. Die Zeit-/Setzungskurve als Maß für die Lagerungsdichte des Betons zeigt dann zu Beginn einen steilen Anstieg, um dann ein Plateau zu bilden. Die Probe reagiert hydrostatisch, da zuviel Wasser im Beton enthalten ist. Zu diesem Zeitpunkt muss die Maschinensteuerung reagieren und den Verdichtungsprozess abbrechen. Eine weitere Verdichtung würde zu einem nicht standfesten sofortentschalteten Beton führen. Ein zu geringer Wassergehalt äußert sich wiederum in einem sehr langsamen Anstieg der Packungsdichte. In diesem Fall muss die Verdichtungsintensität gesteigert werden, um ein

ausreichend verdichtetes Produkt herzustellen. Welche Möglichkeiten sich aus diesem charakteristischen Verhalten von erdfeuchten Betonen in Abhängigkeit vom Wassergehalt für eine noch gezieltere Maschinensteuerung bieten, sollte genauer untersucht werden.

Die gezielte feinststoffliche Optimierung von Betonen kann dazu genutzt werden die vorhandenen Ressourcen besser zu nutzen. Im Rahmen der Arbeit konnte gezeigt werden, dass sandreichere Gesteinskörnungen besonders positiv auf eine feinststoffliche Optimierung reagieren und sandreiche Betone mit hoher Packungsdichte und niedrigen Wasseranspruch hergestellt werden können. Dies bietet die Möglichkeit die häufig auftretenden Sandüberschüsse für die Produktion erdfeuchter Betone zu nutzen. Dies ist ein Beitrag zur Umweltschonung und zur Kosteneinsparung. Davon abgesehen könnte durch die Nutzung sandreicherer Gesteinskörnung auch das optische Erscheinungsbild verbessert werden.

Durch den Einsatz von leistungsfähigen Fließmitteln in Verbindung mit einer feinststofflichen Optimierung war es außerdem möglich, die Zementgehalte der hier untersuchten Kernbetone deutlich zu senken. Dies könnte vor dem Hintergrund einer zunehmenden Verknappung von Primärenergieträgern und der Forderung nach der Vermeidung von Emissionen dazu genutzt werden, ökonomischere und ökologischere Betone (bzw. Bindemittel) herzustellen.

9 Literatur

- [1] Schmidt, M. : Stoffliche und konstruktive Eigenschaften hydraulisch gebundener Tragschichten. IN: Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 51/1991.
- [2] Schmidt, M. ; Vogel, P. : Die HGT – das (un)bekannte Wesen. IN: Straße und Autobahn, Nr.9, S. 493 – 502 (1994).
- [3] Krell, J. : Die Konsistenz von Zementleim, Mörtel und Beton und ihre zeitliche Veränderung. IN: Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 46/1985.
- [4] Rendchen, K. : Einfluss der Granulometrie von Zement auf die Eigenschaften des Frischbetons und auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Festbetons. IN: Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 45/1985.
- [5] Reschke, T. : Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton. IN: Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 62/2000.
- [6] Duran, J. : Sand, Powders and Grains. An introduction to the physics of granular materials. Springer Verlag (2000), ISBN 0-387-98656-1.
- [7] Funk, J. E. ; Dinger, D. R. : Predictive process control of crowded particulate suspensions. Kluwer Academic Publishers (1994), ISBN 0-7923-9409-7.
- [8] Fuller, W. B. ; Thompson, S.E. : The law of proportioning concrete. IN: American society of civil engineers, S. 222 – 298 (3/1907).
- [9] Andreasen, H. M.; Andersen, J.: Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern. IN: Kolloid-Zeitschrift, Heft 50, S. 217 – 228 (1930).
- [10] Schwanda, F. : Der Bestwert der Kornzusammensetzung von Betonzuschlagstoffen. IN: Der Bauingenieur, Heft 2, S. 41 – 46 (1956).

- [11] Schwanda, F. : Der Hohlraumgehalt von Korngemischen. IN: Beton, Heft 1, S. 12 - 19 (1959).
- [12] Schwanda, F. : Das rechnerische Verfahren zur Bestimmung des Hohlraums und Zementleimanspruchs von Zuschlägen und seine Bedeutung für den Spannbetonbau. IN: Zement und Beton, Heft 37, S. 8 – 17 (1966).
- [13] Lange, F. ; Mörtel, H. ; Rudert, V. : Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties. IN: Cement and Concrete Research, Vol. 27, Nr. 10, S. 1481 – 1488 (1997).
- [14] Lange, F. : Gefügeuntersuchungen und Eigenschaften von Hüttensand enthaltenden Zementen. Promotionsschrift Universität Erlangen-Nürnberg (1996).
- [15] Korfiatis, G.P. ; Manikopoulos, C.N. : Maximum dry density for a continuous grain size distribution. IN: Civil engineering for practicing and design engineers, Heft 12, S. 1139 – 1158 (1984).
- [16] Gallias, J. L. ; Kara-Ali, R. ; Bigas, J. P. : The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. IN: Cement and Concrete research, Vol. 30, S. 1543 – 1549 (2000).
- [17] Nehdi, M. ; Mindness, S. ; Aitcin, P.C. : Statistical modelling of the microfiller effect on the rheology of composite pastes. IN: Advances in cement research, Heft 33, S. 37 – 46 (1997).
- [18] Voss, R. : Lagerungsdichte und Tragwerte von Böden bei Straßenbauten. IN: Straße und Autobahn, Heft 4, S. 115 – 124 (1961).
- [19] Schellenberg, K. : Der Einfluss der Kornzusammensetzung von Gemischen aus Muschelkalk auf Proctordichte und optimalen Wassergehalt. IN: Die Naturstein-Industrie, Nr. 2, S. 39 – 43 (1983).
- [20] Ulrich, M. : Korrelation zwischen Korngrößenverteilung und Proctordichte. IN: Fraunhofer IRB Verlag (2002), ISBN 3-8167-6490-8.

- [21] Schubert, H. : Kapillarität in porösen Feststoffsystemen. Springer Verlag (1982), ISBN 3-540-11835-7.
- [22] Rumpf, H. : Mechanische Verfahrenstechnik. Carl Hanser Verlag (1975), ISBN 3-446-11987-6.
- [23] Arquíe, G. : Théorie générale de l'influence de la teneur en eau sur les résultats du compactage. IN: Bulletin de liaison des Laboratoires des Pont et Chaussées, Nr. 64, S. 145 – 158 (1973).
- [24] Schiel, F. : Der durch Kapillarwirkung bedingte Zusammenhalt zweier benetzter Körper. IN: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, Nr. 4, S. 200 – 208 (1943).
- [25] Schütz, W. ; Schubert, H. : Der Einfluss von Anpresskräften auf die Partikelhaftung. IN: Chem.-Ing.-Tech., Nr. 6, S. 567 (1976).
- [26] Schubert, H.: Kapillardruck und Zugfestigkeit von feuchten Haufwerken aus körnigen Stoffen. IN: Chem.-Ing.-Tech., Nr. 6, S. 396 – 401 (1973).
- [27] Borho, K. ; Polke, R. ; Wintermantel, K. ; Schubert, H. ; Sommer, K. : Produkteigenschaften und Verfahrenstechnik. IN: Chem.-Ing.-Tech. Nr. 8, S. 792 – 808 (1991).
- [28] Wierig, H.J. : Zur Frage der Theorie und Technologie des grünen Betons. IN: Mitteilungen aus dem Institut für Materialprüfung und Forschung des Bauwesens der Technischen Universität Hannover (1971).
- [29] Kézdi, Á.: Handbuch der Bodenmechanik. VEB Verlag für Bauwesen Berlin – Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften Budapest (1969).
- [30] Shah, S. ; Swartz, S. E. ; Ouyang, C. : Fracture Mechanics of Concrete: Applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials. John Wiley & Sons (1995), ISBN 0-471-30311-9.

- [31] Schmidt, M. ; Bohlmann, E. ; Vogel, P. ; Westermann, B.: Einfluss der Zusammensetzung und der Verdichtung von Walzbeton auf dessen Gebrauchseigenschaften. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvertrag des Bundesverkehrsministeriums, FE-Nr.: 08.124.G93L (1996).
- [32] Schneider, U. ; Diederichs, U. ; Rosenberger, W. : Eigenschaften und Verwendung von Normalbetonen mit Basalt-Zuschlag Teil 2. IN: Betonwerk+Fertigteil-Technik, Heft 12, S. 739 – 743 (1982).
- [33] Schneider, U. ; Diederichs, U. ; Rosenberger, W. : Eigenschaften und Verwendung von Normalbetonen mit Basalt-Zuschlag Teil 3. IN: Betonwerk+Fertigteil-Technik, Heft 11, S. 36 – 40 (1983).
- [34] Bonzel, J.: Beton bestimmter Festigkeit. IN: Zement-Taschenbuch, Bauverlag.
- [35] Bilgeri, P.: Splittbetone für Pflastersteine mit hohem Frost-Tausalz widerstand. IN: Die Natursteinindustrie, Heft 8, S. 38 – 43 (1989).
- [36] Cannon, R.: Proportioning no-slump concrete for expanded applications. IN: Concrete international, Nr. 8, S. 43 – 47 (1982).
- [37] ACI Committee 211: Guide for selecting proportions for no-slump concrete
- [38] Goldman, A. ; Bentur, A.: Properties of cementitious systems containing silica. IN: Advanced cement based materials, Heft 5, S. 209 – 215 (1994).
- [39] Wierig, H. J.: Einige Beziehungen zwischen den Eigenschaften von „grünen“ und „jungem“ Betonen und denen des Festbetons. IN: Betontechnische Berichte, Betonverlag Düsseldorf, S. 151 – 172 (1971).
- [40] Locher, F.W.: Die Festigkeit des Zements. IN: beton, Nr. 7, S. 247 – 249 (1976).
- [41] Locher, F.W.: Die Festigkeit des Zements. IN: beton, Nr. 8, S. 283 – 286 (1976).
- [42] Bonzel, J. ; Krell, J. : Konsistenzprüfung von Frischbeton. IN: beton, Nr. 2, S. 61 – 66 (1984).

- [43] Bonzel, J. ; Krell, J. : Konsistenzprüfung von Frischbeton. IN: beton, Nr. 3, S. 101 – 104 (1984).
- [44] Nguyen, D. C.: Machine de compactage en laboratoire d' éprouvettes de graves traitées aux liants hydrauliques. IN : Bulletin Liaison Laboratoire Ponts et Chaussees, Nr. 86, S. 85 – 92 (1976).
- [45] Hugot, A. ; Lichtmann, M.: Optimale Mischungen von Betonen. IN: BetonWerk International, Nr. 6, S. 36 – 46 (2000).
- [46] Häring, C.: Herstellung von erdfeuchten und direktausgeschalteten Probekörpern. IN: Betonwerk + Fertigteil-Technik, Nr. 7, S. 100 – 102 (2000).
- [47] Nguyen, D.C.; Mulders, J.: Étude de la compacité limite et de la difficulté de compactage des mélanges granulaires à la machine de vibrocompression à paramètres contrôlés (VCPC). IN : Bulletin Liaison Laboratoire Ponts et Chaussees, Nr. 169, S. 49 – 63 (1990).
- [48] prEN 13286-2: Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 2: Test methods for laboratory dry density and water content – Proctor compaction.
- [49] prEN 13286-3: Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 3: Test methods for laboratory dry density and water content – Vibrocompression with controlled parameters.
- [50] prEN 13286-4: Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 4: Test methods for laboratory dry density and water content – Vibrating hammer.
- [51] prEN 13286-5: Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 4: Test methods for laboratory dry density and water content – Vibrating table.
- [52] NT (nordtest method) Build 427: compactibility with IC-Tester.
- [53] Altmann, W.: Einfluss von Kohäsion und innerer Reibung auf das Verdichtungsverhalten des Frischbetons. IN: betontechnik, Nr. 4, S. 111 – 115 (1989).

- [54] Bentrup, H.: Untersuchungen zur Prüfung der Frostwiderstandsfähigkeit von Ziegeln im Hinblick auf lange Lebensdauer. IN: Promotionsschrift der Technischen Universität Hamburg-Harburg (1992).
- [55] Day, R. L.; Shi, C.: Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural-pozzolan cement paste. IN: Cement and Concrete Research, Nr. 8, S. 1485 – 1491 (1994).
- [56] Krenkler, K.: Chemie des Bauwesens. Band 1: Anorganische Chemie. Springer-Verlag 1980.
- [57] Schmidt, C.: Optimierung der stofflichen Zusammensetzung selbstverdichtender Betone. Diplomarbeit Universität Kassel 2002.
- [58] Kalb, D.: Rheologisches Verhalten von Feinstoffen in Abhängigkeit von ihrer Sieblinie. Diplomarbeit Universität Kassel 2001.
- [59] Dobrinski, P.; Krakau, G.; Vogel, A.: Physik für Ingenieure. Teubner-Verlag Stuttgart (1988), ISBN: 3-519-16501-5.
- [60] Versluys, J.: De capillaire Werking in den Boden. Dissertation TU–Delft (1916).
- [61] Terzaghi, K.: Theoretical soil mechanics. J. Wiley & Sons, New York (1943).
- [62] Wischer, W.; Lusche, M.: Einfluss der inneren Spannungsverteilung auf das Tragverhalten von druckbeanspruchten Normal- und Leichtbeton. In: beton, Heft 8, S. 343 – 347 (1972).
- [63] Wischer, W.; Lusche, M.: Einfluss der inneren Spannungsverteilung auf das Tragverhalten von druckbeanspruchten Normal- und Leichtbeton. In: beton, Heft 9, S. 397 – 403 (1972).
- [64] Stark, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton. Der Baustoff als Werkstoff. Birkhäuser Verlag (2001).

- [65] Brnic, T. : Erhöhung der Tragfähigkeit von Zisternenabdeckungen. Diplomarbeit Universität Kassel (2000).
- [66] Hummel, A.: Das Beton–ABC, 12. Auflage, Verlag Ernst & Sohn (1959).
- [67] Funk, J. E.(Jr.); Dinger, D. R.; Funk, J. E.: Preparation of highly loaded coal-water Mixture: Co – Al. IN: Proceedings of the 4th International Symposium of Coal Slurry Combustion, Vol. 3 (1982).
- [68] Rüsç, H.; Kordina, K.; Hilsdorf, H.: Der Einfluss des mineralischen Charakters der Zuschläge auf das Kriechen von Beton. IN: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 146 (1962).
- [69] Stark, J.; Wicht, B.: Zement und Kalk. Der Baustoff als Werkstoff. Birkhäuser –Verlag. ISBN: 3-7643-6216-2.
- [70] Fernandes, I.D.; Ferret, L.; Khal, C.A.; Endres, J.C.T.; Maegawa, A.: Crystalline microstructure modification of brazilian coal fly ash with alkaline solution. IN: www.flyash.info
- [71] Okamura, Hajime; Ozawa, Kazumasa: Mix design for self-compacting concrete (Translation from proceedings of JSCE, Nr. 396/V – 24, 1994.8). IN: concrete library of JSCE, Nr. 25, S. 107 – 120 (1995).
- [72] Puntke, W.: Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken. Forschen, messen, optimieren. IN: beton, Nr. 5, S.242 – 248 (2002).
- [73] Fagerlund, G.: The critical degree of saturation. Method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. IN: materials and structures, Nr. 10, S. 217 – 229 (1977).
- [74] Palecki, S.; Setzer, M. J.: Durability of High Performance Concrete under Frost Attack. IN: 6th International Symposium on Utilization of High Strength / High Performance Concrete, S. 1235 – 1246, Leipzig (2002).

- [75] Fagerlund, G.: Freeze–Thaw Resistance of High-Performance Concrete. IN: 6th International Symposium on Utilization of High Strength / High Performance Concrete, S. 45 – 62, Leipzig (2002).
- [76] Schmidt, M.: Erdfeuchte Betone: Anforderungen, Verarbeitbarkeit, Grünstandfestigkeit und Prüfverfahren. IN: Betonwerk + Fertigteil –Technik, Nr. 11, S. 14 – 24 (1999).
- [77] Westman, A.E.R. ; Hugill, H.R. : The packing of particles. IN: Journal of the american ceramic society, Heft 13, S. 767 –779 (1930).
- [78] Reisner, A. : Erdfeuchter Beton. Diplomarbeit Universität Kassel (2001).

Anhang A:

1 Chemische Zusammensetzung der Feinststoffe

	CEM I 32,5 R Werk B	CEM I 52,5 R Werk B	CEM III/A 32,5 Werk A
SiO ₂	18,02	17,93	29,22
Al ₂ O ₃	5,85	5,94	8,68
Fe ₂ O ₃	4,47	4,48	1,38
Mn ₂ O ₃	0,68	0,60	-
CaO	63,18	62,90	50,25
MgO	1,05	0,87	
SO ₃	2,85	3,00	1,55
K ₂ O	0,82	0,83	0,79
Na ₂ O	0,07	0,08	0,30
CO ₂	1,85	1,80	-
Cl	0,010	0,010	0,12
Unlös. Rückstand	0,24	0,31	0,65
Na ₂ O äquiv.	0,61	0,63	0,82

Tabelle A1: Chemische Zusammensetzung der Zemente [M.-%]

	CEM I 32,5 R Werk B	CEM I 52,5 R Werk B	CEM III/A 32,5 Werk A
Wasseranspruch	25,5 M.-%	30,8 M.-%	28,0 M.-%
Erstarrungsbeginn	170 Min.	120 Min.	272 Min.
Mahlfeinheit (Blaine)	2.890 cm ² /g	5.510 cm ² /g	3.971 cm ² /g
Normdruckfestigkeit 1d	13,6 N/mm ²	31,9 N/mm ²	27,8 N/mm ²
Normdruckfestigkeit 28d	49,8 N/mm ²	64,3 N/mm ²	47,0 N/mm ²

Tabelle A2: Physikalische und mechanische Eigenschaften der Zemente

	Flugasche FA	Flugasche FFA
SiO ₂	50,00	55,30
Al ₂ O ₃	24,40	19,00
Fe ₂ O ₃	6,90	4,50
CaO	6,60	6,70
MgO	1,90	1,70
K ₂ O	4,80	3,30
Na ₂ O	1,10	1,80

Tabelle A3: Chemische Zusammensetzung der Flugaschen [M.-%]

2 Gesteinskörnung

	0/2r	2/8r	8/16r	0/2g	2/5g	5/8g	8/11g	11/16g
[mm]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
<0,125	5,30	-	-	5,60	-	-	-	-
0,125	14,80	-	-	7,00	-	-	-	-
0,25	19,20	-	-	9,70	-	-	-	-
0,50	28,30	-	-	21,40	-	-	-	-
1,00	28,80	0,40	-	47,30	2,20	-	-	-
2,00	3,60	12,60	-	8,90	62,60	-	-	-
4,00	-	30,70	-	-	34,80	2,80	-	-
5,00	-	54,10	11,20	-	0,40	97,20	1,30	-
8,00	-	1,20	34,00	-	-	0	96,40	2,10
11,00	-	-	53,10	-	-	-	2,30	96,00
16,00	-	-	1,80	-	-	-	-	1,90

Tabelle A4: Zusammensetzung der Teilfraktionen

	A16 – 0/2r – 2/16r	B16 – 0/2r – 2/16r	C16 – 0/2r – 2/16r	A16 – 0/2r – 2/16g
[mm]	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%
0,125	1,1	2,5	3,3	1,2
0,25	4,3	7,1	12,5	4,4
0,50	8,5	16,3	24,3	8,5
1,00	14,6	29,9	42,2	14,7
2,00	21,0	43,8	60,3	21,4
4,00	39,4	59,9	73,0	36,6
5,00	52,7	70,9	81,0	43,5
8,00	64,6	79,2	86,9	60,9
11,00	78,4	86,4	91,3	76,5
16,00	99,2	97,1	98,0	99,6

Tabelle A5: Sieblinienverläufe der verwendeten Gesteinskörnungen

	B16 – 0/2r – 2/16g	C16 – 0/2r – 2/16g	A8 – 0/2r – 2/8g	A8 – 0/2g – 2/8g
[mm]	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%
0,125	2,5	3,3	1,9	2,0
0,25	9,6	12,6	7,2	4,5
0,50	18,8	24,9	14,0	8,0
1,00	32,4	42,3	24,1	15,6
2,00	46,6	60,6	35,2	33,3
4,00	60,9	73,3	58,9	58,6
5,00	68,2	79,3	71,1	71,7
8,00	80,0	87,7	100	100
11,00	88,9	93,3	-	-
16,00	99,8	99,9	-	-

Tabelle A6: Sieblinienverläufe der verwendeten Gesteinskörnungen

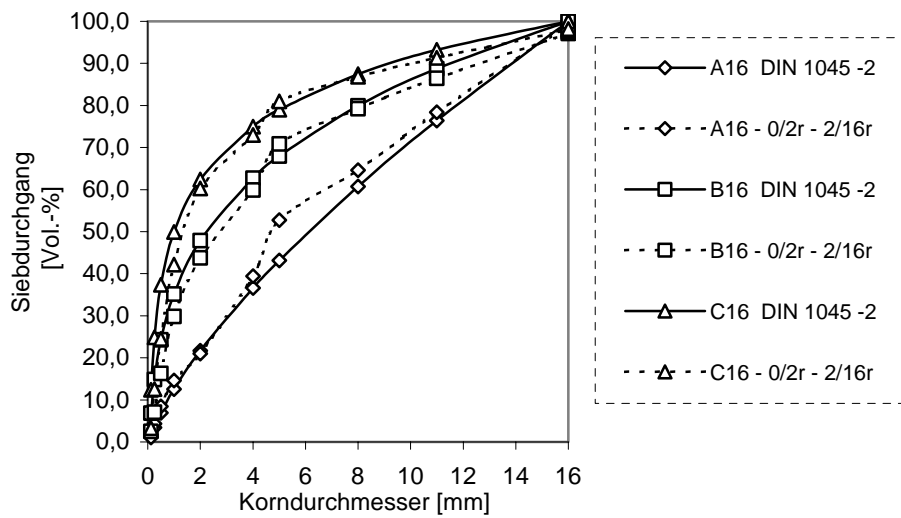


Bild A1: Sieblinienverläufe nach DIN 1045-2 und Verläufe der verwendeten Kornzusammensetzung

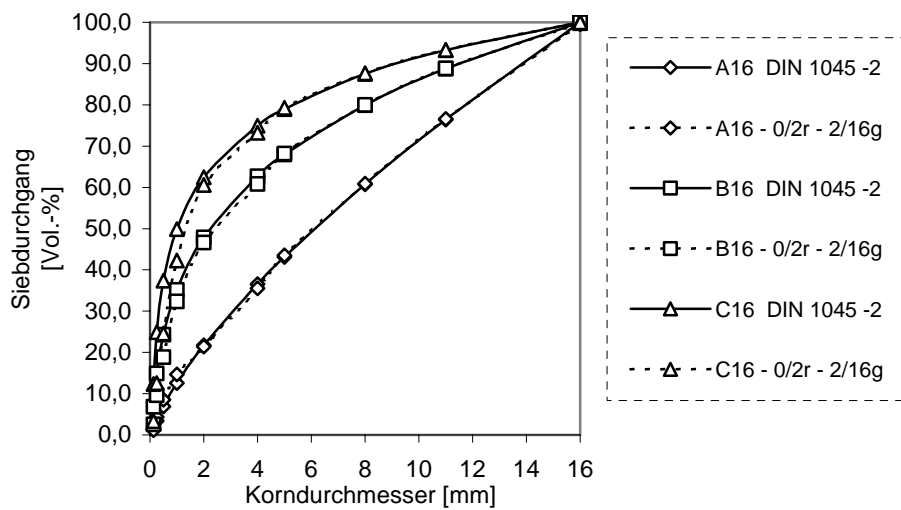


Bild A2: Sieblinienverläufe nach DIN 1045-2 und Verläufe der verwendeten Kornzusammensetzung

