

Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau
Structural Materials and Engineering Series

Heft 12
No. 12

**Einfluss der Granulometrie und
des Wassergehaltes auf die Festigkeit und
Gefügedichtigkeit von Zementstein**

Influence of the granulometrie and
the water content on the strength and
density of cement stone

Thomas Teichmann

kassel
university
press

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. Harald S. Müller

Dritter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Joost C. Walraven

Tag der mündlichen Prüfung: 3. Dezember 2007

Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über

<http://dnb.d-nb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2007

ISBN 978-3-89958-441-7

URN urn:nbn:de:0002-4410

© 2008, kassel university press GmbH, Kassel
www.upress.uni-kassel.de

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmidt
Universität Kassel
Fachbereich Bauingenieurwesen
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens
und Bauchemie
Mönchebergstr. 7
D-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
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Fachgebiet Massivbau
Kurt-Wolters-Str. 3
D-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

Die Porosität des Zementsteins und sein Widerstand gegen betonschädigende Gase und Flüssigkeiten wird bislang in erster Linie durch die sachgerechte Anpassung des Zementgehaltes und des Wasserzementwertes an die Exposition des Bauteils während der Nutzungszeit gesteuert. Die Entwicklung des Ultra-Hochfesten Betons hat gezeigt, dass die Dichtigkeit und die Festigkeit des Zementsteins auch deutlich verbessert werden kann, wenn die Packungsdichte des Feinkorns erhöht und dadurch der Hohlraum zwischen den Partikeln verringert wird.

Der vorliegende 12. Band der Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau beschreibt die umfangreichen Untersuchungen und Betrachtungen, die Herr Dr.-Ing. Thomas Teichmann im Rahmen seiner am Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie angefertigten Dissertation angestellt hat, um die Wirkung einer verbesserten Packungsdichte bei Normalbeton zu ermitteln.

Die mit Auszeichnung bewertete Arbeit macht deutlich, dass die an UHPC festgestellten Wirkmechanismen unter bestimmten Voraussetzungen auch bei Normalbeton festzustellen sind: mit steigender Packungsdichte der feinen Partikel wird das Gefüge dichter und der Diffusionswiderstand und die Festigkeit steigen an. Die in einem Modell zusammengefassten Zusammenhänge ermöglichen es, Mörtel und Betone durch Verwendung kornoptimierter inerter Feinstoffe zu optimieren, indem ihre Wirkung ähnlich wie bei reaktiven Zusatzstoffen mit einem wirkungsäquivalenten k -Wert belegt und bei der Einstellung des w/z-Wertes berücksichtigt wird.

Die Arbeit zeigt damit einen neuen betontechnologischen Weg auf, wie Mörtel und Betone mit wenig zusätzlichem Aufwand technisch und wirtschaftlich optimiert werden können.

Kassel, den 7.7.2008

Die Herausgeber

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie der Universität Kassel.

Mein ganz besonderer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Schmidt für die Möglichkeit und den Freiraum zur Umsetzung meiner Ideen. Die langen und anregenden Gespräche haben ganz wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Für das entgegengebrachte Vertrauen möchte ich mich herzlich bedanken.

Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller von der Universität Karlsruhe und Herrn Prof. Dr.-Ir. Joost C. Walraven von der Technischen Universität Delft für die Übernahme des Korreferats, die kritische Durchsicht und die wertvollen Anmerkungen.

Auch möchte ich mich bei den Herren Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Fehling und Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert für die kritische Durchsicht meiner Arbeit bedanken.

Allen Mitarbeitern des Fachgebiets Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie, ohne deren Mithilfe diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre, möchte ich an dieser Stelle noch einmal meinen herzlichen Dank aussprechen. Besonders Frau Ulrike Dumat, Herrn Burkhardt Deiß und Frau Nadine Schuppke danke ich für ihre tatkräftige Unterstützung bei den zahlreichen Messungen. Ebenso gilt mein Dank den zahlreichen Diplomanden und studentischen Hilfskräften, ganz besonders Frau Fan Jie, Herrn Avshalom Ganz, Herrn Dipl.-Ing. Kai Schumann, Herrn Dipl.-Ing. Lars Nitsch, Herrn Torsten Braun, Herrn Heiko Möller, sowie Herrn Tino Sablotny.

Meinen Kollegen danke ich für die Zusammenarbeit, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Carsten Geisenhanslücke für die gemeinsamen Gespräche und die gegenseitige Hilfe.

Diese Arbeit widme ich meiner Frau Christina, meinen Eltern Angelika und Werner und meiner Schwester Kirstin.

Kurzfassung

Der Widerstand von Beton gegen Gase und Flüssigkeiten wird bislang in erster Linie durch die sachgerechte Anpassung des Zementgehaltes und des Wasserzementwerts (w/z-Wert) an seine Exposition im Bauteil während der Nutzungszeit gesteuert. Je niedriger der w/z-Wert gewählt wird, umso geringer ist der Anteil an Kapillarporen im erhärteten Zementstein und um so höher sein Widerstand gegen Umwelteinflüsse. Demgegenüber hat die Entwicklung von Ultra-Hochfesten Betonen gezeigt, dass man die Dichtigkeit und Festigkeit von Zementstein auch dadurch erhöhen kann, dass die Packung des Feinkorns so dicht gestaltet wird, dass der zwischen dem Feststoff verbleibende Hohlraum minimiert wird.

In dieser Arbeit wurde untersucht wie sich die Effekte der Packungsdichte und des Wassergehalts auf die Zementsteinmatrix auswirken. Dafür wurden zunächst reine Feinstoffgemische, bestehend aus einem Zement und einem inertem Feinstoff untersucht. Der Zement wurde volumengleich durch sogenannte packungswirksame und nicht packungswirksame, zementfeine Feinstoffe ausgetauscht. Durch die gezielte Füllung der Hohlräume zwischen den Zementpartikeln und der Anpassung des Wassergehaltes konnte die Wirksamkeit inerter Füllstoffe signifikant verbessert werden. Von entscheidender Bedeutung war hierbei die Kenntnis von der Granulometrie der Feinstoffe und deren Wirksamkeit im Feinstoffbereich unterhalb 0,125 mm Korngröße.

Es konnte nachgewiesen werden, dass durch inerte, packungswirksame (Hohlraum füllende) Feinstoffe und die Anpassung des Wassergehalts die Gefügedichte des erhärteten Zementsteins signifikant erhöht werden kann. Dabei ist der Wassergehalt von wesentlicher Bedeutung.

Aus den gewonnenen, umfangreichen Laborergebnissen wurde ein Modell entwickelt, dass die Druckfestigkeit oder den Kapillarporengehalt mit der Packungsdichte und der Wasserfilmdicke in Zusammenhang bringt und die Einordnung der Druckfestigkeit über den w/z-Wert erlaubt. Auf diese Weise konnten massebezogene Wirksamkeitsfaktoren (k-Werte) für inerte Feinstoffe im Zementstein und später im Beton bestimmt werden. Die Wirksamkeitsfaktoren sind dabei vom w/z-Wert abhängig. Bei einem w/z-Wert von 0,25 ergab sich bei 20 Vol.-% Austausch eines grobgemahlenen Zements CEM I 32,5 R durch ein hochfeines, packungswirksames Quarzmehl ein k-Wert von 1,87. Mit einem auf 0,45 zunehmendem w/z-Wert verringerte sich der k-Wert auf 0,21. Ein ähnlich feines Kalksteinmehl (K1) ergab bei gleicher Vorgehensweise k-Werte in der gleichen Größenordnung.

Zusammenfassend zeigt das auf umfangreichen Laboruntersuchungen basierende Modell den direkten Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit bzw. der Dichtigkeit der Matrix und der Wasserfilmdicke sowie der Packungsdichte. Es kann ein gutes Instrument sein, um Normal- oder Hochfeste Betone durch die Verwendung von kornoptimierten mineralischen Feinstoffen technisch und wirtschaftlich zu verbessern.

Abstract

Influence of the granulometric and the water content on the strength and density of cement stone.

The resistance of concrete to gases and fluids is regulated predominantly by the adaption of the cement content and the water-cement ratio (w/c-ratio) to the environmental exposition of the concrete structure during the period of use. The lower the w/c-ratio will be chosen the lower the content of capillary pores in the hardened cement stone and the higher its resistance against environmental influences will be. On the other hand the development of ultra-high performance concretes (UHPC) has shown that by increasing the packing density of the fine particles and thus reducing the remaining voids between them the water demand of the fresh concrete was significantly reduced and the density and the strength of the cement stone was improved effectively.

In this PhD-thesis the effects of the packing density on the porosity, durability and strength of the cement matrix of ordinary concretes were investigated. Firstly pure cement mixes were evaluated as a reference.. Then the cement was substituted part by part by an increasing volume of fine powders of different fineness either filling the voids between the coarser particles and thus increasing the packing density or not. By the systematic increase of the packing density together with the adaption of the water content the effectiveness of inert fine powders was proven for ordinary concrete.

It was demonstrated, that the density and the strength of the cement stone and its resistance to harmful substances can be increased significantly even by inert but void filling mineralic powders together with the adaption of the water content and thus the w/c-ratio.

Based on the results of extensive laboratory test series a mathematic model based on non-linear algorithms was developed that combines the porosity and the strength at a certain packing density and w/c-ratio with the calculated water film thickness covering the surface of the particles. As a result efficiency-coefficients (k-values) for the effectiveness of inert fines compared to the equivalent amount of cement can be determined. The coefficients are depending on the w/c-ratio. As an example with a w/c-ratio of 0,25 and a substitution of 20 vol.% of a coarsely ground cement CEM I 32,5 R by a fine, packing-effective quartz powder, a k-value of 1,87 results. If the w/c-ratio increases up to 0,45 the k-value declines to 0,21. Similar results and reactions are appearing when other powders like e.g. fine limestone flours are used.

In summary, the model, which is based on extensive laboratory test series, allows to predict the compressive strength and/or the matrix density from the water-film thickness and the packing density. It is a valuable instrument to improve ordinary or high performance concretes technically and economically by the use of grain optimized inert or reactive mineralic fillers.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Stand des Wissens	3
2.1. ENTWICKLUNG VON BETON	3
2.2. DAUERHAFTIGKEIT VON BETON	4
2.2.1. EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE DAUERHAFTIGKEIT	4
2.2.2. EINFLUSSGRÖßen AUF DIE DAUERHAFTIGKEIT	5
2.2.3. WIRKUNGSMECHANISMEN DER FEINSTOFFE	12
2.3. WIRKSAMKEITSFAKTOREN FÜR ZUSATZSTOFFE	17
2.3.1. REGELUNGEN ZUR DAUERHAFTIGKEIT IN DER DIN EN 206-1	18
3. Transportmechanismen im Zementstein	20
3.1. DIFFUSION	22
3.1.1. DIFFUSIONSKoeffizient	22
3.1.2. WASSERDAMPFDIFFUSIONSKoeffizient	23
3.1.3. CHLORIDIONENDIFFUSION	24
3.2. KAPILLARITÄT	25
3.2.1. WASSERAUFAHMEKOEFFIZIENT	25
4. Vorüberlegungen - Füllereffekt	27
4.1.1. METHODEN ZUR RECHNERISCHEN ERFASSUNG DER PACKUNGSDICHTE	27
4.1.2. RECHENMODELL NACH SCHWANDA	28
4.1.3. EINFLUSS DER FÜLLSTOFFE AUF DIE OBERFLÄCHE UND DIE WASSERFILMDICKE	34
5. Zielsetzung und Vorüberlegungen	37
5.1. ZIELSETZUNG	37
5.2. ANSÄTZE ZUR ERZEUGUNG HOHER PACKUNGS- UND GEFÜGEDICHTEN	38
5.3. UNTERSUCHUNGSPROGRAMM	41
5.3.1. ÜBERSICHT ÜBER DIE DURCHGEFÜHRten VERSUCHE	42
5.3.2. HERSTELLUNG	44
5.4. PRÜFMETHODEN	45
5.4.1. CHARAKTERISIERUNG DER AUSGANGSSTOFFE	45
5.4.2. HOHLRAUMGEHALT	46
5.4.3. WASSERANSPRUCH UND WASSERABSONDERUNG	47
5.4.4. RHEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN	48
5.4.5. FESTIGKEITSUNTERSUCHUNGEN	48

5.4.6. PORENGEFÜGE	49
5.4.7. HYDRATATIONSGRAD	49
5.4.8. DIFFUSION	50
5.4.9. KAPILLARE WASSERAUFGNAHME	54
5.4.10. OPTISCHE GEFÜGEUNTERSUCHUNGEN	55
6. Voruntersuchungen	57
6.1. AUSGANGSSTOFFE	57
6.1.1. CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG	57
6.1.2. GRANULOMETRIE	58
6.1.3. KORNFORM	59
6.2. RECHNERISCHE BESTIMMUNG DER PACKUNGSDICHTE	64
6.3. EINFLUSS DER ART UND MENGE DER FEINSTOFFE AUF DIE SIEBLINIE	66
6.4. EINFLUSS DER FEINSTOFFE AUF DIE RECHN. SPEZIFISCHE OBERFLÄCHE	68
6.5. EINFLUSS DER FEINSTOFFE AUF DIE RECHNERISCHE WASSERFILMDICKE	70
6.6. SCHLUSSFOLGERUNGEN AUS DEN VORUNTERSUCHUNGEN	73
7. Experimentelle Untersuchungen	75
7.1. EINFLUSS AUF WASSERABSONDERUNG, HOHLRAUMVOLUMEN UND WASSERANSPRUCH	75
7.1.1. HOHLRAUMVOLUMEN NACH PUNKTE	75
7.1.2. WASSERANSPRUCH	78
7.1.3. WASSERABSONDERUNG	81
7.2. EINFLUSS AUF RHEOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN	83
7.2.1. VISKOSITÄT	83
7.3. EINFLUSS AUF DAS ZEMENTSTEINGEFÜGE	88
7.3.1. DRUCKFESTIGKEIT	90
7.3.2. GESAMTPORENGEHALT	94
7.3.3. KAPILLARPORENGEHALT UND PORENSTRUKTUR	98
7.4. EINFLUSS AUF DEN HYDRATATIONSGRAD	102
7.5. EINFLUSS AUF DEN DIFFUSIONSWIDERSTAND	105
7.5.1. WASSERDAMPFDIFFUSION	105
7.5.2. CHLORIDIONENDIFFUSION	108
7.6. EINFLUSS AUF DIE KAPILLARE WASSERAUFGNAHME	112
7.7. EINFLUSS DER ZEMENT- UND FEINSTOFFART	115
7.7.1. DRUCKFESTIGKEIT	115
7.7.2. DIFFUSION	118
7.8. RESUMEE	121
7.8.1. KORRELATION ZWISCHEN DRUCKFESTIGKEIT UND WASSERFILMDICKE	121
7.8.2. KORRELATION ZWISCHEN KAPILLARPORENGEHALT UND DICHTIGKEIT	122

8. Modellbildung	125
8.1. MODELL ZUR ABSCHÄTZUNG DER DRUCKFESTIGKEIT	125
8.2. MODELL ZUR ABSCHÄTZUNG DES KAPILLARPORENGEHALTS	130
8.3. BERECHNUNG EINES ANRECHENBARKEITSFAKTORS FÜR INERTE FEINSTOFFE IM ZEMENTSTEIN	133
8.3.1. ANRECHENBARKEITSFAKTOREN FÜR DIE DRUCKFESTIGKEIT	133
8.3.2. ANRECHENBARKEITSFAKTOREN FÜR DIE KAPILLARPOROSITÄT	138
9. Anwendung des Modells auf Betone nach Walz	141
9.1. DRUCKFESTIGKEIT	142
9.2. POROSITÄT	145
9.3. DAUERHAFTIGKEIT	147
9.4. ERWEITERUNG DES ANRECHENBARKEITSFAKTORS AUF BETONE	149
10. Zusammenfassung und Ausblick	151
10.1. ALLGEMEIN	151
10.2. EINFLUSS DER FEINSTOFFE AUF DIE EIGENSCHAFTEN VON ZEMENTLEIM	151
10.3. EINFLUSS DER FEINSTOFFE AUF DIE EIGENSCHAFTEN VON ZEMENTSTEIN	152
10.4. EINFLUSS DER FEINSTOFFE AUF DIE EIGENSCHAFTEN VON BETON	153
10.5. AUSBLICK	154
11. Literatur	155
12. Anlagenverzeichnis	165

Abkürzungen und Formelzeichen

α	Hydratationsgrad
σ	Standardabweichung
φ	Kornformfaktor als Oberflächenverhältnis
τ	Scherspannung eines Fluids
η	Viskosität eines Fluids
ρ	Reindichte
β_d	Druckfestigkeit nach Tagen
D	Kugel-, Partikel- oder Korngröße
D_w	Wasserfilmdicke
ε	Hohlraumgehalt
n	Exponent einer Sieblinienfunktion Q(d)
S_{BET}	Oberfläche nach BET, Gasabsorptionsverfahren
S_{Blaine}	Oberfläche nach Blaine
S_{LG}	Oberfläche nach Lasergranulometrie
p	statisch wirkende Kraft
Q(d)	Sieblinienfunktion
r	Kugelradius, Kreisradius
r_{50}	mittlerer Porenradius aus der Porengrößenverteilung
REM	Rasterelektronenmikroskopie
CIF	Capillary Suction, internal damage and freeze-thaw test
CDF	Capillary Suction, de-icing agent and freeze-thaw test
D_{Leit}	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient
D_{Cl}	Chloridionendiffusionskoeffizient
v	Volumenverhältnis zwischen zwei Korngruppen
V_f	Feststoffvolumen (Zuschlagvolumen)
P_G	Gesamtporenraumvolumen
w/z-Wert	Wasserzementwert
w/z_0	Ausgangswasserzementwert

Weitere, an dieser Stelle nicht aufgeführte, Abkürzungen sind im Text erläutert.

1. Einleitung

Der Widerstand von Beton gegen Gase und Flüssigkeiten wird bislang in erster Linie durch die sachgerechte Anpassung des Zementgehaltes und des Wasserzementwerts (w/z-Wert) an seine Exposition im Bauteil während der Nutzungszeit gesteuert. Je niedriger der w/z-Wert gewählt wird, umso geringer ist der Anteil an Kapillarporen im erhärteten Zementstein und um so höher ist sein Diffusions- und Eindringwiderstand gegen Gase, Wasser und betonangreifende Flüssigkeiten wie z. B. sulfathaltige Lösungen oder Säuren. Nach Powers steigt der Anteil an Kapillarporen dabei ab einem w/z-Wert von rund 0,70 stark progressiv an. Bei w/z-Werten unter 0,60 ist der Kapillarporenanteil so niedrig, dass Beton unter üblichen Umweltbedingungen nicht mehr durchfeuchtet und bei gleichzeitigem Frostangriff nicht mehr zerstört wird.

Die Entwicklung von Ultra-Hochfesten Betonen hat gezeigt, dass man die Dichtigkeit und Festigkeit von Zementstein auch dadurch erhöhen kann, dass die Packung des Feinkorns so dicht gestaltet wird, dass der zwischen dem Feststoff verbleibende Hohlraum minimiert wird.

Erste Vorversuche haben gezeigt, dass die Optimierung der Kornzusammensetzung auch bei üblichem Beton zu einer Erhöhung der Festigkeit führt, d. h., ähnlich wirkt wie eine Verringerung des w/z-Wertes. Inhalt dieser Arbeit war nun die Frage, inwieweit durch die Optimierung der Kornpackung neben der Gefügefestigkeit auch der Widerstand gegen eindringende Gase und Flüssigkeiten wirksam erhöht werden kann, inwieweit diese Maßnahme einer Absenkung des w/z-Wertes in ihrer Wirkung gleichkommt und ob dadurch auch die Dauerhaftigkeit von Beton in gleicher oder ähnlicher Weise gesteuert werden kann, wie durch die Variation des Zementgehaltes und des w/z-Wertes. Wesentliche Untersuchungskriterien waren dabei die Druckfestigkeit und der Widerstand gegen eindringendes Wasser, Chloride und Gase sowie der Frost-Tausalz-Widerstand. Um die Erhöhung der Packungsdichte gegenüber chemisch-mineralogischen Einflüssen möglichst abzugrenzen, wurde in dieser Arbeit überwiegend mit sogenannten inerten Zusatzstoffen gearbeitet.

Darüber hinaus sollte untersucht werden, ob durch die mögliche Steigerung der Gefügedichtigkeit und der Festigkeit inerte, Hohlraum füllende Feinstoffe auf den w/z-Wert durch Wirksamkeitsfaktoren angerechnet werden können.

Die im Rahmen der Arbeit gesammelten Ergebnisse wurden dazu genutzt, das sogenannte „Walzgesetz“ – das den grundlegenden Zusammenhang zwischen dem w/z-Wert und der Druckfestigkeit beschreibt und eine der Grundlagen der Betontechnologie darstellt – so zu ergänzen, dass der Einfluss der Packungsdichte und des Feststoffgehaltes des Zementsteins rechnerisch mit berücksichtigt werden kann.

2. Stand des Wissens

2.1. Entwicklung von Beton

Beton ist einer der ältesten Baustoffe der jungen Menschheitsgeschichte. Bereits vor 2000 Jahren stellten die römischen Baumeister hydraulisch gebundene Mörtel und Betone her, die aus einem gebrannten Kalk, Wasser und Sand bestanden. Dieser Baustoff wurde „opus caementitium“ genannt und bezeichnet gesamtheitlich ein Bauwerk aus gebundenen Zuschlagstoffen. Durch den Einsatz inerter Zuschlagstoffe war es möglich die Druckfestigkeit erheblich zu verbessern. Von der hohen Dauerhaftigkeit dieses Werkstoffs zeugen noch heute viele überlieferte Bauwerke. Mit der Entwicklung des Portlandzements im Jahre 1824 durch den Engländer Aspdin wurde die moderne Betontechnologie eingeführt. Während bis hin in die 1960er Jahre Betone hauptsächlich als Dreistoffsysteme, bestehend aus Zement, Wasser und der Gesteinskörnung eingebaut wurden, kam es durch den Einsatz von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln ab den 1970er Jahren zu einer starken Weiterentwicklung in der Betontechnologie. Hierbei kam es zur Entwicklung von hochfesten Betonen, die vorrangig in den USA und in Japan für den Bau schlanker Bürotürme verwendet wurden.

Die Entwicklung dieser Mehrstoffsysteme wurde stark vorangetrieben, um noch höhere Festigkeiten zu erreichen. Dabei wurden die w/z-Werte deutlich unter das Niveau von Normalbetonen, mit w/z-Werten oberhalb 0,45, gesenkt. Nach Aitcin [Ait1993] war es das Ziel, noch höhere Gebäude und Brücken bauen zu können, aber auch den erhöhten äußeren Angriffen mehr Widerstand entgegen setzen zu können. Durch die Verdichtung des Betongefüges wurden demzufolge nicht nur höhere Druckfestigkeiten sondern auch ein geringerer Porengehalt erzielt. Dadurch bot der Beton einen höheren Widerstand gegen das Eindringen von Wasser und wässrigen Lösungen. Die Einführung hochwirksamer Fließmittel ermöglichte schließlich die Entwicklung der noch gut zu verarbeitenden Ultra-Hochfesten Betone mit einem w/z-Wert unterhalb 0,25. Bei diesen Betonen spielt die optimale Packungsdichte, d.h., die dichteste Lagerung der Feststoffpartikel eine übergeordnete Rolle mit der die überdurchschnittlich hohe Gefügedichtigkeit und Festigkeit erreicht werden.

Die wichtigste Steuergröße für die Herstellung von Betonen ist nach wie vor der w/z-Wert. Bei einem w/z-Werte von 0,40 kann der Zement noch vollständig hydratisieren und das Wasser wird komplett in den Zementstein eingebunden. Dabei werden 25 M.-% chemisch und 15 M.-% physikalisch gebunden. Theoretisch bilden sich bei diesem w/z-Wert keine Kapillarporen. Wird der w/z-Wert weiter gesenkt, hat dies i.d.R. einen positiven Einfluss auf die Druckfestigkeit. Dabei verbleiben Teile des Zementklinkers unhydratisiert.

In [Za1999] wird darauf hingewiesen, dass sehr gute Verarbeitungseigenschaften erreicht werden können, wenn die Einzelkomponenten und insbesondere die Feinstoffe optimal aufeinander abgestimmt sind. Beispielsweise wurde in [Sel1982;Ji1999;Re1999;Tei2006] gezeigt, dass durch die Zugabe feindisperser Zusatzstoffe die Druckfestigkeit deutlich gesteigert werden kann. Dabei fanden insbesondere hochfeine Stoffe wie der aus amorpher Kieselsäure bestehende Silicastaub und hochfeine Quarzmehle Anwendung. Die hohe

Feinheit der verwendeten Stoffe führte zu einem Füllereffekt, der Hohlräume in der Zementsteinmatrix oder in der Randzone zwischen Gesteinskörnung und Zementstein füllt.

Als weitere Zusatzstoffe werden in der heutigen Betontechnologie Flugaschen, Hochofenaschen und Metakaoline eingesetzt. Auf die Verwendung und Anrechenbarkeit von Zusatzstoffen wird in Abschnitt 2.3 weiter eingegangen.

2.2. Dauerhaftigkeit von Beton

Für die Beurteilung der Gebrauchsfähigkeit von Bauteilen aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton ist neben den mechanischen Kenngrößen die Kenntnis der Dauerhaftigkeit von außerordentlicher Bedeutung. Im Gegensatz zu den mechanischen Eigenschaften ist die Dauerhaftigkeit von Beton nur schwer zu charakterisieren, da sie keine absolute Größe ist, die über die Zeit konstant bleibt. Struktur und Eigenschaften von Beton unterliegen einem kontinuierlichen Wandel. Durch technologische und konstruktive Maßnahmen kann die Geschwindigkeit solcher Veränderungen je nach Umweltbedingungen wesentlich verringert werden. Trotzdem sind Dauerhaftigkeit und Gebrauchsfähigkeit an eine erwartete Nutzungsdauer gekoppelt. Dauerhaftigkeit von Beton bedeutet demnach, dass die Bauteile aus Beton, über eine vorgesehene Nutzungsdauer hinaus, gegenüber allen Einwirkungen bei ausreichender Wartung und Instandhaltung genügend beständig sind. Beton ist unter üblichen Umweltbedingungen, bei einer auf den Verwendungszweck abgestimmten Wahl und Zusammensetzung der Ausgangsstoffe, bei sachgerechter Herstellung und entsprechender Nachbehandlung, ein dauerhafter Baustoff. Den bedeutendsten Einfluss auf die Dauerhaftigkeit haben die Transportvorgänge im Beton, die im weit verzweigten Kapillarporensystem statt finden. In der Vergangenheit ging man davon aus, dass Betonkonstruktionen wartungsfrei sind, wenn gewisse Grundregeln der Betontechnologie beachtet werden. Unter anderem wird jedoch in [Sta2001] gezeigt, dass schon geringfügige Abweichungen von diesen Regeln (z.B. Nachlässigkeiten bei der sorgfältigen Herstellung der Baustoffe und Bauwerke) sowie falsch eingeschätzte oder auch in letzter Zeit sich ändernde und verschärzte Umweltbedingungen zu erheblichen Schäden führen können. Dies löste einerseits eine rege Forschungstätigkeit aus und zum anderen wurde auch im Normenwerk (u.a. DIN 1045) der Dauerhaftigkeit mehr Aufmerksamkeit geschenkt.

2.2.1. Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit

Die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit eines Betons oder Mörtels werden von den Eigenschaften seiner Matrix, bestehend aus Zement, Anmachwasser, Poren und gegebenenfalls Zusatzstoffen sowie Zusatzmitteln, den Eigenschaften seines Zuschlags und dem Verbund zwischen Zuschlag und Matrix, bestimmt. Die Dauerhaftigkeit dieses porösen Feststoffes wird durch innere und äußere Einflussfaktoren beeinflusst. Die inneren Einflussfaktoren resultieren im Wesentlichen aus den Hauptausgangsstoffen des Betons, dem Zement, den Zusätzen, dem Wasser sowie den Zuschlägen. Ohne zusätzliche

Einwirkungen (Stoffe) und Umgebungsbedingungen von Außen können bestimmte Reaktionen der im Beton schon vorhandenen Stoffe untereinander ablaufen und die Dauerhaftigkeit negativ beeinflussen (z.B. Alkali-Kieselsäure-Reaktion). Zu den äußeren Einflussfaktoren gehören alle Einwirkungen (Beanspruchungen), die nachträglich auf den Beton oder Mörtel von außen aufgebracht werden und zu einer Veränderung des Betongefüges führen.

[Me1993]

Die Mechanismen, die die Dauerhaftigkeit von Beton gefährden, können nach Stark [Sta2001] in

- physikalische (z.B. Frost),
- chemische (z.B. sulfathaltige Wässer),
- biologische (z.B. Bakterien) und
- mechanische (z.B. mechanischer Verschleiß)

Einwirkungen (Beanspruchungen) eingeteilt werden.

Eine Gemeinsamkeit der meisten dieser Schädigungsmechanismen ist, dass sie zunächst auf die oberflächennahen Bereiche des Betons einwirken und dann je nach den Eigenschaften der eindringenden Substanz, auf unterschiedlichem Weg in den porösen Festkörper eindringen. Der Stofftransport in den Festkörper (Beton oder Mörtel) kann durch Stoffaufnahme in luftgefüllten Kapillaren (kapillare Saugfähigkeit), als Fließvorgang aufgrund äußerer Druckunterschiede (Sickerströmung, Konvektion) oder durch Diffusion aufgrund örtlicher Konzentrationsunterschiede und der Molekularbewegung, erfolgen. Während Kapillar- und Sickerströmungen an das Vorhandensein größerer, durchgehender Poren (Kapillarporen) gebunden sind, können Diffusionsvorgänge auch in sehr dichten Feststoffen mit nur geringen Anteilen durchgehender Poren einen nicht zu vernachlässigenden Stofftransport bewirken.

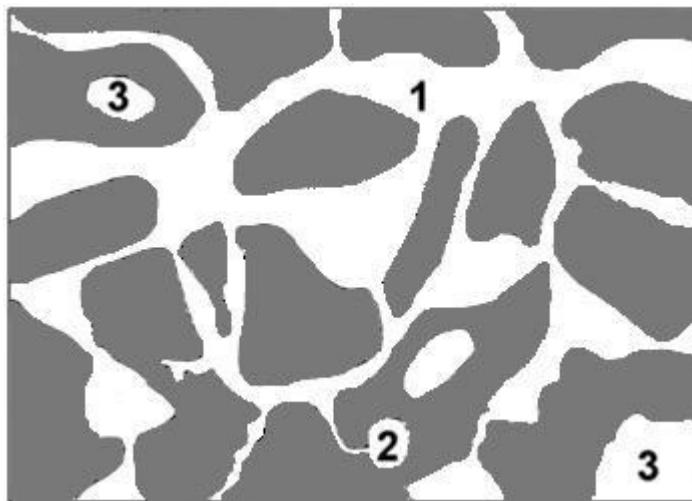
2.2.2. Einflussgrößen auf die Dauerhaftigkeit

Viele Eigenschaften des Betons oder Mörtels, wie auch die Dauerhaftigkeit, lassen sich über die Beschaffenheit und den Aufbau seiner Matrix erklären. Dabei spielen, wie bereits eingangs erwähnt, die Porenverhältnisse der Matrix, insbesondere der Kapillarporenanteil des Gesamtporenvolumens, eine wesentliche Rolle.

2.2.2.1. Porosität

Poren sind u.a. nach [Sta1999] herstellungsbedingt dispers verteilte Hohlräume in Feststoffen. Dagegen werden Hohlräume, die sekundär als Ergebnis von Bruchvorgängen in einem Werkstoff entstehen, als Risse bezeichnet.

Die Poren als Gefügebestandteile können die Baustoffeigenschaften durch ihr Volumen, ihre Form und ihre Oberfläche in unterschiedlicher Weise beeinflussen. Bei der Beschreibung der Porenanordnung im Feststoff unterscheidet man verschiedene Porenarten. Die Poren können isoliert sein (geschlossene Poren) oder mit der Feststoffoberfläche direkt oder über andere Poren in Verbindung stehen (offene Poren). Die offenen Poren können gegenüberliegende Feststoffoberflächen miteinander verbinden (durchgängiger Porenraum) oder einseitig geschlossen sein (Sackporen), siehe dazu Abbildung 1.



- 1 offene Pore
- 2 Sackpore
- 3 geschlossene Pore

Abbildung 1: Porenarten in porösen Baustoffen [Sta1999].

Die Porenarten wiederum beeinflussen die Baustoffeigenschaften in unterschiedlicher Weise. Dabei ist weniger der Gesamtporenraum, sondern vielmehr der Anteil bestimmter Porengrößen von Bedeutung. Die Porosität des Zementsteins umfasst einen sehr weiten Porengrößenbereich. Von klein nach groß wird zwischen Gelporen, Kapillarporen und Grobporen (Luftporen/Verdichtungsporen) unterschieden. Zur Einteilung der Poren im Zementstein, unabhängig von der Geometrie, eignet sich das Modell nach Setzer [Se1975] nach Porenart und Porengröße, siehe Tabelle 1. Vereinfacht kann nach [Hoh2004] der hydr. Radius als die Hälfte des Radius einer zylindrischen Pore angenommen werden:

$$r_{hyd} = \frac{\pi \cdot r_{zyl}^2}{2 \cdot \pi \cdot r_{zyl}^2} = \frac{r_{zyl}}{2}$$

Gleichung 1

r_{hyd} hydraulischer Radius [m]

r_{zyl} Zylinderporenradius [m]

Tabelle 1: Einteilung der Poren im Zementstein nach ihrem kapillaren Saugvermögen [Se1975]

hydr. Radius R_H	Porenart	Merkmale
< 1 nm	Mikrogelporen	Oberflächenphysik, stark gestört, unter normalen Bedingungen nicht gefrierbar
< 30 nm	Mesogelporen	Übergang von makroskopischen zu oberflächenphysikalischen Gesetzmäßigkeiten, Gefrierbarkeit unter -23°C, Verdunstung in 50% rel. Feuchte
< 1 µm	Mikrokapillaren	Kapillares Saugen nur über kurze Distanz möglich, großer Kapillardruck, gefrierbar
< 30 µm	Mesokapillaren	durch Reibung verzögertes Saugen über Tage, große Steighöhe in wenigen Tagen, gefrierbar
< 1 mm	Makrokapillaren	sofortiges kapillares Saugen in Sekunden, hohe Beweglichkeit, geringe Steighöhe, gefrierbar
> 1 mm	Grobporen	Poren sind leer

Die größten Poren im Zementstein, die Luftporen/Verdichtungsporen, werden beim Anmachen des Zements in den Zementleim eingeführt und können durch die nachfolgende Verdichtung nicht vollkommen ausgetrieben werden. Wesentlichen Einfluss auf die Bildung von Verdichtungsporen hat die Konsistenz der Mischung. Steifere Mischungen zeigen i.d.R. einen größeren Verdichtungsporengehalt als weichere Mischungen. [Hew1988]

Einen weiteren Porengrößenbereich umfassen die Kapillarporen. Diese entstehen durch überschüssiges Wasser, welches weder chemisch in die Hydratationsprodukte eingebaut, noch physikalisch gebunden wird. Die Kapillarporen sind den offenen Poren zugeordnet, die mit der Feststoffoberfläche in Verbindung stehen. Nach Setzer [Se1975] wird ihnen ein Porenradienbereich von 30 nm bis 1 mm zugewiesen. Der Kapillarporenraum verändert sich im Gegensatz zu den Luft- und Verdichtungsporen mit fortschreitender Hydratation erheblich. Die neu entstehenden Hydratationsprodukte binden zunehmend Anmachwasser und nehmen dessen Platz ein; der Kapillarporenraum wird dadurch stark reduziert.

Die als Gelporen bezeichneten kleinsten Poren im Zementstein sind Bestandteil des Zementgels bzw. der C-S-H-Phasen. Sie sind im Grunde keine Poren im umgangssprachlichen Sinne, sondern die Zwischenräume zwischen den Nadeln der C-S-H-Phasen. Als Bestandteil eines Hydratationsproduktes nimmt der Anteil der Gelporen mit fortschreitender Hydratation zu. Gelporen sind meist kleiner als 10 nm und mit Wasser gefüllt [Sta2001]. Das verbleibende Wasser ist zum großen Teil als einmolekulare Schicht physikalisch an der Porenwandung adsorbiert. Diese Bindungskräfte sind nahezu genauso

groß wie die chemischen Bindungen an die Hydratationsprodukte. Demzufolge bleiben die Gelporen auch nach längerer Trocknungszeit durch Gelwasser geschlossen, wodurch Flüssigkeitstransporten ein unüberwindbarer Widerstand entgegengesetzt wird.

Schrumpfporen mit einer Porengröße von ca. 10 nm sind das zwangsläufige Ergebnis der Hydratation und werden meistens dem Gelporenbereich zugeordnet. Sie entstehen, weil das Volumen der Ausgangsstoffe größer als das Volumen seiner Hydratationsprodukte ist.

Die unterschiedlichen Porenarten können bestimmte Eigenschaften der Matrix bzw. des Betons beeinflussen. Luftporen fungieren als zusätzlicher Ausdehnungsraum für gefrierendes Wasser und dienen so der Erhöhung des Frostwiderstandes. Luftporen können auch Kapillaren unterbrechen und damit ein Eindringen von schädlichen Flüssigkeiten durch kapillares Saugen unterbinden. Wegen des großen Einflusses der Kapillarporen, besonders auf die Dauerhaftigkeit eines Betons oder Mörtels, soll auf die Zusammenhänge zwischen Kapillarporenanteil und anderen betonspezifischen Parametern, wie Wasser-Zement-Wert, Zementart, Hydratationsgrad oder Packungsdichte der Feinstoffe nun genauer eingegangen werden.

2.2.2.2. Einfluss betonspezifischer Parameter auf die Festigkeits- und Gefügeentwicklung

Die Kapillarporen stellen den Porenbereich dar, über den praktisch alle Transportmechanismen in den Zementstein hinein und aus dem Zementstein hinaus stattfinden. Für die Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit eines Betons ist die Minimierung des Kapillarporenanteils von großer Bedeutung, da u.a. durch die Verringerung der Menge an saugenden Kapillarporen, die Dichtigkeit des Betons gegen das Eindringen von Wasser und Flüssigkeiten vergrößert wird. Der Kapillarporenanteil eines Betons oder Mörtels hängt von vielen verschiedenen Parametern ab. Zum einen wird er vom w/z-Wert, dem Hydratationsgrad, der verwendeten Zementart und Zementmenge beeinflusst. Zum anderen wird der Kapillarporenanteil aber auch durch die Kornzusammensetzung aller Feinstoffpartikel $\leq 0,125$ mm und einen darauf abgestimmten, nicht zu hohen Zementgehalt und einer möglichst weichen Konsistenz, damit der Beton oder Mörtel praktisch vollständig verdichtet werden kann, beeinflusst.

[Ava2002]

Zunächst werden die Zusammenhänge zwischen den betonspezifischen Parametern wie w/z-Wert, Hydratationsgrad, verwendeter Zementart und der Festigkeits- und Gefügeentwicklung erläutert. Es kann näherungsweise davon ausgegangen werden, dass bei einer vollständigen Hydratation der Anteil an chemisch gebundenem Wasser 25 M.-% und der des physikalisch gebundenen Wassers, 15 bis 19 M.-% des Zementgehaltes beträgt. Bei einem w/z-Wert von 0,40 liegt somit, nach Abschluss der Hydratation, das gesamte Anmachwasser in gebundener Form vor, so dass theoretisch keine Kapillarporen im Zementstein vorhanden sind. Wird der w/z-Wert erhöht, entstehen aufgrund des Anmachwasserüberschusses Kapillarporen. Unter praktischen Bedingungen ist im Beton ein Kapillarporenraum, selbst bei niedrigem w/z-Wert, nicht zu vermeiden, da auch nach sehr

langer Erhärtungszeit der Zement nicht vollständig hydratisiert ist und damit Hydratationsgrade unter 100% vorliegen.

Abbildung 2 zeigt die Zusammenhänge zwischen dem w/z-Wert, dem Hydratationsgrad, dem Kapillarporenraum und der Wasserdurchlässigkeit nach Powers [Pow1954a] in [Sch2005b]. Es wird deutlich, dass mit zunehmendem w/z-Wert und gleichzeitig verringertem Hydratationsgrad der Kapillarporenraum und die Wasserdurchlässigkeit des Zementsteins exponential ansteigen. Neben dem w/z-Wert und dem Hydratationsgrad, der stark von der Nachbehandlung des Betons abhängig ist, wird die Porosität aber auch durch die Zementart beeinflusst.

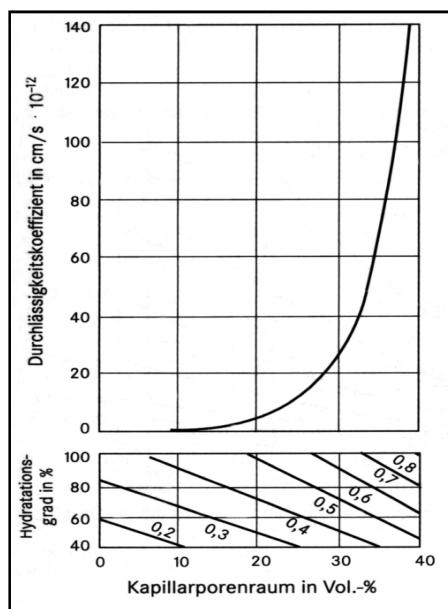


Abbildung 2: Wasserdurchlässigkeit von Zementstein in Abhängigkeit vom Kapillarporenraum, Wasser-Zement-Wert und Hydratationsgrad nach Powers [Pow1954a] in [Sch2005b].

Dazu ist zunächst der Zusammenhang zwischen der Festigkeit und der Porosität eines Betons oder Mörtels zu erläutern. Neben dem w/z-Wert beeinflussen im Wesentlichen die chemische Zusammensetzung und Mahlfeinheit des Zements die Festigkeit bzw. Gefügedichtkeit eines Betons oder Mörtels. Zahlreiche Kenngrößen, wie Wassergehalt (w/z-Wert), Verdichtungsgrad, Alter des Zementsteins oder auch die Nachbehandlung, wirken sich nur deshalb auf die Festigkeit und auch auf die Dichtigkeit aus, weil sie die Porosität und Porengrößenverteilung des Zementsteins bzw. Betons verändern. Die Erhöhung der Festigkeit eines Betons oder Mörtels kann demzufolge auch auf die Abnahme der Porosität zurückgeführt werden. Die mit abnehmendem w/z-Wert und zunehmendem Hydratationsgrad zunehmende Druckfestigkeit eines Betons ist nach [Sta2001] in erster Linie auf die Zunahme der Gelmasse und die Abnahme der Kapillarporen zurückzuführen.

Der unmittelbare Zusammenhang zwischen Porosität - verknüpft und dargestellt durch den w/z-Wert - und Druckfestigkeit bildet heute in den sogenannten Walz-Kurven die Grundlage

für den Mischungsentwurf des Betons. Bereits 1918 wurde dieser Zusammenhang durch Abrams [Abr1918] dargestellt und unabhängig davon 1958 von Walz vertieft. Die Walz-Kurven wurden 1972 in die Neuauflage der DIN 1045 eingeführt, da 1957 erkannt wurde, dass die aufgrund der DIN 1045 von 1943 festgesetzte Zusammensetzung des Betons im Hinblick auf die Festbetoneigenschaften unzureichend war. Die Zusammensetzung von Beton wurde damals lediglich durch die Aufteilung der Kornklassen und den Mindestzementgehalt vorgegeben. Mit Hilfe des Walz-Diagramms nach Abbildung 3 (zeigt die überarbeitete Walz-Kurve, entnommen aus [Sta2001]), welches die Zusammenhänge stark vereinfacht, kann der erforderliche w/z-Wert für den Nachweis einer bestimmten Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Zementfestigkeitsklasse abgeschätzt werden. Dem Diagramm liegen mittlere Würfeldruckfestigkeiten von Betonen ohne Zusatzstoffe und ohne Zusatzmittel Typ I zu Grunde. Zugleich kann der in Abbildung 3 indirekt dargestellte Zusammenhang zwischen Kapillarporenanteil (ausgedrückt als w/z-Wert) und Zementfestigkeitsklasse abgeleitet werden. Je höher die Mahlfeinheit des verwendeten Zements bei gleichem w/z-Wert ist, desto höher ist die Druckfestigkeit und desto geringer der Kapillarporenanteil. Die gestrichelten Linien verdeutlichen den positiven Effekt eines gut abgestimmten Kornaufbaus und damit der Packungsichte in der Gesteinskörnung auf die Druckfestigkeit bei Betonen hoher Festigkeitsklassen.

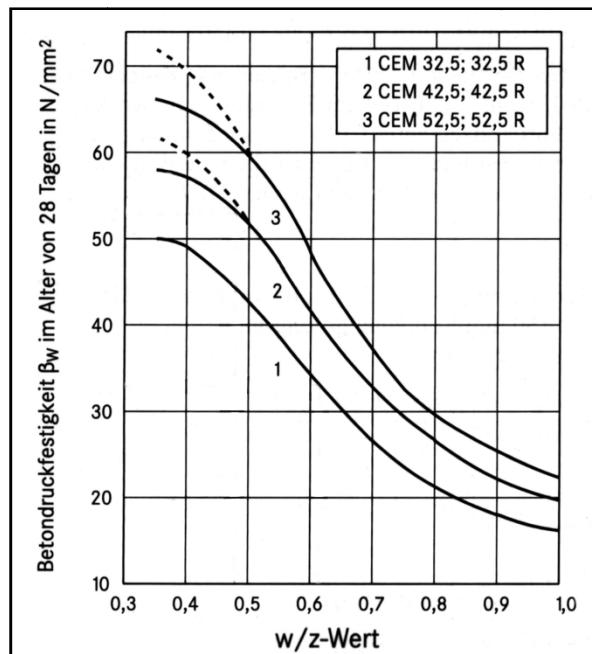


Abbildung 3: Würfeldruckfestigkeit β_w des Betons in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Festigkeitsklasse des Zements nach Walz [1958].

2.2.2.3. Einfluss der Granulometrie und der Reaktivität der verwendeten Ausgangsstoffe auf die Gefügeentwicklung

Die Gefügeentwicklung, die Gesamtporosität und speziell der Kapillarporenanteil eines Betons oder Mörtels hängen nach [Bo2005,Res2001] nicht nur vom w/z-Wert, dem Hydratationsgrad, der verwendeten Zementart und -menge ab, sondern werden auch maßgeblich durch die Reaktivität, die Kornform und die Korngrößenverteilung des Zements und anderen Zusatzstoffen beeinflusst. Nach [Res2001] ist der Einfluss sehr feiner inerter Feinstoffe auf die Gefügedichtigkeit gering. In dieser Arbeit werden die Begriffe Kornform und Korngrößenverteilung unter dem Begriff Granulometrie zusammengefasst.

Die granulometrischen Eigenschaften der Feinstoffe $\leq 0,125$ mm (Kornform und Korngrößenverteilung), bzw. die dadurch entstehenden Einflüsse auf die Festigkeit und speziell auf die Dauerhaftigkeit, werden bei einem Betonentwurf normalerweise nicht differenziert berücksichtigt. Durch eine Abstimmung der Kornverteilung aller Feinstoffe kann aber deren Wirksamkeit im Zement, Mörtel und Beton, insbesondere bei Kombination mehrerer Feinstoffe, gezielt verbessert werden [Sch2005]. Um eine Verbesserung der Feinstoffmatrix hinsichtlich ihrer Festigkeit und Gefügedichtigkeit zu erreichen, sind die beiden folgenden Wirkungsmechanismen von Stoffpartikeln zu berücksichtigen [Res2001]:

- Physikalische Füllerwirkung:

Optimierung der Kornverteilung der Feinstoffe bzw. der gesamten Sieblinie mit dem Ziel, vorhandene Hohlräume zu füllen und somit die Packungsdichte der Partikel und damit die Gefügedichte der Feinstoffmatrix zu erhöhen.

- Chemisch-mineralogische Reaktivität:

Abstimmung der Feinstoffe und der Kornverteilung einzelner Stoffe mit dem Ziel, das chemisch-mineralogische Reaktionspotential der Feinstoffe unter Beachtung des zeitlichen Verlaufs der Reaktionen optimal zu nutzen.

Praktisch alle Betoneigenschaften von Normal-Beton werden maßgeblich von der Zusammensetzung und dem Kornaufbau des Feinmörtels bestimmt. Zur Abklärung der Frage, welche Betoneigenschaften vornehmlich durch die physikalische Füllerwirkung der Feinstoffe im Feinmörtel und welche darüber hinaus durch die Bildung von Reaktionsprodukten beeinflusst werden, wurden schon in der Vergangenheit unterschiedliche Untersuchungen z.B. in [Sch2005a;Bo2005;Res2001;Loc1988] durchgeführt. Die Gefüge verdichtende Wirkung eines Feinstoffzusatzes lässt sich durch die infolge größerer Feinkornoberfläche geringere Wasserfilmdicke um die einzelnen Partikel im Frischbeton erklären, weil dadurch der durch die Hydratationsprodukte zu überbrückende Abstand zwischen den einzelnen Partikeln kleiner wird. Nach [Res2001] ist dabei zu beachten, dass für eine entsprechende Verarbeitbarkeit und im Hinblick auf eine vollständige

Hydratation, aufgrund des Raumbedarfs der Hydratationsprodukte, eine zu dichte Lagerung der Partikel nachteilig sein kann. Dabei sollte nach [Kre1988] der Anteil an Stoffen, die sich praktisch inert gegenüber Zement verhalten, so gering bleiben, dass die Hydratationsprodukte noch ein zusammenhängendes Gefüge bilden und den ursprünglich mit Anmachwasser gefüllten Raum weitgehend ausfüllen können. Die Zugabe von Flugasche oder anderen feinkörnigen, reaktiven Zusatzstoffen konnte [Grä1990] die Hohlraumfüllung bei gleichem w/z-Wert weiter verbessern und damit zu einer weiteren Steigerung der Festigkeit und Gefügedichtigkeit führen. Untersuchungen an Ultra-Hochfesten Betonen in [Tei2004] zeigten demgegenüber, dass inerte hochfeine Feinstoffe bei ausreichend geringen w/z-Werten einen erheblichen Beitrag zur Gefügefestigkeit und Gefügedichtigkeit leisten können.

Ungeklärt blieb bislang die Systematik zwischen dem Feststoffgehalt (Packungsdichte), dem w/z-Wert und der Gefügedichtigkeit bzw. Gefügefestigkeit bei Dreistoffsystmen, bestehend aus Wasser, Zement und einem Hohlraum füllenden inerten Feinstoff.

2.2.3. Wirkungsmechanismen der Feinstoffe

2.2.3.1. Füllereffekt und interpartikuläre Kräfte

Die Packungsdichte bzw. der Hohlraumgehalt der Feinstoffsiebline wird von der Kornverteilung aller verwendeten Feinstoffpartikel bestimmt. In [Res2001] wurde nachgewiesen, dass sich der Hohlraumgehalt, insbesondere durch die Mischung von Feinstoffen deutlich unterschiedlicher Kornverteilung, verringert. Durch die Zugabe gut dispergierter hochfeiner Bestandteile im Zement oder Beton kann neben einer dichten Packung der Feinstoffsiebline selbst, auch der Hohlraumgehalt im unmittelbaren Bereich der Zuschlagrandzone verringert werden [Sel1982]. Dabei ist zu beachten, dass eine dichte Zusammenlagerung der Feinstoffpartikel, sowohl im trockenen Zustand, als auch in einer Wasser-Feinstoff-Suspension (Zementleim + Zusatzstoffe), durch zwischenpartikuläre Kräfte behindert werden kann.

[Tat1983;Gei2006;Sch2007]

Die Stabilität der Feinstoff-Suspension wird durch das Gleichgewicht zwischen abstoßenden elektrostatischen Kräften und den anziehenden van der Waals'schen Kräften gebildet. Mit Hilfe der DLVO-Theorie (benannt nach Derjaguin, Landau, Verwey, Overbeek) können die Kräfte zwischen den Teilchen beschrieben werden. Die wesentlichen Zusammenhänge sind in Abbildung 4 dargestellt.

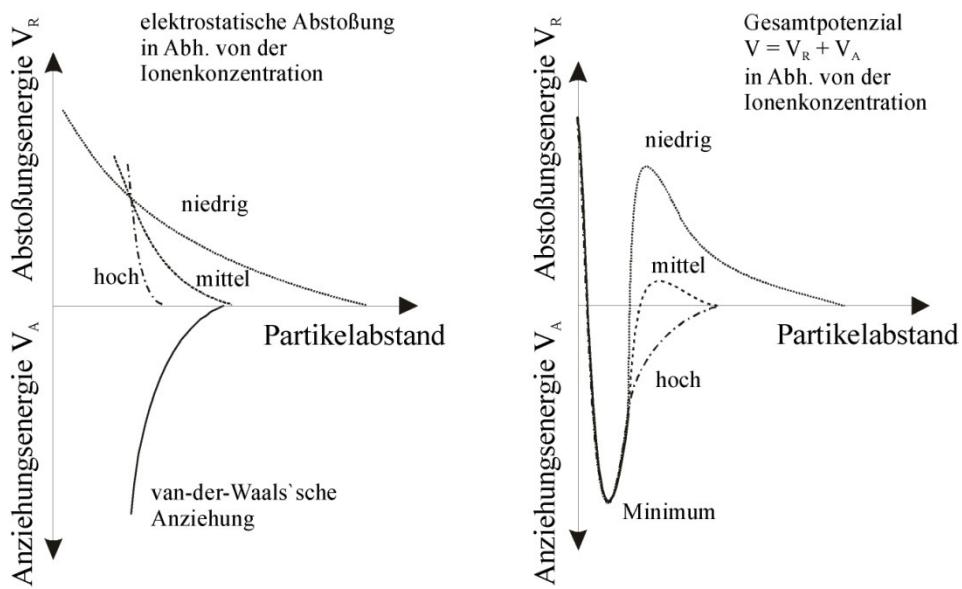


Abbildung 4: Überlagerung der Abstoßungs- und Anziehungsenergie für verschiedene Ionenkonzentrationen in Abhängigkeit vom Partikelabstand [Tat1983], entnommen aus [Ko2005].

Bei geringer Ionenkonzentration liegt ein hohes Abstoßungspotential vor. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn die OH⁻-Ionen an einer Teilchenoberfläche protoniert sind. Bei gleichartig geladenen Oberflächen liegen somit hohe Abstoßungskräfte vor. Da die Partikel diese „Energiebarriere“ normalerweise nicht überwinden können, liegen sie dispergiert vor. Mit zunehmender Ionenkonzentration wird die Barriere kleiner, bis sie schließlich ganz verschwindet. In diesem Augenblick werden die anziehenden van der Waals'schen Kräfte maßgebend. Bis zum Erreichen des Potentialminimums nähern sich die Partikel an, bis sie agglomerieren. Die Viskosität nimmt zu. Dadurch wird die theoretisch erreichbare Packungsdichte und die Verarbeitbarkeit der Feinstoffsuspension vermindert. Die abstoßenden Kräfte, hervorgerufen durch die Oberflächenladung der Partikel selbst, durch Fehler in der Kristallstruktur oder auch durch die Konzentration und Wertigkeit der im Anmachwasser gelösten Ionen, stabilisieren die Suspension, verhindern aber eine optimale Verdichtung der Feinstoffe. Bei fast allen Stoffarten nimmt mit zunehmender Feinheit der Partikel die Wirkung von zwischenpartikulären Haftkräften zu. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Partikelabstand bei gleichem Wassergehalt mit zunehmender Feinheit geringer wird. [Ren1987;Sch2007]

Die aufgrund der Granulometrie der Feinstoffe theoretisch erwartete Packungsdichte kann also oftmals ohne die Verwendung von Fließmitteln, die die Oberflächenladungen beeinflussen, nicht erreicht werden.

Einen wesentlichen Einfluss auf die sich einstellende Packungsdichte der Feinstoffe hat weiterhin der Gesamtwassergehalt des Betons. Nach dem Mischen aller Feinstoffpartikel mit Wasser werden bei ausreichendem Wasserangebot alle Partikel mit einem Wasserfilm

umgeben. Die zwischen den Feststoffpartikeln noch verbleibenden Hohlräume sind mit Wasser gefüllt. Durch die Dicke des die Partikel umhüllenden Wasserfilms wird nach Keck [Kec1999] somit die Lage der Partikel zueinander charakterisiert. Je größer der Wassergehalt des Betons, bezogen auf die gesamte Oberfläche aller Feinstoffpartikel ist, umso weiter liegen die Partikel auseinander. Somit führt ein zu hoher Wassergehalt, trotz hoher rechnerischer Packungsdichte der Feststoffpartikel im trockenen Zustand, zu einer verminderten Packungsdichte im Frisch- und Festbeton.

2.2.3.2. Chemisch-mineralogische Wirkung der Feinstoffe

Durch die Granulometrie der Feinstoffe wird zunächst die Packungsdichte im trockenen Zustand und bei konstantem Wassergehalt die Lage der Partikel zueinander festgelegt. Die Verdichtung des Gefüges durch die Raumausfüllung mit Hydratationsprodukten, hängt zunächst von der vorliegenden Verteilung der Partikel und der Gefügedichte vor Beginn der Hydratation ab (physikalische Füllerwirkung) und wird dann im weiteren Verlauf hauptsächlich durch das Reaktionspotential sowie insbesondere durch die Entwicklung des Hydratationsgrades der Feinstoffe bestimmt (chemisch-mineralogische Reaktivität).

Hinsichtlich ihrer Wirkung im Beton können die Feinstoffe also in inerte und reaktive Stoffe unterteilt werden. Zu den nahezu inerten Stoffen werden Gesteinsmehle, insbesondere Quarzmehle, und der Mehlkornanteil des Zuschlags ($\text{Ø} < 125 \mu\text{m}$) gerechnet. Diese Stoffe haben im Wesentlichen nur eine physikalische Füllerwirkung, d.h. sie füllen, die zwischen den größeren Partikeln verbleibenden Hohlräume in Abhängigkeit von ihrer Granulometrie, aus. Zemente und auch reaktive Betonzusatzstoffe liefern zusätzlich zur physikalischen Füllerwirkung durch ihre chemisch-mineralogische Reaktivität selbst gefüge- und festigkeitsbildende Reaktionsprodukte. Diese durchdringen im Verlauf der Hydratation die wassergefüllten Hohlräume zwischen den Feststoffpartikeln, binden das Wasser teilweise in ihre Hydratationsprodukte chemisch ein und vermindern damit die Porosität der Feinstoffmatrix und ggf. der Zuschlagrandzone [Res1999]. In Abhängigkeit von ihrem spezifischen CaO/SiO_2 -Verhältnis wird zwischen 3 Hauptgruppen unterschieden.

Tabelle 2: Einteilung der reaktiven Feinstoffe [La1996;Sta1998].

Bindemittel	CaO/SiO_2 -Verhältnis
hydraulisch	> 2
latent hydraulisch	1 – 1,5
puzzolanisch	< 0,5

Ausgehend von der chemischen Zusammensetzung und mineralogischen Beschaffenheit können für latent-hydraulische und puzzolanische Zementbestandteile oder Betonzusatzstoffe Aussagen zu den möglichen Reaktionen getroffen werden, die unter Anwesenheit von Wasser gemeinsam mit einem Portlandzementklinker ablaufen können.

Der hydraulisch reagierende Portlandzementklinker erhärtet nach Zugabe von Wasser infolge der Bildung wasserhaltiger Verbindungen, der Hydratphasen. Für die Festigkeitsentwicklung sind in erster Linie die faserförmigen Calciumsilicathydrate (C-S-H) verantwortlich. Die langsamer reagierenden Calciumaluminat- bzw. Calciumferrithydrate (C-A-H + C-A-F) liefern nur einen geringen Festigkeitsbeitrag, beeinflussen aber maßgeblich das Ansteifverhalten und auch das chemische Verhalten des Betons (z.B. Sulfatwiderstand). Bei der Hydratation der Calciumsilikate wird Calciumhydroxid freigesetzt, das zwar aufgrund seiner Form kaum zur Gefügedichtigkeit und Festigkeit beiträgt, jedoch als Partner für die Reaktion der latent-hydraulisch und puzzolanisch reagierenden Stoffe benötigt wird [Tay1997]. Calciumhydroxid ist neben den anderen Alkalihydroxiden (NaOH, KOH) auch für den hohen pH-Wert der Porenlösung von 12,5 verantwortlich und schützt durch die Passivierungsschicht den Bewehrungsstahl vor Korrosion.

Der latent-hydraulische Hüttensand kann prinzipiell die gleichen Reaktionsprodukte wie der Portlandzement bilden, benötigt jedoch für die Hydratation entweder Calciumhydroxid oder Sulfat als Anreger. Verschiedene Untersuchungen [Lo1988, Ren1999] zeigen, dass Betone mit Hochofenzementen, die neben dem Portlandzementklinker als weiteren Hauptbestandteil latent-hydraulischen Hüttensand enthalten, eine gegenüber PZ-Betonen feinere Porenstruktur mit einem geringeren Anteil größerer Kapillarporen besitzen. Sie sind deshalb, bei gleicher Zusammensetzung, im Allgemeinen dichter als PZ-Betone.

Für die puzzolanisch reagierenden Stoffe (Metakaolin, Flugasche, Silicastaub) ist ebenfalls Calciumhydroxid als Reaktionspartner erforderlich. In erster Linie reagieren die gelösten Silicate unter Bildung von Calciumsilicathydraten. Bei der Verwendung von Steinkohlenflugasche wurde in [Sch1993; Sch2005a] infolge der puzzolanischen Reaktion eine Verschiebung der Porenstruktur in den Bereich feinerer Poren beobachtet. Als Ursache für diese Gefügeverdichtung wird eine Umwandlung der groben Ca(OH)₂-Kristalle in feinkristalline C-S-H-Phasen angesehen. Betone mit sehr feinen Puzzolanen, wie z.B. Silicastaub, besitzen gegenüber herkömmlichen Betonen eine deutlich höhere Dichtigkeit. Dieser erhebliche Festigkeits- und Dichtigkeitszuwachs kann auf die Verringerung der wasserreichen Zonen um die Zuschläge zurückgeführt werden. Bei normalen Betonen liegt im Bereich der Zuschlagrandzone eine erhöhte Konzentration von gut kristallisierten und gleichmäßig zur Zuschlagoberfläche ausgerichteten Ca(OH)₂-Kristallen und Ettringitnadeln vor, wodurch die Porosität gegenüber der umgebenden Matrix erhöht ist. Durch die gegenüber dem Zement wesentlich feineren Puzzolane wird u.a. nach Reschke [Res2001] von vornherein eine dichtere Packung der Partikel an der Zuschlagoberfläche erreicht, wodurch eine puzzolanische Reaktion in dieser Zone, d.h. die Bildung dichterer C-S-H-Phasen, begünstigt wird.

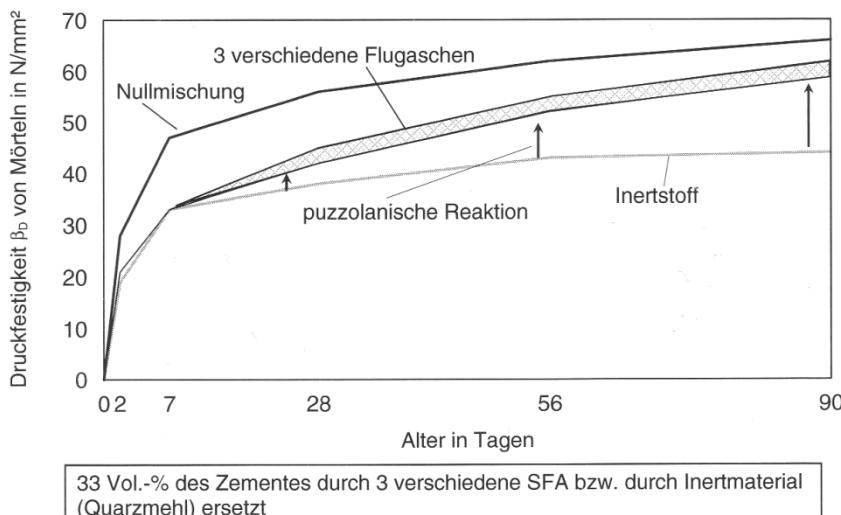


Abbildung 5: Entwicklung der puzzolanischen Reaktion, dargestellt durch den Festigkeitsverlauf (nach Schiessl) [Sta1998].

Abbildung 5 zeigt anschaulich die Entwicklung der puzzolanischen Reaktion von drei Mörtelmischungen mit drei verschiedenen Flugaschen im Vergleich zu einer reinen Zementmörtelmischung und einer Mischung mit inertem Quarzmehl, dargestellt durch den Festigkeitsverlauf. Gegenüber dem inerten Zumahlstoff Quarzmehl wird der Festigkeitsbeitrag der Flugaschen deutlich, der aber immer noch signifikant hinter der Festigkeit der reinen Zementmörtelmischung zurückbleibt. Erst nach mehr als 28 Tagen nähern sich die Druckfestigkeiten der drei Steinkohlenflugaschemischungen, aufgrund der in größerem Maße ablaufenden puzzolanischen Reaktion der Flugaschepartikel, der Druckfestigkeit der reinen Zementmörtelmischung an. Die Gesamtporosität der Mörtelmischungen nahm insgesamt zu, während sich das Porengefüge messbar verfeinerte. [Sch1993;Sta1998;Res2001;Sch2005a]

In [Chi2004] wurde nachgewiesen, dass sich beim Ersatz des Portlandzements durch hochfeine Steinkohleflugaschen, die theoretisch in der Lage sind die Hohlräume zwischen den Zementkörnern zu füllen neben dem Kapillarporenraum auch die Gesamtporosität im Alter nach 28 Tage reduzieren lässt.

Nach [Res2001] wird der Festigkeitsbeitrag der verschiedenen reaktiven Feinstoffe bei gleicher Menge mit zunehmender Feinheit größer, und zwar deutlich über den nach seinen Aussagen geringen physikalischen bedingten Anteil einer höheren Packungsdichte hinaus. Dies führt er auf die größere Reaktionsoberfläche, die schnellere und vollständigere Reaktion sehr feiner Partikel und die dadurch dementsprechend größere Menge an Reaktionsprodukten zurück. Sie ist ebenso für eine geringe Porosität sowie für eine feinere Porenstruktur der Matrix verantwortlich. Einige Autoren [Pan1998,Spo1965] beschreiben, dass sehr feine Gesteinsmehle eine geringe puzzolanische – in diesem Fall Quarzmehle – oder hydraulische – in diesem Fall Kalksteinmehle -Reaktivität aufweisen können.

2.3. Wirksamkeitsfaktoren für Zusatzstoffe

Die Leistungsfähigkeit von Beton wird im deutschen und europäischen Normenwerk in der EN 206-1 über die Einordnung in Expositionsklassen definiert. Hierin ist ein wesentliches Maß für die Betonklassifizierung der w/z-Wert, die Zementmenge und der Gehalt an Zusatzstoffen des Typs II.

Für die Verwendung von reaktionsfähigen Zusatzstoffen des Typs II kommt deren Leistungsfähigkeit über den äquivalenten w/z-Wert (w/z_{eq}) zum Ansatz. D.h., ein Teil der Zusatzstoffmenge kann als zementäquivalent angesetzt werden. Der zementäquivalente Anteil f_{eq} der zulässigen Zusatzstoffmenge f muss über den k-Wert-Ansatz ermittelt werden. Hierbei gilt $f_{eq} \leq k_f \cdot f$. In der deutschen Norm können nur Zusatzstoffe des Typs II als Betonzusatzstoff „ f “ auf die Zementmenge und den w/z-Wert angerechnet werden.

Schon früh erkannte man die positiven Eigenschaften von Betonzusatzstoffen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Für puzzolanische Zusatzstoffe, insbesondere aber Steinkohlenflugaschen, wurden bereits 1938 verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Wirksamkeit in [Lea1938] zusammengefasst und verglichen. Der günstige Einfluss von Steinkohlenflugaschen auf die Betoneigenschaften ist dabei nach Sybertz [Sy1993] nicht nur auf die chemische, sondern auch auf die physikalische Wirkung zurückzuführen. Um das Alkalitätsdepot ausreichend sicherzustellen, ist die auf den äquivalenten w/z-Wert anrechenbare Flugaschemenge „ f_f “ in der deutschen Norm auf bis zu 33 M.-% des Zementgehalts beschränkt. Bei Portlandkompositzementen (CEM II) mit puzzolanischen Hauptbestandteilen dürfen nur 25 M.-% angerechnet werden.

In der europäischen Norm EN 206-1 richtet sich der k-Wert dabei nach der Zementfestigkeitsklasse. So sind bei Portlandklinkerzementen nach EN 197-1 die k-Werte für CEM I 32,5 mit $k = 0,2$ und für CEM 42,5 oder höher mit $k = 0,4$ definiert. In Deutschland dürfen Steinkohlenflugaschen einheitlich mit $k = 0,4$ und bei Unterwasserbetonen mit $k = 0,7$ angerechnet werden.

Durch den bislang fehlenden Nachweis der Eignung des k-Wert-Ansatzes in den Expositionsklassen XF2 und XF4 für Steinkohlenflugasche wie auch für Silicastäube, ist ihre Anwendung in diesen Expositionsklassen bislang in Deutschland ausgeschlossen.

Silicastäube wurden von Sellevold u.a. [Sel1982] als wirksamste Betonzusatzstoffe eingestuft, um den Kapillarporenanteil im Zementstein zu reduzieren und damit die Dauerhaftigkeit zu erhöhen. Sie können mit einem k-Wert von 1,0 angerechnet werden. Anders als bei Flugasche ist zur Sicherung eines ausreichenden Alkaligehaltes der Porenlösung die Zugabe von Silicastaub auf 11 M.-% des Zementgehaltes begrenzt.

Über die Steinkohlenflugasche und den Silicastaub hinaus, dürfen in Deutschland auch weitere Zusatzstoffe des Typs II wie Trass, Blähton und phonolithische Gesteinsmehle angerechnet werden. Für Phonolith-Gesteinsmehl beträgt nach Reinhardt und Schellhorn [Rei2007] der vom DIBt festgelegte k-Wert $k = 0,6$.

In der Europäischen Union gibt es unterschiedliche Ansätze für die Anrechenbarkeit von Betonzusatzstoffen. Während 13 von insgesamt 18 Ländern z.B. bei der Anrechenbarkeit von Steinkohlenflugasche den einheitlichen Vorgaben der EN 206-1 folgen, waren diese z.B. mit Deutschland und Frankreich nicht vereinbar. Im Gegensatz zu Deutschland mit einem einheitlichen k-Wert von 0,4 (ausgenommen bei den Expositionsklassen XF2 und XF4, k = 0) kann in Frankreich Steinkohlenflugasche mit k = 0,4...0,6 zementäquivalent angerechnet werden. Ähnliches trifft auch bei der Anrechenbarkeit von Silicastaub zu. Während dieser, wie oben beschrieben, in Deutschland mit k=1,0 angerechnet werden kann, darf in Frankreich ein k-Wert bis zu 2,0 gewählt werden.

Die zementäquivalente Anrechenbarkeit von Zusatzstoffen des Typs I (inerte Zusatzstoffe) ist in Deutschland bislang ausgeschlossen. Demgegenüber können in der französischen Normung zugelassene Kalksteinmehle nach NF P 18-508 und Quarzmehle nach NF P 18-509 jeweils mit einem k-Wert von 0,25 angerechnet werden. In Deutschland und der ehemaligen DDR wurde z.B. in [Li1985,Li1987] die Wirkung und Anrechenbarkeit von inerten Zusatz- und Zumahlstoffen untersucht. Hierbei wurde der Zement entweder bei unveränderter Wassermenge ausgetauscht oder der Zusatzstoff additiv zugegeben. Anhand von inerten Modellstoffen (Quarzmehle und Kalksteinmehle) mit unterschiedlicher Mahlfeinheit von 1000 bis 7500 cm²/g wurde festgestellt, dass eine zusätzliche Zugabe die Verarbeitbarkeit und die Druckfestigkeit des Betons erhöht. Ein Austausch des Zements durch diese Stoffe erbrachte in [Li1985,Li1987] bei unverändertem Wassergehalt eine Verringerung der Druckfestigkeit und wurde für Betone bis zur Festigkeitsklasse C25 als nennenswerte Alternative eingestuft.

2.3.1. Regelungen zur Dauerhaftigkeit in der DIN EN 206-1

Die Dauerhaftigkeit eines Betons oder Mörtels gibt den Widerstand gegenüber Umwelteinwirkungen an. Diese Widerstandsfähigkeit der Betonkonstruktionen wird heute aus technologischer Sicht in der Regel in nationalen und internationalen Normen und technischen Vorschriften durch Mindestanforderungen an die Betonzusammensetzung geregelt. Hierin sind unter anderem die zulässigen Arten und Klassen der Ausgangsstoffe, der Betondruckfestigkeitsklasse, dem Mindestzementgehalt, dem höchstzulässigen w/z-Wert und die Anrechenbarkeit von Zusatzstoffen geregelt. Die Betonnorm DIN EN 206-1 unterscheidet den äußeren Angriff auf Beton nach Art und Intensität in Expositionsklassen. Für jede dieser Klassen werden individuell abgestimmte Anforderungen an die Ausgangsstoffe und betontechnische Maßnahmen vorgegeben, mit denen der ausreichende Widerstand des Betons gegen die jeweilige Beanspruchung während der vorgesehenen Nutzungsdauer sichergestellt werden kann, eine sachgerechte Verarbeitung des Betons vorausgesetzt. DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 unterteilen den möglichen äußeren Angriff in Expositionsklassen für

- Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung ohne und mit Chlorideinwirkung (XC, XD, XS)
-

- Frostangriff ohne und mit Taumitteleinwirkung (XF)
- Angriff bei chemisch aggressiven Umgebungsbedingungen (XA) und
- Verschleißbeanspruchungen (XM)

Innerhalb jeder Expositionsklasse wird weiter unterteilt nach der Intensität und Wirkung des Angriffs. Dem Planer eines Bauwerkes obliegt es, die jeweils zutreffende Expositionsklasse auszuwählen.

Der Widerstand von Beton gegen Eindringen von Wasser und schädlichen Flüssigkeiten wird u.a. über den einzuhaltenen w/z-Wert und den Mindestzementgehalt gesteuert. Dabei bleibt der Einfluss der Granulometrie auf die Gefügedichte unberücksichtigt. Eigene Untersuchungen [Tei2006] zeigen jedoch, dass eine Optimierung der Packungsdichte der Ausgangsstoffe, insbesondere im Feinstoffbereich, bei gleichem w/z-Wert eine höhere Dichtigkeit oder im Umkehrschluss eine ausreichende Dauerhaftigkeit bei erhöhtem w/z-Wert und gleichzeitig reduziertem Zementgehalt zu erhalten. Die Druckfestigkeit blieb in diesem Fall mindestens auf dem Niveau des Referenzbetons ohne eine optimierte Packungsdichte.

Das hätte zur Folge, dass man die Anforderungen für jede Expositionsklasse nicht nur durch die Einhaltung von vorgegebenen w/z-Werten und Mindestzementgehalten erfüllen kann, sondern dass auch durch die Abstimmung der Ausgangsstoffe die Anforderung an die Dauerhaftigkeit des Betons erfüllt oder übertroffen werden können. Der Vorteil wäre eine größere Flexibilität, mehr Wirtschaftlichkeit durch mögliche Einsparung von Zement und höhere eine Dichtigkeit bei gleichem w/z-Wert.

3. Transportmechanismen im Zementstein

Dringt eine Flüssigkeit oder Dampf in einen porösen Feststoff ein, sind gleichzeitig verschiedene Transportmechanismen in Abhängigkeit vom Porenradius zu beobachten. Sie sind in Abbildung 6 beispielhaft nach [Wi1979] dargestellt.

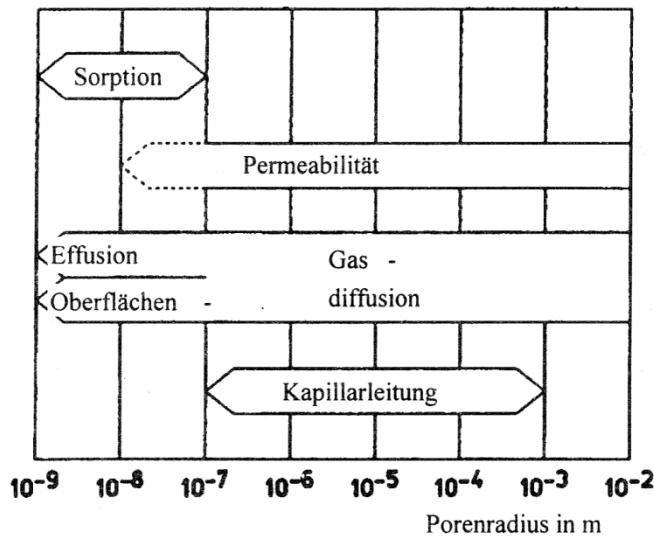


Abbildung 6: Transportvorgänge in Abhängigkeit vom Porenradius [Wi1979].

