

Heft 15
No. 15

U N I K A S S E L
V E R S I T 'A' T

Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau
Structural Materials and Engineering Series

**Einfluss der Verdichtung
von Kalk-Sand-Rohmassen
auf die Scherbenrohdichte
von Kalksandsteinen**

**Influence of the compaction
of calcium silicate raw materials
on the structural density of
calcium silicate masonry units**

Wolfgang Eden

Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau
Structural Materials and Engineering Series

Heft 15
No. 15

Einfluss der Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmassen auf die Scherbenrohdichte von Kalksandsteinen

Influence of the compaction of calcium silicate raw materials
on the structural density of calcium silicate masonry units

Wolfgang Eden

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. rer. nat. Bernhard Middendorf

Tag der mündlichen Prüfung: 24.06.2010

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. 2010

ISBN print: 978-3-86219-040-9

ISBN online: 978-3-86219-041-6

URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-30414>

© 2011, 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

Printed in Germany

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG	7
2 STAND DES WISSENS	10
2.1 Zusammensetzung und Herstellung von Kalksandsteinen	10
2.1.1 Allgemeines	10
2.1.2 Bindemittel Kalk	10
2.1.3 Gesteinskörnungen	11
2.1.3.1 Chemisch-mineralogische Eigenschaften von Gesteinskörnungen	11
2.1.3.2 Korngrößenverteilungen von groben Gesteinskörnungen	13
2.1.3.3 Kornform von Gesteinskörnungen	15
2.1.4 Dosierung der Rohstoffe	22
2.1.5 Mischvorgang	22
2.1.6 Ablöschen der Kalk-Sand-Rohmischung	22
2.1.7 Aspekte der Verdichtung der Kalk-Sand-Rohmischung	22
2.1.8 Hydrothermalhärtung	26
2.2 Packungsdichte	28
2.2.1 Allgemeines	28
2.2.2 Packungsdichteoptimierung in der Kalksandsteintechnologie	29
2.2.3 Koordinationszahl	32
2.2.4 Wand- und Auflockerungseffekt	33
2.2.5 Berechnung der Packungsdichte von groben Partikelgemischen	34
2.2.5.1 Modellierung von Einkornpackungen	35
2.2.5.2 Modellierung von Binärpackungen	36
2.2.6 Kornform und Packungsdichte	47
2.2.6.1 Kornform von groben Gesteinskörnungen	47
2.2.6.2 Kornform von Feinstoffen	49
2.2.7 Auswahl des Berechnungsmodells	50
2.2.8 Beschreibung des Berechnungsverfahrens	50
2.2.9 Übertragbarkeit auf die Kalksandstein-Technologie	51
2.3 Interpartikuläre Kräfte	52
2.3.1 DLVO-Theorie	52
2.3.2 Wirkung von Fließmitteln	57
2.3.3 Rheologie von Kalk-Sand-Rohmassen	58
2.4 Zusammenfassung zum Stand des Wissens	63