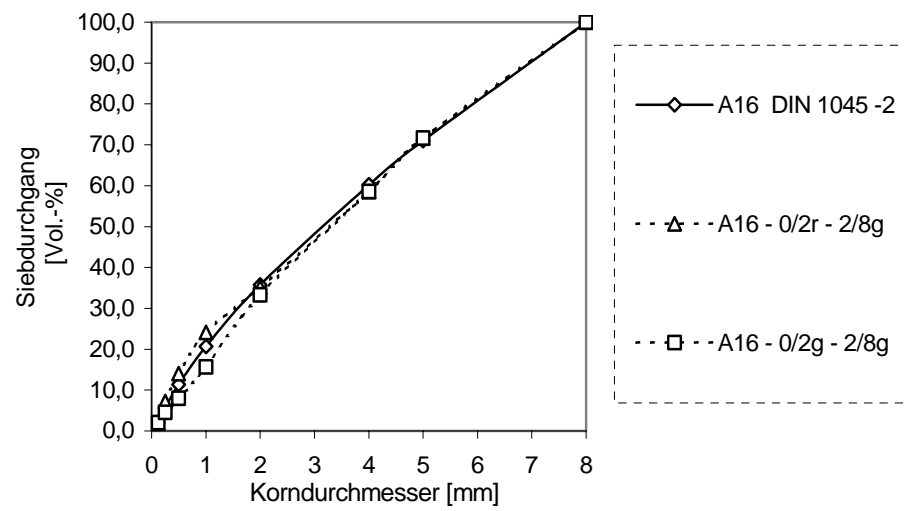


Bild A3: Sieblinie A8 nach DIN 1045-2 und Verläufe der verwendeten Kornzusammensetzung

Anhang B:

1 Überlagerung der Betoneigenschaften am Punkt der optimalen Packungsdichte

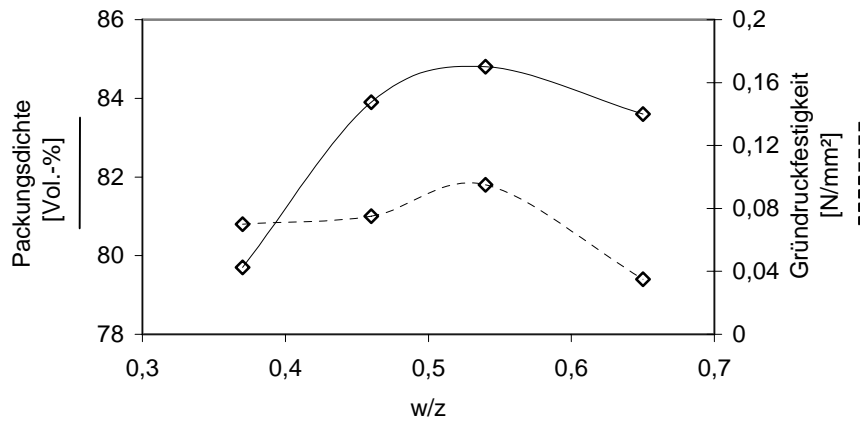


Bild B1: Überlagerung von Packungsdichte und Gründruckfestigkeit (B16r – 0/2r – 2/16r; 250 kg/m³ CEM I 32,5 R Werk B)

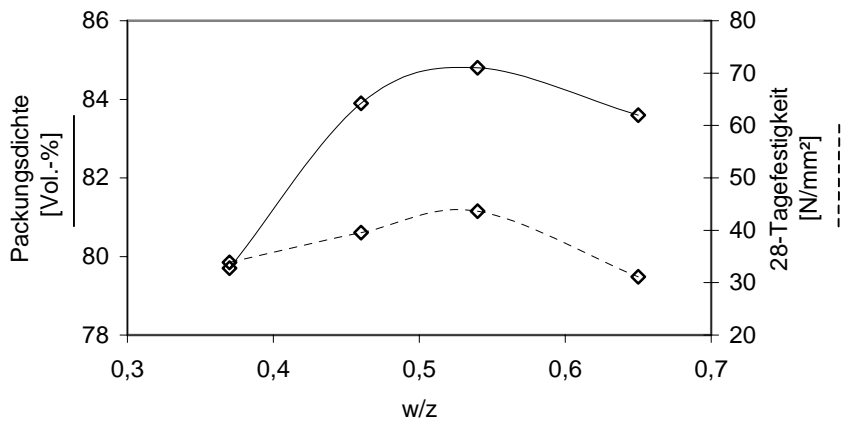


Bild B2: Überlagerung von Packungsdichte und 28-Tagefestigkeit (B16r – 0/2r – 2/16r; 250 kg/m³ CEM I 32,5 R Werk B)

2 Entwicklung der Gründruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Feinleimgehalt

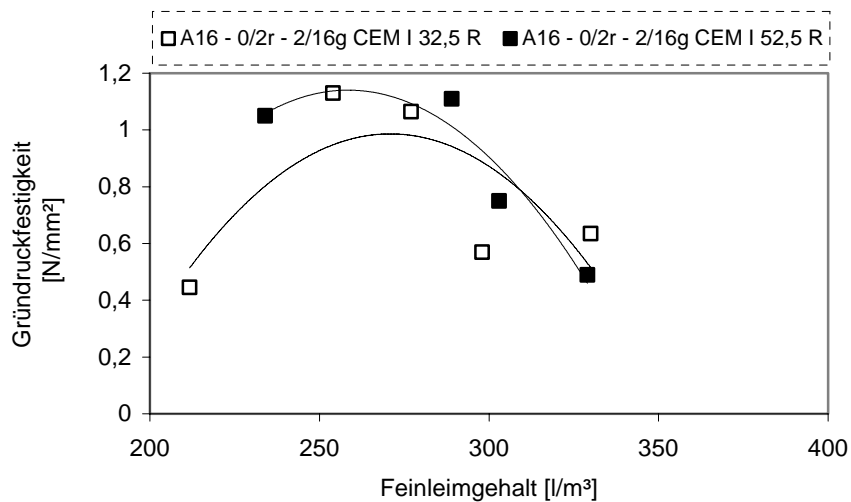


Bild B3: Entwicklung der Gründruckfestigkeit über den Feinleimgehalt (Sieblinie A16)

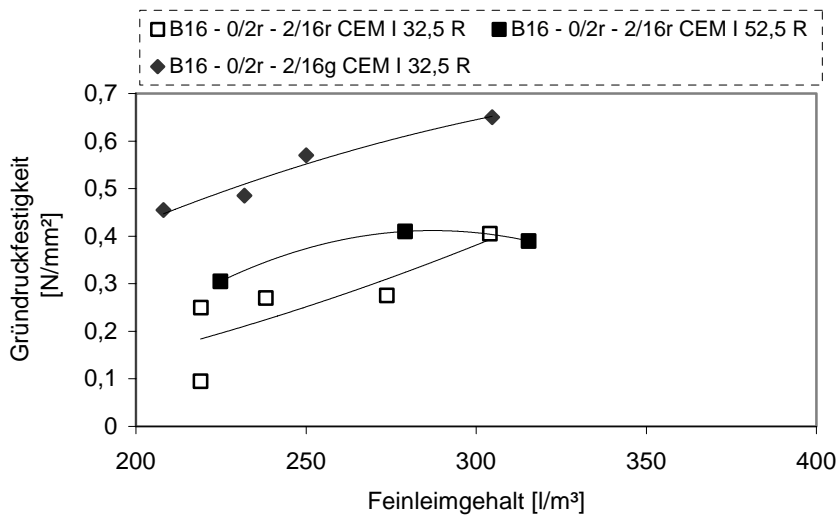


Bild B4: Entwicklung der Gründruckfestigkeit über den Feinleimgehalt (Sieblinie B16)

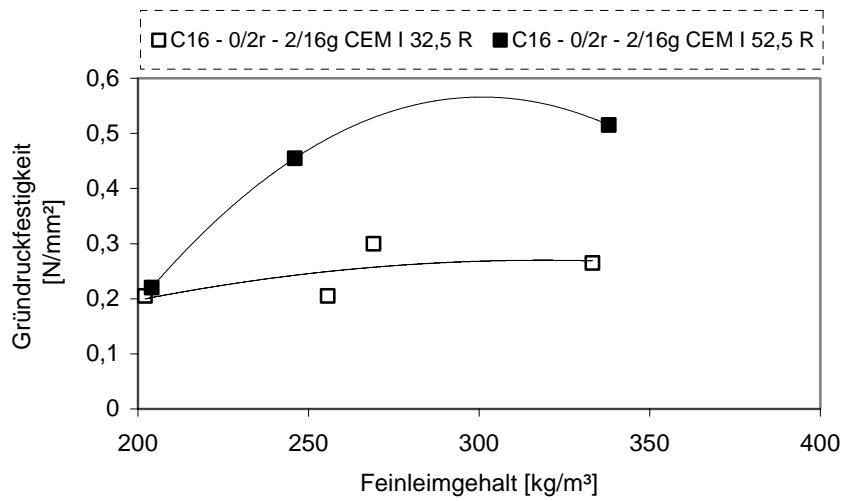


Bild B5: Entwicklung der Gründruckfestigkeit über den Feinleimgehalt (Sieblinie C16)

A16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B						
w/f	Zementgehalt [kg/m³]	Gründruckfestigkeit [N/mm²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m³]	Wassergehalt [l/m³]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,4	293	0,445	83,3	212	117	87,8
0,28	418	1,13	84	253	118	87,8
0,26	474	1,065	84,5	277	124	87,3
0,24	530	0,57	80,5	298	127	86,5
0,21	621	0,635	79,1	330	130	86,1

A16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 52,5 R Werk B						
w/f	Zementgehalt [kg/m³]	Gründruckfestigkeit [N/mm²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m³]	Wassergehalt [l/m³]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,34	352	1,05	82	234	120	87,4
0,29	471	1,11	83,3	288	136	86,0
0,26	522	0,75	79,2	303	135	85,6
0,23	596	0,49	75,3	329	137	85,0

B16 - 0/2r - 2/16r - CEM I 32,5 R Werk B						
w/f	Zementgehalt [kg/m³]	Gründruckfestigkeit [N/mm²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m³]	Wassergehalt [l/m³]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,56	247	0,095	84,3	219	139	85,9
0,42	295	0,25	84,7	219	124	87,3
0,38	339	0,27	85,5	238	129	86,9
0,35	407	0,275	84,7	274	143	85,6
0,26	522	0,405	81,6	303	135	85,9

B16 - 0/2r - 2/16r - CEM I 52,5 R Werk B						
w/f	Zementgehalt [kg/m³]	Gründruckfestigkeit [N/mm²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m³]	Wassergehalt [l/m³]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,45	291	0,305	83,5	225	131	86,5
0,37	403	0,41	84,3	279	149	85,0
0,35	469	0,39	83,9	315	164	83,6

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B						
w/f	Zementgehalt [kg/m³]	Gründruckfestigkeit [N/mm²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m³]	Wassergehalt [l/m³]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,4	288	0,455	83,6	208	115	88,0
0,38	330	0,485	85,1	232	125	87,2
0,31	396	0,57	84,3	250	122	87,4
0,26	523	0,65	83	305	136	86,0

C16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B						
w/f	Zementgehalt [kg/m³]	Gründruckfestigkeit [N/mm²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m³]	Wassergehalt [l/m³]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,44	265	0,205	77,7	202	117	87,2
0,41	349	0,205	81,4	256	143	85,2
0,34	405	0,3	82,1	269	138	85,7
0,28	553	0,265	81	333	155	84,0

C16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 52,5 R Werk B						
w/f	Zementgehalt [kg/m³]	Gründruckfestigkeit [N/mm²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m³]	Wassergehalt [l/m³]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,44	267	0,22	78,7	204	118	87,2
0,38	351	0,455	81,8	246	133	86,1

Tabelle B1: Entwicklung der Packungsdichte über den Feinleimgehalt

3 Zusammenhang zwischen w/f-Wert und Feinleimgehalt

A16 - 0/2r - 2/16g			
w/f	Zementgehalt [kg/m ³]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m ³]
0,4	293	83,3	212
0,28	418	84	253
0,26	474	84,5	277
0,24	530	80,5	298
0,21	621	79,1	330

B16 - 0/2r - 2/16g			
w/f	Zementgehalt [kg/m ³]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m ³]
0,56	247	84,3	219
0,42	295	84,7	219
0,38	339	85,5	238
0,35	407	84,7	274
0,26	522	81,6	303

C16 - 0/2r - 2/16g			
w/f	Zementgehalt [kg/m ³]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m ³]
0,44	267	78,7	204
0,38	351	81,8	246
0,29	552	80,6	338

Tabelle B2: Verhältnis Zementleimmenge zu w/z-Wert

4 Packungsdichte der Gesteinskörnung

	Packungsdichte [Vol.-%]
A16 – 0/2r – 2/16r	76,2
B16 – 0/2r – 2/16r	79,6
C16 – 0/2r – 2/16r	79,1
A16 – 0/2r – 2/16g	74,1
B16 – 0/2r – 2/16g	78,2
C16 – 0/2r – 2/16g	77,5

Tabelle B3: trocken gerüttelte Gesteinskörnungen
(Rüttelzeit 30 Sekunden – 60Hz)

5 Rahmenscherversuche



Bild B6: Rahmenscherprüfstand



Bild B7: Filterplatten und Scherrahmen

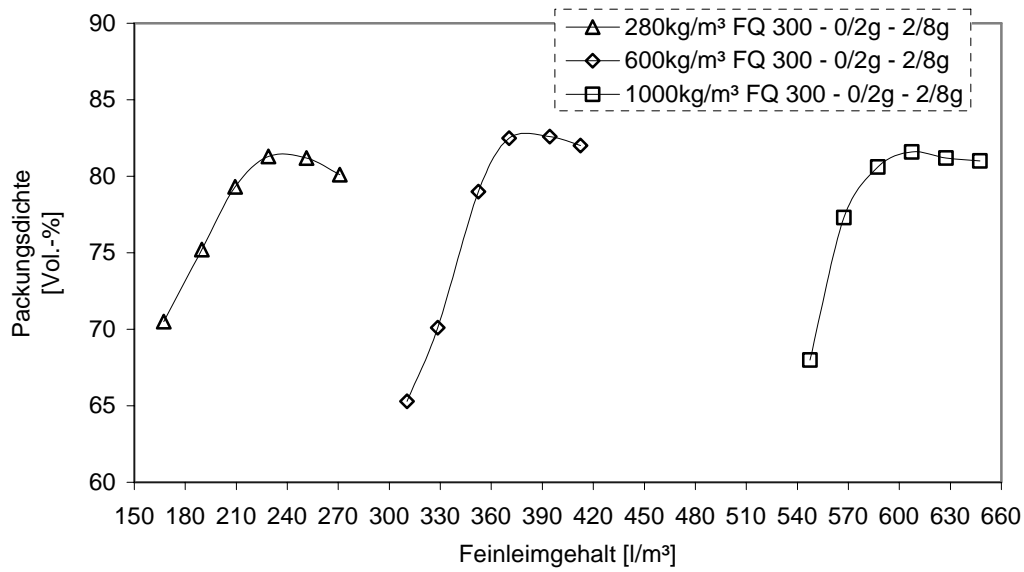


Bild B8: Packungsdichte A8 – 0/2g – 2/8g

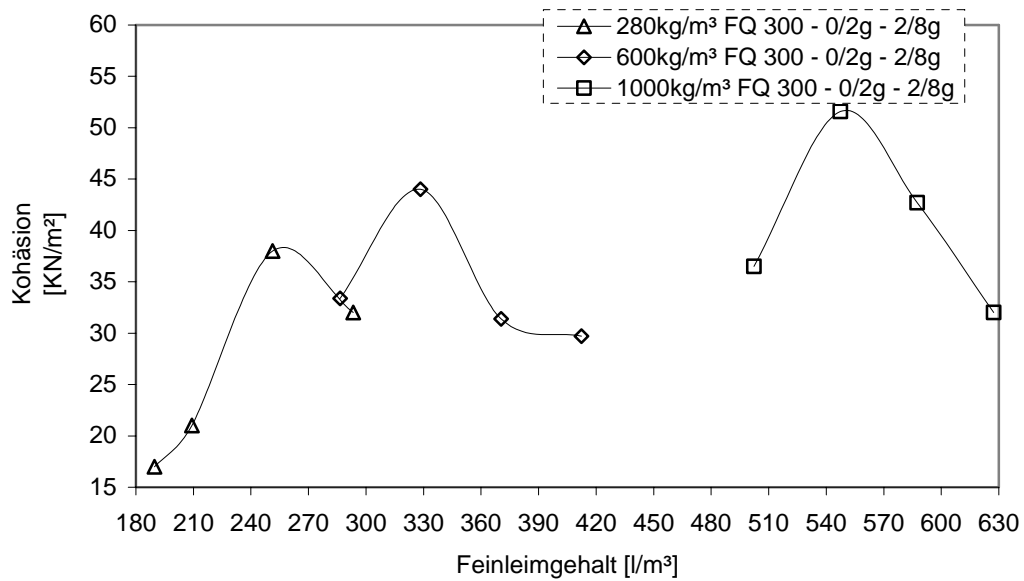


Bild B9: Kohäsionswerte A8 – 0/2g – 2/8g

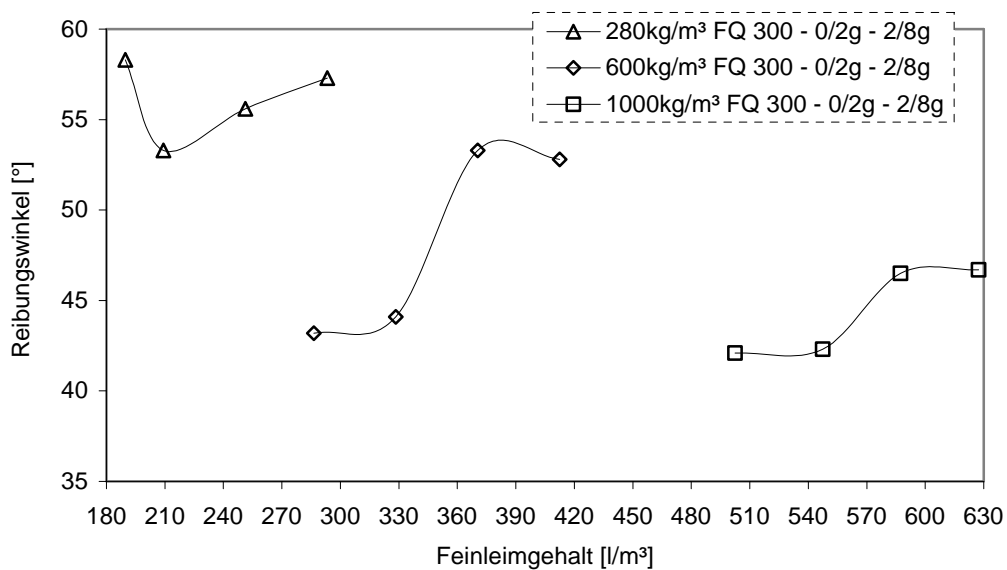


Bild B10: Reibungswinkel A8 – 0/2g – 2/8g

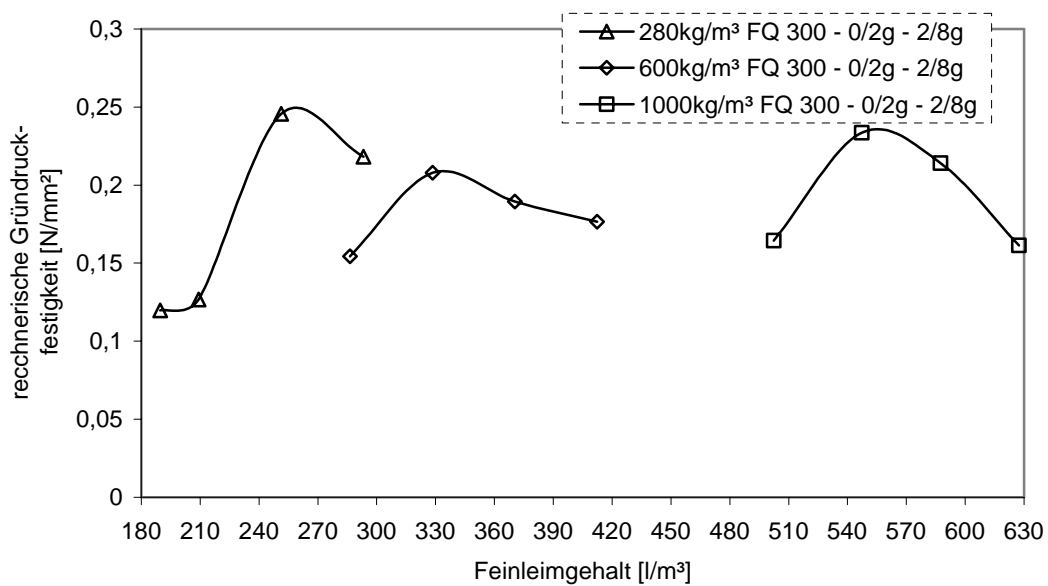


Bild B11: rechnerische Gründruckfestigkeit A8 – 0/2g – 2/8g

280kg/m ³ Feinqarz FQ300			
w/f	Kohäsion [KN/m ²]	Reibungswinkel [°]	Rechnerische Grünstandfestigkeit [N/mm ²]
0,3	4,3	54,3	0,03
0,37	5,6	56	0,04
0,52	28,7	52,1	0,17
0,67	19,6	53,7	0,12

600kg/m ³ Feinqarz FQ300			
w/f	Kohäsion [KN/m ²]	Reibungswinkel [°]	Rechnerische Grünstandfestigkeit [N/mm ²]
0,17	24,7	52,1	0,14
0,24	28	53,1	0,17
0,31	16,1	48,4	0,08
0,34	7,4	49,5	0,04

1000kg/m ³ Feinqarz FQ300			
w/f	Kohäsion [KN/m ²]	Reibungswinkel [°]	Rechnerische Grünstandfestigkeit [N/mm ²]
0,125	31	47,7	0,16
0,17	35,2	50,7	0,20
0,21	21,4	51,8	0,12
0,25	17,6	40,7	0,08

Tabelle B4: Scherparameter der Mischungszusammensetzung A8 – 0/2r – 2/8g

280kg/m ³ Feinqarz FQ300			
w/f	Kohäsion [KN/m ²]	Reibungswinkel [°]	Rechnerische Grünstandfestigkeit [N/mm ²]
0,3	17	58,3	0,12
0,37	21	53,3	0,13
0,52	38	55,6	0,25
0,67	32	57,3	0,22

600kg/m ³ Feinqarz FQ300			
w/f	Kohäsion [KN/m ²]	Reibungswinkel [°]	Rechnerische Grünstandfestigkeit [N/mm ²]
0,1	33,4	43,2	0,15
0,17	44	44,1	0,21
0,24	31,4	53,3	0,19
0,31	29,7	52,8	0,18

1000kg/m ³ Feinqarz FQ300			
w/f	Kohäsion [KN/m ²]	Reibungswinkel [°]	Rechnerische Grünstandfestigkeit [N/mm ²]
0,125	36,5	42,1	0,16
0,17	51,6	42,3	0,23
0,21	42,7	46,5	0,21
0,25	32	46,7	0,16