Nach Rose [Ros1965] kann der Transport von Wasser in drei Hauptkomponenten unterteilt werden. Der jeweilige Anteil der einzelnen Komponenten ist dabei besonders vom Wassergehalt abhängig.

In der ersten Phase der Befeuchtung werden die eindringenden Wassermoleküle an die Porenwände angelagert, bis sich eine monomolekulare Schicht ausgebildet hat. Bei der Zufuhr weiterer Wassermoleküle werden die Porenwandungen nach und nach mit mehreren Molekülschichten belegt. Innerhalb dieser Schichten sind die Wassermoleküle so beweglich, dass das Wasser in der Folge in Form von Oberflächendiffusion entlang der Porenwandung fließen kann. Gleichzeitig wird im Inneren der Poren Wasserdampf transportiert. Bei weiter zunehmender Feuchte erhöht sich die Dicke der adsorbierten Wasserschicht wodurch die Oberflächenströmung dominierend wird. Gleichzeitig reduziert sich der freie Porenraum und vermindert den Anteil der Wasserdampfdiffusion. Dabei stehen die Dampfphase und die Wasseradsorption an der Porenwandung in einem dynamischen Gleichgewicht zueinander.

Nimmt die Feuchte weiter zu, steigt die Dicke der Wasserfilme an der Porenwandung weiter an, bis die Poren mit Wasser gefüllt sind. Damit kommt die Dampfdiffusion zum Ende und eine gesättigte Kapillarströmung kann sich ausbilden. Diese Kapillarströmung ist auch in teilgefüllten Poren möglich, wird dann jedoch erheblich durch die Oberflächenspannung beeinflusst.

Für die Beschreibung der Transportvorgänge ist die Knudsen-Zahl die wichtigste Kennzahl. Sie wird mit Hilfe der freien Weglänge berechnet. Als freie Weglänge λ wird die Strecke bezeichnet, die ein Molekül ungehindert zurücklegen kann, bevor es auf ein anderes Molekül trifft. Nach [Lu1994] ist λ sowohl von der Temperatur als auch vom Gesamtdruck abhängig, wobei mit abnehmender Temperatur und steigendem Druck die mittlere freie Weglänge kleiner wird.

Die Knudsenzahl ist definiert als

$$K_n = \frac{\lambda}{d}$$

Gleichung 2

λ freie Weglänge des Moleküls

d Parendurchmesser

Durch die Knudsen-Zahl können drei Bereiche mit verschiedenen Transportmechanismen unterschieden werden:

$Kn > 1 \rightarrow$ Effusion, Knudsen'sche Molekularbewegung

$Kn \approx 1 \rightarrow$ Mischtransport, Übergangsbereich

$Kn < 1 \rightarrow$ Diffusion oder laminare Strömung, Kontinuumsbereich

Im Kontinuumsbereich ist der Impulsaustausch zwischen den Molekülen für den Transport maßgebend. Es kann sowohl Diffusion als auch Strömung der Wasserdampf enthaltenden Luft stattfinden. Nach Oberbeck [Ob1995] lassen sich bei den mitteleuropäischen Umgebungsbedingungen (Luftdruck ca. 1 bar, Temperatur ca. 300 K) Poren mit einem Durchmesser kleiner als 0,01 µm in den Molekular bzw. Effusionsbereich, zwischen 1 µm und 0,01 µm in den Übergangsbereich und größer als 1 µm in den Kontinuumsbereich einordnen.

Bei einem Stoff wie Beton mit einer sehr weiten Porengrößenverteilung finden sämtliche Transportprozesse gleichzeitig statt und führen zu einem Mischtransport mit sich gegenseitig beeinflussenden Transportprozessen. Diese Prozesse wurden beispielsweise von Gaber [Ga1989] und in [Sch1982;Os1995;Schw1972;Ros1965] ausführlich behandelt und werden hier nicht weiter ausgeführt, da sich die Arbeit im Schwerpunkt mit den Einflüssen der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Eigenschaften von frischen und erhärteten Zementsteinen beschäftigt.

3.1. Diffusion

Im Wesentlichen wird die Durchlässigkeit von porösen Stoffen in der Wissenschaft durch den Diffusionskoeffizienten und in der Praxis durch die Dampfdiffusionswiderstandszahl unterschieden.

3.1.1. Diffusionskoeffizient

Stationäre, also zeitunabhängige, räumliche Strömungsvorgänge die durch ein Konzentrationsgefälle hervorgerufen werden, lassen sich durch das 1. Fick'sche Gesetz wie folgt beschreiben:

$$1. \text{ Fick'sches Gesetz} \quad J = -D \cdot \frac{dc}{dx}$$

Gleichung 3 [LU1994]

Der in Gleichung 3 rechts stehende Bruch beschreibt das Konzentrationsgefälle, das angibt, wie sehr sich die Konzentration dc längs des Weges dx ändert. Der Diffusionskoeffizient D ist dabei, im Gegensatz zur Diffusionswiderstandszahl, das Maß der Durchlässigkeit eines Stoffes gegenüber den darin diffundierenden Teilchen und nicht den Widerstand. Der Zahlenwert des Diffusionskoeffizienten gibt den Betrag der Massenstromdichte beim Konzentrationsgefälle 1 an, das Vorzeichen beschreibt die Diffusion in Richtung Konzentrationsgefälle. Vektoriell betrachtet lautet das erste Ficksche Gesetz:

$$1. \text{ Fick'sches Gesetz (vektoriell)} \quad J = -D \cdot grad n$$

Gleichung 4

Gleichung 4 besagt, dass ein Teilchen in Richtung des Konzentrationsgefälles $grad n$ fließt.

Das 2. Fick'sche Gesetz beschreibt den instationären Zustand, wenn der Konzentrationsunterschied zeitlich veränderlich ist.

$$2. \text{ Fick'sches Gesetz} \quad \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial^2 x}$$

Gleichung 5

c	Konzentration	J	Diffusionsstrom	D	Diffusionskoeffizient
t	Zeit	x	Diffusionsstrecke		

Bei der Diffusion werden nach Klopfer [Kl1974] Wechselwirkungen zwischen den Molekülen und chemische Reaktionen nicht berücksichtigt.

Die Größenordnung von Diffusionskoeffizienten in verschiedenen Stoffen ist in Abbildung 7 angegeben.

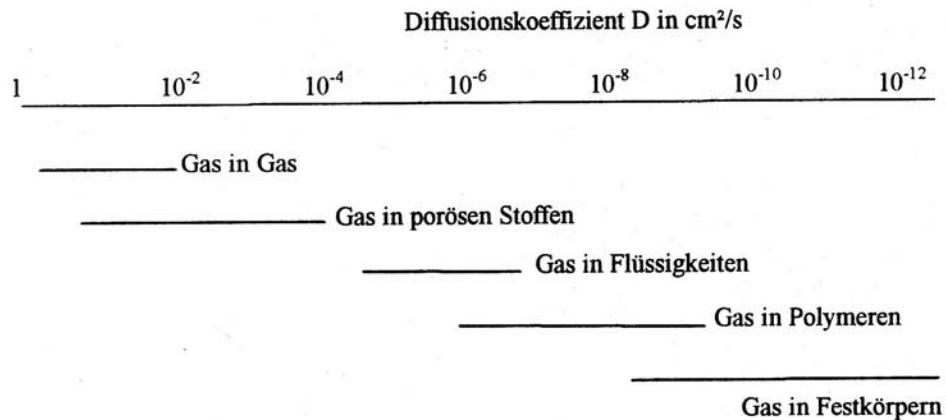


Abbildung 7: Diffusionskoeffizienten in unterschiedlichen Medien [Dar1995].

3.1.2. Wasserdampfdiffusionskoeffizient

Die Diffusionswiderstandszahl μ ist eine eindimensionale Größe, die angibt, wie viel Mal das betreffende Stoffgefüge gegen diffundierende Wassermoleküle dichter ist, als eine gleich dicke Luftsicht. Nach Künzel [Kue1990] ergibt sich das Verhältnis D_{Luft}/D . Dem Widerstand der ruhenden Luftsicht wurde dabei die Widerstandszahl $\mu=1$ zugeordnet. Demnach liegen die Widerstandszahlen der verschiedenen Baumaterialien zwischen eins und unendlich (z.B. Glas, Metalle). Die Berechnung von μ erfolgt nach DIN 52615 wie folgt:

$$\mu = \frac{1}{d} \left(D_L \cdot A \cdot \frac{p_1 - p_2}{I} - s_L \right)$$

Gleichung 6

D_L Diffusionsleitkoeffizient von Wasserdampf in der Luft [kg/mhPa]

A Prüffläche der Probe [m^2]

p_1, p_2 Wasserdampfteildrücke an der Probe [Pa]

I Wasserdampfdiffusionsstrom [kg/h]

D mittlere Dicke der Probe [m]

s_L mittlere Dicke der Luftsicht zwischen Wasseroberfläche und Probe [m]

(vernachlässigbar)

Die genaue Beschreibung und Berechnung des Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten D_L erfolgt in Abschnitt 5.4.8.1 auf Seite 50.

3.1.3. Chloridionendiffusion

Für die Dauerhaftigkeit eines Betons oder Mörtels ist die äußere Einwirkung von Chloriden von großer Bedeutung. Der Eintrag von Chlorid in Beton ist eine der wesentlichen Ursachen für die Gefährdung von Betonbauwerken durch Korrosionsschäden. Dabei schädigen Chloridionen das Gefüge des Zementsteins im Allgemeinen nicht direkt, vielmehr sind es die Bewehrungsstäbe, die einem Chloridangriff ausgesetzt sind. Von den freien Chloridionen in der Porenlösung geht die eigentliche Korrosionsgefahr für den Stahlbeton aus. Die Chloridionen dringen einerseits durch Diffusion in wassergesättigten Beton, andererseits durch Konvektion, d.h. huckepack mit Wasser in Beton ein. In wassergesättigten Betonen fungiert demnach der Konzentrationsgradient als transportauslösende Größe. Die Diffusion ist ein passiver Transport ohne äußere Krafteinwirkung.

Bei einer erzwungenen Konvektion hingegen werden die Chloridionen mit dem eindringenden Wasser in den Beton transportiert. Dabei ist nach Stark [Sta2001] zwischen dem Hydratationssog des Zements (das innere Schrumpfen infolge Zementhydratation bewirkt ein Nachsaugen von Wasser) und dem kapillaren Saugen zu unterscheiden.

Die Eindringgeschwindigkeit und –tiefe sind zudem von der Zusammensetzung des Betons abhängig. Insbesondere das Chloridbindevermögen des Zementsteins übt einen großen Einfluss auf die Eindringgeschwindigkeit aus. Dabei können alle Phasen des Zementklinkers bei ihrer Hydratation Chloride binden. [Sta2001]

In den Beton eingedrungene Chloride können nach [Ary1987; Cle1974] in

- chemisch gebundenes Chlorid,
- physikalisch gebundenes Chlorid und
- freies Chlorid in der Porenlösung

eingeteilt werden.

Nach Untersuchungen von Richartz und Neroth [Ri1969, Ne1985] kann im Zementstein eines Betons mit niedrigem w/z-Wert bis zu 0,4 M.-% Chlorid, bezogen auf den Zementgehalt, gebunden werden. Dabei wird das Chlorid hauptsächlich durch das Tricalciumaluminat (C_3A) und Tetracalciumaluminatferrit (C_4AF) in Form des Friedel'schen Salzes ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) kristallchemisch gebunden, wenn der Chloridgehalt in der Lösung 10g/l nicht überschreitet. Darüber liegende Chloridgehalte werden in das Trichloridhydrat ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaCl_2 \cdot 32H_2O$) eingebunden. Diese Verbindung zerfällt jedoch wieder bei Einwirkung von Wasser unter Freisetzung von Chlorid. Demgegenüber besitzt nach [Ri1969] das Friedel'sche Salz auch in bis 90 °C erhitzter Lösung und einem pH-Wert-Bereich von 7 bis 12,6 eine hohe Stabilität.

Mit steigendem Chloridangebot wird nach [Ne1985] mehr Chlorid im Zementstein gebunden, während jedoch das Verhältnis von gebundenem Chlorid zum Gesamtchloridgehalt sinkt. Darüber hinaus ist nach [Smo1984,Ne1985] die an den Zementstein bindungsfähige Chloridmenge von der Salzart abhängig. Untersuchungen von [Al1990] zeigten, dass bei der Zugabe von Natriumchlorid (NaCl) bis zu 2 M.-% mehr freie Chloridionen (bezogen auf den Zementgehalt) als bei der Zugabe von Calciumchlorid (CaCl_2) vorhanden waren.

Nach [Smo1984] können für die Bestimmung der Eindringtiefe von Chloridionen die Fick'schen Diffusionsgesetze angewendet werden. Die Eindringtiefen und die Chloridverteilung sind dabei unabhängig von der Konzentration der einwirkenden Chloridlösung. Die maximale Eindringtiefe kann nach [Smo1984] nach Gleichung 7 berechnet werden.

$$x_{\max} = 4 \cdot \sqrt{D \cdot t}$$

Gleichung 7

x_{\max} maximale Eindringtiefe

D Diffusionskoeffizient

t Zeit

Short und Smolczyk [Sho1981,Smo1984] wiesen eine Abhängigkeit der Chloriddiffusion vom w/z-Wert und der Zementart nach. Nach [Sho1981] reagieren die Chloridionen mit den Porenwänden oder dem darauf adsorbierten Wasser und bewirken dadurch eine Verringerung des Kapillarporengehaltes, was zu einer reduzierten Diffusionsrate führt.

3.2. Kapillarität

Die kapillare Wasseraufnahme poröser Materialien kann durch den Wasseraufnahmekoeffizienten nach DIN 52617 beschrieben werden.

3.2.1. Wasseraufnahmekoeffizient

Theoretische und experimentelle Untersuchungen in [Schw1972,So1971;Ga1989] zeigten, dass die kapillare Wasseraufnahme eines Materials bei unmittelbarem Kontakt mit flüssigem Wasser durch die folgende Beziehung beschrieben werden kann.

$$m_w = A_w \cdot \sqrt{t}$$

Gleichung 8

m_w pro Flächeneinheit aufgenommene Wassermenge [kg/m^2]

A_w Wasseraufnahmekoeffizient [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0,5}$]

Der sich daraus ergebende Wasseraufnahmekoeffizient mit der Dimension $[kg/m^2 s^{0,5}]$ kennzeichnet den zeitlichen Verlauf der Wasseraufnahme eines Materials, ausgehend vom trockenen Zustand bis zur Durchfeuchtung unter den Randbedingungen, dass an der Saugfläche ein ständiger Wasserüberschuss vorhanden ist. Experimentelle Untersuchungen [Sch1982] zeigten, dass der Einfluss der Schwerkraft auf die Versuchsergebnisse von untergeordneter Bedeutung ist.

4. Vorüberlegungen - Füllereffekt

4.1.1. Methoden zur rechnerischen Erfassung der Packungsdichte

Die heute übliche gravimetrische Mischungsberechnung von Normalbetonen beruht auf dem Kreisscheibenmodell von Fuller und Thompson [Fu1907] und wurde [A1930] weiter vertieft. Mit diesem zweidimensionalen Modell lässt sich die Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung ($> 0,125 \text{ mm}$) geometrisch abbilden. Dabei lässt das Modell jedoch die Kornform, die Granulometrie der Feinstoffe ($< 0,125 \text{ mm}$) und die Agglomerationsneigung feiner Stoffe unberücksichtigt. Demzufolge ist auf dieser Basis die Bestimmung der günstigsten Sieblinie nicht möglich. Ein verbesserter Ansatz wurde von Schwanda [Sch1966] für Gesteinskörnungen entwickelt. Dieser wurde u.a. von Krell [Kre1985] zur Bestimmung des Wasseranspruchs auf der Basis des Hohlraumgehalts und von Reschke [Res2001] zur Bestimmung der Gefügedichtigkeit auf Basis des Hohlraumgehaltes aufgegriffen. Weitere mathematische Modelle von de Larrard und Stroeven zur Berechnung des Hohlraumgehaltes und Optimierung von Korngemischen sind in [Lar2002; Sto1999] beschrieben.

Die Berechnung und Optimierung der Packungsdichte in dieser Arbeit erfolgte nach dem Verfahren nach Schwanda und Reschke [Sch1966; Res2002] und wurde mit einem vom Autor modifizierten Computerprogramm von Geisenhanslücke [Gei2003] berechnet.

Die das Gefüge verdichtende Wirkung eines Feinstoffzusatzes lässt sich durch die infolge größerer Feinkornoberfläche geringere Wasserfilmdicke um die einzelnen Partikel im Frischbeton erklären. Der durch die Hydratationsprodukte zu überbrückende Abstand zwischen den einzelnen Partikeln wird kleiner. Dabei gibt [Res 2001] zu beachten, dass für eine entsprechende Verarbeitbarkeit und im Hinblick auf eine vollständige Hydratation, aufgrund des Raumbedarfs der Hydratationsprodukte, eine zu dichte Lagerung der Partikel nachteilig sein kann. Der Anteil an Stoffen, die sich praktisch inert gegenüber Zement verhalten, muss dabei so gering bleiben, dass die Hydratationsprodukte noch ein zusammenhängendes Gefüge bilden und den ursprünglich mit Anmachwasser gefüllten Raum weitgehend ausfüllen können. Die Packungsdichte bzw. der Hohlraumgehalt der Feinstoffsieblinie wird von der Kornverteilung aller verwendeten Feinstoffpartikel bestimmt. Es hat sich gezeigt, dass sich der Hohlraumgehalt, insbesondere durch die Mischung von Feinstoffen deutlich unterschiedlicher Kornverteilung, verringert. Durch die Zugabe gut dispergierter hochfeiner Bestandteile im Zement oder Beton, kann nach [Me1993; Sel1982] neben einer dichten Packung der Feinstoffschüttung selbst, auch der Hohlraumgehalt im unmittelbaren Bereich der Zuschlagrandzone verbessert werden. Dabei muss nach Keck [Kec1999] allerdings beachtet werden, dass eine dichte Zusammenlagerung der Feinstoffpartikel, sowohl im trockenen Zustand, als auch in einer Wasser-Feinstoff-Suspension (Zementleim + Zusatzstoffe), durch zwischenpartikuläre Kräfte behindert wird.

Weniger Hohlraumgehalt in einem Korngemisch und insbesondere im Feinkorngemisch bedeutet eine höhere Kornpackungsdichte und hat nach [Tei2004] sowohl eine höhere

Gefügedichtigkeit und damit eine gesteigerte Dauerhaftigkeit wie auch eine erhöhte Druckfestigkeit zur Folge. Die dichte und tragfähige Kornpackung besitzt nach [Sch1959] (siehe Abbildung 8) mehr gegenseitige Stütz- und Reibungsfläche. Die größeren, festen und damit tragfähigen Körner bilden bei ausreichender Verdichtung ein eng gelagertes Tragkorngerüst, dessen verbleibende Hohlräume von weiteren Feinstoffen mehr oder weniger aufgefüllt werden.

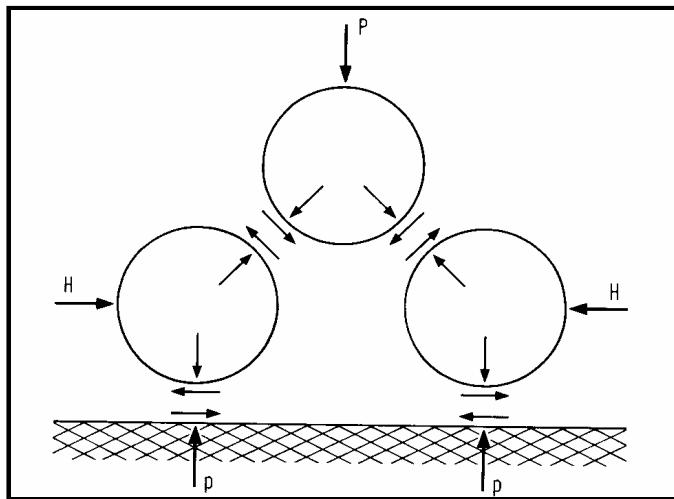


Abbildung 8: Stützpunkte und wirkende Kräfte im Korngerüst [Sch1991].

4.1.2. Rechenmodell nach Schwanda

Ein geeignetes Modell zur Berechnung der Packungsdichte, welches die vorher genannten Bedingungen erfüllt, ist das Modell von Schwanda.

Das Rechenverfahren von Schwanda liefert die rechnerische Ermittlung des Hohlraumgehaltes beliebiger Korngrößenverteilungen, von denen die Art des Kornes gegeben sein muss. Die Korngrößenverteilung kann beispielsweise experimentell mit der Lasergranulometrie bestimmt werden. Die Art des Kornes wird zum Zweck der rechnerischen Behandlung durch zwei Merkmale, den Hohlraumgehalt des Einkornstapels und die Reichweite der Teilchenbehinderung festgelegt. Aus den für Gemische aus zwei Korngruppen erhaltenen Beziehungen wird ein Verfahren zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes von Gemischen beliebig vieler Korngruppen abgeleitet. Die Berechnung kann unabhängig von bestimmten Verteilungsfunktionen, also auch für unstetig verteilte Partikelgemische, erfolgen. Zudem ist der dazugehörige Rechenalgorithmus in der Lage, die optimale Zusammensetzung der vorgegebenen Korngruppen eines Gemisches zur Erzielung des geringsten Hohlraumgehaltes zu berechnen.

[Sch1959]

4.1.2.1. Bestimmung des Hohlraumgehaltes

Zunächst müssen die folgenden Parameter festgelegt werden, die für die Bestimmung des Hohlraumgehaltes nach Schwanda von Bedeutung sind:

Definition aus [Sch1959]:

S, s	Festraum einer Ansammlung von Körnern
H, h	Hohlraum eines Korngemisches im eingerüttelten Zustand
K, k	Hohlraumgehalt eines Einkornstapels
V	aus Festraum und Hohlraum bestehender Gesamtraum einer Ansammlung von Körnern im eingerüttelten Zustand: $V = H + S$ bzw. $V = K + S$

Die Großbuchstaben S, H, K, V geben den Rauminhalt in der Maßeinheit an. Die Kleinbuchstaben s, h, k, v stellen das Verhältnis zwischen S, H und K und dem Festraum aller Körner, die das Gemisch bzw. den Einkornstapel bilden, dar:

$$s = S : \Sigma S$$

$$h = H : \Sigma S$$

$$k = K : S$$

Das beschriebene Verfahren nach Schwanda [Sch1966] beruht auf dem Verhalten von gepackten Partikeln unterschiedlicher Größe. Unterschieden wird zwischen einem Grundkorn und dem betrachteten Beikorn, welches die Hohlräume der Grundkornpackung ausfüllen soll. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden.

Im ersten Fall ist das Partikelvolumen der Beikörper kleiner oder gleich dem Hohlraumvolumen der Grundkornpackung, wodurch sich das Gesamtvolume der Mischung nicht ändert. Es vermindert sich lediglich der Hohlraum um den Festraum der feinen Beikörper. Dabei wird die grobe Komponente als Grundkorn x_g bezeichnet. Abbildung 9 verdeutlicht diesen Vorgang anschaulich.

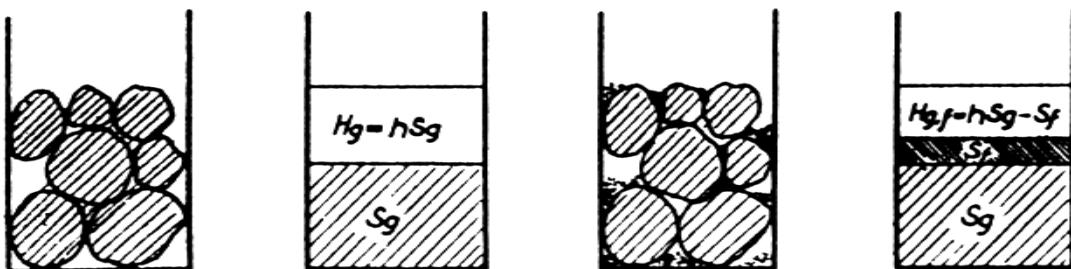


Abbildung 9: Fall 1: Gemisch aus großem Grundkorn und wenigen kleinen Beikörnern [Sch1959].

Es ergibt sich folgender Ansatz:

$$h_{Fall1} = \frac{Hohlraum_{grob} - Festraum_{fein}}{Festraum_{grob+fein}} = \frac{H_g - S_f}{S_g + S_f} = h_{g,f}$$

$$h_{g,f} = h_g - (h_g + 1) \cdot S_f = k_g - (k_g + 1) \cdot S_f$$

Gleichung 9

Man beachte, dass sich bei $h_{g,f}$ (Fall 1) der erste von zwei Zeigern immer auf das Grundkorn bezieht. Dieser Ansatz bleibt solange richtig, bis die kleineren Körner die Lücken zwischen den groben Körnern ausgefüllt haben, ohne diese auseinander zu drängen. Wird die Menge von S_f über diese Grenze hinaus vergrößert, so gilt ein anderer Zusammenhang, zu dessen Darstellung man von der Betrachtung einer nur aus sehr feinen Körnern bestehenden Ansammlung gelangt. Für diesen zweiten Fall ist der Anteil der feinen Komponenten größer als der Hohlraumgehalt der großen, so dass die groben Körner auseinander gedrängt werden und sich das Gesamtvolumen entsprechend erhöht. Der Hohlraumgehalt der Mischung ist dann gleich dem Hohlraumgehalt der feinen Komponente, weshalb in diesem Fall die feine Komponente als Grundkorn x_s bezeichnet wird. Abbildung 10 verdeutlicht diesen Vorgang anschaulich.

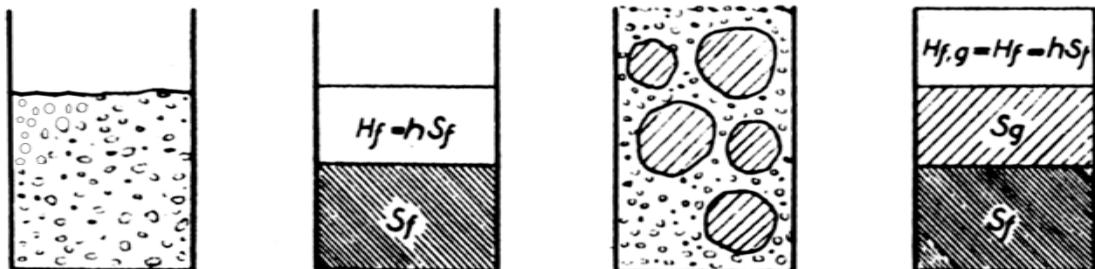


Abbildung 10: Fall 2: Gemisch aus feinem Grundkorn und wenigen großen Beikörnern [Sch1959].

Es ergibt sich folgender Ansatz:

$$h_{Fall1} = \frac{Hohlraum_{fein}}{Festraum_{grob+fein}} = \frac{H_f}{S_g + S_f} = h_{f,g}$$

$$h_{f,g} = h_f - h_f \cdot S_f = k_f - k_f \cdot S_g$$

Gleichung 10

Für die Berechnung des Hohlraumgehaltes von Gemischen aus zwei Körnungen ergeben sich somit zwei Formeln. Gültig ist immer diejenige, die den größeren Wert für h liefert. Ergeben beide Formeln den gleichen Wert, wurde das Mengenverhältnis $S_g : S_f$ gefunden, das den geringsten Hohlraumgehalt aufweist, der sich mit dem gegebenen Korn erzielen lässt.

[Sch1959]

4.1.2.2. Teilchenbehinderung

Bisher wurde vorausgesetzt, dass der Durchmesser der groben Körner um sehr viele Male größer ist als der Durchmesser der feinen Körner. Unterschreitet dieses Größenverhältnis eine gewisse Grenze, so können die feineren Körner nicht mehr ohne weiteres in die Hohlräume zwischen den größeren Körnern verschwinden, sondern müssen sie auseinanderdrängen. Es existiert also zwischen den oben beschriebenen Fällen 1 und 2 ein Übergangsbereich, in dem die Körner sich gegenseitig behindern und das Grundkorngerüst teilweise auseinanderdrängen. Infolge dieser Teilchenbehinderung tritt eine Volumenvergrößerung und somit eine Erhöhung des Hohlraumanteils ein, da der hohlraumvermindernde Einfluss des Beikorns abnimmt. Dies ist durch einen Faktor a zu berücksichtigen. Die a -Werte hängen einmal von der Form und Oberflächenbeschaffenheit der Körner ab und außerdem vom Verhältnis des Durchmessers der größeren Körner zu dem der feineren. Haben beide Körner denselben Durchmesser, so wird $a = 0$. Der Bereich derjenigen Größenverhältnisse der Komponenten, bei denen sich diese Teilchenbehinderung bemerkbar macht, wird daher Reichweite der Teilchenbehinderung w genannt. Die Reichweite w hängt ab vom Verhältnis des Grundkorns x_s zu einer Grenzkorngröße x_w , bei der gerade keine Teilchenbehinderung mehr eintritt. Durch die Reichweite der Teilchenbehinderung wird der Einfluss der Kornform bzw. des Größenverhältnisses berücksichtigt. Berechnet wird die mögliche Vergrößerung des Gesamtvolumens der Partikelmasse.

Es werden also neben der Korngrößenverteilung Parameterwerte benötigt, um die Einflüsse der Kornform und Oberflächenrauhigkeit der Partikel sowie die Reichweite der Teilchenbehinderung zu berücksichtigen. Diese Beschreibung der Materialart wird über den Parameter k_0 , welcher den Hohlraumanteil der Einkornschüttung angibt sowie über die Reichweite der Teilchenbehinderung w_0 vorgenommen.

Der Hohlraumanteil wird nach folgender Formel ermittelt [Res2001]:

$$k_0 = \frac{\varepsilon}{D \cdot 100} = \frac{\varepsilon}{100 - \varepsilon}$$

Gleichung 11

mit: k_0 : Hohlraumanteil Einkornschüttung

ε : Hohlraumgehalt [Vol.-%]

D: Packungsdichte

Mit der Reichweite der Teilchenbehinderung wird das Größenverhältnis des Grundkorns zu einem Grenzkorn bestimmt. Dieser Wert kann über folgende Beziehung abgeschätzt werden [Res2001]:

$$w = \log\left(\frac{x_w}{x_s}\right)$$

Gleichung 12

mit: w : Reichweite der Teilchenbehinderung

x_w : Grenzkorngröße

x_s : Grundkorngröße

Ein geringer Wert für die Teilchenbehinderung w ergibt sich für ein kleines Verhältnis zwischen den Korngruppen, womit eine Teilchenbehinderung in Form eines Auseinanderdrängens stattfindet.

Durch den Hohlraumgehalt der Einkornschüttung k_0 und die Reichweite der Teilchenbehinderung w kann man die verschiedenen Körnungen nach ihrer Art ziffernmäßig so kennzeichnen, dass der Hohlraumgehalt eines jeden beliebigen Gemisches mit einer genügenden Genauigkeit berechnet werden kann. Die beiden Parameter k_0 und w werden durch einfache Versuche bestimmt. Sie lassen sich bei einiger Erfahrung aber auch für die meisten Zwecke hinreichend genau abschätzen.

Der Hohlraumanteil feiner Einzelfraktionen wird erfahrungsgemäß mit $k_0=0,82$ (45 Vol.-% Hohlraum) angenommen, die Reichweite der Teilchenbehinderung mit $w=2$. [Res2001] Der dem Modell zugrunde gelegte mathematische Zusammenhang zwischen k_0 , w , dem Korngrößenverhältnis von Grundkorn x_s zum jeweiligen Beikorn x_i und dem Faktor $a_{s,i}$ als Funktion der vorgenannten Größen, ist beispielhaft für die Parameter $k_0=0,6$ in Abbildung 11 dargestellt. Der größtmögliche Zusammenhang zwischen den Parametern und dem Faktor $a_{s,i}$ wurde durch Versuche von [Sch1966] ermittelt und von [Res2001] in Abbildung 11 für $k_0=0,6$ verallgemeinert.

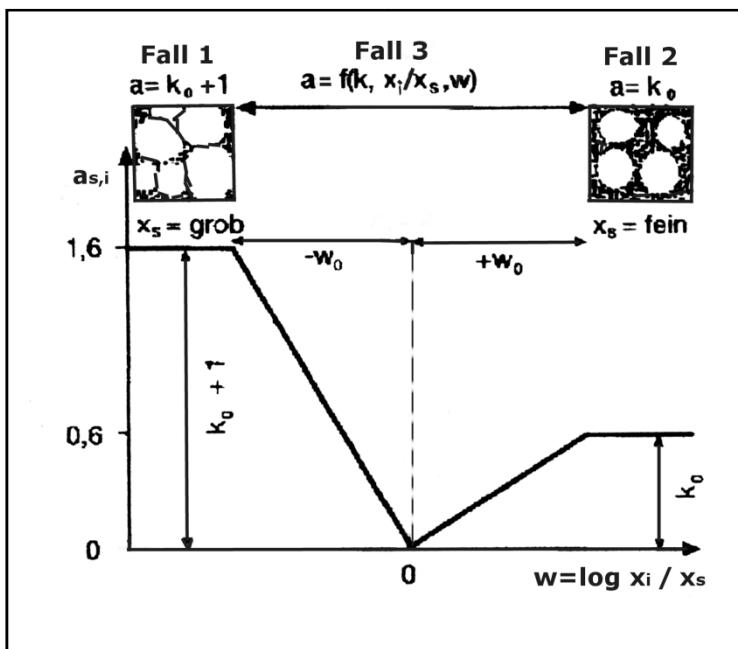


Abbildung 11: Diagramm zur Berechnung der Funktion des Hohlraumgehaltes für $k_0=0,6$ [Res2001].

Basierend auf die in Abbildung 11 dargestellten Zusammenhänge, wurde der Hohlraumanteil der jeweiligen Grundkornklasse h_s ermittelt. Dieser ergibt sich, indem der Hohlraumgehalt des Grundkorns k_0 um die entsprechenden Festraumanteile des Beikorns aller anderen Kornklassen s_i , unter Berücksichtigung des jeweils gültigen Faktors $a_{s,i}$, verringert wird.

$$h_s = k_0 - \sum a_{s,i} \cdot s_i$$

Gleichung 13

- mit: h_s Hohlraumanteil Grundkornklasse
 k_0 Hohlraumanteil Einkornschüttung
 $a_{s,i}$ Faktor a (Teilchenbehinderung) der Kornklasse i
 s_i Festraumanteil Kornklasse i am Gesamtgestraum

Der Reihe nach wurde nun jede Kornklasse einmal als Grundkorn betrachtet. Die Kornklasse, die den größten Hohlraumanteil des Grundkorns $h_{s,max}$ liefert, ist für die Berechnung der Packungsdichte D (oder auch Dichtigkeitsgrad D) der gesamten Partikelschüttung maßgebend:

$$D = \frac{1}{1 + h_{s,max}}$$

Gleichung 14

Die anderen berechneten Hohlraumanteile $h_{s,\max}$ gelten für Gemische, in denen die von einzelnen Korngruppen eingenommenen Räume einander überschneiden. [Res2001]

Das Modell nach Schwanda wird dadurch eingeschränkt, dass die Parameter k_0 und w nur einen konstanten Wert innerhalb der Berechnung annehmen können. Der unterschiedlichen Beschaffenheit der Einzelfraktionen eines Partikelgemisches kann damit nur ungenügend Rechnung getragen werden.

4.1.3. Einfluss der Füllstoffe auf die Oberfläche und die Wasserfilmdicke

Die Kornzusammensetzung der Feinkornmatrix ist nach [Sch2005,Sch2006] für den sogenannten Grundwasserbedarf verantwortlich, wie Abbildung 12 zeigt. Dieser wird für die Füllung der Hohlräume zwischen den Körnern benötigt. Wenig korngestufte, sogenannte „einkörnige“ Zemente und Betonzusatzstoffe zeigten einen höheren Wasserbedarf als gut korngestufte, bei denen feine Partikel (schwarz unterlegt) die Hohlräume zwischen den größeren (grau unterlegt) Partikeln füllen und das sonst dort erforderliche Wasser verdrängen.

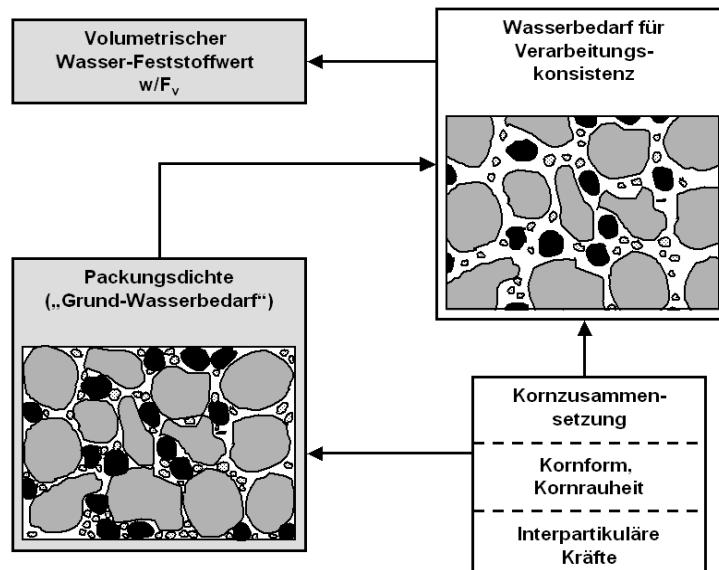


Abbildung 12: Einflüsse auf die Packungsdichte [Sch2005].

In Abbildung 13 stellen [Sch2005,Sch2006] dar wie ein feines Quarzmehl die Hohlräume im Gerüst des größeren Quarzmehls auffüllt und damit Wasser freisetzt, dass die Viskosität des Gemisches herabsetzt. Steigt der Feinkornanteil über die optimale Hohlraumfüllung hinaus, binden die sehr feinen Füllpartikel mit ihrer großen spezifischen Oberfläche zunehmend mehr Wasser und die Viskosität nimmt wieder zu.

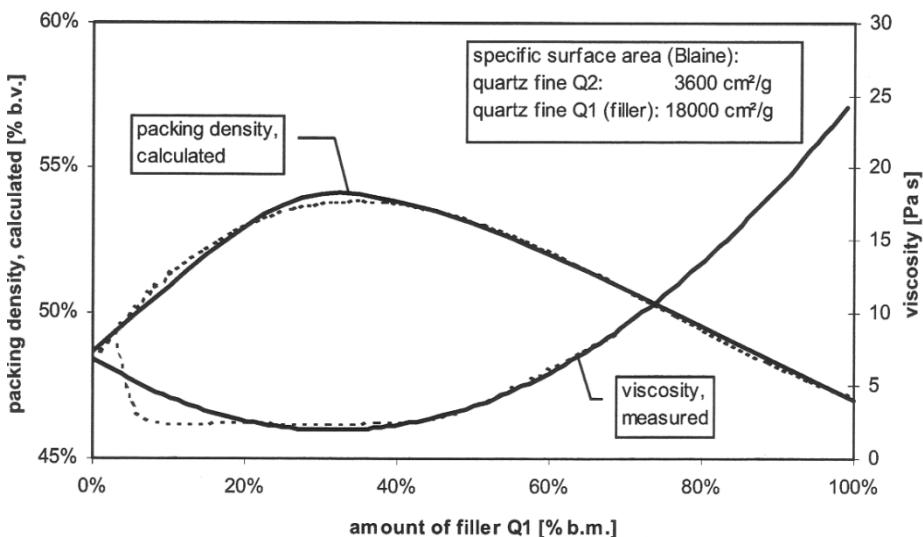


Abbildung 13: Einfluss der Packungsdichte auf die Viskosität, mit inerten Quarzmehlen [Sch2005].

Zu diesem "Grundwasserbedarf" kommt nach Schmidt [Sch2006] die Wassermenge hinzu, die erforderlich ist, um die Partikel zu umhüllen, voneinander zu trennen und sie damit gegeneinander verschiebbar zu machen. Sie ist z. B. bei ungünstig geformten Körnern mit rauer, sogenannter "klüftiger" Kornoberfläche größer als bei überwiegend runden Körner. Dies ist bei der Auswahl von Betonzusatzstoffen ggf. zu beachten.

Bei hohlraumreichem, füllkornarmen Feinkorn steigt nach [Sch2006] wegen des höheren Grundwasserbedarfes und der niedrigeren inneren Oberfläche auch die Sedimentationsneigung des Bindemittelleims und damit die Neigung Wasser abzusetzen. Eine optimal dichte Kornpackung des Feinkorns führt dagegen zu einem niedrigeren Wasserbedarf für die Verarbeitungskonsistenz, die höhere innere Oberfläche bindet das freie Wasser und verringert so das Bluten. Zugleich wird der Bindemittelleim durch die höhere innere Reibung zwischen den feineren und gröberen Partikeln verformungsstabiler.

Um die Lage und den Abstand der Partikel zueinander beschreiben zu können, bietet sich das Modell von Krell [Kre1985] an. Mit diesem Modell kann die Wasserfilmdicke um jedes Partikel berechnet werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass im Feinstoffleim jedes Partikel durch einen Wasserfilm gleicher Dicke umgeben ist, alle Hohlräume mit Wasser gefüllt sind und alle Partikel dispergiert im System vorliegen. Durch die Dicke des Wasserfilms wird somit der Abstand der Körner zueinander gekennzeichnet. Je geringer die Wasserfilmdicke ist, desto dichter liegen die Partikel zusammen. Nach Krell ist dabei zu beachten, dass eine zu geringe Wasserfilmdicke die Verarbeitbarkeit verschlechtert und im Hinblick auf den Raumbedarf der Reaktionsprodukte der Hydratation nachteilig sein kann.

Die Wasserfilmdicke d_w kann nach [Kre1985] vor dem Beginn der Hydratation aus dem zur Verfügung stehendem Wasservolumen V_w , dem Hohlraumgehalt e_f sowie der spezifischen Oberfläche des Feinstoffgemisches S_{mf} nach Gleichung 15 berechnet werden.

$$d_w = \frac{V_w - (\frac{\varepsilon_f}{100 - \varepsilon_f} \cdot \frac{m_f}{\rho_f})}{S_{mf} \cdot m_f} \cdot 10000$$

Gleichung 15 nach [Kre1985]

d_w Wasserfilmdicke [μm]

V_w Wasservolumen [cm^3]

m_f Feinstoffmenge [g]

S_{mf} spezifische Oberfläche [cm^2/g]

ρ_f Feinstoffdichte [g/cm^3]

ε_f Hohlraumgehalt der Feinstoffschüttung [Vol.-%]

Diese Möglichkeit zur Charakterisierung des Partikelabstands wurde von Reschke [Res2001] aufgegriffen. Er leitete aus seinen Untersuchungen ab, dass bis zu einem Grenzwert von rd. 5.000 cm^2/g (spez. Oberfläche) die Gefügedichte bei konstantem Wassergehalt mit zunehmender Feinheit der Feinstoffe zunimmt. Bei einer Feinheit über den genannten Grenzwert hinaus, wurde die Zunahme der Gefügedichte wieder geringer. Die Abhängigkeit ist in Abbildung 14 dargestellt.

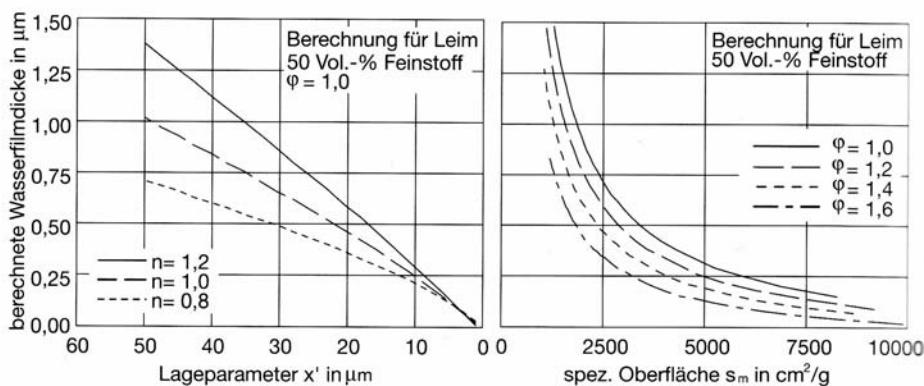


Abbildung 14: Berechnete Wasserfilmdicke in Abhängigkeit von der Feinheit (Lageparameter d') und der Verteilungsbreite (Anstieg n) nach RRSB, Feststoffanteil 50 Vol.-% [Res2001].

Untersuchungen an Selbstverdichtenden Betonen mit Portlandzement und praktisch zementfeinen Gesteinsmehlen in [Bu2005] zeigten, dass die Wasserfilmdicke umso weniger beeinflusst wird, je größer die spez. Oberfläche des Feinkorns ist.

5. Zielsetzung und Vorüberlegungen

5.1. Zielsetzung

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen, dass es eine Vielzahl an Untersuchungen zum Einsatz von reaktiven Betonzusatzstoffen des Typs II gibt. Insbesondere mit Steinkohleflugaschen wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Aufgrund dieser Untersuchungen ist es in Deutschland möglich Zusatzstoffe des Typs II zementäquivalent mit dem k-Wert-Ansatz anzurechnen. Die Anrechnung von Betonzusatzstoffen des Typs I ist in Deutschland trotz der positiven Erfahrungen z.B. in Frankreich nicht möglich. Vergleichbare und umfassende Untersuchungen zur zementäquivalenten Anrechenbarkeit von inerten oder äußerst träge reagierende Betonzusatzstoffen des Typs I fehlen bislang. Des Weiteren zeigte sich, dass nicht nur die Packungsdichte ein Indiz für die Gefügedichtigkeit sein kann, sondern auch Faktoren wie die Reaktivität des Feinstoffs, die spezifische Oberfläche und auch der Wassergehalt eine wesentliche Rolle spielen.

Ziel dieser Arbeit ist es, neueste, aus dem Bereich der Ultra-Hochfesten Betone gewonnene Erkenntnisse zur Optimierung der Packungsdichte auf Normal- und Hochfeste Betone zu übertragen und das sogenannte „Walzgesetz“ so zu ergänzen, dass der Einfluss der Packungsdichte und des Wassergehaltes mit berücksichtigt werden kann.

In den eigenen Untersuchungen wurde der Einfluss von inerten Feinstoffen unterschiedlicher Feinheit auf die Eigenschaften von frischen und erhärteten Zementleimen untersucht. Dabei wurde der Zement, ein möglichst grob gemahlener CEM I 32,5 R, volumengleich durch einen hochfeinen Füllstoff oder einen Feinstoff mit gleicher Feinheit ersetzt. Dies diente im direkten Vergleich zur Erfassung des physikalischen Füllereffekts durch den hochfeinen Füllstoff. Gleichzeitig erlaubten es die Versuche die „Verdünnung“ des Hydratationspotentials durch die Verringerung des hydraulisch aktiven Bindemittelanteils zu erfassen. Als Modellstoffe wurden vorrangig Quarzmehle unterschiedlicher Feinheit und in erweiterten Untersuchungen Kalksteinmehle und Feinstzemente verwendet. Aufgabe des Füllstoffes war es die Packungsdichte, durch gezielte Füllung der Hohlräume zwischen den Zementpartikeln, zu erhöhen. Damit sollte Wasser aus den Zwischenräumen zwischen den Zementpartikeln heraus gedrängt werden, welches wiederum zur Bildung eines Gleitfilmes zur Verfügung stehen kann. Zusammen mit der deutlich erhöhten spezifischen Oberfläche der Feinkornanteile $\leq 0,125$ mm soll dadurch die Konsistenz des Mörtels/Betons weicher und die Viskosität sowie das Wasserrückhaltevermögen erhöht werden.

Anhand der Untersuchungsergebnisse wurde mit Hilfe nichtlinearer Regressionsanalysen ein Modell zur Bewertung der Wirksamkeit der Feinstoffe in Abhängigkeit von ihrer Granulometrie, der Austauschmenge und der Wasserfilmdicke aufgestellt. Anschließend wurden mit dem Prinzip der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit zementäquivalente Wirksamkeitsfaktoren (k-Werte) für inerte Stoffe bestimmter Feinheit berechnet.

Zur Absicherung der Ergebnisse und des Modells wurden Betone nach DIN EN 206 konzipiert, wobei der Zement durch ein hochfeines Quarzmehl ausgetauscht wurde.

5.2. Ansätze zur Erzeugung hoher Packungs- und Gefügedichten

Die Fuller-Parabel wird oft als zweidimensionaler Ansatz zur Erzeugung hoher Packungsdichten verwendet. Betrachtet man den Hohlraum zwischen drei gleich großen Kreisen, so kann dieser mit einem kleineren Kreis gefüllt werden, der um den Faktor 6,5 kleiner ist [Fu1907]. Diese Kreisöffnung entspricht dem Ideal der Öffnung zum Hohlraum zwischen vier gleich großen, tetragonal zueinander gelagerten Partikeln. Dementsprechend eignen sich Partikel mit einem mittleren Radius, der mindestens um das 6,5 fache kleiner ist als der mittlere Radius der nächst größeren Korngruppe zum Füllen der Hohlräume. Eigene Untersuchungen ergaben, dass der Durchmesser des Hohlraums selbst, aufgrund des dreidimensionalen Ansatzes, deutlich größer als die Hohlraumöffnung ist. Der Durchmesser des nächst kleineren Korns, das in den sich ergebenden Hohlraum passt, ist bei Betrachtung von ideal runden, monodispersen und dichtest gelagerten Kugeln, um den Faktor 4,3 kleiner als die nächst größere Kugel. Entscheidend für die Füllung der Hohlräume ist jedoch die Öffnungsweite.

Die Kornform von Zementpartikeln weicht erheblich von der Kugelform ab. Daher sollten zur Füllung der Hohlräume solche Füllstoffe verwendet werden, deren mittlerer Durchmesser möglichst weit unter dem Öffnungsradius der Hohlräume liegt. Nur dann können diese ausreichend gefüllt und eine möglichst hohe Packungsdichte erzeugt werden. Stoffe mit einem mittleren Durchmesser, der mindestens um den Faktor 6,5 kleiner ist als die zu füllende Kornfraktion, werden in dieser Arbeit als packungswirksam bezeichnet. Es wird davon ausgegangen, dass sie in der Lage sind den Hohlraum durch Füllung zu verringern und damit die Packungsdichte effektiv zu erhöhen.

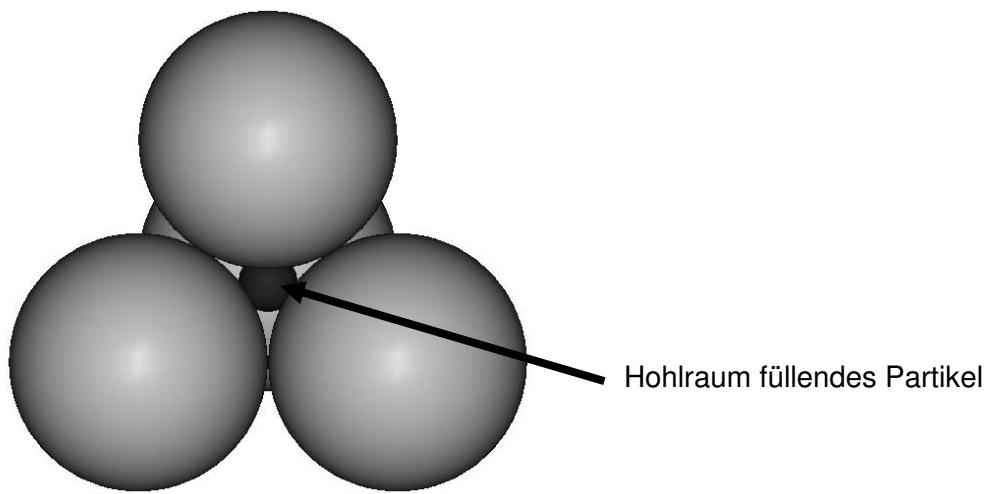


Abbildung 15: Darstellung der Hohlräumfüllung im Tetraeder.

Die gezielte Füllung der Hohlräume im Feinkornbereich kann entsprechend den obigen Ausführungen nur durch hochfeine Füllstoffe erfolgen. Dadurch erhöht sich zwar zum einen die Packungsdichte, zum anderen nimmt auch die spezifische Oberfläche um ein Vielfaches

zu. Diese Erhöhung in Zusammenhang mit der Packungsdichte und dem Wassergehalt des Feinstofffleimes beeinflusst die Wasserfilmdicke signifikant.

Die Wasserfilmdicke kennzeichnet zum einen den Abstand der Partikel im Leim zu einander, zum anderen hat die Wasserfilmdicke einen entscheidenden Einfluss auf die Konsistenz und damit auch auf die Viskosität. Je geringer die Wasserfilmdicke wird, desto größer können interpartikuläre Kräfte und deren Einfluss auf die Viskosität werden. Dabei gilt nach [Fr2002]: Je steifer wiederum die Konsistenz eines Leims ist, desto größer ist der durch den Mischprozess eingetragene Lufteinschluss. Dadurch entstehen Unterbrechungen innerhalb der wässrigen Phase, in deren Bereichen Haftkräfte (interpartikuläre Kräfte) zwischen einzelnen Partikeln oder Partikelagglomeraten wirksam werden können und die Viskosität weiter erhöhen.

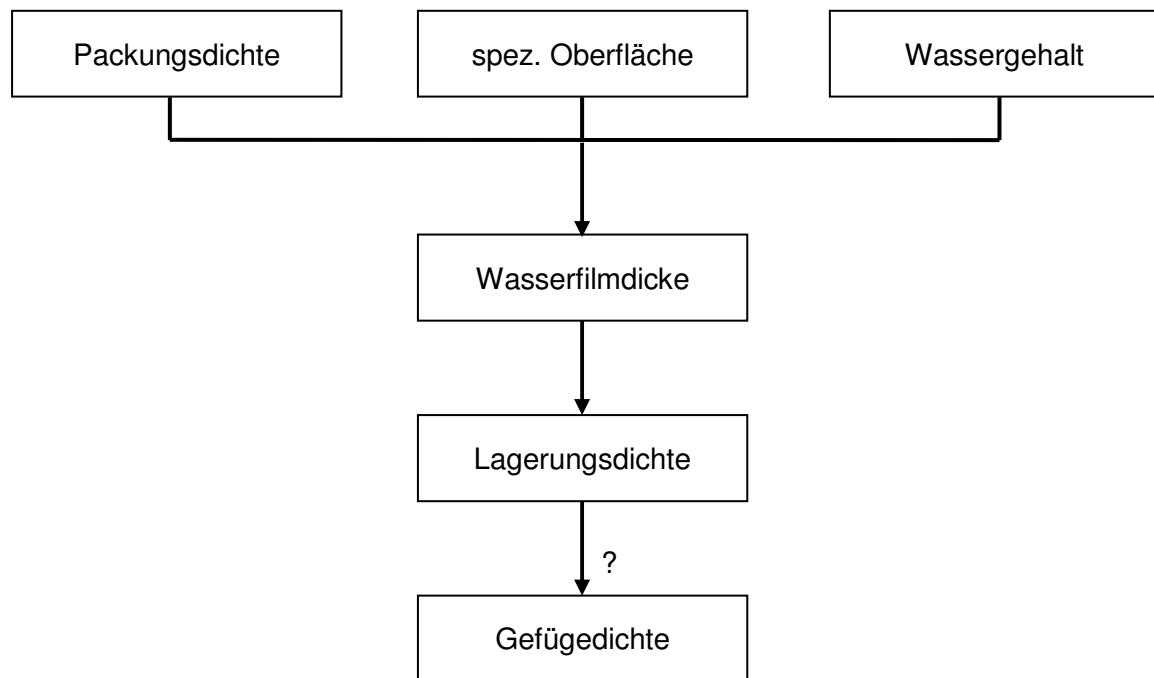


Abbildung 16: Einflüsse auf die Gefügedichte.

Bislang ungeklärt ist die Frage wie der Wassergehalt bei der Optimierung der Packungsdichte von Feinstoffgemischen berücksichtigt werden muss und wie sich eine Überfüllung des Feinstoffgemisches durch hochfeine Stoffe auf die Gefügedichte und damit auf die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit des Zementsteins auswirkt, siehe Abbildung 17 und Abbildung 18.

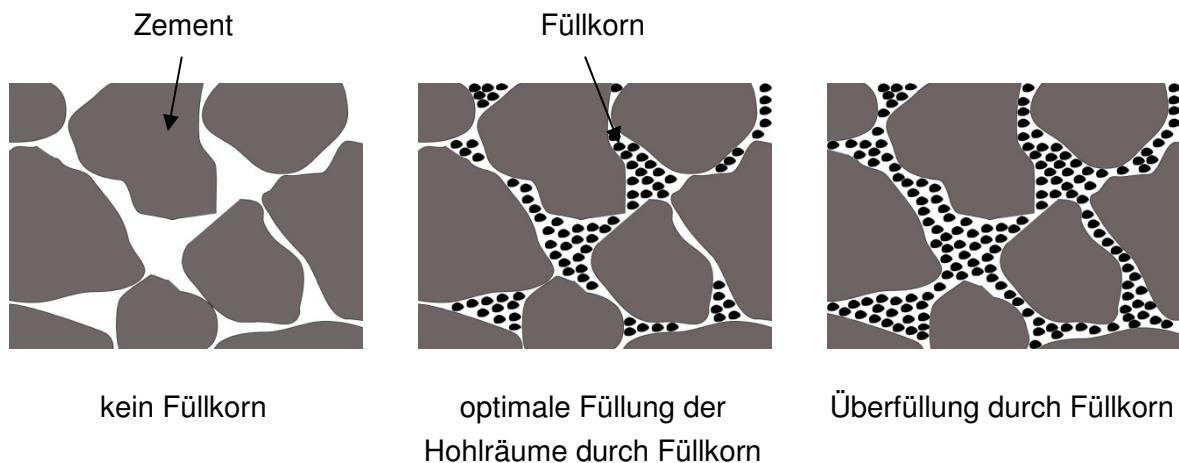


Abbildung 17: Einfluss eines erhöhten und überhöhten Anteils an Füllkorn.

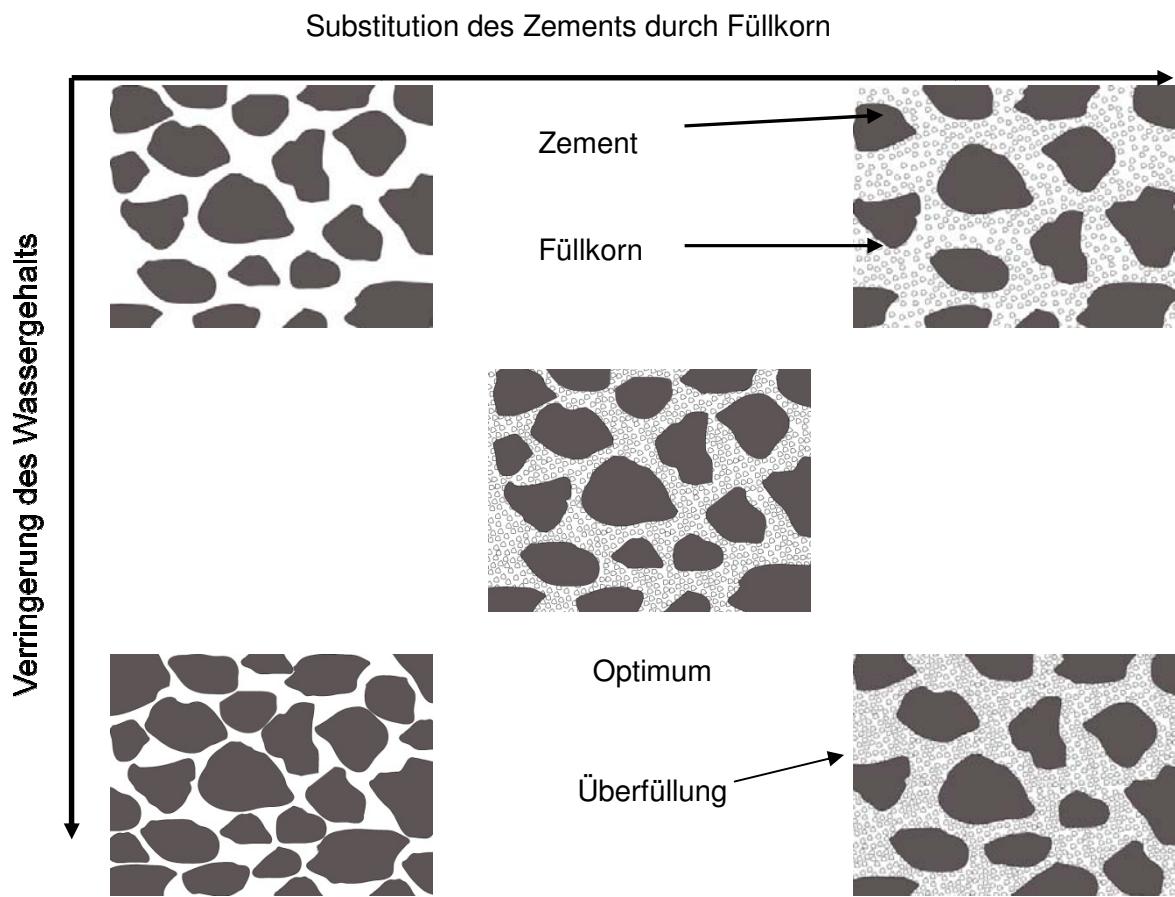


Abbildung 18: Einfluss des Wassergehaltes und der Füllkornmenge auf die Gefügedichte.

Bei der Substitution eines Zements durch einen hohlraumfüllenden Stoff erhöhen sich anfangs die Packungsdichte und insgesamt die spezifische Oberfläche. Im Bereich der erhöhten Packungsdichte wurde in verschiedenen Untersuchungen bereits festgestellt, dass

der Wasseranspruch gleich bleibt oder sinkt. Wird bei einem weiteren Austausch des Zements durch den „Füllstoff“ der Bereich der wirksam erhöhten Packungsdichte verlassen, steigt der Hohlraumgehalt wieder an und der Wasseranspruch des Gemisches nimmt proportional zur spezifischen Oberfläche zu.

5.3. Untersuchungsprogramm

Wie bereits beschrieben, war das Ziel dieser Arbeit, den Einfluss von inerten Feinstoffen unter Beachtung des Wassergehaltes auf die Eigenschaften des frischen und erhärteten Zementsteins zu erfassen.

Zur Abgrenzung des Einflusses des Wassergehalts wurden die Untersuchungen in zwei Fälle unterteilt, Fall A und Fall B. In Fall A wurde der Zement durch den jeweiligen Feinstoff ersetzt ohne den Wassergehalt zu verändern. Der w/z-Wert erhöhte sich somit mit abnehmendem Zementgehalt, wobei der w/F_v-Wert konstant blieb. In Fall B wurde der Wassergehalt proportional zur Zementmenge reduziert, wodurch der w/z-Wert konstant blieb und der w/F_v-Wert abnahm. Der Ausgangswasserzementwert, im Folgenden im Text als w/z₀ und in den Diagrammen als w/z₀ bezeichnet, wurde von 0,25 bis 0,50 gewählt und ab 0,35 in Schritten zu 0,05 variiert. Unterhalb des w/z-Werts von 0,25 war das rheologische Verhalten zunehmend dilatant. Die Verarbeitbarkeit war deutlich erschwert und der Frischleim kaum noch verdichtbar. Oberhalb des w/z-Werts von 0,50 kam es bereits während des Mischprozesses zu starken Sedimentationen. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse wäre in diesem Fall nicht mehr gegeben. Das Ziel dieser Vorgehensweise war es, den Wassergehalt unter ansonsten gleichen Bedingungen zu variieren und somit unterschiedliche Wasserfilmdicken bei unveränderten Randbedingungen zu erhalten. Es wurden bis zu 40 Vol.-% Zement ausgetauscht.

Um die Wirksamkeit der Packungsdichte bei möglichst geringen Wassermengen zu untersuchen wurden Prüfkörper für die Untersuchungen am erhärteten Zementstein hergestellt, bei denen der Wassergehalt dem nach Punkt ermittelten Hohlraumvolumen entsprach. Da davon ausgegangen wird, dass jedes Partikel bei Kontakt mit Wasser versucht einen Wasserfilm aufzubauen, entsprach diese Wassermenge somit versuchsbedingt der für die Bildung einer minimalen Wasserfilmdicke notwendigen Wassermenge. Der resultierende w/z-Wert des Ausgangsgemisches, bestehend aus Zement und Wasser, betrug 0,21 und erhöhte sich dann auf bis zu 0,70, wenn bis zu 70 Vol.-% des Zements durch den Zusatzstoff ausgetauscht wurde (siehe auch Abschnitt 7.3).

Ergänzend zu den inerten Feinstoffen und dem Zement CEM I 32,5 R wurden Füllstoffe mit hydraulischen Eigenschaften, die in ihrer Sieblinie dem inerten Füllstoff möglichst ähnlich waren, und ein werksgleicher Portlandzement CEM I 42,5 R mit erhöhter Mahlfeinheit aus dem gleichen Klinker in bestimmte Abschnitte der Versuchsreihen mit „üblichen w/z-Werten“ eingegliedert. Hierdurch sollte mit Hilfe des feineren Zements bei unveränderten Füllstoffen

(Quarzmehl) der Effekt einer reduzierten Packungsdichte erfasst werden. Die hydraulischen Füllstoffe dienten dazu den physikalischen Füllereffekt deutlicher abzugrenzen. Wie bei den Versuchen mit dem CEM3, wurden auch hier bis zu 40 Vol.-% des Zements durch die Zusatzstoffe ausgetauscht.

An frischen Leimen wurden die Auswirkungen der Füll- und Feinstoffe und des Wassergehaltes auf das rheologische Verhalten anhand der Messung der Viskosität und der Fließgrenze untersucht. Der Einfluss auf die Gefügedichte des erhärteten Zementsteins wurde mit Hilfe der Bestimmung der Druckfestigkeit und der Dichtigkeit gegenüber dem Eindringen von Wasser und Chloridionen erfasst. Die Untersuchungen wurden im Wesentlichen an Zementsteinen mit einer maximalen Korngröße von 0,125 mm durchgeführt. An jedem frischen Prüfkörper wurde die Rohdichte bestimmt und mit der rechnerisch zu erreichenden verglichen. Prüfkörper, deren Rohdichte signifikant von der rechnerischen Rohdichte abgewichen ist, wurden nicht für die Untersuchungen verwendet.

Ausblickend für den baupraktischen Einsatz gaben Untersuchungen an Betonen Aufschluss über die Wirksamkeit des entwickelten Modells.

5.3.1. Übersicht über die durchgeführten Versuche

Ausgehend von dem durch die Referenzmischungen vorgegebenen, konstanten Leimvolumen wurde der Zement in Schritten zu 10 Vol.-% durch die Zusatzstoffe ausgetauscht. Zusätzlich wurde der Wassergehalt einmal konstant gehalten (Fall A) und einmal mit dem Zementvolumen reduziert (Fall B). Daraus ergaben sich 4 unterschiedliche Betrachtungsfälle für insgesamt 5 verschiedene Referenz-Wasserzementwerte, siehe Tabelle 3 und Tabelle 4.

Tabelle 3: Kurzbeschreibung der Fälle.

Fall	Beschreibung	w/z-Wert	w/F _V -Wert
A	Austausch des Zements durch Feinstoff bei unverändertem Wassergehalt	zunehmend	konstant
B	Austausch des Zements durch Feinstoff mit gleichzeitiger Reduktion des Wassergehaltes	konstant	abnehmend

Der ursprüngliche w/z-Wert des Ausgangsgemisches aus Wasser und Zement ist in der Legende des Diagrammes enthalten und wird als Ausgangs-Wasserzementwert w/z₀

bezeichnet. Je nach Fall nimmt der w/z-Wert mit zunehmender Austauschmenge ab oder bleibt konstant. Die genauen Mischungsverhältnisse der Feinstoffleime für die Untersuchungen an erhärteten Zementsteinen sind im Abschnitt 7.3 ab Seite 88 angegeben.

In den folgenden Darstellungen zu den Untersuchungen des erhärteten Zementsteins werden jeweils nur die w/z-Werte 0,25, 0,35 und 0,50 stellvertretend betrachtet. Alle anderen Ergebnisse sind im Anhang aufgeführt.

Tabelle 4: Beispielhafte Darstellung der Entwicklung der tatsächlichen w/z_i -Werte und w/F_{vi} -Werte bei 20 Vol.-% Zementtausch.

Fall	Kommentar	rechn. w/z-Wert				
Referenz	w/z_o	0,25	0,35	0,40	0,45	0,50
	$w/F_{v,o}$	0,78	1,09	1,24	1,39	1,55
A	w/z_i	0,31	0,44	0,50	0,56	0,63
	$w/F_{v,i}$	0,78	1,09	1,24	1,39	1,55
B	w/z_i	0,25	0,35	0,40	0,45	0,50
	$w/F_{v,i}$	0,62	0,87	0,99	1,12	1,24

Die Untersuchungen an den frischen Zementleimen sind Tabelle 5 zusammengestellt und in den jeweiligen, noch folgenden Abschnitten näher erläutert.

Tabelle 5: Übersicht über die durchgeführten Versuche an Zementleimen.

Art der Prüfung	Variation	Prüfgerät/Prüfung
Viskosität	Feinstoffart Feinstoffgehalt	Rheometer
Wasserabsonderung	Feinstoffart Feinstoffgehalt	Messzylinder nach Lieber [Lie1968]
Hohlraumgehalt	Feinstoffart Feinstoffgehalt	nach Puntke [Pun2002]

Eine Übersicht über die Untersuchungen an den erhärteten Zementsteinprüfkörpern enthält Tabelle 6. Die Lagerung orientierte sich an der DIN EN 196, erfolgte jedoch so lange wie möglich unter Wasser, um Rissen durch Trocknungsschwinden möglichst entgegen zu wirken.

Tabelle 6: Übersicht über die durchgeführten Versuche an erhärteten Zementsteinprüfkörpern.

Art der Prüfung	Prüfkörper	Lagerung	Prüfalter
Druckfestigkeit (und Proben für Porositätmessung)	Prismen 40x40x160 mm	bis 21. Tag unter Wasser bis 28. Tag Normklima	28d
Cl ⁻ -Diffusion	Zylinder D/H = 10/4,5 cm	bis 28. Tag unter Wasser	28d
Wasserdampf-diffusion	Scheiben D/H = 15,5/1 cm	bis 21. Tag unter Wasser bis 28. Tag Normklima	28d
kapillare Wasseraufnahme	Prismen 40x40x160 mm	bis 21. Tag unter Wasser bis 28. Tag Normklima	28d

5.3.2. Herstellung

Die Zement-Feinstoff-Leime wurden in enger Anlehnung an DIN EN 196 hergestellt und verdichtet. Im Unterschied zur DIN EN 196 wurde kein Sand zum Gemisch hinzugegeben und der Zement je nach Versuchsreihe durch Feinstoffe ausgetauscht. Gemischt wurde mit einem 1 Liter-Normmörtelmischer mit Planetenbewegung für 60 sec bei langsamer und 30 sec bei schneller Geschwindigkeit. Danach wurde der Mischer für 180 sec angehalten und der an der Wand und dem Boden des Topfes klebende Leim entfernt. Im Anschluss wurde der Leim für weitere 60 sec bei hoher Geschwindigkeit gemischt.

Um den Einfluss des Mixers möglichst klein zu halten, wurde für die Untersuchungen immer 1 dm³ Frischleim hergestellt. Die Lufttemperatur des Labors betrug 20 °C.

Über die Bestimmung des Ausbreitmaßes (beschrieben in Abschnitt 5.4.4.1) wurde der Bedarf an Fließmittel bestimmt. Alle Leime wurden auf ein Ausbreitmaß von 24 cm eingestellt. Der Wasseranteil des Fließmittels wurde auf den Wasseranteil der Mischung angerechnet. Die Mischungsrezepturen sind im Anhang B zusammengestellt.

Die Leime wurden unmittelbar nach dem Mischende auf einem, der DIN EN 196-1 entsprechenden, Rütteltisch 120 sec lang bei einer Frequenz von 60 Hz verdichtet.

5.4. Prüfmethoden

5.4.1. Charakterisierung der Ausgangsstoffe

5.4.1.1. Chemische Untersuchungen

Die chemische Analyse der Zemente und Zusatzstoffe erfolgte nach der zum Zeitpunkt der Versuche gültigen Norm DIN EN 196-2. Der Anteil der Klinkerphasen wurde nach Bogue berechnet. Die Angaben der Hersteller über die chemische Zusammensetzung der Zemente und Zusatzstoffe sind dem Anhang A und den entsprechenden Kapiteln zu entnehmen.

5.4.1.2. Lasergranulometrische Untersuchungen

Zur Messung der Korngrößenverteilung der Feinstoffe wurde ein Laserbeugungsanalysator (Lasergranulometer) der Firma Beckman-Coulter vom Typ LS230 verwandt. Der Messbereich dieses Gerätes liegt zwischen 0,04 bis 2000 µm.

Das von einer Laserdiode ausgestrahlte Licht wird über ein optisches System gebündelt. Die in der Probe enthaltenen Partikel werden bestrahlt und das Licht erfährt eine Beugung. Die Größe der Teilchen hat dabei einen direkten Einfluss auf den Beugungswinkel. Dadurch entstehende Beugungsbilder werden von Detektoren gemessen. Mit Hilfe verschiedener Berechnungsgleichungen werden daraus die Partikelgrößen in 116 Größenklassen analysiert. Für kugelige Partikel wird beispielsweise das Fraunhofersche Beugungsintegral verwandt.

Die Messung sehr feinen Materials, dessen Korngröße im Bereich von 0,04 bis 0,4 µm liegt, setzt ein anderes Messverfahren voraus, da die Beugungswinkel feiner Teilchen sehr groß sind. Hierzu wird die PIDS-Technologie (Polarization Intensity Differential Scattering) genutzt. [Bek2002,Do1998]

Die Ergebnisse der Messungen für die einzelnen Feinstoffe (Zemente und Zusatzstoffe) sind in Abschnitt 5.4.1.2 zusammengefasst.

5.4.1.3. Spezifische Oberfläche nach Blaine

Die spezifische Oberfläche nach Blaine dient der Bestimmung der Mahlfeinheit eines pulverförmigen Stoffes. Die Messung nach Blaine erfolgte nach DIN EN 196-6. Die spezifische Oberfläche wird über die Zeit, die eine definierte Luftmenge zur Durchströmung eines definierten Stoffbettes benötigt, in cm²/g berechnet. Dieser Wert beinhaltet die tatsächliche Oberflächenstruktur der Partikel. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abschnitt 5.4.1.2 zusammengefasst.

5.4.1.4. Spezifische Oberfläche nach BET

Die BET-Methode (Brunauer-Emmett-Teller-Methode) dient der Bestimmung der Oberfläche und gegebenenfalls auch der Poren-Größenverteilung von festen pulverförmigen Körpern [Fal1995]. Dabei wird davon ausgegangen, dass Gase oder Dämpfe auf festen Körpern unter Freisetzung einer messbaren Adsorptionswärme adsorbiert werden. Mit dem verwendeten Gerät SA3100 der Firma Beckman Coulter wird Stickstoffgas bei einer Temperatur von $T = 77,15\text{ K}$ von dem zu untersuchenden Pulver adsorbiert. Die Anlagerung der Stickstoffmoleküle erfolgt dabei in mehreren Schichten, in deren Verlauf die Adsorptionswärme und daraus die Oberfläche berechnet werden kann. Die Messung erfolgte nach DIN 66131.

Um die mit der BET-Methode gemessenen Oberflächen der hochfeinen Stoffe mit denen der anderen Stoffe zu ermöglichen, wurden die Blaine-Oberflächen $s_{m,\text{Blaine}}$ aus den gemessenen BET-Oberflächen $s_{m,\text{BET}}$ mit der nachfolgenden Formel nach [Sch1995] näherungsweise berechnet.

$$S_{m,\text{Blaine}} = \sqrt{\frac{s_{m,\text{BET}} - 3.500}{3,89 \cdot 10^{-4}}}$$

Gleichung 16

5.4.2. Hohlraumgehalt

Der Hohlraumgehalt von pulverförmigen Stoffen wurde experimentell nach dem so genannten Punkt-Verfahren [Pun2002] bestimmt. Der dabei bestimmte Wasseranspruch des pulverförmigen Gemisches kennzeichnet den Wasserbedarf zur Sättigung der Hohlräume feiner, kohäsionsarmer Körnungen.