3 UNTERSUCHUNGSMETHODEN	66
3.1 Untersuchung der Rohstoffe	66
3.1.1 Gesteinskörnungen	66
3.1.1.1 Korngrößenverteilung mittels Siebung	66
3.1.1.2 Korngrößenverteilung mittels Lasergranulometer	66
3.1.1.3 Spezifische Oberfläche nach FISCHER	66
3.1.1.4 Gehalt an abschlämmbaren Bestandteilen und organischen Störstoffen	66
3.1.1.5 Bestimmung der Kornform mittels Computer Particle Analyzer	67
3.1.1.6 Röntgenpulverdiffraktometrie	67
3.1.1.7 Chemische Zusammensetzung mittels Röntgenfluoreszenzanalyse	67
3.1.2 Kalke	67
3.1.2.1 Chemische Zusammensetzung mittels Röntgenfluoreszenzanalyse	67
3.1.2.2 Bestimmung der Reaktivität mittels Nasslöschkurvenverfahren	67
3.1.2.3 Bestimmung der Korngrößenverteilung	68
3.1.3 Wasser - chemische Zusammensetzung	68
3.2 Untersuchungen zum Verdichtungsvorgang	68
3.2.1 Bestimmung der Temperatur der Kalk-Sand-Rohmischung	68
3.2.2 Messung des hydraulischen Verdichtungsdrucks und der Verdichtungszeit	68
3.2.3 Rüttelversuche zur Verdichtungsverhalten der Kalk-Sand-Rohmischungen	68
3.2.4 Versuche zur Rüttelverdichtung mittels Kasseler Rüttelproctorversuch	69
3.3 Untersuchungen an Kalksandsteinen	70
3.3.1 Festigkeitseigenschaften	70
3.3.1.1 Rohlingsstandfestigkeit	70
3.3.1.2 Steindruckfestigkeit	70
3.3.2 Gefügeeigenschaften	71
3.3.2.1 Steinrohdichte/Scherbenrohdichte	71
3.3.2.2 Frostwiderstand	71
3.3.2.3 Wasseraufnahme	71
3.3.2.4 Porosität mittels Quecksilberhochdruckporosimetrie	71
3.3.2.5 Gefügeuntersuchung mittels Lichtmikroskopie	72
3.3.2.6 Gefügeuntersuchung mittels Rasterelektronenmikroskopie	72
3.3.2.7 Masseverteilung mittels Computertomographie	72
3.3.3 Mineralogische Eigenschaften	73
3.3.3.1 Freikalkgehalt mittels Differenzial-Thermo-Analyse	73
3.3.3.2 Röntgenpulverdiffraktometrie	73

4 CHARAKTERISIERUNG DER AUSGANGSSTOFFE	74
4.1 Allgemeines	74
4.2 Gesteinskörnungen	74
4.2.1 Quarzsande	74
4.2.2 Grauwacken	75
4.2.3 Basalt	75
4.2.4 Recyclingsplitt	76
4.2.5 Kalksteinmehle	76
4.3 Kalke	76
4.4 Wasser	76
4.5 Fließmittel	76
5 EXPERIMENTELLER TEIL	77
5.1 Allgemeines	77
5.2 Kalkdosis	77
5.3 Pressfeuchte	77
5.4 Pressdruck	77
5.5 Pressgeschwindigkeit / -dauer	77
5.6 Maschinentechnische Parameter	78
5.7 Härteparameter	78
5.8 Fließmitteldosis	78
6 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	79
6.1 Optimierung der Verdichtungswilligkeit der Kalk-Sand-Rohmischungen	79
6.1.1 Allgemeines	79
6.1.2 Einfluss der CaO-Dosis - Rüttelversuche ohne Auflast	80
6.1.3 Einfluss der Pressfeuchte - Rüttelversuche ohne Auflast	81
6.1.4 Einfluss der Zugabe von Fließmitteln - Rüttelversuche ohne Auflast	81
6.1.5 Kasseler Rüttelproctorversuche	84
6.2 Untersuchungsergebnisse zur Erhöhung der Scherbenrohdichte	84
6.2.1 Allgemeines	84
6.2.2 Rohlingsstandfestigkeit	84
6.2.3 Steindruckfestigkeit	85
6.2.4 Scherbenrohdichte	95
6.2.5 Wasseraufnahme	105
6.2.6 Porosität mittels Quecksilberdruckporosimetrie	106
6.2.7 Gefügeuntersuchung mittels Lichtmikroskopie	108
6.2.8 Gefügeuntersuchung mittels Rasterelektronenmikroskopie	109
6.2.9 Computertomographie	109

6.3 Untersuchungsergebnisse zur Packungsdichteberechnung	110
6.3.1 Allgemeines	110
6.3.2 Rohlingsstandfestigkeit	111
6.3.3 Steindruckfestigkeit	111
6.3.4 Scherbenrohdichte und Packungsdichte	116
6.3.5 Wasseraufnahme	124
6.3.6 Frostwiderstand	124
6.3.7 Porosität mittels Quecksilberdruckporosimetrie	124
6.3.8 Gefügeuntersuchung mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie	125
6.3.9 Modell-Werksversuche	126
7 MODELLBILDUNG	128
7.1 Prognose der Scherbenrohdichte - Grundlagen für eine numerisches Modell	128
7.2 Einflussgrößen	131
7.3 Stoffraumrechnung für Kalk-Sand-Rohmassen	136
7.4 Vereinfachtes Praxismodell auf der Basis des Herstellparametersatzes	138
8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	147
8.1 Zusammenfassung	147
8.2 Ausblick	148
9 LITERATURVERZEICHNIS	149
10 ANHANG	158
11.1 Abkürzungsverzeichnis	158
11.2 Versuche zur Verdichtungswilligkeit der Kalk-Sand-Rohmassen	160
11.3 Ergebnisse zum Teil 1 der Untersuchungen	162
11.4 Ergebnisse zum Teil 2 der Untersuchungen	185