Tabelle B5: Scherparameter der Mischungszusammensetzung A8 – 0/2g – 2/8g

6 Einfluss von Feinststoff und Gesteinskörnung auf die Tragfähigkeit im grünen Zustand

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5R Werk B							
w/f	Zementgehalt [kg/m³]	Gründruckfestigkeit [N/mm²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleim [l/m³]	Wasser [l/m³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,27	310	0,395	79,2	184	84	12,4	90,6
0,30	316	0,565	81,3	196	95	9,2	89,7
0,33	320	0,72	83,4	209	106	6	88,7
0,36	325	0,765	83,7	222	117	4,6	87,7
0,39	325	0,58	82,6	232	127	4,2	86,7

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B - 7,0 kg/m³ FM 1254							
w/f	Zementgehalt [kg/m³]	Gründruckfestigkeit [N/mm²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleim [l/m³]	Wasser [l/m³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,19	291	0,295	77,8	149	55	16,7	93,45
0,22	310	0,975	83,5	168	68	9,7	92,5
0,25	313	0,855	84,9	179	78	7,3	91,6
0,28	310	0,72	84,6	187	87	6,7	90,75

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B - Flugasche FA							
w/f	Zement- / Flugaschegehalt [kg/m³]	Gründruckfestigkeit [N/mm²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleim [l/m³]	Wasser [l/m³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,30	180/93	0,215	78,7	179	82	13,1	90,6
0,33	188/97	0,31	80,8	195	94	9,8	89,6
0,36	198/102	0,535	84,7	215	108	4,5	88,6
0,40	195/100	0,41	85,1	223	118	3,1	87,6
0,43	197/101	0,285	84,8	234	128	2,4	86,6

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B - Flugasche FA							
w/f	Zement- / Flugaschegehalt [kg/m³]	Gründruckfestigkeit [N/mm²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleim [l/m³]	Wasser [l/m³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,31	151/110	0,175	77,7	176	81	14,2	90,6
0,34	163/118	0,375	82,3	197	95	8,2	89,6
0,37	174/124	0,395	85,3	217	109	3,2	88,6
0,41	168/122	0,35	85,7	224	119	2,4	87,6
0,44	169/123	0,27	85	234	128	0,6	86,6

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B - Flugasche FA - 7kg/m³ FM 1254							
w/f	Zement- / Flugaschegehalt [kg/m³]	Gründruckfestigkeit [N/mm²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleim [l/m³]	Wasser [l/m³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,17	182/94	0,055	80,5	145	47	14,8	94,5
0,20	188/97	0,385	82,1	158	57	12,2	93,5
0,23	195/101	0,415	84	173	68	9,2	92,5
0,26	203/105	0,315	86,1	190	80	5,9	91,5
0,30	197/102	0,26	85,7	196	90	5,4	90,5

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B - Flugasche FA - 7kg/m³ FM 1254							
w/f	Zement- / Flugaschegehalt [kg/m³]	Gründruckfestigkeit [N/mm²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleim [l/m³]	Wasser [l/m³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,17	157/113	0,09	79,5	144	46	15,9	94,5
0,20	165/120	0,315	82,6	160	57	11,7	93,5
0,24	165/120	0,295	83,6	172	68	9,6	92,5
0,27	172/124	0,305	86,3	188	80	5,7	91,5
0,31	168/122	0,185	86	195	90	5	90,5

Tabelle B6: Packungsdichte und Gründruckfestigkeit von erdfuchten Betonen mit Flugasche- und Fließmittelzugabe (B16 - 0/2r - 2/16g)

7 Rücktrochnungsversuche

270 kg/m³ KSM C, B16 - 0/2r - 2/16g, w/f = 0,43 - Pk = 84 Vol.-%

absoluter Wasserverlust [g]	relativer Wassergehalt [-]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]
0	1	0,5
20	0,92	0,86
29	0,884	1,13
30	0,12	1,08
37	0,852	1,54
100	0,6	1,63
134	0,464	1,99
150	0,4	1,96
250	0	2,29

400 kg/m³ KSM C, B16 - 0/2r - 2/8g, w/f = 0,29 - Pk = 82 Vol.-%

absoluter Wasserverlust [g]	relativer Wassergehalt [-]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]
0	1	0,795
7	0,972	1,02
10	0,96	1,13
20	0,92	1,37
47	0,812	1,35
55	0,78	1,49
133	0,468	1,83
250	0	1,82

270 kg/m³ KSM C, B16 - 0/2r - 2/16r, w/f = 0,45 - Pk = 85 Vol.-%

absoluter Wasserverlust [g]	relativer Wassergehalt [-]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]
0	1,00	0,09
0	1,00	0,1
26	0,90	0,21
28	0,90	0,2
112	0,59	0,3
119	0,56	0,31
121	0,55	0,37
133	0,51	0,35
270	0,00	0,62

240 kg/m³ FA, B16 - 0/2r - 2/16g, w/f = 0,45 - Pk = 88 Vol.-%

absoluter Wasserverlust [g]	relativer Gehalt [-]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]
0	1,00	0,07
0	1,00	0,06
16	0,93	0,12
26	0,89	0,17
46	0,81	0,24
47	0,80	0,23
106	0,56	0,48
107	0,55	0,4
153	0,36	0,87
240	0,00	0,94

Tabelle B7: Messwerte aus Trocknungsversuchen

8 Dreidimensionales Prognosemodell der Gründruckfestigkeit

B16 - 0/2r - 2/16g					
w/f	Zementgehalt [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m ³]	Wassergehalt [l/m ³]
0,46	234	0,3	81,5	183	108
0,46	235	0,375	81,8	184	108
0,46	240	0,445	83,1	188	110
0,46	240	0,405	83,3	188	110
0,46	230	0,165	79,9	180	106

B16 - 0/2r - 2/16g					
w/f	Zementgehalt [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m ³]	Wassergehalt [l/m ³]
0,38	274	0,48	80,5	193	104
0,38	275	0,44	80,8	193	105
0,38	279	0,735	81,9	196	106
0,38	283	0,765	83,3	199	108
0,38	286	0,84	84,1	201	109

B16 - 0/2r - 2/16g					
w/f	Zementgehalt [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m ³]	Wassergehalt [l/m ³]
0,33	308	0,55	79,8	201	102
0,33	313	0,73	81,2	204	103
0,33	317	0,745	82,1	207	105
0,33	321	0,925	83,2	209	106
0,33	324	1,115	84,1	211	107

B16 - 0/2r - 2/16g					
w/f	Zementgehalt [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m ³]	Wassergehalt [l/m ³]
0,29	348	0,705	80,4	81	101
0,29	350	0,73	80,9	82	102
0,29	354	1	81,9	83	103
0,29	360	1,025	83,2	221	104
0,29	363	1,235	83,9	222	105

Tabelle B8: Datenbasis des dreidimensionalen Systems aus w/f-Wert, Packungsdichte und Gründruckfestigkeit

9 Rechengang zur Bestimmung der Flächenfunktion

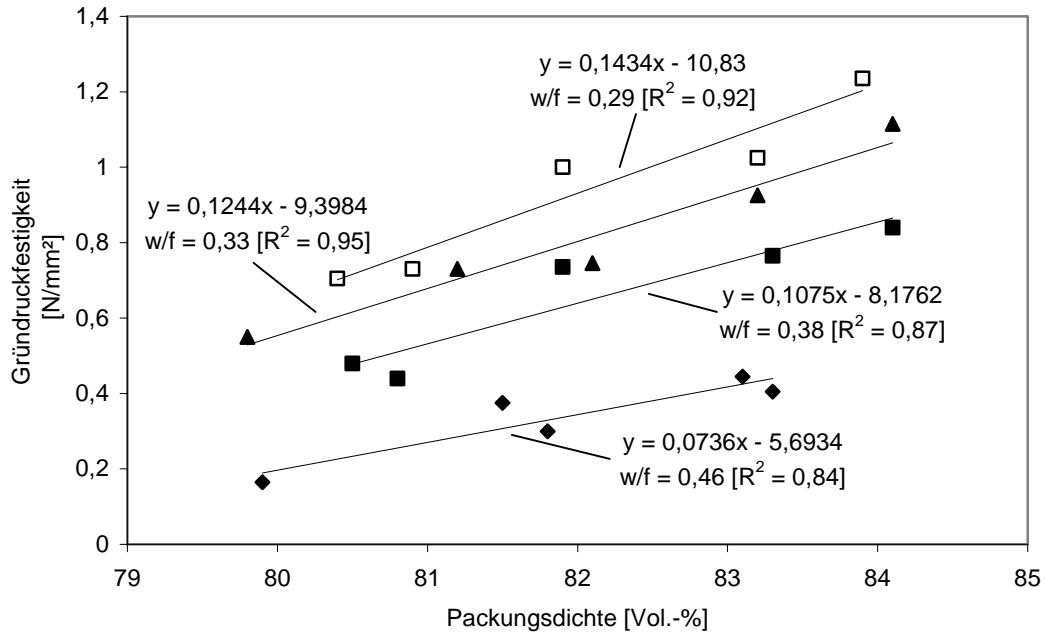


Bild B12: Interpolation

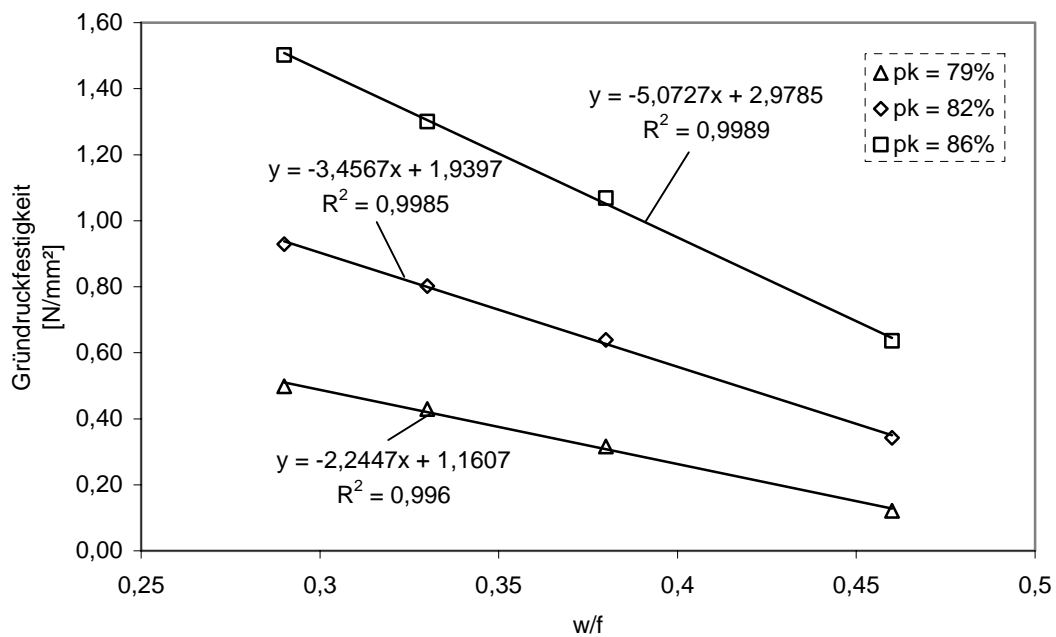


Bild B13: Interpolation

10 Fehlerabschätzung

pk [Vol.-%]	79	80	81	82	83	84	85	86
w/f								
0,29	0,50	0,64	0,79	0,93	1,07	1,22	1,36	1,50
0,33	0,43	0,55	0,68	0,80	0,93	1,05	1,18	1,30
0,38	0,32	0,42	0,53	0,64	0,75	0,85	0,96	1,07
0,46	0,12	0,20	0,27	0,34	0,42	0,49	0,56	0,64

Tabelle B9: Gründruckfestigkeiten berechnet mit den in Bild B12 angegebenen Geradengleichungen

pk [Vol.-%]	79	80	81	82	83	84	85	86
w/f								
0,29	0,51	0,58	0,66	0,73	0,81	0,88	0,95	1,03
0,33	0,42	0,49	0,57	0,64	0,72	0,79	0,86	0,94
0,38	0,31	0,38	0,46	0,53	0,60	0,68	0,75	0,82
0,46	0,13	0,20	0,28	0,35	0,42	0,50	0,57	0,64

Tabelle B10: Gründruckfestigkeiten nach Gleichung 26

pk [Vol.-%]	79	80	81	82	83	84	85	86
w/f								
0,29	1,02	0,91	0,84	0,79	0,75	0,72	0,70	0,68
0,33	0,98	0,89	0,84	0,80	0,77	0,75	0,73	0,72
0,38	0,98	0,90	0,86	0,83	0,81	0,79	0,78	0,77
0,46	1,07	1,04	1,03	1,02	1,02	1,02	1,01	1,01

Tabelle B11: Auftretender Fehler bei Berechnung der Gründruckfestigkeit nach Gleichung 26

Anhang C:

1 Kapillarporosität des Zementsteins

w/z	CEM I 52,5 R Werk B [kg/m ³]	Sand 0/2 [kg/m ³]	Wassergehalt [l/m ³]	Zementleimgehalt [l/m ³]	Kapillarporosität des Zementsteins [Vol.-%]
0,3	626	1564	188	390	14,6
0,35	607	1517	212	408	15,9
0,4	589	1472	236	426	18,5
0,45	572	1430	257	442	20,6
0,5	556	1390	278	457	21,5
0,55	541	1353	298	472	22,5
0,6	527	1317	316	486	23,9

Tabelle C1: Mischungszusammensetzung der Mörtel für quecksilberdruckporosimetrische Untersuchungen

2 Packungsdichte, Feinleimgehalt und Festigkeit

A16 - 0/2r – 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B						
w/f	Zementgehalt [kg/m ³]	28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,4	290	67,85	82,3	209	115	87,8
0,28	415	98,85	83,2	251	117	87,8
0,26	471	103	83,8	275	123	87,3
0,24	535	96,75	81,5	302	129	86,5
0,21	627	105,5	80,2	333	131	86,1
A16 - 0/2r – 2/16g - CEM I 52,5 R Werk B						
w/f	Zementgehalt [kg/m ³]	28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleimgehalt [l/m ³]	Wassergehalt [l/m ³]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,34	353	90,85	82,2	233	120	87,4
0,29	468	109,05	82,5	286	135	86,0
0,23	632	109,2	81,6	349	145	85,0

Tabelle C2/1: Auswirkung von Feinleimgehalt und Packungsdichte

B16 - 0/2r – 2/16r - CEM I 32,5 R Werk B						
w/f	Zementgehalt [kg/m ³]	28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,56	247	45,05	84,3	219	139	85,9
0,42	296	60,7	84,9	220	124	87,3
0,38	338	70,75	85,2	238	129	86,9
0,35	407	71,85	84,7	274	143	85,6
0,26	520	62,5	81,3	303	135	85,9
B16 - 0/2r – 2/16r - CEM I 52,5 R Werk B						
w/f	Zementgehalt [kg/m ³]	28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,45	297	73,1	85,6	230	134	86,5
0,37	403	79,35	84,3	279	149	85,0
0,35	466	76,3	83	313	163	83,6
B16 - 0/2r – 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B						
w/f	Zementgehalt [kg/m ³]	28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,4	270	71,05	76,7	219	108	88,0
0,38	329	79,15	84,9	231	125	87,2
0,31	393	87,55	83,5	248	121	87,4
0,26	518	84,85	82	302	135	86,0
C16 - 0/2r – 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B						
w/f	Zementgehalt [kg/m ³]	28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,44	266	59,1	78,2	203	117	87,2
0,41	349	59,1	81,4	254	142	85,2
0,34	401	70,35	80,9	266	137	85,7
0,28	553	83,8	80,9	333	155	84,0
C16 - 0/2r – 2/16g - CEM I 52,5 R Werk B						
w/f	Zementgehalt [kg/m ³]	28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,44	269	58,7	79,3	206	119	87,2
0,38	339	77,75	78	239	129	86,1
0,29	536	84,65	77,6	329	156	83,5

Tabelle C2/2: Auswirkung von Feinleimgehalt und Packungsdichte

3 Dreidimensionales Prognosemodell auf Basis von w/z-Wert und Packungsdichte

w/z	H ₂ O [l/m ³]	Zement [kg/m ³]	0/2 [kg/m ³]	2/5 [kg/m ³]	5/8 [kg/m ³]	8/11 [kg/m ³]	11/16 [kg/m ³]
0,27 ○	130	480	827	446	245	184	230
0,30 ◆	135	450	840	450	246	185	230
0,40 △	132	330	892	477	261	197	245
0,45 ■	131	290	909	485	265	200	250
0,50 ◇	130	260	922	493	269	203	253

Tabelle C3: Mischungszusammensetzungen der auf definierte Packungsdichten gerüttelten erdfeuchten Betone mit gebrochener Gesteinskörnung 2/16

w/z	H ₂ O [l/m ³]	Zement [kg/m ³]	0/2 [kg/m ³]	2/8 [kg/m ³]	8/16 [kg/m ³]
0,27 ○	130	480	827	576	345
0,35 ▲	136	390	862	594	355
0,40 △	131	327	892	615	370
0,45 ■	129	286	909	626	375
0,50 ◇	130	260	922	635	380

Tabelle C4: Mischungszusammensetzungen der auf definierte Packungsdichten gerüttelten erdfeuchten Betone mit runder Gesteinskörnung

w/z = 0,50 ◇		w/z = 0,45 ■		w/z = 0,35 ▲	
β _{d28} [N/mm ²]	pk [Vol.-%]	β _{d28} [N/mm ²]	pk [Vol.-%]	β _{d28} [N/mm ²]	pk [Vol.-%]
49	86,3	62,4	86,3	66,8	85,9
50,6	85,6	53,4	85,6	65,9	85,2
44,5	85	56	85,3	59,2	83,9
40	84,3	46,4	83,7	47,8	83,3
36,6	83,7	42,2	82,2	73,7	87,3
31,2	82,2	27,2	81,3	66,9	85,2
51,8	85,9	61,4	86	64,6	84,9
48,4	85	57,5	85,6	56,7	84,3
43,5	84	52,3	85	55,3	83,3
38,1	82,8	52,7	83,7	-	-
24,3	81,3	44,1	83,1	-	-
-	-	39,2	81,8	-	-

Tabelle C5: Festigkeitsergebnisse CEM I 32,5 R Werk B, Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16r

w/z = 0,50 ◇		w/z = 0,40 △		w/z = 0,35 ▲		w/z 0,27 ○	
βd28 [N/mm ²]	pk [Vol.-%]	βd28 [N/mm ²]	pk [Vol.-%]	βd28 [N/mm ²]	pk [Vol.-%]	βd28 [N/mm ²]	pk [Vol.-%]
40,4	83,6	55,1	84,8	38,5	80,6	63	82,2
37,2	82,4	47,9	83,6	36,1	79,1	53,5	81
27,8	80,9	44,4	82,3	35,3	78,8	44,3	79,8
29,4	81,2	42,7	81,7	47,2	82,9	43,7	79,3
26	80	37,5	80,5	50	82	41,2	79
21,1	79,2	31,1	80,3	48,7	81,4	41,9	77,8
39,5	83,3	53,2	84,8	39,7	80,6	57,2	81,6
36,2	82,7	51,9	82,9	33,8	79,1	58,8	81,6
29,8	81,8	47,4	82,9	35,5	78,6	54,5	80,4
31,7	81,8	43,8	82,3	-	-	41,6	79,3
30,2	80,6	40,8	81,1	-	-	41,3	79
24,9	80	33,4	80	-	-	40,4	77,8

Tabelle C6: Festigkeitsergebnisse CEM III/A 32,5 Werk A, Sieblinie B16 - 0/2r - 2/16r

w/z = 0,50 ◇		w/z = 0,45 ■		w/z = 0,40 △	
βd28 [N/mm ²]	pk [Vol.-%]	βd28 [N/mm ²]	pk [Vol.-%]	βd28 [N/mm ²]	pk [Vol.-%]
57,6	85,9	67,2	86	70,4	85,9
55,4	85	65,8	85,5	72	85,2
55,6	84	55,4	84	70,3	83,9
45,5	83,1	52	83,1	63,2	83
43,6	81,9	46,4	81,9	52,5	82
51,8	86,3	59,1	85,6	67,2	85,2
58,1	85,6	63,7	85	72	84,9
53	84,3	61,2	85	70,6	83,9
50,3	84	49,7	84	53,1	82,6
45,5	82,8	49,1	82,2	54,7	81,7
41,7	82,5	44,6	81,3	-	-

Tabelle C7: Festigkeitsergebnisse CEM I 52,5 R Werk B, Sieblinie B16 - 0/2r - 2/16r

4 Regressionsgleichungen

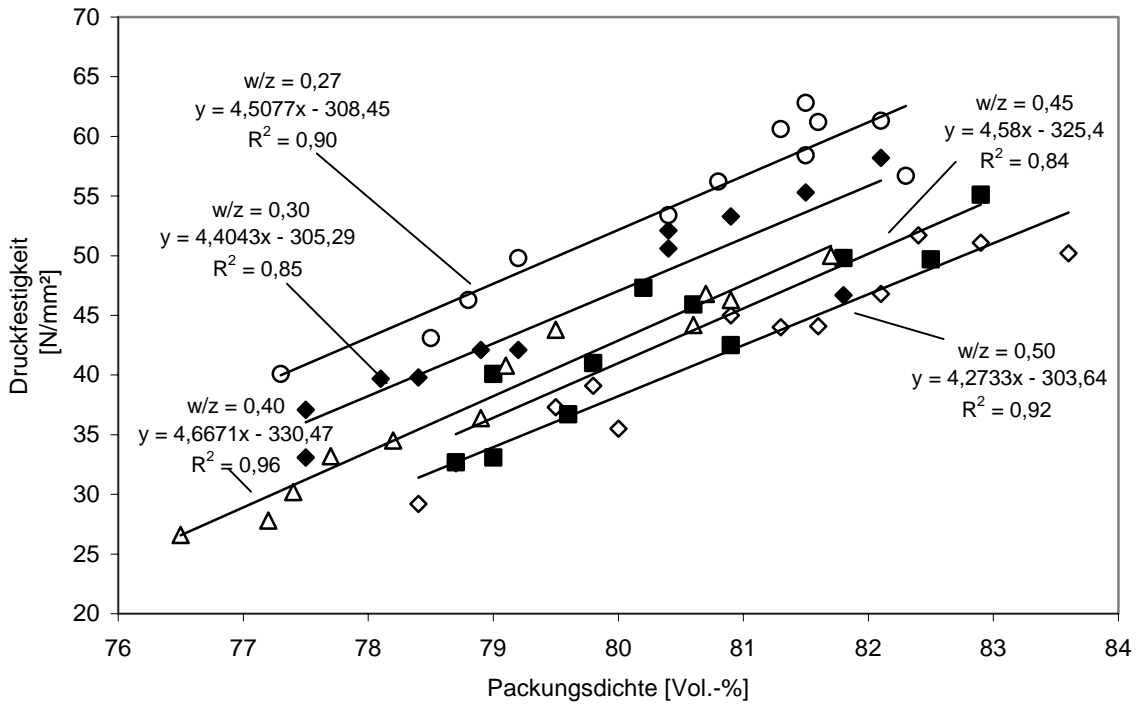


Bild C1: Zweidimensionaler Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Druckfestigkeit, CEM I 32,5 R Werk B, Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16g mit Regressionsgleichungen