Die folgende Versuchsbeschreibung entspricht den Empfehlungen des Autors von [Pun2002]. Für die Untersuchungen wurden die Zemente und eine repräsentative Probe des jeweiligen Feinstoffes bei $105 \pm 5\text{ °C}$ bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend auf Raumtemperatur abgekühlt. Danach wurden insgesamt 200 g des Probematerials in einen Metallbecher gefüllt und tröpfchenweise Wasser zugegeben. Durch Verrühren mit einem Spatel und nach regelmäßiger Aufstoßen des Bechers aus etwa 5 cm Höhe füllen sich die Hohlräume des Gemisches zunehmend mit Wasser, bis die Oberfläche mattfeucht glänzt. Anschließend wurden die zugegebene Wassermenge respektive der gefüllte Hohlraum durch Rückwägung mit einer Genauigkeit von 0,01 g bestimmt. Der Einfluss der versuchsdurchführenden Person ist im Vergleich von Ergebnissen unterschiedlicher Personen erkennbar. Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen von Versuchen, die von derselben Person durchgeführt wurden, ist jedoch möglich.

Der wassergefüllte Porenanteil des luftfreien Gemischs, ausgedrückt als Wasseranspruch n_w , kann aus der folgenden Gleichung nach Puntke [Pun2002] berechnet werden.

$$n_w = \frac{m_w}{\frac{m_k}{\rho_k} + m_w}$$

Gleichung 17

n_w wassergefüllter Porenanteil [Volumenanteil von 1]

m_w Masse des Wasserbedarfs bei Sättigung in dichtester Lagerung [g]

m_k Masse des eingewogenen Kornfeststoffs [g]

ρ_k Kornrohdichte [g/cm³]

Zur Berechnung der Feststoffpackungsdichte kann der Anteil n_w von 1 subtrahiert werden. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 7.1.1 und Anhang B zusammengefasst.

5.4.3. Wasseranspruch und Wasserabsonderung

Der Wasseranspruch wurde in Anlehnung an das Verfahren zur Bestimmung der Normsteife nach DIN EN 196-3 mit dem Vicat-Gerät bestimmt. Das Gerät war für diese Versuche mit einem normkonformen Tauchstab bestückt. Abweichend von der Norm, wurde der Zement zu Teilen zwischen 0 und 70 Vol.-% durch den jeweiligen Zusatzstoff ausgetauscht. Das sich die Reindichte des Zements und der Zusatzstoffe unterscheiden erfolgt die Darstellung des Wasseranspruchs anstelle der üblichen Massenprozent (M.-%) vom Zementgehalt in Volumenprozent (Vol.-%) vom Zementgehalt. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 7.1.2 und im Anhang Teil B dargestellt.

Das Absetzmaß, auch als Wasserabsonderung bezeichnet, wurde nach dem Verfahren von Lieber [Lie1968] geprüft. Dazu wurden in ein 250 ml- Becherglas, in dem sich ein Magnetstäbchen befand, 98 g Wasser mit einer Temperatur von 20°C gegossen und bei mittlerer Rührgeschwindigkeit innerhalb von 20 Sekunden 115 g Zement portionsweise hinzugegeben. Die Mischung wurde 2 Minuten lang zu einer relativ dünnen Zementpaste vermischt (w/z-Wert = 0,85). Für eine deutliche Differenzierung der Ergebnisse ist für dieses Verfahren ein überhöhter w/z-Wert vorgegeben. Die w/z-Werte der übrigen Versuche lagen im Bereich 0,17 bis 0,50. Im Anschluss wurde der homogenisierte Feinstoffkleim mit Hilfe eines Glasstabes in einen 100 ml Messzylinders bis zur Marke 100 ml eingefüllt. Die abgesetzte Wassermenge wurde nach 5, 10, 15, 30, 60 und 120 Minuten nach Wasserzugabe gemessen. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 7.1.3 zusammengefasst und Anhang B dargestellt.

5.4.4. Rheologische Untersuchungen

5.4.4.1. Ausbreitmaß

Die Zement-Feinstoff-Leime wurden in Anlehnung an DIN EN 196 mit den dort vorgegebenen Mischzeiten und Geräten gemischt und verarbeitet (siehe auch Abschnitt 44). Das Ausbreitmaß der Leime wurde in Anlehnung an DIN 18555 mit dem Hägermann-Ausbreittisch ohne Hubschläge gemessen. Für jede Versuchsreihe wurde das Ausbreitmaß im Doppelversuch bestimmt, wobei die Mittelwerte jedes Versuches auf 0,1 cm gerundet wurden. Bei Differenzen über 1 cm zwischen den einzelnen Mischungen einer Versuchsreihe wurde ein dritter Versuch durchgeführt. Das Ausbreitmaß wurde bei allen Mischungen auf 24 cm eingestellt.

5.4.4.2. Rotationsrheometer

Die Zementleime wurden in einem Zylinderrotationsviskosimeter der Firma Bohlin, Typ CS-50 gemessen. Die Versuchsanordnung besteht aus zwei koaxial zueinander angeordneten Zylindern, von denen der innere in Rotationsbewegung versetzt wird und der äußere ruht. Die Prüfsuspension wird in den Meßspalt zwischen den Zylinderwandungen gegeben. Der innere Zylinder misst gleichzeitig mit Aufbringen der Umdrehungsgeschwindigkeit den Widerstand der gescherten Flüssigkeit als Drehmoment. Über die Gerätekonstanten können aus Umdrehungsgeschwindigkeit und Drehmoment die absoluten Größen Geschwindigkeitsgefälle D und Schubspannung τ ermittelt werden.

Die relative Viskosität η_{rel} sowie die relative Fließgrenze τ_{rel} können in Anlehnung an das Newton'sche Fließgesetz ermittelt werden, da die gemessenen Viskositäten und Fließgrenzen direkt proportional zum gemessenen Drehmoment sind.

5.4.5. Festigkeitsuntersuchungen

Für die Untersuchung der Druckfestigkeit der Zement-Feinstoff-Gemische wurden prismatische Prüfkörper 40x40x160 mm in Anlehnung an die DIN EN 196-1 hergestellt, 3 Wochen gelagert und geprüft. Die DIN EN 196-1 sieht die Herstellung von Mörtelprismen vor. Für die Prüfung der Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen wurden die Prüfkörper 1 Tag in der Schalung, danach bis zum 21. Tag unter Wasser und dann bis zum 28. Tag bei 20 °C und 65% rel. Luftfeuchte gelagert. Für die Prüfung der Druckfestigkeit an Betonen wurden zylindrische Prüfkörper D/L=150/300 mm hergestellt und unter gleichen Bedingungen gelagert. Die Prüfung erfolgte nach DIN EN 12504.

Die Ergebnisse sind in den Abschnitten 7.3.1 und 7.7.1 für die Zementsteindruckfestigkeiten und in Abschnitt 9.1 für die Betondruckfestigkeiten dargestellt und im Anhang C zusammengefasst.

5.4.6. Porengefüge

Die Porengrößenverteilung in der Zementsteinmatrix wurde mit einem Quecksilberhochdruckporosimeter Autopore II 9220 der Firma Micromeritics mit einem maximalen Druck von 2000 bar gemessen. Damit können Porenradien bis 3,8 nm erfasst werden. Mikroporen können mit dieser Apparatur dementsprechend nicht mehr gemessen werden. Die Darstellung der Porengrößenverteilung erfolgt in dieser Arbeit über die differentielle Verteilung sowie das intrudierte Quecksilervolumen in Abhängigkeit des Porenradius. Da die Bestimmung der Porengrößenverteilung mit Hilfe dieser Meßmethode aufgrund der sehr hohen Dichtigkeit der feinkornoptimierten Zementsteinproben mit minimalem Wassergehalt erschwert ist und somit die Streuung der Messergebnisse u.U. erhöht, wurde bei den Serien mit sehr geringem Wassergehalt bis zu 3 Messungen durchgeführt.

Die Proben, mit einem Durchmesser von rd. 3 mm, wurden aus 28 Tage alten 40x40x160 mm Prismen entnommen, die zunächst 21 Tage unter Wasser und dann bis zur Prüfung im Laborklima bei 20°C und 65% rel. LF gelagert wurden. Anschließend wurden sie bis zur Massekonstanz, jedoch maximal 72 Stunden, bei 12% rel. LF im Exsikkator bei 45°C getrocknet.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass geschlossene Poren und sehr feine Poren mit einem Durchmesser kleiner als 3,5 nm bei der Messung nicht erfasst werden können.

5.4.7. Hydratationsgrad

Der Hydratationsgrad der Zemente $\alpha_{z,28}$ wurde an 28 Tage alten Proben aus dem Verhältnis der Menge des bis zum 28. Tag chemisch bindbaren Wassers $m_{w,28}$ und der maximal bindbaren Wassermenge bei vollständiger Hydratation $m_{w,\infty}$ nach [Sta1998] berechnet.

$$\alpha_{z,28} = \frac{m_{w,28}}{m_{w,\infty}} \times 100\%$$

Gleichung 18

Die Menge des nach 28 Tagen chemisch gebundenen Wassers $m_{w,28}$ wurde aus dem Glühverlust bei 1050°C im Muffelofen ermittelt. Die bei der Hydratation vollständig bindbare Wassermenge $m_{w,\infty}$ wurde aus der Wasserbindung der einzelnen Klinkerphasen entsprechend ihrer Stöchiometrie berechnet. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 7.4 und im Anhang C dargestellt.

5.4.8. Diffusion

5.4.8.1. Wasserdampfdiffusion

Die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit erfolgte nach EN ISO 12572:2001. Für diese Versuche wurde ein mit rd. 100 ml Wasser gefüllter zylindrischer Behälter oberseitig mit der zu prüfenden Probe versiegelt und für rd. 30 Tage im Normklima gelagert. Zur Auswertung des Widerstands gegenüber der Wasserdampfdiffusion wurde der Wasserdampfleitkoeffizient nach DIN ISO 12572 berechnet. Eine einfache Auswertung des Durchlasswiderstandes war für diese Arbeit unzureichend, da dabei die Dicke der Prüfkörper unberücksichtigt bleibt.

$$D_{Leit} = \frac{G \cdot d}{A \cdot \Delta p_v}$$

Gleichung 19

D_{Leit} Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in [kg/(m*s*Pa)]

G Quotient aus linearem Masseverlust über die Zeit in [kg/s]

d Dicke der Prüfkörper [m]

A Prüffläche [m^2]

Δp_v Mittelwert der gemessenen Temperatur und Luftfeuchtigkeit über den Prüfzeitraum,
 $p_{sat} = 116847$ [Pa]

Auf eine Korrektur der Wirkung von verdeckten Kanten wurde aufgrund des sehr geringen Koeffizienten mit rd. 0,03 aus Probendicke und hydraulischem Durchmesser verzichtet. Der Korrekturfaktor würde hier 1,02 betragen.

Die Norm sieht vor, dass der Durchmesser von kreisförmigen Probekörpern oder die Kante eines quadratischen Probekörpers mindestens das Doppelte der Probendicke betragen muss. Bei inhomogenen Stoffen wie etwa Beton soll die Prüfkörperdicke mindestens das Dreifache des Größtkorns betragen. Als kleinste Prüffläche sind $0,005\ m^2$ vorgeschrieben.

Für die in dieser Arbeit beschriebenen Versuche wurde eine eigene Messapparatur gebaut, siehe Anordnung in Abbildung 19. Die Prüfoberfläche betrug rd. $0,017\ m^2$ (Durchmesser der Prüfkörper rd. 155 mm) und die Prüfkörperdicke rd. 10 mm. Die Dicke jeder geprüften Scheibe wurde vor dem Versuch auf 1/10 mm genau gemessen und in der Berechnung des Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten berücksichtigt. Das Prügefäß mit dem Probekörper wurde bei $20^\circ C$ und 50% rel. Luftfeuchte bei gleichmäßiger Luftumwälzung gelagert. Durch die unterschiedlichen Wasserdampfdrücke zwischen Prügefäß und Umgebungsraum entsteht ein Dampfdiffusionsstrom durch den Prüfkörper. In regelmäßigen Abständen von ein

bis vier Tagen wurde die Gesamtanordnung gewogen, um die Wasserdampfdiffusionsstromdichte im stationären Zustand zu bestimmen.

Die Ergebnisse sind in Abschnitt 7.5.1 und im Anhang Teil C zusammengestellt.



Abbildung 19: Prüfkörper nach dem Einbau auf das Prüfgefäß (Abdichtung mit Silikon).

5.4.8.2. Chloridionendiffusion

Der Chloriddiffusionswiderstand der hergestellten Prüfkörper wurde mit einem Schnellmigrationstest nach Tang und Nillson [Tan1992] bestimmt. Für diese Versuche wurden Zylinder mit den Abmessungen $D/L = 100/100$ mm hergestellt. Im Alter von 2 Tagen wurden bei diesen Zylindern die oberen 55 mm entfernt. Die doppelte Höhe bei der Herstellung der Prüfkörper sollte sicherstellen, dass der zu prüfende Teil möglichst homogen verdichtet und zusammengesetzt ist. Im Alter von 28 Tagen wurden die zugeschnittenen, scheibenförmigen Probekörper mit den Abmessungen $D/H=100/45$ mm so in einen Silikonschlauch eingepasst, dass der Prüfkörper mit der Schlauchunterseite bündig abschloss. Die Unterseite wurde vor dem Versuch mit einer Stahlbürste aufgeraut, um oberflächliche Poren zu öffnen. Auf der Oberseite des Prüfkörpers war der Schlauch mindestens 10 cm höher, so dass sich dort ein Reservoir ausbilden konnte. Durch Silikon wurde der Spalt zwischen Probe und Schlauchwandung zusätzlich gegen eindringendes Wasser abgedichtet. Zwei Edelstahl-Doppelschellen dichteten die Probe zusätzlich über die Prüfkörperhöhe gegen den Transport von Lösungen über die Prüfkörperseiten ab. Vor dem Einbau der Prüfkörper in die Diffusionszellen, wurden die Oberflächen der Prüfkörper für ca. 15 min. in einem Ultraschallbad von Luftblasen befreit. Die Probeflächen müssen sauber und staubfrei sein. Vor jedem Versuch wurden die Versuchsapparate mit warmem Wasser ausgewaschen und nach Versuchsende warm ausgespült, um Salzrückstände zu entfernen. In das Oberflächenreservoir aus Schlauch und Probe wurde 0,2 N KOH-Lösung so eingefüllt, dass die oberste Kante des geneigten Prüfkörpers 2 cm überdeckt war. Der Gesamtaufbau

wurde dann auf einem Edelstahlgestell in einem Becken mit einer 5%igen NaCl-Lösung in 0,2 N KOH-Lösung in einem Winkel von 30° eingestellt, siehe Abbildung 20.

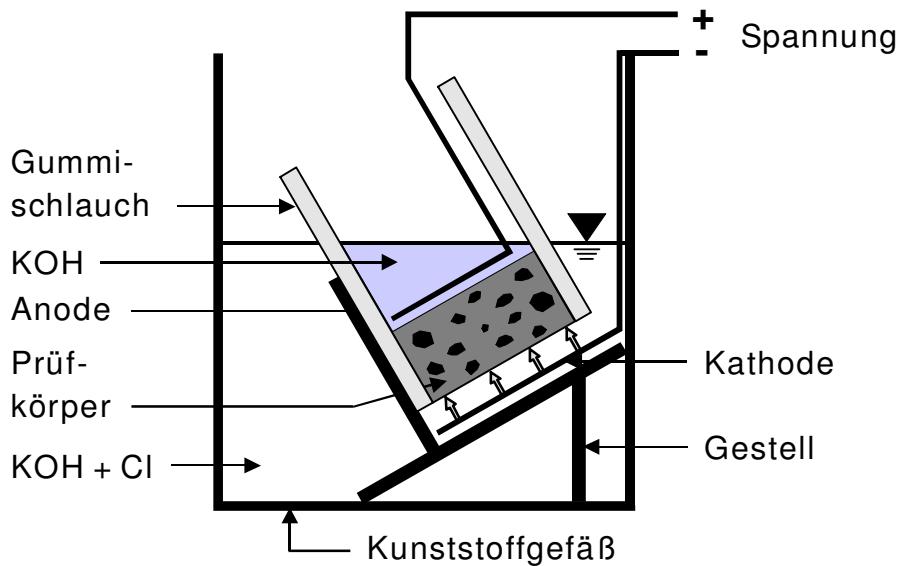


Abbildung 20: Prüfkörpераufbau – Chloriddiffusionsapparat nach [No1992].

Das Kaliumhydroxid verlangsamt einerseits die Korrosion der Elektroden und erhöht andererseits die Leitfähigkeit der Flüssigkeit als Elektrolyt. Durch Aufbringen einer Gleichspannung von 30 V über einen Zeitraum von 4 Stunden bei den reinen Zementsteinproben und 72 Stunden bei den Betonproben wurde die Diffusion der Chlorid-Ionen innerhalb des elektrischen Feldes ausgelöst und beschleunigt. Der sich dabei einstellende Stromfluss wurde computergestützt gemessen und aufgezeichnet.

Die Versuchsdauer ist von der Dichtigkeit der Prüfkörper abhängig und wurde mit Hilfe der Tabelle 7 nach [No1992] anhand der gemessenen Stromstärke ermittelt. Dies sollte garantieren, dass die Eindringtiefen $x_d < 45$ mm bleiben.

Tabelle 7: Laufzeitbestimmung der Versuche nach [No1992].

Laufzeit der RCM-Versuche in Abhängigkeit des Anfangsstromes und des Prüfkörperwiderstandes (ermittelt durch 2-Elektrodenmessung)				
Strom [mA]		Widerstand [Ω]		Laufzeit [h]
von ($>=$)	bis (<)	von(>)	bis ($<=$)	
0	5	6000	"unendlich"	168
5	10	3000	6000	96
10	30	1000	3000	48
30	60	500	1000	24
60	120	250	500	8
120	"unendlich"	0	250	4

Nach dem Versuchsende wurde die Probe gespalten und die Eindringtiefe mit einer Indikatorlösung (0,1 g Fluorescein je 100 ml Ethanollösung (70%ig)) bestimmt.

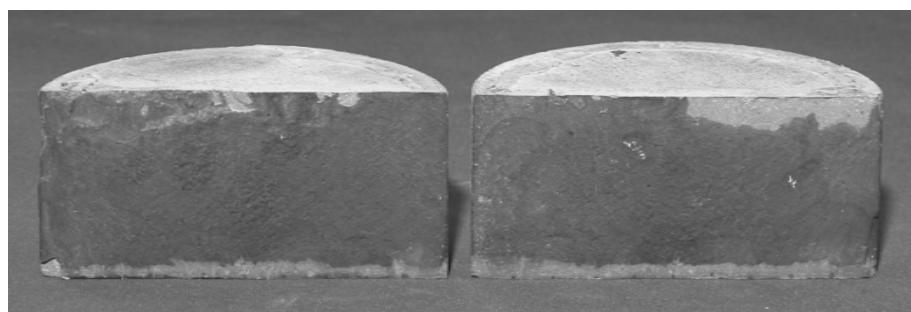


Abbildung 21: Gespaltene Prüfkörper, unterer heller Bereich kennzeichnet die Eindringtiefe der Chloridionen, Abmessung der Zylinder D/L = 100/45 mm.

Über die Eindringtiefe wurde dann der Diffusionskoeffizient D in $[m/s^2]$ nach [Tan1992] ermittelt.

$$D = \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{k \cdot t}$$

$$\alpha = \frac{2}{\sqrt{k}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \cdot \left(1 - \frac{2c_d}{c_1}\right)$$

$$k = \frac{z \cdot F \cdot E}{R \cdot T}$$

Gleichung 20 [Tan1992,Tan1995,Tan1996]

R Gaskonstante (J/molK)	x_d	Penetrationstiefe
T Temperatur der Lösung (K)	c_d	Chloridkonzentration bei x_d (N)
Z Ionenvalenz, für Chloridionen gilt z=1	c_1	Chloridkonzentration in der Aufströmzelle (N)
F Faraday'sche Konstante (J/molV)	t	Testzeit
E Elektrische Feld (V/m)	erf^{-1}	inverse Fehlerfunktion

5.4.9. Kapillare Wasseraufnahme

Die kapillare Wasseraufnahme entgegen der Schwerkraft nach DIN 52617 beschreibt das Einsaugen von Flüssigkeit in die Kapillarporen eines porösen Stoffes. Dabei wird das Material an der Prüfkörperunterseite von Wasser berührt und saugt entgegen der Schwerkraft durch Kapillarzugkräfte die Flüssigkeit in sich ein. Die flächenbezogene Wasseraufnahme ergibt sich aus den Grenzflächenkräften zwischen Wasser und dem Probenmaterial. Das Verfahren der freiwilligen Wasseraufnahme durch Saugen dient der Bestimmung des kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten. Das Prüfverfahren ermöglicht somit die Beurteilung von Baustoffen, hinsichtlich ihres Kapillarverhaltens gegenüber Wasser oder anderen Flüssigkeiten. Geprüft wurden prismatische Prüfkörper 40x40x160 mm. Diese wurden an den Seiten durch Heißwachs abgedichtet und mit den Stirnseiten 20 mm tief in 20 °C warmes Leitungswasser gestellt. Vor der Prüfung wurde die zu prüfende Oberfläche mit einer Drahtbürste aufgeraut. Zur Registrierung der Massezunahme in Abhängigkeit von der Zeit, wurden die Proben in bestimmten Zeitabständen gewogen. Die Wiegungen erfolgten in den folgenden Zeitabständen: 5, 10, 20, 30, 60 Minuten, 2, 3, 4, 5, 6 und 24 Stunden. Bei den einzelnen Wiegungen wurden die feuchten Prüfflächen vor dem Wiegen mit einem feuchten Schwammtuch abgetupft. Der Versuch wurde abgebrochen, wenn auf der, der Saugfläche gegenüberliegenden Probenoberfläche, Durchfeuchtungen sichtbar

wurden. Mit Hilfe der so bestimmten Versuchswerte konnte für jede untersuchte Mischung ein charakteristischer Wasseraufnahmekoeffizient bestimmt werden.



Abbildung 22: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wasseraufnahme durch kapillares Saugen.

5.4.10. Optische Gefügeuntersuchungen

Zur optischen Charakterisierung der Homogenität der Zementsteinproben wurde ein Auflicht-Stereomikroskop der Firma Zeiss Typ Stemi SV 11 verwendet, das bis zu 1.000fache Vergrößerungen ermöglicht. Geprüft wurden Probenanschliffe.

Untersuchungen zur Mikrostruktur der Zementsteine wie zur Kornform der Ausgangsstoffe wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) der Marke Philips, Typ XL30, durchgeführt. Bei diesem Rasterelektronenmikroskop wird ein Elektronenstrahl durch elektromagnetische Spulen fein gebündelt auf eine Oberfläche projiziert. Dadurch wird die Oberfläche zur Emission von Röntgenstrahlen, Rückstreu- sowie Sekundärelektronen angeregt. Mit verschiedenen Detektoren können diese erfasst und bildlich dargestellt werden. Um den Elektronenstrahl nicht abzulenken, erfolgt die Strukturuntersuchung im Hochvakuum. Zusätzlich müssen elektrisch nicht leitende Proben mit Kohlenstoff oder Gold bedampft werden, was zu einer Veränderung der Oberflächenstruktur führt. In dieser Arbeit wurden die Prüfkörper mit Gold besputtert (beschichtet).

6. Voruntersuchungen

6.1. Ausgangsstoffe

6.1.1. Chemische Zusammensetzung

Für die Untersuchungen wurden insgesamt 3 Zemente verwendet:

- CEM I 32,5 R und CEM I 42,5 R aus Werk A
- Portland-Feinstzement FC aus Werk B

Für die Hauptuntersuchungen und damit als wesentliche Basis aller Ergebnisse, dienten die der EN 197 entsprechenden Zemente CEM I 32,5 R und CEM I 42,5 R aus Werk A. Diese Zemente werden im Weiteren mit CEM3 und CEM4 bezeichnet. Die Eigenschaften und Zusammensetzung der Zemente sind in Tabelle 8 näher beschrieben.

Tabelle 8: Eigenschaften und Zusammensetzung der Zemente, Klinkerphasen nach Bogue.

Merkmal	Einheit	Cem I 32,5 R CEM3	CEM I 42,5 R CEM4	Feinstzement FC
spez. OF nach Blaine	cm ² /g	2.750	3.660	17.500
Wasseranspruch	M.-%	26,2	28,9	43,6
Erstarrungsbeginn	min	170	165	45
Druckfestigkeit, 2d	N/mm ²	22,2	34,0	24,0
Druckfestigkeit, 28d	N/mm ²	50,7	60,3	50,0
Reindichte	g/cm ³	3,1	3,1	3,1
C ₃ S	M.-%	55,5	56,8	54,0
C ₂ S	M.-%	17,8	16,3	22,0
C ₃ A	M.-%	10,4	10,3	2,0
C ₄ AF	M.-%	7,5	7,6	13,0
Na ₂ O-Äqu.	M.-%	0,7	0,7	0,5

Um den Einfluss unterschiedlicher Klinkerphasengehalte möglichst gering zu halten, basierten die Zemente CEM3 und CEM4 auf demselben Portlandzementklinker und unterschieden sich im Wesentlichen nur in ihrer Mahlfeinheit. Die nach Blaine bestimmte

spezifische Oberfläche der beiden Normalzemente betrug 2750 cm²/g bzw. 3660 cm²/g. Der Zement FC war ein hochfeiner Injektionszement, der in dieser Arbeit als hochreaktiver Füllstoff diente und hinsichtlich seiner Feinheit und Kornverteilung mit später noch beschriebenen hochfeinen Quarzmehl Q1 verglichen werden kann.

Für die Optimierung der Mischungszusammensetzungen wurden unterschiedliche Quarz- und Kalksteinmehle verwendet. Zum Austausch des Zements durch einen inerten Stoff nahezu gleicher Feinheit wurde das Quarzmehl Q2 verwendet. Es hatte mit rd. 3.300 cm²/g nahezu die gleiche spezifische Oberfläche wie der Zement CEM3 mit 2.750 cm²/g. Als hochfeine Füllstoffe kamen das Quarzmehl Q1 und in verschiedenen Versuchen das Kalksteinmehl K1 zum Einsatz. Diese beiden hochfeinen Gesteinsmehle hatten eine spez. Oberfläche von rd. 18.000 cm²/g. Alle Stoffe entsprachen DIN 4226-1. Die Zusammensetzung und die wesentlichen Eigenschaften der Zusatzstoffe sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Zusammensetzung und Eigenschaften der Zusatzstoffe.

Bezeichnung	Einheit	Quarzmehl Q1	Quarzmehl Q2	Kalksteinmehl K1
spez. Oberfläche	cm ² /g	18.000*	3.300	18.000*
Reindichte	g/cm ³	2,65	2,65	2,79
chem. Hauptkomponente	-	SiO ₂	SiO ₂	CaCO ₃
	M.-%	99,9	99,9	98,0
Reaktivität	M.-%	4,2	0,1	0,1
Wasseranspruch	M.-%	32,5	28,4	29,6

*) näherungsweise berechneter Wert aus BET-Messung, siehe Abschnitt 5.4.1.4

6.1.2. Granulometrie

Abbildung 23 zeigt die Korngrößenverteilung aller verwendeten Ausgangsstoffe, gemessen mit einem Laserbeugungsgranulometer.

Die durchschnittliche Korngröße des Zements CEM3 ist mit $d_{50} = 27 \mu\text{m}$ praktisch doppelt so groß wie die des Zements CEM4 mit $d_{50} = 14 \mu\text{m}$. Das im Bereich der Zementfeinheit liegende Quarzmehl Q2 liegt mit einem $d_{50} = 16 \mu\text{m}$ zwischen den beiden Portlandzementen und diente als zementgleicher, inerter Ersatzstoff. Mit einem mittleren Durchmesser d_{50} zwischen 2,1 und 3,3 μm waren die als Füllstoffe verwendeten Gesteinsmehle: das Quarzmehl Q1, das Kalksteinmehl KSM1 und der Feinstzement FC rd. 8 bis 13 mal so fein wie der Zement CEM3 bzw. 4 bis 7 mal so fein wie der Zement CEM4.

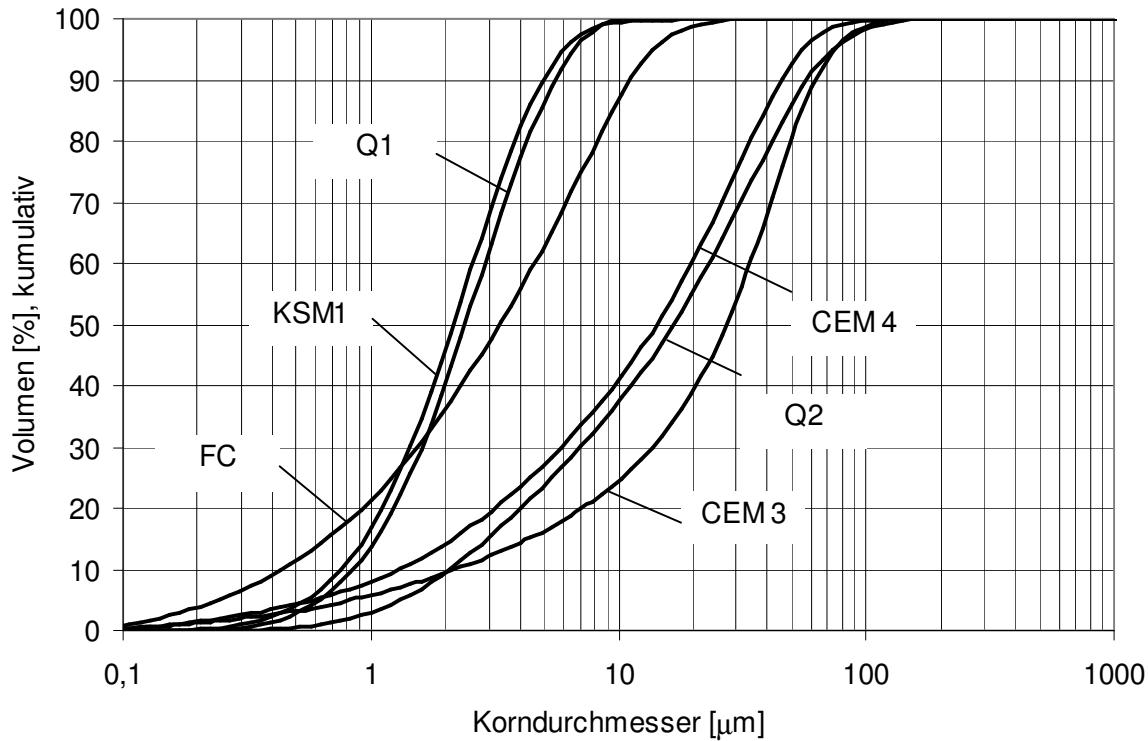


Abbildung 23: Korngrößenverteilung der verwendeten Ausgangsstoffe, Darstellung kumulativ.

Tabelle 10 fasst die statistisch relevanten Korndurchmesser für 10, 50 und 90 Vol.-% der kumulativen Sieblinien zusammen.

Tabelle 10: Kornklassen der kumulativen Sieblinien bei 10, 50 und 90 Vol.-%.

Kornklasse	CEM3	CEM4	FC	Q1	Q2	K1
d_{10}	2,2	1,3	0,4	0,9	2,1	0,8
d_{50}	27,0	14,0	3,3	2,4	16,0	2,2
d_{90}	63,0	45,8	11,3	5,6	57,0	5,1

6.1.3. Kornform

Die Kornform der Feinstoffpartikel kann mit Hilfe eines Formfaktors φ beschrieben werden, der nach DIN 66141 das Verhältnis der tatsächlichen Partikeloberfläche eines unregelmäßig geformten Teilchens zur Oberfläche einer volumengleichen Kugel wiedergibt. Die Oberfläche eines Stoffes wurde entsprechend der nachfolgenden Formel nach DIN 66141 unter der Annahme der idealen Kugelform aus den Daten der lasergranulometrischen Messungen mit

einem selbst geschriebenen Programm für 116 Kornklassen pro gemessenen Stoff berechnet.

$$S_v = 6 \cdot \varphi_K \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta Q_{3,i}}{x_i}$$

Gleichung 21

S_v	volumenbezogene Oberfläche [cm ²]
$\Delta Q_{3,i}$	Volumenanteil der Kornklasse i [-]
x_i	mittlerer arithmetischer Durchmesser der Kornklasse i [cm]

Unter Einbeziehung der Reindichte ρ des Partikelgemisches kann aus der volumenbezogenen Oberfläche S_v die massebezogene Oberfläche $S_{m,cal}$ berechnet werden. Bei dieser Berechnung wird davon ausgegangen, dass die Reindichte der Einzelpartikel des Partikelgemisches über den gesamten Korngrößenbereich gleich ist. Der Formfaktor φ ließ sich dann durch den Vergleich der rechnerisch ermittelten, massebezogenen Oberfläche $S_{m,cal}$ mit der nach Blaine gemessenen Oberfläche $S_{m,Blaine}$ nach der folgenden Formel berechnen.

$$\varphi = \frac{S_{m,Blaine}}{S_{m,cal}}$$

Gleichung 22

φ	Formfaktor, Kornformfaktor
$S_{m,Blaine}$	Oberfläche nach Blaine-Verfahren [cm ² /g]
$S_{m,cal}$	berechnete Oberfläche [cm ² /g]

Die Ergebnisse der Rechnungen sind im Anhang und die Kornformfaktoren in Tabelle 11 zusammengefasst.

Mittels eines Rasterelektronenmikroskops wurde die Form der Feinstoffpartikel untersucht. Damit eine subjektive Auswahl der Partikel ausgeschlossen werden konnte, war die Positionierung der REM-Aufnahmen zufallsgesteuert. Hierzu wurden in der kleinsten Vergrößerung zufällig 3 Punkte ausgewählt und diese dann genauer untersucht. Bei der Präparation der Proben wurde der Probenhalter ($\varnothing = 1,0$ cm) mit dem Feinstoff bestreut und anschließend mit Gold bedampft. Die Startpositionen über den Probenhaltern wurden zufällig gewählt.

Bei den hochfeinen Gesteinsmehlen Q1 und K1, dem Feinstzement FC und dem Zement CEM4 wurden 4 verschiedene Vergrößerungsstufen gewählt, die einer Bildbreite von 232 µm, 58 µm, 29 µm und 14,5 µm entsprechen. Davon abweichend wurde bei den

gröberen Stoffen, dem Zement CEM3 und dem Quarzmehl Q2 etwas höhere Vergrößerungsstufen gewählt. Sie entsprachen einer Bildbreite von 1,16 mm, 232 µm und 58 µm. Die Übersichtsaufnahmen sind zusätzlich zu den folgenden Abbildungen im Anhang Teil A zusammengefasst.

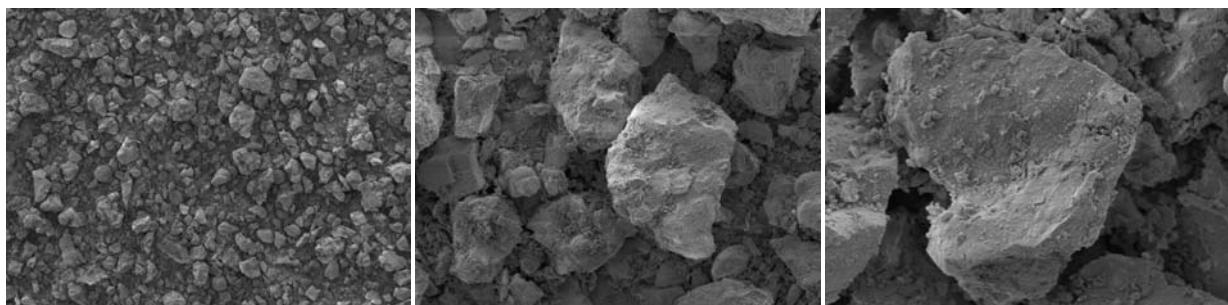
Tabelle 11 gibt eine Übersicht über die visuelle Beurteilung der Kornform und der Oberflächenstruktur der untersuchten Feinststoffe.

Tabelle 11: Visuelle Beurteilung der Kornform der Feinststoffe.

Feinststoffart	Kornform der Partikel	Oberflächenstruktur der Partikel	Kornformfaktor φ
Zement CEM3	kantig	rau	1,52
Zement CEM4	kantig	rau	1,63
Quarzmehl Q1	kantig	glattbrüchig	1,88
Quarzmehl Q2	kantig	scharfkantig, glatt	1,31
Kalksteinmehl K1	kantig	rau	1,93
Feinstzement FC	kantig	rau	1,72

Zement CEM3

Abbildung 24 zeigt übersichtlich die Form und Größe der Körner des Zements CEM3. Verglichen mit dem in dieser Arbeit als zementgleich eingestuften Quarzmehl Q2 ist die Kornform ähnlich.



Bildbreite: 1,16 mm

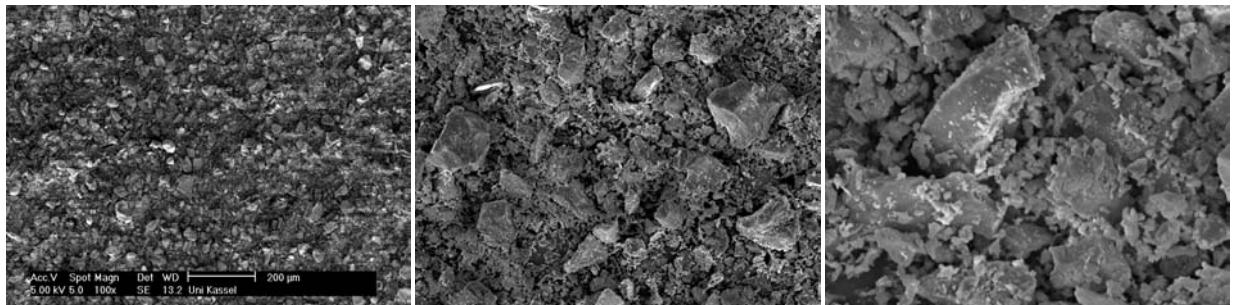
Bildbreite: 232 µm

Bildbreite: 58 µm

Abbildung 24: Übersichtsaufnahmen des Zements CEM3.

Zement CEM4

Die Übersichtsaufnahmen in Abbildung 25 zeigen Form und Korngröße des Zements CEM4. Die deutlich größere Feinheit dieses Zements zeigt sich in der signifikant kleineren mittleren Korngröße. Die Kornform ist identisch.



Bildbreite: 1,16 mm

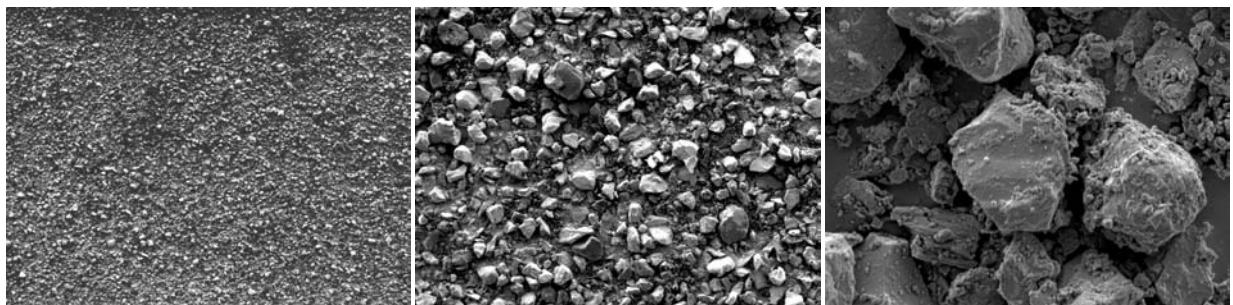
Bildbreite: 232 μm

Bildbreite: 58 μm

Abbildung 25: Übersichtsaufnahmen des Zements CEM4.

Feinstzement FC

Abbildung 26 zeigt die Übersichtsaufnahmen des Feinstzements FC. Die Kornform ist insgesamt vergleichbar mit der des hochfeinen Quarzmehls Q1. Die Körner sind insgesamt etwas spärlicher ausgebildet als bei dem vergleichbaren Quarzmehl Q1.



Bildbreite: 232 μm

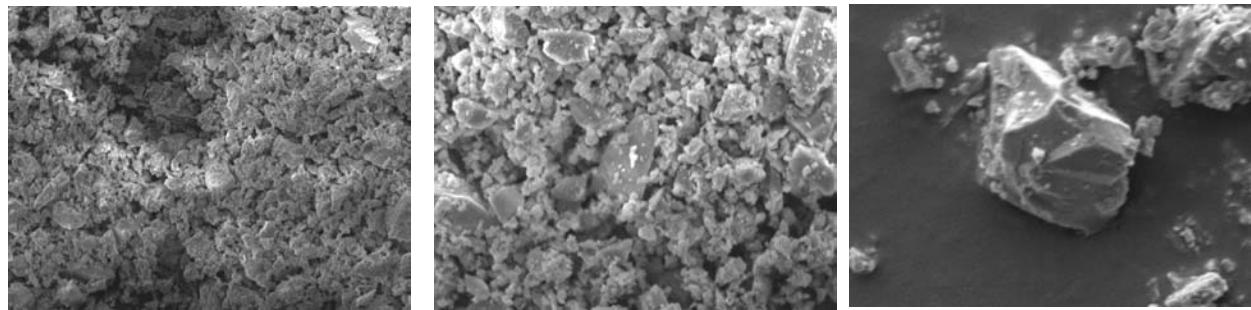
Bildbreite: 58 μm

Bildbreite: 14,5 μm

Abbildung 26: Übersichtsaufnahmen des Feinstzements FC.

Quarzmehl Q1

Die Übersichtsaufnahmen des feinen Quarzmehls Q1 sind in Abbildung 27 dargestellt. Der SiO₂-Gehalt dieses Stoffes, der durch einen Mahlprozess hergestellt wird, liegt bei über 99%. Diese mechanische Beanspruchung erzeugt bei den Partikeln eine scharfkantige Oberflächenstruktur mit zahlreichen Bruchkanten. Durch die sehr hohe Feinheit neigt das Quarzmehl Q1 zur Agglomeration, wie Abbildung 27 zeigt.



Bildbreite: 232 µm

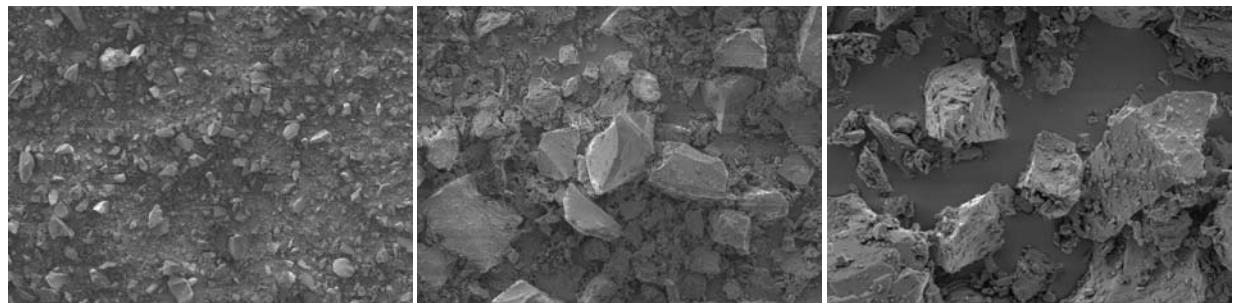
Bildbreite: 58 µm

Bildbreite: 14,5 µm

Abbildung 27: Übersichtsaufnahmen des Quarzmehls Q1.

Quarzmehl Q2

Das Quarzmehl Q2 besteht aus dem gleichen Grundstoff wie das Quarzmehl Q1. Die Oberflächenstruktur ist trotz des deutlich größeren mittleren Korndurchmessers vergleichbar, jedoch versehen mit zahlreichen scharfkantigen Bruchkanten. Aufgrund der um den Faktor 8 größeren mittleren Korngröße ist das Quarzmehl Q2 leicht dispergierbar.



Bildbreite: 1,16 mm

Bildbreite: 232 µm

Bildbreite: 58 µm

Abbildung 28: Übersichtsaufnahmen des Quarzmehls Q2.

Kalksteinmehl K1

Die charakteristische Kornform und -oberfläche des feinen Kalksteinmehls K1 zeigt Abbildung 29. Die Oberfläche ist ähnlich wie bei dem Quarzmehl Q1 durch zahlreiche scharfkantige Bruchkanten gekennzeichnet. Die Agglomerationsneigung ist jedoch trotz gleicher Sieblinie und Feinheit deutlich geringer als bei dem Quarzmehl Q1.

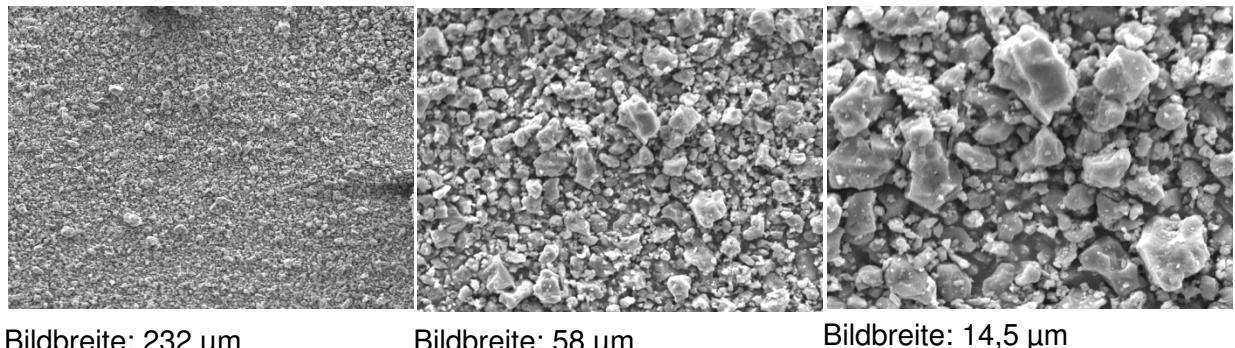


Abbildung 29: Übersichtsaufnahmen des Kalksteinmehls K1.

6.2. Rechnerische Bestimmung der Packungsdichte

Die numerische Berechnung der Packungsdichte erfolgte computergestützt, mit Hilfe eines an der Universität Kassel entwickelten Programms [Gei2003], das dem Verfahren nach Schwanda folgt. Dieses Programm erlaubt es, die mit dem Lasergranulometer gemessenen, 128 Kornklassen der Sieblinien von 2 pulverförmigen Stoffen oder Stoffgemischen miteinander zu kombinieren und die Packungsdichte bei unterschiedlichen Kombinationsmengen zu berechnen. Als Teilchenbehinderungsbeiwert w_0 wurde 2 und als Hohlraumanteil k_0 der Korngruppen 0,82 verallgemeinernd nach [Res2001] angenommen.

Abbildung 30 zeigt die Entwicklung der Packungsdichte des Zements CEM3 kombiniert mit den unterschiedlichen Zusatzstoffen. Beim Austausch des Zements durch die hochfeinen Füllstoffe Q1 und K1 erhöhte sich bei einer Austauschmenge von bis zu 20 Vol.-% die Packungsdichte von 0,657 (reiner Zement CEM3) um rd. 4 % auf bis zu 0,682. Ein weiterer Austausch des Zements durch diese hochfeinen Füllstoffe führte rechnerisch zu einer Verringerung der Packungsdichte, bis sie ab 40 Vol.-% Austauschmenge unter die Packungsdichte des reinen Zements und schließlich auf bis zu 0,600 abfiel. Die Verwendung des hochfeinen Füllzements FC ergab ebenfalls eine deutliche Erhöhung der Packungsdichte. Der Maximalwert wurde jedoch erst bei 40 Vol.-% Austauschmenge erreicht. Dies ist, verglichen mit dem Quarzmehl Q1 und dem Kalksteinmehl K1, auf den erhöhten Kornanteil des Feinstzements FC unterhalb 1 µm zurückzuführen (siehe auch vergleichend d_{10} in Tabelle 10). Dadurch konnten noch kleinere Hohlräume effektiv gefüllt werden.

Beim Austausch des Zements CEM3 durch das praktisch gleich feine Quarzmehl Q2 blieb die Packungsdichte bis zu 30 Vol.-% Austauschmenge mit 0,657 praktisch gleich. Darüber hinaus verringerte sich die Packungsdichte auf bis zu 0,647.

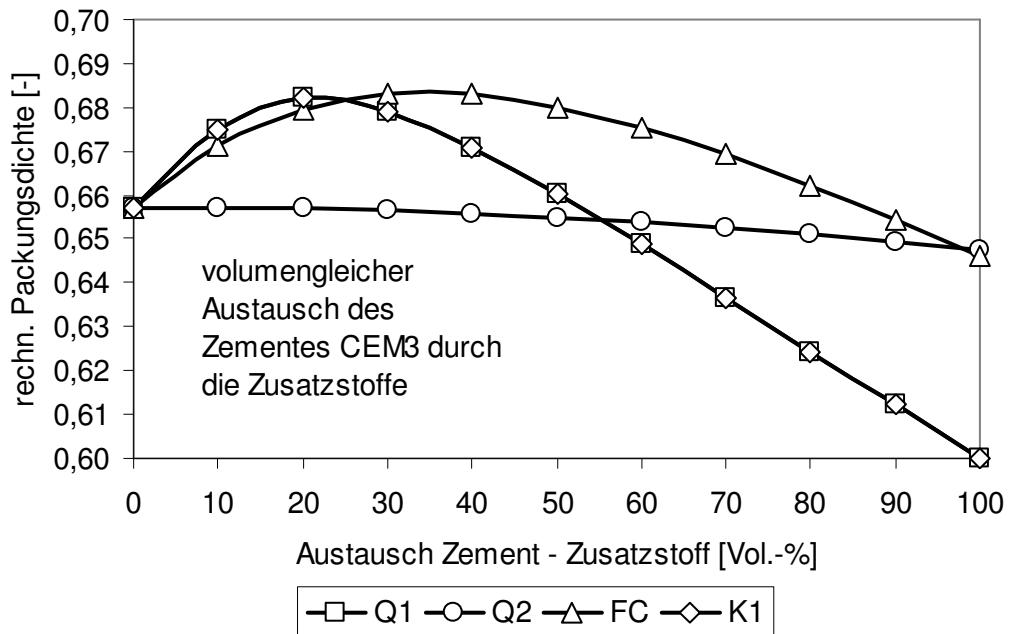


Abbildung 30: Entwicklung der rechnerischen Packungsdichte nach Schwanda [Sch1966] bei volumengleichen Austausch des Zementes CEM3 durch die Zusatzstoffe.

Die Kombination des feineren CEM4 mit einer spez. Oberfläche von rd. $3.660 \text{ cm}^2/\text{g}$ durch die hochfeinen Füllstoffe Q1, K1 und FC führte zwar ebenfalls zu einer Steigerung der Packungsdichte, jedoch war diese nicht so ausgeprägt wie bei dem vergleichsweise grob gemahlenen Zement CEM3. Die Packungsdichte des Zements CEM4 betrug rechnerisch 0,663 und konnte mit den hochfeinen Gesteinsmehlen Q1 und K1 nur um 0,6 % auf rd. 0,665 gesteigert werden.

Mit dem Feinstzement FC ergab sich eine rechnerische Steigerung der Packungsdichte um 0,9 % auf 0,669. Wie bei dem größeren Zement CEM3 ergab sich bei dem Zement CEM4 durch den Austausch mit dem zementfeinen Quarzmehl Q2 keine Steigerung der Packungsdichte, sondern sie wurde von Beginn an praktisch linear auf bis zu 0,647 reduziert.

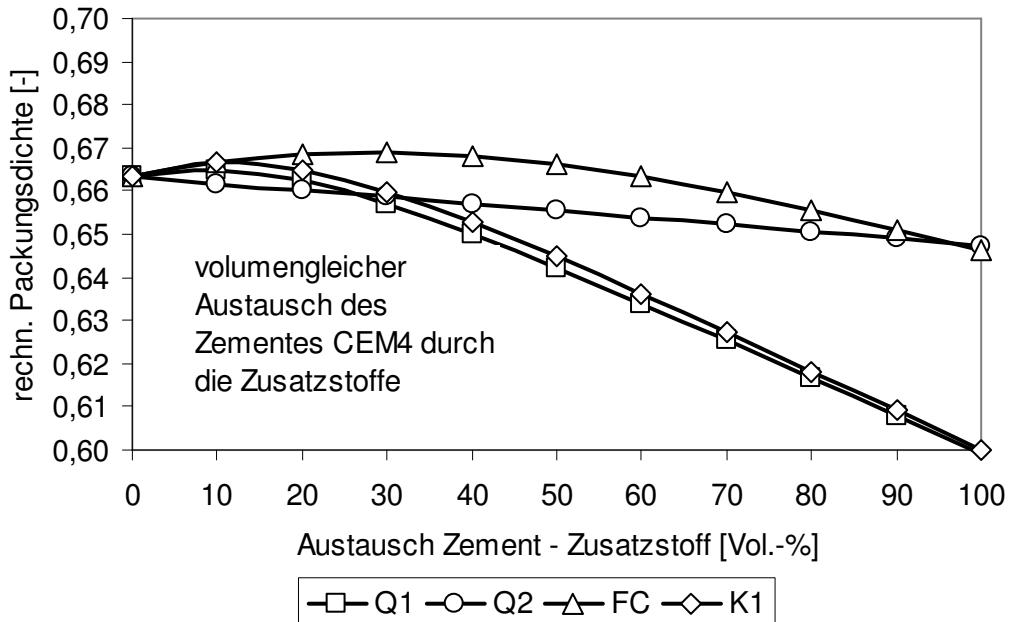


Abbildung 31: Entwicklung der rechnerischen Packungsdichte nach Schwanda [1966] bei volumengleichen Austausch des Zements CEM4 durch die Zusatzstoffe.

Zur nachhaltigen Erhöhung der rechnerischen Packungsdichte bei Feinstoffsystmen, die den deutlich feineren Zement CEM4 als Grundlage haben, sind deutlich feinere Füllstoffe als die in dieser Arbeit verwendeten notwendig, da sie wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, nicht oder nur schwer hohlraumfähig sind. Der Zement CEM4 diente lediglich als Vergleichsstoff mit gleicher Zusammensetzung zur Kontrolle der Füllwirkung der Zusatzstoffe.

6.3. Einfluss der Art und Menge der Feinstoffe auf die Sieblinie

Durch die gezielte Füllung der Hohlräume zwischen den Zementpartikeln wird die Sieblinie der Gesamtmischung entsprechend stark geändert. Abbildung 32 zeigt beispielhaft die Veränderung der Sieblinie beim Austausch des Zements CEM3 durch das hochfeine Quarzmehl Q1. Das nach RRSB ermittelte Steigungsmaß n lässt mit zunehmender Feinheit der Sieblinie keine deutliche Unterscheidung mehr zu und ist demzufolge zur Einteilung von Stoffen hinsichtlich ihrer Eignung als Füllstoff ungeeignet, siehe auch [Bo2005]. Stattdessen wurde in dieser Arbeit die Sieblinie eines Stoffes durch den mittleren Durchmesser d_{50} charakterisiert.

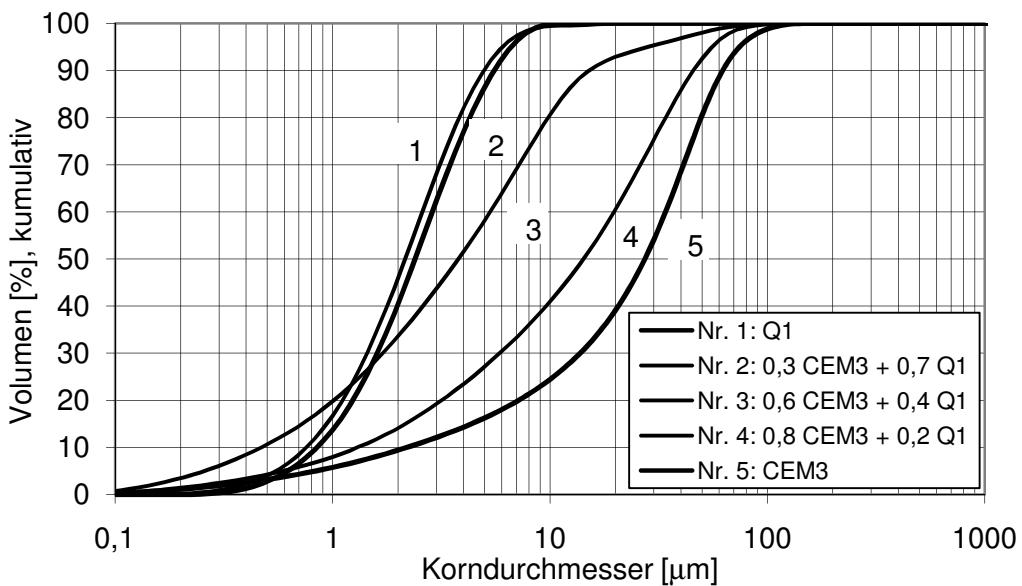


Abbildung 32: Einfluss des Feinstoffes auf die Sieblinie beispielhaft am Zement CEM3 ausgetauscht durch das hochfeine Quarzmehl Q1.

Die Änderung des mittleren Durchmessers d_{50} infolge des Austauschs des Zements CEM3 bzw. CEM4 durch die Zusatzstoffe sind in Abbildung 33 und Abbildung 34 dargestellt. Am Beispiel des hochfeinen Quarzmehls Q1 verringerte sich der mittlere Durchmesser d_{50} von 27 µm des reinen Zements auf 2,4 µm um den Faktor 11.

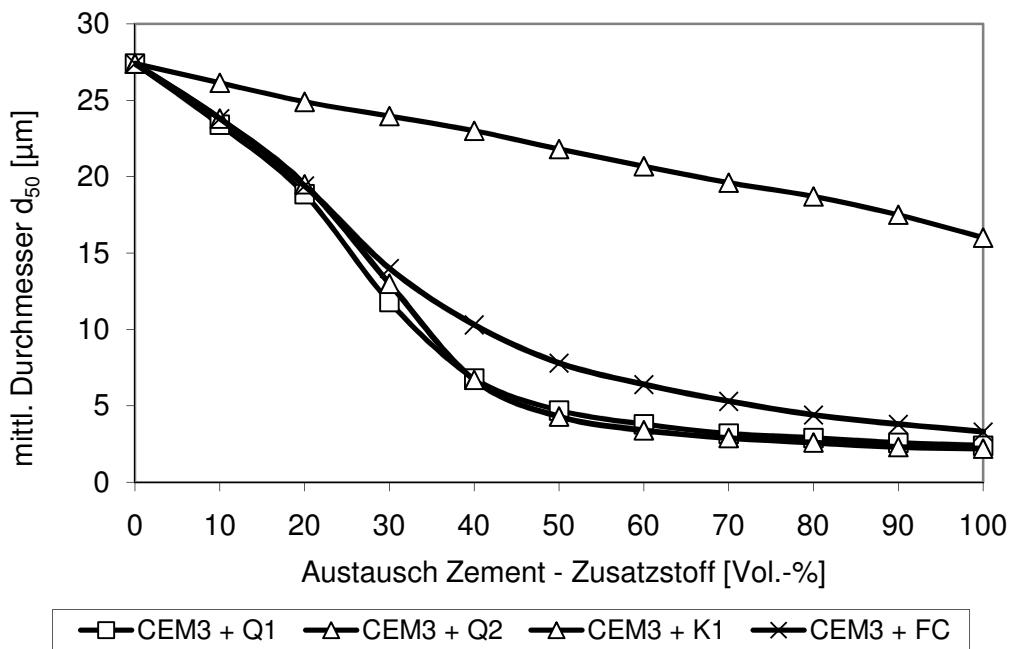


Abbildung 33: Entwicklung der mittleren Korndurchmessers d_{50} der Zement-Feinstoff-Mischungen mit dem Zement CEM3 und den Zusatzstoffen Q1, Q2, K1 und FC.

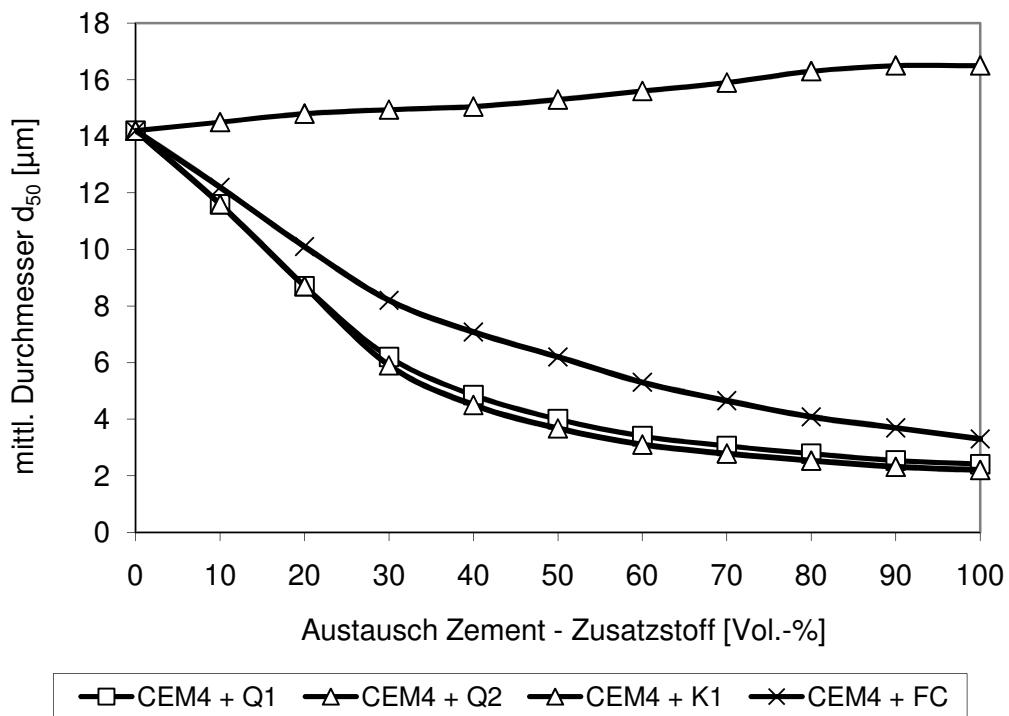


Abbildung 34: Entwicklung des mittleren Korndurchmessers d_{50} der Zement-Feinstoff-Mischungen mit dem Zement CEM4 und den Zusatzstoffen Q1, Q2, K1 und FC.

Die Ergebnisse sind zusätzlich tabellarisch im Anhang Teil B zusammengefasst.

6.4. Einfluss der Feinstoffe auf die rechn. spezifische Oberfläche

Die spezifische Oberfläche der Feinstoffgemische, bestehend aus Zement und Feinstoff, wurde rechnerisch ermittelt. Dazu wurden die spezifischen Oberflächen nach Blaine der Ausgangsstoffe zugrunde gelegt.

Durch die Zugabe der Zusatzstoffe Q1, K1 und FC veränderte sich die rechn. spezifische Oberfläche der Feinstoffgemische mit den Ausgangszementen CEM3 oder CEM4 signifikant. Der Austausch der Zemente durch das praktisch gleich feine Quarzmehl Q2 erbrachte erwartungsgemäß keine signifikante Änderung der spezifischen Oberfläche des Feinstoffgemisches. Beispielsweise wurde beim Austausch von 40 Vol.-% Zement CEM3 durch das hochfeine Quarzmehl Q1 die spezifische Oberfläche von $2750 \text{ cm}^2/\text{g}$ auf rd. $8290 \text{ cm}^2/\text{g}$ erhöht, was einer Steigerung von 200% entspricht. Beim Austausch des Zements durch den Feinstzement FC und das Kalksteinmehl K1 ergaben sich ähnliche Steigerungen, siehe Abbildung 35. Die Verwendung des zementgleichen Quarzmehls Q2 erhöhte im Vergleich zu den hochfeinen Ersatzstoffen die spezifische Oberfläche nur geringfügig um 7 %, wenn 40 Vol.-% substituiert wurden.

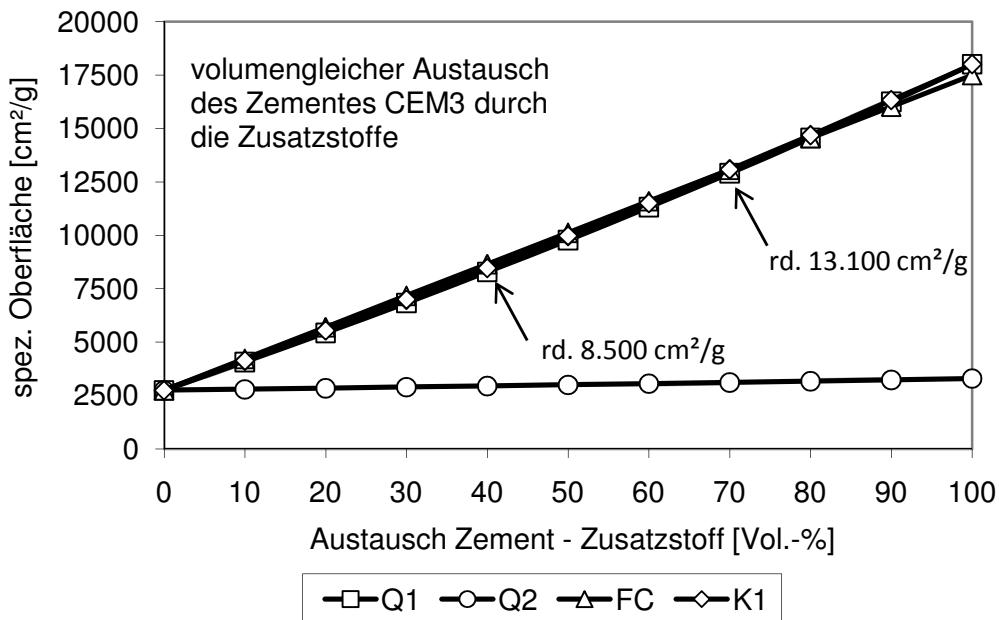


Abbildung 35: Entwicklung der rechn. spez. Oberfläche bei volumengleichen Austausch des Zements CEM3 durch die Zusatzstoffe.

Abbildung 36 zeigt den Einfluss der Zusatzstoffe auf die rechnerische spez. Oberfläche der Feinstoffgemische mit dem Zement CEM4.

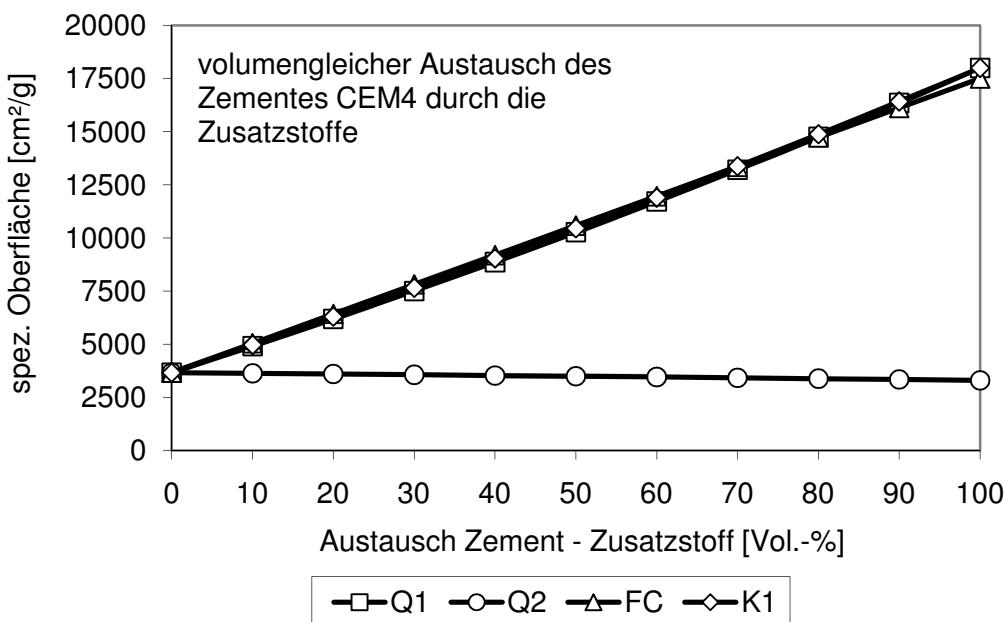


Abbildung 36: Entwicklung der rechn. spez. Oberfläche bei volumengleichen Austausch des Zements CEM4 durch die Zusatzstoffe.

Erwartungsgemäß fiel das Steigungsmaß beim Austausch des Zements CEM4, mit einer spezifischen Oberfläche von 3660 cm²/g, durch die hochfeinen Zusatzstoffe etwas geringer aus als bei dem CEM3, bei gleichzeitig größerer Oberfläche. Der Ersatz von beispielsweise 40 Vol.-% Zement durch Q1 erhöhte die spezifische Oberfläche um 142% von 3660 cm²/g auf 8870 cm²/g. Beim Ersatz des Zements CEM4 durch das Quarzmehl Q2 mit einer geringeren Mahlfeinheit von 3300 cm²/g verringert sich die spezifische Oberfläche um 3,5% auf 3530 cm²/g bei 40 Vol.-% Austausch, siehe Abbildung 36.

6.5. Einfluss der Feinstoffe auf die rechnerische Wasserfilmdicke

Die Wasserfilmdicke d_w wurde in Abhängigkeit von der rechnerischen Packungsdichte, dem Feinstoffgehalt und der sich daraus ergebenden spezifischen Oberfläche je dm³ sowie dem Gesamtwassergehalt in Anlehnung an [Kre1985] nach der folgenden Gleichung berechnet. Dabei gehen alle Werte volumenbezogen in die Rechnung ein.

$$d_w = \frac{V_w - V_H \cdot \frac{1 - PD}{PD}}{s_{vf} \cdot V_f} \cdot 100.000$$

Gleichung 23

d_w Wasserfilmdicke [μm]

V_w Wasservolumen [dm³]

V_H Volumen Hohlraum [dm³]

PD rechnerische Packungsdichte nach Schwanda [-]

s_{vf} spezifische Oberfläche der Feststoffe [dm²/dm³]

V_f Volumen der Feststoffe [dm³]

In Abbildung 37 und Abbildung 38 ist der Einfluss der Feinstoffart, des Feinstoffgehaltes und des Wassergehaltes auf die Wasserfilmdicke dargestellt. Bei den reinen Zementgemischen ergaben sich in Abhängigkeit vom w/z-Wert Wasserfilmdicken zwischen 1,20 μm (w/z = 0,50) und 0,30 μm (w/z = 0,25).

Mit steigender Austauschmenge des Zements durch den Füllstoff Q1 verringerte sich die Wasserfilmdicke infolge der zunehmenden Oberfläche. Hierbei muss zwischen den beiden Austauscharten Fall A (konstanter Wassergehalt) und Fall B (proportional zur Zementmenge reduzierter Wassergehalt) unterschieden werden. Bei konstantem Wassergehalt (Fall A) verringert sich die Wasserfilmdicke von 1,20 μm bei dem w/z-Wert 0,50 auf 0,41 μm bei 40 Vol.-% Austausch durch Q1. Wird der Wassergehalt proportional zur Zementmenge

ebenfalls reduziert (Fall B), dann beträgt die Wasserfilmdicke bei gleicher Austauschmenge nur noch $0,17 \mu\text{m}$, wird also um mehr als die Hälfte reduziert. Im Fall B sinkt die rechnerische Wasserfilmdicke der Prüfreihe mit dem Ausgangswasserzementwert $w/z_0 = 0,25$ bei 40 Vol.-% Austausch durch Q1 auf Null, da das verfügbare Gesamtwasser in der oben stehenden Gleichung rechnerisch zuerst zur Füllung der Hohlräume herangezogen wird. Erst die sich daraus ergebende Restwassermenge ergibt die rechnerische Wasserfilmdicke d_w .

Beim Ersatz des Zements CEM3 durch das zementfeine Quarzmehl Q2 bleibt die Wasserfilmdicke bei konstantem Wassergehalt mit zunehmender Austauschmenge nahezu unverändert. Wird der Wassergehalt proportional zur Zementmenge reduziert, verringert sich die Wasserfilmdicke linear zur Abnahme des Wassergehalts.

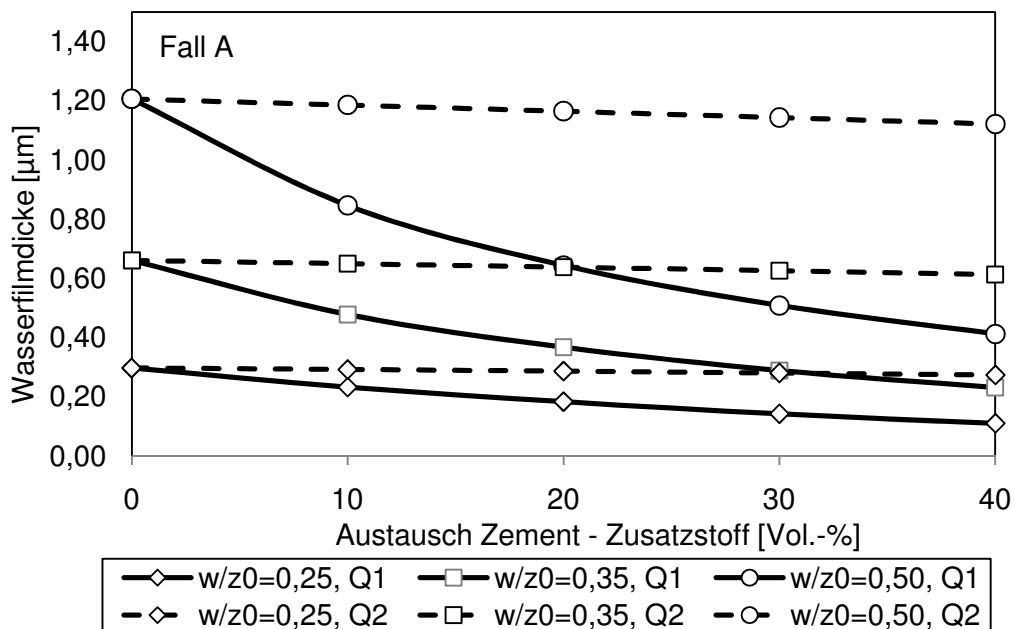


Abbildung 37: Einfluss des zementfeinen und des hochfeinen Quarzmehls auf die Wasserfilmdicke d_w bei konstantem Wassergehalt, Fall A; w/z_0 = Ausgangswasserzementwert

In beiden Darstellungen wird der Einfluss der Ausgangswassermenge auf die Wasserfilmdicke mit zunehmender Feinheit (spez. Oberfläche) des Gemisches deutlich. Bei hohen Wassermengen ist das Steigungsmaß deutlich größer. Dieser Effekt lässt sich anhand der Gleichung zur Berechnung der Wasserfilmdicke erklären. Es wird angenommen, dass durch das vorhandene Wasser erst alle Hohlräume gefüllt werden und sich erst danach ein Wasserfilm um die Partikel aufbaut. D.h., bei großen Wassermengen wirkt sich eine Erhöhung der zu benetzenden Oberfläche in der Berechnung der Wasserfilmdicke deutlicher aus als bei geringen Wassermengen. Zusätzlich macht sich der Einfluss der veränderlichen Packungsdichte, die bei 20 Vol.-% Austausch des Zements CEM3 durch das hochfeine Quarzmehl Q1 maximal ist, auf die Entwicklung der Wasserfilmdicke bemerkbar.