1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Kalksandsteine sind Mauersteine, die aus überwiegend kalkhaltigen und silikatischen Rohstoffen geformt und die in einer Atmosphäre von gespanntem Wasserdampf gehärtet werden. Hierbei bilden sich vorwiegend Calciumsilikathydrate (CSH-Phasen), die diesem Baustoff die erforderliche Festigkeit verleihen. Im Vergleich zu den an Luft sehr langsam ablaufenden Abbindereaktionen führt die Dampfhärtung zu einer enormen Beschleunigung der CSH-Phasen-Bildung [1]. Den Anstoß zur Entwicklung von Kalksandsteinen gaben ab Anfang des 19. Jahrhunderts Bestrebungen, den Kalk-Sand-Mörtel für die Herstellung von Bauelementen und ganzen Gebäuden zu nutzen. So ging die Entwicklung von RYDIN, über POCHOW zu BERHHARDI, der 1854 mit einer handbetriebenen hölzernen Hebelpresse die ersten luftgehärteten Kalkmörtel-Mauersteine fertigte [2]. Da die Erhärtung des Mörtels an der Luft für praktische Belange zu lange dauerte, wurde nach Möglichkeiten zur Beschleunigung der Erhärtung gesucht. Einen ersten grundlegenden Weg wies ZERNIKOW [3], der durch Kochen des Mörtels in hochgespanntem Wasserdampf die Bildung von Calciumsilikathraten im Mörtel anstrehte. Die Weiterentwicklung erfolgte durch MICHAELIS, der 1880 feststellte, dass sich erdfeuchter Kalk-Sand-Mörtel in einer hochgespannten Wasserdampfatmosphäre vergleichsweise schnell zu einer wasserfesten, steinarten Masse verfestigt [4].

Durch die Weiterentwicklung mechanischer Pressen und der Autoklaven konnte in den letzten Jahren des 19. Jahrhunderts die Grundlage für die industrielle Erzeugung der Kalksandsteinproduktion entstehen. Der Beginn der industriellen Kalksandsteinfertigung wird mit 1894 angegeben. Begünstigt durch den wirtschaftlichen Aufschwung Nordeuropas mit seiner starken Bautätigkeit entwickelte sich die Kalksandsteinindustrie um 1900 in schnellem Tempo zu einem eigenen Industriezweig. Bereits im Jahre 1900 produzierten in Deutschland 80 Kalksandsteinwerke mit einer Jahresleistung von rund 300 Millionen Kalksandsteinen und im Jahre 1905 waren es bereits 209 Werke mit einer Produktionsleistung von 1 Mrd. Steine [1]. Im Jahre 1903 machte der Verein der Kalksandsteinfabriken seinen Mitgliedsunternehmen als Qualitätsanforderung an die Festigkeit eine Mindestdruckfestigkeit von $\beta_D = 14 \text{ N/mm}^2$ zur Auflage. 1927 erschien die erste Kalksandsteinnorm [N1, N2]. Mit Ausnahme der kriegsbedingten Unterbrechungen stieg der Absatz der Kalksandsteinindustrie bis 1972 und auch 1994 auf seine Höchstmarken von rd. 6 Mrd. Kalksandsteine.