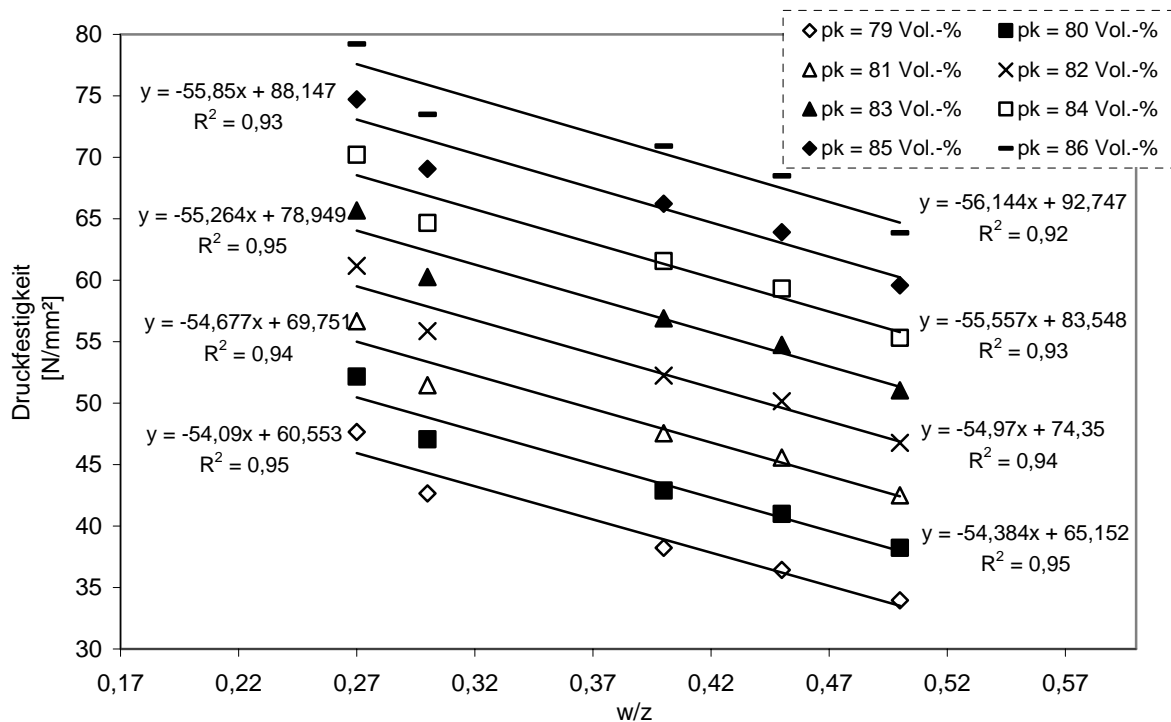


Bild C2: Zweidimensionaler Zusammenhang zwischen w/z-Wert und Druckfestigkeit, CEM I 32,5 R Werk B, Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16g mit Regressionsgleichungen

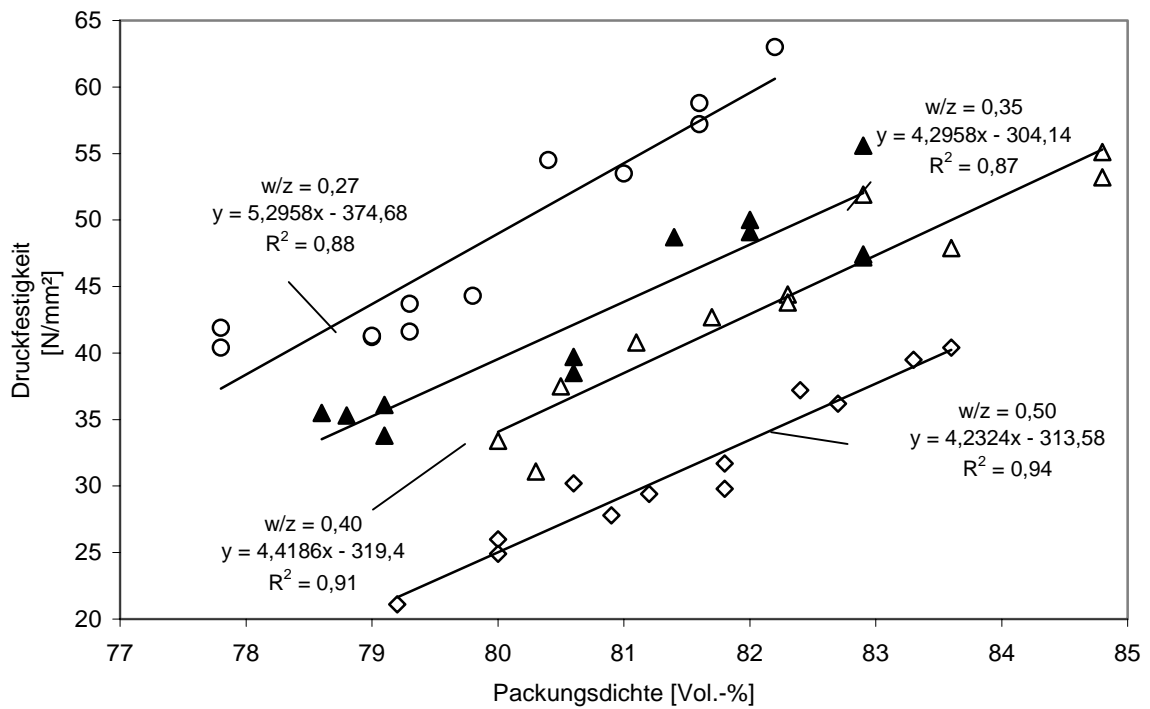


Bild C3: Zweidimensionaler Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Druckfestigkeit, CEM III/A 32,5 R Werk A, Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16r mit Regressionsgleichungen

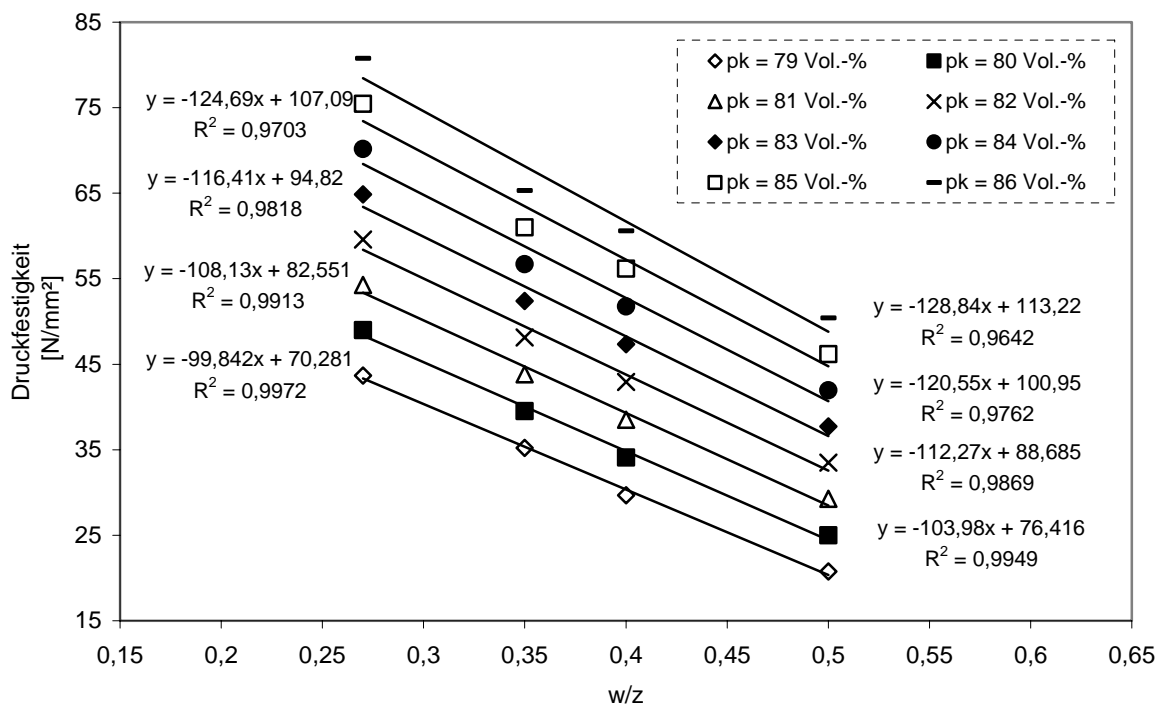


Bild C4: Zweidimensionaler Zusammenhang zwischen w/z-Wert und Druckfestigkeit, CEM III/A 32,5 R Werk B, Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16r mit Regressionsgleichungen

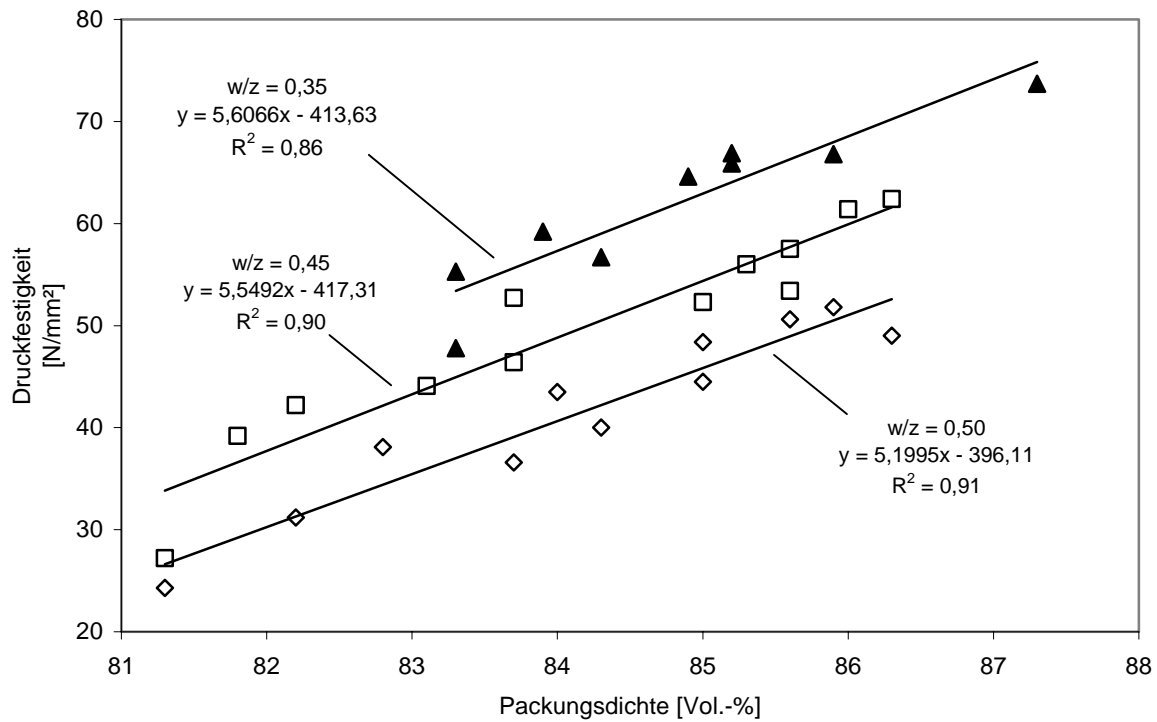


Bild C5: Zweidimensionaler Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Druckfestigkeit, CEM I 32,5 R Werk B, Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16r mit Regressionsgleichungen

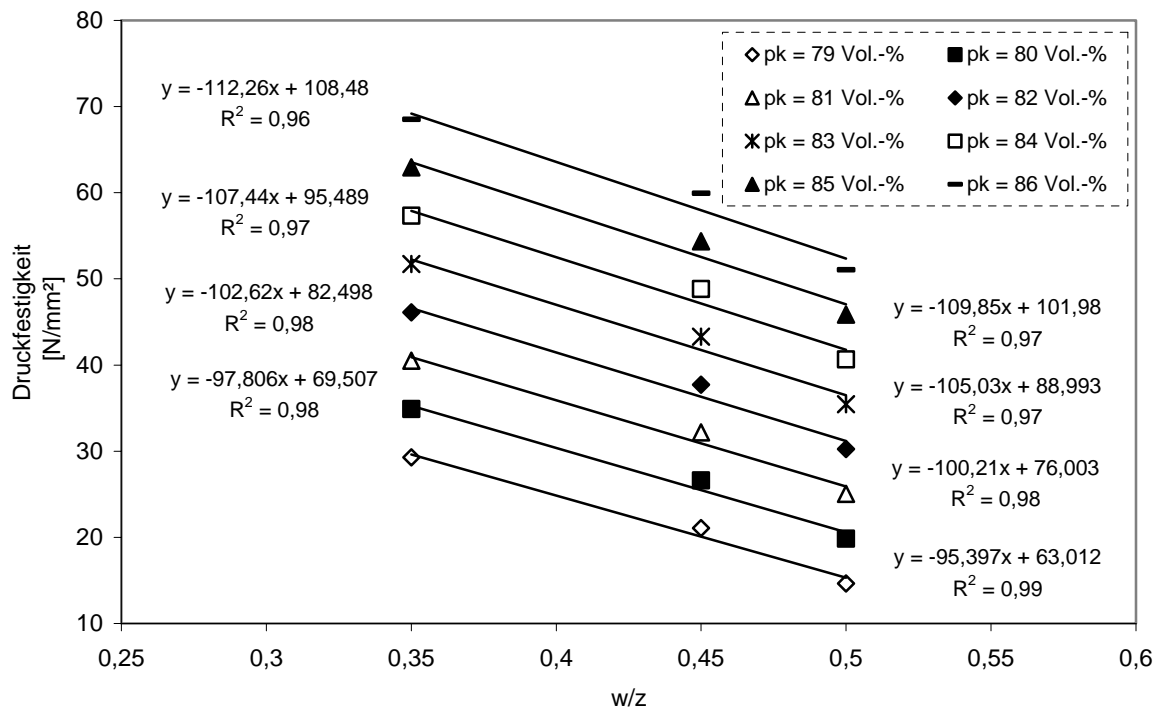


Bild C6: Zweidimensionaler Zusammenhang zwischen w/z-Wert und Druckfestigkeit, CEM I 32,5 R Werk B, Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16r mit Regressionsgleichungen

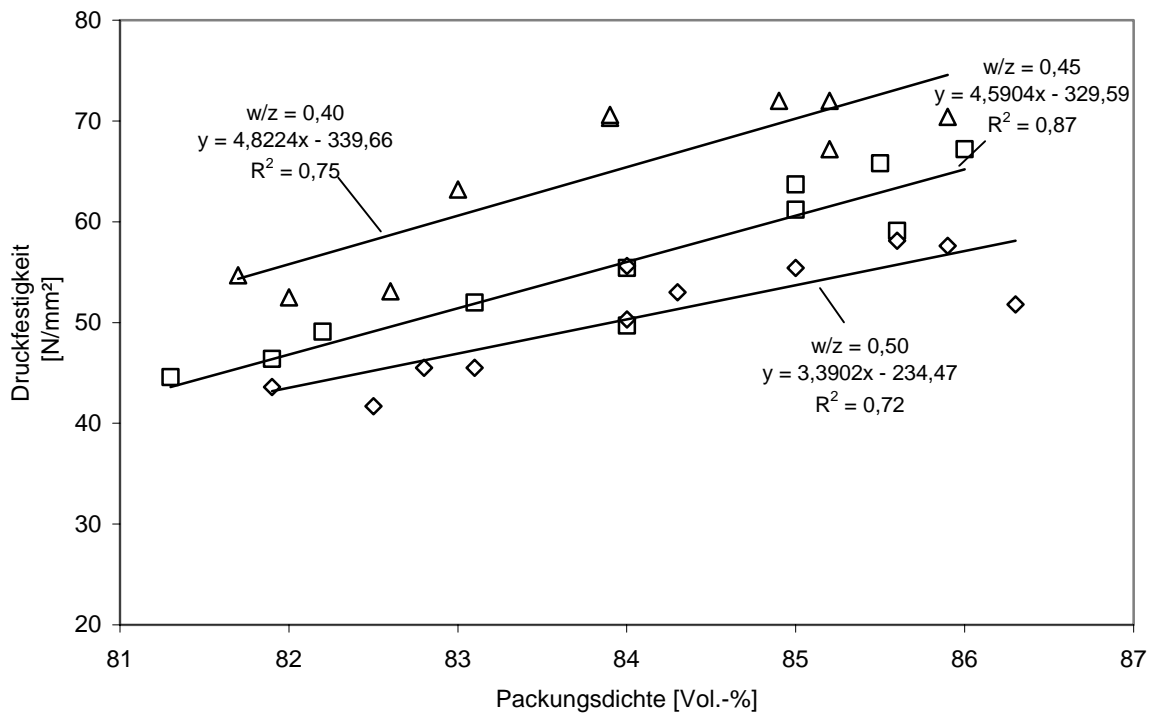


Bild C7: Zweidimensionaler Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Druckfestigkeit, CEM I 52,5 R Werk B, Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16r mit Regressionsgleichungen

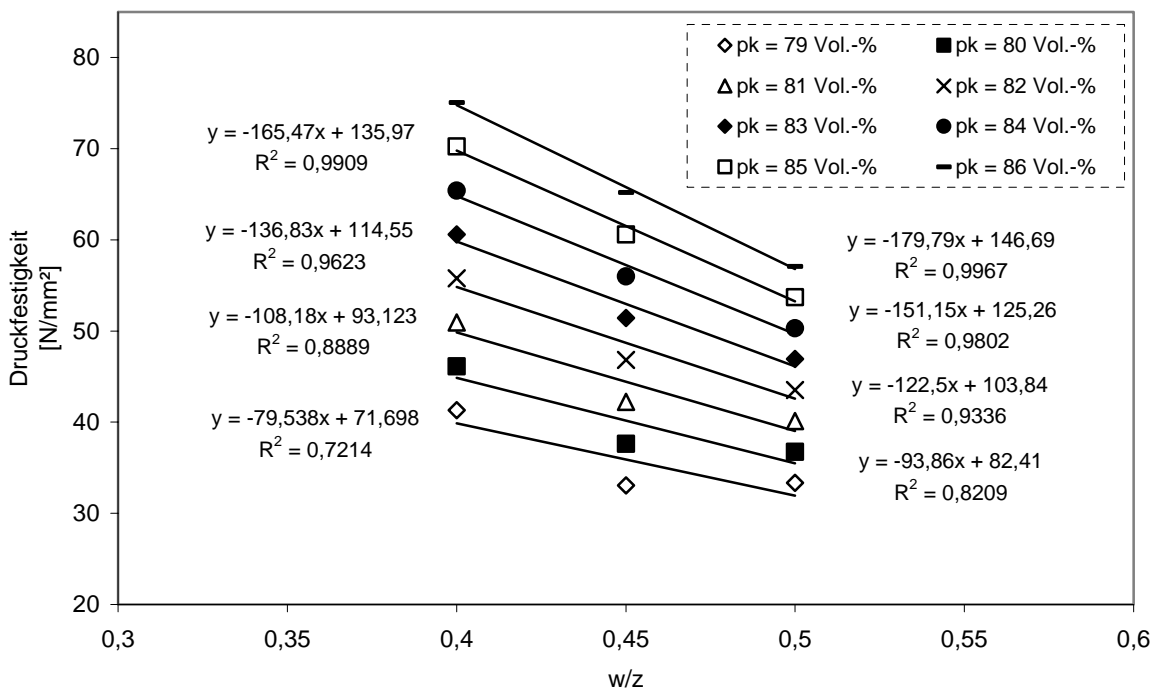


Bild C8: Zweidimensionaler Zusammenhang zwischen w/z-Wert und Druckfestigkeit, CEM I 52,5 R Werk B, Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16r mit Regressionsgleichungen

5 Fehlerabschätzung der Ebenengleichung

28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	rechnerische 28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	relativer Fehler
51,1	82,9	51	0,99
50,2	83,6	54	1,07
51,7	82,4	48	0,94
46,8	82,1	47	1,01
44	81,3	44	0,99
44,1	81,6	45	1,02
39,1	79,8	37	0,96
45	80,9	42	0,93
37,3	79,5	36	0,97
35,5	80	38	1,08
32,6	78,7	33	1,00
29,2	78,4	31	1,07

**Tabelle C8: Kontrolle der Ebenengleichung $w/z = 0,50$ ◇
Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16g; CEM I 32,5 R Werk B**

28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	rechnerische 28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	relativer Fehler
55,1	82,9	53	0,97
49,7	82,5	52	1,04
45,9	80,6	43	0,95
49,8	81,8	49	0,98
42,5	80,9	45	1,05
47,3	80,2	42	0,88
36,7	79,6	39	1,07
41	79,8	40	0,98
40,1	79	37	0,91
33,1	79	37	1,11
32,7	78,7	35	1,08

**Tabelle C9: Kontrolle der Ebenengleichung $w/z = 0,45$ ■
Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16g; CEM I 32,5 R Werk B**

28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	rechnerische 28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	relativer Fehler
50	81,7	51	1,02
46,8	80,7	47	1,00
44,2	80,6	46	1,05
46,3	80,9	47	1,03
40,8	79,1	40	0,98
43,8	79,5	41	0,95
34,5	78,2	36	1,04
36,4	78,9	39	1,07
30,2	77,4	33	1,08
33,2	77,7	34	1,02
26,6	76,5	29	1,08
27,8	77,2	32	1,14

*Tabelle C10: Kontrolle der Ebenengleichung $w/z = 0,40\Delta$
Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16g CEM I 32,5 R Werk B*

28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	rechnerische 28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	relativer Fehler
58,2	82,1	58	1,00
53,3	80,9	53	0,99
52,1	80,4	51	0,97
42,1	78,9	44	1,05
39,8	78,4	42	1,06
33,1	77,5	38	1,16
46,7	81,8	57	1,21
55,3	81,5	55	1,00
50,6	80,4	51	1,00
42,1	79,2	46	1,08
39,7	78,1	41	1,03
37,1	77,5	38	1,03

*Tabelle C11: Kontrolle der Ebenengleichung $w/z = 0,30 \blacklozenge$
Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16g CEM I 32,5 R Werk B*

28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	rechnerische 28-Tagefestigkeit [N/mm ²]	relativer Fehler
56,7	82,3	60	1,07
61,3	82,1	60	0,97
60,6	81,3	56	0,93
61,2	81,6	58	0,94
58,4	81,5	57	0,98
62,8	81,5	57	0,91
53,4	80,4	52	0,98
56,2	80,8	54	0,96
46,3	78,8	46	0,98
49,8	79,2	47	0,95
40,1	77,3	39	0,98
43,1	78,5	44	1,03

Tabelle C12: Kontrolle der Ebenengleichung $w/z = 0,270$
 Sieblinie B16 – 0/2r – 2/16g CEM I 32,5 R Werk B