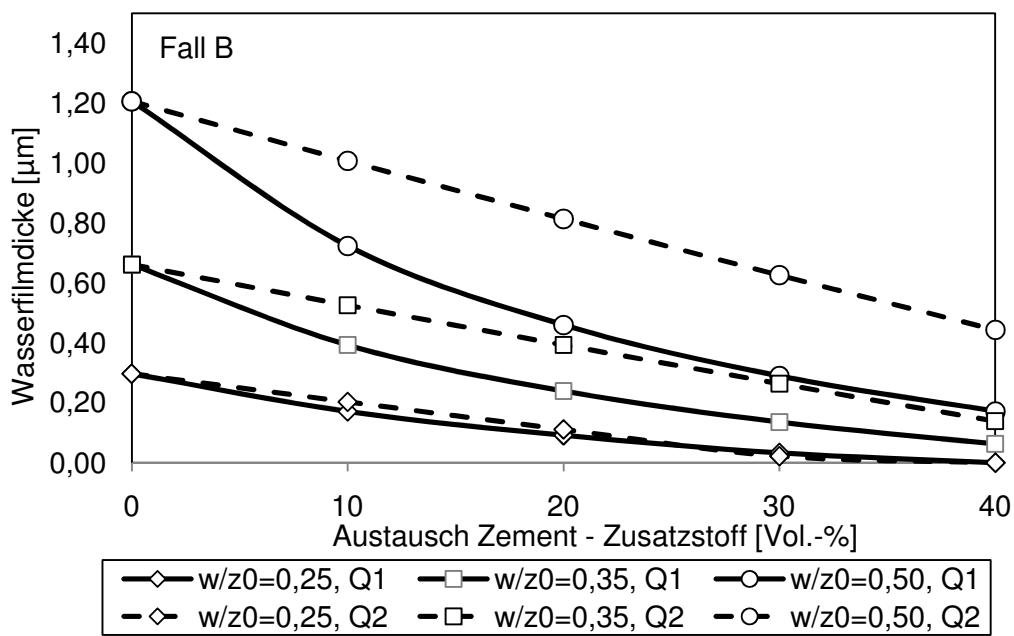


Abbildung 38: Einfluss des zementfeinen und der hochfeinen Quarzmehls auf die Wasserfilmdicke d_w bei proportional zum Zementvolumen reduziertem Wassergehalt, Fall B.

Tabelle 12 verdeutlicht diesen Effekt anhand der Quotienten aus den Wasserfilmdicken d_w bei unterschiedlichen Ausgangswassergehalten. Mit zunehmender Austauschmenge, in der Tabelle dargestellt bei 0, 20 und 40 Vol.-%, nimmt das Verhältnis zwischen der Wasserfilmdicke bei $w/z_0=0,50$ und $w/z_0=0,35$ oder $w/z_0=0,25$ im Fall A ab und im Fall B zu. Die daraus gebildeten Quotienten unterscheiden sich zwar untereinander und zeigen, dass die Kurven nicht direkt proportional, jedoch in ihrer Tendenz zueinander affin sind.

Tabelle 12: Verhältnisse der rechn. Wasserfilmdicken zueinander, am Beispiel CEM3 + Q1.

w/z ₀ -Wert	Fall A konstanter Wassergehalt			Fall B abnehmender Wassergehalt		
	Austauschmenge					
	0 Vol.-%	20 Vol.-%	40 Vol.-%	0 Vol.-%	20 Vol.-%	40 Vol.-%
	Wasserfilmdicke d_w [μm]					
0,50	1,21	0,64	0,41	1,21	0,46	0,17
0,35	0,66	0,37	0,27	0,66	0,24	0,06
0,25	0,30	0,18	0,11	0,30	0,11	0
Verhältnis	Quotient aus $d_w(w/z_0=0,50)/d_w(w/z_0=0,35;0,25)$					
0,50/0,35	1,83	1,73	1,52	1,83	1,92	2,83
0,50/0,25	4,03	3,56	3,73	4,03	4,18	-

6.6. Schlussfolgerungen aus den Voruntersuchungen

Die Voruntersuchungen haben gezeigt, dass es eine gute Übereinstimmung zwischen der rechnerisch und der experimentell bestimmten Packungsdichte gibt. In den folgenden Darstellungen wird daher als Vergleichsgröße die rechnerische Packungsdichte herangezogen. Sie steigt vom reinen Zement CEM3 von 0,657 beim Austausch durch 20 Vol.-% durch das hochfeine Quarzmehl Q1 auf 0,682 an. Darüber hinaus nimmt sie wieder ab.

Durch die, mit dem Austausch des Zements durch den hochfeinen Füllstoff einhergehende, starke Erhöhung der spezifischen Oberfläche wird die rechnerische Wasserfilmdicke signifikant reduziert. Wird dabei die Wassermenge mit der Zementmenge reduziert, also der w/z-Wert konstant gehalten, ist die Abnahme der Wasserfilmdicke stärker. Für die weiteren Untersuchungen war zu erwarten, dass die Zementsteine mit reduzierter Wassermenge eine höhere Gefügedichte und Festigkeit ausbilden, da der Partikelabstand insgesamt geringer ist. In

Abbildung 39 ist dieser Zusammenhang schematisch verdeutlicht.

In a) wird die Wasserfilmdicke um die Zementkörner mit dem Hohlraumwasser gezeigt. Durch den Austausch des Zements durch einen Füllstoff bei unverändertem Wassergehalt reduziert sich zwar die Wasserfilmdicke wie in b), ist jedoch noch deutlich größer als in d). Durch die Füllung der Hohlräume mit dem Füllstoff wird das Wasser aus den Hohlräumen verdrängt und erhöht die Wasserfilmdicke. Beim Austausch des Zements durch einen gleich feinen Ersatzstoff und verringertem Wassergehalt wird zwar auch die Wasserfilmdicke reduziert, wie c) zeigt, jedoch ist durch die fehlenden Füllstoffe noch viel Hohlraumwasser vorhanden. Das Schema verdeutlicht, dass zusätzlich zur Hohlraumfüllung die Reduktion der Wasserfilmdicke von wesentlicher Bedeutung ist, damit die erhöhte rechnerische Packungsdichte wirksam werden kann.

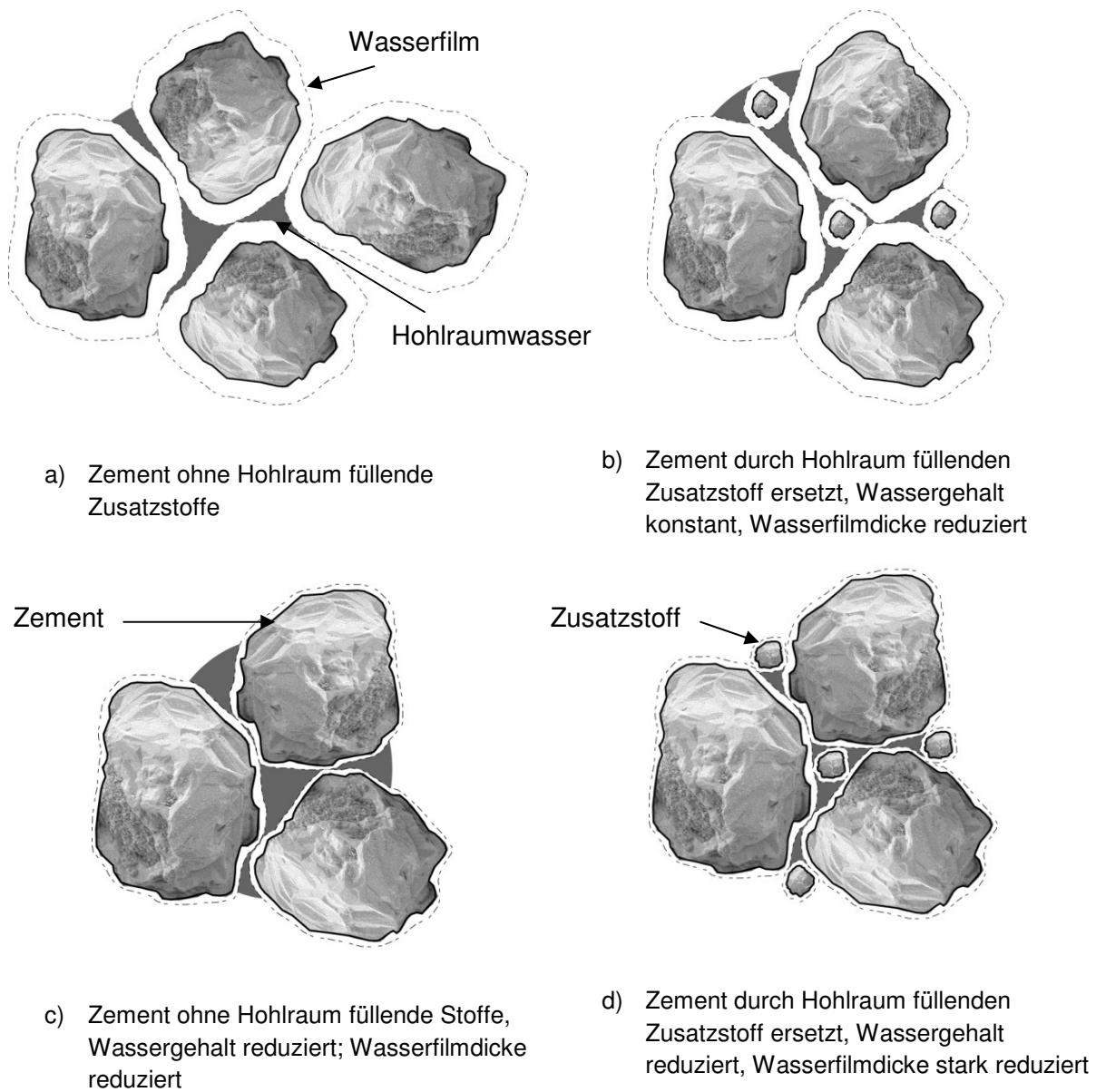


Abbildung 39: Schema zur Wirkung der Hohlraumfüllung und der Verringerung der Wasserfilmdicke.

7. Experimentelle Untersuchungen

7.1. Einfluss auf Wasserabsonderung, Hohlraumvolumen und Wasseranspruch

7.1.1. Hohlraumvolumen nach Puntke

Um feststellen zu können, wie relevant die rechnerisch nach dem Verfahren von Schwanda ermittelte Packungsdichte ist, wurde das Hohlraumvolumen mit dem Verfahren nach Puntke bestimmt. Im Umkehrschluss gibt das so ermittelte Hohlraumvolumen den Feststoffgehalt und damit die Packungsdichte wieder, siehe auch Abschnitt 5.4.2. Um die Ergebnisse aus der rechnerischen und der experimentell bestimmten Packungsdichte besser vergleichen und Diskrepanzen hervorheben zu können, wurde der Korrelationsfaktor k_{PD} eingeführt. Dieser Korrelationsfaktor k_{PD} gibt das Verhältnis zwischen der Packungsdichte bei 100 Vol.-% Zement sowie 0 Vol.-% Zusatzstoff und bei 100-n Vol.-% Zement sowie n Vol.-% Zusatzstoff an. Damit ist der Korrelationsfaktor k_{PD} unabhängig von absoluten Unterschieden und zeigt die relative Entwicklung beider Packungsdichten zueinander. Als Ausgangsgrößen dienen die jeweiligen Packungsdichten des reinen Zements.

$$k_{PD} = \frac{PD_{P0} \cdot PD_{Sn}}{PD_{Pn} \cdot PD_{S0}}$$

Gleichung 24

k_{PD}	Korrelationsfaktor aus rechn. Packungsdichte nach Schwanda und experimenteller Packungsdichte nach Puntke, [-]
PD_{P0}	Packungsdichte nach Puntke bei 100 Vol.-% Zement, 0 Vol.-% Zusatzstoff, [-]
PD_{Pn}	Packungsdichte nach Puntke bei 100-n Vol.-% Zement, n Vol.-% Zusatzstoff, [-]
PD_{S0}	Packungsdichte nach Schwanda bei 100 Vol.-% Zement, 0 Vol.-% Zusatzstoff, [-]
PD_{Sn}	Packungsdichte nach Schwanda bei 100-n Vol.-% Zement, n Vol.-% Zusatzstoff, [-]

Bei $k_{PD} = 1$ entspricht das Verhältnis der Packungsdichten zueinander dem Verhältnis des Ausgangswerts bei 0 Vol.-% Zusatzstoff. Wird der Korrelationsfaktor $k_{PD} < 1$ ist der experimentell gemessene Hohlraum nach Puntke relativ kleiner als der rechnerische

Hohlraumgehalt nach Schwanda. Bei $k_{PD} > 1$ ist der experimentell bestimmte Hohlraumgehalt relativ größer als der rechnerische Hohlraumgehalt nach Schwanda.

Abbildung 40 und Abbildung 41 zeigen die experimentell und rechnerisch bestimmten Packungsdichten nach Puntke und Schwanda im Verhältnis zueinander, beim Austausch des Zements CEM3 durch die Quarzmehle Q1 und Q2. Die experimentell bestimmte Packungsdichte des Zements ist mit 0,606 rd. 8 % kleiner als die rechnerisch ermittelte Packungsdichte mit 0,657. Der Korrelationsfaktor ist 1.

Beim Austausch des Zements durch das praktisch gleich feine Quarzmehl Q2 ändert sich die rechnerische Packungsdichte praktisch nicht. Demgegenüber erhöhte sich jedoch die experimentell bestimmte Packungsdichte, wenn der Zement bis zu 40 Vol.-% durch Q2 ausgetauscht wurde.

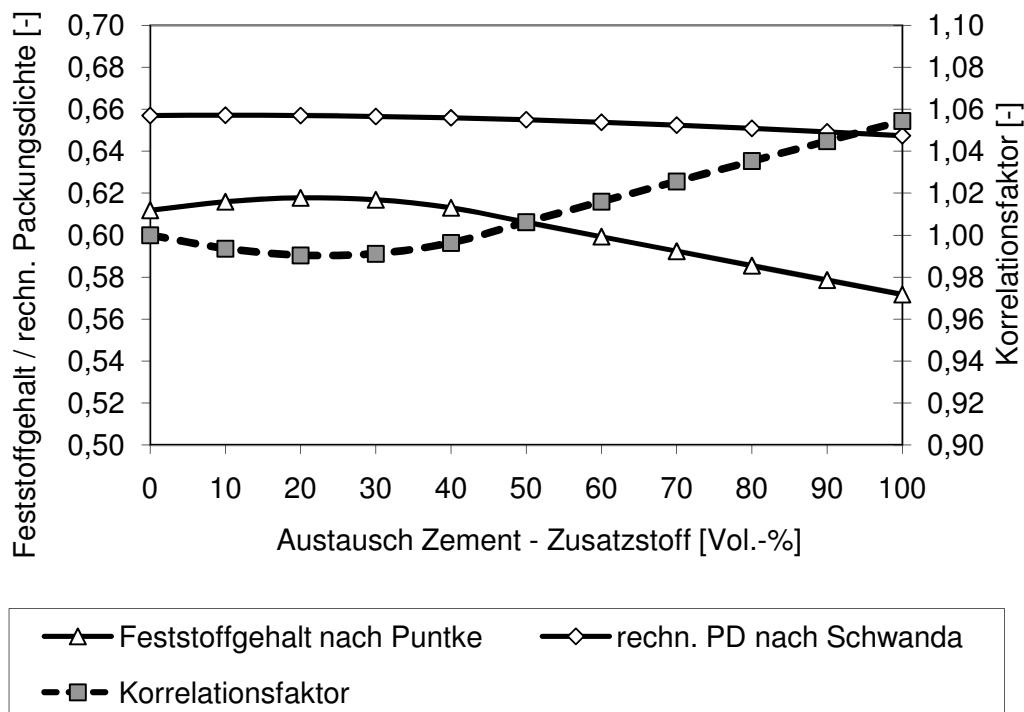


Abbildung 40: Vergleich der rechnerischen Packungsdichte mit dem nach Puntke [Pun2002] ermittelten Feststoffgehalt, Zement CEM3 durch zementfeines Quarzmehl Q2 ersetzt.

Bei weiterem Austausch verringerte sich die experimentell bestimmte Packungsdichte deutlich unter die des reinen Zements. Bei 100 Vol.-% Quarzmehl Q2 betrug die experimentell bestimmte Packungsdichte nur noch 0,572. Die rechnerische Packungsdichte betrug bei dieser Austauschmenge 0,647. Der Korrelationsfaktor k_{PD} nimmt von 50 bis 100 Vol.-% Zementtausch zu und ist mit maximal 1,06 deutlich größer als 1. D.h., bei der experimentell bestimmten Packungsdichte war der ermittelte Hohlraumgehalt größer als bei der rechnerisch bestimmten Packungsdichte.

Wurde der Zement CEM3 durch das hochfeine Quarzmehl Q1 ersetzt, nahm die experimentell bestimmte Packungsdichte äquivalent zur rechnerisch bestimmten Packungsdichte zu, beide Kurven waren affin zueinander. Beim Austausch des Zements bis zu 30 Vol.-% war der Korrelationsfaktor k_{PD} mit Abweichungen von rd. 0,01 von 1,0 praktisch gleich 1,0. D.h., die beiden auf unterschiedliche Weise bestimmten Packungsdichten entwickelten sich ähnlich. Bei weiterem Austausch des Zements durch das Quarzmehl nahm der Korrelationsfaktor auf bis zu 1,10 deutlich zu. D.h., die mit dem Punkt-Verfahren ermittelte Packungsdichte war mit rd. 0,500 signifikant kleiner als die rechnerisch ermittelte Packungsdichte mit 0,600.

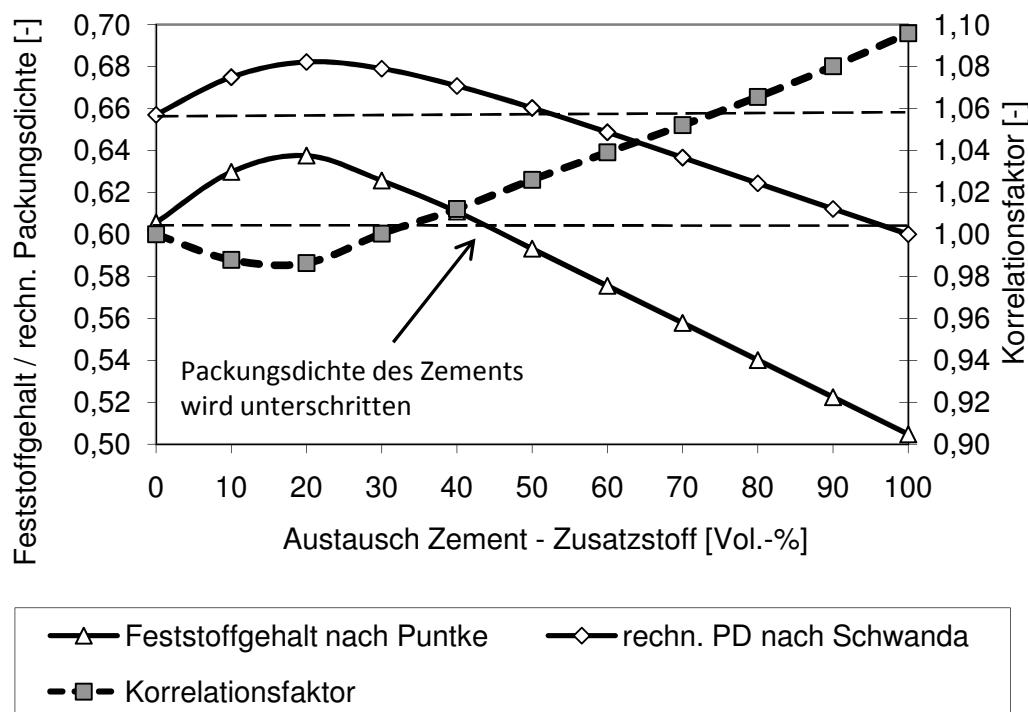


Abbildung 41: Vergleich der rechnerischen Packungsdichte mit dem nach Punkt-Verfahren [Pun2002] ermittelten Feststoffgehalt, Zement CEM3 durch Füllstoff Quarzmehl Q1 ersetzt.

Die deutlichen Unterschiede der Packungsdichten, gerade bei hohen Zusatzstoffgehalten, bzw. hoher Feinheit des Gemisches beruhen vermutlich auf erhöhten interpartikulären Kräften, die einer dichtesten Lagerung der Feinstoffpartikel entgegen wirken.

Die Ergebnisse zeigen, dass die rechnerisch nach dem Verfahren von Schwanda bestimmten Packungsdichten mit dem Verfahren nach Punkt-Verfahren nachgewiesen werden können und dass sich die ausgesuchten Füllstoffe zur Füllung der Hohlräume eignen.

7.1.2. Wasseranspruch

Der Wasseranspruch nach DIN EN 196-3 kennzeichnet für die Normsteife erforderliche Wassermenge, die gebraucht wird, um die Partikel zu umhüllen und die Hohlräume zu füllen. Wasseranteile, die innerhalb der ersten Minuten, in denen dieser Versuch stattfand, chemisch an den Zement gebunden werden können, sind vernachlässigbar klein und nur schwer bestimmbar. Sie werden in den folgenden Darstellungen nicht weiter berücksichtigt.

Der Wasseranspruch wird wegen der unterschiedlichen Reindichte der Ausgangsstoffe in dieser Arbeit volumenbezogen dargestellt und bezieht sich in X Vol.-% des Wassers auf 100 Vol.-% des Feinstoffgemisches.

Abbildung 42 zeigt die rechnerische spezifische Oberfläche sowie den experimentell bestimmten Wasseranspruch beim Austausch des Zements CEM3 durch das praktisch gleich feine Quarzmehl Q2. Der Wasseranspruch des reinen Zements CEM3 betrug 79 Vol.-%. Das entspricht einem gravimetrisch bezogenem Wasseranspruch von 25,2 M.-%. Da das Quarzmehl Q2 mit $3300 \text{ cm}^2/\text{g}$ eine um 20% größere Oberfläche als der Zement CEM3 hatte und keine nennenswerte Füllerwirkung übernehmen kann, stieg der Wasserspruch bis zu einer Austauschmenge von 70 Vol.-% linear um rd. 6% auf einen Wasseranspruch von 84 Vol.-% an.

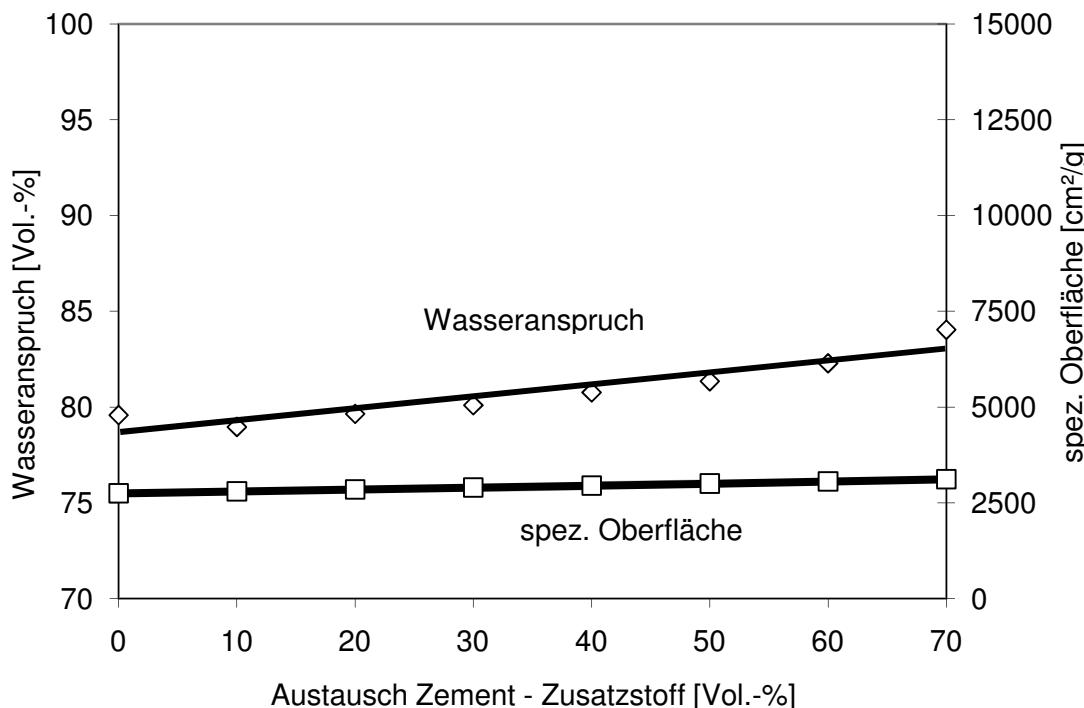


Abbildung 42: Einfluss des Quarzmehls Q2 auf den Wasseranspruch der Zement-Zusatzstoffmischung, vergleichende Darstellung mit der Entwicklung der spez. Oberfläche, CEM3.

Beim Austausch des Zements durch das hochfeine Quarzmehl Q1 steigerte sich die spez. Oberfläche des Feinstoffgemisches beim Austausch von bis zu 70 Vol.-% von 2750 cm²/g um das 4,7 fache auf rd. 12.900 cm²/g.

Wie Abbildung 43 zeigt war bis zur Austauschmenge von 30 Vol.-% keine signifikante Veränderung des Wasseranspruchs messbar. Dieser Effekt kann auf die Füllerwirkung des hochfeinen Quarzmehls zurückgeführt werden. Die Hohlräume werden aufgefüllt, so dass die zur Erzielung der Normsteife benötigte Wassermenge, trotz steigender spezifischer Oberfläche, gleich bleibt. In diesem Bereich war die in Abschnitt 7.1.1 rechnerische sowie die experimentell ermittelte Packungsdichte ebenfalls größer als die des reinen Zements.

Erst bei weiterem Austausch des Zements stieg der Wasseranspruch vergleichbar zur spezifischen Oberfläche um rd. 18% auf einen Spitzenwert von 94 Vol.-% an. Dieser höchste Wasseranspruch wurde auch hier bei einer Austauschmenge von 70 Vol.-% erreicht. Durch die hohe Feinheit der Partikel werden optimal dichte Packungen vermutlich durch interpartikuläre Kräfte verhindert. Dieses Verhalten stimmt auch mit dem von Reschke [Res2001] beobachteten Verhalten hochfeiner Stoffgemische überein. In seinen Untersuchungen stieg insbesondere im Bereich $x' < 10 \mu\text{m}$ der eingeschlossene Hohlraumgehalt bei Partikelgemischen überproportional an. Der Lageparameter x' ist entsprechend der RRSB-Verteilung nach DIN 66145 die Korngröße x bei einer Massenverteilungssumme von 63,2 % und charakterisiert damit die Feinheit des Korngemischs.

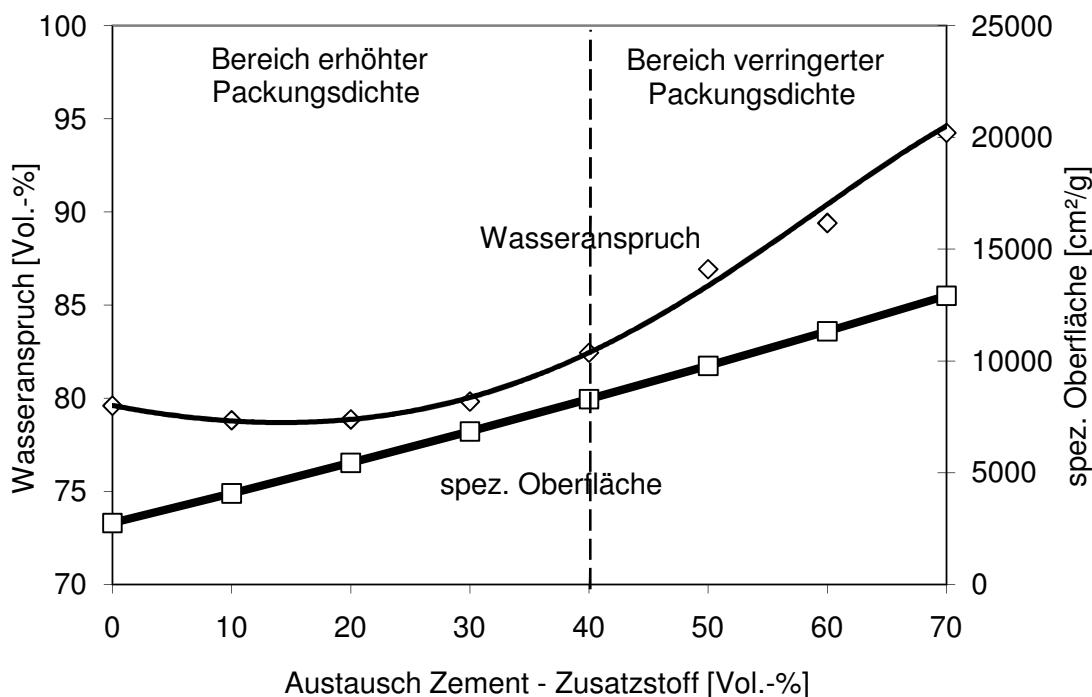


Abbildung 43: Einfluss des Quarzmehls Q1 auf den Wasseranspruch der Zement-Feinstoffmischung, vergleichende Darstellung mit der Entwicklung der spez. Oberfläche, CEM3.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe des Verfahrens zur Bestimmung der Normsteife indirekt der Einfluss der Füllerwirkung und der spezifischen Oberfläche untersucht werden kann. Die Differenzierbarkeit der Ergebnisse ist jedoch nicht so deutlich wie mit der Prüfung des Hohlraumgehaltes nach Puntke, siehe Abschnitt 7.1.1. Der Füllung der Hohlräume steht bei diesem Versuch die steigende spezifische Oberfläche, mit einem großen Einfluss auf den Wasseranspruch, entgegen.

Bei gleichmäßigem Anstieg des Wasseranspruches kann davon ausgegangen werden, dass die Packungsdichte nicht ausreichend erhöht bzw. sogar verringert wurde und damit die spezifische Oberfläche den signifikanten Einfluss auf den Wasseranspruch darstellt. Bleibt der Wasseranspruch jedoch bei zunehmender Austauschmenge und damit erhöhter spezifischer Oberfläche gleich oder verringert er sich, so ist in diesem Fall die erhöhte Packungsdichte maßgebend, siehe Abbildung 43. Das Wasser wird durch den Feststoff aus den Hohlräumen verdrängt und steht dann zur Gleitfilmbildung und damit zur Verflüssigung zur Verfügung.

Abbildung 44 zeigt den aus der Bestimmung des Wasseranspruchs zurückgerechneten Feststoffgehalt. Erhöhte Feststoffgehalte, wie sie das Verfahren nach Puntke wiedergibt, sind bei diesem Verfahren nicht bestimmbar. Es wird deutlich, dass dieses Verfahren zwar keine Entwicklung der Packungsdichte wiedergeben kann, jedoch Hinweise auf die Wirksamkeit hohlraumfüllender Feinstoffe gibt.

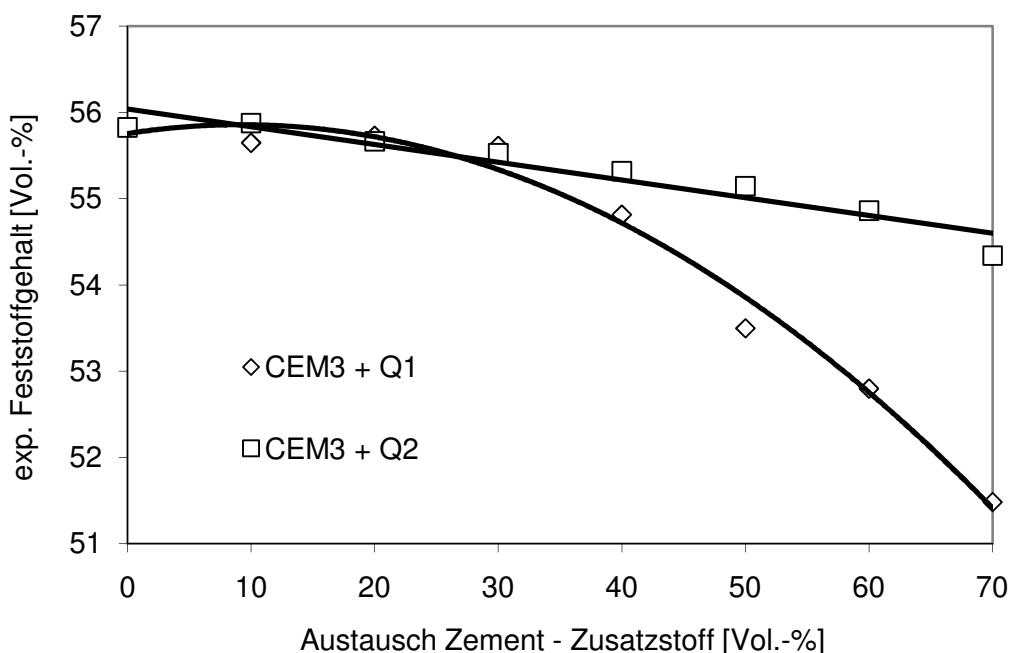


Abbildung 44: Einfluss der Feinstoffe und der Austauschmenge auf den Feststoffgehalt, ermittelt in Anlehnung an das Verfahren zur Bestimmung der Normsteife.

7.1.3. Wasserabsonderung

Über die Wasserabsonderung, die sogenannte Blutneigung, eines Zement-Feinstoffgemisches ergibt sich eine weitere Möglichkeit die Füllerwirkung der Zusatzstoffe zu untersuchen. Wie beim Wasseranspruch auch beeinflussen sich die Füllerwirkung und die erhöhte spezifische Oberfläche gegenseitig.

Während sich bei den Messungen nach 15 min die erhöhte spezifische Oberfläche verringert auf die abgesonderte Wassermenge auswirkt, gewann mit zunehmender Zeit die Füllerwirkung an Einfluss. Bei den Messungen nach 60 und 120 min war insbesondere bei 10 Vol.-% Stoffaustausch die abgesonderte Wassermenge signifikant erhöht. Dieses Verhalten ist konform zu den Ergebnissen zum Feststoffgehalt nach Punkt in Abschnitt 7.1.1.

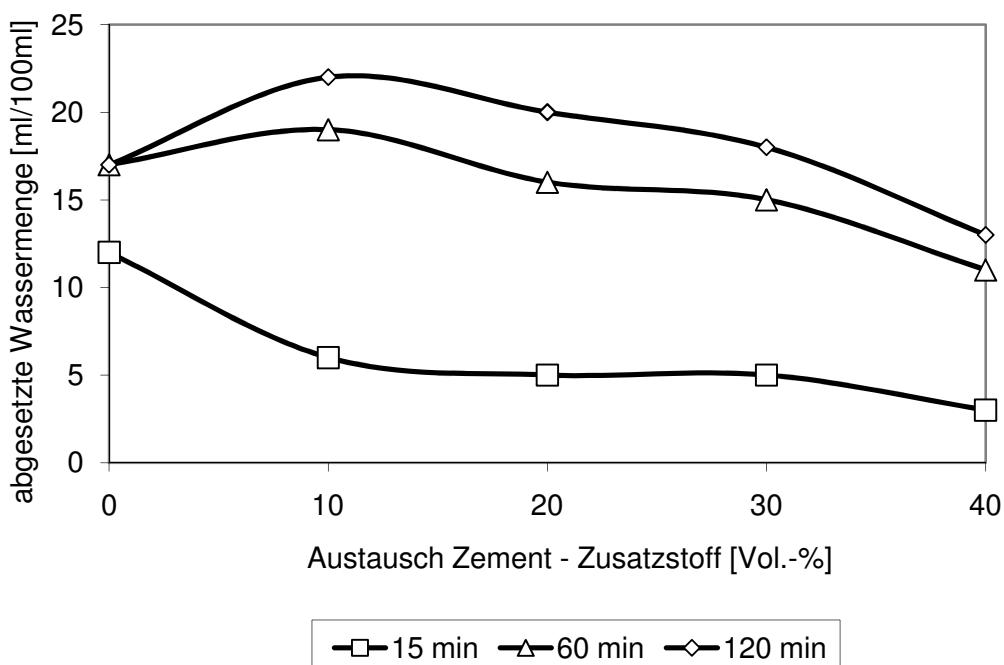


Abbildung 45: Wasserabsonderung nach 15, 60 und 120 min, Zement CEM3 durch zementfeines Quarzmehl Q2 ersetzt (Fall 2).

Beim Austausch des Zements CEM3 durch das nur geringfügig feinere Quarzmehl Q2 verringerte sich nach 15 min die abgesonderte Wassermenge von 12 ml/100ml auf 6 ml/100ml. Dies traf für alle Austauschvolumen bis zu 40 Vol.-% zu. Nach 60 min nahm dann die gegenüber dem reinen Zement abgesonderte Wassermenge deutlich zu, siehe Abbildung 45. Dieses Verhalten ist einerseits der geringfügig steigenden Packungsdichte sowie dem beim reinen Quarzmehl Q2 geringeren Wasseranspruch zuzuschreiben. Die abgesonderte Wassermenge des reinen Zements betrug nach 60 und 120 min 17 ml/100ml. Beim Austausch des Zements durch 10 Vol.-% erhöhte sich diese Menge auf bis zu 22 ml/100ml nach 120 min. Bei weiterem Austausch des Zements lag die abgesonderte Wassermenge nach 120 min über dem Niveau des reinen Zements, um dann mit 40 Vol.-% Austausch mit

13 ml/100ml signifikant kleiner zu werden. An diesem Punkt überwog die erhöhte spez. Oberfläche, die zunehmend Wasser an sich bindet.

In Abbildung 46 ist der Einfluss des hochfeinen Quarzmehls Q1 auf die Wasserabsonderung des Zement-Feinstoff-Gemisches dargestellt. Anders als bei dem „zementfeinen“ Quarzmehl Q2 waren auch nach 60 min trotz der nachgewiesenen Füllerwirkung des Füllstoffes Q1 noch keine über dem Niveau des reinen Zements abgesonderten Wassermengen messbar. Die abgesonderte Wassermenge wurde durch das Quarzmehl signifikant reduziert. Erst nach 120 min, wenn das Wasser bis zur Oberfläche aufsteigen konnte, machte sich bei einer Austauschmenge von 10 Vol.-% der Füllereffekt des Feinstoffes bemerkbar. Die abgesonderte Wassermenge lag mit 19 ml/100ml über der des reinen Zements mit 17 ml/100ml. Bei weiterem volumengleichen Stoffaustausch verringerte sich die abgesonderte Wassermenge wieder zunehmend. Dieser Effekt ist der stark zunehmenden spezifischen Oberfläche zuzuschreiben.

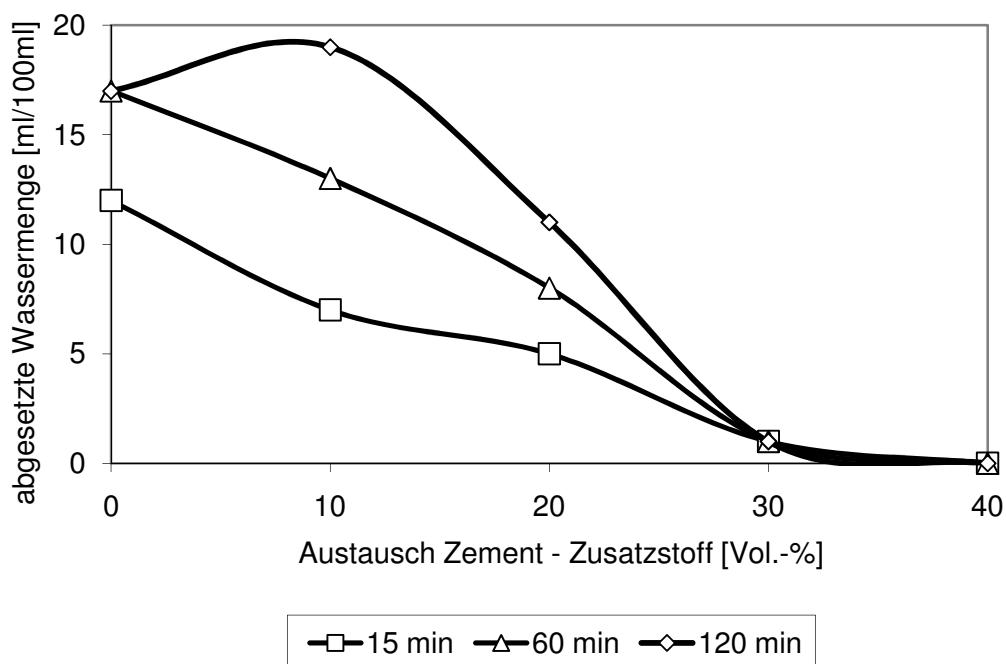


Abbildung 46: Wasserabsonderung nach 15, 60 und 120 min, Zement CEM3 durch Füllstoff Quarzmehl Q1 ersetzt (Fall 1).

Die Ergebnisse bestätigen die theoretischen Vor betrachtungen in Abschnitt 6 und damit die Eignung der Zusatzstoffe für die weiteren Untersuchungen. Mit Hilfe der Untersuchungen zur Wirksamkeit der Füllstoffe konnte nachgewiesen werden, dass das hochfeine Quarzmehl Q1, insbesondere bei bis zu 40 Vol.-% Austauschvolumen, in der Lage ist die Hohlräume zu füllen und die Packungsdichte effektiv zu erhöhen. Damit kann das Wasser eingespart oder durch die Verdrängung aus den Hohlräumen zur Gleitfilmbildung zur Verfügung gestellt werden.

Es stellte sich nun die Frage wie sich die Hohlraumfüllung und damit die Packungsdichte im Zusammenhang mit der spezifischen Oberfläche auf die Viskosität auswirken.

7.2. Einfluss auf rheologische Eigenschaften

7.2.1. Viskosität

Um zu untersuchen, wie sich die Granulometrie, verändert durch die Zugabe der Quarzmehle Q1 und Q2 zum Zement CEM3, auf das Fließverhalten und mögliche Agglomerationen in der Feinstoffsuspension auswirkt, wurde die Viskosität gemessen. Darüber hinaus liefern die Messwerte pragmatische Erkenntnisse über das mögliche Austauschvolumen, d.h. ab welchem Füll- oder Feinstoffvolumen sich die Viskosität signifikant erhöht und die Verarbeitbarkeit des Zement-Feinstoffleims schlechter wird. Darüber hinaus ist die Fließgrenze des Leims die entscheidende Kenngröße zur Verdichtbarkeit. D.h., je höher die Fließgrenze ist, desto größer werden die ausrüttelbaren Luftporen; siehe auch [Vo2006].

Das volumetrische Wasser-Feststoff-Verhältnis betrug bei allen Suspensionen einheitlich 0,50, um eine Sättigung des Feinstoffgemischs mit Wasser sicherzustellen. Darüber hinaus wurden, um die Feinstoffe ausreichend zu dispergieren, einheitlich 2,0 Vol.-% Fließmittel und 0,5 Vol.-% Verzögerer in die Suspension hinzugegeben. Kapillarkräfte als zwischenpartikuläre Kräfte konnten so bei den Ausgangssuspensionen, bestehend aus Zement und Wasser, und Suspensionen vergleichbarer Feinheit aufgrund der ausreichend großen Wasserfilmdicke von rd. 0,55 µm ausgeschlossen werden.

Abbildung 47 zeigt den Einfluss der Quarzmehle Q1 und Q2 mit zunehmender Austauschmenge auf die relative Viskosität der Suspensionen. Die Untersuchungen ergaben, dass sich das „zementfeine“ Quarzmehl Q2 nicht bzw. geringfügig verringert auf die relative Viskosität auswirkte. Bei der Zugabe des hochfeinen Quarzmehls Q1 war ebenfalls bis zu einer Austauschmenge von rd. 50 Vol.-% kein signifikanter Anstieg der relativen Viskosität messbar. Erst danach stieg die relative Viskosität von anfangs rd. 0,20 bis 0,40 Pa*s auf bis zu 1,4 Pa*s stark an. Die gemessene wie auch die rechnerische Packungsdichte waren ab einer Austauschmenge von 50 Vol.-% geringer als die des Zements, siehe Abschnitt 7.1.1.

Veränderte elektrostatische Abstoßungskräfte und van der Waals'sche Anziehungskräfte scheinen bei diesen Versuchen (mit Fließmittel) demnach bei einer ausreichenden Wasserfilmdicke bzw. bei einer erhöhten Packungsdichte nur von untergeordneter Bedeutung zu sein.

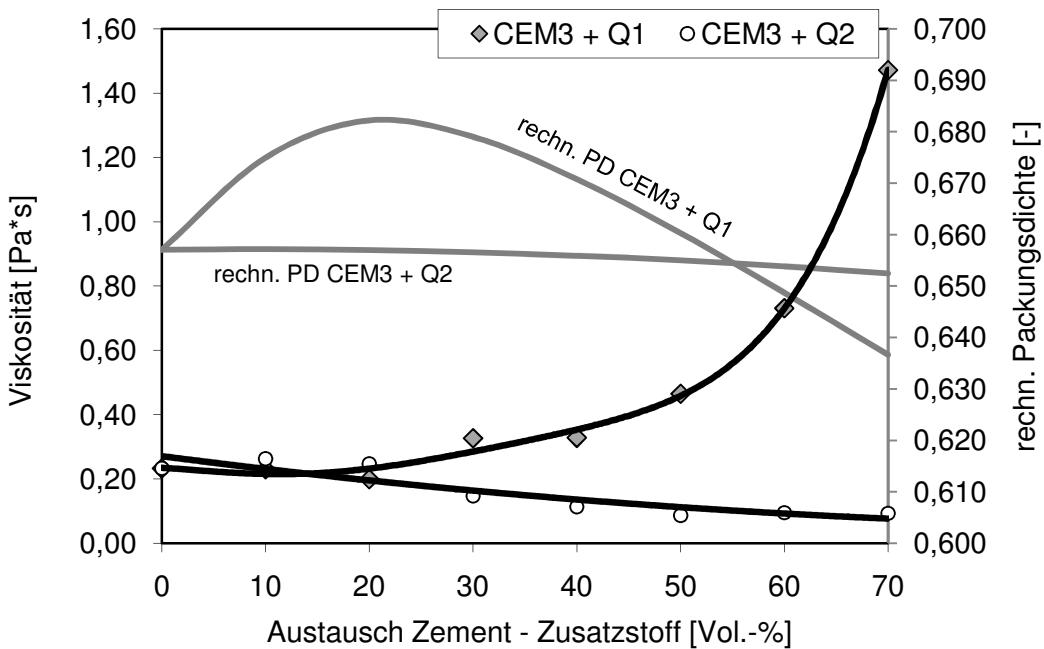


Abbildung 47: Einfluss der Feinstoffe auf die Viskosität, $w/F_v=0,50$, 2 Vol.-% Fließmittel; gemeinsame Darstellung mit der rechnerischen Packungsdichte (PD).

Eine durch Agglomeration von Partikeln verminderte Fließfähigkeit einer Suspension wird durch die Fließgrenze wiedergegeben [Fr2002]. Werden die für eine Dispergierung der feinen Partikel aufzubringenden Scherkräfte größer, nimmt die Fließgrenze zu. Wie bei der Bestimmung der Viskosität zeigte sich auch bei der Messung der Fließgrenze eine deutliche Abhängigkeit von der Feinheit der Suspensionen wie aber auch von der Packungsdichte. Im Bereich einer gegenüber dem Zement gleichen oder erhöhten Packungsdichte (Ersatzmenge: 0 bis 40 Vol.-%, Zement CEM3 durch Q1 ausgetauscht) war, trotz erheblich gestiegener spez. Oberfläche und damit reduzierter Wasserfilmdicke, keine signifikante Änderung der Fließgrenze messbar. Bei darüber hinaus gehenden Gehalten des hochfeinen Quarzmehls Q1 nahm die Fließgrenze überproportional zu. Dies ist darauf zurückzuführen das mit zunehmendem Füllstoffgehalt die Packungsdichte, der Partikelabstand und die Wasserfilmdicke geringer werden, wodurch die interpartikulären Haftkräfte deutlich an Wirkung zunehmen.

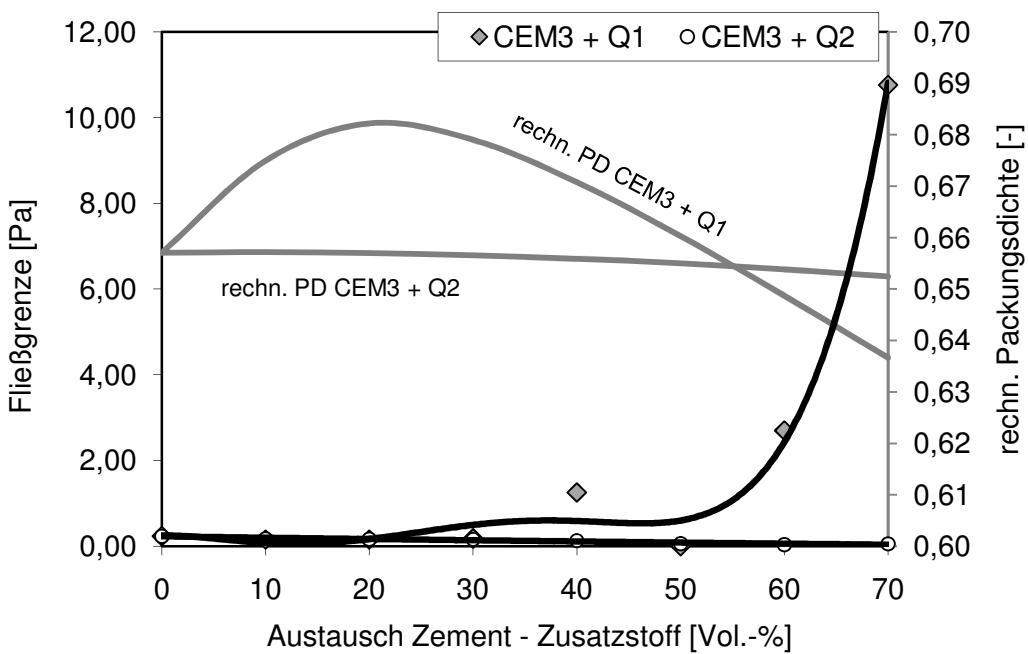


Abbildung 48: Einfluss der Feinstoffe auf die Fließgrenze, $w/F_v=0,50$, 2 Vol.-% Fließmittel.

Abbildung 49 zeigt anhand der rechnerischen Wasserfilmdicke, dass ab dem Austausch von etwa 40 Vol.-% und mehr, die Wasserfilmdicke unter die nach Krell [Kre1985] physikalisch für die Normsteife von Zementen notwendige Wasserfilmdicke von $0,22 \mu\text{m}$ (rd. $0,2 \mu\text{m}$) gesunken ist. Unterhalb dieser Wasserfilmdicke, insbesondere ab $0,15 \mu\text{m}$, ist demzufolge mit dem in dieser Arbeit verwendetem Fließmittel und den Quarzmehlen Q1 und Q2 mit einer deutlichen Zunahme der Viskosität zu rechnen.

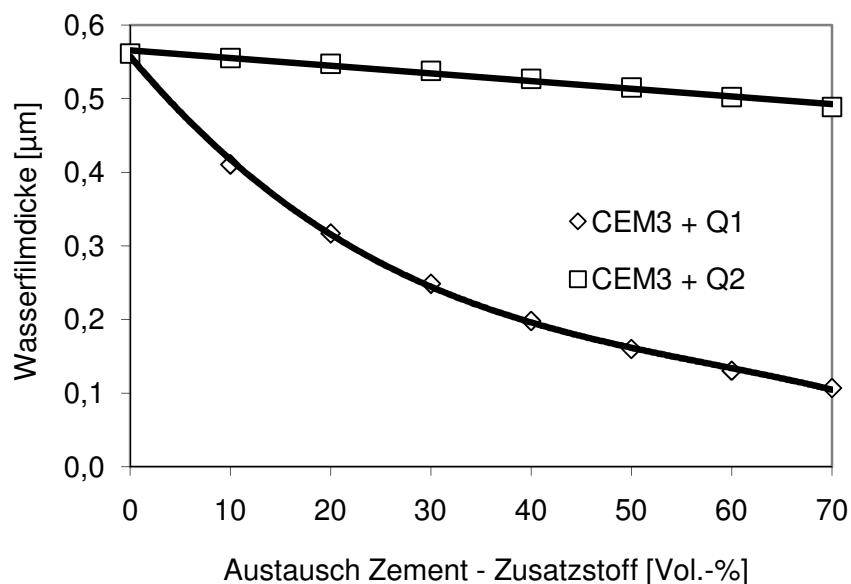


Abbildung 49: Rechnerische Wasserfilmdicke für Feinstoffsuspensionen mit 50 Vol.-% Feststoffgehalt.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse aus den rheologischen Untersuchungen und die Übertragung auf die Wasserfilmdicke zeigt übereinstimmend mit [Kre1985;Res2001;KrFr2002], dass die Wasserfilmdicke einen entscheidenden Einfluss auf die Viskosität hat. In Abbildung 50 und Abbildung 51 ist der Einfluss der Wasserfilmdicke der geprüften Feinstoffmischungen dargestellt.

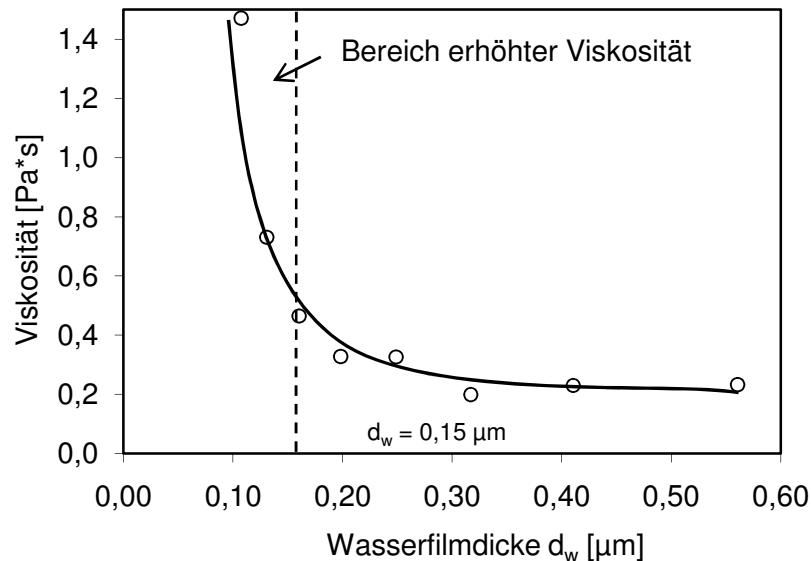


Abbildung 50: Einfluss der Wasserfilmdicke auf die Viskosität von Zement-Feinkorn-Gemischen, Austausch des CEM3 gegen Q1 oder Q2.

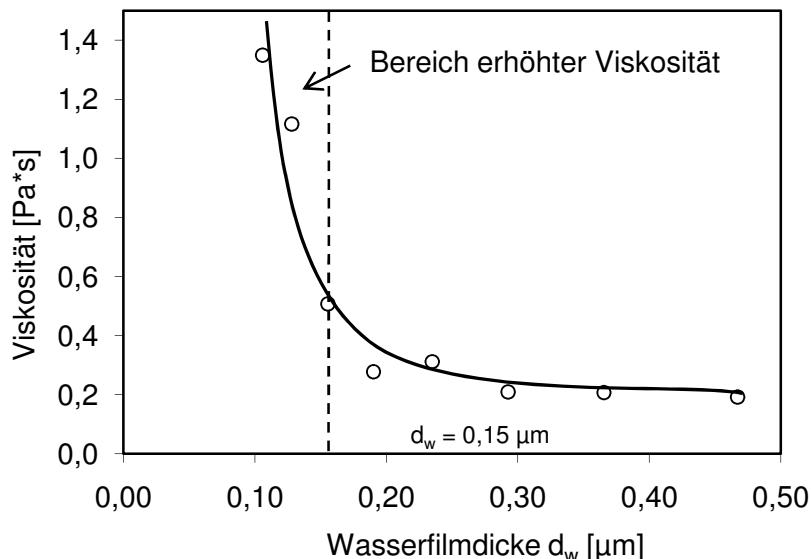


Abbildung 51: Einfluss der Wasserfilmdicke auf die Viskosität inerter Feinkorngemische, Kombination Q1 und Q2.

Während Abbildung 50 den Einfluss der Wasserfilmdicke bei den Feinstoffgemischen mit CEM und Q1 und Q2 zeigt, wurde in Abbildung 51 das zementfeine Quarzmehl Q2 stellvertretend für den Zement CEM3 durch das hochfeine Quarzmehl Q1 ersetzt. Beide Verläufe sind praktisch gleich und zeigen, dass unterhalb einer Wasserfilmdicke von rd. 0,2 µm die Viskosität, vermutlich durch erhöhte interpartikuläre Kräfte, deutlich ansteigt.

Aus den Untersuchungen kann geschlussfolgert werden, dass Partikelgemische mit stark zunehmender Feinheit zu Agglomerationen neigen, sobald der Bereich, einer gegenüber dem Ausgangsgemisch, erhöhten oder gleichen Packungsdichte verlassen wird.

Unabhängig von den chemischen Eigenschaften des Feinstoffs nahm unterhalb einer Wasserfilmdicke von rd. 0,2 µm die Viskosität deutlich zu.

7.3. Einfluss auf das Zementsteingefüge

Die Einflüsse auf das Zementsteingefüge, wurden wie in Abschnitt 5.3.1 beschrieben, an Prüfkörpern mit unterschiedlichen Wassergehalten untersucht. In den folgenden Abschnitten ist die Darstellung der Ergebnisse in zwei Teile aufgeteilt. Im ersten Teil werden jeweils die Untersuchungen an den Zementsteinen mit dem nach dem Puntke-Verfahren [Pun2002] minimal notwendigen Wassergehalt – zur Sättigung aller Poren und zum Aufbau einer Mindestwasserfilmdicke – dargestellt. Tabelle 13 fasst für diesen Teil die Mischungsverhältnisse je 1 dm³, die experimentelle und die rechnerische Packungsdichte sowie den Wasserfeinstoffwert w/F_v und den resultierenden w/z-Wert zusammen. Die rechnerischen Packungsdichten in Tabelle 13 sind unabhängig vom Wassergehalt und damit relevant für alle weiteren Auswertungen – auch auf Basis der „üblichen w/z-Werte“.

Tabelle 13: Mischungsverhältnisse der Zementeime mit dem nach Puntke **minimal notwendigen Wassergehalt**; Wassergehalt richtet sich nach Hohlraumgehalt; Angaben je 1 dm³.

CEM3 ausgetauscht durch Q1									
Austauschvolumen ¹⁾	Vol.-%	0	10	20	30	40	50	60	70
rechn. Packungsdichte nach Schwanda	-	0,657	0,675	0,682	0,679	0,671	0,660	0,649	0,637
exp. Packungsdichte nach Puntke	-	0,606	0,630	0,638	0,626	0,611	0,606	0,606	0,606
w/F _v -Wert	-	0,394	0,370	0,362	0,374	0,389	0,394	0,394	0,394
res. w/z-Wert	-	0,210	0,211	0,229	0,276	0,342	0,420	0,525	0,700
Zementmenge	kg/dm ³	1,878	1,757	1,581	1,358	1,136	0,939	0,751	0,563
Zusatzstoff	kg/dm ³	0,000	0,167	0,338	0,497	0,648	0,803	0,963	1,124
Wasser	kg/dm ³	0,394	0,370	0,362	0,374	0,389	0,394	0,394	0,394
Fließmittel	kg/dm ³								

CEM3 ausgetauscht durch Q2									
Austauschvolumen	Vol.-%	0	10	20	30	40	50	60	70
rechn. Packungsdichte nach Schwanda	-	0,657	0,657	0,657	0,657	0,656	0,655	0,654	0,652
exp. Packungsdichte nach Puntke	-	0,606	0,616	0,618	0,617	0,613	0,606	0,606	0,606
w/F _v -Wert	-	0,394	0,384	0,382	0,383	0,387	0,394	0,394	0,394
res. w/z-Wert	-	0,210	0,224	0,250	0,286	0,339	0,420	0,525	0,700
Zementmenge	kg/dm ³	1,878	1,718	1,532	1,339	1,140	0,939	0,751	0,563
Zusatzstoff	kg/dm ³	0,000	0,163	0,327	0,490	0,650	0,803	0,963	1,124
Wasser	kg/dm ³	0,394	0,384	0,382	0,383	0,387	0,394	0,394	0,394
Fließmittel	kg/dm ³								

¹⁾CEM3 wurde volumengleich durch Q1 bzw. Q2 ausgetauscht

Der Wasserfeinstoffwert w/F_v wurde bei der Suspension mit dem Quarzmehl Q1 jedoch auf maximal 0,394 begrenzt, um eine Vergleichbarkeit der w/z -Werte und der w/F_v -Werte zwischen den beiden unterschiedlich zusammengesetzten Suspensionen zu gewährleisten. Der Zement wurde bis zu 70 Vol.-% ersetzt. Bei einem Zementtausch von 0 bis 40 Vol.-% durch das hochfeine Quarzmehl Q1 lag der w/F_v -Wert zwischen rd. 0,362 (20 Vol.-% Austausch) und 0,394 (0 Vol.-% Austausch). Darüber hinaus wurde er trotz abnehmender Packungsdichte und damit erhöhtem Wasseranspruch auf 0,394 beschränkt, um die Mischungen mit Q1 und Q2 auf Basis der Wasserfeinstoffwerte und der resultierenden w/z -Werte vergleichen zu können. Bei Verwendung des zementfeinen Quarzmehls Q2 lag der Wasserfeinstoffwert w/F_v aufgrund der geringeren Packungsdichte bei gleichen Austauschmengen zwischen 0,382 und 0,394. Ergänzend dazu zeigt Abbildung 52 die Entwicklung des resultierenden w/z -Wertes dieser beiden Versuchsreihen. Hier nahm der resultierende w/z -Wert mit zunehmender Zementtauschmenge jeweils von 0,21 auf 0,70 zu. Die Kurvenverläufe waren proportional zueinander. Dies ermöglichte den direkten Vergleich der physikalischen Füllerwirkung unabhängig vom w/z -Wert.

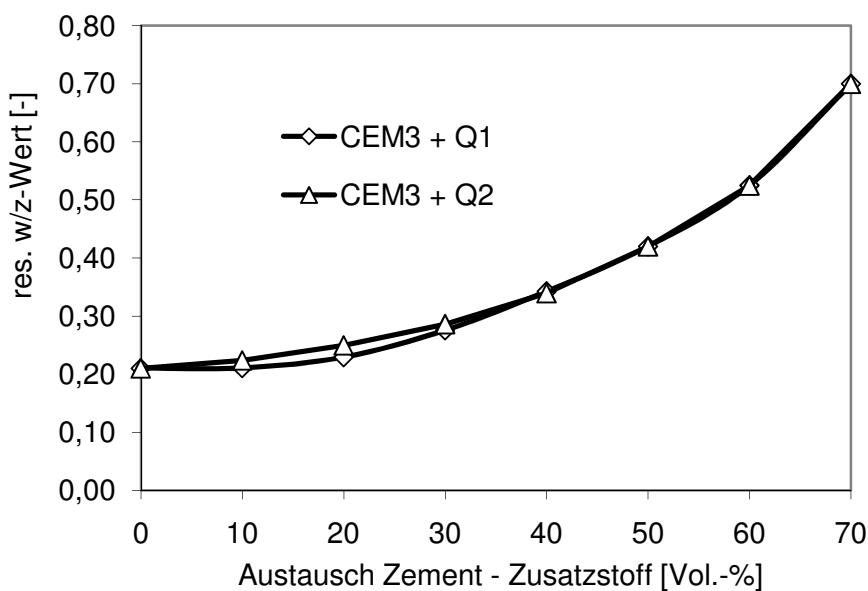


Abbildung 52: Entwicklung des resultierenden w/z -Wertes in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Zementmenge.

Tabelle 14 zeigt die Mischungsverhältnisse der Zementleime für die Untersuchungen am Zementstein mit „üblichen w/z -Werten“. Die Tabelle ist in Fall A und Fall B für die Ausgangs-Wasserzementwerte (w/z_0) 0,25, 0,35 und 0,50 unterteilt. Die Mischungsverhältnisse beziehen sich auch hier auf 1 dm³.

Tabelle 14: Mischungsverhältnisse der in den folgenden Abschnitten untersuchten Zementsteine mit **üblichen w/z-Werten**; unterteilt nach Fall A und Fall B; Angaben je 1 dm³.

	Einheit	Fall A					Fall B				
		w/z-Wert zunehmend			w/F _v -Wert konstant		w/z-Wert konstant			w/F _v -Wert abnehmend	
w/z ₀ -Wert	-	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Austauschvolumen ²⁾	Vol.-%	0	10	20	30	40	0	10	20	30	40
res. w/z-Wert	-	0,250	0,278	0,313	0,357	0,417	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
res. w/F _v -Wert	-	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,698	0,620	0,543	0,465
Zement	kg/dm ³	1,746	1,572	1,397	1,223	1,048	1,746	1,644	1,531	1,407	1,270
Zusatzstoff	kg/dm ³	0,000	0,149	0,299	0,448	0,597	0,000	0,156	0,327	0,515	0,724
Wasser	kg/dm ³	0,437	0,437	0,437	0,437	0,437	0,437	0,411	0,383	0,352	0,317
Fließmittel	kg/dm ³										

w/z ₀ -Wert	-	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Austauschvolumen ²⁾	Vol.-%	0	10	20	30	40	0	10	20	30	40
res. w/z-Wert	-	0,350	0,389	0,438	0,500	0,583	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350
res. w/F _v -Wert	-	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085	0,977	0,868	0,760	0,651
Zement	kg/dm ³	1,487	1,338	1,189	1,041	0,892	1,487	1,412	1,328	1,233	1,127
Zusatzstoff	kg/dm ³	0,000	0,127	0,254	0,381	0,508	0,000	0,134	0,284	0,452	0,642
Wasser	kg/dm ³	0,520	0,520	0,520	0,520	0,520	0,520	0,494	0,465	0,432	0,394
Fließmittel	kg/dm ³										

w/z ₀ -Wert	-	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Austauschvolumen ²⁾	Vol.-%	0	10	20	30	40	0	10	20	30	40
res. w/z-Wert	-	0,500	0,556	0,625	0,714	0,833	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
res. w/F _v -Wert	-	1,550	1,550	1,550	1,550	1,550	1,550	1,395	1,240	1,085	0,930
Zement	kg/dm ³	1,216	1,094	0,973	0,851	0,729	1,216	1,165	1,107	1,041	0,964
Zusatzstoff	kg/dm ³	0,000	0,104	0,208	0,312	0,416	0,000	0,111	0,237	0,381	0,549
Wasser	kg/dm ³	0,608	0,608	0,608	0,608	0,608	0,608	0,582	0,554	0,520	0,482
Fließmittel	kg/dm ³										

²⁾ CEM3 oder CEM4 wurde volumengleich durch Zusatzstoff ausgetauscht

7.3.1. Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde an prismatischen Prüfkörpern 40x40x160 mm untersucht. Jeder der dargestellten Mittelwerte steht für 6 Einzelwerte, die statistisch hinsichtlich Standardabweichung und Signifikanz ausgewertet wurden. Einzelwerte außerhalb der Signifikanzgrenze wurden nicht in die Mittelwertberechnung einbezogen.

7.3.1.1. Grenzwertbetrachtung bei minimal notwendigem Wassergehalt

Abbildung 53 zeigt den Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der rechnerischen Packungsdichte bei minimal notwendigem Wassergehalt - für den Zement CEM3, einmal ersetzt durch das hochfeine, Hohlraum füllende Quarzmehl Q1 und einmal durch das „zementfeine“ Quarzmehl Q2.

Am Beispiel des hochfeinen Quarzmehls Q1 führte die Erhöhung der rechnerischen Packungsdichte um 3,5% beim Austausch von 10 Vol.-% Zement bei praktisch gleichem res. w/z-Wert zu einer signifikanten Erhöhung der Druckfestigkeit. Sie stieg um 20% von 117 N/mm² auf 140 N/mm² an. Danach nahm sie – trotz weiter steigender Packungsdichte – nahezu linear ab. Bei rd. 30 Vol.-% Stoffaustausch entsprach die Druckfestigkeit mit rd. 117 N/mm² der des reinen Zementsteins. Der Vergleich der Druckfestigkeiten der Zementsteine, einmal mit dem hochfeinen Quarzmehl Q1 und einmal mit dem zementgleichen Quarzmehl Q2 verdeutlicht den Effekt der erhöhten Packungsdichte auf die Druckfestigkeit.

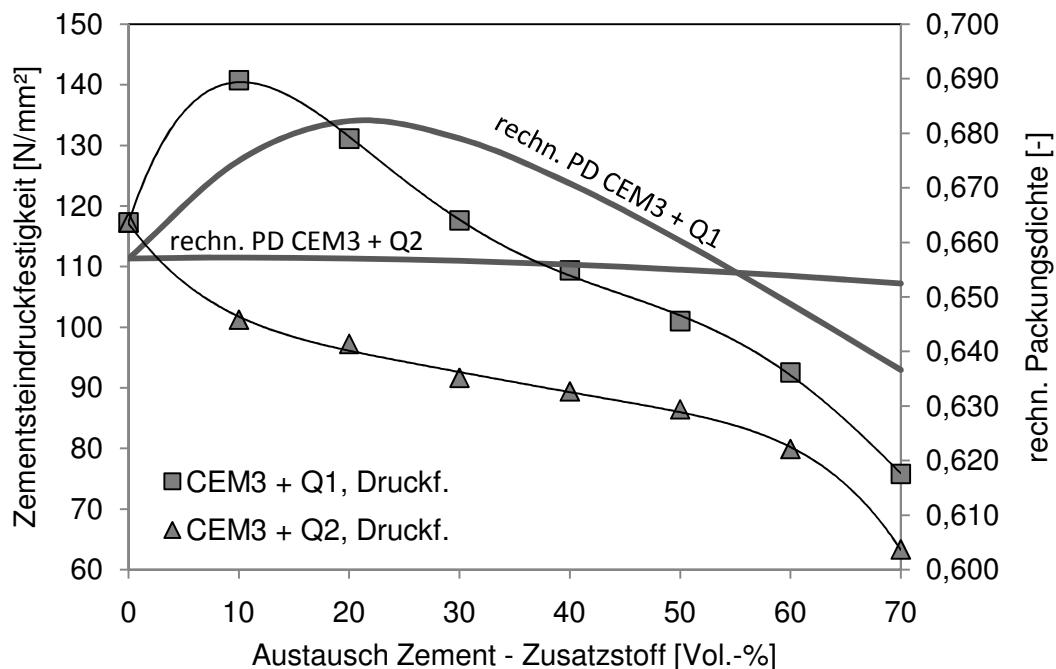


Abbildung 53: Entwicklung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der rechnerischen Packungsdichte.

Der Austausch des Zements durch das gleich feine Quarzmehl Q2 verringerte die Druckfestigkeit nahezu linear. Zwar stieg die experimentell bestimmte Packungsdichte beim Austausch des Zements von 0,606 auf 0,618 leicht an (siehe Tabelle 13 und Abschnitt 7.1.1), dennoch wirkte sich diese geringfügige Steigerung um weniger als 2 % nicht messbar auf die Druckfestigkeit aus.

Vorherrschend war hier die Verringerung des Hydratationspotentials durch die Reduktion des Zementgehaltes bei praktisch unverändertem Wassergehalt und steigenden w/z-Werts, siehe Abbildung 52. Die Packungsdichte und der damit einhergehende Wassergehalt haben in der Gesamtheit betrachtet einen nur geringfügigen Einfluss auf den w/z-Wert.

7.3.1.2. Entwicklung der Druckfestigkeit bei üblichen Wassergehalten

Im Fall A war bei den Ausgangswasserzementwerten $w/z_0 = 0,35$ und $0,50$ der resultierende w/z-Wert die entscheidende Größe ist. Die Druckfestigkeit nahm umgekehrt proportional mit zunehmendem Zementtausch (bis 40 Vol.-%) ab. Sie verringerte sich bei $w/z_0 = 0,35$ und $0,50$ jeweils um rd. 30%, siehe Abbildung 54. Dabei spielte die Feinheit des Zusatzstoffes bei konstantem Wassergehalt vorerst keine Rolle.

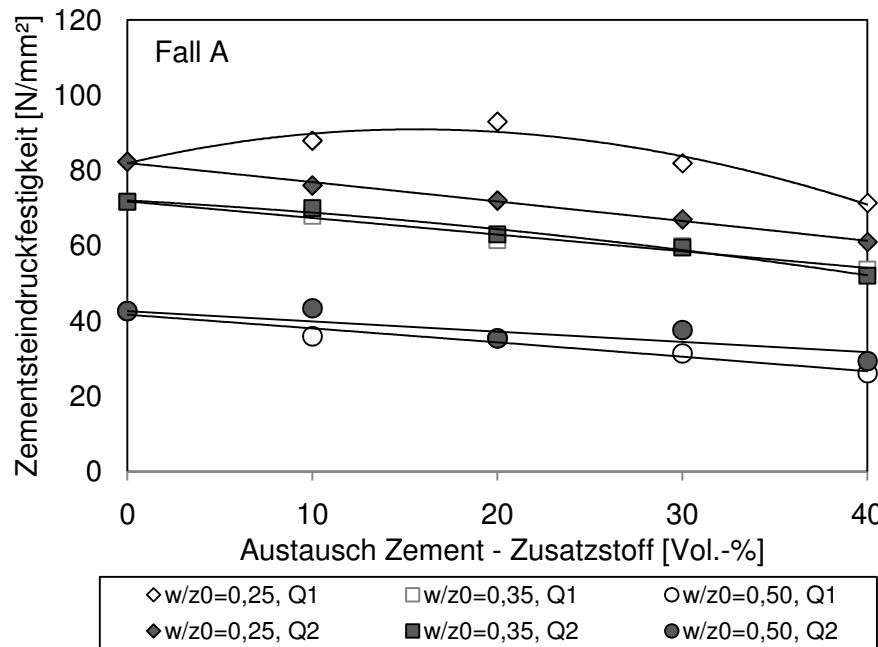


Abbildung 54: Einfluss der Feinheit der Quarzmehle Q1 und Q2 auf die Druckfestigkeit bei unverändertem Wassergehalt, Fall A: w/z zunehmend, w/F_v konstant.

Erst bei einem w/z_0 von $0,25$ zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Packungsdichte auf die Druckfestigkeit des Zementsteins. Bei bis zu 20 Vol.-% Austausch durch das hochfeine Quarzmehl Q1 erhöhte sich die Druckfestigkeit von 82 N/mm^2 auf 93 N/mm^2 um rd. 13%, um dann bei weiterem Zementtausch wieder abzunehmen. Die experimentelle wie auch die rechnerische Packungsdichte waren bei 20 Vol.-% Austausch am größten, siehe Tabelle 13 auf Seite 88. Im Vergleich dazu verringerte sich die Druckfestigkeit, wenn der Zement CEM3 durch das „zementfeine“ Quarzmehl Q2 ausgetauscht wurde. Das Festigkeitsmaximum kann demzufolge mit einem dichteren Gefüge erklärt werden.

In der Versuchsreihe B (Fall B) blieb der w/z-Wert konstant. D.h., mit abnehmendem Zementgehalt wurde auch der Wassergehalt verringert und der Wasserfeinstoffwert w/F_v nahm ab. Durch die Verringerung des Wassergehaltes bei unverändertem Feststoffvolumen verringerte sich die Wasserfilmdicke um alle Partikel (siehe Abschnitt 6.5, Seite 70). Bei dem w/z₀ = 0,50 nahm die Druckfestigkeit beim Austausch mit Q1 und Q2 in beiden Fällen zu und es zeigte sich deutlich die Wirkung der Erhöhung der Kontaktstellen durch die Verringerung der Wasserfilmdicke.

Ab einem w/z-Wert von 0,35 nahm die Druckfestigkeit der Zement-Feinstoff-Gemische mit dem Quarzmehl Q2 nur noch geringfügig zu und stagnierte auf dem Niveau des reinen Zements.

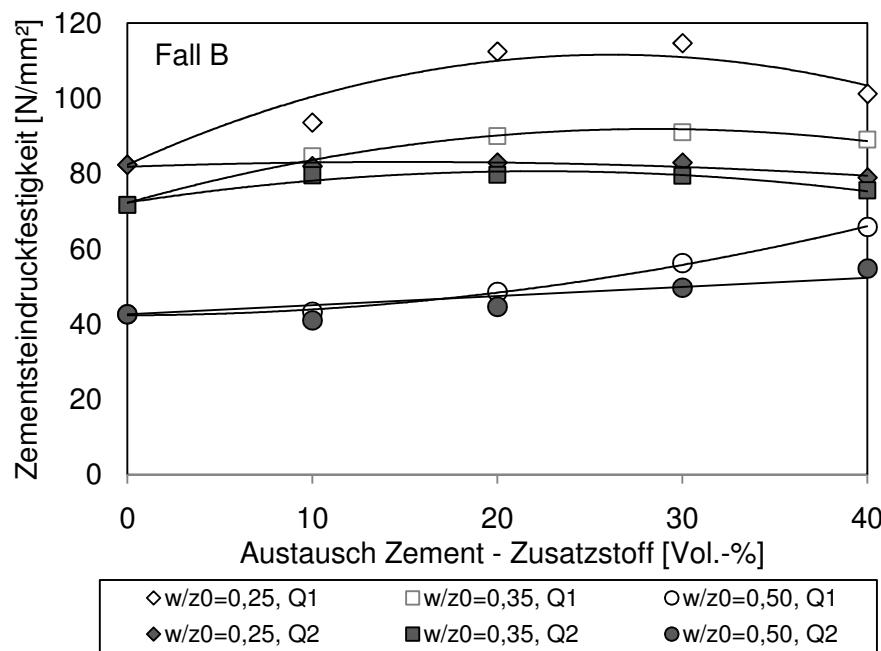


Abbildung 55: Einfluss der Feinheit der Quarzmehle Q1 und Q2 auf die Druckfestigkeit bei proportional zum Zementgehalt abnehmendem Wassergehalt, Fall B: w/z konstant, w/F_v abnehmend.