Parallel zu dieser Entwicklungen beschäftigte sich die deutsche Kalksandsteinforschung ab Anfang der 60er Jahre bis etwa Mitte der 80er Jahre vorrangig mit dem Ziel, die qualitätskennzeichnenden Eigenschaften von Kalksandsteinprodukten durch die Erforschung der Beschaffenheit und die gezielte Beeinflussung der Bindemittelphasen, den Calciumsilikathydraten, schrittweise zu verbessern [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Eine herausragende Erkenntnis aus dieser Zeit ist die Tatsache, dass eine ausreichend genaue Charakterisierung der Calciumsilikathydrate im Hinblick auf ihre Wirkung bezüglich der technischen Kennwerte von Kalksandsteinen nur durch eine Kombination verschiedener chemischer und mineralogischer Bestimmungsmethoden (Röntgenfluoreszenzanalyse, Röntgenbeugungsanalyse, Thermoanalyse und Lichtmikroskopie) erfolgen kann [12]. Insbesondere ist in den genannten Schriften [5 bis 12] erstmals beschrieben, unter welchen verfahrenstechnischen Bedingungen Kalksandsteine mit günstigen technischen Eigenschaften (hohe Festigkeit, geringe Verformung) erzeugt werden können. Die optimale Morphologie der die Gesteinskörner verklebenden CSH-Phasen ist das so genannte "Kartenhausgefüge", das insbesondere HOCHSTETTER und MÖRTEL [5, 6, 12] beschreiben.

Fragen nach technischen Möglichkeiten zur Erzeugung von Kalksandsteinen mit hohen Scherbenrohdichten unter möglichst optimaler Rohstoffausnutzung blieben seinerzeit jedoch noch unbeantwortet.

Anfang der 70er Jahre begann sowohl in den Niederlanden als auch in Deutschland eine technische Entwicklung in Richtung der Erzeugung mittel- und großformatiger Kalksandsteine. Unter Einsatz von groß dimensionierten Hydraulikpressen war es erstmals möglich, Mauersteinformate und Elemente mit Abmessungen von bis zu einem Meter Länge mit hoher Festigkeit und relativ hohen Rohdichten herzustellen. Resultierend aus den ansteigenden Anforderungen des baulichen Wärmeschutzes seit Beginn der Ölkrise und der parallelen Entwicklung von hochfestem schlanken Mauerwerk mit hohen Rohdichten im Bereich von 2,0 bis zu 2,4 kg/dm³ für einen hohen Schallschutz steigen die Qualitätsanforderungen an die Rohstoffe und die Verfahrenstechnik bis heute immer weiter an.

Die kostengünstige Produktion von Kalksandsteinen mit hohen Rohdichten ist daher für die Erstellung von Mauerwerk mit hoher Schalldämmung von großer Wichtigkeit. Technische Maßnahmen zur Erhöhung der Steinrohdichte führen darüber hinaus im Allgemeinen zu einer Erhöhung der Steindruckfestigkeit sowie zu Verbesserungen beim Frostwiderstand und bei der Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen und sind deshalb erstrebenswert. Grundsätzlich sind fünf verschiedene technische Maßnahmen zur Steigerung der Rohdichte von Kalksandsteinen zu unterscheiden:

- 1) Reduzierung des Hohlraumanteils (Wegnahme des Dornlochvolumens)
- 2) Zugabe von Gesteinskörnungen mit hoher Reindichte
- 3) Erhöhung der Packungsdichte durch eine Anhebung der Verdichtungskraft
- 4) Zugabe von verdichtungsfördernden Fließmitteln
- 5) Optimierung der Korngrößenverteilung der verwendeten Gesteinskörnungen (Feinpartikel und Grobzuschlag) im Hinblick auf eine maximale volumetrische Packungsdichte.

Systematische Untersuchungen zum Einfluss dieser fünf Maßnahmen auf die Steinrohdichte und zu deren Wechselwirkungen wurden bislang nicht durchgeführt. Alle fünf Möglichkeiten haben eine jeweils unterschiedlich große Wirkung auf die Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmas-sen. Es ist jedoch keine additive Steigerung der Steinrohdichte durch die verschiedenen Maßnahmen zu erwarten.