6 Festigkeitssteigerung durch die Verwendung von CEM I 52,5 R und/oder gebrochener Gesteinskörnung

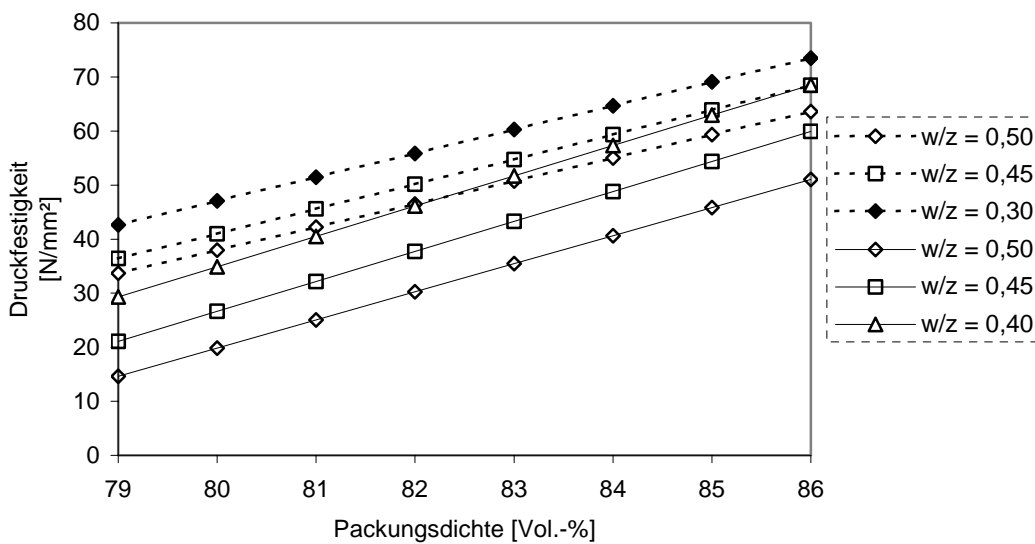


Bild C9: Vergleich der Druckfestigkeitsergebnisse CEM I 32,5 R Werk B mit Gesteinskörnung B16 – 0/2r – 2/16g (gestrichelte Linie) und mit Gesteinskörnung B16 – 0/2r – 2/16r (durchgezogene Linie)

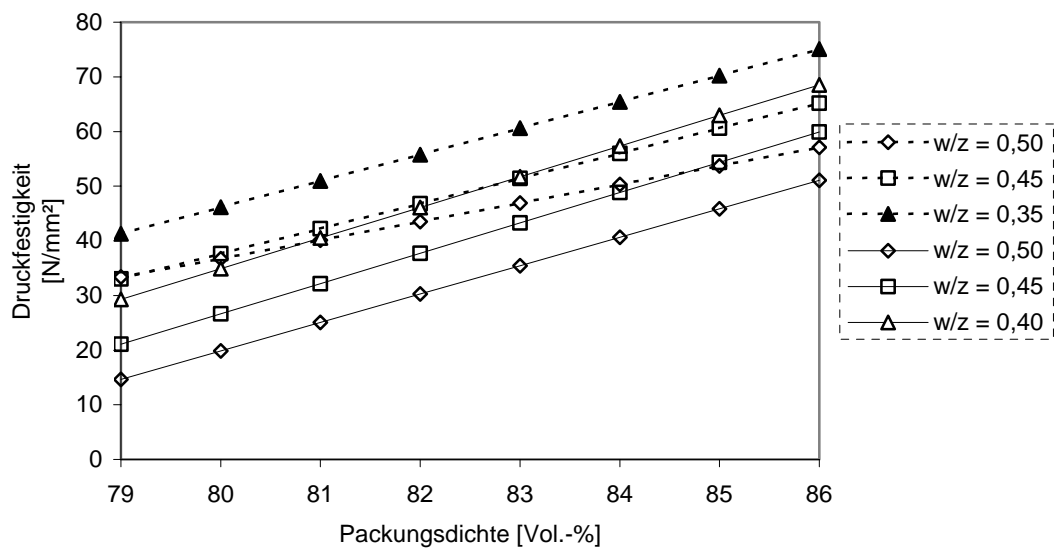


Bild C10: Vergleich der Druckfestigkeitsergebnisse CEM I 52,5 R Werk B mit Gesteinskörnung B16 – 0/2r – 2/16r (gestrichelte Linie) und CEM I 32,5 R Werk B mit Gesteinskörnung B16 – 0/2r – 2/16r (durchgezogene Linie)

Anhang D:

1 Zusammensetzung des Feinststoffs und Proctorwerte der Feinstquarz“betone“

	n = 0,60	n = 0,35	n = 0,01
FQ3	90 Vol.-%	50 Vol.-%	35 Vol.-%
FQ12	5 Vol.-%	40 Vol.-%	-
FQ300	-	-	48 Vol.-%
FQ800	5 Vol.-%	10 Vol.-%	17 Vol.-%
Σ	100 Vol.-%	100 Vol.-%	100 Vol.-%

Tabelle D1: Volumetrischer Anteil der Quarzmehle (lange Sieblinie)

F = 0,01 G = 0,35						
w/f	Feinststoffgehalt [kg/m ³]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleimgehalt [l/m ³]	Wassergehalt [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,25	312	80	196	78	12,2	90,2
0,29	417	84,6	278	121	3,3	87,5
0,33	421	85,6	298	139	0,5	86
0,38	411	85,3	311	156	entwässert	84,4
0,42	405	85	323	170	entwässert	83
0,46	400	84	335	184	entwässert	81,6

Tabelle D2: Proctorwerte der Gemische aus Gesteinskörnung und Quarzmehlen (0/2r – 2/16r)

F = 0,35 G = 0,35						
w/f	Feinststoffgehalt [kg/m ³]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleimgehalt [l/m ³]	Wassergehalt [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,21	376	80,9	215	73	11,8	91,8
0,25	428	83,9	245	107	5,4	89,1
0,29	424	85,6	283	123	2,1	87,5
0,33	420	84,9	298	140	2,1	85,9
0,38	411	84,3	311	156	0,1	84,4
0,42	405	84	322	170	entwässert	83

Tabelle D3: Proctorwerte der Gemische aus Gesteinskörnung und Quarzmehlen (0/2r – 2/16r)

F = 0,60 G = 0,35						
w/f	Feinststoffgehalt [kg/m ³]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleimgehalt [l/m ³]	Wassergehalt [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,21	319	77	187	67	16,3	82,1
0,25	384	77,5	241	96	12,9	89,1
0,29	403	80,9	269	117	7,4	87,5
0,33	415	82,7	293	137	3,6	85,9
0,38	403	82,7	305	153	2	84,4
0,42	405	82,7	323	170	0,3	83

Tabelle D4: Proctorwerte der Gemische aus Gesteinskörnung und Quarzmehlen (0/2r – 2/16r)

F = 0,01 G = 0,35						
w/f	Feinststoffgehalt [kg/m ³]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleimgehalt [l/m ³]	Wassergehalt [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,21	381	80,3	224	80	11,7	91
0,25	452	84,3	284	113	4,4	88,2
0,29	462	85,8	308	134	0,8	86,5
0,33	461	85,2	326	152	entwässert	84,8
0,38	439	84,9	333	167	entwässert	83,3
0,42	436	84,7	348	183	entwässert	81,7

*Tabelle D5: Proctorwerte der Gemische aus Gesteinskörnung und Quarzmehlen
(0/2r – 2/16g)*

F = 0,35 G = 0,35						
w/f	Feinststoffgehalt [kg/m ³]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleimgehalt [l/m ³]	Wassergehalt [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,21	371	79,1	218	78	13,1	91
0,25	444	82,3	279	111	6,6	88,2
0,29	451	83,7	301	131	3,2	86,5
0,33	460	84,5	326	152	0,3	84,8
0,38	442	84,6	335	168	entwässert	83,2
0,42	436	84,3	348	183	entwässert	82,7

*Tabelle D6: Proctorwerte der Gemische aus Gesteinskörnung und Quarzmehlen
(0/2r – 2/16g)*

F = 0,60 G = 0,35						
w/f	Feinststoffgehalt [kg/m ³]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleimgehalt [l/m ³]	Wassergehalt [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,21	343	75,6	201	72	17,2	91,5
0,25	428	78,5	269	107	10,8	88,2
0,29	441	80,7	294	128	6,6	86,5
0,33	442	81,1	313	146	4,3	84,8
0,38	432	81,1	327	164	2,5	83,2
0,42	431	80,5	344	181	1,4	81,7

*Tabelle D7: Proctorwerte der Gemische aus Gesteinskörnung und Quarzmehlen
(0/2r – 2/16g)*

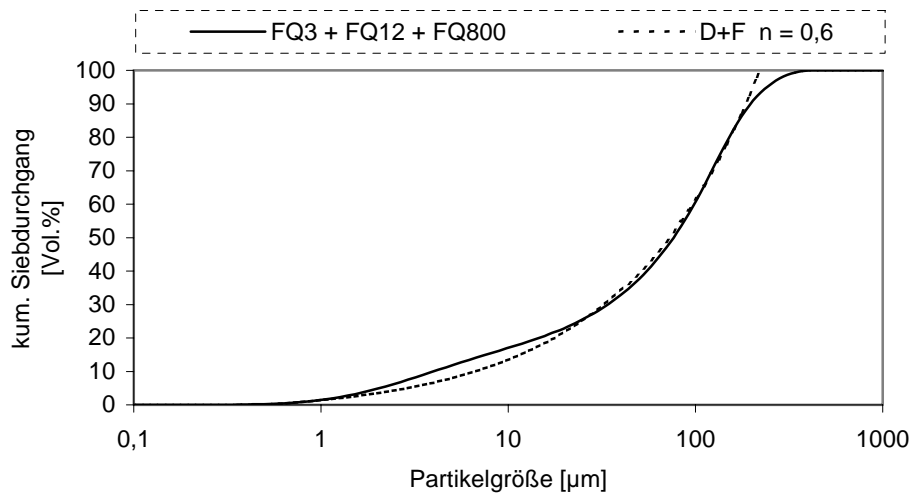


Bild D1: Übereinstimmung von rechnerischer und realer Sieblinie

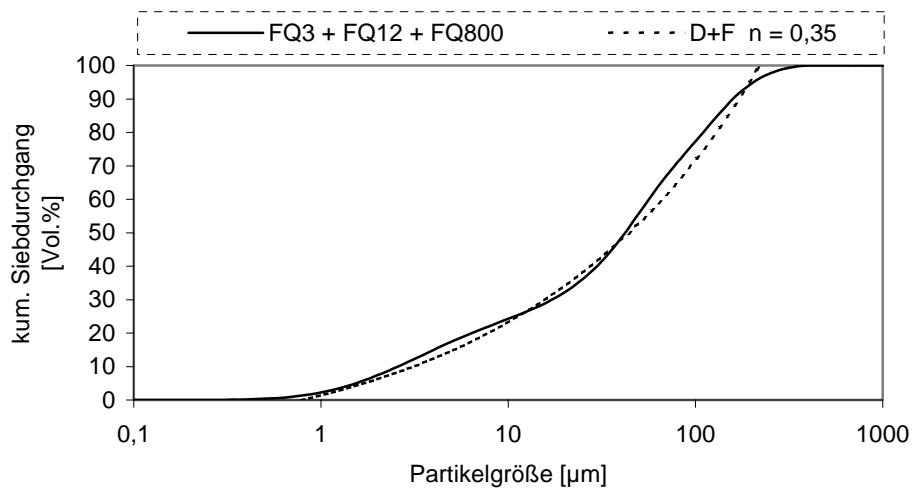


Bild D2: Übereinstimmung von rechnerischer und realer Sieblinie

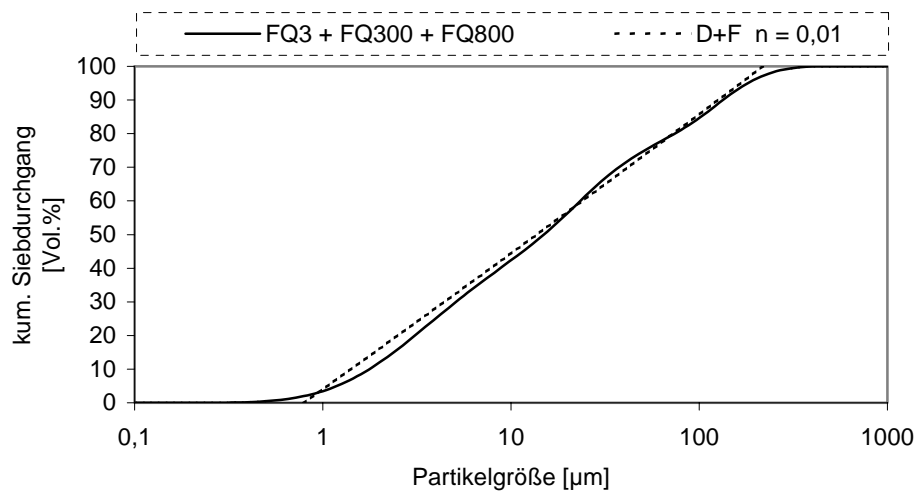


Bild D3: Übereinstimmung von rechnerischer und realer Sieblinie

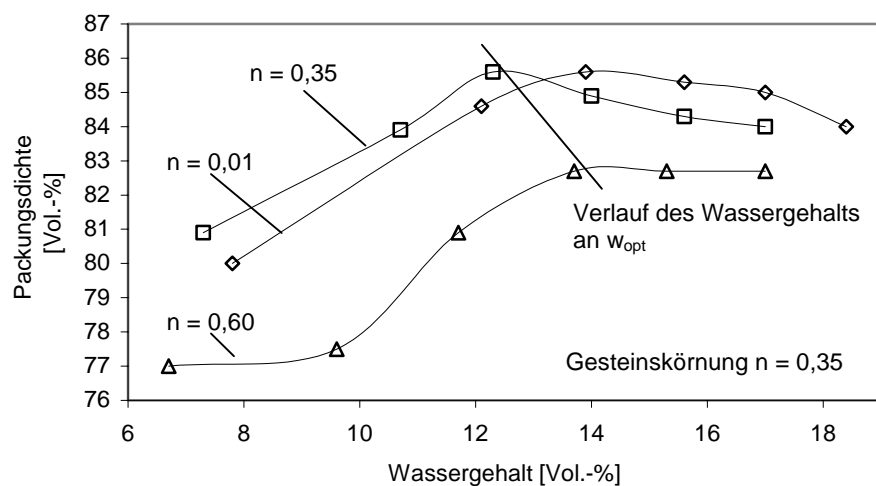


Bild D4: Proctorkurven von Gemischen mit runder Gesteinskörnung in Abhängigkeit von der Sieblinie des Feinstoffs (Gesteinskörnung $0/2r - 2/16r$; Feinststoff: Fein Quarze, Sieblinie der Gesteinskörnung $n = 0,35$)

2 Packungsdichten und Mischungszusammensetzung der Ausfallsieblinien an w_{opt} :

Sieblinienverläufe	w/f	Feinststoffgehalt [kg/m ³]	Packungsdichte [Vol.-%]	Wassergehalt [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
FQ3 = 100%	0,33	415	83,9	137	2,4	86
FQ3 = 70% FQ300 = 30%	0,33	418	84,8	138	1,4	86
FQ3 = 50% FQ300 = 50%	0,33	414	84,7	138	1,5	86
FQ3 = 30% FQ300 = 70%	0,33	412	84,3	138	1,9	86
FQ300 = 100%	0,35	410	83,5	142	2,3	85,5

Tabelle D8: Mischungszusammensetzung und Packungsdichte der Ausfallsieblinien W3/FQ300 an w_{opt} (Gesteinskörnung 0/2r – 2/16g)

Sieblinienverläufe	w/f	Feinststoffgehalt [kg/m ³]	Packungsdichte [Vol.-%]	Wassergehalt [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
FQ3 = 100%	0,33	415	84	137	2,3	86
FQ3 = 70% FQ800 = 30%	0,30	430	86	129	1,1	87
FQ3 = 50% FQ800 = 50%	0,29	427	87	124	0,6	87,5
FQ3 = 30% FQ800 = 70%	0,29	431	87,3	125	0,2	87,5
FQ800 = 100%	0,35	408	84	143	1,7	85,5

Tabelle D9: Mischungszusammensetzung und Packungsdichte der Ausfallsieblinien W3/FQ800 an w_{opt} (Gesteinskörnung 0/2r – 2/16g)

3 Rheologische Messungen an Quarzmehlgemischen mit Ausfallkörnung und Fließmittelzugabe (FM 1254 der Fa. Woermann Zugabemenge: 7 M.-% v. Zementgewicht):

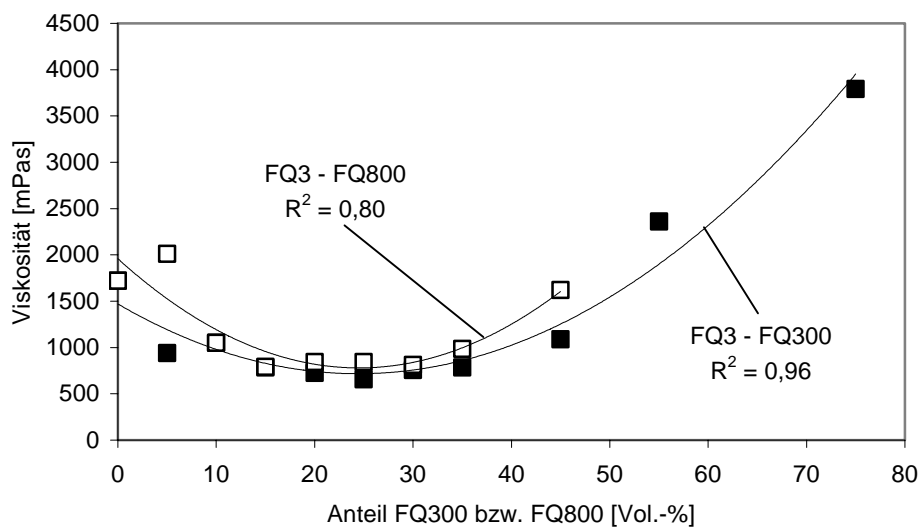


Bild 5: Ausfallsieblinien mit Feinstquarz; $w/f = 0,29 - 7$ M.-% FM 1254. Zugabe von FQ300 bzw. FQ800 zum Feinstquarz FQ3

4 Packungsdichten der stetigen Sieblinien an w_{opt}

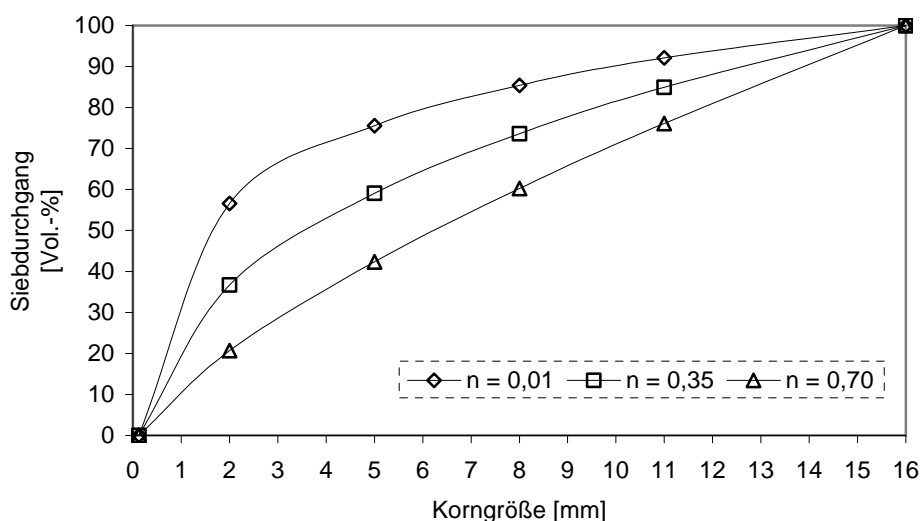


Bild D6: Sieblinienverläufe der Gesteinskörnungen

Sieblinienverläufe	w/f	Feinststoffgehalt [kg/m ³]	Packungsdichte [Vol.-%]	Wassergehalt [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
F = 0,01 G = 0,01	0,33	420	84,2	138	2	86
F = 0,01 G = 0,35	0,33	421	85,6	139	0,5	86
F = 0,01 G = 0,70	0,29	430	87,4	125	0,1	87,5
F = 0,35 G = 0,01	0,35	400	82,2	140	3,8	85,5
F = 0,35 G = 0,35	0,29	424	85,6	123	2,1	87,7
F = 0,35 G = 0,70	0,30	425	86,9	128	0,3	87,2
F = 0,60 G = 0,01	0,36	475	80	171	2,9	82,5
F = 0,60 G = 0,35	0,35	400	82,8	141	3,1	85,5
F = 0,60 G = 0,70	0,30	420	86	126	1,4	87,2

Tabelle D10: Mischungszusammensetzung und Packungsdichte der stetigen Sieblinien an w_{opt} ($0/2r - 2/16r$)

Sieblinienverläufe	w/f	Feinststoffgehalt [kg/m ³]	Packungsdichte [Vol.-%]	Wassergehalt [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
F = 0,01 G = 0,01	0,30	430	82	139	5,1	84,7
F = 0,01 G = 0,35	0,29	462	85,8	134	0,8	86,5
F = 0,01 G = 0,70	0,29	472	85,2	137	1,1	86,3
F = 0,35 G = 0,01	0,34	435	81,2	148	4	85
F = 0,35 G = 0,35	0,33	460	84,5	135	0,3	86,5
F = 0,35 G = 0,70	0,27	460	85,8	125	1,7	87,3
F = 0,60 G = 0,01	0,38	415	78,7	157	5,6	83,5
F = 0,60 G = 0,35	0,30	505	81,2	152	3,6	86,2
F = 0,60 G = 0,70	0,29	475	84	138	2,2	86,2

Tabelle D11: Mischungszusammensetzung und Packungsdichte der stetigen Sieblinien an w_{opt} ($0/2r - 2/16g$)

5 Übertragung der Erkenntnisse auf zementgebundene Systeme

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B							
w/f	Zement [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,33	261	0,25	80,8	172	86	10,6	90,4
0,37	265	0,29	82,4	184	98	7,8	89,4
0,41	266	0,36	82,9	195	109	6,2	88,4
0,44	273	0,45	83,1	208	120	4,9	86,4
0,48	271	0,27	82,6	217	130	4,4	85,4

Tabelle D12: Mischung mit 273 kg/m³ CEM I 32,5 R Werk B an w_{opt} (0/2r – 2/16g)

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B							
w/f	Zement [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,27	310	0,395	79,2	184	84	12,4	90,6
0,30	316	0,565	81,3	196	95	9,2	89,7
0,33	320	0,72	83,4	209	106	6	88,7
0,36	325	0,765	83,7	222	117	4,6	87,7
0,39	325	0,58	82,6	232	127	4,2	86,7

Tabelle D13: Mischung mit 325 kg/m³ CEM I 32,5 R Werk B an w_{opt} (0/2r – 2/16g)

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B - 3,5 kg/m ³ FM 1254							
w/f	Zement [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,22	296	0,49	79,5	161	65	14	92,5
0,25	306	0,92	82,9	176	77	9,4	91,6
0,28	313	1,00	85,5	189	88	5,7	90,75
0,31	307	0,825	84,3	194	95	6,2	89,9

Tabelle D14: Mischung mit 313 kg/m³ CEM I 32,5 R Werk B an w_{opt} (0/2r – 2/16g)

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B - 7,0 kg/m ³ FM 1254							
w/f	Zement [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,19	291	0,295	77,8	149	55	16,7	93,45
0,22	310	0,975	83,5	168	68	9,7	92,5
0,25	313	0,855	84,9	179	78	7,3	91,6
0,28	310	0,72	84,6	187	87	6,7	90,75

Tabelle D15: Mischung mit 313 kg/m³ CEM I 32,5 R Werk B an w_{opt} (0/2r – 2/16g)

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B - mit Kalksteinmehl KSM C							
w/f	Zement [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Zementleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,22	234/122	0,15	69	199	78	23,2	90,2
0,26	250/131	0,39	73,1	228	99	17	88,3
0,30	277/143	0,67	79,5	267	125	8	86,7
0,34	266/139	0,33	77,15	275	138	9,05	85,0
0,37	257/135	0,25	75,8	278	145	9,7	84,2