Beim Austausch durch das hochfeine Quarzmehl Q1 wurde insbesondere bei den w/z₀ von 0,25 und 0,35 der Effekt der Füllerwirkung deutlich. Die Druckfestigkeit folgte ab w/z₀ = 0,35 und niedriger zunehmend der Funktion der Packungsdichte und nahm bei w/z₀ = 0,25 im Bereich von 20 bis 30 Vol.-% Austausch um bis zu 38 % zu. Bei w/z₀ = 0,35 war dieser Effekt ebenfalls noch messbar, die Erhöhung der Druckfestigkeit um 28% jedoch weniger ausgeprägt. D.h., erst bei ausreichend geringen Wasserfilmdicken wird die Wirkung einer gesteigerten Packungsdichte auf die Zementsteinfestigkeit deutlich.

7.3.2. Gesamtporengehalt

Die Gefügedichte des erhärteten Zementsteins hängt zum einen von der Raumausfüllung durch Reaktionsprodukte des Zements ab. Zum anderen wird die Gefügedichte aber auch durch die Packungsdichte wesentlich mitbestimmt, wie Versuche in [Tei2004] zeigen. Für eine vollständige Hydratation werden rd. 35 bis 40 M.-% des Zements an Wasser benötigt. Davon werden rd. 25 M.-% chemisch und 10 bis 15 M.-% physikalisch gebunden. Darüber hinaus gehende Wassermengen führen zur Ausbildung eines Kapillarporensystems mit Porengrößen zwischen 30 nm und 1 mm, siehe Abschnitt 2.2.2.1.

Die im Folgenden beschriebene Gesamtporosität P_{G28} gibt den Anteil der Poren, bestehend aus den Gel-, Kapillar- und Schrumpfporen, in einem sehr weiten Porengrößenbereich an, die an 28 Tage alten Prüfkörpern mittels der Quecksilber-Hochdruckporosimetrie gemessen wurden. Dabei bleibt die Porenstruktur vorerst unberücksichtigt. Sie wird in Abschnitt 7.3.3 näher behandelt.

7.3.2.1. Grenzwertbetrachtung bei minimal notwendigem Wassergehalt

Betrachtet man in Abbildung 56 den Einfluss der Quarzmehle auf die Gesamtporosität, lässt sich zunächst ein nur geringer Einfluss beider Feinstoffe feststellen. Während beim Austausch des Zements durch das gleich feine Quarzmehl Q2 der Gesamtporengehalt bis hin zu einer Austauschmenge von rd. 50 Vol.-% praktisch nicht verändert wurde, verringerte sich die Gesamtporosität bei den Leimen mit dem hochfeinen Quarzmehl Q1 umgekehrt proportional zur rechnerischen Packungsdichte. D.h., mit zunehmender Packungsdichte nahm die Gesamtporosität ab, um dann mit abnehmender Packungsdichte wieder zuzunehmen. Das Minimum wurde bei 20 Vol.-% Austauschmenge erreicht. Hier ist die rechnerische wie auch die experimentell bestimmte Packungsdichte am größten. Bei weiterem Austausch des Zements durch das Quarzmehl Q1 nahm die Gesamtporosität leicht zu. Ab einer Austauschmenge von 50 Vol.-% war ein signifikanter Anstieg der Gesamtporosität bei beiden Quarzmehlen zu verzeichnen.

Tendenziell ähnlich verhielten sich auch die Kapillarporengehalte. Beim Austausch des Zements durch das Quarzmehl Q2 erhöhte sich der Kapillarporengehalt von 3,3 Vol.-% nahezu proportional zur Austauschmenge auf bis zu 9,0 Vol.-%. Der Austausch des Zements durch das hochfeine Quarzmehl Q1 reduzierte den Kapillarporenanteil bereits bei einer Austauschmenge von 10 Vol.-% signifikant um 75% auf 0,8 Vol.-%. Eine weitere Erhöhung des Feinstoffgehaltes erbrachte zunächst keine weitere signifikante Veränderung des Kapillarporengehalts. Bis zu einer Austauschmenge von 50 Vol.-% schwankte er zwischen 0,4 und 0,8 Vol.-%. Danach nahm er proportional zur Packungsdichte wieder auf Werte bis 1,4 Vol.-% bei 70 Vol.-% Austauschmenge zu.

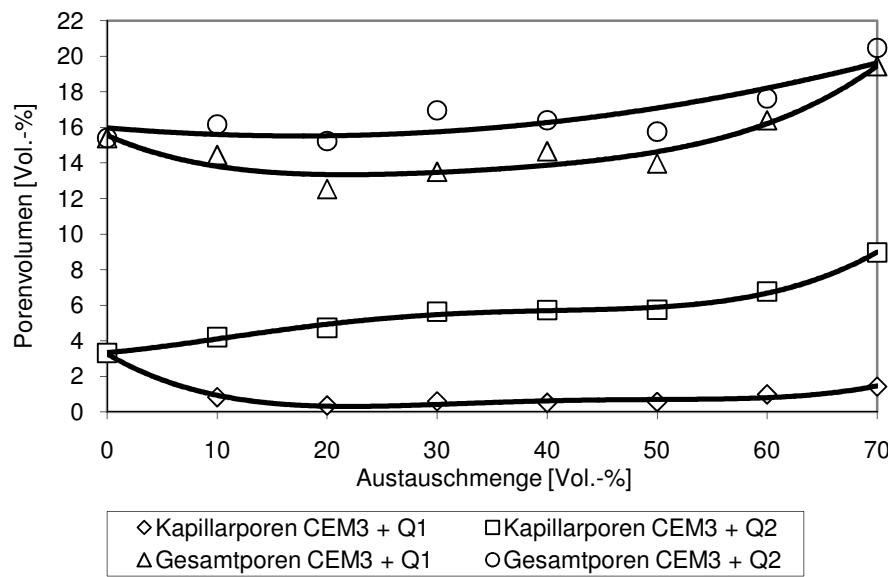


Abbildung 56: Einfluss des Stoffaustauschs auf die Gesamt- und Kapillarporosität bei minimal notwendiger Wassermenge.

7.3.2.2. Einfluss der Feinstoffe auf die Gesamtporosität bei gebräuchlichen Wassergehalten

In den Abbildung 57 und Abbildung 58 ist der Einfluss der Feinstoffe sowie des Wassergehaltes auf die Gesamtporosität P_{G28} in Vol.-% des Prüfkörpers dargestellt.

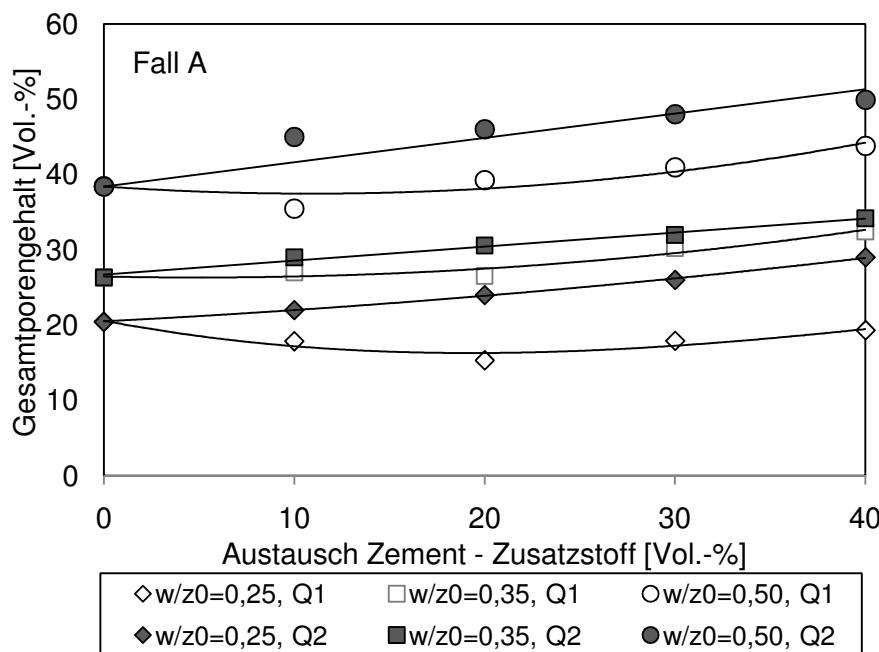


Abbildung 57: Einfluss der Feinheit der Quarzmehle Q1 und Q2 auf den Gesamtporengehalt bei unverändertem Wassergehalt, Fall A: w/z zunehmend, w/F_v konstant.

Fall A bezeichnet den Austausch des Zements durch das jeweilige Quarzmehl bei unverändertem Wassergehalt. Bei allen Versuchsreihen oberhalb des w/z_0 von 0,25 nahm die Gesamtporosität durch den Austausch des Zements zu. Während bei dem w/z_0 von 0,35 kein signifikanter Einfluss der Feinheit des Feinstoffes auf die Gesamtporosität gemessen werden konnte, zeichnete sich bei den w/z_0 ein deutlicher Einfluss der Feinheit des Feinstoffes ab. Bei allen Prüfserien lag die Gesamtporosität der mit dem hochfeinen Quarzmehl hergestellten Prüfkörpern deutlich unter der mit dem zementfeinen Quarzmehl Q2 hergestellten. Bei dem $w/z_0 = 0,25$ wurde die Gesamtporosität durch das hochfeine Quarzmehl Q1 bis zur Austauschmenge von 20 Vol.-% um 25 % sogar deutlich reduziert. Die Gesamtporosität nahm hier von rd. 20 Vol.-% auf rd. 15 Vol.-% ab. Darüber hinaus nahm die Gesamtporosität wieder zu.

Im Fall B wurde die Wassermenge proportional zur Zementmenge reduziert. Hierbei nahm sowohl bei den mit dem zementfeinen wie auch bei den mit dem hochfeinen Quarzmehl hergestellten Prüfkörpern die Gesamtporosität proportional zur Zementmenge ab. Bei den $w/z_0 = 0,35 \dots 0,50$ ergab sich kein signifikanter Einfluss der Feinheit des Quarzmehls auf die Gesamtporosität. Erst bei dem $w/z_0 = 0,25$ war die bei den mit dem hochfeinen Quarzmehl Q1 hergestellten Proben um rd. 3 Vol.-% kleiner als bei den mit dem Quarzmehl Q2 hergestellten.

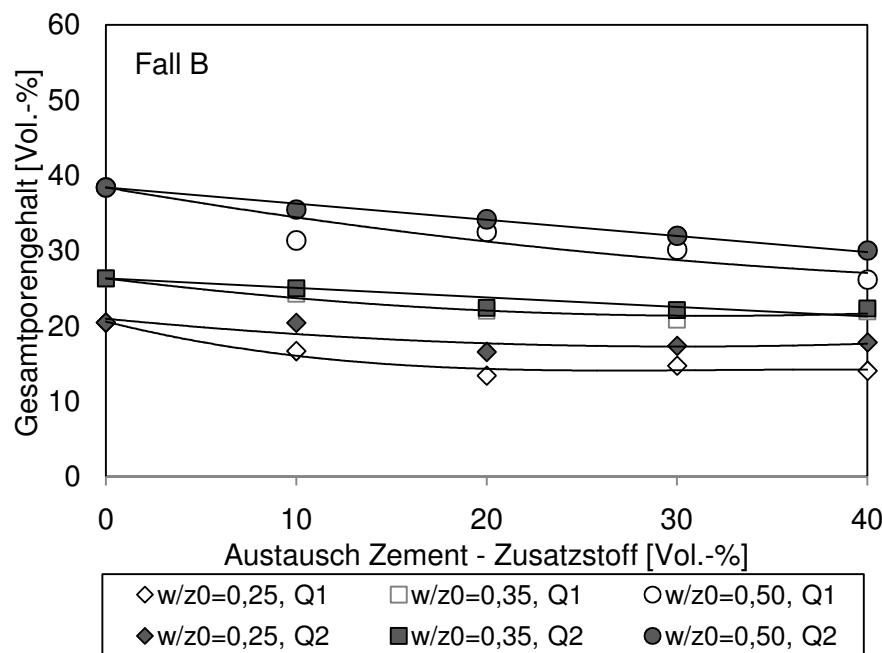


Abbildung 58: Einfluss der Feinheit der Quarzmehle Q1 und Q2 auf den Gesamtporengehalt bei proportional zum Zementgehalt abnehmendem Wassergehalt, Fall B: w/z konstant, w/F_v abnehmend.

Abbildung 59 zeigt vergleichend den Einfluss des Wassergehaltes auf die Gesamtporosität am Beispiel der mit dem hochfeinen Quarzmehl Q1 hergestellten Prüfkörper.

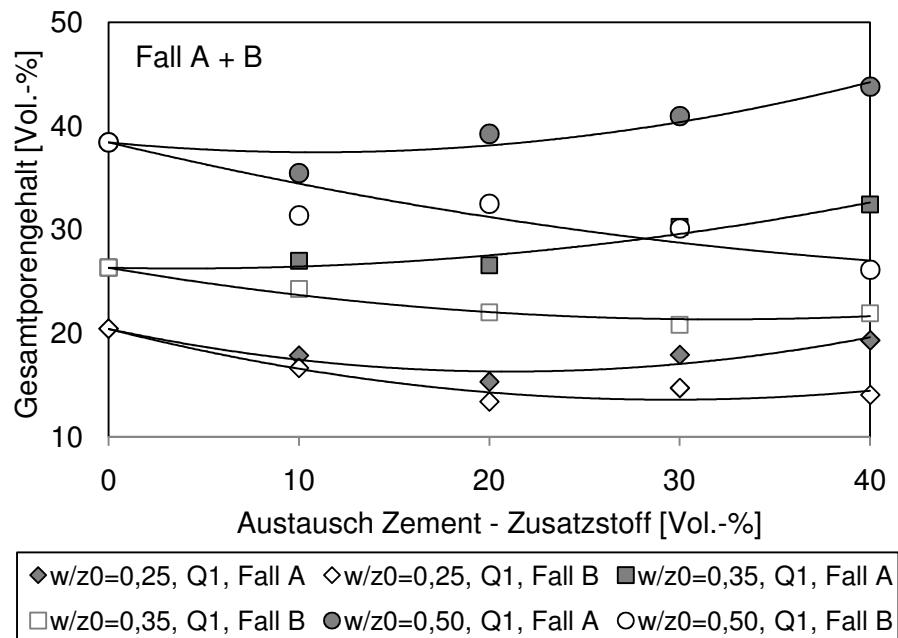


Abbildung 59: Vergleich des Einfluss des Wassergehaltes auf den Gesamtporengehalt beim Austausch des Zements durch das hochfeine Quarzmehl Q1.

Hierbei wird der große Einfluss des Wassergehalts auf die Gefüge verändernde Wirkung des hochfeinen Quarzmehls Q1 deutlich. Im Fall A bleibt der Wassergehalt mit zunehmender Austauschmenge konstant, während er sich im Fall B verringert, siehe Tabelle 14 auf Seite 90. Bei den $w/z_0=0,35\dots0,50$ war der Gesamtporengehalt zwischen beiden Fällen sehr unterschiedlich. Im Fall A war der Gesamtporengehalt beim Austausch von bis zu 40 Vol.-% um 70 % ($w/z_0 = 0,50$) und 52% ($w/z_0 = 0,35$) größer als im Fall B. Die Unterschiede nahmen mit zunehmendem Zementtausch zu. D.h., bei konstantem w/F_v -Wert und damit zunehmendem w/z -Wert war das Quarzmehl nicht in der Lage die Gefügedichtigkeit zu erhöhen, sondern der Gesamtporengehalt erhöhte sich. Zusätzlich wurde durch den hochfeinen Füllstoff das Wasser aus den Hohlräumen verdrängt und reicherte sich im Gleitfilm zwischen den Zementkörnern an. Tabelle 15 fasst die rechn. Wasserfilmdicken beispielhaft für den Austausch von 20 Vol.-% CEM3 durch Q1 zusammen. An diesem Punkt war die rechnerische wie auch die experimentell bestimmte Packungsdichte mit 0,682 am größten. Die rechn. Wasserfilmdicken waren bei dieser Austauschmenge im Fall A rd. 39 % bis 64 % größer als im Fall B.

Tabelle 15: Übersicht zu rechnerischen Wasserfilmdicken d_w für den Austausch des CEM3 durch 20 Vol.-% hochfeines Quarzmehl Q1.

w/z_0	0,25	0,35	0,50
rechn. Wasserfilmdicke d_w Fall A	0,18 µm	0,37 µm	0,64 µm
rechn. Wasserfilmdicke d_w Fall B	0,11 µm	0,24 µm	0,46 µm
Quotient aus $d_{w,Fall\ A} / d_{w,Fall\ B}$	1,39	1,54	1,64

Bei sehr geringen Wassergehalten wie dem $w/z_0=0,25$ waren die Unterschiede zwischen den Fällen deutlich geringer ausgeprägt. Die Differenz in der Gesamtporosität betrug bei 40 Vol.-% Zementtausch nur noch 35 %. Bei der höchsten rechnerisch und experimentell erreichbaren Packungsdichte (20 Vol.-% Austausch durch Q1) war der Gesamtporengehalt im Fall A und B am geringsten. Höhere Austauschmenge führten im Fall A zu steigenden Gesamtporengehalten, während sie im Fall B praktisch unverändert klein blieben.

7.3.3. Kapillarporengehalt und Porenstruktur

Bei der Beschreibung der Gesamtporosität bleibt die Porenstruktur unberücksichtigt. Für die Dauerhaftigkeit der Matrix sowie der Art und den Umfang an Transportvorgängen ist die Porenstruktur, also die Porengrößenverteilung und insbesondere der Gehalt an Kapillarporen, maßgebend. Für die Transportvorgänge ist dabei nur der von außen zugängliche Porenraum von Bedeutung.

7.3.3.1. Kapillarporengehalt

Im Folgenden ist der Einfluss der Feinstoffe und des Wassergehaltes auf den Kapillarporengehalt dargestellt. Dabei wird der hydraulische Radius (siehe Abschnitt 2.2.2.1) zur Einteilung herangezogen.

Zunächst lässt sich feststellen, dass der Kapillarporengehalt tendenziell der Gesamtporosität folgte. Jedoch zeigten sich deutlichere Unterschiede in der Wirkung des hochfeinen Füllstoffs Q1 gegenüber dem zementfeinen Quarzmehl Q2.

Bei unverändertem Wassergehalt (Fall A) nahm beim Austausch des Zements durch das zementfeine Quarzmehl Q2 der Kapillarporengehalt immer proportional zur Gesamtporosität zu. Bei einer Austauschmenge von bis zu 40 Vol.-% betrug die Zunahme zwischen 7,5 und 9,7 Vol.-%. Mit dem hochfeinen Quarzmehl Q1 verringerte sich der Kapillarporengehalt bzw. blieb nahezu unverändert. Insbesondere bei sehr geringen Wassermengen ($w/z_0 = 0,25$ und 0,35) war die Abhängigkeit des Kapillarporengehaltes von der Feinheit des Zement-Feinstoff-Gemisches besonders deutlich. Einzig bei dem Ausgangswasserzementwert $w/z_0 = 0,50$

nahm der Kapillarporengehalt beim Austausch von mehr als 30 Vol.-% CEM3 durch Q1 leicht zu und erhöhte sich von 26,4 Vol.-% auf 29,1 Vol.-%.

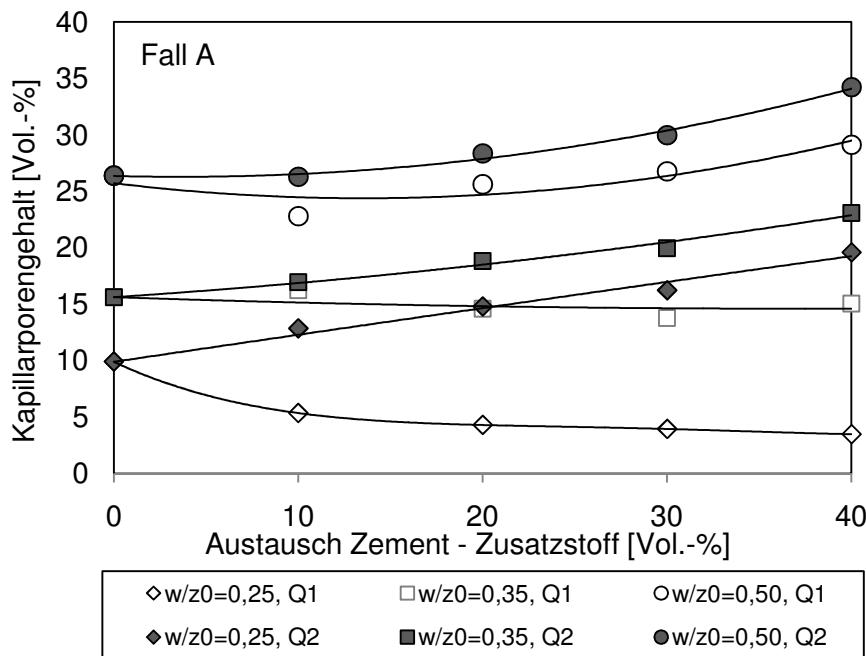


Abbildung 60: Einfluss der Feinheit der Quarzmehle Q1 und Q2 auf den Kapillarporengehalt bei unverändertem Wassergehalt, Fall A: w/z zunehmend, w/F_v konstant.

In Fall B, bei proportional zum Zementgehalt abnehmender Wassermenge, verringerte sich, analog zum Gesamtporengehalt, der Kapillarporengehalt bei beiden Quarzmehlen. Auch hier sind im Vergleich zur Gesamtporosität deutlichere Unterschiede zwischen den beiden Zusatzstoffen erkennbar. Die Verwendung des Füllstoffs Q1 führte auch in diesem Fall zu einer vergleichsweise geringen Kapillarporosität, wie Abbildung 61 zeigt.

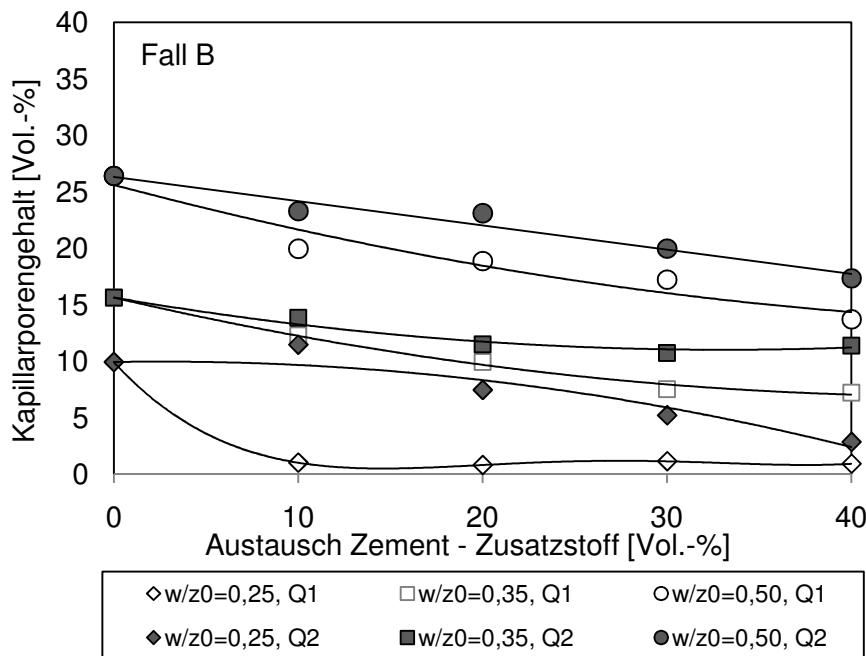


Abbildung 61: Einfluss der Feinheit der Quarzmehle Q1 und Q2 auf Kapillarporengehalt bei proportional zum Zementgehalt abnehmendem Wassergehalt, Fall B: w/z konstant, w/F_v abnehmend.

Besonders deutlich wird die Hohlraum füllende Wirkung von Q1 bei einem w/z₀ von 0,25 (Fall B). Bereits bei geringer Zugabemenge ab 10 Vol.-% reduzierte sich der messbare Kapillarporenraum auf Werte um rd. 1,0 Vol.-%. Der Gelporenraum nahm dabei von rd. 8,0 Vol.-% auf rd. 11 Vol.-% zu, während der Gesamtporenraum gleichmäßig von 20 auf 14 Vol.-% abnahm. Der für die Transportvorgänge verantwortliche Kapillarporenraum wurde durch eine Verschiebung der Poredurchmesser in den feineren Gelporenbereich verringert, wie Abbildung 62 anhand der Porenverteilung zeigt. Wurde der Zement unter ansonsten gleichen Bedingungen durch 10 Vol.-% Q2 ausgetauscht, blieb die Porenstruktur nahezu unverändert. Die rechn. Wasserfilmdicke d_w verringerte sich von anfangs 0,30 µm beim Austausch von 10 Vol.-% durch Q1 auf 0,17 µm, während sie beim Austausch durch Q2 mit 0,29 µm praktisch unverändert blieb. Eine umfassendere Auswertung zum Einfluss des Zusatzstoffs auf den Kapillarporengehalt in Abhängigkeit von der Wasserfilmdicke erfolgt in Abschnitt 8.2.

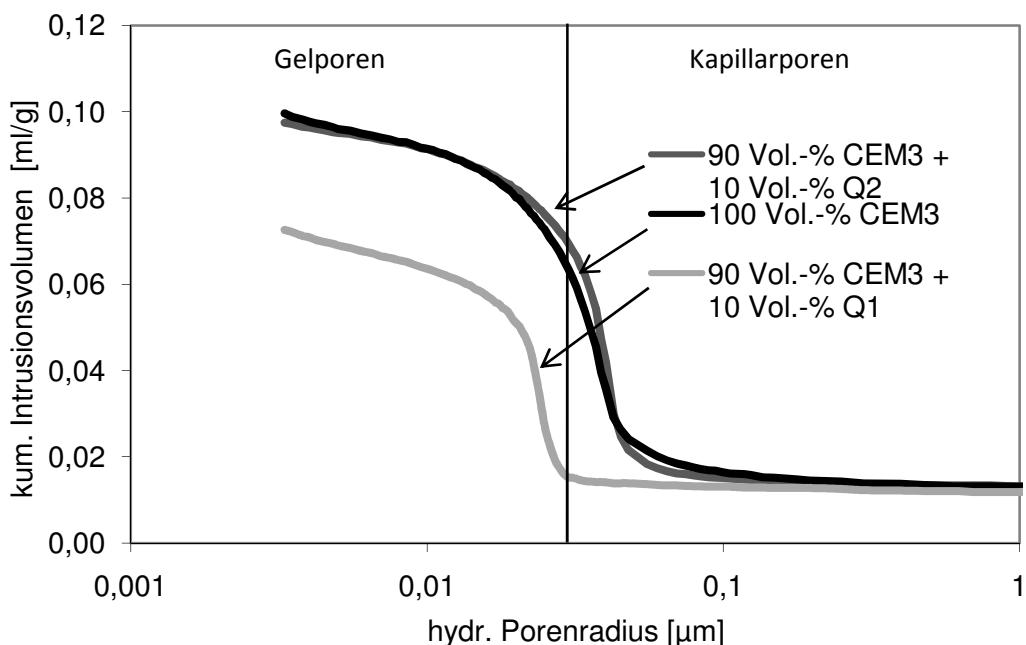


Abbildung 62: Beispielhafte Darstellung des Einfluss der Feinheit des Austauschstoffes auf die Porenstruktur, Fall B, $w/z_0 = 0,25$.

Abbildung 63 unterstreicht den Einfluss der Wasserfilmdicke und damit des Wassergehaltes auf die Gefüge dichtende Wirkung des hochfeinen Quarzmehls Q1, indem Fall A und Fall B direkt miteinander verglichen werden.

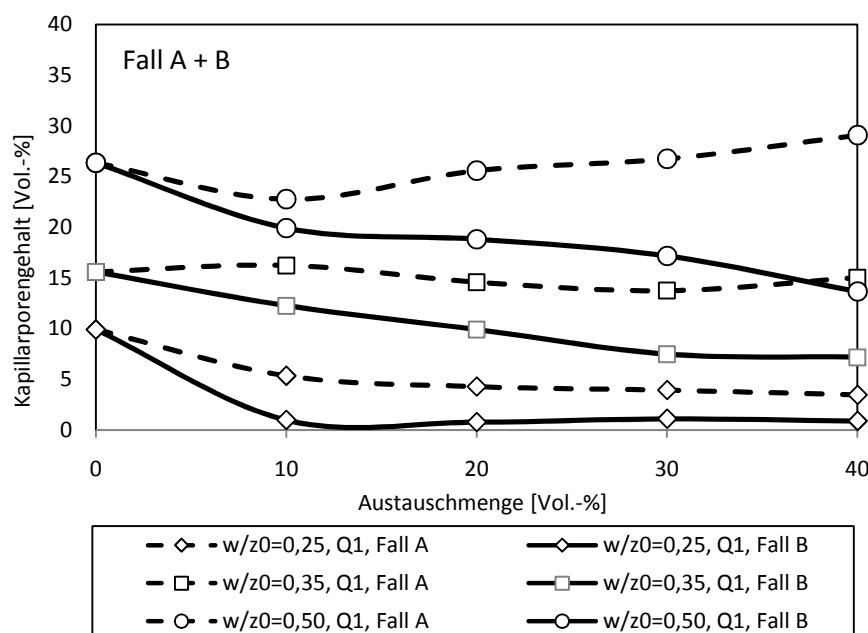


Abbildung 63: Vergleich des Einfluss des Wassergehaltes auf den Kapillarporengehalt beim Austausch des Zements durch das hochfeine Quarzmehl Q1.

Erst bei angepassten oder insgesamt ausreichend geringen Wassergehalten ($w/z_0=0,25$) ist es möglich die Packungsdichte erhöhende Wirkung auszunutzen und den Kapillarporengehalt signifikant zu reduzieren.

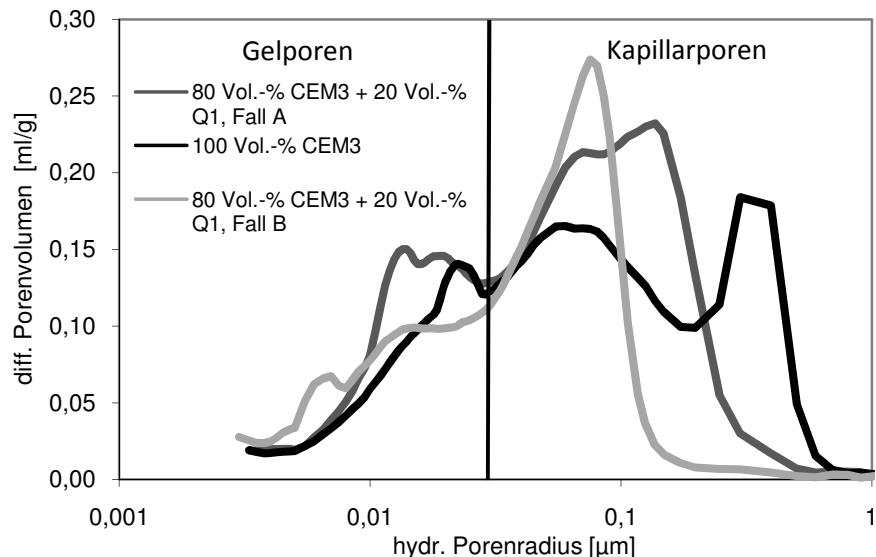


Abbildung 64: Einfluss des Wassergehaltes auf die Porenstruktur, Verschiebung der wirksamen Poredurchmesser durch den abnehmenden Wassergehalt und die dadurch zunehmende Füllerwirkung in den feineren Porengrößenbereich; Vergleich Fall A + B, $w/z_0 = 0,50$.

Der Gelporengehalt nahm mit zunehmender Austauschmenge durch das hochfeine Quarzmehl Q1 insgesamt zu. Das lässt darauf schließen, dass der Mikroporengehalt durch die Füllung der groben Hohlräume zwischen den Zementkörnern zum einen durch die Füllung mit Feststoffen reduziert und zum anderen in den feineren Porenbereich verschoben wird. Beim Austausch des Zements durch das praktisch gleich feine Quarzmehl Q2 bleibt der Gelporengehalt praktisch gleich.

7.4. Einfluss auf den Hydratationsgrad

Der Hydratationsgrad der Gemische aus dem grob gemahlenen Portlandzement CEM3 und den inerten Quarzmehlen wurde aus dem Verhältnis des chemisch gebundenen Wassers $m_{w,28}$ nach 28 Tagen und der theoretisch maximal bindbaren Wassermenge bei vollständiger Hydratation $m_{w,\infty}$ berechnet. Dieses einfache Verfahren erwies sich in der Literatur [Sta1998] als hinreichend genau. Exaktere Analyseverfahren wie die Massenermittlung der Klinkerphasen mittels Röntgendiffraktometrie wurden in der vorliegenden Arbeit nicht angewendet.

Die so ermittelten Hydratationsgrade, die an mehreren Zementsteinproben bestimmt wurden, sind im Anhang Teil C enthalten.

7.4.1.1. Grenzwertbetrachtung bei minimal notwendigem Wassergehalt

Abbildung 65 zeigt den Hydratationsgrad der Zement-Quarzmehl-Gemische bei minimal notwendiger Wassermenge. Der Wasserfeinstoffwert w/F_v variierte während dieser Untersuchungen zwischen rd. 0,36 und 0,39, siehe auch Tabelle 13 auf Seite 88.

Mit zunehmendem Austausch des Zements durch die Quarzmehle stieg der Hydratationsgrad praktisch linear an. Beim Austausch durch das zementfeine Quarzmehl Q2 stellten sich durchweg deutlich höhere Hydratationsgrade ein als beim Austausch durch das hochfeine Quarzmehl Q1. Der zunehmende Hydratationsgrad ist darauf zurückzuführen, dass mit zunehmender Zementtauschmenge der w/z -Wert von 0,21 auf bis zu 0,70 zunahm. Erst bei 50 Vol.-% ausgetauschten Zements wurde ein w/z -Wert von rd. 0,40 erreicht. Bei diesem kann der Hydratationsgrad theoretisch mit 100% angenommen, so dass kein weiteres Überschusswasser vorhanden ist.

Die deutlich geringeren Hydratationsgrade bei Verwendung des hochfeinen Quarzmehls Q1 lassen darauf schließen, dass bei vergleichbaren Wassergehalten bzw. w/z -Werten ein Teil des Wassers durch die große Oberfläche des Quarzmehls physikalisch gebunden wird und zumindest bis Alter von 28 Tagen nicht für die Hydratation zur Verfügung steht.

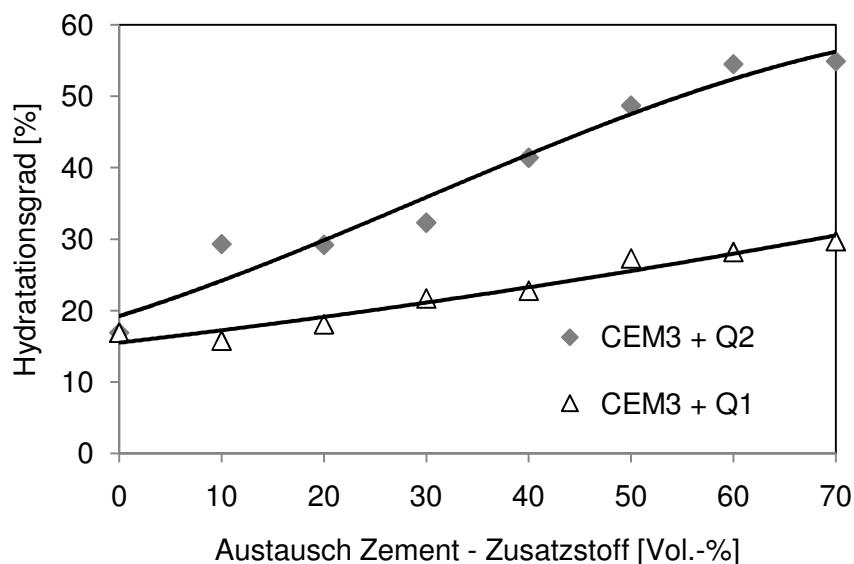


Abbildung 65: Gegenüberstellung des Einflusses der Feinstoffe auf den Hydratationsgrad bei minimal notwendiger Wassermenge.

Trotz des geringeren Hydratationsgrades bilden die mit dem hochfeinen Quarzmehl Q1 gemischten Zemente eine wesentlich höhere Gefügedichte aus. Sie weisen beispielsweise ein dichteres Porengefüge mit einer starken Gelporosität und einem nur geringen Kapillarporengehalt auf.

Darüber hinaus nehmen mit zunehmendem Austausch des Zements durch das hochfeine Quarzmehl Q1 der Hydratationsgrad und die Gefügedichte gleichermaßen zu.

7.4.1.2. Hydratationsgrad bei üblichen Wassergehalten

Die folgenden Abbildungen zeigen die Entwicklung des Hydratationsgrades bei deutlich höheren Wassergehalten ($w/z_0 = 0,35$ und $0,50$).

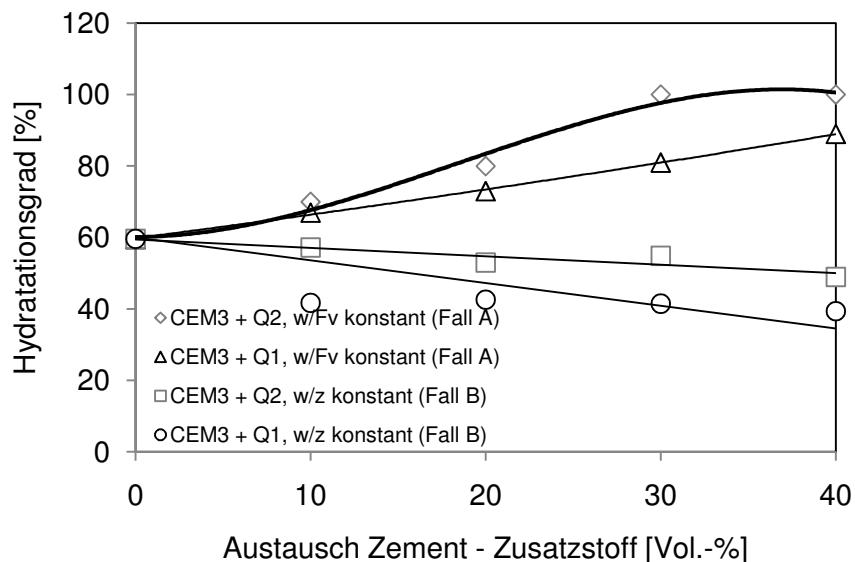


Abbildung 66: Einfluss der Feinstoffe und des Wassergehaltes auf den Hydratationsgrad bei $w/z_0 = 0,35$.

Je höher der Wassergehalt wurde, desto weniger wurde der Hydratationsgrad durch die Feinheit des Quarzmehls beeinflusst. Offensichtlich war hier die Dicke des Wasserfilms immer so groß, dass ausreichend Wasser für die fortschreitende Hydratation zur Verfügung stand.

Im Fall B, also bei proportional zum Zementgehalt abnehmendem Wassergehalt, nahm der Hydratationsgrad gleichmäßig mit zunehmender Austauschmenge ab. Auch dies weist darauf hin, dass hier trotz eines gleichbleibenden w/z -Werts durch die adsorptive Bindung des Wassers wiederum weniger Wasser für die Hydratation – bezogen auf den Hydratationsgrad im Alter von 28 Tagen – zur Verfügung stand.

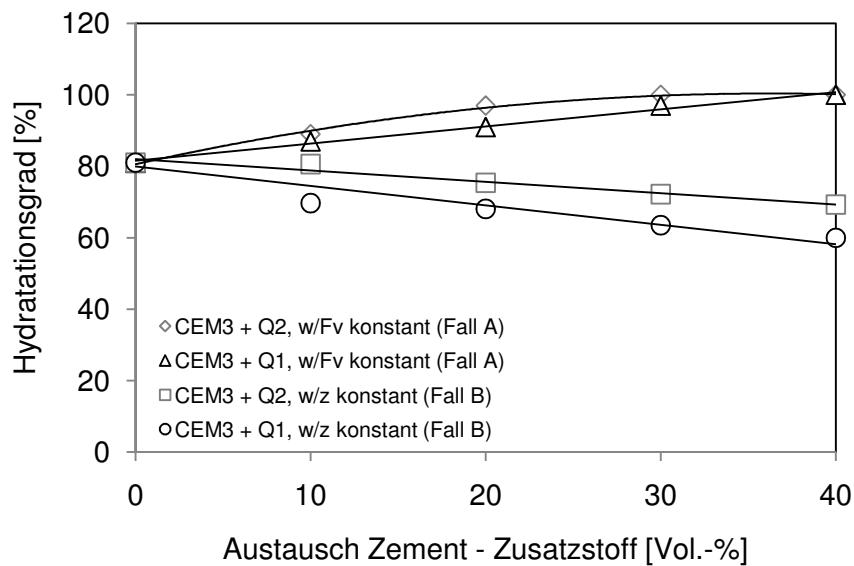


Abbildung 67: Einfluss der Feinstoffe und des Wassergehaltes auf den Hydratationsgrad bei $w/z_0 = 0,50$.

7.5. Einfluss auf den Diffusionswiderstand

7.5.1. Wasserdampfdiffusion

7.5.1.1. Grenzwertbetrachtung bei minimal notwendigem Wassergehalt

In Abbildung 68 sind die Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten D_{Leit} der Zement-Feinstoff-Gemische mit nach Punkt minimaler Wassermenge dargestellt. Je höher dabei D_{Leit} ist, umso durchlässiger ist die Probe gegenüber Wasserdampf. Der D_{Leit} der Prüfkörper mit dem hochfeinen Quarzmehl Q1 war mit Werten von $6,1 \cdot 10^{-15}$ bis $1,1 \cdot 10^{-14}$ kg/(m*s*Pa) beim Austausch von 10 – 40 Vol.-% deutlich geringer als der D_{Leit} der Prüfkörper, die mit dem „zementfeinen“ Quarzmehl Q2 hergestellt wurden. Im selben Austauschbereich war der D_{Leit} der Prüfkörper mit Q2 mit Werten von $1,8 \cdot 10^{-14}$ bis $3,2 \cdot 10^{-14}$ kg/(m*s*Pa) um rd. eine halbe Zehnerpotenz größer. Beim Austausch von mehr als 50 Vol.-% des Zements CEM3 durch das hochfeine Quarzmehl Q1 stieg der D_{Leit} überproportional an, um letztendlich bei 70 Vol.-% ausgetauschten Zements mit rd. $8,4 \cdot 10^{-14}$ kg/(m*s*Pa) die selbe Größenordnung anzunehmen wie bei den Prüfkörpern mit Q2. Der praktisch konstante D_{Leit} der Prüfkörper mit Q1 im Bereich 10 – 40 Vol.-% Austausch ist auf die begrenzte Differenzierbarkeit der Ergebnisse des angewendeten Messverfahrens bei hochdichten Stoffen zurückzuführen.

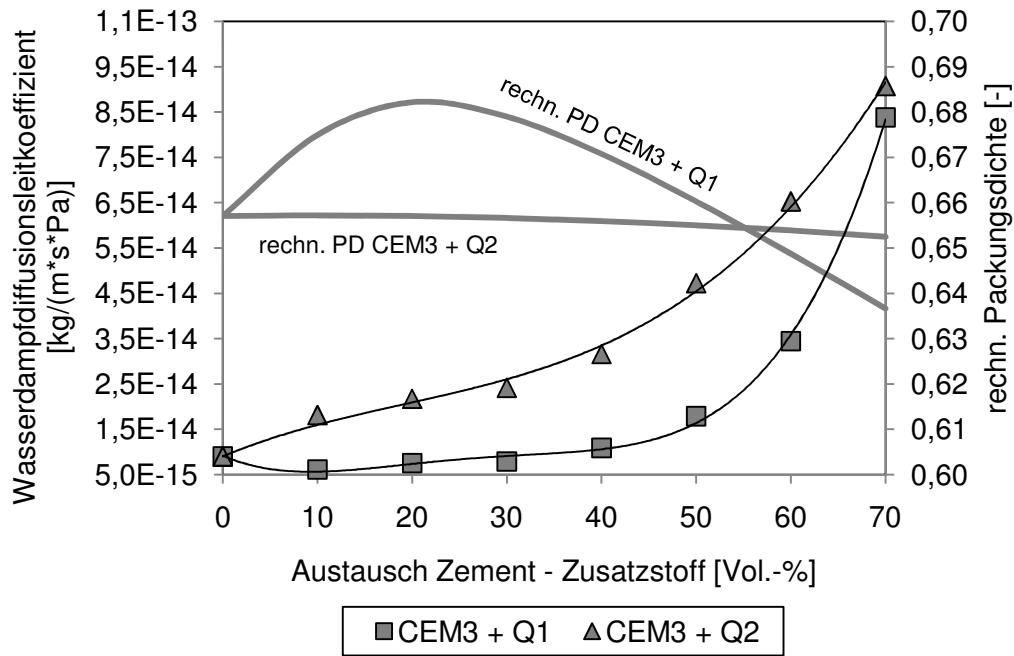


Abbildung 68: Einfluss der Feinstoffe auf den Wasserdampfleitkoeffizienten bei minimal notwendiger Wassermenge.

7.5.1.2. Wasserdampfdiffusion bei üblichen Wassergehalten

Abbildung 69 und Abbildung 70 zeigen den Einfluss der Feinheit der Feinstoffe auf D_{Leit} bei im Fall A und Fall B.

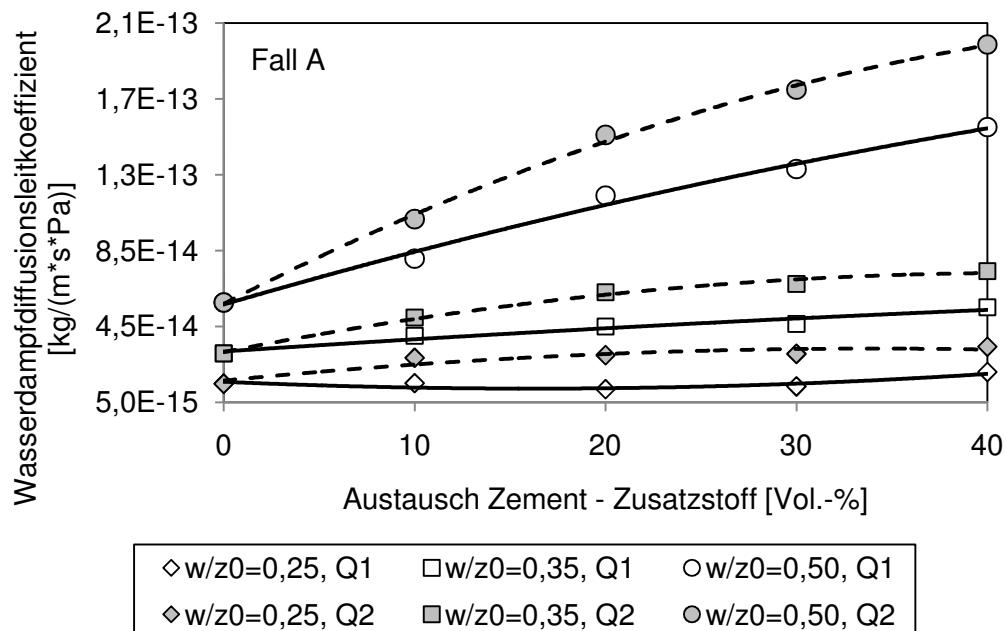


Abbildung 69: Einfluss der Feinheit der Quarzmehle Q1 und Q2 auf den Diffusionsleitkoeffizienten D_{Leit} für Wasserdampf bei unverändertem Wassergehalt, Fall A: w/z zunehmend, w/F_v konstant.

Insgesamt nahm D_{Leit} bei unveränderter Wassermenge im Fall A unabhängig von der Feinheit des Austauschstoffes zu. Beim hochfeinen Quarzmehl Q1 war der Effekt jedoch geringer als bei dem „zementfeinen“ Quarzmehl Q2. Differenzierbare Effekte durch eine gesteigerte Packungsdichte (siehe Abbildung 68), wie sie z.B. bei der Druckfestigkeit bei $w/z_0=0,25$ festgestellt wurden (siehe Abbildung 54, Seite 92), konnten mit diesem Messverfahren nur teilweise erfasst werden – siehe Abbildung 71.

Bei reduzierter Wassermenge zeigten sich deutlichere Unterschiede in der Wirkung der Feinstoffe. Während D_{Leit} beim Ersatz des Zements durch Q2 proportional zur Austauschmenge gleichmäßig zunahm, blieb er beim Austausch durch Q1 praktisch unverändert. Dieses Verhalten ist auf die Veränderung der Porosität zurückzuführen. Durch den Austausch des Zements CEM3 durch Q1 verringerte sich der Kapillarporenanteil signifikant, teilweise bis auf 50 % (siehe Abschnitt 7.3.3), gleichzeitig erhöhte sich der Gelporenanteil – wenn auch unterproportional.

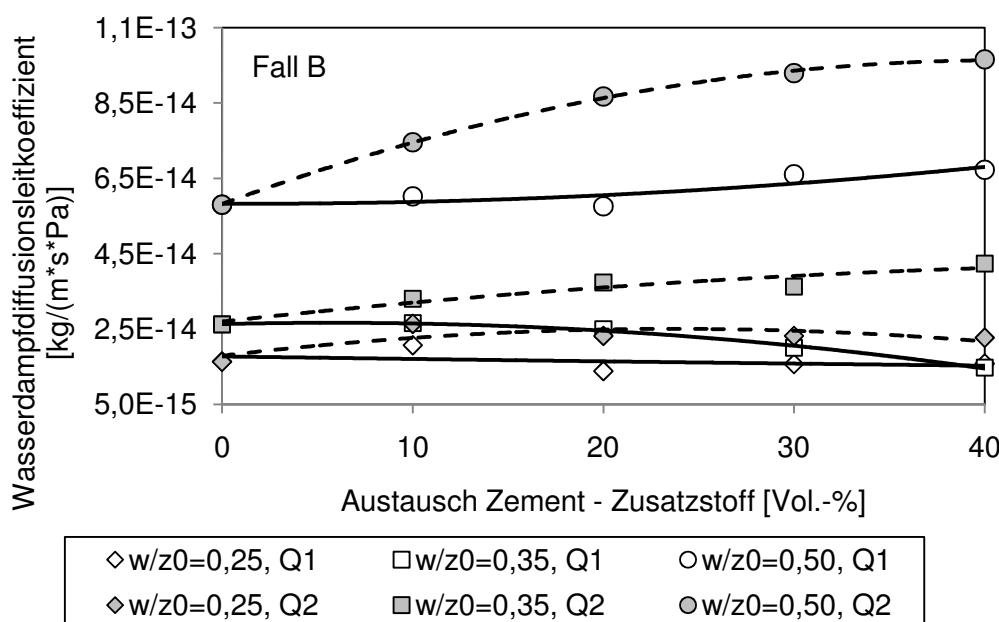


Abbildung 70: Einfluss der Feinheit der Quarzmehle Q1 und Q2 auf den Diffusionsleitkoeffizienten D_{Leit} für Wasserdampf bei proportional zum Zementgehalt abnehmendem Wassergehalt, Fall B: $w/z_0 = \text{konstant}$, $w/F_v = \text{abnehmend}$.

Beim Vergleich der Fälle A und B wird der Einfluss des Wassergehaltes auf D_{Leit} deutlich, siehe Abbildung 71. Er ist in diesem Beispiel anhand des Quarzmehls Q1 dargestellt. Im Falle des $w/z_0 = 0,50$ und einer Austauschmenge von 20 Vol.-% halbierte sich der D_{Leit} des Zementsteins von rd. $1,2 \times 10^{-13}$ auf $0,6 \times 10^{-13}$ $\text{kg} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ durch die proportional zum Zementgehalt reduzierte Wassermenge. Demnach war auch hier für einen erhöhten Wasserdampfdiffusionswiderstand die Anpassung des Wassergehaltes an den Zementgehalt und an die Packungsdichte ausschlaggebend.

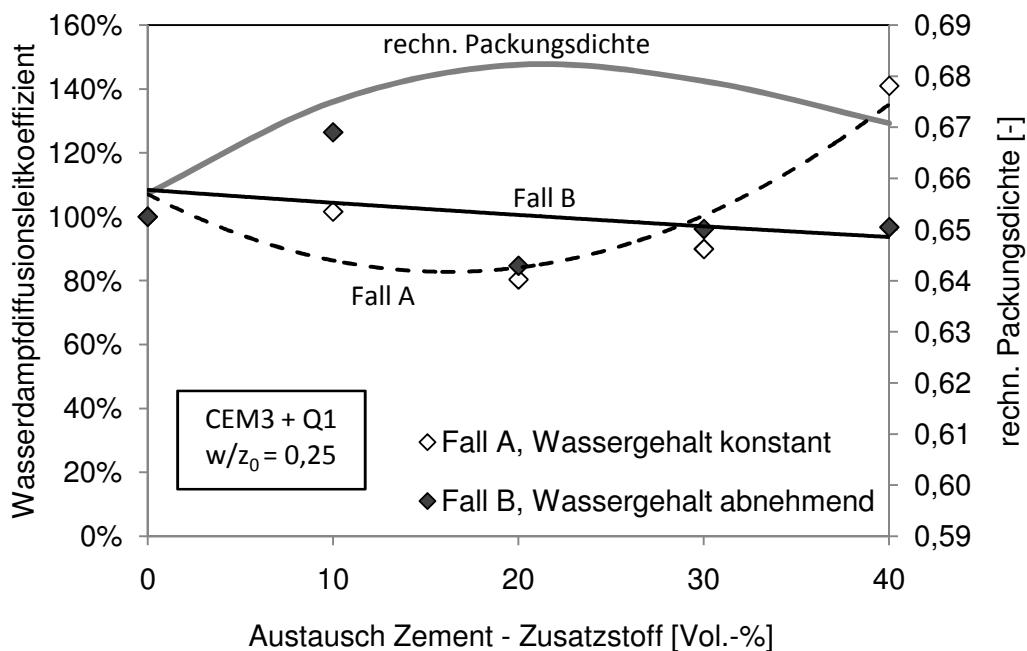


Abbildung 71: Vergleich des Einfluss des Wassergehaltes (Fall A: Wassergehalt konstant, Fall B: Wassergehalt abnehmend) auf den Diffusionsleitkoeffizienten für Wasserdampf D_{Leit} , Zement CEM3 ausgetauscht durch Q1, $w/z_0 = 0,25$.

7.5.2. Chloridionendiffusion

7.5.2.1. Widerstand gegenüber eindringenden Chloridionen bei minimal notwendigem Wassergehalt

Der nach dem Verfahren nach Tang [Tan1995] berechnete Diffusionskoeffizient für das Eindringen von Chloriden wurde in Abhängigkeit von der Zeit, der Eindringtiefe und der Beschleunigungsspannung berechnet (siehe Abschnitt 5.4.8.2, Seite 51). Als zusätzliche Bewertungsmöglichkeit wurden bedarfsweise die gemessenen übertragenen Ladungsmengen herangezogen.

Der quantitative Zusammenhang zwischen dem Quarzmehlgehalt unterschiedlicher Feinheit und dem Diffusionskoeffizienten D_{Cl} sowie der übertragenen Ladungsmenge ist in Abbildung 72 für die Leime mit der minimal notwendigen Wassermenge dargestellt. Mit zunehmendem Gehalt des „zementfeinen“ Quarzmehls Q2 nahm die Durchlässigkeit zu. Der Austausch des Zements durch das hochfeine Quarzmehl Q1 bewirkt durch die Verdichtung des Gefüges bis hin zu einer Austauschmenge von 60 Vol.-% eine konstante Verringerung der Durchlässigkeit auf einen Grenzwert von rd. $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Ab 60 Vol.-% Quarzmehlgehalt stieg sie dann bei beiden Quarzmehlen Q1 und Q2 überproportional an. Hervorzuheben ist jedoch, dass die über die Eindringtiefe ermittelten Diffusionskoeffizienten D_{Cl} aufgrund der geringen Eindringtiefen (0 bis 2 mm) nur noch bedingt differenzierbar waren. Besser differenzierbare Ergebnisse liefert die Betrachtung der übertragenen Ladungsmengen. Diese sind beim Austausch des Zements durch das zementfeine Quarzmehl Q2 mit 1800 A*s

(10 Vol.-%) bis 2250 A*s (60 Vol.-%) praktisch doppelt so hoch wie beim Austausch gegen das hochfeine Quarzmehl Q1 mit rd. 1050 A*s. In Abbildung 72 sind der aus der Eindringtiefe ermittelte Diffusionskoeffizient D_{Cl} und die übertragene Ladungsmenge vergleichend dargestellt. Effekte durch die Verdichtung der Frischleime konnten aufgrund der geringen Abweichungen der rechnerischen Dichte von der Frischleimdichte, wie aber auch von der Rohdichte der Prüfkörper ausgeschlossen werden. Die Abweichungen lagen zwischen 2% und 6%. Sie sind im Anhang Teil C zusammengefasst.

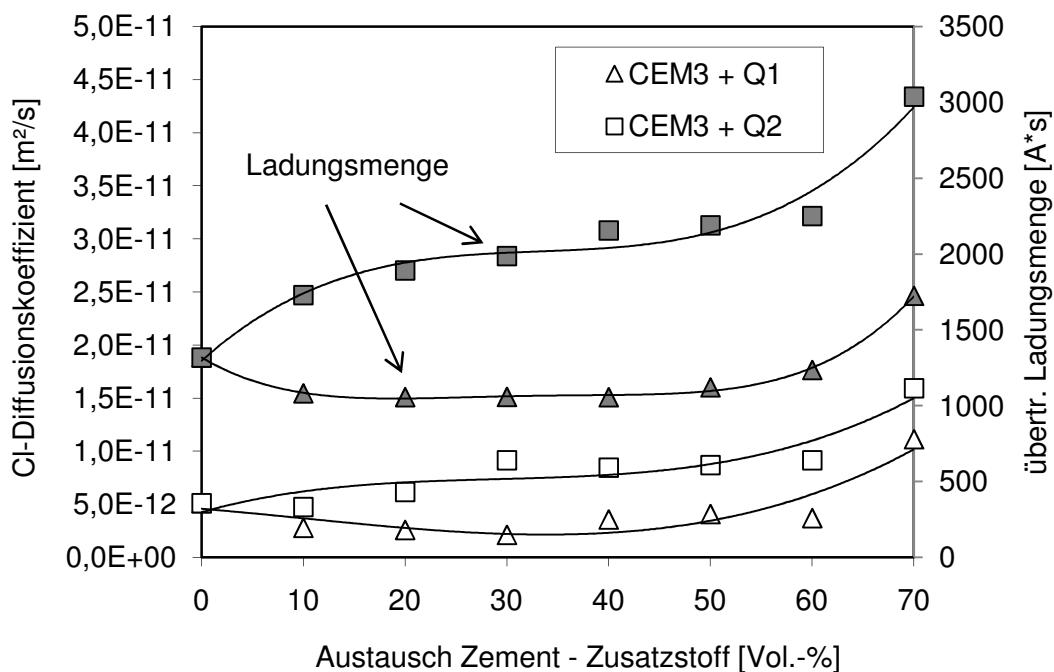


Abbildung 72: Vergleich des Cl-Diffusionskoeffizienten mit der übertragenen Ladungsmenge unter dem Einfluss der Feinstoffe bei minimal notwendiger Wassermenge.

Der deutliche Anstieg der Durchlässigkeit ab einer Austauschmenge von 60 Vol.-% ist auf die an dieser Stelle auftretende Erhöhung der Gesamt- und Kapillarporosität zurückzuführen. Wie in Abschnitt 7.3.3 bereits erläutert, führen zunehmende interpartikuläre Kräfte zu einer verringerten Packungsdichte. Hinzu kommt die erhebliche Verdünnung des Zementgehalts (< 40 Vol.-%), die durch die deutlich weniger gebildeten und Gefüge verdichtenden C-S-H-Phasen die Gefügedichtigkeit des Zementsteins herabsetzt. Des Weiteren wird das Bindungsvermögen von Chloridionen im Zementstein [Gu1992] verringert. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Effekte beim Austausch von mehr als 60 Vol.-% zu der sprunghaften Erhöhung der Durchlässigkeit gegenüber Chloridionen führten.

7.5.2.2. Widerstand gegenüber eindringenden Chloridionen bei üblichen Wassergehalten

Beim Austausch des Zements durch bis zu 20 Vol.-% Quarzmehl Q1 zeigte sich bei unverändertem Wassergehalt und damit zunehmendem w/z-Wert ein ähnliches Verhalten, wie in den vorangegangen Beschreibungen (siehe Abbildung 73). Der Diffusionskoeffizient D_{Cl} blieb in diesem Bereich unverändert auf dem Niveau des reinen Zementsteins oder wurde bei 10 Vol.-% Quarzmehlzugabe bei den $w/z_0 = 0,25, 0,35$ leicht verringert. Bei weiter erhöhter Austauschmenge erhöhte sich die Durchlässigkeit dann wieder. Der Austausch des Zements durch das „zementfeine“ Quarzmehl Q2 erhöhte die Durchlässigkeit kontinuierlich.

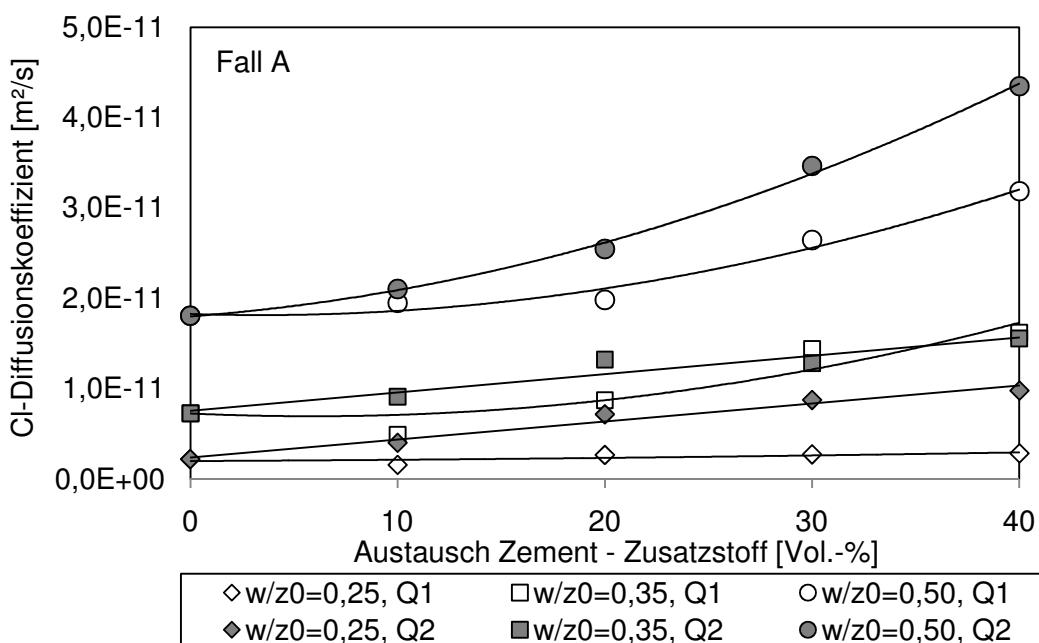


Abbildung 73: Einfluss der Feinheit der Quarzmehle Q1 und Q2 auf den Chloriddiffusionskoeffizienten bei unverändertem Wassergehalt, Fall A: w/z zunehmend, w/F_V konstant.

Mit proportional zum Zement abnehmendem Wassergehalt verringerte sich D_{Cl} bei Zugabe von bis zu 20 Vol.-% Q1 bei einem Ausgangswasserzementwert $w/z_0 = 0,50$ um rd. 80 % von $1,8 \times 10^{-11}$ auf $4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Danach blieb D_{Cl} unverändert. Dies ist auf die unzureichende Differenzierbarkeit der gemessenen Eindringtiefen bei diesem Versuch zurückzuführen. Eine bessere Differenzierbarkeit bieten die übertragenen Ladungsmengen. Sie sind in Abbildung 75 für den Vergleich der Fälle A und B am Beispiel des Quarzmehls Q1 dargestellt. Hierzu sei hinzugefügt, dass die übertragenen Ladungsmengen insbesondere im Grenzbereich des Messverfahrens die Möglichkeit bieten, gemessene Eindringtiefen und die daraus berechneten Diffusionskoeffizienten klarer zu unterscheiden. Die in dieser Arbeit gemessenen Ladungsmengen unterstützen die berechneten Diffusionskoeffizienten.

Beim Austausch des Zements durch das zementfeine Quarzmehl Q2 änderte sich der Diffusionswiderstand trotz abnehmendem Wassergehalts praktisch nicht.

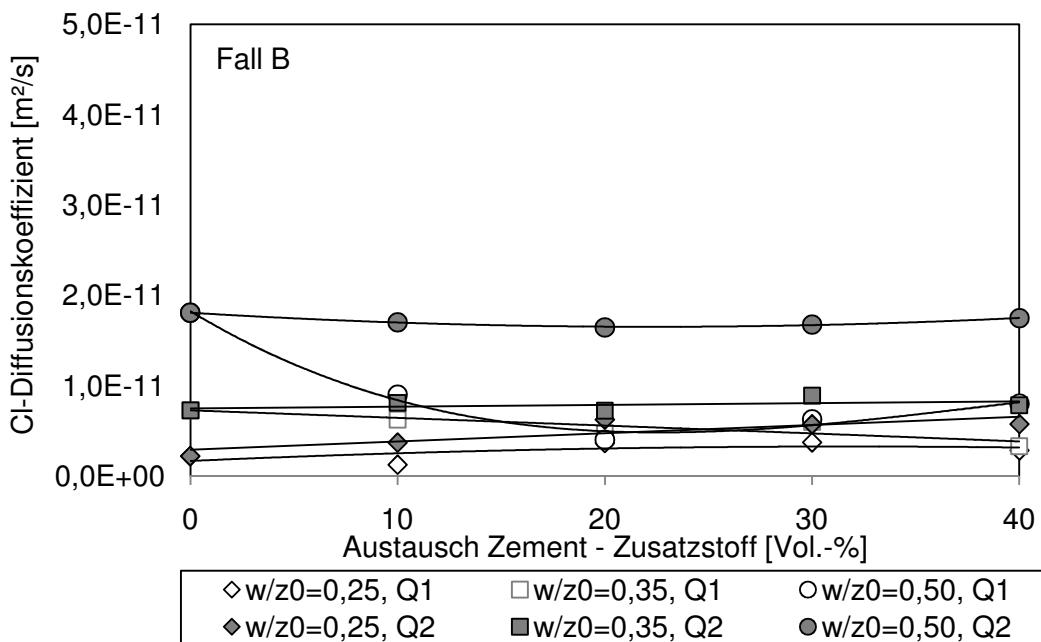


Abbildung 74: Einfluss der Feinheit der Quarzmehle Q1 und Q2 auf den Chloriddiffusionskoeffizienten bei proportional zum Zementgehalt annehmendem Wassergehalt, Fall B: w/z konstant, w/F_v abnehmend.

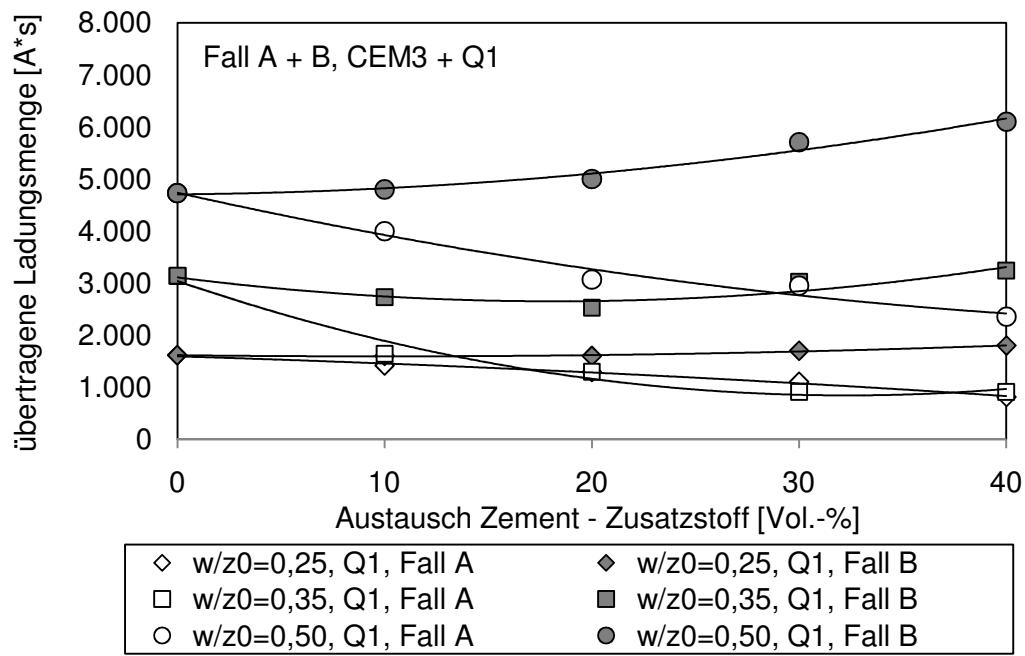


Abbildung 75: Vergleich der Fälle A und B anhand der übertragenen Ladungsmengen, Zement CEM3 ausgetauscht durch Quarzmehl Q1.

Der Vergleich der Fälle A und B in Abbildung 75 zeigt sehr deutlich den Einfluss des Füllereffekts auf die Gefügedichtigkeit und damit auf die Durchlässigkeit. Durch die Hohlräume

füllende und Wasserfilm verringende Wirkung des hochfeinen Quarzmehls Q1 steigerte sich die Gefügedichtigkeit mit zunehmender Packungsdichte oder sie blieb unverändert. Nahm die Packungsdichte ab, dann nahm auch die Durchlässigkeit zu. Im Fall des zementfeinen Quarzmehls Q2 war kein signifikanter Einfluss auf die Packungsdichte messbar. Dadurch war hier der Wassergehalt von entscheidender Bedeutung.

7.6. Einfluss auf die kapillare Wasseraufnahme

Für den konvektiven Transport von Schadstoffen, z.B. Chloridionen, ist das kapillare Saugvermögen der Zementsteinmatrix entscheidend. Die gelösten Ionen können dabei nahezu so tief wie das Lösungswasser eindringen. Bei praxisüblichen Feuchtegehalten von Betonen wurden in [Sta2001] Chlorideindringtiefen von 40 bis 70% der Wassereindringtiefen erreicht.

7.6.1.1. Kapillare Wasseraufnahme bei minimal notwendiger Wassermenge

Die kapillare Wasseraufnahme der mit nur minimal notwendiger Wassermenge hergestellten Prüfkörper war auch bei diesen Versuchen bis zu einer Austauschmenge von 50 Vol.-% mit Werten um rd. $0,015 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ sehr gering und praktisch nicht differenzierbar, siehe Abbildung 76. Bei weiterem Zementtausch bis zu 70 Vol.-% wuchsen die Werte überproportional auf rd. $0,16 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ bei Q1 und $0,29 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ bei Q2 an und ließen eine Unterscheidung zu. Dabei war der Wasseraufnahmekoeffizient (WA) der Prüfkörper mit dem hochfeinen Quarzmehl Q1 nur etwa halb so groß wie mit dem „zementfeinen“ Quarzmehl Q2.

Die Zunahme im Bereich > 50 Vol.-% resultierte dabei zum einen aus der deutlich abnehmenden Packungsdichte und zum anderen aus der Verdünnung des Zementgehaltes. Während die Packungsdichte der Zement-Zusatzstoffgemische mit Q1 im Bereich 10 bis 50 Vol.-% Austausch mit Werten von 0,66 bis 0,68 immer über der Packungsdichte des reinen Zements lag, verringerte sich diese beim Austausch von mehr als 50 Vol.-% durch Q1 auf Werte unterhalb der Packungsdichte des Zements.

Trotz des deutlich höheren Kapillarporenanteils der mit dem zementfeinen Quarzmehl Q2 hergestellten Prüfkörper ist einer Unterscheidung im kapillaren Saugvermögen aufgrund der insgesamt sehr niedrigen Kapillarporenanteile und des in diesem Größenbereich nicht miteinander verbundenen Porensystems nicht klar möglich. Das kapillare Saugvermögen bleibt demnach bei den Prüfserien mit minimalem Wassergehalt trotz unveränderter Wassermenge und zunehmendem w/z-Wert ($w/z = 0,21$ bis $0,42$) innerhalb 10 bis 50 Vol.-% Zementtausch auf dem Niveau des reinen Zementsteins mit $w/z = 0,21$. Die Entwicklung der w/z-Werte ist in Abbildung 52 (Seite 89) dargestellt.

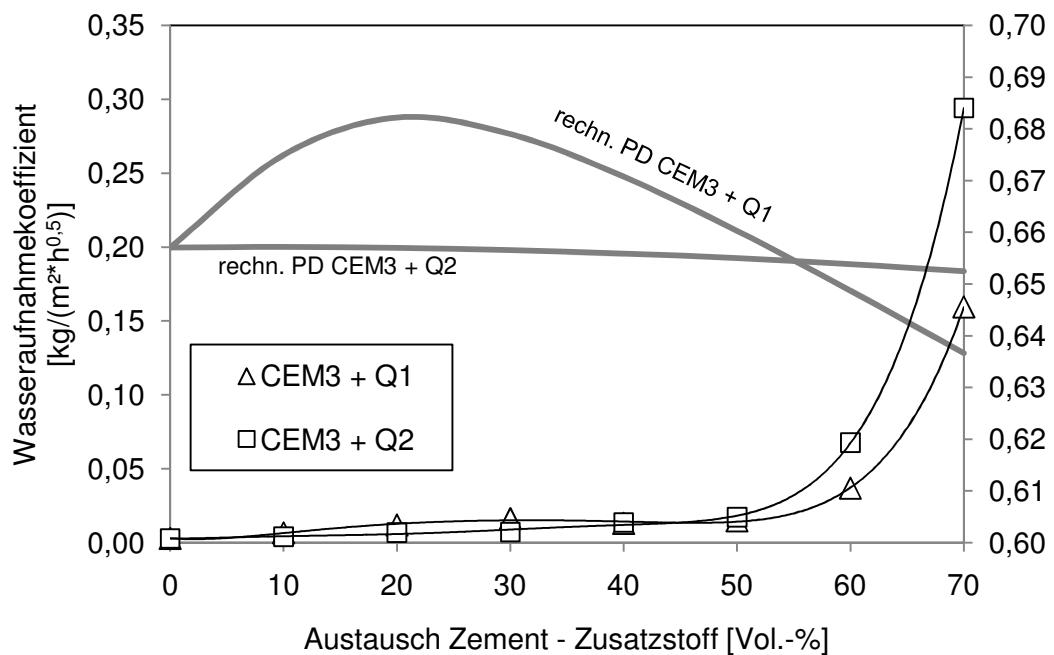


Abbildung 76: Einfluss des Stoffaustauschs auf die kapillare Wasseraufnahme, bei minimal notwendiger Wassermenge.

7.6.1.2. Kapillare Wasseraufnahme bei üblichen Wassergehalten

Die Ergebnisse der kapillaren Wasseraufnahme bei höheren Wassergehalten wie in Abbildung 77 lassen eine bessere Differenzierbarkeit des Einflusses der Feinstoffe zu. Im Fall A, also bei unverändertem Wassergehalt, gilt im Vergleich mit Abbildung 60 auf Seite 99, dass mit abnehmendem Kapillarporenanteil der Wasseraufnahmekoeffizient sinkt. Durch den Füllereffekt des hochfeinen Quarzmehls Q1 war die Kapillarporosität immer geringer als bei den Proben mit dem zementfeinen Quarzmehl Q2. Jedoch lag sie für $w/z_0 = 0,35$ und $0,50$ über den Werten des reinen Zementsteins mit gleichen w/F_v . Bei $w/z_0 = 0,25$ waren die Ergebnisse nicht mehr differenzierbar.