Mit den Maßnahmen 3) bis 5) wird die Packungsdichte des Kalksandsteingefüges volumetrisch erhöht und die Porosität entsprechend verringert. Während die Maßnahmen 1) bis 4) technisch vergleichsweise schnell durch einfache Kalkulationen oder praxisnahe Versuche zum Erfolg führen können, ist eine Berechnung der Packungsdichte deutlich schwieriger und war bis zur Einführung von Rechenalgorithmen im Bereich der Betontechnologie vor wenigen Jahren nicht ohne unverhältnismäßig hohem Arbeitsaufwand möglich. Maßnahmen zur Erhöhung der Scherbenrohdichte durch eine Optimierung der Korngrößenverteilung erfolgten bislang ausschließlich auf einer empirischen und schrittweise Vorgehensweise und führten zu sehr aufwändigen und nur schwer reproduzierbaren Untersuchungsreihen. Mit der Übertragung der in der Betontechnologie vorliegenden numerischen Verfahren zur Berechnung der Packungsdichte auf die Kalksandsteintechnologie liegt nun erstmals ein Werkzeug vor, mit dem der hohe Rechenaufwand entsprechender mathematischer Algorithmen unter Einsatz von Computern für beliebige Stoffkombinationen relativ schnell bearbeitet werden kann.

Diese Arbeit befasst sich vor dem geschilderten Hintergrund mit der Untersuchung der Einflussgrößen und der Modellierung der Packungsdichte von Kalk-Sand-Rohmassen und belegt die Durchführbarkeit der Übertragung der Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Packungsdichte aus der Beton- auf die Kalksandsteintechnologie.

2. STAND DES WISSENS

2.1 Zusammensetzung und Herstellung von Kalksandsteinen

2.1.1 Allgemeines

Kalksandsteine werden aus einer Rohstoffmischung von Kalk (ca. 5 bis 8 M.-%), Sand (ca. 87 bis 90 M.-%) und Wasser (ca. 5 M.-%) hergestellt. Der Herstellprozess der Kalksandsteinfertigung besteht aus mehreren aufeinander folgenden Einzelschritten, die eine jeweils unterschiedliche Bedeutung für den Verdichtungsvorgang haben. Bild 2.1 gibt einen Überblick über das Verfahrensschema. Die drei Rohstoffkomponenten werden homogen vermischt, mittels hydraulischer Pressen auf das gewünschte Sollmaß verdichtet und anschließend unter gespanntem Wasserdampfdruck bei einer Temperatur von $T \approx 200^{\circ}\text{C}$ für einen Zeitraum von $t = 6$ bis 12 h in Autoklaven gehärtet. Nach der Abkühlung sind die Kalksandsteine geräuchert fertig.

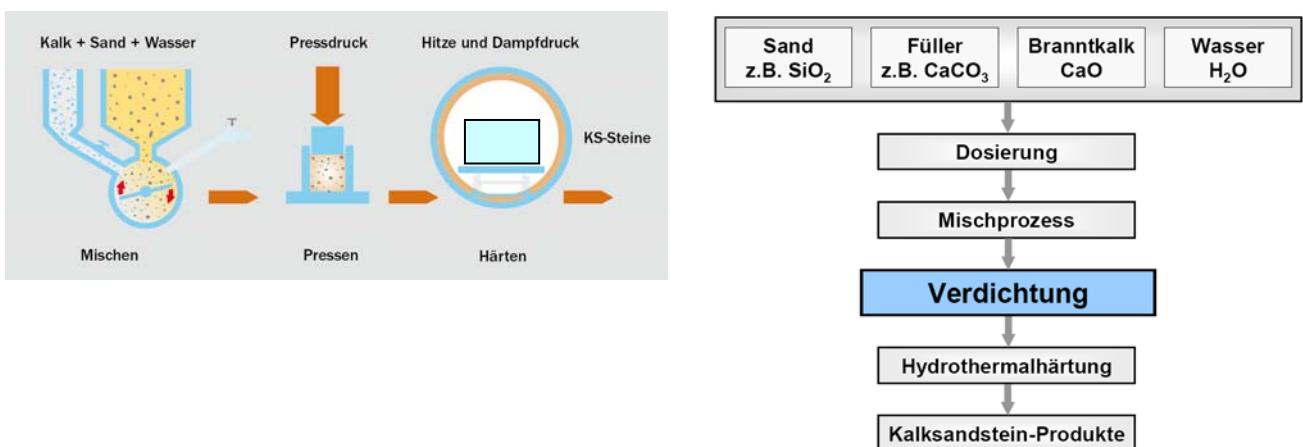


Bild 2.1: Verfahrensschema der Kalksandsteinproduktion [13]

Im Folgenden wird auf die Einzelkomponenten und deren Einfluss auf die Kalksandsteinprodukte eingegangen.