Tabelle D16: Mischung mit 277 kg/m³ CEM I 32,5 R Werk B an w_{opt} + 143 kg/m³ KSM C (0/2r – 2/16g)

6 Feinststoffliche Optimierung erdfeuchter Betongemische

6.1 Gemische mit Flugaschezugabe (Flugasche FA)

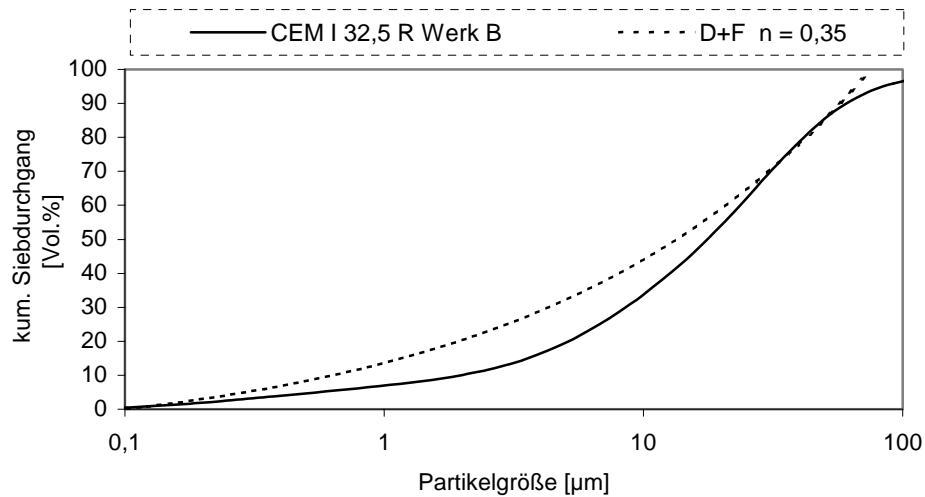


Bild D7: Sieblinienverlauf CEM I 32,5 R Werk B und ideale Sieblinie $n = 0,35$

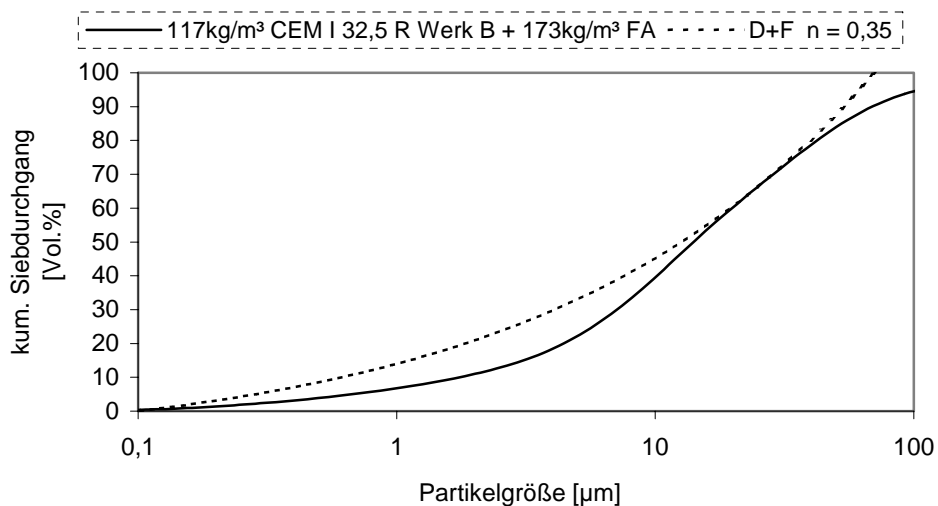


Bild 8: Übereinstimmung CEM I 32,5 R Werk B und Flugasche FA mit dem in Tabelle D23 angegebenen Mischungsverhältnis an w_{opt} mit der idealen Sieblinie $n = 0,35$

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B – Flugasche FA – 3,5 kg/m ³ FM 1254							
w/f	Zement-/ Flugaschegehalt (Typ FA) [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,14	108/160	0,16	80,9	140	37,5	15,4	95,6
0,18	110/162	0,21	84,3	152	49	10,8	94,5
0,21	117/173	0,26	87,4	171	61	6,5	93,5
0,25	116/172	0,29	88,6	182	72	4,2	92,5
0,28	118/174	0,22	88,2	193	82	3,6	91,5

Tabelle D17: Mischung mit 116 kg/m³ CEM I 32,5 R Werk B und 172 kg/m³ FA an w_{opt} (0/2r – 2/16g)

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B – Flugasche FA - 7 kg/m ³ FM 1254							
w/f	Zement-/ Flugaschegehalt (Typ FA) [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,14	110/161	0,165	82,1	141	38	14,1	95,6
0,18	112/164	0,23	85,7	155	50	9,3	94,5
0,21	118/173	0,26	88,2	172	61	5,7	93,5
0,25	117/173	0,30	89,3	183	72,5	3,5	92,5
0,28	119/176	0,24	88,9	195	82,5	2,9	91,5

Tabelle D18: Mischung mit 117 kg/m³ CEM I 32,5 R Werk B und 173 kg/m³ FA an w_{opt} (0/2r – 2/16g)

6.2 Gemische mit Feinstquarzzugabe (Feinstquarz FQ800)

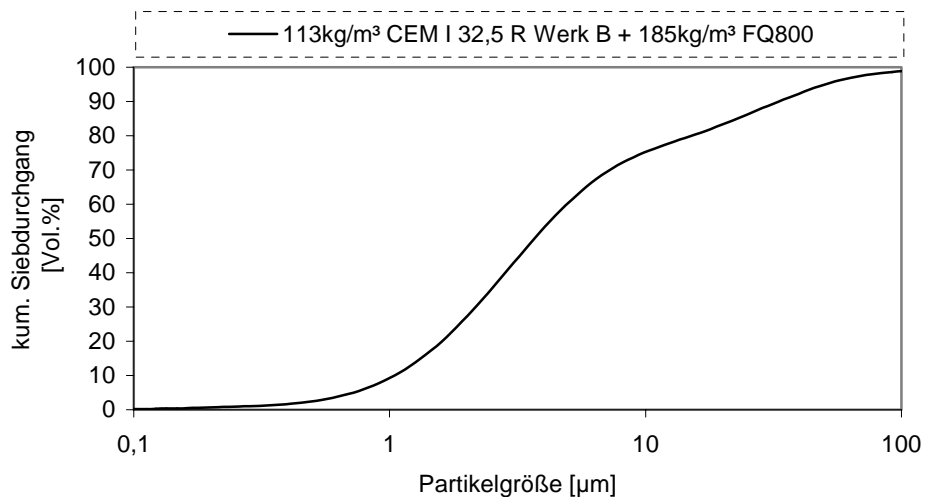


Bild D9: Ausfallsiebdiagramm CEM I 32,5 R Werk B und Feinstquarz FQ800 mit dem in Tabelle D23 angegebenen Mischungsverhältnis an w_{opt}

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B - Quarzmehl FQ800 - 7 kg/m ³ FM 1254							
w/f	Zement-/ Feinquarzgehalt (Typ FQ800) [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,20	94/156	0,06	72,5	139	50	17,7	94
0,23	112/184	0,73	84	174	68	12,9	92,9
0,27	113/185	0,23	86,8	187	81	8	91,5
0,30	114/187	-	86,5	197	90	5,8	90,6
0,33	115/189	-	85,4	207	99	6,4	89,8

Tabelle D19: Mischung mit 113 kg/m³ CEM I 32,5 R Werk B und 185 kg/m³ FQ800 an w_{opt} (0/2r – 2/16g)

6.3 Gemische mit Kalksteinmehlzugabe (KSM BG)

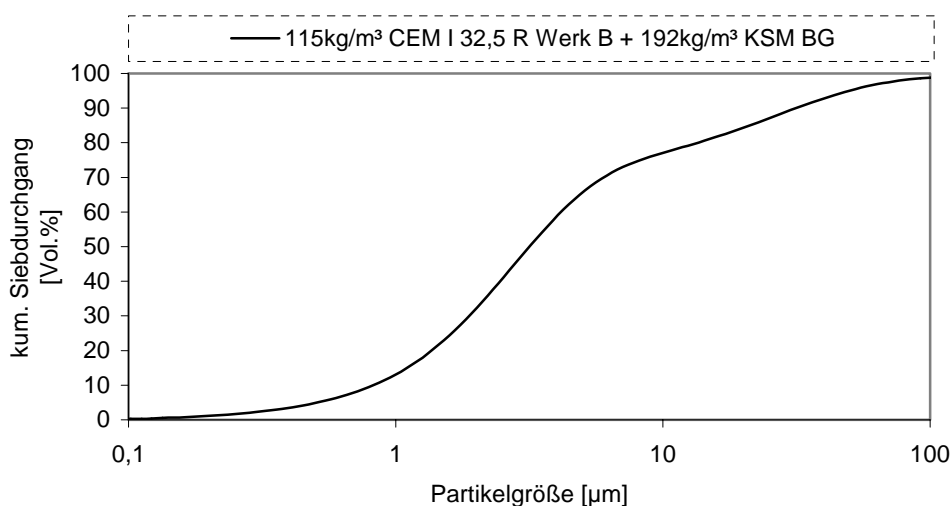


Bild D10: Ausfallsieblinie CEM I 32,5 R Werk B und Kalksteinmehl KSM BG mit dem in Tabelle D24 angegebenen Mischungsverhältnis an w_{opt}

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B – Kalksteinmehl KSM BG - 3,5 kg/m ³ FM 1254							
w/f	Zement-/ Kalksteinmehlgehalt (Typ KSM BG) [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,20	99/164	0,085	75,5	145	52,5	19,3	94
0,23	109/182	0,83	82,3	169	67	11	92,9
0,26	116/192	0,19	86	189	80	6	91,5
0,30	115/192	-	87,8	200	92	3	90,6
0,33	115/191	-	87,5	209	101	2,4	89,8

Tabelle D20: Mischung mit 115 kg/m³ CEM I 32,5 R Werk B und 192 kg/m³ KSM BG an w_{opt} (0/2r – 2/16g)

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B – Kalksteinmehl KSM BG - 7 kg/m ³ FM 1254							
w/f	Zement-/ Kalksteinmehlgehalt (Typ KSM BG) [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,16	103/172	0,045	75,3	141	44	20,3	94,5
0,20	111/184	0,875	84,6	163	59	9,5	93,5
0,23	117/196	0,13	89,2	182	72	3,6	92,5
0,26	119/198	-	88,9	194	82,5	2,9	91,5
0,30	115/192	-	88,6	200	92	2,2	90,5

Tabelle D21: Mischung mit 117 kg/m³ CEM I 32,5 R Werk B und 196 kg/m³ KSM BG an w_{opt} (0/2r – 2/16g)

6.4 Gemische mit stetiger Sieblinie mit Zugabe zweier Kalksteinmehle (KSM C und BG)

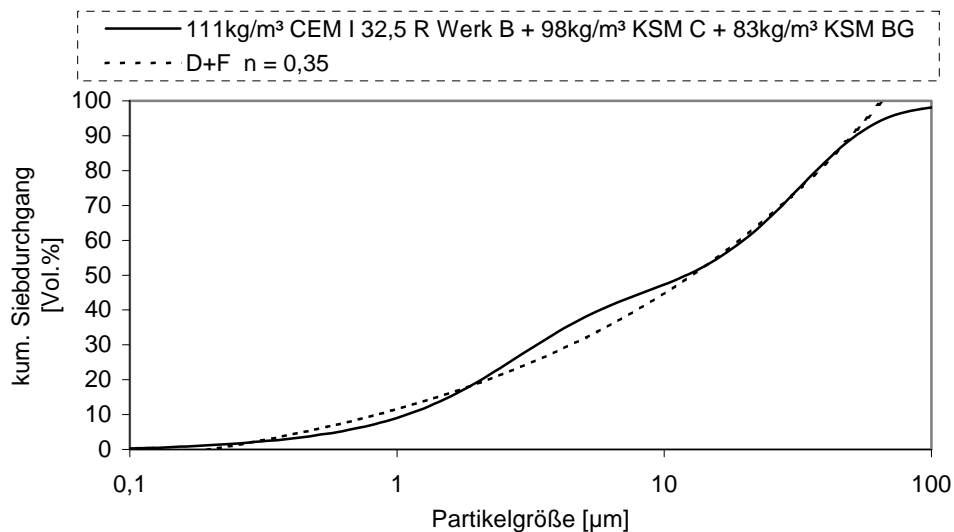


Bild D11: Übereinstimmung CEM I 32,5 R Werk B und Kalksteinmehl KSM C und KSM BG mit dem in Tabelle D26 angegebenen Mischungsverhältnis an w_{opt} mit der idealen Sieblinie $n = 0,35$

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B – Kalksteinmehl KSM C und KSM BG – 3,5 kg/m ³ FM 1254							
w/f	Zement-/ Kalksteinmehl- (Typ KSM C) / Kalksteinmehlgehalt (Typ KSM BG) [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,15	99/87/74	0,115	78,3	131	39	17,8	94,9
0,17	104/93/79	0,155	79,5	144	47	15,8	93,9
0,22	107/94/79	0,77	83,7	159	60	10,3	92,9
0,25	111/98/83	0,705	87	176	73	5,7	91,9
0,28	111/98/84	0,445	86,6	185	82	5,2	90,9

Tabelle D22: Mischung mit 111 kg/m³ CEM I 32,5 R Werk B, 98 kg/m³ KSM C und 83 kg/m³ KSM BG an w_{opt} (0/2r – 2/16g)

B16 - 0/2r - 2/16g - CEM I 32,5 R Werk B – Kalksteinmehl KSM C und KSM BG – 7,0 kg/m ³ FM 1254							
w/f	Zement-/ Kalksteinmehl- (Typ KSM C) / Kalksteinmehlgehalt (Typ KSM BG) [kg/m ³]	Gründruckfestigkeit [N/mm ²]	Packungsdichte [Vol.-%]	Feinleim [l/m ³]	Wasser [l/m ³]	LP [Vol.-%]	Sr(pk) [Vol.-%]
0,16	99/87/74	0,37	81,2	133	41	14,7	94,7
0,19	103/91/78	0,46	82,8	148	52	12	93,7
0,22	109/95/82	0,89	85,3	164	63	8,4	92,7
0,25	115/100/86	0,73	87,8	181	75	4,7	91,7
0,29	111/98/83	0,47	86,9	188	85	4,6	90,7

Tabelle D23: Mischung mit 115 kg/m³ CEM I 32,5 R Werk B, 100 kg/m³ KSM C und 86 kg/m³ KSM BG an w_{opt} (0/2r – 2/16g)

7 Gezielt auf Höhe gerüttelte Betone für die Festbeton- untersuchungen

7.1 Ausgangsmischungen ohne Zusatz von Fließmittel

Probenname		280/1	280/2	280/3	280/4	280/5	280/6
w/f	-	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
w/z	-	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	271	269	269	267	267	269
Sand 0/2	[kg/m ³]	836	830	830	826	826	830
Basalt 2/5	[kg/m ³]	463	460	460	458	458	460
Basalt 5/8	[kg/m ³]	325	322	322	321	321	322
Basalt 8/11	[kg/m ³]	256	254	254	253	253	254
Basalt 11/16	[kg/m ³]	301	298	298	297	297	298
Wasser	[kg/m ³]	120	119	119	119	119	119
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	208	206	206	205	205	206
Packungsdichte	[Vol.-%]	84,5	83,8	83,8	83,4	83,4	83,8
Luftporengehalt	[Vol.-%]	3,5	4,3	4,3	4,7	4,7	4,3
Sr(pk)	[Vol.-%]	87,5	87,5	87,5	87,5	87,5	87,5
Abwitterung	[g/m ²]	1132,8	1365,4	-	-	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	10,1	9,1	-	-	-	-
β _{d28}	[N/mm ²]	-	-	-	-	67,6	64,4
Spaltzug	[N/mm ²]	-	-	4,8	4,1	-	-

Tabelle D24: Referenz 1

Probename		B1	B2	B3	B4	B5	B6
w/f	-	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
w/z	-	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	266	268	267	268	268	266
Sand 0/2	[kg/m ³]	821	830	828	830	830	821
Basalt 2/5	[kg/m ³]	455	459	457	459	459	455
Basalt 5/8	[kg/m ³]	319	322	321	322	322	319
Basalt 8/11	[kg/m ³]	251	253	252	253	253	251
Basalt 11/16	[kg/m ³]	296	298	297	298	298	296
Wasser	[kg/m ³]	118	119	119	119	119	118
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	204	206	205	206	206	204
Packungsdichte	[Vol.-%]	81,6	82,2	81,9	82,2	82,2	81,6
Luftporengehalt	[Vol.-%]	6,6	5,8	6,2	5,8	5,8	6,6
Sr(pk)	[Vol.-%]	87,3	87,3	87,3	87,3	87,3	87,3
Abwitterung	[g/m ²]	1801,83	2048,49	-	-	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	17,8	15,6	-	-	-	-
βd28	[N/mm ²]	-	-	-	-	57,6	56,6
Spaltzug	[N/mm ²]	-	-	4,37	4,93	-	-

Tabelle D25: Mischung 2 für Dauerhaftigkeitsuntersuchungen

Probename		350/1	350/2	350/3	350/4	350/5	350/6
w/f	-	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
w/z	-	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	307	312	309	312	309	309
Sand 0/2	[kg/m ³]	769	781	775	781	775	775
Basalt 2/5	[kg/m ³]	426	432	429	432	429	429
Basalt 5/8	[kg/m ³]	299	303	301	303	301	301
Basalt 8/11	[kg/m ³]	235	239	237	239	237	237
Basalt 11/16	[kg/m ³]	276	281	279	281	279	279
Wasser	[kg/m ³]	101	103	102	103	102	102
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	200	204	202	204	202	202
Packungsdichte	[Vol.-%]	79,5	80,8	80,1	80,8	80,1	80,1
Luftporengehalt	[Vol.-%]	10,4	8,9	9,6	8,9	9,6	9,6
Sr(pk)	[Vol.-%]	88,7	88,7	88,7	88,7	88,7	88,7
Abwitterung	[g/m ²]	771,61	969,08	-	-	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	25,9	19,9	-	-	-	-
βd28	[N/mm ²]	-	-	-	-	55,4	56,7
Spaltzug	[N/mm ²]	-	-	4,29	4,03	-	-

Tabelle D26: Mischung 3 für Dauerhaftigkeitsuntersuchungen

Probenname		A1	A2	A3	A4	A5	A6
w/f	-	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
w/z	-	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	302	305	305	305	308	307
Sand 0/2	[kg/m ³]	756	761	761	761	770	767
Basalt 2/5	[kg/m ³]	420	423	423	423	428	426
Basalt 5/8	[kg/m ³]	294	297	297	297	300	299
Basalt 8/11	[kg/m ³]	232	233	233	233	236	235
Basalt 11/16	[kg/m ³]	272	275	275	275	278	277
Wasser	[kg/m ³]	100	101	101	101	102	101
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	197	199	199	199	201	201
Packungsdichte	[Vol.-%]	78,3	78,9	78,9	78,9	79,8	79,5
Luftporengehalt	[Vol.-%]	11,7	11,0	11,0	11,0	10,0	10,4
Sr(pk)	[Vol.-%]	88,7	88,7	88,7	88,7	88,7	88,7
Abwitterung	[g/m ²]	1416	988	-	-	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	27,9	32,1	-	-	-	-
ßd28	[N/mm ²]	-	-	-	-	52	46,7
Spaltzug	[N/mm ²]	-	-	3,84	3,94	-	-

Tabelle D27: Mischung 4 für Dauerhaftigkeitsuntersuchungen

Probenname		G1	G2	G3	G4	G5	G6
w/f	-	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
w/z	-	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
w/z _{eq}	-	0,485	0,485	0,485	0,485	0,485	0,485
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	198	199	199	198	198	199
Flugasche FA	[kg/m ³]	92	92	92	92	92	92
Sand 0/2	[kg/m ³]	825	829	829	825	825	829
Basalt 2/5	[kg/m ³]	457	459	459	457	457	459
Basalt 5/8	[kg/m ³]	321	322	322	321	321	322
Basalt 8/11	[kg/m ³]	252	253	253	252	252	253
Basalt 11/16	[kg/m ³]	297	298	298	297	297	298
Wasser	[kg/m ³]	109	109	109	109	109	109
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	211	212	212	211	211	212
Packungsdichte	[Vol.-%]	85,0	85,4	85,4	85,0	85,0	85,4
Luftporengehalt	[Vol.-%]	4,1	3,7	3,7	4,1	4,1	3,7
Sr(pk)	[Vol.-%]	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6
Abwitterung	[g/m ²]	2262,1	2387,9	-	-	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	10,1	9,1	-	-	-	-
ßd28	[N/mm ²]	-	-	-	-	59,2	64,4
Spaltzug	[N/mm ²]	-	-	4,5	4,1	-	-

Tabelle D28: Referenz 2

7.2 Mischungen Typ 1

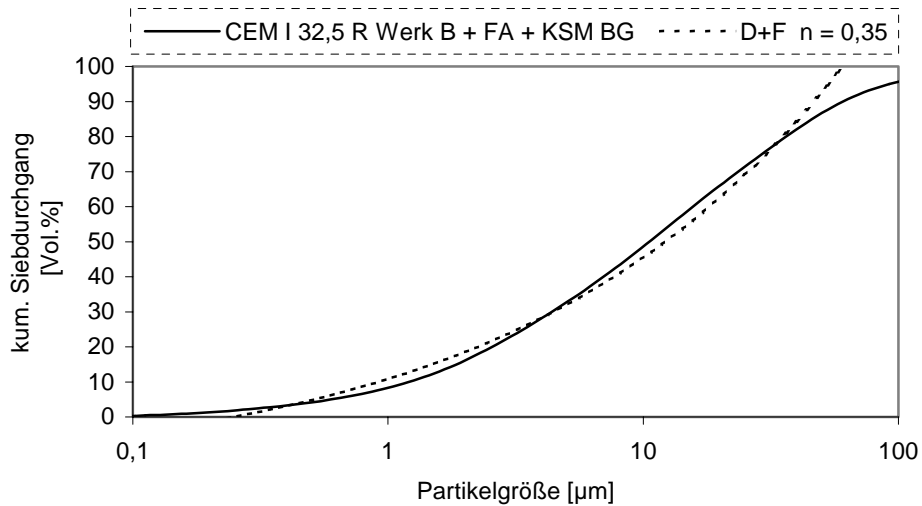


Bild D12: Übereinstimmung des Feinststoffs mit der idealen Sieblinie $n = 0,35$

Probenname		Vor1	Vor2	Vor3	Vor4
w/f	-	0,22	0,22	0,22	0,22
w/z	-	0,55	0,55	0,55	0,55
w/z _{eq}	-	0,485	0,485	0,485	0,485
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	117	117	117	117
Flugasche FA	[kg/m ³]	126	126	126	126
KSM BG	[kg/m ³]	46	46	46	46
Sand 0/2	[kg/m ³]	835	835	835	835
Basalt 2/5	[kg/m ³]	463	463	463	463
Basalt 5/8	[kg/m ³]	324	324	324	324
Basalt 8/11	[kg/m ³]	255	255	255	255
Basalt 11/16	[kg/m ³]	300	300	300	300
Wasser	[kg/m ³]	64	64	64	64
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	172	172	172	172
Packungsdichte	[Vol.-%]	86,4	86,4	86,4	86,4
Luftporengehalt	[Vol.-%]	7,2	7,2	7,2	7,2
Sr(pk)	[Vol.-%]	93,1	93,1	93,1	93,1
Abwitterung	[g/m ²]	1635,07	1547	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	8,72	7,69	-	-
βd28	[N/mm ²]	-	-	66,1	66,7