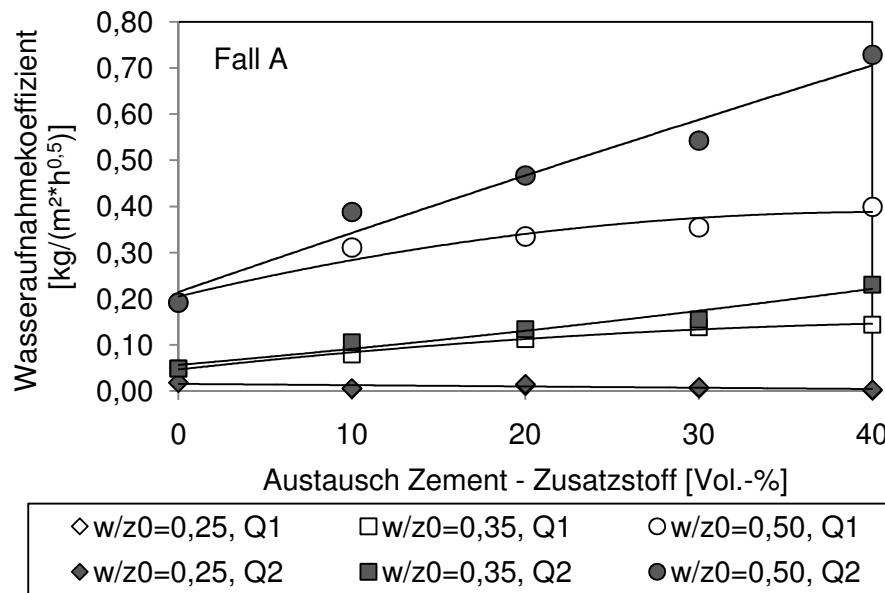


Abbildung 77: Einfluss der Feinheit der Quarzmehle Q1 und Q2 auf die kapillare Wasseraufnahme bei unverändertem Wassergehalt, Fall A: w/z zunehmend, w/F_v konstant.

Der gleiche Effekt stellte sich auch bei den Probeserien im Fall B, also bei proportional zur Zementmenge verringelter Wassermenge, ein (siehe Abbildung 78). Jedoch wurde hier durch die Reduktion des Wassergehaltes das kapillare Saugvermögen unter das Niveau der Ausgangsmischung verringert. Beispielsweise verringerte sich bei $w/z_0 = 0,50$ der Wasseraufnahmekoeffizient von $0,19 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ mit Q2 auf bis zu $0,09 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ und betrug damit nur noch rd. 50%. Mit Q1 betrug der Wasseraufnahmekoeffizient mit $0,03 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ nur noch 15%. Bei den $w/z_0=0,25; 0,35$ waren auch hier die Ergebnisse nicht mehr ausreichend zu unterscheiden.

Im direkten Vergleich der Fälle A und B am Beispiel des hochfeinen, Hohlraum füllenden Quarzmehls Q1 zeigt sich erneut der starke Einfluss des Wassergehalts auf die Gefügedichtigkeit. Durch den Austausch des Zements CEM3 durch 20 Vol.-% Q1 verringerte sich z.B. bei $w/z_0 = 0,50$ bei abnehmendem Wassergehalt das kapillare Saugvermögen um 68%, während es bei konstantem Wassergehalt um 74% anstieg.

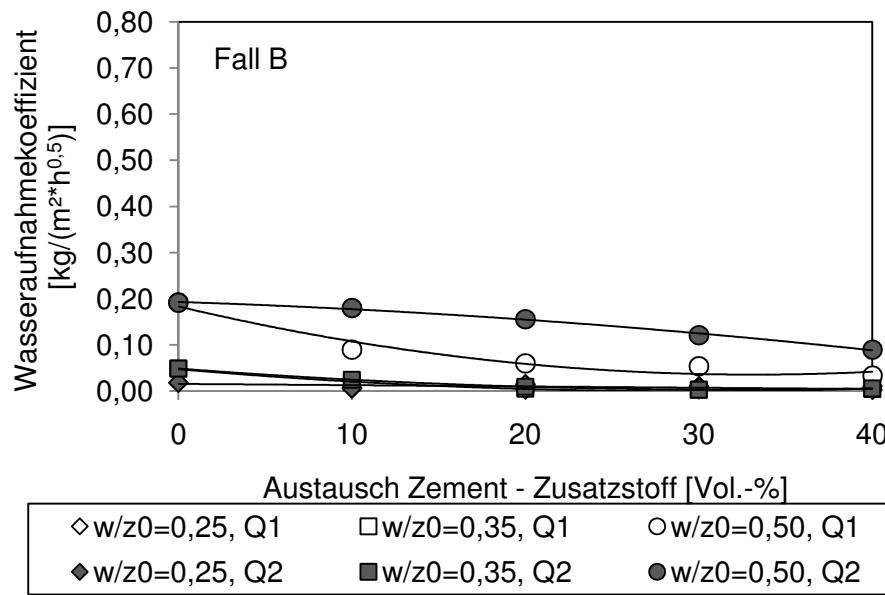


Abbildung 78: Einfluss der Feinheit der Quarzmehle Q1 und Q2 auf die kapillare Wasseraufnahme bei proportional zum Zementgehalt annehmendem Wassergehalt, Fall B: w/z konstant, w/F_v abnehmend.

7.7. Einfluss der Zement- und Feinstoffart

Wie in Abschnitt 6.2 dargestellt, ist bei einem Zement mit höherer Mahlfeinheit, wie der Zement CEM I 42,5 R (CEM4) aus Werk A, der Einfluss der in dieser Arbeit verwendeten hochfeinen Stoffe auf die rechnerische Packungsdichte deutlich geringer. Die Füllerwirkung war durch das kleinere Verhältnis der mittleren Durchmesser d₅₀ des Zements zum Füllstoff deutlich geringer. In diesem Abschnitt wurde untersucht, wie sich die geringere Füllerwirkung des Quarzmehls Q1 bei dem CEM4 auf die Druckfestigkeit und die Dichtigkeit auswirkt.

Zur Abgrenzung der physikalischen Füllerwirkung des inerten Quarzmehls Q1 wurden vergleichend ein Kalksteinmehl (K1) und ein Feinstzement (FC) als Füllstoffe in Kombination mit CEM3 untersucht.

Dargestellt werden im Folgenden die Einflüsse auf die Druckfestigkeit und stellvertretend für die Dichtigkeit auf die Chloridionendiffusion bei den Ausgangswasserzementwerten w/z₀ = 0,35 und 0,50 im Fall B (proportional zum Zement reduzierter Wassergehalt). Weitere Ergebnisse zum unveränderten Wassergehalt und zur Wirkung des zementfeinen Quarzmehls Q2 sind im Anhang Teil C enthalten.

7.7.1. Druckfestigkeit

Die Wirkung der unterschiedlichen Feinstoffe auf die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen sind in den Abbildung 79 und Abbildung 80 dargestellt.

Der reine Zementstein hatte bei einem w/z_0 von 0,35 eine Druckfestigkeit von rd. 85 N/mm². Die des CEM3 betrug rd. 72 N/mm². Bei $w/z_0 = 0,50$ war der Unterschied mit 46 N/mm² beim CEM4 und 42,6 N/mm² beim CEM3 deutlich geringer ausgeprägt.

Wie in den vorhergehenden Abschnitten bereits umfassend dargestellt wurde, ist der Einfluss der Packungsdichte besonders bei geringen Wassergehalten groß. Wenn statt des hochfeinen Quarzmehls Q1 das ebenso feine Kalksteinmehl K1 verwendet wurde, stieg die Druckfestigkeit der Zementsteine mit CEM3 tendenziell in gleicher Weise an und folgte damit der rechnerischen und experimentell ermittelten Packungsdichte. Die rechnerischen Wasserfilmdicken waren bei beiden Feinstoffgemischen ähnlich.

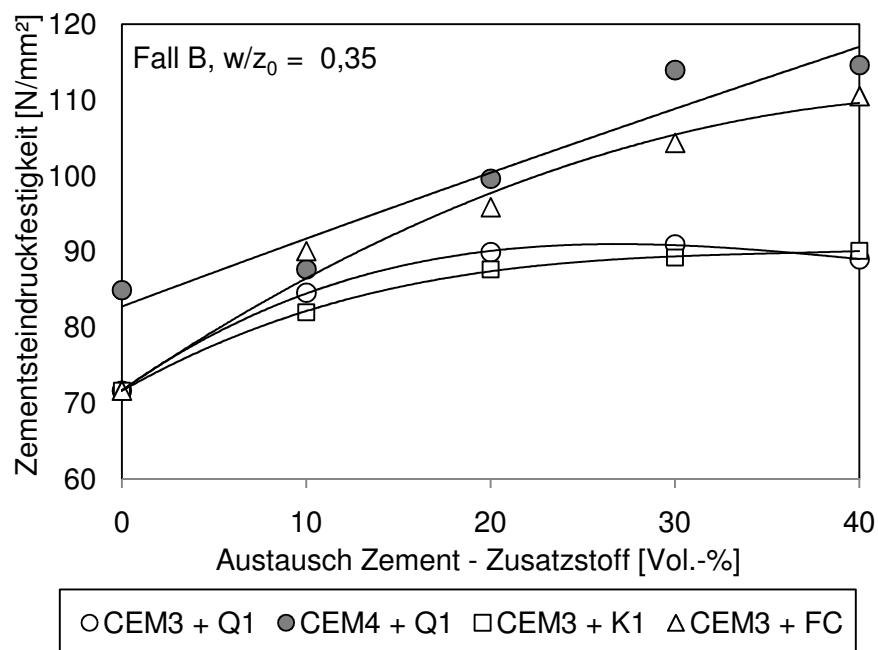


Abbildung 79: Einfluss der Mahlfeinheit und der Reaktivität von Zementen und Zusatzstoffen auf die Druckfestigkeit; $w/z_0 = 0,35$, Fall B: w/z konstant, w/F_v abnehmend.

Bei dem $w/z_0 = 0,50$ stieg bei allen Gemischen mit zunehmendem Zementtausch die Druckfestigkeit nahezu linear an, siehe Abbildung 80.

Gegenüber dem CEM3 hatten die mit dem CEM4 und Q1 hergestellten Leime eine höhere Druckfestigkeit. Sie entsprach nahezu dem erhöhten Festigkeitspotentials des CEM4. Die mit dem hochfeinen Kalksteinmehl K1 hergestellten Prüfkörper hatten auch hier in etwa die gleiche Druckfestigkeit wie mit Q1.

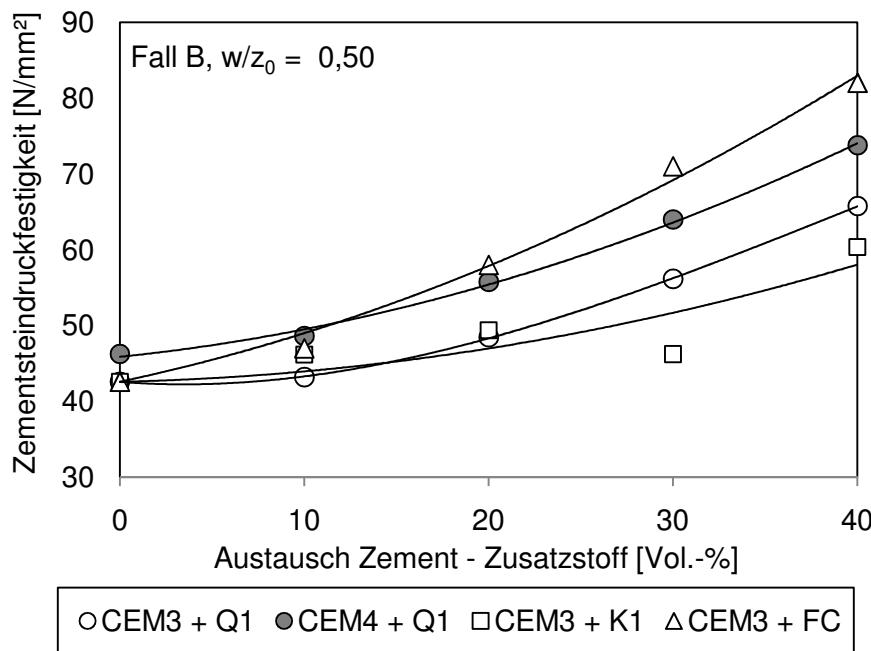


Abbildung 80: Einfluss der Mahlfeinheit und der Reaktivität von Zementen und Zusatzstoffen auf die Druckfestigkeit; $w/z_0 = 0,50$, Fall B: w/z konstant, w/F_v abnehmend.

Beim Austausch des CEM3 durch den Feinstzement FC lag die Druckfestigkeit in allen Fällen über der Druckfestigkeit des Zementsteins mit dem Quarzmehl Q1 und dem Kalksteinmehl K1. Die Absenkung des Wassergehaltes und die Auffüllung mit dem hochreaktivem Feinstzement FC führte zu einer schrittweisen Verringerung des effektiven w/z -Werts von 0,35 auf 0,26 (40 Vol.-% Ersatz des CEM3 durch FC) und gleichzeitig zu einer Erhöhung der benetzbaren, chemisch aktiven Oberfläche. Die erhöhte Druckfestigkeit kann somit in erster Linie auf die Reduktion des w/z -Wertes zurückgeführt werden. Da die Packungsdichte des Gemisches aus Normal- und Feinstzement bis zu der hier dargestellten Austauschmenge von 40 Vol.-% noch höher war als die des reinen Zements CEM3 lässt sich der zusätzliche Effekt der Füllerwirkung nicht klar abgrenzen. Die Druckfestigkeit war um bis zu rd. 23% höher als beim Austausch des Zements durch das hochfeine Quarzmehl Q1.

Vergleicht man den Austausch des relativ grob gemahlenen CEM3 ($s_{m,Blaine}=2750 \text{ cm}^2/\text{g}$) durch das Quarzmehl Q1 mit dem Austausch des feineren CEM4 ($s_{m,Blaine}=3660 \text{ cm}^2/\text{g}$) durch das gleiche Quarzmehl bei niedrigen Wassergehalten ($w/z_0 = 0,35$) und somit geringen Wasserfilmdicken ist festzustellen, dass sich bei dem groben Zement der Einfluss der Packungsdichte deutlicher bemerkbar macht. Die Druckfestigkeit folgte im Wesentlichen der Packungsdichte. Zusammen mit dem CEM4 war einerseits die Füllerwirkung geringer und andererseits die Passagen zu den zu füllenden Hohlräumen kleiner. Das hochfeine Quarzmehl war vermutlich nicht mehr in der Lage in ausreichender Menge in die Hohlräume zu gelangen und diese in gleicher Weise wie bei dem CEM3 zu füllen. Zusammen mit dem höheren Druckfestigkeitspotential des Zements und der, bedingt durch die höhere Feinheit,

noch geringeren Wasserfilmdicke führte das zu einer Erhöhung der Zementsteindruckfestigkeit über das Niveau des CEM3.

7.7.2. Diffusion

Die Wirkung der unterschiedlichen Feinstoffe und der Zemente auf den Widerstand gegen das Eindringen von Chloridionen ist in Abbildung 81 und Abbildung 82 anhand des Cl-Diffusionskoeffizienten D_{Cl} dargestellt.

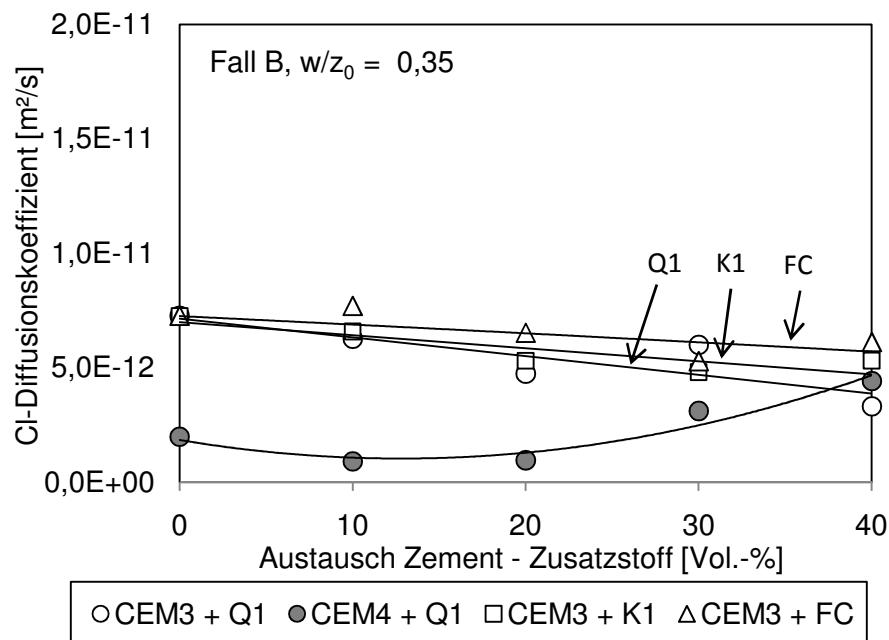


Abbildung 81: Einfluss der Mahlfeinheit und der Reaktivität von Zementen und Zusatzstoffen auf den Cl-Diffusionskoeffizienten, $w/z_0 = 0,35$, Fall B: w/z konstant, w/F_v abnehmend.

Das durch die höhere Mahlfeinheit erhöhte Reaktionspotential des feineren Portlandzements CEM I 42,5 R (CEM4) führte bei gleichem Wassergehalt erwartungsgemäß zu einer gegenüber dem CEM3 gesteigerten Gefügedichtigkeit des reinen Zementsteins. Die Packungsdichte des CEM4 war mit 0,663 ebenfalls etwas höher als bei dem CEM3 mit 0,657. Bei einem w/z_0 von 0,35 war der D_{Cl} bei dem CEM4 mit $2,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ rd. 70% kleiner als bei dem CEM3 mit $7,3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Bei $w/z_0=0,50$ betrug der Unterschied noch 50%. Während beim Austausch des CEM3 durch die jeweiligen Austauschstoffe der Diffusionskoeffizient D_{Cl} unabhängig vom Wassergehalt ($w/z_0 = 0,35$ bzw. 0,50) abnahm, wurde der Diffusionskoeffizient D_{Cl} beim Austausch des CEM4 durch Q1, bei mehr als 20 Vol.-% ausgetauschten Zements, größer. Bei 40 Vol.-% Austauschvolumen lag der Diffusionskoeffizient D_{Cl} bei einem w/z_0 von 0,35 auf dem gleichen Niveau wie die Gemische mit CEM3 oder war bei $w/z_0 = 0,50$ mit $1,2 \times 10^{-11}$ deutlich größer. Während bei bis zu 40 Vol.-% Austausch des CEM3 durch die hochfeinen Stoffe (Q1, K1, FC) die rechn. Packungsdichte

immer noch über der des reinen Zements lag, war sie bei dem CEM4 bereits ab 10 Vol.-% Austausch durch Q1 geringer als die des reinen Zements. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Packungsdichte der Feinstoffmatrix neben dem Reaktionspotential einen wichtigen Einfluss auf die Gefügedichtigkeit hat.

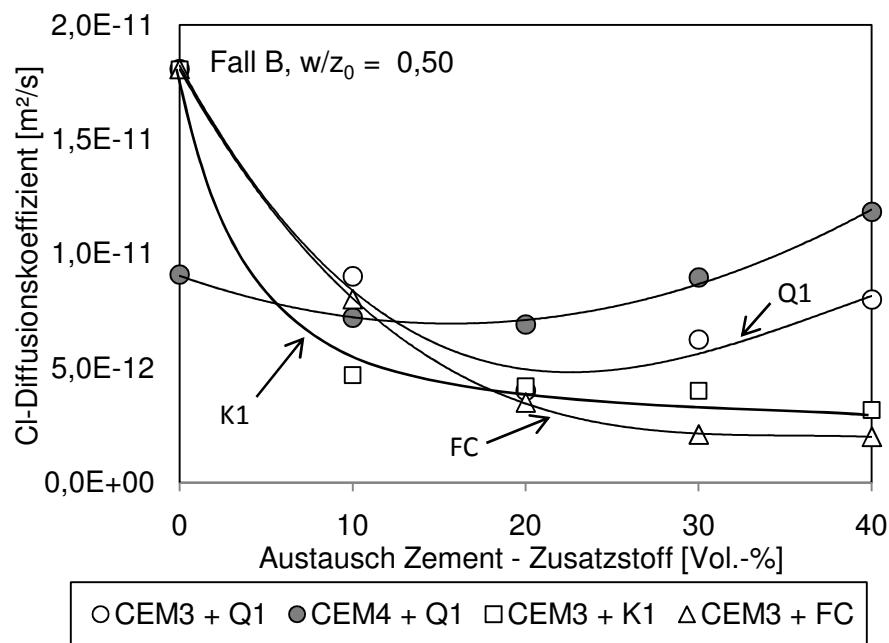


Abbildung 82: Einfluss der Mahlfeinheit und der Reaktivität von Zementen und Zusatzstoffen auf den Cl-Diffusionskoeffizienten; $w/z_0 = 0,50$, Fall B: w/z konstant, w/F_v abnehmend.

Bei den Systemen mit dem CEM3 waren beim Austausch des Zements durch die Füllstoffe Q1, K1 und FC bei dem $w/z_0=0,35$ keine signifikanten Unterschiede in der Wirkung der verschiedenen Füllstoffe erkennbar, siehe Abbildung 81. Der Diffusionskoeffizient D_{Cl} der unterschiedlichen Prüfkörper verringerte sich mit zunehmendem Austauschvolumen nahezu gleich. Ein positiver Einfluss des Feinstzements FC auf die Gefügedichte gegenüber dem hochfeinen Quarzmehl Q1 und dem ebenso feinen Kalksteinmehl K1 war nur bei dem erhöhtem w/z_0 von 0,50 messbar. Besonders bei hohen Austauschvolumina von 40 Vol.-% war der Diffusionskoeffizient D_{Cl} mit K1 und FC mit rd. $3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ um rd. 60% kleiner als mit Q1.

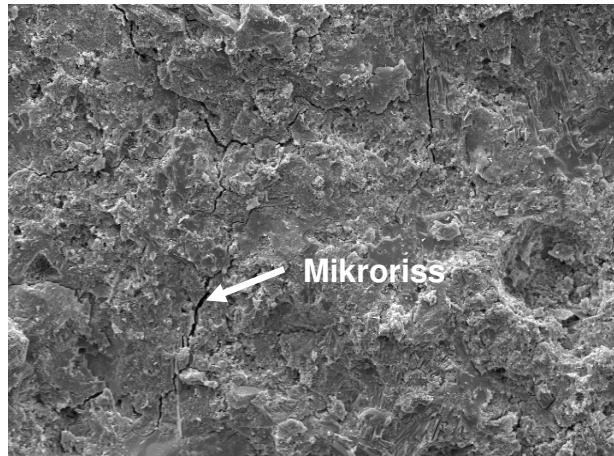


Abbildung 83: Zementsteinmatrix (CEM3 + 40 Vol.-% FC, $w/z_0 = 0,35$) mit zahlreichen Mikrorissen, Rissbreite rd. $2 \mu\text{m}$, Vergrößerung 500x, Bildbreite = 58 μm .

Die Versuche zeigen, dass bei höheren Wassergehalten hoch reaktive und zugleich Hohlraum füllende Feinstzemente noch besser auf die Gefügedichtigkeit auswirken als inerte Stoffe. Erklärbar ist dies durch das Bindungsvermögen von Chloridionen durch den Zement und eine durch das hohe Reaktionspotential erhöhte Gefügedichtigkeit. Bei geringeren Wassergehalten hebt sich dieser Effekt auf. Bei diesen Prüfkörpern waren vermehrt Mikrorisse und durchgehende Risse sichtbar. Vermutlich kam es durch den, von 0,35 auf 0,21 reduzierten, effektiven w/z -Wert bei 40 Vol.-% Austausch des CEM3 durch FC zu einem erhöhten autogenen Schwinden.

7.8. Resumee

7.8.1. Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Wasserfilmdicke

In den vorherigen Kapiteln wurde gezeigt, dass die Gefügedichtigkeit von Zementstein und damit Eigenschaften wie die Druckfestigkeit, die Porosität und der Diffusionswiderstand wesentlich vom Wassergehalt, der Feinheit und bei bestimmten Randbedingungen auch von der Packungsdichte abhängen. Dabei kann eine erhöhte Packungsdichte erst dann die Gefügeeigenschaften verbessern, wenn die Wasserfilmdicke d_w ausreichend gering ist.

Abbildung 84 zeigt den Zusammenhang von Druckfestigkeit, Feinstoffgehalt und Wassergehalt bei einem Zement-Füllstoff-Gemisch, bei dem der Füllstoff, rechnerisch und experimentell nachgewiesen, in der Lage ist, die Hohlräume zwischen den Zementkörnern zu füllen. Der Füllstoffgehalt beeinflusst hierbei die Packungsdichte, die spezifische Oberfläche des Stoffgemisches und zusammen mit dem Wassergehalt im Wesentlichen die Wasserfilmdicke d_w , welche wiederum den Abstand der Partikel zueinander kennzeichnet. Die Wasserfilmdicke wurde nach der in Abschnitt 6.5 entwickelten Gleichung berechnet. In den oberen Diagrammen der Abbildung 84 wird der Einfluss des Feinstoff- und Wassergehaltes auf die Druckfestigkeit und in den unteren der Einfluss auf die Wasserfilmdicke dargestellt. Es wird deutlich, dass ein volumengleicher Austausch des Zements durch ein Hohlraum füllendes Quarzmehl bei unverändertem Wassergehalt nur dann eine Steigerung der Druckfestigkeit und der Gefügedichtigkeit der Zementsteinmatrix bewirkt, wenn der Wassergehalt und damit die Wasserfilmdicke ausreichend niedrig waren. Bei hohen Wassergehalten ($w/z_0 > 0,35$) nahm die Druckfestigkeit und die Gefügedichtigkeit der Zementsteinmatrix proportional zur ausgetauschten Zementmenge und damit zum Anstieg des w/z -Werts ab. Wurde dagegen der Wassergehalt beim Austausch des Zements in gleicher Weise wie der Zement reduziert, also der w/z -Wert konstant gehalten, erhöhte sich in allen Fällen die Druckfestigkeit. War hingegen der Wassergehalt und damit die Wasserfilmdicke ausreichend gering (wie bei dem Ausgangswasserzementwert $w/z_0 = 0,25$) wurden die Druckfestigkeit und die Gefügedichte direkt durch die Packungsdichte und unabhängig vom w/z -Wert beeinflusst. In beiden Fällen nahm mit steigender Packungsdichte - siehe Abschnitt 6.2 - die Druckfestigkeit zu. Die Packungsdichte und damit auch die Druckfestigkeit nahmen wieder ab, wenn der Füllstoffgehalt über das Optimum (20 bis 30 Vol.-%) gesteigert wurde, siehe Abschnitt 7.1.

Auch wenn der dargestellte Zusammenhang des Dreistoffsystems die Abhängigkeit der Gefügedichte von der Packungsdichte und der Wasserfilmdicke verdeutlicht, ist es mit dieser Darstellung noch nicht möglich eine optimale Wasserfilmdicke zu bestimmen, die die Packungsdichte wirksam werden lässt. Hierzu wird in Abschnitt 8 ein Verfahren vorgestellt.

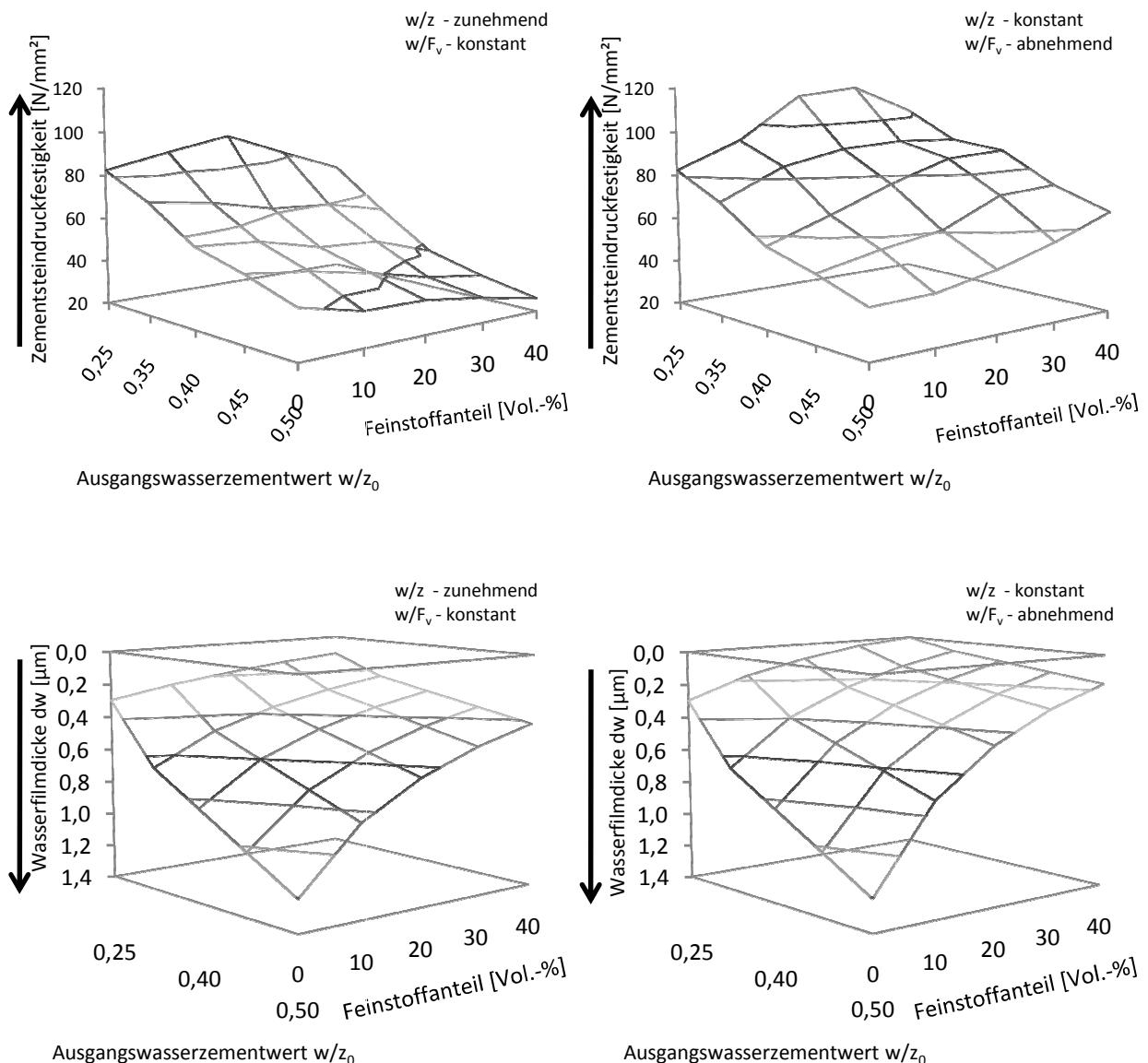


Abbildung 84: Zusammenhang zwischen Feinstoffgehalt, Wassergehalt bzw. Wasserfilmdicke und Druckfestigkeit; CEM 3 ausgetauscht durch das Hohlraum füllende Quarzmehl Q1; links: w/F_v konstant, w/z zunehmend (Fall A); rechts: w/F_v abnehmend, w/z konstant (Fall B).

7.8.2. Korrelation zwischen Kapillarporengehalt und Dichtigkeit

In den vorangegangen Kapiteln konnte unabhängig voneinander gezeigt werden, dass der Kapillarporengehalt und die Gefügedichtigkeit durch den Einsatz von Füllstoffen signifikant verbessert werden konnte. Für ein ingenieurpraktisches Modell, wie es in den Abschnitten 8.1 und 8.2 aufgestellt wird, ist es wichtig, dass anhand weniger Eingangswerte nicht nur die Druckfestigkeit, sondern auch die Dauerhaftigkeit des Werkstoffes prognostiziert werden

kann. Hierzu wurde der Kapillarporengehalt, der über die Wasserfilmdicke ermittelt wird, mit den charakteristischen Werten für die Gefügedichtigkeit und den Stofftransport korreliert.

Der Kapillarporengehalt ist der Teil im Gesamtporengefüge in dem die wesentlichen Transportmechanismen stattfinden. Bei den in dieser Arbeit geprüften Zementsteinen mit unterschiedlichen Gehalten an Feinstoffen und unterschiedlichen Feinstoffarten ergab sich eine gute Korrelation zwischen dem Kapillarporengehalt, der kapillaren Wasseraufnahme, der Wasserdampfdiffusion und dem Diffusionswiderstand gegen das Eindringen von Chloriden. Die folgenden Abbildungen zeigen den Zusammenhang zwischen dem Kapillarporengehalt und den jeweiligen Transporten. Die exponentielle Korrelation der einzelnen Ergebnisse erwies sich mit Bestimmtheitsmaßen über 0,78 als ausreichend gut.

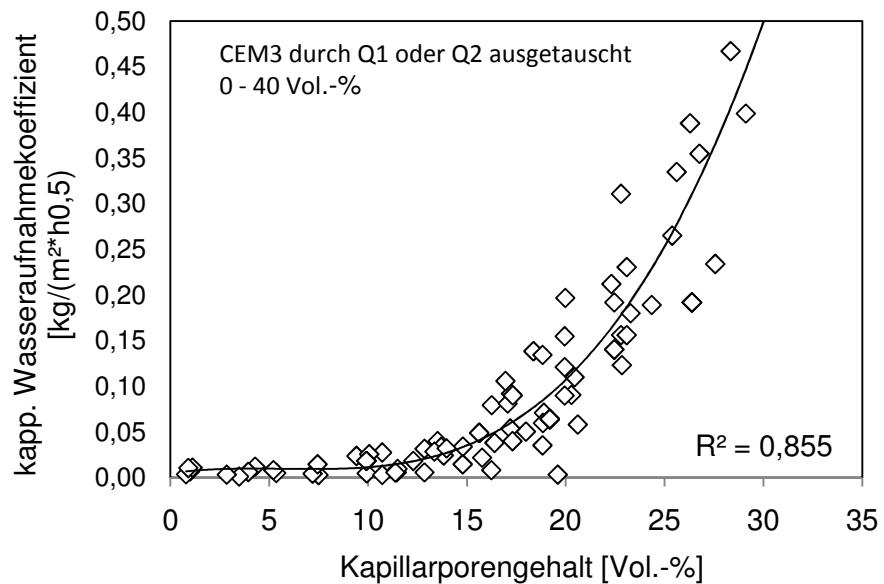


Abbildung 85: Zusammenhang zwischen Kapillarporengehalt und kap. Wasseraufnahmekoeffizienten.

Mit zunehmendem Kapillarporengehalt stieg der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient exponentiell an. D.h., wenn es gelingt, den Kapillarporengehalt zu senken, erhöht sich der Widerstand des Zementsteins gegenüber dem kapillaren Eindringen von Wasser.

Ähnlich verhielt sich der Wasserdampfdiffusionskoeffizient. Mit zunehmendem Kapillarporengehalt nahm die Durchdringung durch Wasserdampf zu.

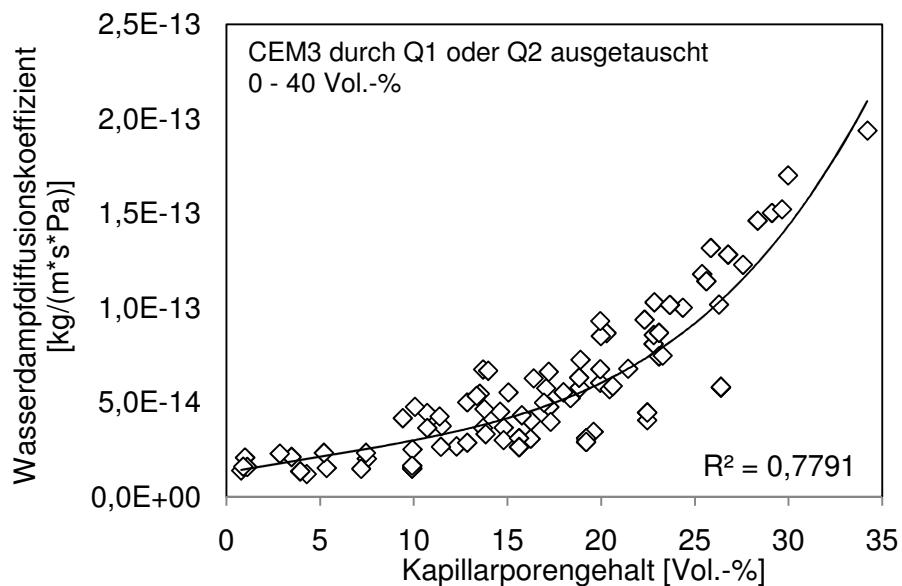


Abbildung 86: Zusammenhang zwischen Kapillarporengehalt und Wasserdampfdiffusionskoeffizienten.

Da der größte Teil der Chloridionen praktisch huckepack im Wasser durch Konvektion eingetragen wird, steigert sich der Chloriddiffusionswiderstand in ähnlicher Weise. Allen drei Transportfunktionen war gemeinsam, dass ab einem Kapillarporengehalt von 20 Vol.-% der jeweilige Stofftransport überproportional anstieg. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Feststellungen in [Sta2001; Pow1968].

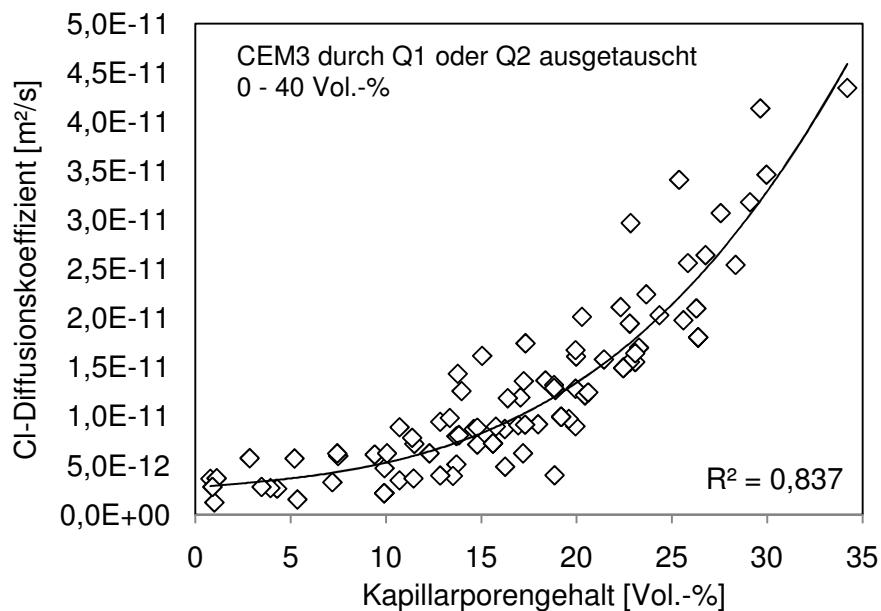


Abbildung 87: Zusammenhang zwischen Kapillarporengehalt und Cl⁻-Diffusionskoeffizient.

8. Modellbildung

8.1. Modell zur Abschätzung der Druckfestigkeit

Abbildung 88 zeigt den Zusammenhang zwischen der Wasserfilmdicke d_w , dem Feinstoffgehalt und der Druckfestigkeit des Zementsteins anhand ausgewählter Messwerte und verdeutlicht den direkten Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Wasserfilmdicke. Für eine bessere Übersicht wurde auf die Darstellung der Ergebnisse für $w/z_0=0,40$ und $0,45$ verzichtet. In dieser Darstellung wurden alle Messwerte aus Abbildung 84 so kombiniert, dass der Zusammenhang zwischen Wasserfilmdicke und Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Feinstoffgehalt und damit der Packungsdichte dargestellt werden kann. Die Abbildung verdeutlicht, dass beim Austausch des Zements durch einen inerten und zugleich Hohlraum füllenden Feinstoff nur dann vergleichbare Druckfestigkeiten wie bei der reinen Zementsteinmatrix erreicht werden können, wenn die Wasserfilmdicke und damit der Partikelabstand entsprechend reduziert werden. Ist die Wasserfilmdicke zu groß, verringert sich, trotz Austausch des Zements durch einen Hohlraum füllenden Stoff, die Druckfestigkeit.

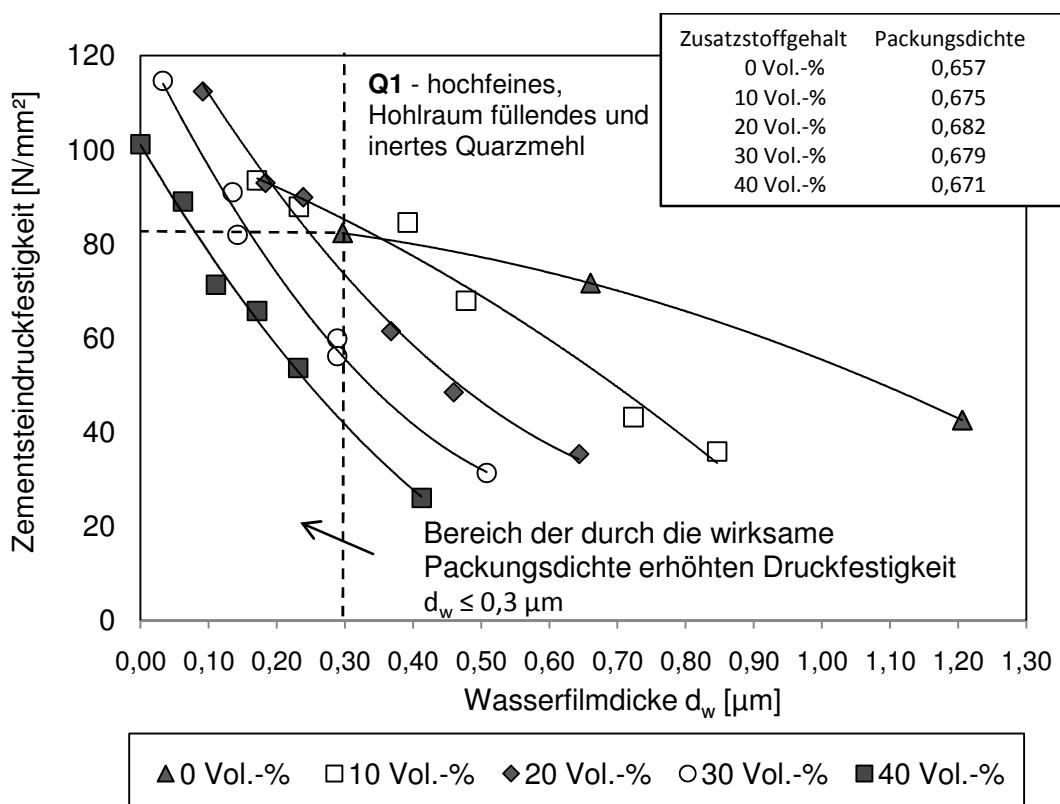


Abbildung 88: Zusammenhang zwischen Wasserfilmdicke d_w , Zementsteindruckfestigkeit und inertern Zusatzstoffgehalt beim Austausch eines CEM I 32,5 R (CEM3) durch ein hochfeines, packungswirksames Quarzmehl Q1.

Der Zusammenhang zwischen Wasserfilmdicke, Füllstoffgehalt und Druckfestigkeit kann über eine jeweils individuelle nicht lineare Gleichung beschrieben werden. Wie Tabelle 17 mit den zugehörigen Regressionsgleichungen zeigt, wird mit zunehmendem Füllstoffgehalt und zunehmender Packungsdichte der Einfluss der Wasserfilmdicke d_w auf die Druckfestigkeit größer. Bei Füllstoffgehalten, die über das Optimum der Packungsdichte hinausgehen nimmt der Einfluss wieder ab. Höchste Druckfestigkeiten werden nur bei der optimalen Packungsdichte im Bereich 20 bis 30 Vol.-% Füllstoffgehalt und bei Wasserfilmdicken von weniger als 0,3 µm erzielt. In Tabelle 16 sind die rechnerischen Wasserfilmdicken zusammengefasst, ab denen, in Abhängigkeit vom Austauschvolumen, die die Druckfestigkeit der reinen und bei rd. 82 N/mm² stagnierenden Druckfestigkeit (siehe Abbildung 89) überschritten wurde. Beispielsweise konnte gegenüber der Ausgangsmischung (nur Zement und Wasser) mit einem w/z-Wert von 0,25 bei unverändertem w/z-Wert durch die gezielte Füllung der Hohlräume und bei gleichzeitigem Austausch des Zements durch 20 Vol.-% eines Hohlraum füllenden Quarzmehls die Druckfestigkeit von rd. 82 N/mm² um 37% auf 112 N/mm² gesteigert werden. Hierbei wurde die Wasserfilmdicke von 0,48 µm auf 0,09 µm verringert.

Tabelle 16: Rechn. Wasserfilmdicken unterhalb derer in Abhängigkeit vom Austauschvolumen (CEM3 durch Q1) die höchsten Druckfestigkeiten erreicht wurden.

Austauschvolumen (CEM3 durch Q1)	10 Vol.-%	20 Vol.	30 Vol.-%	40 Vol.
rechn. Wasserfilmdicken	0,30 µm	0,25 µm	0,15 µm	0,09 µm

Bei Wasserfilmdicken unterhalb von rd. 0,15 µm ist mit den in dieser Arbeit verwendeten Stoffen mit einer erhöhten Viskosität des Feinstoffleims aufgrund erhöhter interpartikulärer Kräften zu rechnen, wie in Abschnitt 7.2 gezeigt wurde.

Tabelle 17: Darstellung des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Druckfestigkeit und Wasserfilmdicke d_w in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt.

Füllstoffgehalt	Regressionsgleichung	Bestimmtheitsmaß
0 Vol.-%	$f_0(d_w) = -26,5 \cdot d_w^2 - 3,9 \cdot d_w + 86$	R = 1,00
10 Vol.-%	$f_{10}(d_w) = -39 \cdot d_w^2 - 49,8 \cdot d_w + 103,5$	R = 0,97
20 Vol.-%	$f_{20}(d_w) = 144,7 \cdot d_w^2 - 250,6 \cdot d_w + 135,5$	R = 0,97
30 Vol.-%	$f_{30}(d_w) = 217,4 \cdot d_w^2 - 291,2 \cdot d_w + 123,4$	R = 0,99
40 Vol.-%	$f_{40}(d_w) = 149,2 \cdot d_w^2 - 243 \cdot d_w + 101,1$	R = 0,99

Der Vergleich mit Abbildung 89 verdeutlicht nochmals den Einfluss des Füllereffekts auf die Druckfestigkeit. Trotz vergleichbar reduzierter Wasserfilmdicken d_w und gleichen Feinstoffgehalten ließ sich die Druckfestigkeit, der durch die Feinstoffe modifizierten Zementsteinmatrix, nicht über das Niveau des reinen Zementsteins steigern. Die Druckfestigkeit stagnierte bei rd. 83 N/mm². Die Packungsdichte wurde hierbei durch die Zugabe des zementfeinen Quarzmehls Q2 in den untersuchten Grenzen praktisch nicht verändert.

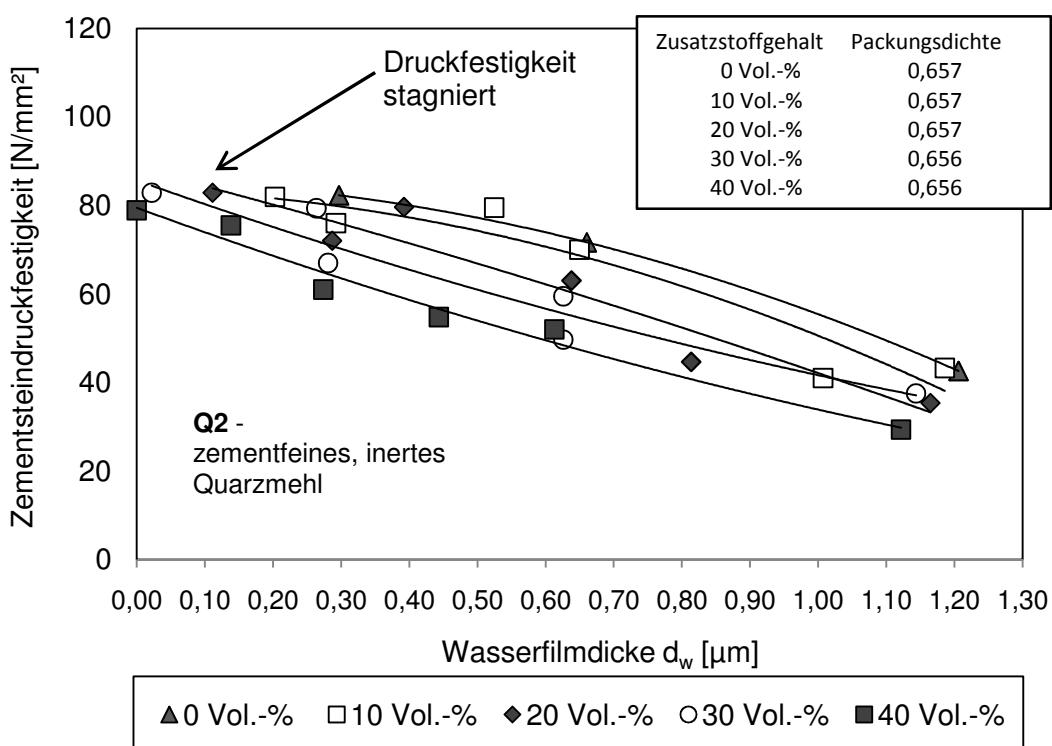


Abbildung 89: Zusammenhang zwischen Wasserfilmdicke, Zementsteindruckfestigkeit und inertem Zusatzstoffgehalt beim Austausch eines CEM I 32,5 R (CEM3) durch ein zementfeines Quarzmehl Q2.

Wurde die rechn. Wasserfilmdicke auf bis zu Null verringert, war es bei gleicher Druckfestigkeit möglich bis zu 40 Vol.-% Zement einzusparen. Die Verarbeitbarkeit des Feinstoffleims nahm dabei jedoch immer weiter ab. Der Feinstoffleim verhielt sich dann dilatant.

Die den Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit, Wasserfilmdicke und Feinstoffgehalt kennzeichnenden Regressionsgleichungen sind im Anhang aufgeführt.

Für die Praxis ist ein Abgleich dieser Abhängigkeiten in bestehende Gesetzmäßigkeiten von großer Wichtigkeit. Ein wesentliches Kriterium zur Einordnung von Beton ist neben der Druckfestigkeit der w/z-Wert. Im Folgenden wird der effektive w/z-Wert aus dem

Gesamtgehalt an Wasser (mittlere rechn. Wasserfilmdicke und Hohlräumwasser) und der Masse an Zement berechnet.

Die Wasserfilmdicke d_w berechnet sich aus der Differenz des zugegebenen Gesamtwasservolumens und dem Volumen des Wassers in den Hohlräumen zwischen den Feinkörnern (siehe Abschnitt 6.5). In Anlehnung an diesen Zusammenhang kann entsprechend der folgenden Vorstellung der individuelle w/z-Wert in Abhängigkeit von der Wasserfilmdicke d_w , der Packungsdichte PD, der spezifischen Oberfläche s_{vF} und vom Zementgehalt a_z berechnet werden.

$$w/z = \frac{\text{Volumen des Wassers}}{\text{Masse des anteiligen Zements}} = \frac{\text{Wasserfilm} + \text{Hohlräumwasser}}{\text{Masse des anteiligen Zements}}$$

$$w/z = \frac{\frac{d_w}{100.000} \cdot s_{vF} \cdot V_F + \frac{1 - PD_F}{PD_F} \cdot V_F}{V_F \cdot a_z \cdot \rho_z}$$

Gleichung 25

d_w	Wasserfilmdicke [μm]	PD_F	rechn. Packungsdichte nach Schwanda [-]
s_{vF}	spez. Oberfläche des Feinstoffs [dm^2/dm^3]	a_z	volumetrischer Anteil des Zements [-]
V_F	Feinstoffvolumen [dm^3]	ρ_z	Reindichte des Zements [kg/dm^3]

Mit Hilfe der Wasserfilmdicke d_w lässt sich mit der vorrgehenden Gleichung nicht nur der w/z-Wert, sondern auch nach Tabelle 17 der dazugehörige Wert für die Druckfestigkeit der Zementsteinmatrix berechnen. In Abbildung 90 sind die so ermittelten Werte in Anlehnung an die Walz-Kurven miteinander in Zusammenhang gebracht und beispielhaft für einen reinen Zementstein und einen Zementstein mit 20 Vol.-% Zementtausch durch ein packungswirksames, hochfeines bzw. ein nicht packungswirksames, zementfeines und inertes Quarzmehl dargestellt.

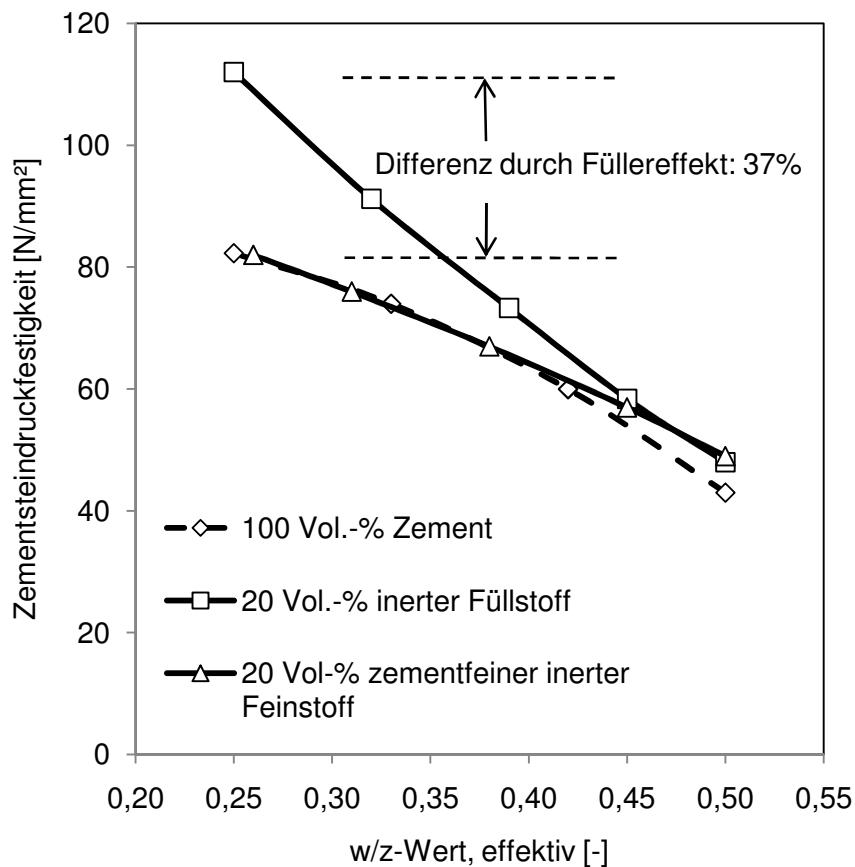


Abbildung 90: Zusammenhang zwischen w/z-Wert und Druckfestigkeit nach 28 Tagen in Abhängigkeit von der Feinstoffart und vom Füllereffekt.

Der Effekt der Füllerwirkung zeigte sich insbesondere bei niedrigen w/z-Werten. Je niedriger der w/z-Wert und damit die Gesamtmenge an Wasser im System wurde, desto dünner wurde die, die Partikel umgebende, Wasserfilmdicke d_w , die den theoretischen Partikelabstand kennzeichnet. Dadurch konnte der Hohlraum füllende Effekt besser wirken. Abbildung 91 zeigt den Zusammenhang zwischen der Wasserfilmdicke d_w und dem w/z-Wert. Der Gefüge verdichtende Füllereffekt kann hier besonders gut wirksam werden, da die bei der Hydratationsreaktion zu überbrückenden Räume zwischen den Festpartikeln klein sind. Wie bereits beschrieben war bei dem w/z-Wert 0,25 die Druckfestigkeit der mit dem Füllstoff optimierten Zementsteinmatrix mit 112 N/mm^2 um 37 % höher als die der reinen Zementsteinmatrix oder beim Austausch des Zements durch das zementfeine Quarzmehl. Mit zunehmendem w/z-Wert nahm die Wirksamkeit des Füllereffektes ab, die Differenz zwischen der optimierten Matrix und dem reinen Zementstein wurde kleiner und folgte einer quadratischen Funktion. Oberhalb des w/z-Werts 0,40 näherte sich die Druckfestigkeit der Zementsteine mit dem zementfeinen Quarzmehl Q2 den Zementsteinen mit dem füllenden Quarzmehl Q1 an. Dieser Effekt kann durch die sich angleichenden Hydratationsgrade erklärt werden. Bei w/z-Werten unterhalb 0,40 steht dem Zement nicht genügend Wasser für eine 100%ige Hydratation zur Verfügung. Die Untersuchungen zum Hydratationsgrad in

Abschnitt 5.4.7 zeigten zudem, dass mit zunehmender Feinheit des Zement-Zusatzstoff-Gemischs der Hydratationsgrad bei gleichem w/z-Wert abnahm.

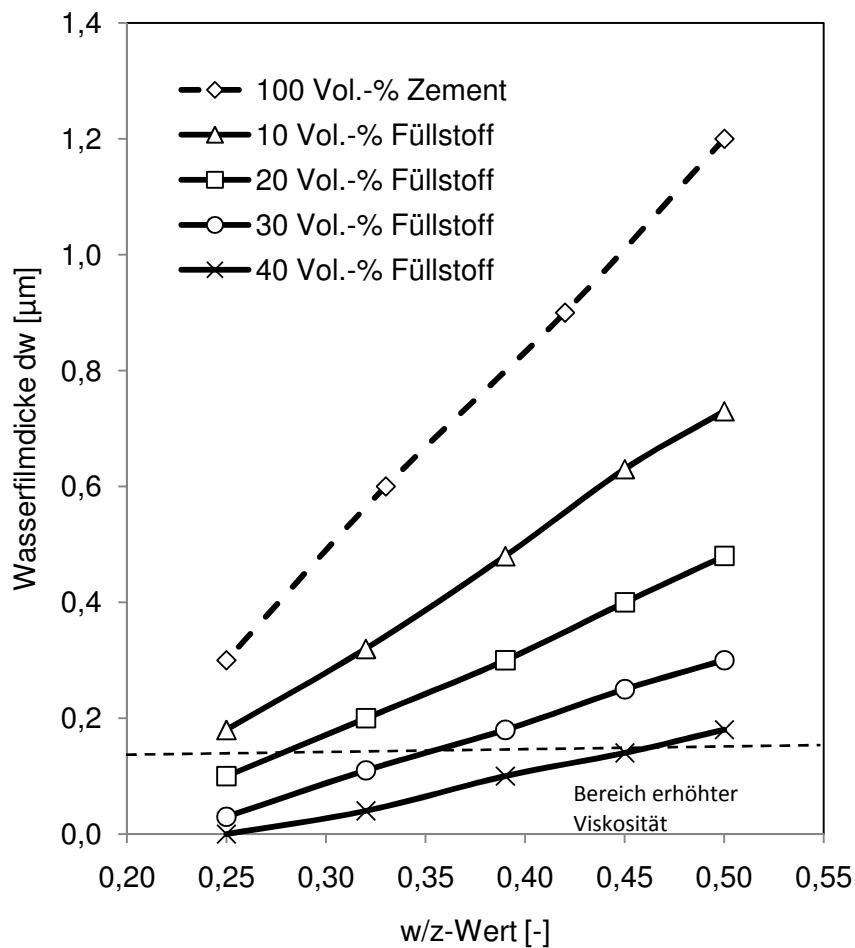


Abbildung 91: Zusammenhang zwischen w/z-Wert und Wasserfilmdicke in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt (hochfeinen Quarzmehl Q1).

8.2. Modell zur Abschätzung des Kapillarporengehalts

Wie bei der Druckfestigkeit kann auch der Kapillarporengehalt mit der Wasserfilmdicke d_w und dem Füllstoffgehalt korreliert werden, siehe Abbildung 92. Dabei zeigte sich, dass in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt der Kapillarporengehalt proportional zur Wasserfilmdicke d_w abnahm. Je höher dabei der Füllstoffgehalt und damit die sich ergebende spezifische Oberfläche waren, umso enger wurde der Zusammenhang zwischen Wasserfilmdicke und Kapillarporengehalt. Ab 30 Vol.-% und mehr Austausch besteht eine nahezu lineare Abhängigkeit.

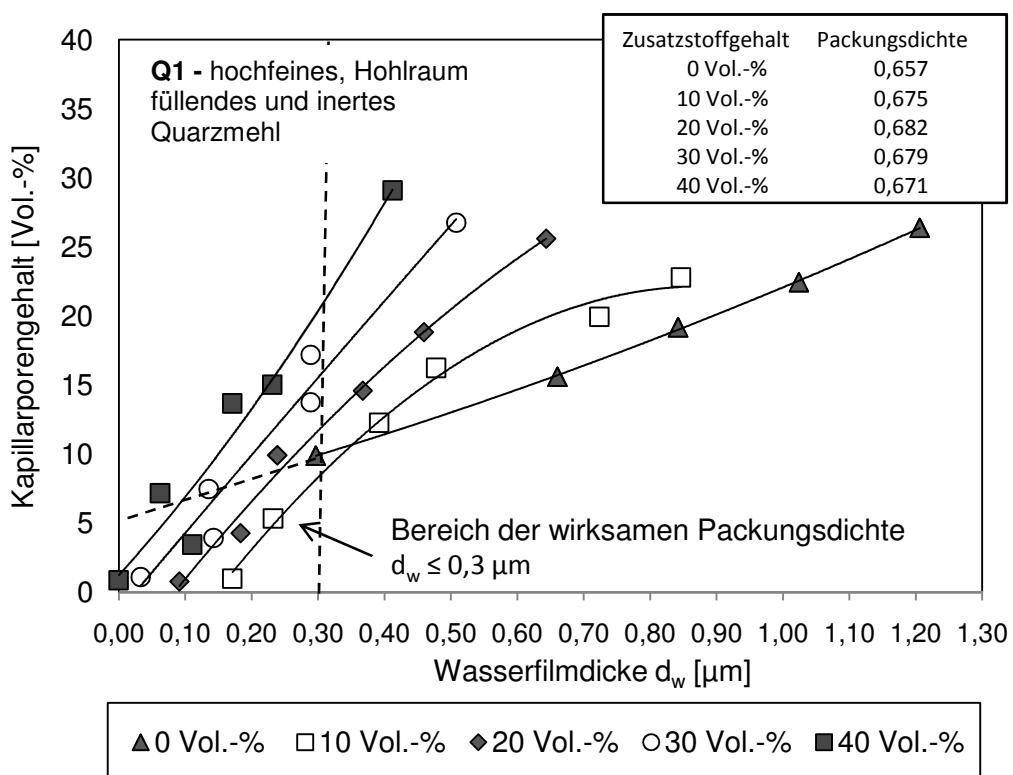


Abbildung 92: Zusammenhang zwischen der Wasserfilmdicke d_w , dem Kapillarporengehalt und dem Gehalt an inertem, Hohlraum füllenden Quarzmehl Q1 beim Austausch des CEM3.

Vergleicht man die der Wasserfilmdicke zugeordneten Kapillarporengehalte, so fällt auf, dass mit zunehmendem Zementtausch durch das hochfeine Quarzmehl Q1 der Kapillarporengehalt abnahm. Dies ist eine Folge der reduzierten Wasserfilmdicke.

Jedoch war bei gleichen Wasserfilmdicken und damit gleich guten Verarbeitungseigenschaften der Kapillarporengehalt umso geringer, je höher der Anteil an Zement war. Dieser Zusammenhang trifft bis zu einer Wasserfilmdicke von rd. 0,30 μm zu. Diese Wasserfilmdicke entspricht bei einem CEM I 32,5 R mit einer Mahlfeinheit von 2750 cm^2/g einem w/z-Wert von 0,25. Der Kapillarporengehalt lag hier bei rd. 10 Vol.-%. Wurde der Zement zu 10 Vol.-% durch das Hohlraum füllende, hochfeine Quarzmehl Q1 ausgetauscht und dadurch die Wasserfilmdicke von 0,30 μm auf 0,20 μm gesenkt, verringerte sich der Kapillarporengehalt um 60% auf rd. 3 Vol.-%. Der w/z-Wert betrug dabei 0,26. Wie Abbildung 93 anhand des Austauschs des Zements durch das praktisch gleich feine Quarzmehl Q2 zeigt, war jedoch eine reine Reduktion der Wasserfilmdicke nicht ausreichend. Der Vergleich beider Abbildungen verdeutlicht, dass nur ein entsprechender Füllstoff bei ausreichend niedriger Wasserfilmdicke unter 0,30 μm in der Lage ist, den Kapillarporengehalt signifikant zu verringern.

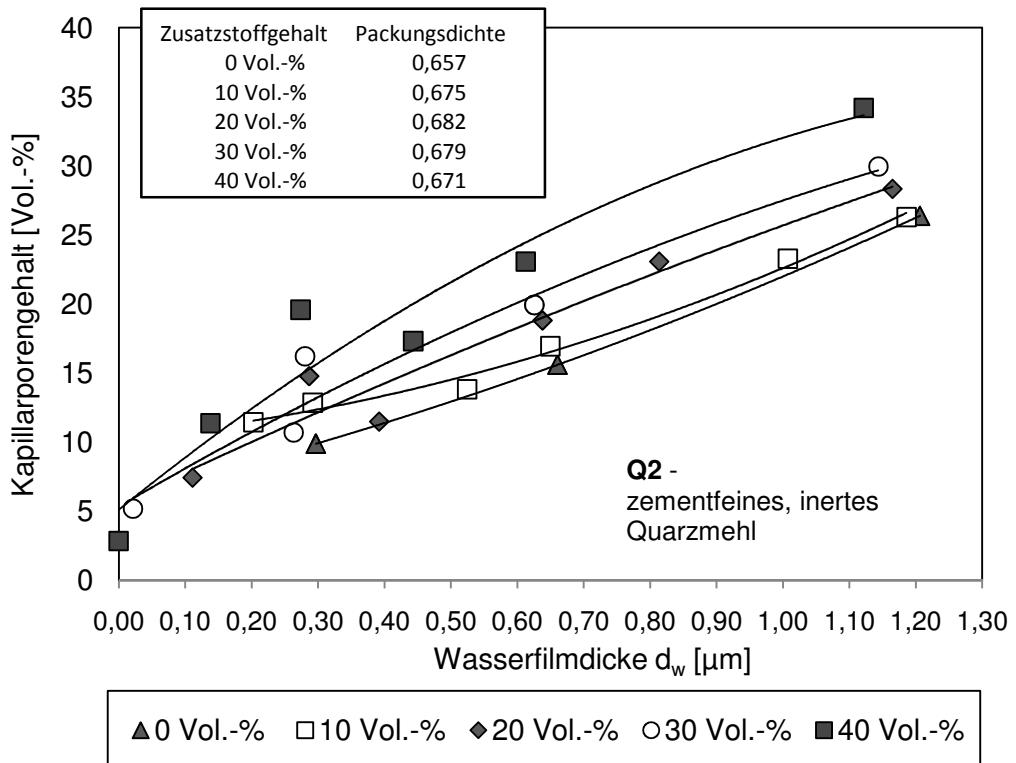


Abbildung 93: Zusammenhang zwischen der Wasserfilmdicke d_w , dem Kapillarporengehalt und dem Gehalt an inertem, zementfeinem Quarzmehl Q2 beim Austausch des Zements CEM3.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass die Schnittpunkte, die sich zwischen der Verlängerung der Resultierenden des reinen Zementsteins und den Zementsteinen mit 10 bis 40 Vol.-% packungswirksamen Q1 bilden lassen, denen entsprechen, die auch für die Druckfestigkeit ableitbar sind.

Tabelle 18: Rechn. Wasserfilmdicken unterhalb derer in Abhängigkeit vom Austauschvolumen (CEM3 durch Q1) der Kapillarporengehalt des reinen Zementsteins (nur CEM3) unterschritten wird.

Austauschvolumen (CEM3 durch Q1)	10 Vol.-%	20 Vol.	30 Vol.-%	40 Vol.-%
rechn. Wasserfilmdicken	0,30 μm	0,25 μm	0,15 μm	0,09 μm

Wie bei der Druckfestigkeit auch, konnte der gefügeverdichtende Effekt des hochfeinen Quarzmehls Q1 erst bei Wasserfilmdicken unterhalb 0,3 μm und damit bei sehr geringen w/z-Werten besonders gut wirksam werden. Dies ist in Abbildung 94 anhand der für die jeweiligen Wasserfilmdicken berechneten w/z-Werte verdeutlicht. Der Austausch des Zements durch das zementfeine Quarzmehl Q2 bei gleichem w/z-Wert verringerte den Kapillarporengehalt gleichmäßig um rd. 1,5 Vol.-%. Beim Austausch durch das hochfeine, Hohlraum füllende Quarzmehl verringerte sich der Kapillarporengehalt bei einem w/z-Wert von 0,50 von 23,3 Vol.-% bereits um 3,6 Vol.-% auf 19,7 Vol.-%. Je geringer der w/z-Wert

wurde, desto größer wurden auch die Unterschiede. Bei dem w/z-Wert 0,25 wurde der Kapillarporengehalt von 10,0 Vol.-% auf 1,0 Vol.-% reduziert.

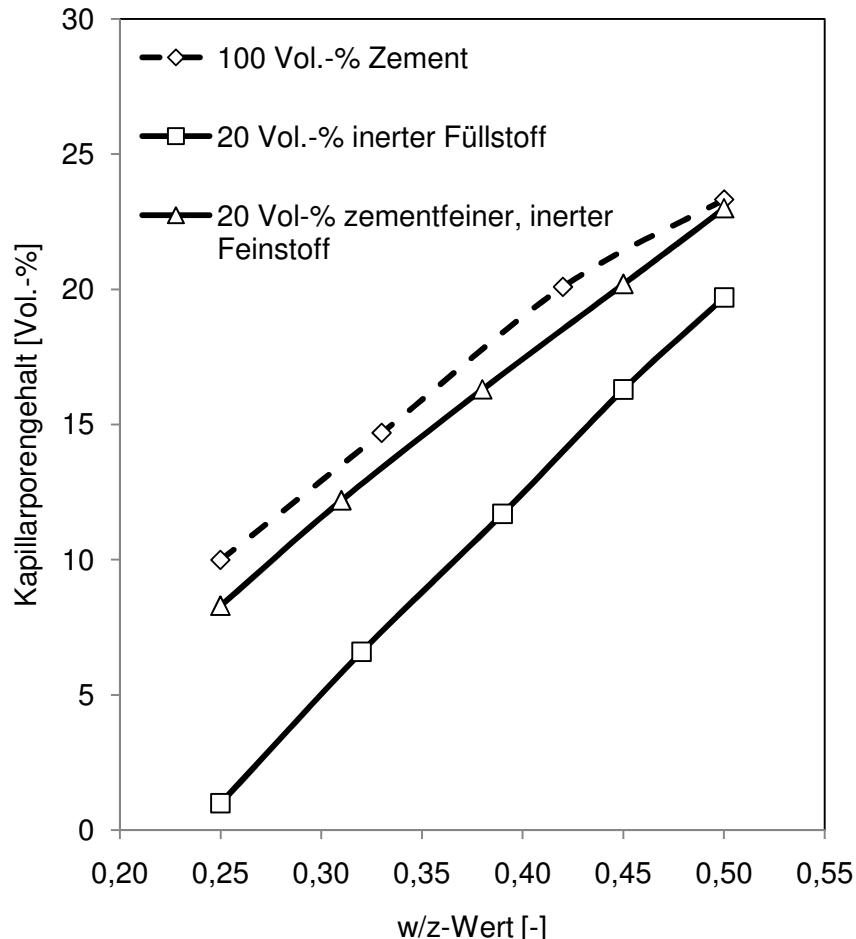


Abbildung 94: Zusammenhang zwischen w/z-Wert und Kapillarporengehalt in Abhängigkeit von der Feinheit (Füllerwirkung) und des Zusatzstoffs, Zement durch 20 Vol.-% Zusatzstoff ausgetauscht.

8.3. Berechnung eines Anrechenbarkeitsfaktors für inerte Feinstoffe im Zementstein

8.3.1. Anrechenbarkeitsfaktoren für die Druckfestigkeit

In der Arbeit konnte gezeigt werden, dass inerte Feinstoffe, die eine Hohlraum füllende Funktion übernehmen können und die Packungsdichte steigern, die Druckfestigkeit und die Gefügedichtigkeit maßgeblich erhöhen. Die physikalische Wirkung beruht auf der Erhöhung der Packungsdichte und der spezifischen Oberfläche. Dadurch werden zum einen mehr Kontaktstellen geschaffen und der Abstand zwischen den Festkörnern reduziert. Durch die

Erhöhung der Packungsdichte wird der Wasseranspruch, trotz deutlich erhöhter spezifischer Oberfläche des Feinkorns, bei optimaler Abstimmung nicht erhöht. Ein chemischer Festigkeitsbeitrag konnte bei den als inert eingestuften Quarzmehlen nicht festgestellt werden. Um die Wirksamkeit packungswirksamer Stoffe zu charakterisieren bietet es sich an, angelehnt an bestehende Verfahren z.B. für Steinkohleflugasche [We1984], einen Anrechenbarkeitsfaktor zu bestimmen. Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse der vorliegenden Arbeit in dieser Hinsicht ausgewertet. Dabei werden die Anteile massebezogen berücksichtigt.

Der Festigkeitsbeitrag von Gesteinsmehlen oder Steinkohleflugaschen wird über den Anteil k bezogen auf den Masseanteil Zement (kg/kg) im Mörtel oder Beton gekennzeichnet. Bei $k = 0,50$ wäre damit die Hälfte des Zusatzstoffs in Bezug auf die Druckfestigkeit als zementäquivalent anzusetzen.

$$w/z_{eq} = \frac{w}{z + k \cdot f}$$

Gleichung 26

Unter der vereinfachenden Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Druckfestigkeit und w/z-Wert wird der w/z-Wert ω_f der Probe mit dem Feinstoff berechnet, bei dem genau die Druckfestigkeit der Referenzprobe, unter sonst vergleichbaren Bedingungen ohne Feinstoff, mit ω_0 erreicht wird. Dieser Zusammenhang ist bildlich in Abbildung 99 auf Seite 144 dargestellt.

$$k = \left(\frac{\omega_f}{\omega_0} - 1 \right) \cdot \frac{z}{f_f}$$

Gleichung 27

Abbildung 95 veranschaulicht die auf diese Art für das packungswirksame Quarzmehl Q1 berechneten Anrechenbarkeitsfaktoren k für die unterschiedlichen Zusatzstoffgehalte (hier kennzeichnend als Füllstoff bezeichnet). Da das Verhältnis z/f_f (Zement/Feinstoff) massebezogen in die obige Gleichung zur Berechnung des k-Wertes eingeht, ist der k-Wert bei sehr geringen Austauschmengen entsprechend groß. Deutlich wird, dass der k-Wert bei dem Füllstoff mit zunehmendem w/z-Wert kleiner wird, siehe auch Tabelle 19. Dies ist auf die zunehmende Wasserfilmdicke und die dadurch reduzierte Wirkung der Packungsdichte zurückzuführen. Für die hinsichtlich der Packungsdichte optimale Austauschmenge von 20 Vol.-% ergibt sich bei dem w/z-Wert von 0,25 ein k-Wert von rd. 1,87. Mit zunehmendem w/z-Wert verringert sich der k-Wert dann auf bis zu 0,21. Bis zum w/z-Wert von 0,35 ist der k-Wert größer als 1,0. Dementsprechend kann in diesem Beispiel bei einem w/z-Wert von 0,35 oder geringer der volle Anteil des Füllstoffs zementäquivalent auf die Druckfestigkeit des Zementsteins angesetzt werden. Je höher der Feinstoffgehalt ist, desto gleichmäßiger,

aber auch desto geringer sind die k-Werte. Abbildung 95 stellt die Entwicklung der Anrechenbarkeitsfaktoren (k-Werte) über den zunehmenden w/z-Wert und in Abhängigkeit vom Feinstoffgehalt anschaulich dar.