2.1.2 Bindemittel Kalk

Als Bindemittel für die Kalksandsteinproduktion werden Branntkalke benötigt, die im Allgemeinen CaO-Gehalte zwischen 81 M.-% und 95 M.-% aufweisen. Zur Herstellung der Kalksandrohmasse wird feingemahlener Branntkalk mit Sand und Wasser vermischt und in einen Reaktor gefördert. Im Reaktor findet dann unter Erwärmung die exotherme Ablöscreaktion des Branntkalkes statt. Dabei wird ein Teil des Wassers verbraucht. Die Löscreaktion des Branntkalkbestandteils CaO erfolgt nach Gleichung 1:



Die für die Kalksandsteinproduktion herausragende Eigenschaft des Branntkalkes ist die Reaktionsfähigkeit. Deren Einflussgrößen sind der Brenngrad, die mineralische Zusammensetzung, die Korngrößenverteilung, die Wassermenge, die Wasserqualität und die Temperatur. Nach ausreichender Verweildauer im Reaktor wird die aus Kalkhydrat und Sand und Wasser bestehende erdfeuchte Rohmasse den nachfolgenden Prozessschritte zugeleitet [1, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. Folgende Qualitätsmerkmale von Kalken sind für die Kalksandsteinproduktion relevant [20]: CaO- und MgO-Gehalt, Reaktionsfähigkeit, Raumbeständigkeit und die Korngrößenverteilung. Um eine ausreichende Feinkörnigkeit und ein gutes Fließ- und Förderverhalten und, um ein gleichmäßiges Einmischen des Kalkes in den Sand zu ermöglichen, gilt folgende technische Anforderung:

- Anteil auf dem Sieb 0,09 mm \leq 7 M.-%
- Anteil auf dem Sieb 0,20 mm \leq 2 M.-%

WITTNEBEN hat die Korngrößenverteilung von suspendierten Kalkhydraten und nassgelöschten Feinkalken untersucht. Die Reaktionsdauer wird mit Werten von $t_u = \text{rd. } 3$ und 24 min angegeben. Das Bild 2.2 zeigt die mittleren Korngrößenverteilungen und die zugehörigen Streubereiche von insgesamt 24 verschiedenen untersuchten handelsüblichen Kalken [21].

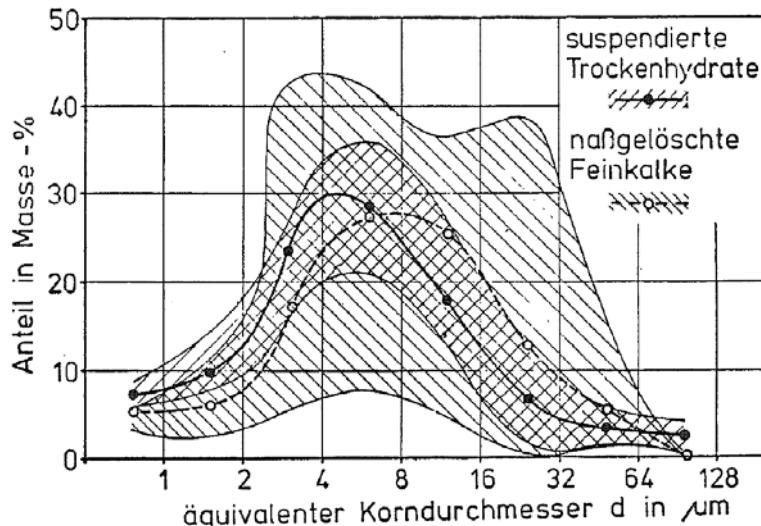


Bild 2.2: Mittlere Korngrößenverteilung und zugehörige Streubereiche verschiedener suspendierter Trockenhydrate und nassgelöschter Branntkalke [21]