Tabelle D29: Mischungszusammensetzung, Packungsdichte und Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen

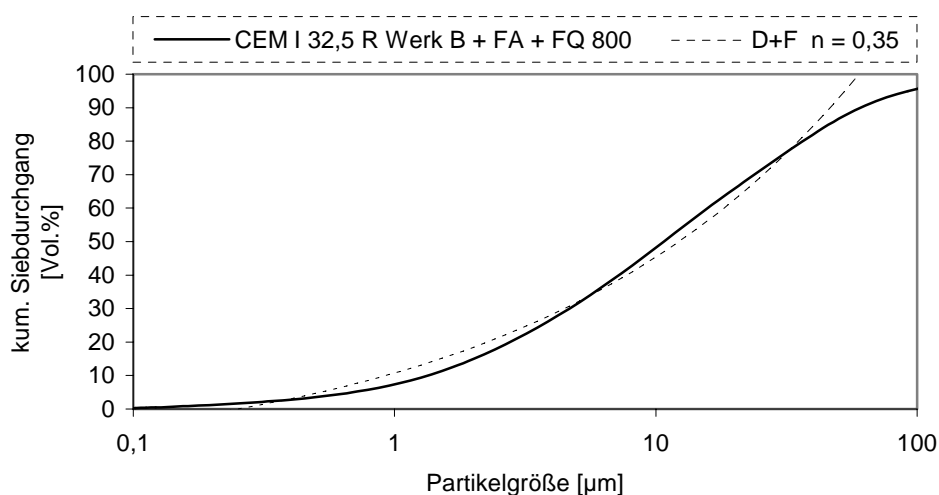


Bild D13: Übereinstimmung des Feinststoffs mit der idealen Sieblinie $n = 0,35$

Probenname		O1	O2	O3	O4	O5	O6
w/f	-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
w/z	-	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
w/z _{eq}	-	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	116	116	115	116	116	116
Flugasche FA	[kg/m ³]	126	125	125	125	126	126
Quarzmehl FQ800	[kg/m ³]	45	45	45	45	45	45
Sand 0/2	[kg/m ³]	832	828	825	828	832	832
Basalt 2/5	[kg/m ³]	461	459	457	459	461	461
Basalt 5/8	[kg/m ³]	323	322	321	322	323	323
Basalt 8/11	[kg/m ³]	254	253	252	253	254	254
Basalt 11/16	[kg/m ³]	299	298	297	298	299	299
Wasser	[kg/m ³]	74	74	73	74	74	74
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	181	181	180	181	181	181
Packungsdichte	[Vol.-%]	86,1	85,7	85,4	85,7	86,1	86,1
Luftporengehalt	[Vol.-%]	6,5	6,9	7,3	6,9	6,5	6,5
Sr(pk)	[Vol.-%]	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1
Abwitterung	[g/m ²]	1668	1591	-	-	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	7	5,6	-	-	-	-
f _{d28}	[N/mm ²]	-	-	-	-	58,1	66,6
Spaltzug	[N/mm ²]	-	-	3,47	3,99	-	-

Tabelle D30: Mischungszusammensetzung, Packungsdichte und Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen

7.3 Mischungen Typ 2

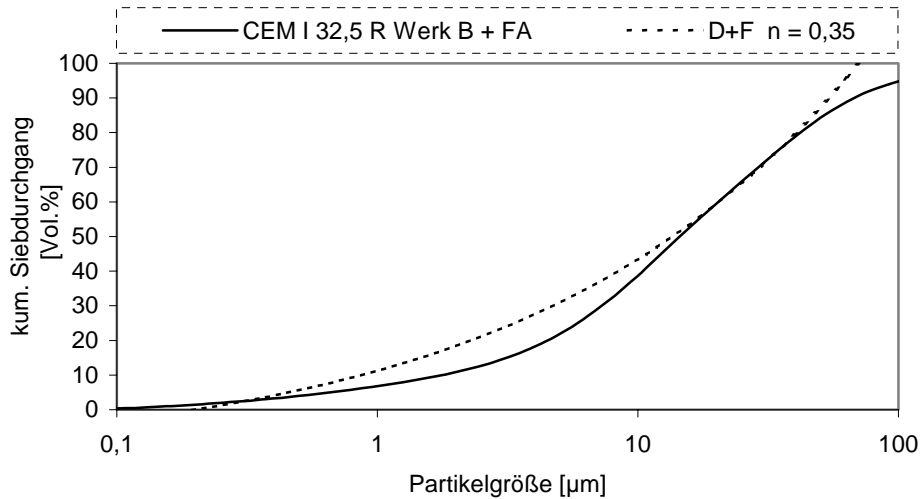


Bild 14: Übereinstimmung des Feinststoffs mit der idealen Sieblinie $n = 0,35$

Probenname		U1	U2	U3	U4	U5	U6
w/f	-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
w/z	-	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
w/z _{eq}	-	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	143	141	141	142	142	142
Flugasche FA	[kg/m ³]	147	145	145	145	146	146
Sand 0/2	[kg/m ³]	838	825	825	828	832	832
Basalt 2/5	[kg/m ³]	464	457	457	459	461	461
Basalt 5/8	[kg/m ³]	326	320	320	322	323	323
Basalt 8/11	[kg/m ³]	256	252	252	253	254	254
Basalt 11/16	[kg/m ³]	302	297	297	298	299	299
Wasser	[kg/m ³]	74	73	73	73	74	74
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	182	180	180	180	181	181
Packungsdichte	[Vol.-%]	86,7	85,3	85,3	85,7	86,0	86,0
Luftporengehalt	[Vol.-%]	5,8	7,3	7,3	7,0	6,6	6,6
Sr(pk)	[Vol.-%]	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1
Abwitterung	[g/m ²]	825	1582	-	-	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	7,2	6,7	-	-	-	-
βd28	[N/mm ²]	-	-	-	-	62,7	61,8
Spaltzug	[N/mm ²]	-	-	4,29	4,61	-	-

Tabelle D31: Mischungszusammensetzung, Packungsdichte und Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen

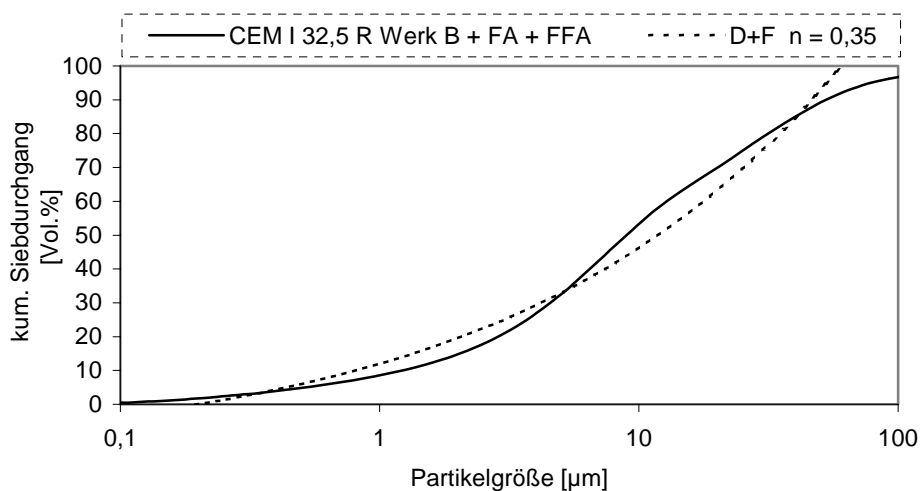


Bild D15: Übereinstimmung des Feinststoffs mit der idealen Sieblinie $n = 0,35$

Probenname		V1	V2	V3	V4	V5	V6
w/f	-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
w/z	-	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
w/z _{eq}	-	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	143	146	145	145	145	144
Flugasche FFA	[kg/m ³]	77	79	78	79	78	78
Flugasche FA	[kg/m ³]	69	71	70	71	70	70
Sand 0/2	[kg/m ³]	835	852	845	849	845	842
Basalt 2/5	[kg/m ³]	462	472	468	470	468	466
Basalt 5/8	[kg/m ³]	324	331	328	330	328	327
Basalt 8/11	[kg/m ³]	255	261	258	259	258	257
Basalt 11/16	[kg/m ³]	300	307	304	305	304	303
Wasser	[kg/m ³]	74	76	75	75	75	75
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	182	186	184	185	184	183
Packungsdichte	[Vol.-%]	86,4	88,2	87,4	87,8	87,4	87,1
Luftporengehalt	[Vol.-%]	6,2	4,3	5,1	4,7	5,1	5,5
Sr(pk)	[Vol.-%]	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1
Abwitterung	[g/m ²]	1292,3	1142	-	-	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	25	22	-	-	-	-
f _{d28}	[N/mm ²]	-	-	-	-	64	67,1
Spaltzug	[N/mm ²]	-	-	4,44	4,12	-	-

Tabelle D32: Mischungszusammensetzung, Packungsdichte und Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen

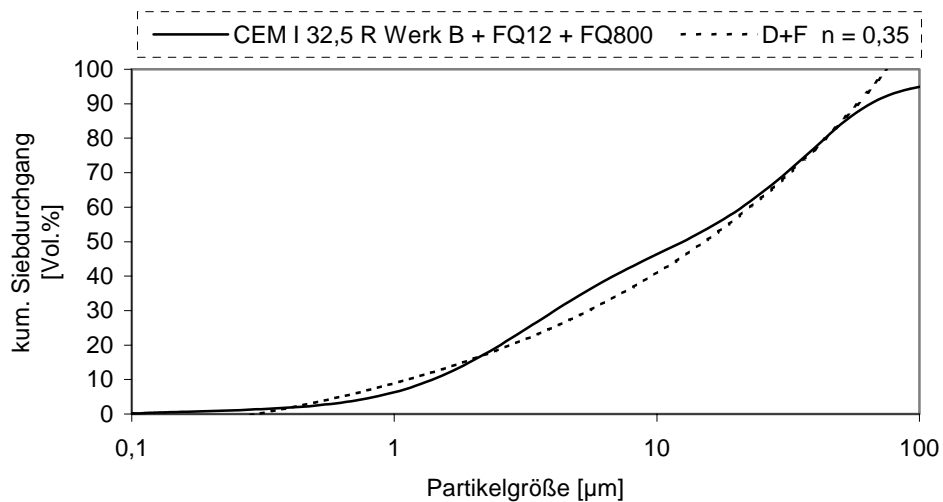


Bild D16: Übereinstimmung des Feinststoffs mit der idealen Sieblinie $n = 0,35$

Probenname		W1	W2	W3	W4	W5	W6
w/f	-	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
w/z	-	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	145	145	145	145	146	145
Quarzmehl FQ800	[kg/m ³]	87	87	87	87	87	87
Quarzmehl FQ12	[kg/m ³]	78	79	79	78	79	79
Sand 0/2	[kg/m ³]	847	851	851	847	854	851
Basalt 2/5	[kg/m ³]	469	471	471	469	473	471
Basalt 5/8	[kg/m ³]	329	330	330	329	332	330
Basalt 8/11	[kg/m ³]	259	260	260	259	261	260
Basalt 11/16	[kg/m ³]	305	306	306	305	307	306
Wasser	[kg/m ³]	85	86	86	85	86	86
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	194	195	195	194	196	195
Packungsdichte	[Vol.-%]	87,6	88,0	88,0	87,6	88,4	88,0
Luftporengehalt	[Vol.-%]	3,8	3,4	3,4	3,8	3,0	3,4
Sr(pk)	[Vol.-%]	91,1	91,1	91,1	91,1	91,1	91,1
Abwitterung	[g/m ²]	2165,6	2438,5	-	-	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	23	29	-	-	-	-
βd28	[N/mm ²]	-	-	-	-	70,4	68,2
Spaltzug	[N/mm ²]	-	-	4,81	3,93	-	-

Tabelle D33: Mischungszusammensetzung, Packungsdichte und Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen

7.4 Mischungen Typ 3

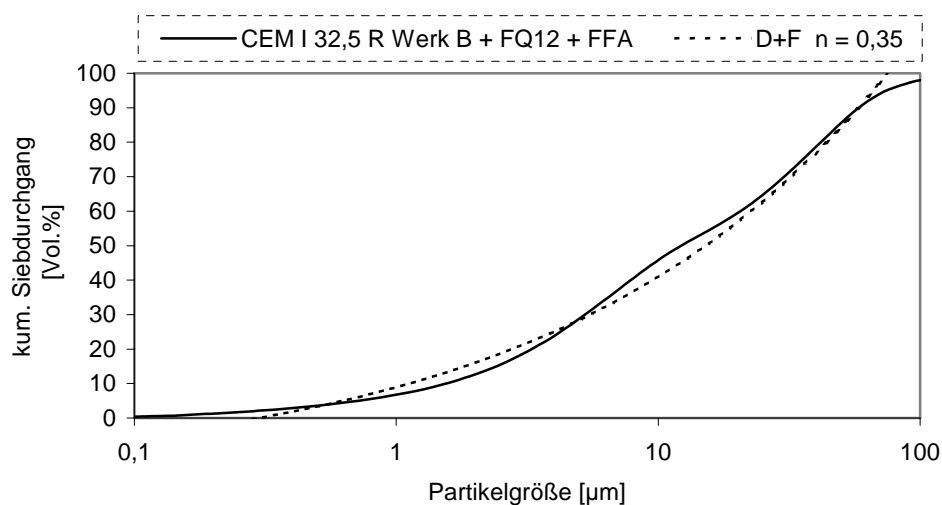


Bild D17: Übereinstimmung des Feinststoffs mit der idealen Sieblinie $n = 0,35$

Probenname		R1	R2	R3	R4	R5	R6
w/f	-	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
w/z	-	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
w/z _{eq}	-	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	118	120	118	119	118	119
Flugasche FFA	[kg/m ³]	79	80	79	79	79	80
Quarzmehl FQ12	[kg/m ³]	104	106	104	105	104	105
Sand 0/2	[kg/m ³]	847	858	847	851	847	854
Basalt 2/5	[kg/m ³]	469	475	469	471	469	473
Basalt 5/8	[kg/m ³]	329	333	329	330	329	332
Basalt 8/11	[kg/m ³]	259	262	259	260	259	261
Basalt 11/16	[kg/m ³]	305	309	305	306	305	307
Wasser	[kg/m ³]	83	84	83	84	83	84
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	194	196	194	195	194	196
Packungsdichte	[Vol.-%]	87,7	88,8	87,7	88,0	87,7	88,4
Luftporengehalt	[Vol.-%]	4,0	2,8	4,0	3,6	4,0	3,2
Sr(pk)	[Vol.-%]	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3
Abwitterung	[g/m ²]	2534	2390	-	-	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	9,7	10,6	-	-	-	-
f _{d28}	[N/mm ²]	-	-	-	-	50,8	56,7
Spaltzug	[N/mm ²]	-	-	4,2	4,62	-	-

Tabelle D34: Mischungszusammensetzung, Packungsdichte und Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen

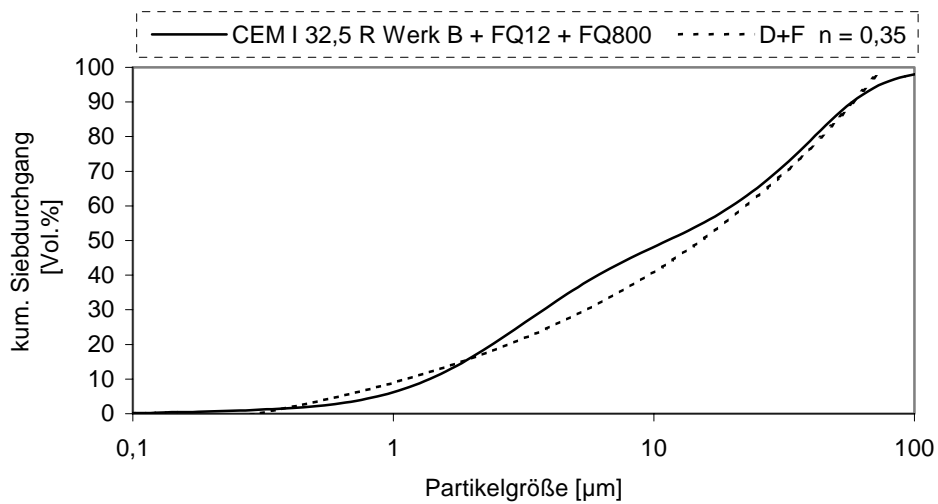


Bild D18: Übereinstimmung des Feinststoffs mit der idealen Sieblinie $n = 0,35$

Probenname		P1	P2	P3	P4	P5	P6
w/f	-	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
w/z	-	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	117	116	116	117	116	116
Quarzmehl FQ12	[kg/m ³]	101	100	100	101	100	100
Quarzmehl FQ800	[kg/m ³]	86	86	86	86	86	86
Sand 0/2	[kg/m ³]	838	831	831	834	831	831
Basalt 2/5	[kg/m ³]	464	460	460	462	460	460
Basalt 5/8	[kg/m ³]	326	323	323	324	323	323
Basalt 8/11	[kg/m ³]	256	254	254	255	254	254
Basalt 11/16	[kg/m ³]	301	299	299	300	299	299
Wasser	[kg/m ³]	82	82	82	82	82	82
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	191	189	189	190	189	189
Packungsdichte	[Vol.-%]	86,7	86,0	86,0	86,4	86,0	86,0
Luftporengehalt	[Vol.-%]	5,0	5,8	5,8	5,4	5,8	5,8
Sr(pk)	[Vol.-%]	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3
Abwitterung	[g/m ²]	3690	3172	-	-	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	5,7	6,2	-	-	-	-
βd28	[N/mm ²]	-	-	-	-	51,1	51,4
Spaltzug	[N/mm ²]	-	-	4,32	3,35	-	-

Tabelle D35: Mischungszusammensetzung, Packungsdichte und Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen

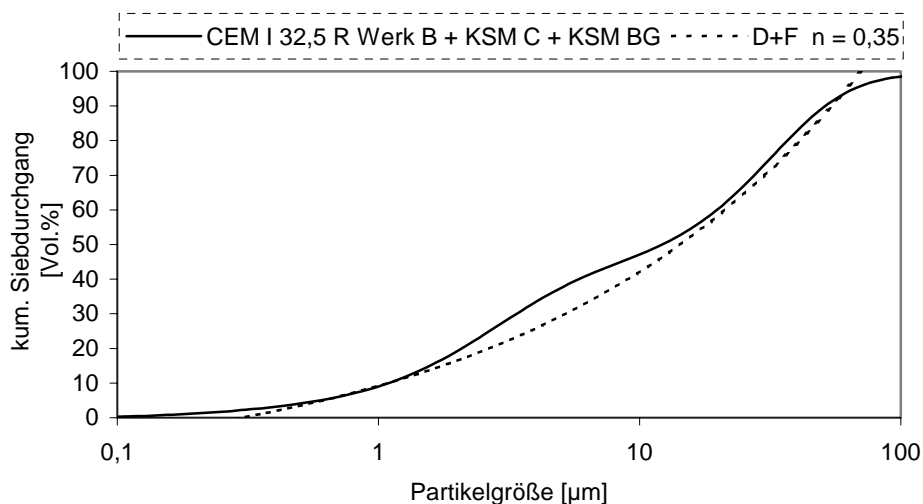


Bild D19: Übereinstimmung des Feinststoffs mit der idealen Sieblinie $n = 0,35$

Probename		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
w/f	-	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
w/z	-	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	117	118	118	117	117	116
Kalksteinmehl KSM C	[kg/m ³]	101	102	102	101	101	100
Kalksteinmehl KSM BG	[kg/m ³]	87	88	88	88	88	87
Sand 0/2	[kg/m ³]	834	844	844	837	837	831
Basalt 2/5	[kg/m ³]	462	468	468	464	464	460
Basalt 5/8	[kg/m ³]	324	328	328	325	325	323
Basalt 8/11	[kg/m ³]	255	258	258	256	256	254
Basalt 11/16	[kg/m ³]	300	304	304	301	301	299
Wasser	[kg/m ³]	82	83	83	82	82	82
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	189	192	192	190	190	189
Packungsdichte	[Vol.-%]	86,3	87,3	87,3	86,6	86,6	85,9
Luftporengehalt	[Vol.-%]	5,5	4,4	4,4	5,1	5,1	5,9
Sr(pk)	[Vol.-%]	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3
Abwitterung	[g/m ²]	7179	6641	-	-	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	18,8	15,5	-	-	-	-
f _{d28}	[N/mm ²]	-	-	-	-	52,8	56
Spaltzug	[N/mm ²]	-	-	3,77	3,43	-	-

Tabelle D36: Mischungszusammensetzung, Packungsdichte und Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen

7.5 Mischungen Typ 4

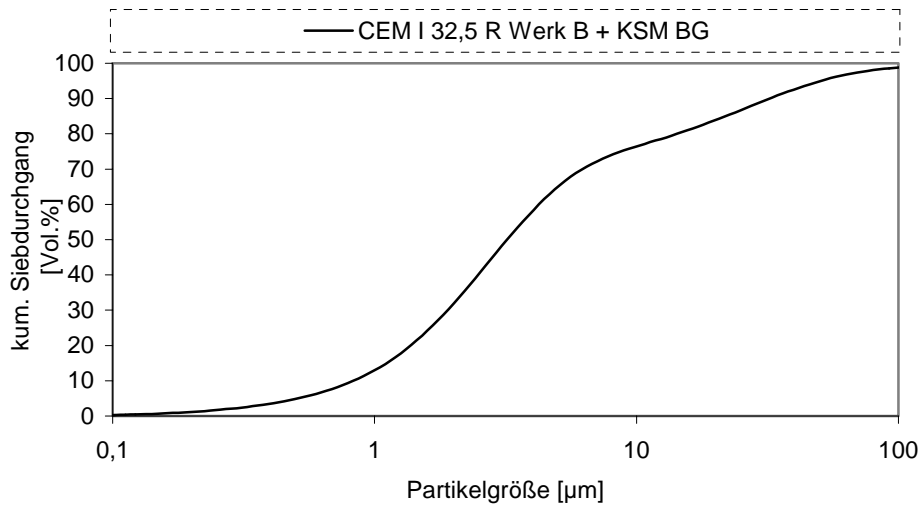


Bild D20: Ausfallsieblinie

Probenname		BG1	BG2	BG3	BG4
w/f	-	0,24	0,24	0,24	0,24
w/z	-	0,63	0,63	0,63	0,63
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	118	118	119	119
Kalksteinmehl KSM BG	[kg/m ³]	190	190	190	190
Sand 0/2	[kg/m ³]	848	848	851	851
Basalt 2/5	[kg/m ³]	470	470	471	471
Basalt 5/8	[kg/m ³]	329	329	331	331
Basalt 8/11	[kg/m ³]	259	259	260	260
Basalt 11/16	[kg/m ³]	305	305	306	306
Wasser	[kg/m ³]	75	75	76	76
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	185	185	186	186
Packungsdichte	[Vol.-%]	87,6	87,6	88,0	88,0
Luftporengehalt	[Vol.-%]	4,9	4,9	4,5	4,5
Sr(pk)	[Vol.-%]	92,1	92,1	92,1	92,1
Abwitterung	[g/m ²]	6685,3	6736,94	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	13,92	10,2	-	-
ßd28	[N/mm ²]	-	-	60,3	64,9