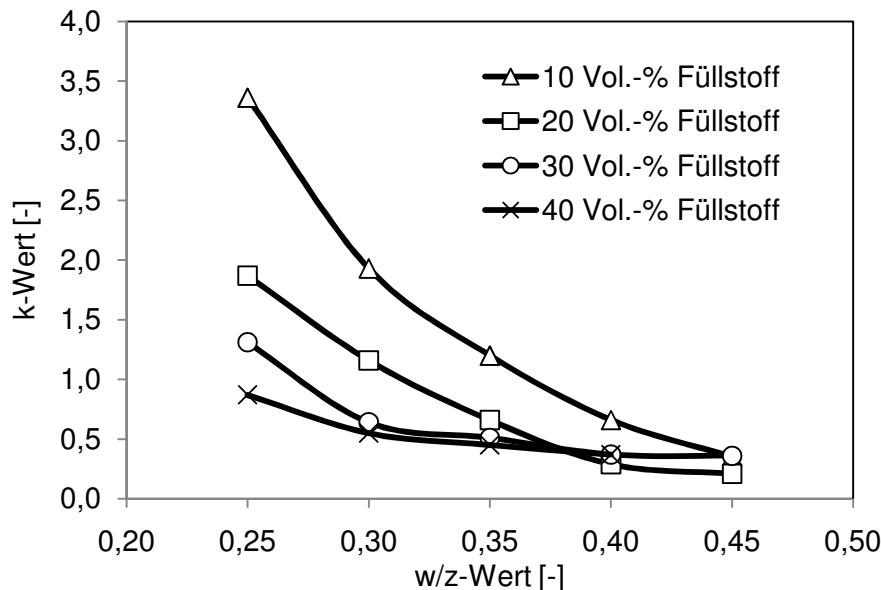


Abbildung 95: Anrechenbarkeitsfaktoren (k-Wert) für die Druckfestigkeit des Zementsteins für das packungswirksame Quarzmehl Q1 mit dem CEM3.

Wie die Untersuchungen zur Dichtigkeit der Zementsteinmatrix gezeigt haben, ist durch die gezielte Anrechnung eines geeigneten Füllstoffs in den hier untersuchten Grenzen keine Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit zu erwarten, da sich der Kapillarporenanteil verringert. Beispielsweise ergibt sich bei einem w/z-Wert von 0,25 beim reinen Zementstein eine Druckfestigkeit von rd. 83 N/mm² und ein Kapillarporengehalt von 10 Vol.-%. Bei einer Austauschmenge von 20 Vol.-% ergibt sich bei dem entsprechenden äquivalenten w/z_{eq} = 0,25 (w/z = 0,35) ein etwas geringerer Kapillarporengehalt von rd. 9 Vol.-%.

Tabelle 20 fasst die ermittelten Anrechenbarkeitsfaktoren für den Austausch des Zements CEM3 durch das packungswirksame Quarzmehl Q1 für die w/z-Werte von 0,25 bis 0,45 zusammen.

Der volumengleiche Ersatz des Zements CEM3 durch das gleich feine, inerte Quarzmehl Q2 ergab keine Veränderung oder sogar eine Verringerung der Druckfestigkeit der Zementsteinmatrix bei niedrigen w/z-Werten. Dementsprechend ergibt sich entweder ein k-Wert von Null, wenn die Festigkeit weder positiv noch negativ beeinflusst wird oder ein negativer k-Wert, wie Tabelle 20 zeigt.

Tabelle 19: k-Werte für die Druckfestigkeit der Zementsteine mit dem Zement CEM3 und dem hochfeinen Quarzmehl Q1 für die w/z-Werte von 0,25 bis 0,45; CEM3 volumengleich durch Q1 ausgetauscht.

Q1	w/z-Wert				
	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
10 Vol.-%	3,36	1,93	1,20	0,66	0,35
20 Vol.-%	1,87	1,16	0,66	0,29	0,21
30 Vol.-%	1,31	0,64	0,51	0,37	0,36
40 Vol.-%	0,87	0,55	0,45	0,37	n.b. ¹⁾

1) n.b. nicht bestimmbar

Tabelle 20: k-Werte für die Druckfestigkeit der Zementsteine mit dem Zement CEM3 und dem zementfeinen Quarzmehl Q2 für die w/z-Werte von 0,25 bis 0,45; CEM3 volumengleich durch Q1 ausgetauscht.

Q2	w/z-Wert				
	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
10 Vol.-%	-0,59	0	0,60	0,66	0,58
20 Vol.-%	0	0	0,13	0,14	0,21
30 Vol.-%	-0,42	-0,13	0	0,10	0,30
40 Vol.-%	0	0	0	0	0,08

Der Vergleich der Gesteinsmehle Q1 und K1, dargestellt in Abbildung 96 und Tabelle 21, zeigt, dass sich trotz der unterschiedlichen chemischen und mineralogischen Zusammensetzung beider Gesteinsmehle keine nennenswerten Unterschiede in der Beeinflussung der Druckfestigkeit und der Dichtigkeit der Zementsteinmatrix ergeben und somit auch die berechneten k-Werte nahezu gleich sind. Dieser Effekt kann demzufolge auf die nahezu gleiche Sieblinie zurückgeführt werden.

Die k-Werte für die Gemische aus dem feineren CEM4 und dem Quarzmehl Q1 sind mit denen der Gemische aus dem gröberen Zement CEM3 in den w/z-Wert Bereichen 0,25 bis 0,35 praktisch identisch. Sie nehmen in diesem w/z-Wert Bereich gleichmäßig von 1,77 auf 0,67 ab. Erst oberhalb von $w/z = 0,35$ sind die k-Werte der Gemische mit dem CEM4 größer. Dieser Effekt kann auf die Beeinflussung der Wasserfilmdicke und das höhere Reaktionspotential des feineren Zements zurückgeführt werden. Im w/z-Wert Bereich unterhalb 0,32 liegt die rechnerische Wasserfilmdicke der Gemische mit CEM4 und Q1 unterhalb 0,15 µm. Hier muss mit einer erhöhten Viskosität gerechnet werden, die einer optimalen Verdichtung entgegenwirkt, während bei den Gemischen mit CEM3 und Q1 bzw. K1 vergleichbar geringe rechn. Wasserfilmdicken erst ab einem w/z-Wert von 0,28 erreicht

werden. Darüber hinaus kommt in diesen w/z-Wert Bereichen unterhalb 0,35 der Füllereffekt der Gemische mit CEM3 und Q1 bzw. K1 erst voll zur Geltung und erhöht die Druckfestigkeit maßgeblich. Die k-Werte für das hochfeine Kalksteinmehl K1 sind insgesamt vergleichbar mit denen des hochfeinen Quarzmehls Q1. Die etwas geringeren Werte resultieren im Wesentlichen aus dem kleineren Verhältnis (bezogen auf die Dichte) von Zement und Zusatzstoff (z/f_f).

In den w/z-Wert Bereichen oberhalb 0,35 sind die Wasserfilmdicken der Gemische mit CEM4 mit 0,33 µm (w/z=0,45) und 0,39 µm (w/z=0,50) rd. 25% dünner als bei den Gemischen mit CEM3. Der daraus resultierende geringere Partikelabstand bewirkt die Festigkeitserhöhung der Gemische mit CEM4 in den oberen w/z-Wert Bereichen.

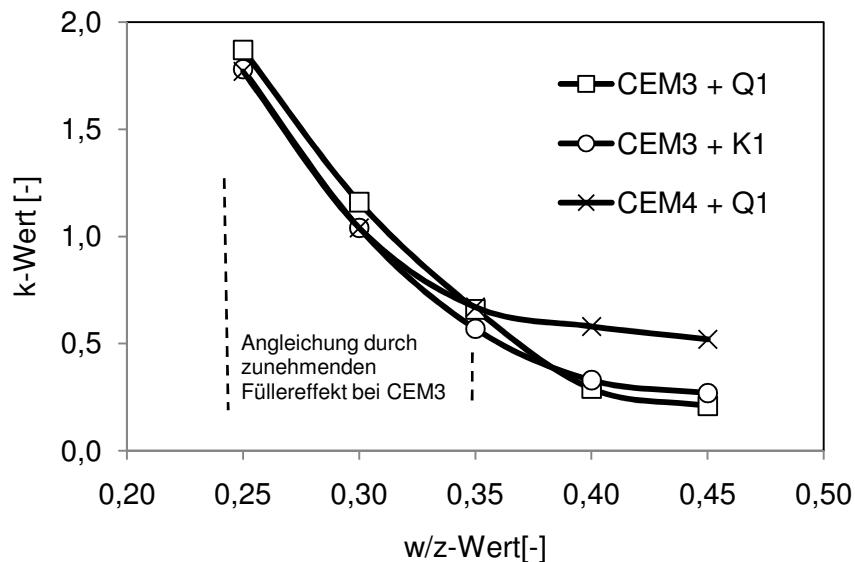


Abbildung 96: Anrechenbarkeitsfaktoren (k-Werte) für unterschiedliche Zement-Feinstoff-Kombinationen; Zement zu 20 Vol.-% durch Feinstoff ausgetauscht.

Tabelle 21: k-Werte der Zementsteine mit unterschiedlichen Zement-Feinstoff-Kombinationen für die w/z-Werte von 0,25 bis 0,45; Zement zu 20 Vol.-% durch Feinstoff ausgetauscht.

Kombination	w/z-Wert					z/f_f
	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	
CEM3 + Q1	1,87	1,16	0,66	0,26	0,21	4,682
CEM3 + K1	1,78	1,04	0,57	0,33	0,27	4,451
CEM4 + Q1	1,77	1,04	0,67	0,58	0,52	4,682

8.3.2. Anrechenbarkeitsfaktoren für die Kapillarporosität

Analog zur Bestimmung der Anrechenbarkeitsfaktoren für die Druckfestigkeit des Zementsteins lassen sich mit demselben Verfahren Anrechenbarkeitsfaktoren für die Kapillarporosität berechnen. Abbildung 97 zeigt die ermittelten Anrechenbarkeitsfaktoren (k -Werte) für das packungswirksame Quarzmehl Q1. Auch hier werden die Anrechenbarkeitsfaktoren mit zunehmendem w/z -Wert kleiner. Die über den Kapillarporengehalt ermittelten Anrechenbarkeitsfaktoren sind in der Regel größer als die aus der Druckfestigkeit.

Während der Anrechenbarkeitsfaktor für die Druckfestigkeit bei einem w/z -Wert von 0,40 und einem Füllstoffgehalt von 20 Vol.-% bei 0,29 liegt, beträgt er für den Kapillarporengehalt 1,05. Maßgebend für die Anrechenbarkeit packungswirksamer Feinstoffe sind demnach die aus der Druckfestigkeit ermittelten Anrechenbarkeitsfaktoren.

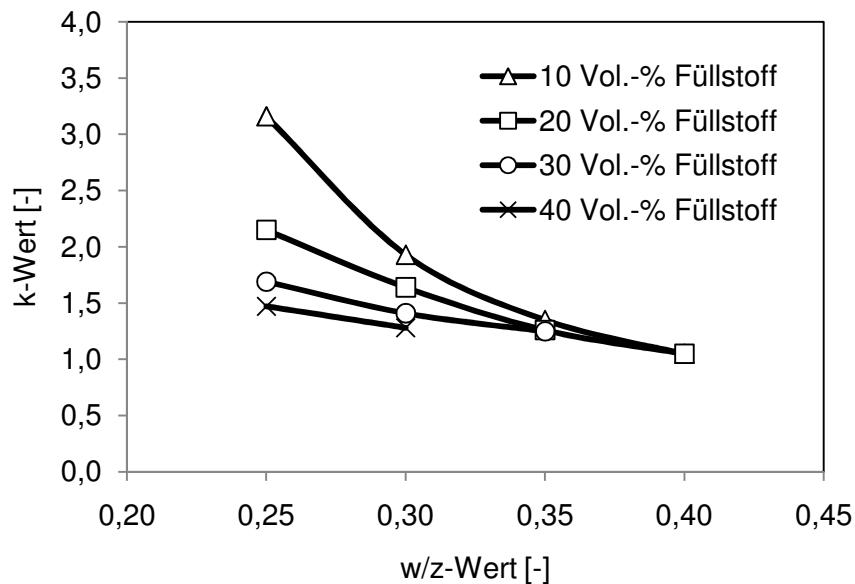


Abbildung 97: Anrechenbarkeitsfaktoren (k -Wert) für den Kapillarporengehalt des Zementsteins für das packungswirksame Quarzmehl Q1 (Füllstoff) mit dem CEM3.

In Tabelle 22 und Tabelle 23 sind die aus dem Kapillarporengehalt berechneten Anrechenbarkeitsfaktoren aufgelistet. Durch die sehr großen Unterschiede zwischen dem reinen Zementstein und dem mit dem packungswirksamen Quarzmehl Q1 modifiziertem Zementstein (siehe beispielhaft Abbildung 94, Seite 133) war die Berechnung von Anrechenbarkeitsfaktoren mit zunehmendem Quarzmehlgehalt und gleichzeitig erhöhtem w/z -Wert nicht möglich.

Tabelle 22: k-Werte für den Kapillarporengehalt der Zementsteine mit dem Zement CEM3 und dem hochfeinen Quarzmehl Q1 für die w/z-Werte von 0,25 bis 0,45; CEM3 volumengleich durch Q1 ausgetauscht.

Q1	w/z-Wert				
	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
10 Vol.-%	3,16	1,93	1,35	1,05	n.b. ¹⁾
20 Vol.-%	2,15	1,64	1,26	1,05	n.b. ¹⁾
30 Vol.-%	1,69	1,41	1,25	n.b. ¹⁾	n.b. ¹⁾
40 Vol.-%	1,47	1,28	n.b. ¹⁾	n.b. ¹⁾	n.b. ¹⁾

1) n.b. nicht bestimmbar

Tabelle 23: k-Werte für den Kapillarporengehalt der Zementsteine mit dem Zement CEM3 und dem zementfeinen Quarzmehl Q2 für die w/z-Werte von 0,25 bis 0,45; CEM3 volumengleich durch Q1 ausgetauscht.

Q2	w/z-Wert				
	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
10 Vol.-%	0	0	0,75	0,66	0,58
20 Vol.-%	0,47	0,39	0,33	0,35	0,21
30 Vol.-%	0,60	0,45	0,39	0,38	n.b. ¹⁾
40 Vol.-%	0,67	0,41	0,35	0,29	n.b. ¹⁾

1) n.b. nicht bestimmbar

9. Anwendung des Modells auf Betone nach Walz

Um die am Zementstein erhaltenen Ergebnisse zu verifizieren, wurde in ausblickenden Versuchen der Einfluss des Hohlraum füllenden Quarzmehls Q1 auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften in Anlehnung an die Arbeiten von Walz [Wa1958] untersucht. Dazu wurde der Zement CEM3 zu 20 Vol.-% durch das Quarzmehl ausgetauscht. Bei dieser Austauschmenge war die Packungsdichte am höchsten. Insgesamt wurden 15 verschiedene Betone untersucht, die in Anlehnung an die Versuche am Zementstein in drei verschiedene Betongruppen eingeteilt wurden. Bei der Gruppe R handelte es sich um den Referenzbeton mit dem Zement CEM3 und ohne Zusatzstoffe. In den Gruppen A und B wurde wie in den Fällen A und B der Zement CEM3 zu 20 Vol.-% durch das hochfeine Quarzmehl Q1 ersetzt. In Gruppe A wurde dabei der w/F_v -Wert konstant und in Gruppe B der w/z -Wert konstant gehalten.

Bei allen Betonen war der Leimanteil mit $310 \text{ dm}^3/\text{m}^3$, bestehend aus dem Zement CEM3, dem Quarzmehl Q1, dem Wasser und der eingeschlossenen Luft (1,5 Vol.-%) gleich. Die Ausgangswasserzementwerte w/z_0 variierten zwischen 0,25 und 0,60 und sind in Tabelle 24 zusammengestellt.

Um den Einfluss der Gesteinskörnung (Sieblinie A/B 8, Sieblinie siehe Anhang) auf das Bruchverhalten möglichst gering zu halten, wurde als grobe Gesteinskörnung Basalt verwendet. Die Konsistenz wurde bei allen Betonen auf die Konsistenzklasse F2 (plastisch) festgelegt, um besonders bei dem hohen w/z -Wert von 0,60 Wasserabsonderungen zu vermeiden. Das Ausbreitmaß betrug einheitlich 38,0 cm ($\pm 1,0 \text{ cm}$).

Die Betone mit $w/z_0 = 0,25$ waren aufgrund des durch die Zusammensetzung sehr hohen Fließmittelanspruchs (FM auf PCE-Basis) nur schwer verarbeitbar und verdichtbar. Die Ergebnisse werden dementsprechend bei der Interpretation berücksichtigt.

Tabelle 24: Zusammensetzung der untersuchten Betone.

Komponente	Einheit	Ausgangswasserzementwert w/z _o				
		0,25	0,35	0,40	0,50	0,60
Sand 0/2 [43%]	kg/m ³	786,0				
Basalt 2/5 [32%]	kg/m ³	662,2				
Basalt 5/8 [25%]	kg/m ³	517,3				
eingeschl. Luft [dm ³]	dm ³ /m ³	15,0				

Referenzbeton R - ohne Zusatzstoffe

w/z-Wert, effektiv	-	0,25	0,35	0,40	0,50	0,60
w/F _v -Wert	-	0,78	1,09	1,24	1,55	1,86
Zementgehalt	kg/m ³	515,6	438,9	408,6	358,9	320,0
Wassergehalt ¹⁾	kg/m ³	128,9	153,6	163,4	179,5	192,0
Fließmittelgehalt	% v. Z.	11,0	2,5	1,0	0,5	0,0
rechn. Wasserfilmdicke	µm	1,56	1,21	0,84	0,66	0,30

Gruppe A - 20 Vol.-% Quarzmehl Q1, w/z erhöht, w/F_v konstant

w/z-Wert, effektiv	-	0,31	0,44	0,50	0,63	0,75
w/F _v -Wert	-	0,78	1,09	1,24	1,55	1,86
Zementgehalt	kg/m ³	412,5	351,2	326,9	287,1	256,0
Quarzmehlgehalt	kg/m ³	88,2	75,1	69,9	61,4	54,7
Wassergehalt ¹⁾	kg/m ³	128,9	153,6	163,4	179,5	192,0
Fließmittelgehalt	% v. Z.	14,0	2,0	1,0	0,7	0,0
rechn. Wasserfilmdicke	µm	0,85	0,66	0,47	0,38	0,19

Gruppe B - 20 Vol.-% Quarzmehl Q1, w/z konstant, w/F_v verringert

w/z-Wert, effektiv	-	0,25	0,35	0,40	0,50	0,60
w/F _v -Wert	-	0,62	0,87	0,99	1,24	1,49
Zementgehalt	kg/m ³	452,0	392,0	367,6	326,9	294,3
Quarzmehlgehalt	kg/m ³	96,6	83,8	78,6	69,9	62,9
Wassergehalt ¹⁾	kg/m ³	113,0	137,2	147,0	163,5	176,6
Fließmittelgehalt	% v. Z.	20,0	8,0	3,0	0,8	0,2
rechn. Wasserfilmdicke	µm	0,62	0,47	0,32	0,25	0,09

1) Wasser aus Fließmittel mit angerechnet, Feststoffgehalt im FM 35 M.-%

9.1. Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit der geprüften Betonprüfkörper ist in Abbildung 98 zusammengefasst und in Abhängigkeit von der rechn. Wasserfilmdicke dargestellt. Jeder dargestellte Wert stellt

einen Mittelwert aus drei Einzelwerten dar. Dabei wurden wie bei den Zementsteinversuchen die mit dem Quarzmehl Q1 modifizierten Betone zusammengefasst und den Referenzbetonen ohne Quarzmehl gegenübergestellt. Analog zu den Untersuchungen am Zementstein stellten sich höchste Druckfestigkeiten unterhalb der rechn. Wasserfilmdicke von 0,25 µm ein (siehe auch Tabelle 16, Seite 126).

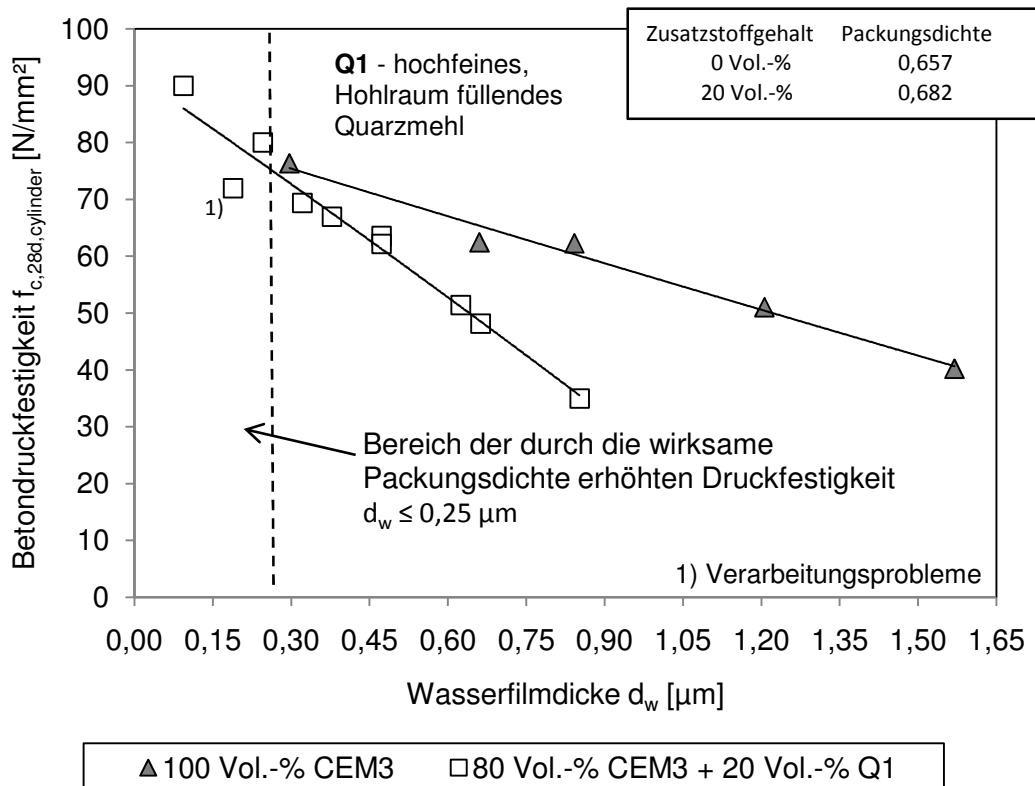


Abbildung 98: Zusammenhang zwischen der Wasserfilmdicke d_w , der Betondruckfestigkeit und dem Gehalt an Quarzmehl Q1, Austausch des CEM I 32,5 R (CEM3) durch 20 Vol.-% Q1.

Tabelle 25 enthält die zugehörigen, nichtlinearen Regressionsgleichungen. Anhand dieser wurde analog zu den Rechnungen in Abschnitt 8.1 (Modellbildung am Zementstein) über die Wasserfilmdicke die Druckfestigkeit berechnet. Parallel dazu erfolgte die Berechnung des effektiven w/z-Wertes aus der Wasserfilmdicke.

Tabelle 25: Darstellung des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen der Druckfestigkeit und der Wasserfilmdicke d_w in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt am Beton.

Füllstoffgehalt	Regressionsgleichung	Bestimmtheitsmaß
0 Vol.-%	$f_0(d_w) = 0,56 \cdot d_w^2 - 28,5 \cdot d_w + 83,9$	$R = 0,98$
20 Vol.-%	$f_{20}(d_w) = -3,63 \cdot d_w^2 - 63,2 \cdot d_w + 92,0$	$R = 0,95$

In Abbildung 99 sind die so ermittelten Werte für den Referenzbeton nach Walz und für den modifizierten Beton zusammengefasst. Der Verlauf der Druckfestigkeit des Referenzbetons nach Walz ähnelt im Wesentlichen dem der Zementsteine mit gleichem effektiven w/z-Wert. Es zeigte sich auch am Beton, dass es mit einem geeigneten Füllstoff (Quarzmehl Q1) möglich ist, bei Berücksichtigung der rechn. Packungsdichte und der Verringerung der Wasserfilmdicke die Druckfestigkeit bei gleichem, effektivem w/z-Wert signifikant zu erhöhen. In diesem Beispiel steigerte sich die Druckfestigkeit der Betone um jeweils rd. 10 N/mm². Die überproportionale Zunahme der Druckfestigkeit bei w/z-Werten unterhalb 0,40, wie bei den Versuchen an Zementsteinen, konnte bei den Versuchen an Betonen nicht bestätigt werden. Vermutlich beeinflusste hier die geringe Verdichtungswilligkeit die Druckfestigkeit der Betone.

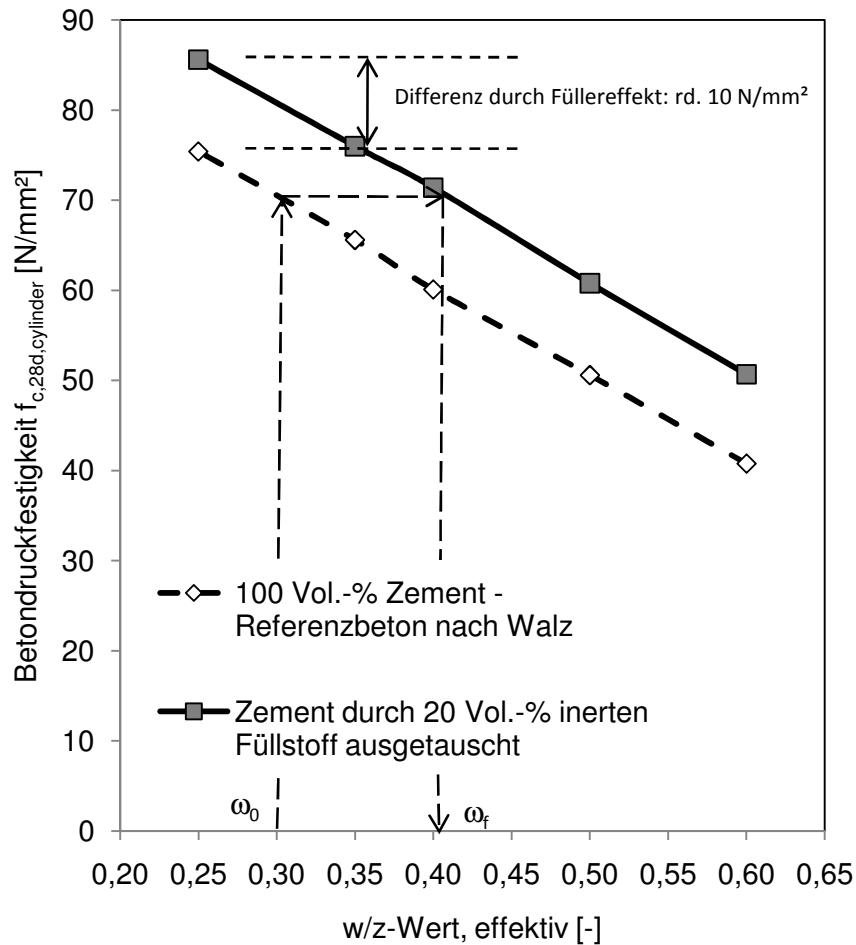


Abbildung 99: Zusammenhang zwischen dem effektiven w/z-Wert und der Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt.

Die Differenz in der Druckfestigkeit zwischen den Referenzbetonen und den optimierten Betonen (20 Vol.-% Quarzmehl Q1) bei w/z-Werten oberhalb 0,40 war mit rd. 10 N/mm² größer als die 6 N/mm², die bei den Untersuchungen am Zementstein gemessen wurden.

Dieser Effekt ist zum einen der festigkeitserhöhenden Wirkung und dem Wasseranspruch der Gesteinskörnung sowie der Stabilisierung der Feinstoffmatrix durch das hochfeine Quarzmehl Q1 zuzuordnen.

9.2. Porosität

Die Entwicklung des Kapillarporengehalts in Abhängigkeit von der rechnerischen Wasserfilmdicke und dem Füllstoffgehalt (Q1) im Beton ist vergleichbar mit der Entwicklung im Zementstein. D.h. mit zunehmender Wasserfilmdicke nimmt auch der Kapillarporengehalt zu, wobei er im Beton erwartungsgemäß geringer ist als im reinen Zementstein. Der Schnittpunkt, von dem an bei dem Beton mit 20 Vol.-% packungswirksamem Quarzmehl Q1 der Kapillarporengehalt bei gleicher Wasserfilmdicke geringer ist als im Beton mit 100 Vol.-% Zement CEM3 ergibt sich hier bei rd. 0,20 µm. Im Zementstein lag diese Grenzwasserfilmdicke bei 0,25 µm.

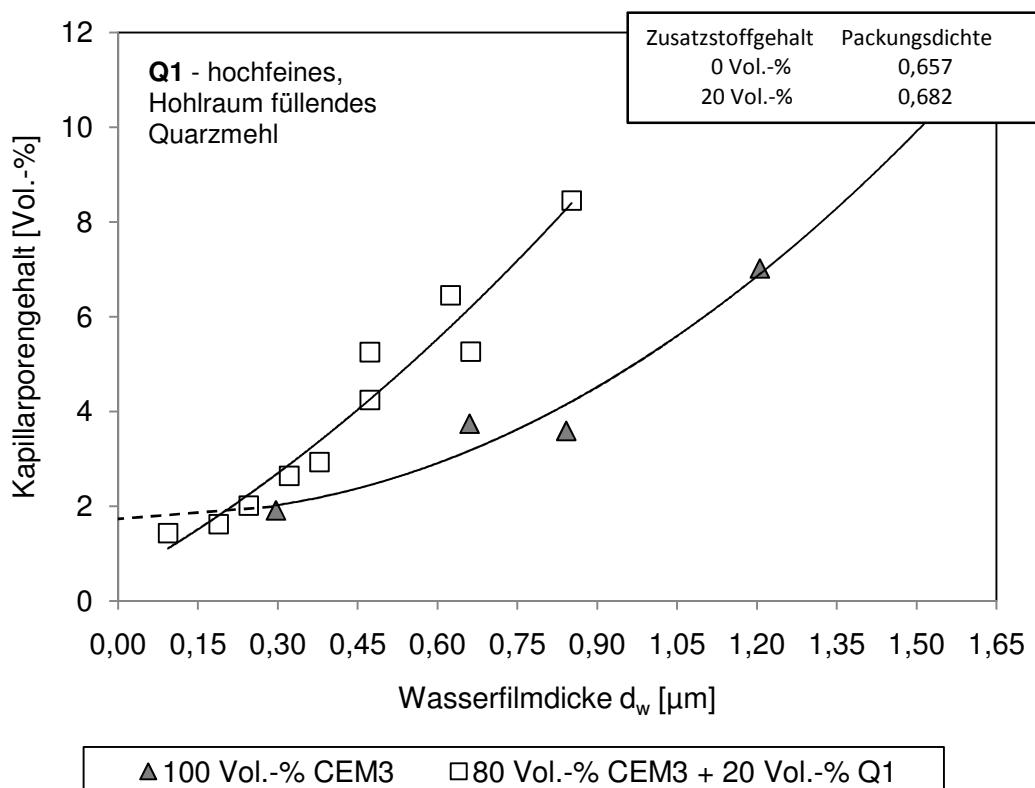


Abbildung 100: Zusammenhang zwischen der Wasserfilmdicke d_w , dem Kapillarporengehalt und dem Gehalt an inertem, Hohlraum füllendem Quarzmehl Q1 beim Austausch des CEM3.

Tabelle 26 fasst die quadratischen Regressionsgleichungen für die Entwicklung des Kapillarporengehalts P_{Kap} in Abhängigkeit von der Wasserfilmdicke d_w und dem

Füllstoffgehalt zusammen. Das Bestimmtheitsmaß ist mit mindestens 0,94 als sehr hoch einzustufen.

Tabelle 26: Darstellung des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Kapillarporengehalt und Wasserfilmdicke d_w in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt, am Beton.

Füllstoffgehalt	Regressionsgleichung	Bestimmtheitsmaß
0 Vol.-%	$P_{Kap,0} (d_w) = 4,03 \cdot d_w^2 - 0,69 \cdot d_w + 1,87$	$R = 0,95$
20 Vol.-%	$P_{Kap,20} (d_w) = 3,48 \cdot d_w^2 + 6,33 \cdot d_w + 0,48$	$R = 0,94$

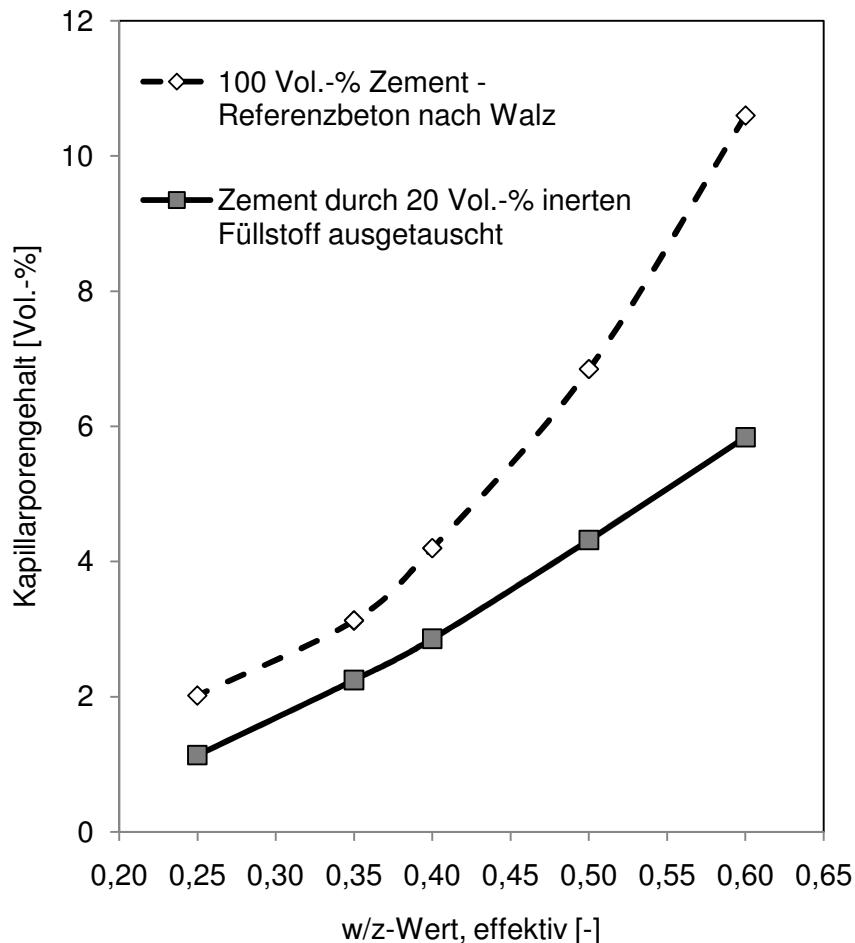


Abbildung 101: Zusammenhang zwischen dem effektiven w/z-Wert und dem Kapillarporengehalt im Beton nach 28 Tagen in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt.

Mit Hilfe der Regressionsgleichungen und der Gleichung 25 wurde wie bei den Zementsteinen der Kapillarporengehalt für den effektiven w/z-Wert berechnet. Abbildung 101 zeigt den Zusammenhang zwischen dem effektiven w/z-Wert und dem Kapillarporengehalt

bei einem Beton nur mit Zement und bei einem Beton, bei dem der Zement zu 20 Vol.-% durch ein packungswirksames Quarzmehl (Q1) ausgetauscht wurde.

Wie bei den Untersuchungen am Zementstein lag der Kapillarporengehalt des Betons mit dem Quarzmehl Q1 deutlich unter dem des nicht feinkornoptimierten Betons. Bei einem w/z-Wert von 0,60 war der Kapillarporengehalt der mit Q1 hergestellten Betone mit 5,8 Vol.-% deutlich geringer als bei dem Referenzbeton mit gleichem w/z-Wert. Hier betrug der Kapillarporengehalt 10,6 Vol.-% und war damit rd. 83% größer. Im Bereich der w/z-Werte unterhalb 0,40 wurde die Differenz zwischen den beiden Betonen immer geringer, während sie bei den Zementsteinen zu Gunsten der mit Q1 hergestellten Zementsteine zunahm. Diese Abnahme in der Differenz ist bei den Untersuchungen am Beton vermutlich auf die abnehmende Verarbeitbarkeit und Verdichtungswilligkeit zurückzuführen.

9.3. Dauerhaftigkeit

Maßgeblich für die Dauerhaftigkeit von Betonen ist neben der Festigkeit der Zementsteinmatrix insbesondere der Anteil an Kapillarporen. In den folgenden Abbildungen wird der Kapillarporenanteil mit dem Wasseraufnahmekoeffizient und dem Chloriddiffusionskoeffizient korreliert. Wie bei den Untersuchungen am Zementstein, ist auch hier das Bestimmtheitsmaß der Resultierenden mit über 0,80 als gut einzuschätzen. Zusätzlich wurde an den Betonen mit einem effektiven w/z-Wert von 0,35, 0,40 und 0,60 der Frost-Tausalz-Widerstand nach dem CDF-Verfahren bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 104 dargestellt.

Der Zusammenhang zwischen Kapillarporengehalt und Wasseraufnahmekoeffizient folgte einem exponentiellen Zusammenhang, bei dem bei einem Kapillarporengehalt über rd. 6 Vol.-% mit einem starken Anstieg der kapillar aufgenommenen Wassermenge zu rechnen ist.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen am Zementstein ist der Zusammenhang zwischen dem Kapillarporengehalt und dem Chloriddiffusionskoeffizienten nach Tang als linear einzustufen. Die Größenordnung ist bei den Untersuchungen am Beton erwartungsgemäß rd. eine Zehnerpotenz kleiner.

Der Vergleich dieser Ergebnisse mit dem der Darstellung des Kapillarporengehalt in Abbildung 101 auf Seite 146 zeigt, dass durch die Verwendung eines packungswirksamen, inertien Quarzmehls der Transport von Wasser oder das Eindringen von Chloridionen wirksam verringert werden kann. Am Beispiel eines Betons mit einem effektiven w/z-Werts von 0,50 verringerte sich der Kapillarporengehalt von rd. 7,0 Vol.-% auf 4,3 Vol.-%, wenn 20 Vol.-% des Zements CEM3 durch das hochfeine Quarzmehl Q1 ersetzt wurde. Dementsprechend verringerte sich der Wasseraufnahmekoeffizient von rd. $0,15 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ um 66 % auf rd. $0,05 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$. Der Chloriddiffusionskoeffizient wurde von $7,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ um rd. 50 % auf $3,9 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ verringert.

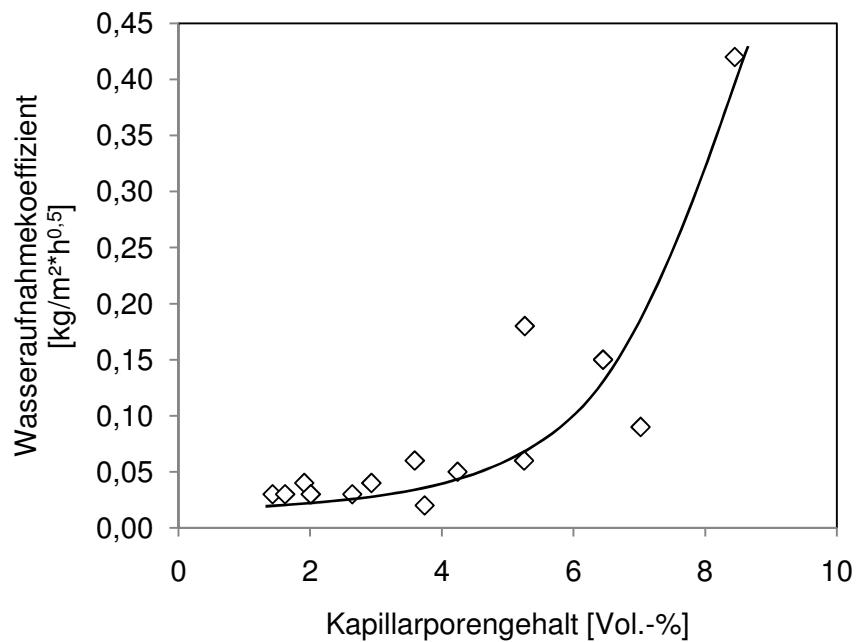


Abbildung 102: Zusammenhang zwischen Kapillarporengehalt und Wasseraufnahmekoeffizient im Beton.

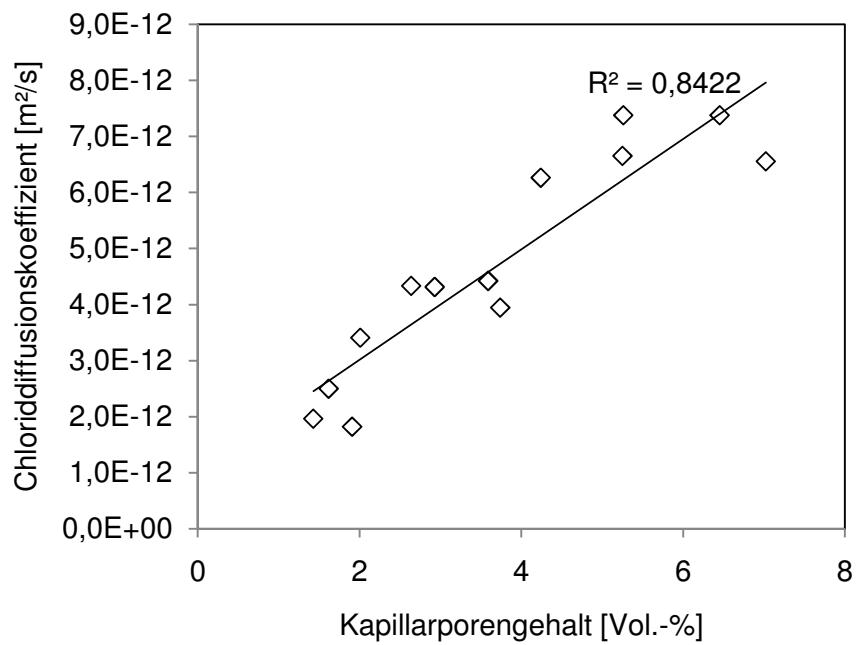


Abbildung 103: Zusammenhang zwischen Kapillarporengehalt und Cl⁻Diffusionskoeffizient.

Die Abwitterungsmengen der mit dem CDF-Verfahren geprüften Betone nahm mit zunehmendem w/z-Wert unabhängig vom Zementgehalt zu.

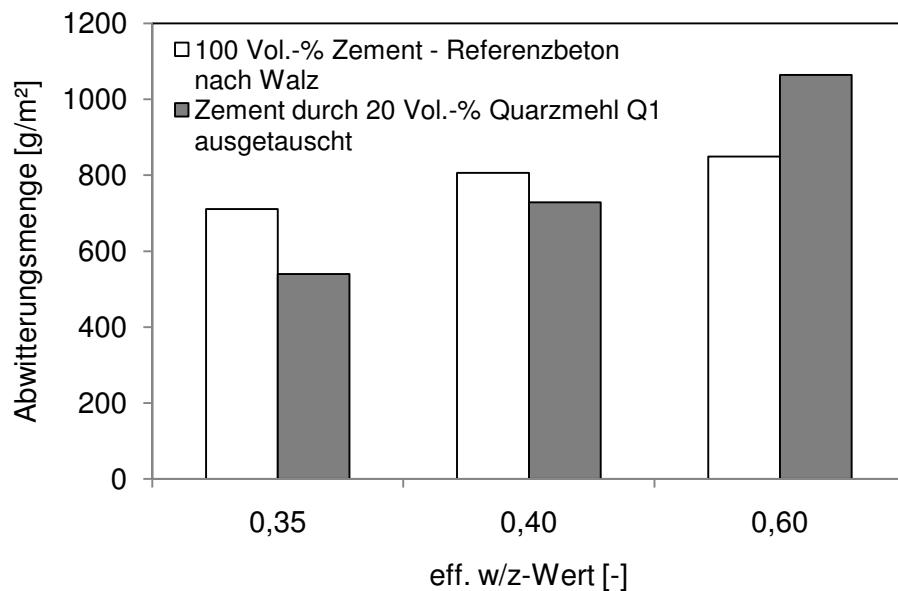


Abbildung 104: Frost-Tausalz-Widerstand, Abwitterungsmengen der Betone nach 28 Frost-Tau-Wechseln, CDF-Verfahren mit 3%iger NaCl-Lösung.

Bei den w/z-Werten von 0,35 und 0,40 war der Frost-Tausalz-Widerstand der Betone mit 20 Vol.-% Quarzmehl Q1 signifikant kleiner als bei den Referenzbetonen ohne Quarzmehl. Die Abwitterungsmengen waren bei den optimierten Betonen mit rd. 540 g/m² (w/z = 0,35) und 730 g/m² (w/z = 0,40) um 24% und respektive 10% kleiner als bei den Referenzbetonen. Bei dem w/z-Wert von 0,60 war die Abwitterungsmenge des Referenzbetons geringer als die des optimierten Betons. Dieses Verhalten kann auf den an diesen Prüfkörpern gemessenen Kapillarporengehalt zurückgeführt werden. Dieser war bei dem optimierten Beton mit 6,5 Vol.-% deutlich größer als bei dem Referenzbeton mit 5,9 Vol.-%. Vermutlich wurden die Prüfkörper nicht ausreichend verdichtet.

Alle Betone sind entsprechend ihrer Abwitterungsmenge (kleiner 1.500 g/m²) nach 28 Frost-Tau-Wechseln der Expositionsklasse XF4 nach DIN EN 206-1 zuzuordnen.

9.4. Erweiterung des Anrechenbarkeitsfaktors auf Betone

Mit Hilfe von Gleichung 27 und Abbildung 99 sowie Abbildung 101 wurden die Anrechenbarkeitsfaktoren (k-Werte) für den Austausch des Zements CEM3 durch das hochfeine, Hohlraum füllende Quarzmehl Q1 am Beton bestimmt. Dabei waren 20 Vol.-% des Zements durch das Quarzmehl ersetzt. Sie sind in Tabelle 27 zusammengefasst.

Die anhand der Druckfestigkeit ermittelten k-Werte sind beim Beton mit 0,94 (w/z = 0,50) bis 2,05 (w/z = 0,25) aufgrund der durchgängig höheren Festigkeit größer als die aus den Zementsteinuntersuchungen gewonnenen k-Werte. D.h., innerhalb der w/z-Werte von 0,25

bis 0,50 hatte das Quarzmehl nahezu die gleiche bis doppelte festigkeitsbildende Wirkung wie der verwendete Zement CEM3. Demgegenüber sind die anhand des Kapillarporengehaltes und zur Beurteilung der Dauerhaftigkeitseigenschaften am Beton ermittelten k-Werte unterhalb des w/z-Werts 0,40 kleiner als die der Zementsteinuntersuchungen. Dies begründet sich auf der geringeren Differenz zwischen dem optimierten Beton und dem Referenzbeton (ohne Quarzmehl) unterhalb des w/z-Werts 0,40. Bei dem w/z-Wert von 0,40 gleichen sich die aus den Beton- und Zementsteinuntersuchungen berechneten k-Werte mit jeweils 1,05 wieder an. Für darüber hinausgehende w/z-Werte konnten die k-Werte aufgrund der weiter steigenden Differenz (siehe Abbildung 101) in dieser Arbeit nicht berechnet werden.

Tabelle 27: k-Werte für einen Beton nach Walz; berechnet auf Basis der Zylinderdruckfestigkeit und des Kapillarporengehalts; Zement CEM3 durch 20 Vol.-% Quarzmehl Q1 ersetzt.

w/z-Wert	0,25	0,35	0,40	0,50	0,60
k-Wert _{Druckfestigkeit}	2,06	1,40	1,29	0,94	n.b.
k-Wert _{Kapillarporengehalt}	1,40	0,87	1,05	n.b.	n.b.

n.b. – nicht bestimmbar

10. Zusammenfassung und Ausblick

10.1. Allgemein

In dieser Arbeit wurden zunächst reine Feinstoffgemische, bestehend aus einem Zement und einem Feinstoff untersucht. Dabei wurde der Zement volumengleich durch den Feinstoff ausgetauscht. Die Feinstoffe wurden in packungswirksame Füllstoffe und nicht packungswirksame, zementfeine Feinstoffe unterteilt. Durch die gezielte Füllung der Hohlräume zwischen den Zementpartikeln und der Anpassung des Wassergehaltes konnte die Wirksamkeit inerter Füllstoffe deutlich verbessert werden. Von entscheidender Bedeutung war hierbei die Kenntnis von der Granulometrie der Feinstoffe und deren Wirksamkeit im Feinstoffbereich unterhalb 0,125 mm Korngröße. Als packungswirksam wurden in dieser Arbeit Füllstoffe eingestuft, deren mittlerer Durchmesser mindestens um den Faktor 6,5 kleiner war als der mittlere Durchmesser des zu füllenden Feinstoffs.

Die Granulometrie eines Feinstoffgemischs bestimmt zunächst die Packungsdichte. Der Wassergehalt und demzufolge die Wasserfilmdicke haben hierbei einen unmittelbaren Einfluss auf den Abstand der Partikel zueinander. Es konnte gezeigt werden, dass diese Kenngrößen die Gefügedichte der Zementsteinmatrix bereits vor Beginn der Hydratation wesentlich definieren.

Durch computergestützte Berechnungen, die auf dem Modell nach Schwanda basieren, wurde zunächst die Packungsdichte der Feinstoffgemische berechnet. Dabei wurde der Zement in Schritten zu 10 Vol.-% durch einen hochfeinen Füllstoff oder durch einen der Zementfeinheit entsprechenden Feinstoff ausgetauscht. Bei beiden Stoffen handelte es sich um Quarzmehle, die als inert eingestuft wurden. Das hochfeine Quarzmehl erhöhte die rechnerische Packungsdichte von 0,657 auf 0,682, wenn 20 Vol.-% des Zements ausgetauscht wurden. Bei dem als zementfein eingestuften Quarzmehl blieb die rechnerische Packungsdichte praktisch unverändert. Vergleichend wurden ein Kalksteinmehl und ein Feinstzement als Substitutionsstoffe untersucht, die beide in ihrer Granulometrie dem hochfeinen, packungswirksamen Quarzmehl entsprachen.

10.2. Einfluss der Feinstoffe auf die Eigenschaften von Zementleim

Die Ergebnisse der rechnerischen Modellierungen wurden mit experimentellen Untersuchungen, wie der Bestimmung des Hohlraumgehaltes mit dem Punkte-Verfahren, der Bestimmung des Wasseranspruches (Normsteife) nach DIN EN 196 und rheologischen Untersuchungen abgeglichen. Die experimentellen Untersuchungen zeigten, dass sich die theoretischen Berechnungen nach Schwanda dazu eignen die Packungswirksamkeit eines Füllstoffes zu beurteilen.

- Innerhalb des Bereiches in dem die Füllstoffe die Packungsdichte erhöhen, verändern sich der Wasseranspruch oder die Viskosität trotz der sich vervielfachenden spezifischen Oberfläche nicht. Das Wasser wird aus den Hohlräumen durch die Füllstoffe verdrängt und steht zur Gleitfilmbildung zur Verfügung.
- Im Bereich der durch die Füllstoffe verringerten Packungsdichte wird die stark erhöhte spezifische Oberfläche wirksam und der Hohlraumgehalt nimmt mit abnehmender Packungsdichte zu. Durch die stark abnehmende Packungsdichte erhöhen sich die Viskosität und der Wasseranspruch erheblich.

10.3. Einfluss der Feinstoffe auf die Eigenschaften von Zementstein

Es konnte nachgewiesen werden, dass durch inerte, packungswirksame (Hohlraum füllende) Feinstoffe die Gefügedichte des erhärteten Zementsteins ansteigt. Dabei ist der Wassergehalt von wesentlicher Bedeutung. Bei dem Ersatz des Zements durch die inerten Feinstoffe wurden die folgenden Wirkungen ermittelt:

- Bei unverändertem w/F_v -Wert wird mit zunehmendem Austausch durch einen packungswirksamen Füllstoff die Druckfestigkeit trotz zunehmender Packungsdichte verringert, wenn der w/F_v -Wert oberhalb 0,775 liegt. Unterhalb dieses Wertes verhält sich die Gefügedichtigkeit nahezu proportional zur Packungsdichte. D.h., mit zunehmender Packungsdichte nimmt die Druckfestigkeit zu. Beim Austausch durch zementfeine Feinstoffe, wird die Druckfestigkeit reduziert.
- Bei konstantem w/z -Wert nimmt mit zunehmendem Austausch durch einen inerten Feinstoff die Druckfestigkeit unabhängig von der Packungswirksamkeit des Feinstoffs zu. Erst ab einem w/z -Wert von 0,35 und kleiner wird die Druckfestigkeit eindeutig von der Packungsdichte beeinflusst. Die Druckfestigkeit wurde bei einem w/z -Wert von 0,25 und 20 Vol.-% Austausch um bis zu 38% erhöht.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse über die Wasserfilmdicke zeigt eine deutliche Abhängigkeit der Druckfestigkeit und des Kapillarporengehaltes von der Packungsdichte, dem Feinstoffgehalt und der Wasserfilmdicke. Erst bei entsprechender Verringerung der Wasserfilmdicke kann der Zement praktisch wirkungsgleich durch einen Feinstoff ersetzt werden.

Während durch den Austausch des Zements durch zementfeine, inerte Feinstoffe (nicht packungswirksam) die Druckfestigkeit nur unerheblich über die der reinen Zementsteinmatrix

steigt, erhöhen hochfeine und packungswirksame Feinstoffe, hier als Füllstoffe bezeichnet, die Druckfestigkeit signifikant. Dabei gilt: Je geringer die Wasserfilmdicke ist, desto größer ist die Steigerung der Druckfestigkeit. Maximale, durch die erhöhte Packungsdichte beeinflusste, Druckfestigkeiten stellten sich erst unterhalb einer Wasserfilmdicke von 0,30 µm ein. Hierbei ergaben sich Steigerungen in der Druckfestigkeit um bis zu 38% durch den Austausch von 10 Vol.-% bis 30 Vol.-% des Zements. In diesem Bereich war die rechnerische wie auch die experimentell bestimmte Packungsdichte maximal.

Die Transportprozesse im Zementstein wurden im Wesentlichen durch den Anteil an Kapillarporen beeinflusst. Ab rd. 20 Vol.-% Kapillarporengehalt stiegen die jeweiligen Stofftransporte deutlich an. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Erhöhung der Packungsdichte und die gleichzeitige Verringerung der Wasserfilmdicke der Kapillarporengehalt erheblich verringert werden kann. Damit stieg der Widerstand gegenüber dem Eindringen von Wasser, wässrigen Lösungen und Chloridionen signifikant an.

Das Modell, dass die Druckfestigkeit oder den Kapillarporengehalt mit der Packungsdichte und der Wasserfilmdicke in Zusammenhang bringt, erlaubt die Einordnung der Druckfestigkeit über den w/z-Wert durch die Bildung von Regressionsgleichungen und der daran gekoppelten Zurückrechnung der Wasserfilmdicke und des Hohlraumwassers auf einen effektiven w/z-Wert. Auf diese Weise konnten massebezogene Wirksamkeitsfaktoren (k-Werte) für inerte Feinstoffe im Zementstein und später im Beton bestimmt werden. Die Wirksamkeitsfaktoren sind dabei vom w/z-Wert abhängig. Bei einem w/z-Wert von 0,25 ergab sich bei 20 Vol.-% Austausch eines grobgemahlenen Zements CEM I 32,5 R (CEM3) durch ein hochfeines, packungswirksames Quarzmehl (Q1) ein k-Wert von 1,87. Mit einem auf 0,45 zunehmendem w/z-Wert verringerte sich der k-Wert auf 0,21. Ein ähnlich feines Kalksteinmehl (K1) ergab bei gleicher Vorgehensweise k-Werte in der gleichen Größenordnung.

10.4. Einfluss der Feinstoffe auf die Eigenschaften von Beton

An Betonen nach Walz, mit effektiven w/z-Werten von 0,25 bis 0,60, wurde die Wirkung eines inerten, Hohlraum füllenden Quarzmehls untersucht. In diesen Untersuchungen wurde der Zement durch ein Hohlraum füllendes Quarzmehl zu 20 Vol.-% ersetzt. Dabei war die Packungsdichte am höchsten. Bei einem konstanten Leimanteil von 310 dm³/m³ wurde durch die Füllerwirkung des Quarzmehls die an Zylindern (D/L = 150/300 mm) bestimmte Druckfestigkeit durchgehend bei allen w/z-Werten um 10 N/mm² über die des Referenzbetons, ohne füllendes Quarzmehl, erhöht. Darüber hinaus nahm der Widerstand gegenüber dem Eindringen von Wasser und Gasen signifikant zu.

Die Einordnung der Druckfestigkeit wie auch des Kapillarporengehalts nach der Wasserfilmdicke und der Packungsdichte zeigte eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den Untersuchungen am Zementstein.

Für den Beton ergaben sich gegenüber dem Zementstein höhere Wirksamkeitsfaktoren. Dieser Zusammenhang liegt in der verringerten relativen Porosität bei Betonen begründet. Die Wirksamkeitsfaktoren sind auch beim Beton vom effektiven w/z-Wert abhängig. Bei dem w/z-Wert von 0,25 beträgt der k-Wert 2,06 und verringert sich auf 0,94 bei einem w/z-Wert von 0,50. D.h., bei einem w/z-Wert von 0,50 und einer Ersatzmenge von 20 Vol.-% kann der Zement nahezu wirkungsgleich durch einen packungswirksamen Inertstoff ersetzt werden.

10.5. Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit am Zementstein und Beton ermittelten Kennwerte bei einem Alter von 28 Tagen sind als Basis für weitere Untersuchungen zu verstehen. Es konnte in umfangreichen Untersuchungen gezeigt werden, dass durch die Füllung von Mikrohohlräumen zwischen den Zementpartikeln und der Erhöhung der Packungsdichte inerte Füllstoffe bei entsprechender Berücksichtigung des Wassergehalts einen erheblichen Beitrag zur Erhöhung der Druckfestigkeit und der Dichtigkeit der Zementsteinmatrix leisten können. Die hier bestimmten Wirksamkeitsfaktoren beziehen sich dabei modellhaft auf zwei inerte Quarzmehle und ein Kalksteinmehl und sind daher nicht als allgemeingültig anzusehen.

Durch die Nutzung des gegenwärtig üblichen, massebezogenen k-Wert Modells ergaben sich trotz gleicher Wirksamkeit unterschiedliche k-Werte für Feinstoffe mit unterschiedlicher Dichte. Ein volumenbezogenes k-Wert Modell könnte diese Differenzen ausräumen.

Die berechneten Wirksamkeitsfaktoren stellen in erster Linie eine Orientierung für die Anrechenbarkeit von inerten und packungswirksamen Füllstoffen dar. Dabei wurden Fragen der physikalischen Füllerwirkung weitgehend abgegrenzt und beantwortet. Für eine Verallgemeinerung der bestimmten Wirksamkeitsfaktoren ist es jedoch notwendig eine breitere Palette von Füllstoffen mit unterschiedlicher Feinheit, mineralogischen Eigenschaften sowie unterschiedlich starkem Einfluss auf die Packungsdichte zu untersuchen. Darüber hinaus bedarf es der Untersuchung des Einfluss auf die Spätfestigkeit sowie der Strukturentwicklung durch mögliche chemisch-mineralogische Reaktionen der Feinstoffe.

11. Literatur

- [A1930] Andreasen, A.H.M., Andersen, J.: Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten), Kolloid-Zeitschrift, Nr. 50, 1930, S.217.228
- [Abr1918] Abrams, D.A.: Design of concrete mixtures; Bulletin of the Structural Materials Research Laboratory; Lewis Institute, Vol. 1, Chicago, 1918
- [Ait1993] Aitcin, P.C., Neville, A.: High-Perfomance Concrete Demystified; Concrete International, 1993, S.21-26
- [Al1990] Al-Hussaini, M.J., Sangha, C.M., Plunkett, B.A., Walden, P.J.: The effect of chloride ion source on the free chloride ion percentages on OPC mortars. In: Cement and concrete research, vol. 20, 1990
- [Ali2006] Aligizaki, K.K.: Pore structure of cement based materials – testing, interpretation and requirements, Taylor and Francis, Oxon, 2006, ISBN 0-419-22800-4
- [Ary1987] Arya, C., Buenfeld, N.R., Newman, J.B.: Assessment of simple methods od determining the free chloride ion content of cement paste. In: Cement and concrete research, Vol. 17, 1987
- [Bek2002] Beckman-Coulter: Firmenpräsentation; Unterlagen als Powerpoint-Präsentation. 2002
- [Bo2005] Bornemann, R.: Untersuchungen zur Modellierung des Frisch- und Festbetonverhaltens erdfeuchter Betone; Dissertation, Kassel, 2005
- [Bra2005] Brameshuber, W., Pierkes, R., Tauscher, F., Friebel, W.D.: Anrechnung von Flugasche bei Betonen für Innenschalen von Straßentunneln; Beton, Jhg. 55, Heft 7+8, 2005
- [Bra2007] Brameshuber, W., Uebachs, S.: Numerical modeling of the flow process of self-compacting concrete; Beton-Fertigteiltechnik, Heft 3, 2007, S.14-21

- [Bro1982] Broderson, H.A.: Zur Abhängigkeit von Transportvorgängen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins. Dissertation, RWTH Aachen, 1982
- [Bu2005] Buchenau, G., Hillemeier, B.: Kugelfallrheometer zur Prüfung von Selbstverdichtendem Beton; Beton- und Stahlbetonbau 100, Heft 2, 2005, S.139-147
- [Chi2004] Chindaprasirt, P., Jaturapatiakkul, C., Theerawat, S.: Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste; Cement and Concrete Composites, Vol 27, Issue 4, 2005, S.425-428
- [Cle1974] Clear, K.C.: Evaluation of portland cement concrete for permanent bridge deck repair. In: Report No. FHWA-RD-74-5, Federal highway administration, Washington D.C., 1974
- [Dar1995] DAfStb (Hrsg.): DAfStb-Richtlinie für hochfesten Beton. Ergänzung zur DIN 1045/08.88 für die Festigkeitsklassen B65 bis B115, Berlin, 1995
- [Deh2006] Dehn, F., Ehrlich, N., Hemrich, W., Lietzmann, M.: CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ im Transportbeton; Beton, Jhg. 55, Heft 4, 2006, S. 138-143
- [Deu2007] Deuse, T., Schultz, W., Strunge, J.: Spezialzemente für Hochleistungsbetone; Betonwerk International, Nr. 1, 2007, S.40-43
- [Do1998] Dorner, H. W.; Festing, H.:Einsatz des Laserbeugungsanalysators COULTER LS 230 in der Betonanalytik. In: ZKG International; 1998; Vol. 51; S. 376-380.
- [Fal1995] Falbe, J., Regitz, M.: Römpf Chemielexikon, 9. Auflage, Thieme-Verlag, Stuttgart, New York, 1995
- [Fr2002] Freimann, T.: Einfluss von Steinkohleflugaschen auf das rheologische Verhalten von Zementleimen und –mörteln; Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 1, 2002
- [Fr2003] Friedl, L.: Experimentelle Untersuchungen zum Transport von Wasser und Chlorid in rezykliertem Beton und zu der daraus ableitbaren Gefahr der chloridinduzierten Stahlkorrosion; Dissertation, München, 2003

- [Fu1907] Fuller, W.B., Thompson, S.E.: The laws of proportioning concrete; American Society of Civil Engineers, Papers and Discussions, Vol. 23, 1907, S.222-298
- [Ga1989] Gaber, K.: Einfluss der Porengrößenverteilung in der Mörtelmatrix auf den Transport von Wasser, Chlorid und Sauerstoff im Beton; Dissertation, Darmstadt, 1989
- [Gei2003] Geisenhanslueke, C.: Excelbasiertes Makro zur Berechnung von Packungsdichten von Stoffgemischen über jeweils 128 Korngrößen; Universität Kassel, 2003
- [Gei2006] Geisenhanslueke, C., Schmidt, M., Krelaus, R.: Wirkung von Fließmitteln auf Zusatzstoffe im Beton; 16. Ibausil, Weimar, Band 2, 2006
- [Gu1992] Gunkel, H.P.: Die Bindung des Chlorids im Zementstein und die Zusammensetzung chloridhaltiger Porenlösungen; Dissertation, Dortmund, 1992
- [Gr1988] Gräf, H.: Über die Porosität und die Durchlässigkeit von Zementstein und Mörtel und ihren Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften von Beton; Dissertation, Essen, 1988
- [Gr2006] Graubner, C.A., Proske, T., Ramge, P.: Einfluss der Kornform auf die Packungsdichte von Gesteinskörnungen; Beton, Jhg. 56, Heft 9, 2006, S. 398-403
- [He2004] Heine, R.: Gesteinskörnungen im Beton unter Frost-Tau-Belastungen; Dissertation, Essen, 2004
- [Hew1988] Hewlett, P.C.: Lea's Chemistry of Cement and Concrete – Fourth Edition; New York, USA, 1988
- [Hoh2004] Hohmann, R., Setzer, M.J., Wehling, M.: Bauphysikalische Formeln und Tabellen; Werner Verlag, Darmstadt 2004
- [Ji1999] Jiangyong, L., Pei, T.: Effect of slag and silica fume on mechanical properties of high strength concrete; Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1997, S.833-837

- [Jo2001] Jooss, M.: Dictheit von Heißwasser-Langzeitspeichern aus Hochleistungsbeton; Dissertation, München, 2001
- [Kec1999] Keck, H. J.: Untersuchung des Fließverhaltens von Zementleim anhand rheologischer Messungen. Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften, Band 5, Shaker Verlag, Aachen, 1999
- [Kl1974] Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen, Dissertation, Wiesbaden, 1974
- [Ko2005] Kordts, S.: Herstellung und Steuerung der Verarbeitungseigenschaften selbstverdichtender Betone; Dissertation, Berlin, 2005
- [Kre1985] Krell, J.: Die Konsistenz von Zementleim, Mörtel und Beton und ihre zeitliche Veränderung, Dissertation RWTH Aachen, 1985
- [Kue1990] Künzel, H.M.: Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes von mineralischen Baustoffen aus Sorptionsversuchen, Zeitschrift für Bauphysik, Heft 5 (1990), S.140-144
- [La1996] Lange, F.: Gefügeuntersuchungen und Eigenschaften von Hüttensand enthaltenden Zementen, Dissertation, Erlangen, 1996
- [Lar2002] de Larrard, F., Sedran, T.: Mixture-proportioning of high-performance concrete; Cement and Concrete Research, Nr. 32, 2002, S.1699-1704
- [Lea1938] Lea, F.M.: The chemistry of pozzolanas; Proceedings 3rd international Symposium on Chemistry of cements, Stockholm, 1938, S.460-490
- [Li1985] Lisiecki, K.H.: Einfluss von Feinstzuschlagstoffen mit unterschiedlichem Reaktionsvermögen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften; Betontechnik, Heft 4, 1985, S.119-122
- [Li1987] Lisiecki, K.H.: Wirksamkeitsfaktor und Zementäquivalentmasse – neue Kenngrößen zur Bewertung von Betonzusatz- und Zementzumahlstoffen; Betontechnik, Heft 2, 1987, S.58-64

- [Lie1968] Lieber, W.: Das Sedimentieren (Bluten) von Zementen; Zement-Kalk-Gips, Nr. 11, 1968
- [Lo1984] Locher, F.W.: Chemie des Zements und der Hydrataionsprodukte; Zement-Taschenbuch
- [Lo1988] Locher, C.: Zum Einfluss verschiedener Zumahlstoffe auf das Gefüge von erhärtetem Zementstein Mörteln und Betonen; Dissertation, Aachen, 1988
- [Lo2007] Loser, R., Leemann, A., Tuchschild, M.: Chloride resistance of SCC compared to conventionally vibrated concrete; Beton-Fertigteiltechnik, Heft 3, 2007, S.4-13
- [Lu1994] Lutz, P., Jenisch, R., Klopfer, H.: Lehrbuch der Bauphysik, 3. Auflage. Teubner, Stuttgart, (1994)
- [Ma2006] Macht, J., Nischer, P.: Optimization of powder content – Need for and the possibility of determining particle size distribution, particle shape and surface characteristics of the particles, BFT International, Heft 4, 2006, S.47
- [Me1993] Metha, P.K., Monteiro, P.J.M.: Concrete – Microstructure, Properties and Materials; The McGraw-Hill Companies, Inc., 1993
- [Ne1985] Neroth, G.: Zur Bindung von Chlorid im Zementstein. In: Baustoffe 1985, Bauverlag, Hrsg. Ibac aachen, 1985
- [Ni2007] Nischer, P., Macht, J.: Powder optimization to improve the quality of hardened concrete; Beton-Fertigteiltechnik, Heft 3, 2007, S.22-33
- [No1992] Prüfnorm: Schnellbestimmung von Chloriddiffusionskoeffizienten für Betonprüfkörper nach Tang; ACI Materials Journal, Nr. 1/2, 1992
- [Ob1995] Oberbeck, N.: Instationärer Wärme-Feuchte-Schadstofftransport in Beton: Theorie und Berechnung, Bericht Nr. 95-79, Institut für Statik TU Braunschweig (1995)
- [Pa2005] Palecki, S.: Hochleistungsbeton unter Frost-Tau-Wechselbelastung; Dissertation, Essen, 2005

- [Pa2006] Paulini, P., Nasution, F.: Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Beton anhand der Luft-Permeabilität; Tagungsband der Ibausil, Band 1, 2006, S.1365-1372
- [Pow1949] Powers, T.C.: The Nonevaporable Water Content of Hardened Portland-Cement Paste – Ist Significance for Concrete Research and Its Method of Determination; ASTM Bulletin, No. 158, May 1949, S.68-76
- [Pow1947] Powers, T.C.: A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete; Proceedings of the Highway Research Board, Volume 27, Washington, 1947
- [Pow1954] Powers, T.C., Copeland, L.E., Hayes, J.C., Mann, H.M.: Permeability of Portland Cement Paste; Journal of the American Concrete Institute, Proceedings Vol. 51, 1954
- [Pow1954a] Powers, T.C.: Void spacing as a Basis for Producing Air-Entrained Concrete; ACI Journal, Vol. 59, 1954, S741-759
- [Pow1968] Powers, T.C.: Properties of fresh Concrete, John Wiley and Sons, Inc., 1968
- [Pun2002] Puntke, W.: Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken, Beton, 2002, Heft 5, S. 242-248
- [Re1985] Rendchen, K.: Einfluss der Granulometrie von Zement auf die Eigenschaften des Frischbetons und auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Festbetons; Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 45, 1985
- [Ren1999] Rendchen, K.: Frost- und Tausalz-Widerstand von Beton mit Hochofenzement; Beton-Informationen, Nr. 39, Heft 4, 1999, S. 3.23
- [Re1999] Reda, M.M., Shrive, N.G., Gillot, J.E.: Microstructural investigation of innovative UHPC; Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1999, S.323-329
- [Rei2007] Reinhardt, H.W., Schellhorn, H.: Getempertes Phonolith-Gesteinsmehl als Betonzusatzstoff mit hohem k-Wert; ZKG International, Heft 3, Vol. 60, 2007, S.78-84

- [Res1999] Reschke, T.; Siebel, E.; Thielen, G.: Einfluss der Granulometrie und Reaktivität von Zement und Zusatzstoffen auf die Festigkeits- und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton, Beton, 1999, Heft 12, S. 719-724 und Beton, 2000, Heft 1, S. 47-50
- [Res2001] Reschke, T.: Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftreihe der Zementindustrie, Heft 62/2000, Bau+Technik Verlag, Düsseldorf 2001
- [Ren1987] Rennert, P., Schmiedel, H., Weißmantel, C.: Kleine Enzyklopädie Physik; VEB Bibliographisches Institut Leipzig, 1987
- [Ros1965] Rose, D.A.: Water movement in unsaturated porous material, Rilem Bulletin 16.29, 1965
- [Ri1969] Richartz, W.: Die Bindung von Chlorid bei der Zementerhärtung. In: Zement-Kalk-Gips, Heft 10, 1969
- [Sch1993] Schießl, P., Härdtl, R.: Steinkohlenflugasche im Beton – Untersuchungen über Wirkung und Anrechenbarkeit; Beton, Jhg. 43, 1993, Heft 11, S. 576-580
- [Sch1993a] Schießl, P., Härdtl, R.: Steinkohlenflugasche im Beton – Untersuchungen über Wirkung und Anrechenbarkeit; Beton, Jhg. 43, 1993, Heft 12, S. 644-648
- [Sch1966] Schwanda, F.: Das rechnerische Verfahren zur Bestimmung des Hohlraumes und Zementleimanspruches von Zuschlägen und seine Bedeutung für den Spannbetonbau, Zement und Beton 37, 1966, S. 8-17
- [Sch1982] Schubert, H.: Kapillarität in porösen Feststoffsystmen, Springer Verlag, Berlin, 1982, ISBN 3-540-11835-7
- [Sch1995] Schnatz, R., Ellerbrock, H.G., Sprung, S.: Beeinflussung der Verarbeitungseigenschaften von Zement bei der Fertigmahlung mit der Gutbett-Walzenmühle; Zement-Kalk-Gips, Heft 4, Jhg. 48, 1995, S.63-71
- [Sch2005] Schmidt, M.; Geisenhanslüke, C.: Optimierung der Zusammensetzung des Feinstkorns von Ultra-Hochleistungs- und von Selbstverdichtendem Beton. Beton, Heft 5, 2005

- [Sch2005a] Schneider, E., Guse, U., Müller, H.S.: Zur Wirksamkeit von Flugasche im Beton; Beton, Jhg. 55, Heft 10, 2005, S. 488-494
- [Sch2005b] Schmidt, M., Avak, R.: Beton und Betonstahl – Praxishandbuch 2005, Sonderdruck aus Stahlbetonbau aktuell; Bauwerk Verlag, Berlin, 2005
- [Sch2006] Schmidt, M., Teichmann, T.: Optimierung der Betonzusammensetzung für Beläge mit dauerhaften Oberflächeneigenschaften. Seminarbeiträge, Weiterbildungsveranstaltung Betonbeläge als Verkehrsflächen, Wildegg, 2006
- [Sch2007] Schmidt, M., Stephan, D., Krelaus, R., Geisenhanslueke, C.: Die chancenreiche Dimension im Bauwesen: Nanopartikel, nanoskopische Strukturen und Grenzflächenphänomene; Cement International, eingereicht für Ausgabe 2007
- [Schu2007] Schumann, K.: Einfluss von Feinstoffen auf die Eigenschaften von Beton; Diplomarbeit an der Universität Kassel, 2007
- [Schw1972] Schwarz, B.: Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen, Gesundheitsingenieur 93, (1972), H. 7, S. 206 ff.
- [Se1975] Setzer, M.J.: Zum Mikrogefüge des Zementsteins und dessen Einfluss auf das mechanische Verhalten des Betons; Sonderdruck Zement und Beton, 1975, S.29-34
- [Se1977] Setzer, M.J.: Einfluss des Wassergehaltes auf die Eigenschaften des erhärteten Betons; DAfStb, Heft 280, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1977, S. 43-117
- [Sel1982] Sellevold, E.J. et al.: Silica fume – cement pastes: hydration and pore structure. Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1982, S.19-50
- [Sho1981] Short, N.R., Page, C.L.: Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes: a factor in relation to the corrosion of steel in concrete. In: Proceedings of the 8th International Congress on Metallic Corrosion, Vol. 2, Mains, 1981
- [Smo1984] Smolczyk, H.G.: Flüssigkeit in den Poren des Betons – Zusammensetzung und Transportvorgänge in der flüssigen Phase des Zementsteins. In: Betoninformationen 1, 1984

- [So1971] Sommer, E.: Beitrag zur Frage der kapillaren Flüssigkeitsbewegung in porigen Stoffen bei Be- und Entfeuchtungsvorgängen. Diss. TH Darmstadt, 1971
- [Sta1998] Stark, J., Wicht, B.: Anorganische Bindemittel – Zement, Kalk und spezielle Bindemittel; Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Band 109, Weimar, 1998
- [Sta2001] Stark, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton; Der Baustoff als Werkstoff, Birkhäuser Verlag, Basel/Boston/Berlin 2001
- [Sto1999] Stovall, T., de Larrard, F.: Linear packing density model of Grain mixtures; Powder Technology, Vol. 48, 1986, S.1-12
- [St2006] Stark, U., Müller, A.: Korngröße und Kornform von Gesteinskörnungen und ihr Potential für die Betonforschung; Beton, Jhg.56, Heft 9, 2006, S. 390-397
- [Sy1993] Sybertz, F.: Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen als betonzusatzstoff; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 434, 1993
- [Tan1992] Tang, L., Nilsson, L.O.: Rapid determination of chloride diffusivity of concrete by applying an electric field. ACI Materials Journal, Vol. 49, No.1, Seite 620-625
- [Tan1992] Tang, L.; Nilsson, L.-O.: Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field, ACI Materials Journal 89, 1992, S.49-53
- [Tan1995] Tang, L.: On chloride diffusion coefficients obtained by using the electrically accelerated methods. RILEM International Workshop on Chloride Penetration into concrete, 1995, Saint-Rémy-les-Chevreuse, France
- [Tan1996] Tang, L.: Chloride Transport in Concrete – Measurement and Prediction. PhD-thesis, report P-96:6, Department of Building Materials, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1996
- [Tat1983] Tattersal, G.H.: Workability and quality control of concrete; Pitman Books, Limited Edition, London, 1983

- [Tei2004] Teichmann, T, Schmidt, M.: Influence of the packing density of fine particles on structure, strength and durability of UHPC, Ultra High Performance Concrete (UHPC); Structural Materials and Engineering Series, International Symposium on UHPC, Kassel, 2004
- [Vog2006] Vogel, R.: Stabilität und Fließverhalten von Selbstverdichtendem Beton, 16. Ibausil, Weimar, 2006, Band 2, S.147-158
- [Wa1958] Walz, K.: Anleitung für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften; Beton- und Stahlbetonbau, Sonderdruck, Jhg. 53, Heft 6, 1958, S.163-169
- [We1984] Wesche, K., Schubert, P., Weber, J.W.: Zur Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton bei Zusatz von Steinkohlenflugasche; Betonwerk+Fertigteil-Technik, Jhg. 49, Heft 6, 1984, S. 367-374
- [Wi1979] Wittmann, F.H.: Porensysteme und Feuchtigkeitsgehalt, Bautenschutz und Bausanierung, Heft 2, 1979
- [Wu2005] Wuestholz, T.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton; Dissertation, Stuttgart, 2005
- [Za1999] Zain, F.M., Sfiuddin, M, Yusof, K.M.: A study on the properties of freshly mixed high performance concrete; Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1999, S.1427-1432

12. Anlagenverzeichnis

1. ANHANG TEIL A - AUSGANGSSTOFFE	166
2. ANHANG TEIL B – UNTERSUCHUNGEN AM FRISCHEN ZEMENTLEIM	170
3. ANHANG TEIL C – UNTERSUCHUNGEN AM ZEMENTSTEIN	172
3.1. FALL A, CEM 3 + Q1	172
3.2. FALL A, CEM 3 + Q2	174
3.3. FALL B, CEM 3 + Q1	176
3.4. FALL B, CEM 3 + Q2	178
4. ANHANG TEIL D – UNTERSUCHUNGEN AM BETON	180
4.1. FRISCHBETONUNTERSUCHUNGEN	180
4.2. FESTBETONUNTERSUCHUNGEN	181
4.3. CHLORIDDIFFUSIONSWIDERSTAND	190
4.4. FROST-TAUSALZ-WIDERSTAND	191
4.5. KAPILLARE WASSERAUFGNAHME	191

1. Anhang Teil A - Ausgangsstoffe

Tabelle-A 1: Technische Daten der verwendeten Zemente.