Tabelle D37: Mischungszusammensetzung, Packungsdichte und Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen

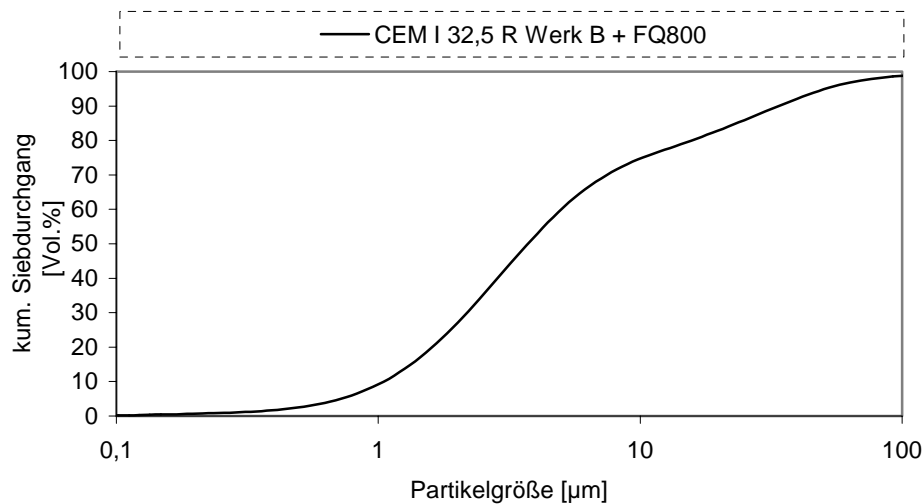


Bild D21: Ausfallsieblinie

Probenname		Aus1	Aus2	Aus3	Aus4
w/f	-	0,28	0,28	0,28	0,28
w/z	-	0,72	0,72	0,72	0,72
CEM I 32,5 R Werk B	[kg/m ³]	116	116	117	117
Quarzmehl FQ800	[kg/m ³]	186	186	187	187
Sand 0/2	[kg/m ³]	830	830	834	837
Basalt 2/5	[kg/m ³]	460	460	462	464
Basalt 5/8	[kg/m ³]	323	323	324	325
Basalt 8/11	[kg/m ³]	254	254	255	256
Basalt 11/16	[kg/m ³]	299	299	300	301
Wasser	[kg/m ³]	84	84	84	84
Feinleimgehalt	[kg/m ³]	191	191	192	193
Packungsdichte	[Vol.-%]	86,0	86,0	86,3	86,7
Luftporengehalt	[Vol.-%]	5,7	5,7	5,3	4,9
Sr(pk)	[Vol.-%]	91,1	91,1	91,1	91,1
Abwitterung	[g/m ²]	2844,6	2826,09	-	-
Lösungsaufnahme	[g]	4,82	4,28	-	-
βd28	[N/mm ²]	-	-	74,9	80,1

Tabelle D38: Mischungszusammensetzung, Packungsdichte und Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen

8 Berechnung des Feststoffvolumens der Feinststoffe und des durch Hydratation chemisch und physikalisch gebundenen Wassers

Gleichung D1:

$$280 / 6 = \frac{269 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{CEMI } 32,5 \text{ R}}{3100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{269 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{CEMI } 32,5 \text{ R} \cdot 0,2}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,141 \text{ m}^3 \text{ Feststoff}$$

Gleichung D2:

$$\text{Vor4} = \frac{117 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{CEMI } 32,5 \text{ R}}{3100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{117 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{CEMI } 32,5 \text{ R} \cdot 0,2}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{126 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{FA}}{2380 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{46 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{BG}}{2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,131 \text{ m}^3 \text{ Feststoff}$$

Gleichung D3:

$$\text{W6} = \frac{145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{CEMI } 32,5 \text{ R}}{3100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{CEMI } 32,5 \text{ R} \cdot 0,2}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{79 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{FQ } 12}{2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{87 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{FQ } 800}{2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,138 \text{ m}^3 \text{ Feststoff}$$

Gleichung D4:

$$\text{U6} = \frac{142 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{CEMI } 32,5 \text{ R}}{3100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{142 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{CEMI } 32,5 \text{ R} \cdot 0,2}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{146 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{FA}}{2380 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,136 \text{ m}^3 \text{ Feststoff}$$

Gleichung D5:

$$\text{Q6} = \frac{116 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{CEMI } 32,5 \text{ R}}{3100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{116 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{CEMI } 32,5 \text{ R} \cdot 0,2}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{KSM } C}{2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{87 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{BG}}{2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,130 \text{ m}^3 \text{ Feststoff}$$

Gleichung D6:

$$BG3 = \frac{119 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{CEMI } 32,5 R}{3100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{119 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{CEMI } 32,5 R \cdot 0,2}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{190 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{BG}}{2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,133 \text{ m}^3 \text{ Feststoff}$$

Gleichung D7:

$$\text{Aus4} = \frac{117 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{CEMI } 32,5 R}{3100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{117 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{CEMI } 32,5 R \cdot 0,2}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{187 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{FQ } 800}{2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,132 \text{ m}^3 \text{ Feststoff}$$

9 Quecksilberdruckporosimetrie

Probe	Porosität [Vol.-%]	Luft- poren [Vol.-%]	Kapillar- poren [Vol.-%]	Gel- poren [Vol.-%]	mittlerer Porenrad. (med. pore rad.) [µm]	Gesamtvol. Probe (tot. intr. Vol.) [ml/g]
280/6	14,3269	5,6405	5,1893	3,4971	0,2764	0,0635
Vor4	9,1954	4,2196	2,0488	2,9269	1,9953	0,0377
W6	9,7356	2,6352	2,0984	5,0020	0,0282	0,0399
U6	8,9696	3,4855	1,4381	4,0461	0,0935	0,0368
Q6	9,9881	3,2019	4,1338	2,6523	0,0756	0,0418
BG3	9,8470	3,0982	1,1048	5,6440	0,0212	0,0410
Aus4	10,0181	2,7761	1,4725	5,7695	0,0193	0,0415

Tabelle D39: Porositätsverteilung der beprobten optimierten Betone im Vergleich zur Referenz 1

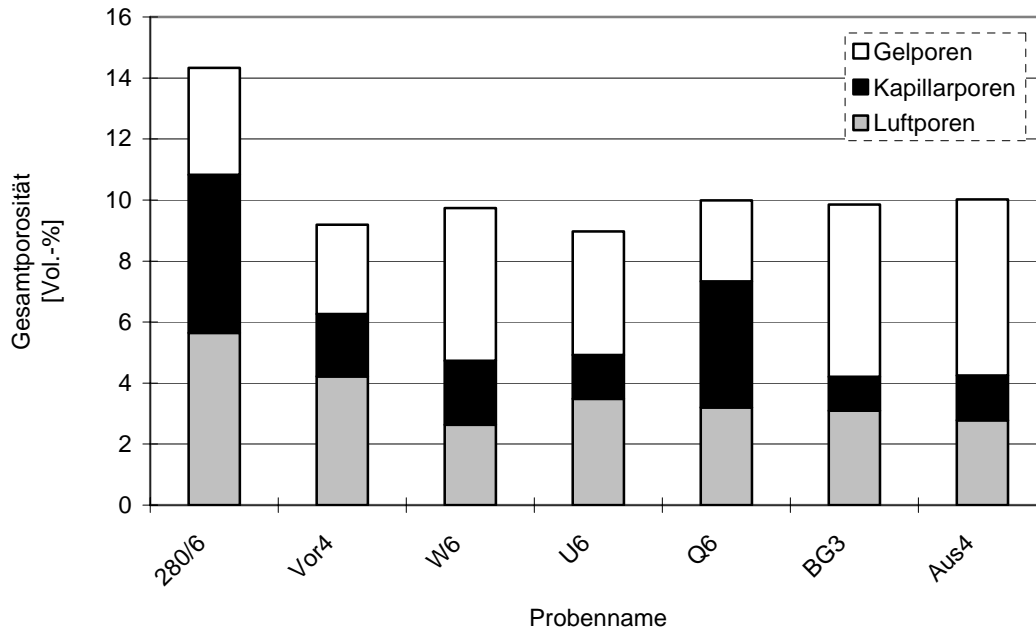


Bild D22: Gel-, Kapillar- und Luftporengehalte der optimierten Betone im Vergleich zur Referenz 1

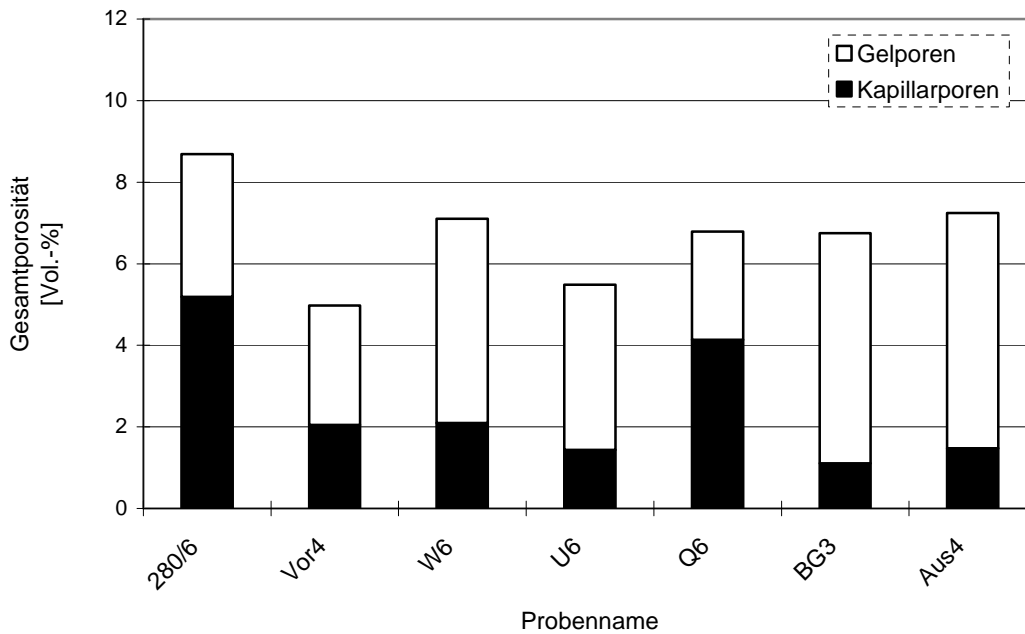


Bild D23: Gel- und Kapillarporengehalte der optimierten Betone im Vergleich zur Referenz 1

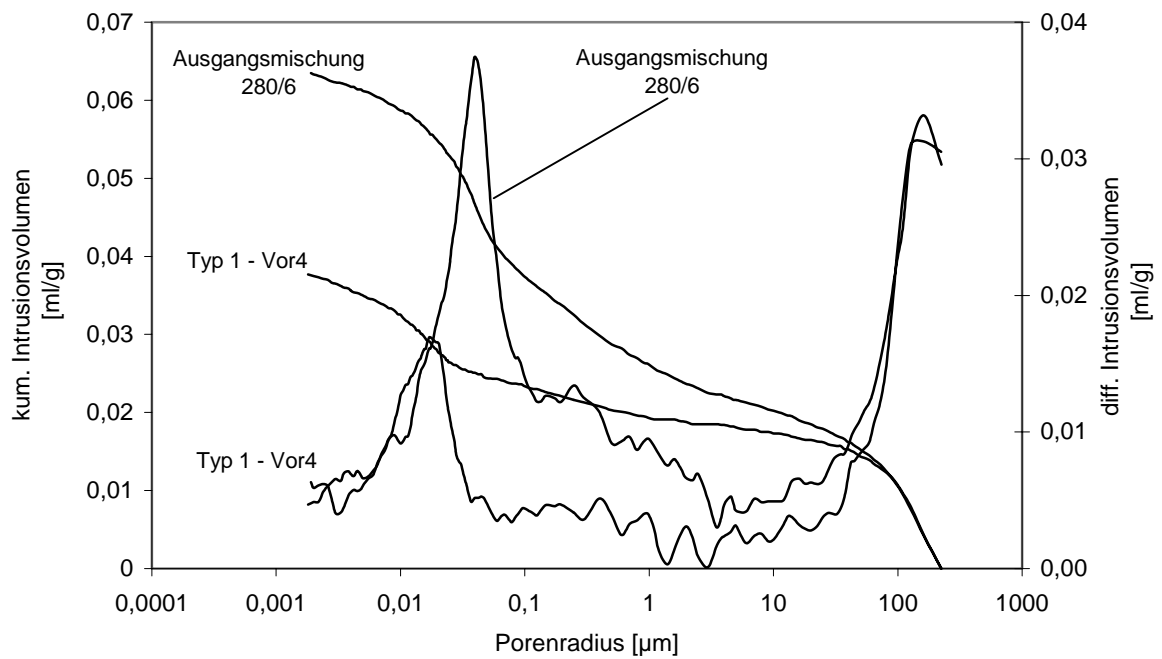


Bild D24: Differentielle und kumulative Porenradienverteilung des optimierten Betons Vor4 (Typ 1) im Vergleich zur Referenz 1

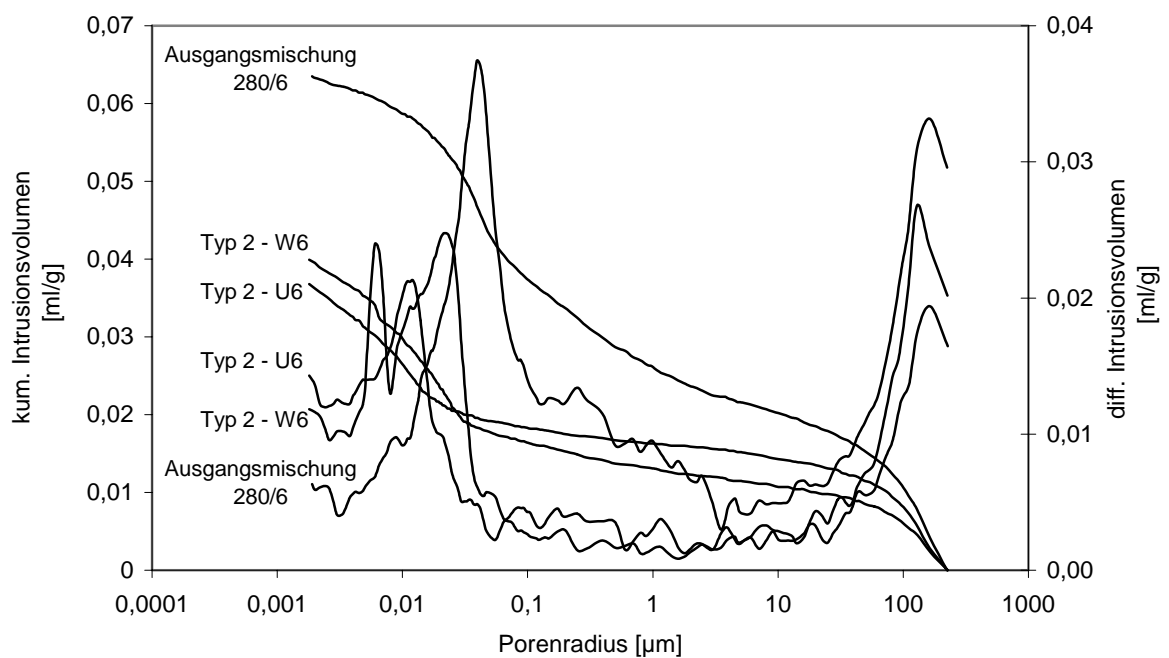


Bild D25: Differentielle und kumulative Porenradienverteilung der optimierten Betone W6 und U6 (Typ 2) im Vergleich zur Referenz 1

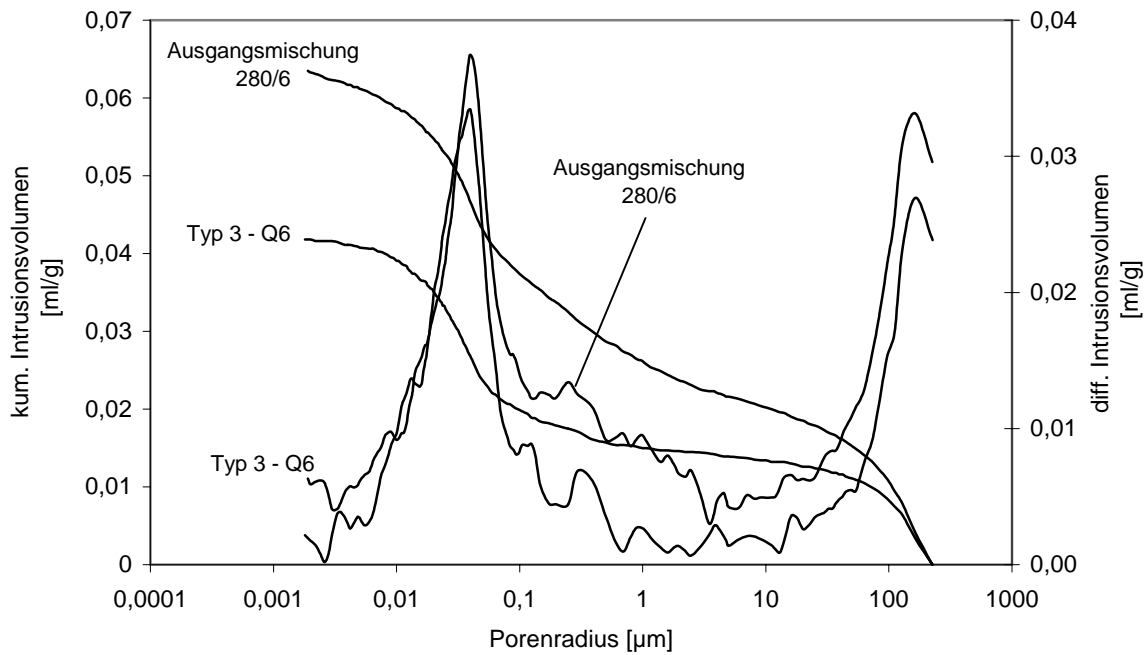


Bild D26: Differentielle und kumulative Porenradienverteilung des optimierten Betons Q6 (Typ 3) im Vergleich zur Referenz 1

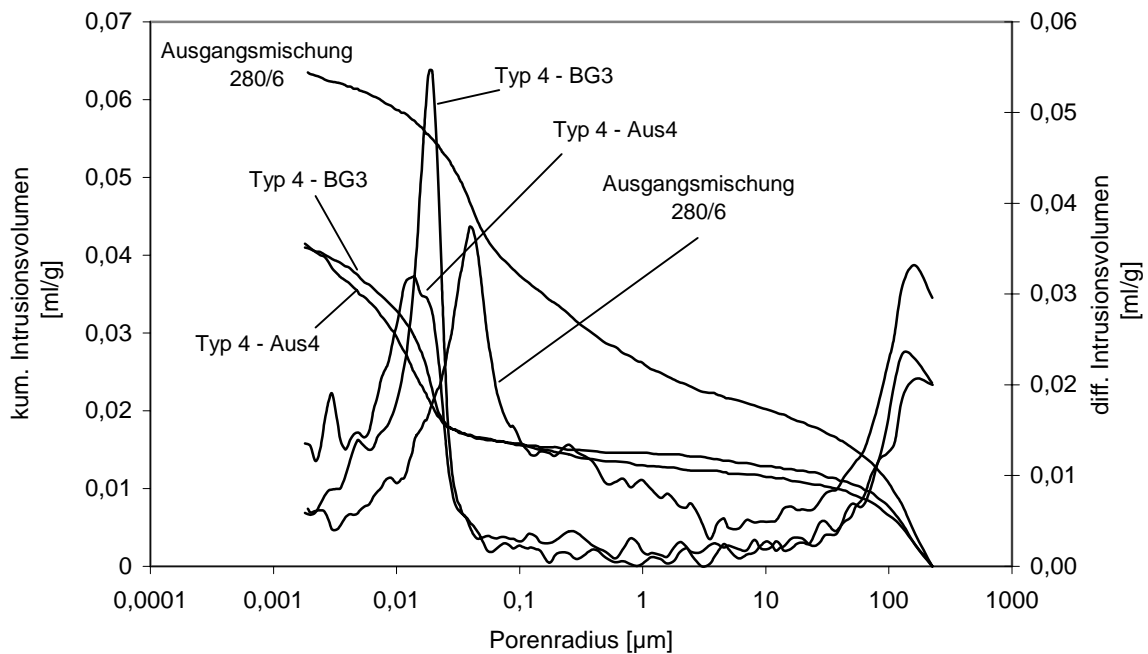


Bild D27: Differentielle und kumulative Porenradienverteilung der optimierten Betone BG3 und Aus4 (Typ 4) im Vergleich zur Referenz 1

Anhang E:

1 Liste häufig verwendeter Bezeichnungen und Symbole

1.1 Lateinische Buchstaben

<i>a</i>	<i>Beschleunigung</i>	<i>[m/s²]</i>
<i>á</i>	<i>Erdbeschleunigung</i>	<i>[m/s²]</i>
<i>c</i>	<i>Kohäsion</i>	<i>[kN/m²]</i>
<i>f</i>	<i>Gewicht Feinststoff</i>	<i>[kg]</i>
<i>f'</i>	<i>Frequenz</i>	<i>[1/s]</i>
<i>G_i</i>	<i>Gewicht Feststoffe</i>	<i>[kg]</i>
<i>m</i>	<i>Masse</i>	<i>[kg]</i>
<i>n</i>	<i>Verteilungsmodul nach Dinger und Funk</i>	<i>[-]</i>
<i>(n)</i>	<i>Steigungsmaß RRSB-Verteilung</i>	<i>[-]</i>
<i>pk</i>	<i>Packungsdichte</i>	<i>[Vol.-%]</i>
<i>s</i>	<i>Fallstrecke</i>	<i>[m]</i>
<i>v</i>	<i>Geschwindigkeit</i>	<i>[m/s]</i>
<i>V_w</i>	<i>Volumen Wasser</i>	<i>[Vol.-%]</i>
<i>V_i</i>	<i>Volumen Feststoffe</i>	<i>[Vol.-]</i>

V_{LP}	Volumen Luftporen	[Vol.-%]
w	Gewicht bzw. Volumen Wasser	[kg bzw. Vol.-%]
W_B	Beschleunigungsarbeit	[Nm]
W_{kin}	kinetische Energie	[Nm]
w_{opt}	Optimaler Wassergehalt	[Vol.-%]
z	Gewicht Zement	[kg]

1.2 Griechische Buchstaben

ρ	Stoffdichte	[kg/dm ³]
σ_1	Vertikale Hauptspannungen	[KN/m ²]
σ_3	Horizontale Hauptspannungen	[KN/m ²]
φ	Reibungswinkel	[°]
ω	Winkelgeschwindigkeit	[rad/s]

1.3 Weitere verwendete Begriffe

Adhäsionskraft	[N/cm ²]
Dauerhaftigkeit	[-]
Gründruckfestigkeit	[N/mm ²]
Kapillarkraft	[N/cm ²]

Kapillarporosität	[Vol.-%]
Kapillarsog	[N/cm ²]
Kohäsionskraft	[KN/m ²]
Packungsoptimierung	[-]
Spaltzugfestigkeit	[N/mm ²]
Robustheit	[-]
28-Tagefestigkeit	[N/mm ²]
Verdichtungsarbeit	[-]
Wiederholgenauigkeit	[-]