Stoff	Einheit	CEM I 32,5 R Werk A (CEM3)	CEM I 42,5 R Werk A (CEM4)
Glühverlust	M.-%	2,3	2,4
Unl.-Rückst.	M.-%	1,0	0,9
SiO ₂	M.-%	20,8	20,6
Al ₂ O ₃	M.-%	5,5	5,5
TiO ₂	M.-%	0,3	0,3
Mn ₂ O ₃	M.-%	0,1	0,1
P ₂ O ₅	M.-%	0,1	0,1
Fe ₂ O ₃	M.-%	2,5	2,5
CaO	M.-%	64,5	64,6
MgO	M.-%	1,4	1,4
SO ₃	M.-%	2,9	3,2
S	M.-%	-	-
K ₂ O	M.-%	0,8	0,8
Na ₂ O	M.-%	0,2	0,2
PbO	M.-%	-	-
ZnO	M.-%	0,0	0,0
Cl	M.-%	<0,1	<0,1
Kalkstandard	M.-%	94,1	94,8
fr. CaO	M.-%	0,7	0,7
Na ₂ O-Äquivalent	M.-%	0,7	0,7

Tabelle-A 2: Mittlere Durchmesser der Stoffgemische CEM4 + Q1.

Anteil Zusatzstoff	CEM3 + Q1 d ₅₀ µm	CEM3 + Q2 d ₅₀ µm	CEM3 + K1 d ₅₀ µm	CEM3 + FC d ₅₀ µm
0	27,4	27,4	27,4	27,4
10	23,4	26,1	23,8	23,8
20	18,8	24,9	19,5	19,4
30	11,8	23,9	13,0	14,0
40	6,8	23,0	6,7	10,3
50	4,7	21,8	4,3	7,8
60	3,8	20,6	3,4	6,4
70	3,1	19,6	2,9	5,3
80	2,9	18,7	2,6	4,4
90	2,5	17,5	2,3	3,8
100	2,4	16,0	2,2	3,3

Tabelle-A 3: Mittlere Durchmesser der Stoffgemische CEM4 + Q1.

Anteil Zusatzstoff	CEM4 + Q1 d ₅₀ µm	CEM4 + Q2 d ₅₀ µm	CEM4 + K1 d ₅₀ µm	CEM4 + FC d ₅₀ µm
0	14,2	14,2	14,2	14,2
10	11,6	14,5	11,6	12,2
20	8,7	14,8	8,7	10,1
30	6,2	14,9	5,9	8,2
40	4,9	15,1	4,5	7,1
50	4,0	15,3	3,7	6,2
60	3,4	15,6	3,1	5,3
70	3,1	15,9	2,8	4,7
80	2,8	16,3	2,5	4,1
90	2,5	16,5	2,3	3,7
100	2,4	16,5	2,2	3,3

Tabelle-A 4: Entwicklung der rechnerischen Packungsdichte nach Schwanda der Feinstoffgemische mit CEM3.

Zusatzstoff	Zusatzstoffgehalt CEM3 - Zusatzstoff in Vol.-%										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q1	0,657	0,675	0,682	0,679	0,671	0,660	0,649	0,637	0,624	0,612	0,600
Q2	0,657	0,657	0,657	0,657	0,656	0,655	0,654	0,652	0,651	0,649	0,647
FC	0,657	0,671	0,679	0,683	0,683	0,680	0,675	0,669	0,662	0,654	0,646
K1	0,657	0,675	0,682	0,679	0,671	0,660	0,649	0,637	0,624	0,612	0,600

Tabelle-A 5: Entwicklung der rechnerischen Packungsdichte nach Schwanda der Feinstoffgemische mit CEM4.

Zusatzstoff	Zusatzstoffgehalt CEM4 – Zusatzstoff in Vol.-%										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q1	0,663	0,665	0,662	0,657	0,650	0,642	0,634	0,625	0,617	0,608	0,599
Q2	0,663	0,662	0,660	0,659	0,657	0,655	0,654	0,652	0,651	0,649	0,647
FC	0,663	0,667	0,669	0,669	0,668	0,666	0,663	0,660	0,656	0,651	0,646
K1	0,663	0,667	0,665	0,660	0,653	0,645	0,636	0,627	0,618	0,609	0,600

Tabelle-A 6: Entwicklung der spezifischen, massebezogenen Oberfläche [cm²/g] der Feinstoffgemische mit CEM3.

Zusatzstoff	Zusatzstoffgehalt CEM3 - Zusatzstoff in Vol.-%										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q1	2750	4073	5435	6839	8286	9778	11318	12908	14549	16246	18000
Q2	2750	2798	2847	2897	2950	3003	3059	3116	3176	3237	3300
FC	2750	4225	5700	7175	8650	10125	11600	13075	14550	16025	17500
K1	2750	4136	5551	6995	8469	9974	11511	13081	14685	16324	18000

Tabelle-A 7: Entwicklung der spezifischen, massebezogenen Oberfläche [cm²/g] der Feinstoffgemische mit CEM4.

Zusatzstoff	Zusatzstoffgehalt CEM4 – Zusatzstoff in Vol.-%										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q1	3660	4904	6185	7505	8866	10269	11717	13211	14755	16351	18000
Q2	3660	3629	3597	3563	3529	3494	3458	3420	3381	3341	3300
FC	3660	5044	6428	7812	9196	10580	11964	13348	14732	16116	17500
K1	3660	4964	6294	7652	9038	10453	11898	13374	14883	16424	18000

2. Anhang Teil B – Untersuchungen am frischen Zementleim

Tabelle-A 8: Hohlraumanteil in den Zement-Zusatzstoff-Gemischen, Punktke-Verfahren.

Austausch Zement – Zusatzstoff Vol.-%	CEM3 – Q1 Hohlraumanteil Vol.-%	CEM3 – Q2 Hohlraumanteil Vol.-%
0	39,4	38,8
10	37,0	38,4
20	36,2	38,2
30	37,4	38,3
40	38,9	38,7
50	40,7	39,4
60	42,5	40,1
70	44,2	40,8
80	46,0	41,5
90	47,8	42,1
100	49,5	42,8

Tabelle-A 9: Abgesetzte Wassermenge bei Austausch des Zements CEM3 durch Q1, Absetzmaß nach Lieber.

Zeit in min	CEM3 – Q1 abgesonderte Wassermenge ml/100 g				
	0 Vol.-%	10 Vol.-%	20 Vol.-%	30 Vol.-%	40 Vol.-%
0	0	0	0	0	0
5	4	5	0	0	0
10	7	7	0	0	0
15	12	9	6,5	0	0
20	16	10	7	0	0
30	17	11	7	0	0
60	17	11	7	0	0
120	17	11	7	0	0

Tabelle-A 10: Abgesetzte Wassermenge bei Austausch des Zements CEM3 durch Q2, Absetzmaß nach Lieber.

Zeit in min	CEM3 – Q2				
	abgesonderte Wassermenge				
	ml/100 g	0 Vol.-%	10 Vol.-%	20 Vol.-%	30 Vol.-%
0	0	0	0	0	0
5	4	1	1	0	0
10	7	3	2	1	1
15	12	5	2	1	2
20	16	6	3	2	2
30	17	9	4	3	2,5
60	17	16	10	5	4
120	17	19	13,5	10	5

3. Anhang Teil C – Untersuchungen am Zementstein

3.1. Fall A, CEM 3 + Q1

Tabelle-A 11: Ergebnisse am Zementstein, Fall A, CEM3 + Q1, w/z₀ = 0,25.

w/z ₀ (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,25				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	82,3	87,9	93,0	81,9	71,4
Gesamtporengehalt	Vol.-%	20,4	17,8	15,3	17,9	19,3
Kapillarporengehalt	Vol.-%	9,9	5,4	4,3	3,9	3,5
Gelporengehalt	Vol.-%	8,2	11,0	8,8	11,3	13,0
Hydratationsgrad	%	-	-	-	-	-
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	1,49E-14	1,51E-14	1,20E-14	1,34E-14	2,10E-14
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	2,19E-12	1,55E-12	2,65E-12	2,71E-12	2,83E-12
übertragene Ladungsmenge	A*s	1614	1601	1600	1700	1800
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,0183	0,0051	0,0120	0,0062	0,0012

Tabelle-A 12: Ergebnisse am Zementstein, Fall A, CEM3 + Q1, w/z₀ = 0,35.

w/z ₀ (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,35				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	71,7	68,0	61,5	59,9	53,7
Gesamtporengehalt	Vol.-%	26,3	27,0	26,6	30,3	32,4
Kapillarporengehalt	Vol.-%	15,6	16,2	14,6	13,8	15,0
Gelporengehalt	Vol.-%	9,2	9,6	9,8	15,5	16,4
Hydratationsgrad	%	60	67	73	81	89
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	3,09E-14	4,01E-14	4,50E-14	4,63E-14	5,51E-14
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	7,26E-12	4,88E-12	8,72E-12	1,44E-11	1,62E-11
übertragene Ladungsmenge	A*s	3140	2730	2529	3028	3239
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,0489	0,0793	0,1127	0,1380	0,1437

Tabelle-A 13: Ergebnisse am Zementstein, Fall A, CEM3 + Q1, $w/z_0 = 0,40$.

w/z_0 (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,40				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	56,8	54,9	48,0	46,5	37,6
Gesamtporengehalt	Vol.-%	31,3	28,6	31,1	34,4	36,1
Kapillarporengehalt	Vol.-%	19,2	17,2	18,9	20,3	22,8
Gelporengehalt	Vol.-%	10,8	10,1	11,2	12,7	12,3
Hydratationsgrad	%	-	-	-	-	-
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	3,09E-14	4,75E-14	7,24E-14	8,66E-14	1,03E-13
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	9,97E-12	1,36E-11	1,27E-11	2,02E-11	2,97E-11
übertragene Ladungsmenge	A*s	3781	4071	3697	4505	5165
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,0641	0,0920	0,0710	0,0905	0,1231

Tabelle-A 14: Ergebnisse am Zementstein, Fall A, CEM3 + Q1, $w/z_0 = 0,45$.

w/z_0 (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,45				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	50,5	46,9	41,5	34,9	31,0
Gesamtporengehalt	Vol.-%	32,8	30,5	32,9	37,9	40,1
Kapillarporengehalt	Vol.-%	22,4	18,4	20,0	22,3	25,4
Gelporengehalt	Vol.-%	9,1	10,7	11,8	14,0	13,6
Hydratationsgrad	%	-	-	-	-	-
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	4,04E-14	5,21E-14	8,50E-14	9,36E-14	1,18E-13
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	1,49E-11	1,37E-11	1,61E-11	2,11E-11	3,41E-11
übertragene Ladungsmenge	A*s	4156	4428	4488	5148	5993
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,1402	0,1384	0,1968	0,2120	0,2650

Tabelle-A 15: Ergebnisse am Zementstein, Fall A, CEM3 + Q1, $w/z_0 = 0,50$.

w/z_0 (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,50				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	42,6	35,9	35,4	31,3	26,1
Gesamtporengehalt	Vol.-%	38,4	35,4	39,2	40,9	43,8
Kapillarporengehalt	Vol.-%	26,4	22,8	25,6	26,8	29,1
Gelporengehalt	Vol.-%	10,4	11,3	12,6	12,5	13,3
Hydratationsgrad	%	81	87	91	97	100
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	5,77E-14	8,08E-14	1,14E-13	1,28E-13	1,50E-13
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	1,81E-11	1,95E-11	1,98E-11	2,64E-11	3,18E-11
übertragene Ladungsmenge	A*s	4730	4800	5000	5709	6103
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,1919	0,3108	0,3347	0,3547	0,3987

3.2. Fall A, CEM 3 + Q2

Tabelle-A 16: Ergebnisse am Zementstein, Fall A, CEM3 + Q2, w/z₀ = 0,25.

w/z ₀ (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,25				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	82,3	76,0	72,0	67,0	61,0
Gesamtporengehalt	Vol.-%	20,4	22,0	24,0	26,0	29,0
Kapillarporengehalt	Vol.-%	9,9	11,4	7,4	5,2	2,8
Gelporengehalt	Vol.-%	8,2	6,6	7,9	10,4	12,1
Hydratationsgrad	%	-	-	-	-	-
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	1,49E-14	2,85E-14	2,99E-14	3,06E-14	3,43E-14
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	2,19E-12	3,69E-12	6,24E-12	5,73E-12	5,76E-12
übertragene Ladungsmenge	A*s	1614	1987	2098	2301	2800
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,0183	0,0057	0,0146	0,0082	0,0032

Tabelle-A 17: Ergebnisse am Zementstein, Fall A, CEM3 + Q2, w/z₀ = 0,35.

w/z ₀ (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,35				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	71,7	70,0	63,0	59,5	52,0
Gesamtporengehalt	Vol.-%	26,3	29,0	30,6	32,0	34,2
Kapillarporengehalt	Vol.-%	15,6	16,9	18,8	19,9	23,1
Gelporengehalt	Vol.-%	9,2	10,8	10,2	10,9	9,1
Hydratationsgrad	%	60	70	80	100	100
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	3,09E-14	4,97E-14	6,31E-14	6,74E-14	7,42E-14
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	7,26E-12	9,11E-12	1,32E-11	1,28E-11	1,56E-11
übertragene Ladungsmenge	A*s	3140	3630	4010	3828	3991
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,0489	0,1058	0,1343	0,1548	0,2305

Tabelle-A 18: Ergebnisse am Zementstein, Fall A, CEM3 + Q2, $w/z_0 = 0,40$.

w/z_0 (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,40				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	58,8	57,0	55,2	51,0	46,0
Gesamtporengehalt	Vol.-%	31,3	35,0	37,0	39,0	40,2
Kapillarporengehalt	Vol.-%	19,2	20,4	22,8	24,3	27,6
Gelporengehalt	Vol.-%	10,8	13,1	12,4	13,3	11,2
Hydratationsgrad	%	-	-	-	-	-
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	3,09E-14	5,69E-14	8,55E-14	1,00E-13	1,23E-13
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	9,97E-12	1,22E-11	1,55E-11	2,03E-11	3,07E-11
übertragene Ladungsmenge	A*s	3781	4071	4677	4905	6765
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,0641	0,1100	0,1560	0,1890	0,2340

Tabelle-A 19: Ergebnisse am Zementstein, Fall A, CEM3 + Q2, $w/z_0 = 0,45$.

w/z_0 (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,45				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	50,5	47,3	44,6	40,0	34,3
Gesamtporengehalt	Vol.-%	32,8	36,7	38,4	41,4	42,8
Kapillarporengehalt	Vol.-%	22,4	21,4	23,7	25,8	29,6
Gelporengehalt	Vol.-%	9,1	13,7	12,8	14,1	10,7
Hydratationsgrad	%	-	-	-	-	-
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	4,04E-14	6,77E-14	1,01E-13	1,32E-13	1,52E-13
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	1,49E-11	1,58E-11	2,24E-11	2,56E-11	4,14E-11
übertragene Ladungsmenge	A*s	4156	4928	5923	7148	7928
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,1402	0,2702	0,3014	0,3327	0,3462

Tabelle-A 20: Ergebnisse am Zementstein, Fall A, CEM3 + Q2, $w/z_0 = 0,50$.

w/z_0 (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,50				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	42,6	43,3	35,4	37,6	29,4
Gesamtporengehalt	Vol.-%	38,4	45,0	46,0	48,0	49,9
Kapillarporengehalt	Vol.-%	26,4	26,3	28,3	30,0	34,2
Gelporengehalt	Vol.-%	10,4	16,8	15,4	16,4	13,9
Hydratationsgrad	%	81	89	97	100	100
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	5,77E-14	1,02E-13	1,46E-13	1,70E-13	1,94E-13
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	1,81E-11	2,10E-11	2,54E-11	3,46E-11	4,35E-11
übertragene Ladungsmenge	A*s	4730	5800	6602	7709	9103
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,1919	0,3880	0,4670	0,5430	0,8286

3.3. Fall B, CEM 3 + Q1

Tabelle-A 21: Ergebnisse am Zementstein, Fall B, CEM3 + Q1, w/z₀ = 0,25.

w/z ₀ (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,25				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	82,3	93,5	112,4	114,6	101,2
Gesamtporengehalt	Vol.-%	20,4	16,6	13,4	14,7	14,0
Kapillarporengehalt	Vol.-%	9,9	1,0	0,8	1,1	0,9
Gelporengehalt	Vol.-%	8,2	13,5	10,4	10,7	10,8
Hydratationsgrad	%	-	-	-	-	-
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	1,64E-14	2,07E-14	1,38E-14	1,57E-14	1,58E-14
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	2,19E-12	1,25E-12	3,65E-12	3,71E-12	2,83E-12
übertragene Ladungsmenge	A*s	1614	1417	1293	1104	815
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,0183	0,0069	0,0037	0,0109	0,0105

Tabelle-A 22: Ergebnisse am Zementstein, Fall B, CEM3 + Q1, w/z₀ = 0,35.

w/z ₀ (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,35				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	71,7	84,6	89,9	91,0	89,0
Gesamtporengehalt	Vol.-%	26,3	24,3	22,0	20,8	21,9
Kapillarporengehalt	Vol.-%	15,6	12,3	9,9	7,5	7,2
Gelporengehalt	Vol.-%	9,2	11,0	11,4	12,5	13,6
Hydratationsgrad	%	60	42	43	42	39
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	2,63E-14	2,66E-14	2,49E-14	2,00E-14	1,47E-14
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	7,26E-12	6,25E-12	4,73E-12	5,98E-12	3,31E-12
übertragene Ladungsmenge	A*s	3140	1641	1300	913	910
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,0489	0,0182	0,0047	0,0028	0,0044

Tabelle-A 23: Ergebnisse am Zementstein, Fall B, CEM3 + Q1, $w/z_0 = 0,40$.

w/z_0 (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,40				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	56,8	66,7	77,2	85,9	87,0
Gesamtporengehalt	Vol.-%	31,3	25,9	26,1	23,9	21,0
Kapillarporengehalt	Vol.-%	19,2	14,8	13,7	10,7	9,4
Gelporengehalt	Vol.-%	10,8	9,8	11,6	12,1	10,6
Hydratationsgrad	%	-	-	-	-	-
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	2,90E-14	3,65E-14	3,63E-14	4,43E-14	4,15E-14
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	9,97E-12	8,87E-12	5,13E-12	3,50E-12	6,12E-12
übertragene Ladungsmenge	A*s	3781	2369	1933	1699	1389
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,0641	0,0339	0,0178	0,0275	0,0237

Tabelle-A 24: Ergebnisse am Zementstein, Fall B, CEM3 + Q1, $w/z_0 = 0,45$

w/z_0 (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,45				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	50,5	56,3	60,6	72,6	74,0
Gesamtporengehalt	Vol.-%	32,8	29,1	30,5	26,1	25,2
Kapillarporengehalt	Vol.-%	22,4	17,1	18,0	13,5	10,1
Gelporengehalt	Vol.-%	9,1	11,2	11,4	11,6	14,1
Hydratationsgrad	%	-	-	-	-	-
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	4,45E-14	5,73E-14	5,53E-14	5,45E-14	4,75E-14
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	1,49E-11	1,20E-11	9,21E-12	3,95E-12	6,25E-12
übertragene Ladungsmenge	A*s	4156	2968	2358	2434	1815
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,1402	0,0812	0,0504	0,0400	0,0256

Tabelle-A 25: Ergebnisse am Zementstein, Fall B, CEM3 + Q1, $w/z_0 = 0,50$

w/z_0 (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,50				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	42,6	43,2	48,5	56,2	65,8
Gesamtporengehalt	Vol.-%	38,4	31,4	32,5	30,1	26,1
Kapillarporengehalt	Vol.-%	26,4	19,9	18,8	17,2	13,7
Gelporengehalt	Vol.-%	10,4	10,4	12,5	11,8	11,6
Hydratationsgrad	%	81	70	68	64	60
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	5,81E-14	6,02E-14	5,76E-14	6,61E-14	6,73E-14
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	1,81E-11	9,01E-12	4,01E-12	6,25E-12	7,99E-12
übertragene Ladungsmenge	A*s	4730	4000	3070	2954	2358
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,1919	0,0898	0,0598	0,0538	0,0335

3.4. Fall B, CEM 3 + Q2

Tabelle-A 26: Ergebnisse am Zementstein, Fall B, CEM3 + Q2, w/z₀ = 0,25.

w/z ₀ (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,25				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	82,3	81,9	82,9	82,9	78,9
Gesamtporengehalt	Vol.-%	20,4	20,4	16,5	17,3	17,8
Kapillarporengehalt	Vol.-%	9,9	11,4	7,4	5,2	2,8
Gelporengehalt	Vol.-%	8,2	6,6	7,9	10,4	12,1
Hydratationsgrad	%	-	-	-	-	-
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	1,64E-14	2,64E-14	2,32E-14	2,32E-14	2,27E-14
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	2,19E-12	3,69E-12	6,24E-12	5,73E-12	5,76E-12
übertragene Ladungsmenge	A*s	1614	1839	1894	1868	1934
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,0183	0,0058	0,0146	0,0082	0,0032

Tabelle-A 27: Ergebnisse am Zementstein, Fall B, CEM3 + Q2, w/z₀ = 0,35.

w/z ₀ (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,35				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	71,7	79,5	79,6	79,4	75,5
Gesamtporengehalt	Vol.-%	26,3	25,0	22,4	22,1	22,3
Kapillarporengehalt	Vol.-%	15,6	13,8	11,5	10,7	11,4
Gelporengehalt	Vol.-%	9,2	10,2	9,7	9,9	10,0
Hydratationsgrad	%	60	57	53	55	49
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	2,63E-14	3,31E-14	3,74E-14	3,63E-14	4,24E-14
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	7,26E-12	8,10E-12	7,22E-12	8,90E-12	7,83E-12
übertragene Ladungsmenge	A*s	3140	2730	2662	2400	2100
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,0489	0,0242	0,0096	0,0030	0,0056

Tabelle-A 28: Ergebnisse am Zementstein, Fall B, CEM3 + Q2, w/z₀ = 0,40.

w/z ₀ (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,40				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	58,8	61,3	65,7	71,8	72,0
Gesamtporengehalt	Vol.-%	31,3	29,6	27,2	24,0	24,7
Kapillarporengehalt	Vol.-%	19,2	17,3	15,8	12,8	13,3
Gelporengehalt	Vol.-%	10,8	11,1	10,6	10,1	9,8
Hydratationsgrad	%	-	-	-	-	-
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	2,90E-14	3,96E-14	4,31E-14	4,99E-14	5,33E-14
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	9,97E-12	9,17E-12	8,97E-12	9,47E-12	9,85E-12
übertragene Ladungsmenge	A*s	3781	3654	3197	3005	2977
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,0641	0,0399	0,0218	0,0315	0,0285

Tabelle-A 29: Ergebnisse am Zementstein, Fall B, CEM3 + Q2, w/z₀ = 0,45.

w/z ₀ (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,45				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	50,5	50,0	52,9	59,2	67,8
Gesamtporengehalt	Vol.-%	32,8	32,4	30,6	28,1	25,6
Kapillarporengehalt	Vol.-%	22,4	20,6	18,8	16,4	14,0
Gelporengehalt	Vol.-%	9,1	10,2	10,2	10,2	10,3
Hydratationsgrad	%	-	-	-	-	-
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	4,45E-14	5,85E-14	6,30E-14	6,26E-14	6,66E-14
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	1,49E-11	1,25E-11	1,29E-11	1,19E-11	1,26E-11
übertragene Ladungsmenge	A*s	4156	3790	3582	3247	3135
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,1402	0,0581	0,0353	0,0381	0,0320

Tabelle-A 30: Ergebnisse am Zementstein, Fall B, CEM3 + Q2, w/z₀ = 0,50.

w/z ₀ (Ausgangswasserzementwert)	Einheit	0,50				
Zusatzstoffgehalt	Vol.-%	0	10	20	30	40
Druckfestigkeit	N/mm ²	42,6	41,0	44,6	49,7	54,8
Gesamtporengehalt	Vol.-%	38,4	35,5	34,2	32,0	30,0
Kapillarporengehalt	Vol.-%	26,4	23,3	23,1	19,9	17,3
Gelporengehalt	Vol.-%	10,4	10,8	9,1	10,9	11,5
Hydratationsgrad	%	81	81	75	72	69
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	kg/(m*s*Pa)	5,81E-14	7,46E-14	8,67E-14	9,29E-14	9,66E-14
Cl-Diffusionskoeffizient	m ² /s	1,81E-11	1,70E-11	1,64E-11	1,68E-11	1,75E-11
übertragene Ladungsmenge	A*s	4730	4800	4602	4309	4306
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² *h ^{0,5})	0,1919	0,1800	0,1560	0,1210	0,0900

4. Anhang Teil D – Untersuchungen am Beton

4.1. Frischbetonuntersuchungen

Tabelle-A 31: Ergebnisse der Frischbetonuntersuchungen.

Mischung	Luftgehalt [Vol.-%]	Ausbreitmaß [cm]	Frischbetonrohdichte [kg/m ³]		
			rechnerisch	experimentell	Differenz
R 0,25	1,3	38,0	2610	2575	1,3%
R 0,30	1,6	37,0	2558	2544	0,5%
R 0,40	2,0	38,0	2538	2526	0,5%
R 0,50	1,7	38,5	2504	2487	0,7%
R 0,60	1,6	40,0	2478	2477	0,0%
A 0,25	3,5	38,5	2627	2534	3,5%
A 0,35	0,8	36,0	2578	2564	0,5%
A 0,40	1,7	37,0	2559	2534	1,0%
A 0,50	1,9	37,5	2526	2501	1,0%
A 0,60	2,0	37,5	2499	2489	0,4%
B 0,78	1,5	37,0	2595	2548	1,8%
B 1,09	2,0	38,0	2545	2503	1,7%
B 1,24	1,7	38,0	2526	2487	1,5%
B 1,55	2,0	37,0	2493	2465	1,1%
B 1,86	1,4	38,0	2468	2446	0,9%

4.2. Festbetonuntersuchungen

Tabelle-A 32: Druckfestigkeit und Festbetonrohdichte.

Mischungen	Druckfestigkeit [N/mm ²]				Festbetonrohdichte [kg/m ³]			
	1	2	3	Mittelwert	1	2	2	Mittelwert
R 0,25	95,0	76,1	72,9	81,3	2566	2506	2492	2521
R 0,35	76,1	78,8	79,3	78,0	2502	2510	2553	2522
R 0,40	83,9	61,6	85,5	77,0	2504	2486	2503	2498
R 0,50	55,0	62,4	56,1	57,8	2478	2463	2438	2460
R 0,60	53,9	47,7	40,4	47,3	2454	2437	2415	2435
A 0,25	70,4	60,9	61,6	64,3	2529	2472	2472	2491
A 0,35	96,1	82,2	78,8	85,7	2506	2533	2515	2518
A 0,40	84,6	81,9	92,8	86,4	2529	2539	2509	2526
A 0,50	80,9	61,4	64,6	69,0	2478	2430	2438	2449
A 0,60	60,5	51,7	52,2	54,8	2480	2410	2410	2433
B 0,78	76,0	71,2	72,5	73,2	2498	2491	2459	2483
B 1,09	72,3	69,9	58,7	67,0	2479	2477	2390	2449
B 1,24	63,3	62,5	60,8	62,2	2442	2443	2412	2432
B 1,55	49,7	48,9	45,9	48,2	2428	2443	2402	2424
B 1,86	34,5	34,7	35,8	35,0	2401	2408	2396	2402

Tabelle-A 33: Messdaten für Gaspermeabilität mit Stickstoff.

Probe	Druck [bar]	Fläche [m ²]	Dicke [m]	Volumen [m ³]	Zeit [s]	Durchfluss [m ³ /s]	P.koeffi. [m ²]
R 0,25I	1,5	0,0176	0,04898	0,0000015	30,18	4,97018E-08	3,85E-17
R 0,25II			0,04895	0,0000150	45,97	3,26300E-07	2,53E-16
R 0,25III			0,04855	Messung nicht möglich			
R 0,25I	2,0	0,0176	0,04898	0,0000015	36,15	4,14938E-08	1,34E-17
R 0,25II			0,04895	0,0000150	32,98	4,54821E-07	1,47E-16
R 0,25III			0,04855	Messung nicht möglich			
R 0,25I	2,5	0,0176	0,04898	0,0000015	33,33	4,50045E-08	8,30E-18
R 0,25II			0,04895	0,0000150	24,57	6,10501E-07	1,13E-16
R 0,25III			0,04855	Messung nicht möglich			
R 0,25I	3,0	0,0176	0,04898	0,0000015	28,99	5,17420E-08	6,26E-18
R 0,25II			0,04895	0,0001500	201,32	7,45082E-07	9,01E-17
R 0,25III			0,04855	Messung nicht möglich			
R 0,25I	3,5	0,0176	0,04898	0,0000015	24,18	6,20347E-08	5,34E-18
R 0,25II			0,04895	0,0001500	181,54	8,26264E-07	7,11E-17
R 0,25III			0,04855	Messung nicht möglich			

Probe	Druck [bar]	Fläche [m ²]	Dicke [m]	Volumen [m ³]	Zeit [s]	Durchfluss [m ³ /s]	P.koeffi. [m ²]
R 0,35I	1,5	0,0176	0,04953	0,0000015	30,05	4,99168E-08	3,91E-17
R 0,35II			0,04950	0,0000015	44,53	3,36852E-08	2,64E-17
R 0,35III			0,04953	0,0000015	23,23	6,45717E-08	5,06E-17
R 0,35I	2,0	0,0176	0,04953	0,0000015	20,49	7,32064E-08	2,39E-17
R 0,35II			0,04950	0,0000015	30,89	4,85594E-08	1,58E-17
R 0,35III			0,04953	0,0000050	40,33	1,23977E-07	4,05E-17
R 0,35I	2,5	0,0176	0,04953	0,0000050	44,22	1,13071E-07	2,11E-17
R 0,35II			0,04950	0,0000015	23,31	6,43501E-08	1,20E-17
R 0,35III			0,04953	0,0000050	35,71	1,40017E-07	2,61E-17
R 0,35I	3,0	0,0176	0,04953	0,0000050	32,04	1,56055E-07	1,91E-17
R 0,35II			0,04950	0,0000050	61,58	8,11952E-08	9,93E-18
R 0,35III			0,04953	0,0000050	25,33	1,97394E-07	2,42E-17
R 0,35I	3,5	0,0176	0,04953	0,0000050	23,58	2,12044E-07	1,85E-17
R 0,35II			0,04950	0,0000050	50,26	9,94827E-08	8,65E-18
R 0,35III			0,04953	0,0000050	19,76	2,53036E-07	2,20E-17
R 0,40I	1,5	0,0176	0,04840	0,000005	75,89	6,58848E-08	5,04E-17
R 0,40II			0,04915	0,000005	60,31	8,29050E-08	6,45E-17
R 0,40III			0,04825	0,000005	150,86	3,31433E-08	2,53E-17
R 0,40I	2,0	0,0176	0,04840	0,000005	51,88	9,63763E-08	3,07E-17
R 0,40II			0,04915	0,000005	40,43	1,23671E-07	4,01E-17
R 0,40III			0,04825	0,000005	98,30	5,08647E-08	1,62E-17
R 0,40I	2,5	0,0176	0,04840	0,000005	36,83	1,35759E-07	2,47E-17
R 0,40II			0,04915	0,000005	30,13	1,65948E-07	3,07E-17
R 0,40III			0,04825	0,000005	69,48	7,19632E-08	1,31E-17
R 0,40I	3,0	0,0176	0,04840	0,000005	27,63	1,80963E-07	2,16E-17
R 0,40II			0,04915	0,000005	24,06	2,07814E-07	2,52E-17
R 0,40III			0,04825	0,000005	49,91	1,00180E-07	1,19E-17
R 0,40I	3,5	0,0176	0,04840	0,000015	58,98	2,54323E-07	2,16E-17
R 0,40II			0,04915	0,000015	60,35	2,48550E-07	2,15E-17
R 0,40III			0,04825	0,000005	37,34	1,33905E-07	1,14E-17
R 0,50I	1,5	0,0176	0,04935	0,000005	69,09	7,23694E-08	5,65E-17
R 0,50II			0,04968	0,000005	67,93	7,36052E-08	5,78E-17
R 0,50III			0,04860	0,000005	46,69	1,07089E-07	8,23E-17
R 0,50I	2,0	0,0176	0,04935	0,000005	41,91	1,19303E-07	3,88E-17
R 0,50II			0,04968	0,000005	45,14	1,10767E-07	3,63E-17
R 0,50III			0,04860	0,000005	32,19	1,55328E-07	4,98E-17
R 0,50I	2,5	0,0176	0,04935	0,000005	31,11	1,60720E-07	2,99E-17
R 0,50II			0,04968	0,000005	33,34	1,49970E-07	2,81E-17
R 0,50III			0,04860	0,000015	68,34	2,19491E-07	4,02E-17
R 0,50I	3,0	0,0176	0,04935	0,000015	76,67	1,95644E-07	2,39E-17
R 0,50II			0,04968	0,000015	66,47	2,25666E-07	2,77E-17
R 0,50III			0,04860	0,000015	46,30	3,23974E-07	3,89E-17
R 0,50I	3,5	0,0176	0,04935	0,000015	58,05	2,58398E-07	2,24E-17
R 0,50II			0,04968	0,000015	49,36	3,03890E-07	2,65E-17
R 0,50III			0,04860	0,000015	33,66	4,45633E-07	3,81E-17

Probe	Druck [bar]	Fläche [m ²]	Dicke [m]	Volumen [m ³]	Zeit [s]	Durchfluss [m ³ /s]	P.koeffi. [m ²]
R 0,60I	1,5	0,0176	0,05115	0,000005	30,24	1,65344E-07	1,34E-16
R 0,60II			0,05625	0,000005	30,30	1,65017E-07	1,47E-16
R 0,60III			0,05035	0,000005	40,92	1,22190E-07	9,73E-17
R 0,60I	2,0	0,0176	0,05115	0,000015	58,53	2,56279E-07	8,64E-17
R 0,60II			0,05625	0,000015	58,88	2,54755E-07	9,44E-17
R 0,60III			0,05035	0,000005	31,35	1,59490E-07	5,29E-17
R 0,60I	2,5	0,0176	0,05115	0,000015	42,93	3,49406E-07	6,73E-17
R 0,60II			0,05625	0,000015	42,52	3,52775E-07	7,47E-17
R 0,60III			0,05035	0,000015	59,12	2,53721E-07	4,81E-17
R 0,60I	3,0	0,0176	0,05115	0,000015	32,47	4,61965E-07	5,84E-17
R 0,60II			0,05625	0,000015	31,13	4,81850E-07	6,70E-17
R 0,60III			0,05035	0,000015	44,33	3,38371E-07	4,21E-17
R 0,60I	3,5	0,0176	0,05115	0,000015	24,99	6,00240E-07	5,40E-17
R 0,60II			0,05625	0,000015	23,85	6,28931E-07	6,22E-17
R 0,60III			0,05035	0,000015	33,93	4,42087E-07	3,91E-17
A 0,25I	2,5	0,0176	0,04985	0,0000015	114,88	1,30571E-08	2,45E-18
A 0,25II			0,04963	0,0000015	146,88	1,02124E-08	1,91E-18
A 0,25III			0,04935	0,0000015	119,46	1,25565E-08	2,33E-18
A 0,25I	3,0	0,0176	0,04985	0,0000015	91,45	1,64024E-08	2,02E-18
A 0,25II			0,04963	0,0000015	96,81	1,54943E-08	1,90E-18
A 0,25III			0,04935	0,0000015	95,42	1,57200E-08	1,92E-18
A 0,25I	3,5	0,0176	0,04985	0,0000015	75,23	1,99389E-08	1,75E-18
A 0,25II			0,04963	0,0000015	77,09	1,94578E-08	1,70E-18
A 0,25III			0,04935	0,0000015	80,85	1,85529E-08	1,61E-18
A 0,25I	4,0	0,0176	0,04985	0,0000015	66,69	2,24921E-08	1,48E-18
A 0,25II			0,04963	0,0000015	62,67	2,39349E-08	1,57E-18
A 0,25III			0,04935	0,0000015	71,73	2,09118E-08	1,36E-18
A 0,25I	4,5	0,0176	0,04985	0,0000015	63,15	2,37530E-08	1,22E-18
A 0,25II			0,04963	0,0000015	52,51	2,85660E-08	1,46E-18
A 0,25III			0,04935	0,0000015	70,35	2,13220E-08	1,08E-18
A 0,35I	1,5	0,0176	0,04888	0,0000015	32,07	4,67727E-08	3,62E-17
A 0,35II			0,04930	0,0000015	24,64	6,08766E-08	4,75E-17
A 0,35III			0,05115	0,0000015	21,06	7,12251E-08	5,76E-17
A 0,35I	2,0	0,0176	0,04888	0,0000015	22,64	6,62544E-08	2,13E-17
A 0,35II			0,04930	0,0000015	17,26	8,69061E-08	2,82E-17
A 0,35III			0,05115	0,0000015	15,54	9,65251E-08	3,25E-17
A 0,35I	2,5	0,0176	0,04888	0,0000050	49,29	1,01440E-07	1,87E-17
A 0,35II			0,04930	0,0000050	40,01	1,24969E-07	2,32E-17
A 0,35III			0,05115	0,0000050	36,59	1,36649E-07	2,63E-17
A 0,35I	3,0	0,0176	0,04888	0,0000050	35,19	1,42086E-07	1,72E-17
A 0,35II			0,04930	0,0000050	30,63	1,63239E-07	1,99E-17
A 0,35III			0,05115	0,0000050	28,00	1,78571E-07	2,26E-17
A 0,35I	3,5	0,0176	0,04888	0,0000050	27,83	1,79662E-07	1,54E-17
A 0,35II			0,04930	0,0000050	24,53	2,03832E-07	1,77E-17
A 0,35III			0,05115	0,0000050	22,95	2,17865E-07	1,96E-17

Probe	Druck [bar]	Fläche [m ²]	Dicke [m]	Volumen [m ³]	Zeit [s]	Durchfluss [m ³ /s]	P.koeffi. [m ²]
-------	-------------	--------------------------	-----------	---------------------------	----------	--------------------------------	-----------------------------

A 0,40I	1,5	0,0176	0,04950	0,000005	72,59	6,88800E-08	5,39E-17
A 0,40II			0,04948	0,000005	92,53	5,40365E-08	4,23E-17
A 0,40III			0,04910	0,000005	76,27	6,55566E-08	5,09E-17
A 0,40I	2,0	0,0176	0,04950	0,000005	49,18	1,01667E-07	3,32E-17
A 0,40II			0,04948	0,000005	56,87	8,79198E-08	2,87E-17
A 0,40III			0,04910	0,000005	48,3	1,03520E-07	3,35E-17
A 0,40I	2,5	0,0176	0,04950	0,000005	35,07	1,42572E-07	2,66E-17
A 0,40II			0,04948	0,000005	40,31	1,24039E-07	2,31E-17
A 0,40III			0,04910	0,000005	35,15	1,42248E-07	2,63E-17
A 0,40I	3,0	0,0176	0,04950	0,000005	27,33	1,82949E-07	2,24E-17
A 0,40II			0,04948	0,000005	28,43	1,75871E-07	2,15E-17
A 0,40III			0,04910	0,000005	26,47	1,88893E-07	2,29E-17
A 0,40I	3,5	0,0176	0,04950	0,000005	23,43	2,13402E-07	1,86E-17
A 0,40II			0,04948	0,000005	20,64	2,42248E-07	2,11E-17
A 0,40III			0,04910	0,000005	22,17	2,25530E-07	1,95E-17

A 0,50I	1,5	0,0176	0,04868	0,000005	65,99	7,57691E-08	5,83E-17
A 0,50II			0,05133	0,000005	98,15	5,09424E-08	4,14E-17
A 0,50III			0,04880	0,000005	51,35	9,73710E-08	7,52E-17
A 0,50I	2,0	0,0176	0,04868	0,000005	38,98	1,28271E-07	4,12E-17
A 0,50II			0,05133	0,000005	70,75	7,06714E-08	2,39E-17
A 0,50III			0,04880	0,000005	31,27	1,59898E-07	5,14E-17
A 0,50I	2,5	0,0176	0,04868	0,000005	29,14	1,71585E-07	3,15E-17
A 0,50II			0,05133	0,000005	49,31	1,01399E-07	1,96E-17
A 0,50III			0,04880	0,000005	22,84	2,18914E-07	4,02E-17
A 0,50I	3,0	0,0176	0,04868	0,000015	62,19	2,41196E-07	2,90E-17
A 0,50II			0,05133	0,000005	37,27	1,34156E-07	1,70E-17
A 0,50III			0,04880	0,000015	50,87	2,94869E-07	3,56E-17
A 0,50I	3,5	0,0176	0,04868	0,000015	47,27	3,17326E-07	2,72E-17
A 0,50II			0,05133	0,000015	71,64	2,09380E-07	1,89E-17
A 0,50III			0,04880	0,000015	37,55	3,99467E-07	3,43E-17

A 0,60I	1,5	0,0176	0,04920	0,000005	49,66	1,00685E-07	7,84E-17
A 0,60II			0,05018	0,000005	35,49	1,40885E-07	1,12E-16
A 0,60III			0,04968	0,000005	30,39	1,64528E-07	1,29E-16
A 0,60I	2,0	0,0176	0,04920	0,000005	33,06	1,51240E-07	4,90E-17
A 0,60II			0,05018	0,000005	26,26	1,90404E-07	6,30E-17
A 0,60III			0,04968	0,000005	21,99	2,27376E-07	7,45E-17
A 0,60I	2,5	0,0176	0,04920	0,000005	21,55	2,32019E-07	4,30E-17
A 0,60II			0,05018	0,000005	19,03	2,62743E-07	4,97E-17
A 0,60III			0,04968	0,000015	43,91	3,41608E-07	6,39E-17
A 0,60I	3,0	0,0176	0,04920	0,000015	47,50	3,15789E-07	3,84E-17
A 0,60II			0,05018	0,000015	42,07	3,56549E-07	4,42E-17
A 0,60III			0,04968	0,000015	31,85	4,70958E-07	5,78E-17
A 0,60I	3,5	0,0176	0,04920	0,000015	36,50	4,10959E-07	3,55E-17
A 0,60II			0,05018	0,000015	32,73	4,58295E-07	4,04E-17
A 0,60III			0,04968	0,000015	24,19	6,20091E-07	5,41E-17

Probe	Druck [bar]	Fläche [m ²]	Dicke [m]	Volumen [m ³]	Zeit [s]	Durchfluss [m ³ /s]	P.koeffi. [m ²]
B 0,78I	2,5	0,0176	0,04978	0,0000015	45,09	3,32668E-08	6,24E-18
B 0,78II			0,04968	0,0000015	52,75	2,84360E-08	5,32E-18
B 0,78III			0,04948	0,0000015	84,32	1,77894E-08	3,32E-18
B 0,78I	3,0	0,0176	0,04978	0,0000015	36,07	4,15858E-08	5,12E-18
B 0,78II			0,04968	0,0000015	41,44	3,61969E-08	4,44E-18
B 0,78III			0,04948	0,0000015	65,65	2,28484E-08	2,79E-18
B 0,78I	3,5	0,0176	0,04978	0,0000015	29,43	5,09684E-08	4,46E-18
B 0,78II			0,04968	0,0000015	33,90	4,42478E-08	3,86E-18
B 0,78III			0,04948	0,0000015	50,45	2,97324E-08	2,59E-18
B 0,78I	4,0	0,0176	0,04978	0,0000015	25,27	5,93589E-08	3,90E-18
B 0,78II			0,04968	0,0000015	28,46	5,27056E-08	3,45E-18
B 0,78III			0,04948	0,0000015	39,78	3,77074E-08	2,46E-18
B 0,78I	4,5	0,0176	0,04978	0,0000015	22,01	6,81508E-08	3,48E-18
B 0,78II			0,04968	0,0000015	25,33	5,92183E-08	3,02E-18
B 0,78III			0,04948	0,0000015	32,29	4,64540E-08	2,36E-18
B 1,09I	1,5	0,0176	0,04963	0,0000015	36,23	4,14022E-08	3,25E-17
B 1,09II			0,04980	0,0000015	33,85	4,43131E-08	3,49E-17
B 1,09III			0,04953	0,0000015	28,96	5,17956E-08	4,06E-17
B 1,09I	2,0	0,0176	0,04963	0,0000015	24,65	6,08519E-08	1,99E-17
B 1,09II			0,04980	0,0000015	23,69	6,33179E-08	2,08E-17
B 1,09III			0,04953	0,0000015	19,69	7,61808E-08	2,49E-17
B 1,09I	2,5	0,0176	0,04963	0,0000015	18,69	8,02568E-08	1,50E-17
B 1,09II			0,04980	0,0000015	17,54	8,55188E-08	1,60E-17
B 1,09III			0,04953	0,0000015	14,48	1,03591E-07	1,93E-17
B 1,09I	3,0	0,0176	0,04963	0,0000050	49,02	1,01999E-07	1,25E-17
B 1,09II			0,04980	0,0000050	42,13	1,18680E-07	1,46E-17
B 1,09III			0,04953	0,0000050	38,23	1,30787E-07	1,60E-17
B 1,09I	3,5	0,0176	0,04963	0,0000050	32,48	1,53941E-07	1,34E-17
B 1,09II			0,04980	0,0000050	31,71	1,57679E-07	1,38E-17
B 1,09III			0,04953	0,0000050	29,63	1,68748E-07	1,47E-17
B 1,24I	1,5	0,0176	0,04940	0,0000015	24,77	6,05571E-08	4,73E-17
B 1,24II			0,04988	0,0000015	34,39	4,36173E-08	3,44E-17
B 1,24III			0,04620	0,0000050	50,40	9,92063E-08	7,25E-17
B 1,24I	2,0	0,0176	0,04940	0,0000050	54,32	9,20471E-08	3,00E-17
B 1,24II			0,04988	0,0000015	25,21	5,95002E-08	1,96E-17
B 1,24III			0,04620	0,0000050	33,44	1,49522E-07	4,55E-17
B 1,24I	2,5	0,0176	0,04940	0,0000050	37,58	1,33049E-07	2,48E-17
B 1,24II			0,04988	0,0000015	18,34	8,17884E-08	1,54E-17
B 1,24III			0,04620	0,0000050	24,23	2,06356E-07	3,59E-17
B 1,24I	3,0	0,0176	0,04940	0,0000050	26,96	1,85460E-07	2,26E-17
B 1,24II			0,04988	0,0000050	41,55	1,20337E-07	1,48E-17
B 1,24III			0,04620	0,0000050	18,42	2,71444E-07	3,10E-17
B 1,24I	3,5	0,0176	0,04940	0,0000050	19,76	2,53036E-07	2,20E-17
B 1,24II			0,04988	0,0000050	29,87	1,67392E-07	1,47E-17
B 1,24III			0,04620	0,0000150	43,43	3,45383E-07	2,80E-17

Probe	Druck [bar]	Fläche [m ²]	Dicke [m]	Volumen [m ³]	Zeit [s]	Durchfluss [m ³ /s]	P.koeffi. [m ²]
B 1,55I	1,5	0,0176	0,04960	0,000005	64,44	7,75916E-08	6,09E-17
B 1,55II			0,04900	0,000005	63,95	7,81861E-08	6,06E-17
B 1,55III			0,04900	0,000005	59,63	8,38504E-08	6,50E-17
B 1,55I	2,0	0,0176	0,04960	0,000005	38,97	1,28304E-07	4,19E-17
B 1,55II			0,04900	0,000005	37,38	1,33761E-07	4,32E-17
B 1,55III			0,04900	0,000005	40,33	1,23977E-07	4,00E-17
B 1,55I	2,5	0,0176	0,04960	0,000005	27,22	1,83688E-07	3,43E-17
B 1,55II			0,04900	0,000005	27,6	1,81159E-07	3,34E-17
B 1,55III			0,04900	0,000005	30,16	1,65782E-07	3,06E-17
B 1,55I	3,0	0,0176	0,04960	0,000015	61,89	2,42365E-07	2,97E-17
B 1,55II			0,04900	0,000015	53,98	2,77881E-07	3,37E-17
B 1,55III			0,04900	0,000015	68,92	2,17644E-07	2,64E-17
B 1,55I	3,5	0,0176	0,04960	0,000015	47,87	3,13349E-07	2,73E-17
B 1,55II			0,04900	0,000015	39,43	3,80421E-07	3,28E-17
B 1,55III			0,04900	0,000015	53,69	2,79382E-07	2,41E-17
B 1,86I	1,5	0,0176	0,04965	0,000005	26,17	1,91058E-07	1,50E-16
B 1,86II			0,04898	0,000005	26,60	1,87970E-07	1,46E-16
B 1,86III			0,04900	0,000005	37,78	1,32345E-07	1,03E-16
B 1,86I	2,0	0,0176	0,04965	0,000015	53,86	2,78500E-07	9,11E-17
B 1,86II			0,04898	0,000015	56,64	2,64831E-07	8,55E-17
B 1,86III			0,04900	0,000005	29,79	1,67842E-07	5,42E-17
B 1,86I	2,5	0,0176	0,04965	0,000015	39,73	3,77548E-07	7,06E-17
B 1,86II			0,04898	0,000015	41,37	3,62582E-07	6,69E-17
B 1,86III			0,04900	0,000015	53,96	2,77984E-07	5,13E-17
B 1,86I	3,0	0,0176	0,04965	0,000015	30,29	4,95213E-07	6,08E-17
B 1,86II			0,04898	0,000015	32,32	4,64109E-07	5,62E-17
B 1,86III			0,04900	0,000015	40,47	3,70645E-07	4,49E-17
B 1,86I	3,5	0,0176	0,04965	0,000015	23,53	6,37484E-07	5,56E-17
B 1,86II			0,04898	0,000015	27,60	5,43478E-07	4,68E-17
B 1,86III			0,04900	0,000015	32,06	4,67873E-07	4,03E-17

Tabelle-A 34: Mittelwerte der Durchflussmenge Q.

Eingangsdruck p_e [bar]	$(p_e^2 - 1)$ [bar]	R 0,35	R 0,40	R 0,50	R 0,60
		Mittelwerte der Durchflussmenge Q [m³/s]			
1,5	1,25	4,93912E-08	6,06444E-08	8,43546E-08	1,50850E-07
2,0	3,00	8,19143E-08	9,03038E-08	1,28466E-07	2,23508E-07
2,5	5,25	1,05813E-07	1,24557E-07	1,76727E-07	3,18634E-07
3,0	8,00	1,44882E-07	1,62986E-07	2,48428E-07	4,27396E-07
3,5	11,25	1,88188E-07	2,12259E-07	3,35974E-07	5,57086E-07

Eingangsdruck p_e [bar]	$(p_e^2 - 1)$ [bar]	A 0,35	A 0,40	A 0,50	A 0,60
		Mittelwerte der Durchflussmenge Q [m³/s]			
1,5	1,25	5,96248E-08	6,28244E-08	7,46942E-08	1,35366E-07
2,0	3,00	8,32286E-08	9,77023E-08	1,19613E-07	1,89673E-07
2,5	5,25	1,21020E-07	1,36286E-07	1,63966E-07	2,78790E-07
3,0	8,00	1,61299E-07	1,82571E-07	2,23407E-07	3,81099E-07
3,5	11,25	2,00453E-07	2,27060E-07	3,08725E-07	4,96448E-07

Eingangsdruck p_e [bar]	$(p_e^2 - 1)$ [bar]	B 1,09	B 1,24	B 1,55	B 1,86
		Mittelwerte der Durchflussmenge Q [m³/s]			
1,5	1,25	4,58370E-08	6,77936E-08	7,98760E-08	1,70458E-07
2,0	3,00	6,67835E-08	1,00356E-07	1,28681E-07	2,37057E-07
2,5	5,25	8,97889E-08	1,40398E-07	1,76877E-07	3,39371E-07
3,0	8,00	1,17156E-07	1,92414E-07	2,45963E-07	4,43322E-07
3,5	11,25	1,60123E-07	2,55271E-07	3,24384E-07	5,49612E-07

Eingangsdruck p_e [bar]	$(p_e^2 - 1)$ [bar]	R 0,25	A 0,25	B 0,78
		Mittelwerte der Durchflussmenge Q [m³/s]		
2,5	5,25	1,88001E-07	1,19420E-08	2,64974E-08
3,0	8,00	2,48157E-07	1,58722E-08	3,35437E-08
3,5	11,25	3,27753E-07	1,93165E-08	4,16495E-08
4,0	15,00	3,98412E-07	2,24463E-08	4,99240E-08
4,5	19,25	4,44149E-07	2,45470E-08	5,79411E-08

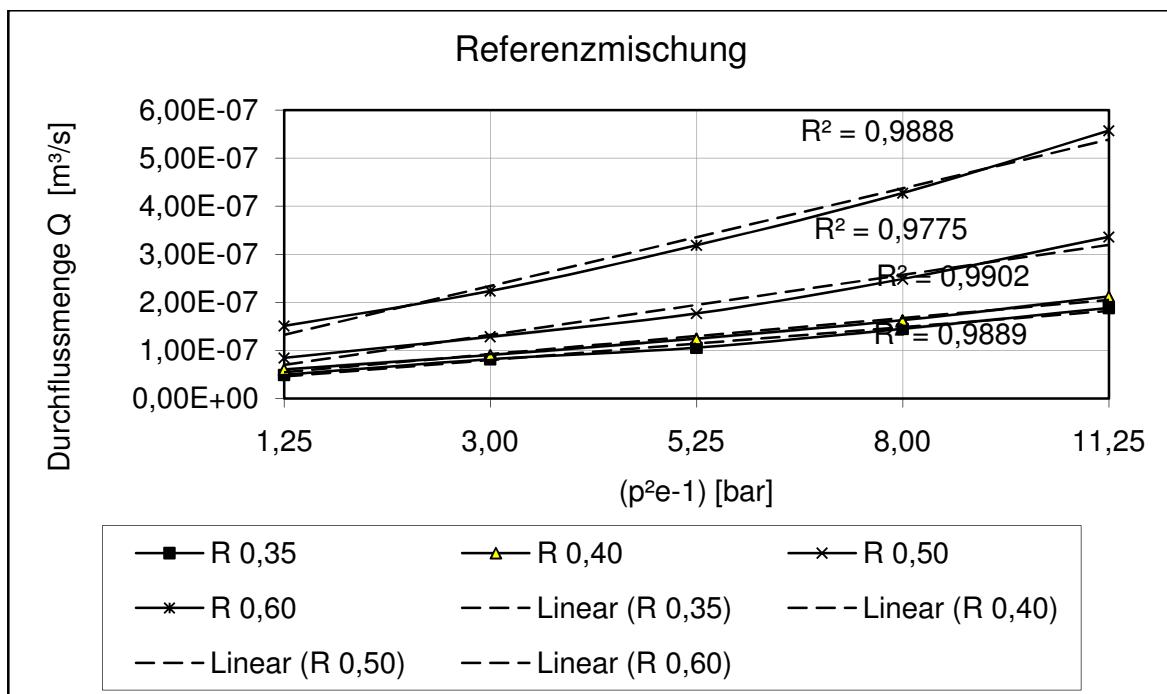


Abbildung-A 1: Lineare Abhangigkeit der Durchflussmenge Q bei den Referenzbetonen.

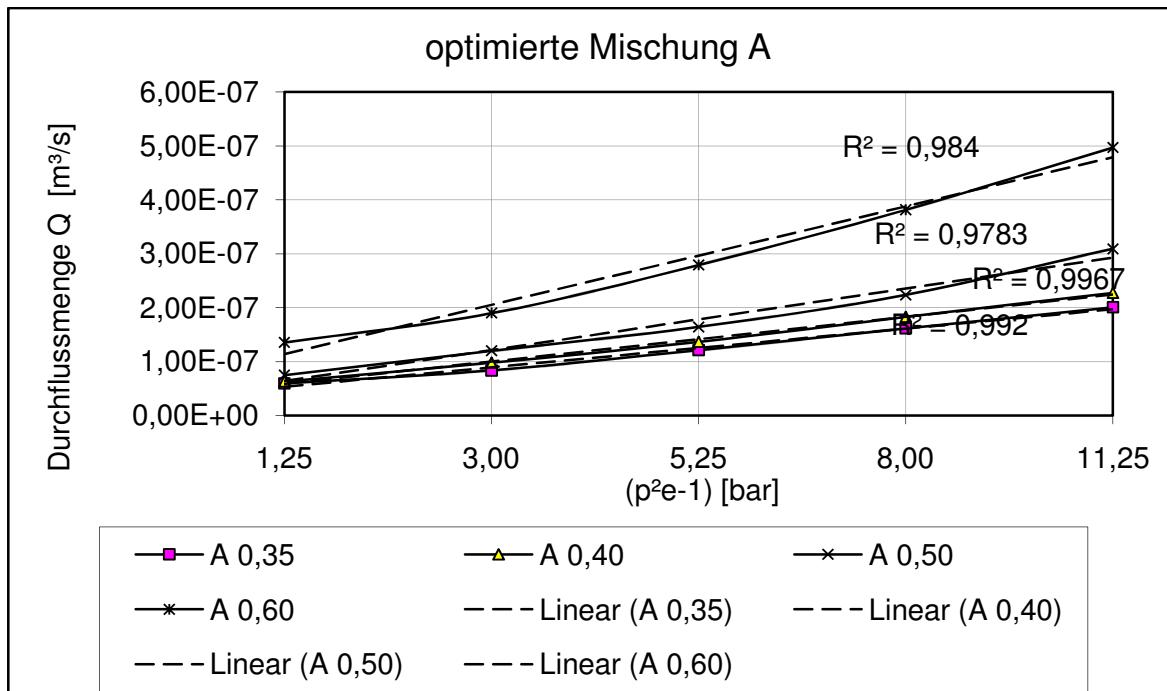


Abbildung-A 2: Lineare Abhangigkeit der Durchflussmenge Q bei den Betonen Gruppe A.

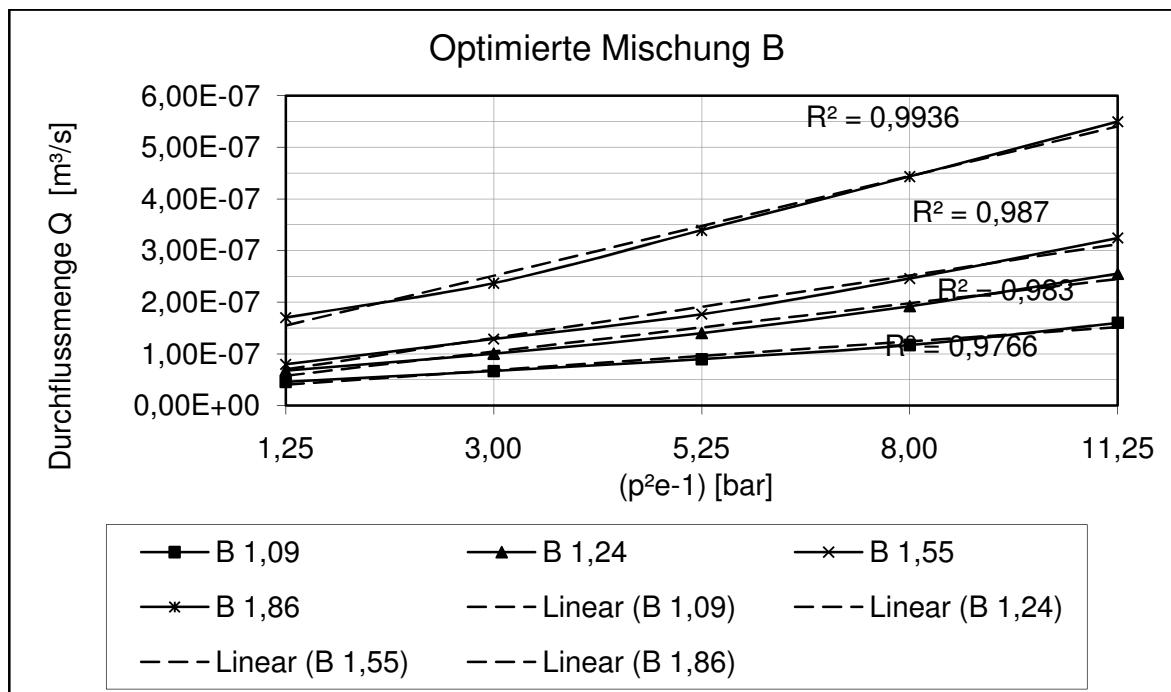


Abbildung-A 3: Lineare Abhängigkeit der Durchflussmenge Q bei den Betonen Gruppe B.

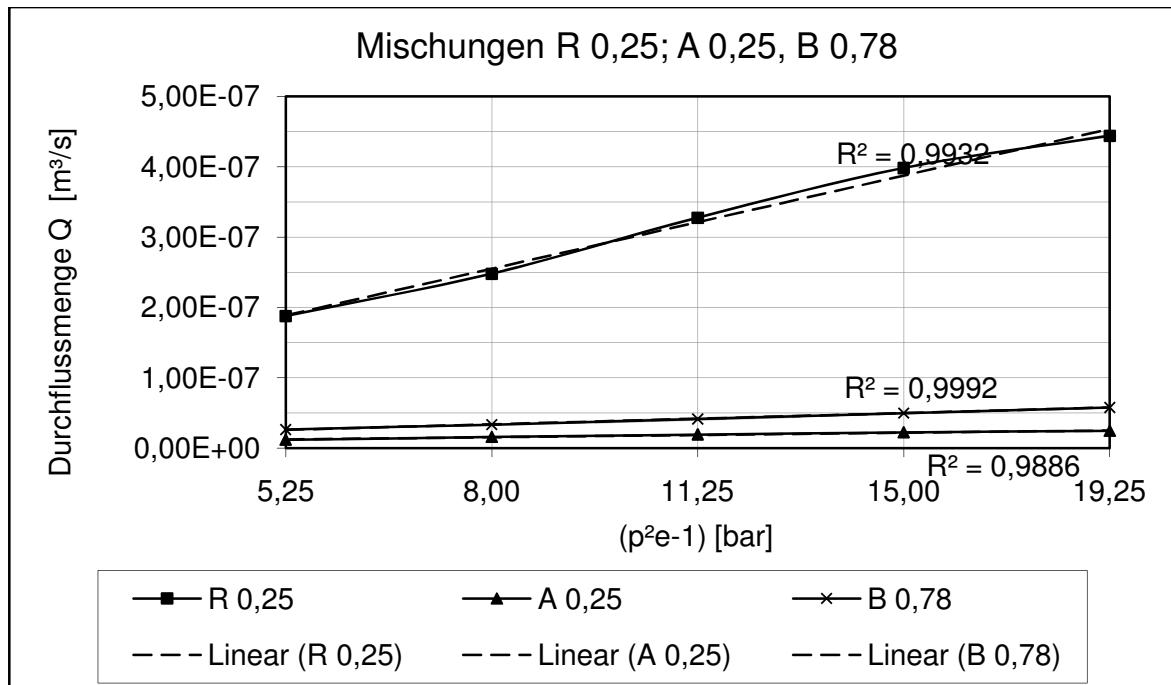


Abbildung-A 4: Vergleich der linearen Abhängigkeit der Durchflussmenge Q.

Tabelle-A 35: Gaspermeabilität, Berechnung der Mittel- und Endwerte.

spez. Gaspermeabilitätskoeffizient K als konstanter Werkstoffkennwert		
Probe	Gaspermeabilitätskoeffizient K [m ²]	[pPm]
R 0,25	7,449792E-17	0,745
R 0,35	2,385592E-17	0,239
R 0,40	2,726786E-17	0,273
R 0,50	3,980655E-17	0,398
R 0,60	7,497463E-17	0,750
A 0,25	1,716264E-18	0,017
A 0,35	2,692716E-17	0,269
A 0,40	2,962618E-17	0,296
A 0,50	3,630440E-17	0,363
A 0,60	6,220416E-17	0,622
B 0,78	3,787338E-18	0,038
B 1,09	2,059750E-17	0,206
B 1,25	3,056563E-17	0,306
B 1,55	3,892368E-17	0,389
B 1,86	7,482911E-17	0,748

4.3. Chloriddiffusionswiderstand

Tabelle-A 36: Kenndaten für Chlorideindringprüfung im Schnellverfahren.

Mischungen	Chloriddiffusions - koeffizient D [m ² /s]	Chlorideindring- tiefen [cm]	Übertragene Ladungsmenge [A*s]
R 0,25	1,8231E-12	1,364	1292,4
R 0,35	3,9487E-12	2,814	7495,9
R 0,40	4,4240E-12	3,161	6203,5
R 0,50	6,5594E-12	4,734	9040,5
R 0,60	7,1558E-12	5,200	16789,5
A 0,25	1,9638E-12	1,520	1808,1
A 0,35	3,4104E-12	2,500	5682,6
A 0,40	4,3352E-12	3,159	6199,2
A 0,50	6,6564E-12	4,836	8782,2
A 0,60	7,0341E-12	5,200	16531,2
B 0,78	2,5008E-12	1,768	2843,3
B 1,09	4,3163E-12	3,050	7754,4
B 1,24	6,2661E-12	4,407	10080,7
B 1,55	7,3252E-12	5,200	19903,0
B 1,86	7,3806E-12	5,200	14733,4

4.4. Frost-Tausalz-Widerstand

Tabelle-A 37: Abwitterungsmengen nach 28 Frost-Tau-Zyklen im CDF-Test.

Beton	w/z ₀ -Wert		
	0,35	0,40	0,60
Referenzbeton nach Walz	711 g/m ²	806 g/m ²	849 g/m ²
Beton Gruppe A, 20 Vol.-% Zement CEM3 durch Q1 ersetzt	540 g/m ²	729 g/m ²	1064 g/m ²

4.5. Kapillare Wasseraufnahme

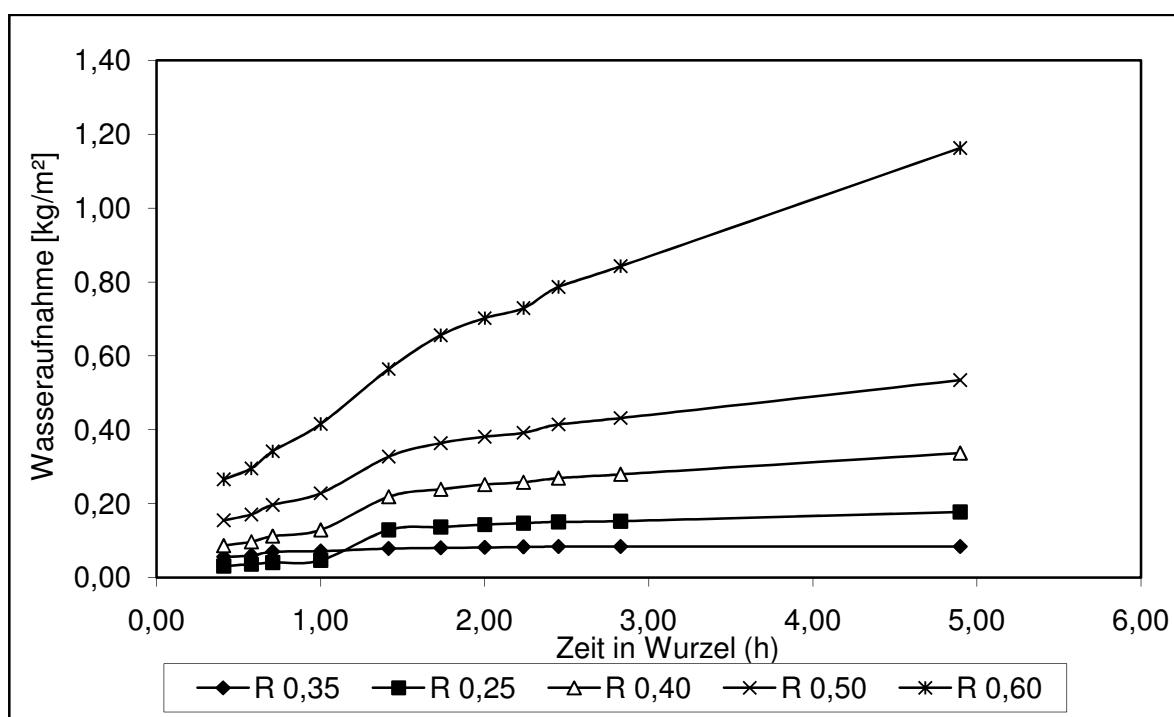


Abbildung-A 5: Wasseraufnahme der Referenzbetone.

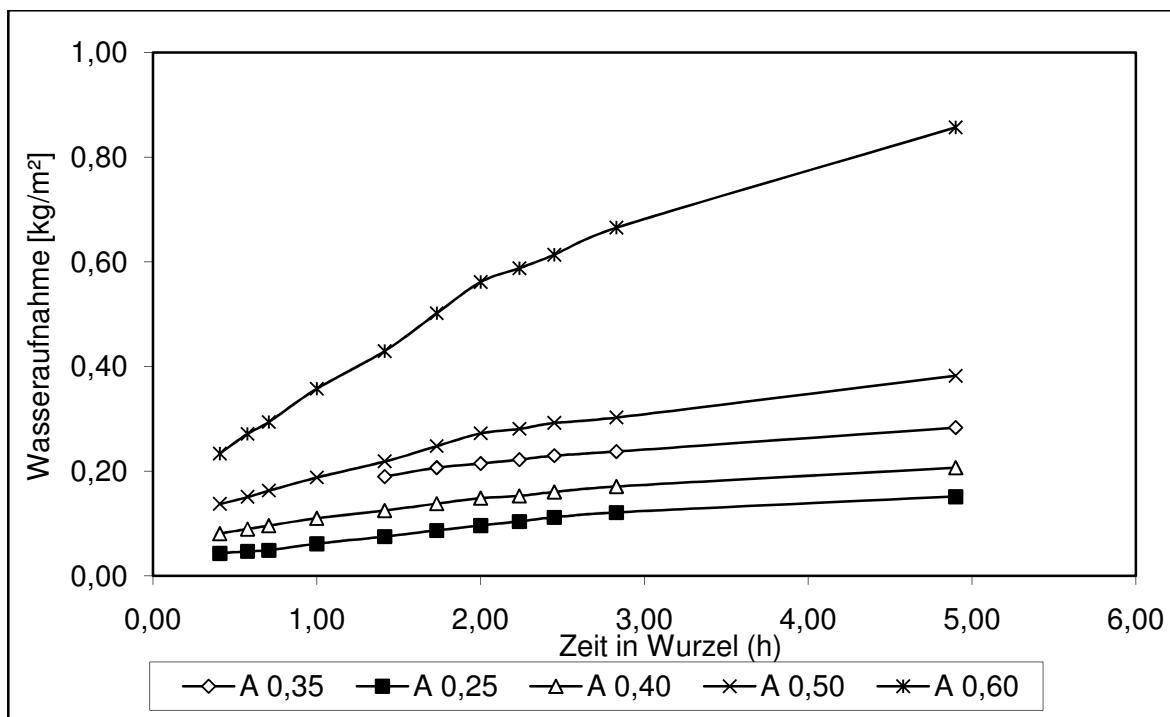


Abbildung-A 6: Wasseraufnahme der Betone Gruppe A.

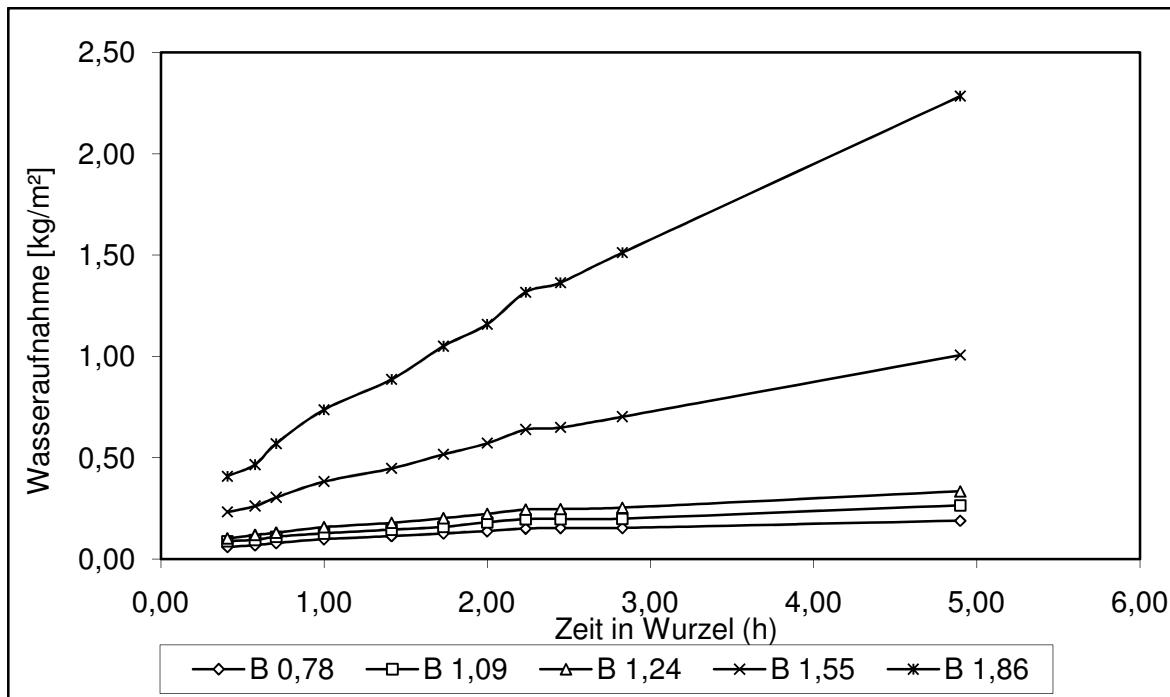


Abbildung-A 7: Wasseraufnahme der Betone Gruppe B.