Die Darstellung zeigt, dass die Verteilungsfunktionen der nassgelöschten Kalke mit einer durchschnittlichen Korngröße um ca. 8 µm gegenüber denen der suspendierten Trockenhydrate mit einer mittleren Korngröße von ca. 5 µm zu etwas größeren Korndurchmessern hin verschoben sind. Die Kornform ist bei Branntkalken, je nach Festlegung der Brennbedingungen unterschiedlich [18, 19]. GEISENHANSLUKE berichtet in [22] von detailgetreuen Kornformmessungen an Zementpartikeln mit Hilfe von hochauflösenden Computertomographen bis in den Bereich von 3 µm. In [23] wird von ersten Ansätzen zur Klärung der Kornform von Zementen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften berichtet. Für Branntkalke, die zur Herstellung von Kalksandsteinen verwendet werden, sind keine derartigen Untersuchungen bekannt.

2.1.3 Gesteinskörnungen

2.1.3.1 Chemisch-mineralogische Eigenschaften von Gesteinskörnungen

Als Gesteinskörnungen kommen für die Kalksandsteinherstellung vorwiegend silikatische Minerale und Gesteine in Frage. Die Zahl der möglichen Gesteinsarten ist sehr groß. Praktisch können alle in der Natur vorkommenden Gesteine Verwendung finden, sofern sie technisch geeignet und hinsichtlich ihres Umweltverhaltens unbedenklich sind [17]. Unter ihnen muss man in Abhängigkeit vom Mineralbestand zwischen reaktiven (z. B. Quarz) und inerten Arten (z.B. Kalkstein) unterscheiden, je nachdem, ob sie an der Hydrothermalsynthese der Bildung der Calciumsilikathydratphasen beim Autoklavierungsprozess teilnehmen oder nicht.

Den reaktiven Gesteinsarten kommt dabei die größere Bedeutung zu. Als reaktiv werden die Gesteinskörnungen bezeichnet, die aufgrund ihrer chemischen und mineralischen Zusammensetzung fähig sind, bei der Hydrothermalsynthese mit dem Kalk und des Wasser zu reagieren. In erster Linie sind das die verschiedenen Formen des SiO_2 und die Silikate [1, 24].

In Abhängigkeit von ihrer Korngrößenverteilung und Kornform, ihrer mineralischen Zusammensetzung, ihrem Grad der Beteiligung am Reaktionsgeschehen, haben die Gesteinskörnungen verschiedene Funktionen. Sie bilden das Stützskelett, das von den bei der Hydrothermalbehandlung gebildeten Calciumsilikathydraten zusammengehalten wird. Außerdem stellen sie einen Teil der Substanz für die Synthese der Calciumsilikhydrate dar oder dienen ferner als Füllstoff. Die Gesteinskörnungen bilden mit einem Anteil von über 87 bis 89 M.-% (\approx 91 bis 93 Vol.-%) die mengenmäßig größte Komponente in der Rezeptur. An Quarzsande, die bei der Herstellung von Kalksandsteinen Verwendung finden, werden eine Reihe von Anforderungen hinsichtlich ihrer chemischen und mineralogischen Zusammensetzung gestellt. Nach GUNDLACH [1] kann man die chemische Zusammensetzung der Sande im Hinblick auf ihre Eignung für die KS-Produktion nach dem SiO_2 -Gehalt (Quarz) wie folgt beurteilen (Tabelle 2.1):

SiO_2-Gehalt	Bewertung nach GUNDLACH
> 95 M.-%	sehr gut
70-95 M.-%	gut
30-70 M.-%	noch brauchbar
< 30 M.-%	unbrauchbar

Tabelle 2.1: Bewertung von SiO_2 -haltigen reaktiven Gesteinszuschlägen nach GUNDLACH [1]

Diese vor vielen Jahren angegebene Klassifizierung der Sande ist zwar heute noch ein grober Anhaltspunkt, sie kann jedoch bei der Beurteilung von Sanden für die zu erwartenden Qualitäten der Kalksandsteinprodukte nicht mehr ausschließlich herangezogen werden. Reine, nur aus Quarzkörnern bestehende Sande sind in den bekannten Sandlagerstätten nur noch relativ selten zu finden. Je nach der geologischen Situation sind Sande mit anderen Mineralien befrachtet. Die häufigsten Begleitminerale sind neben dem erwünschten Quarz, Feldspäte, Schichtsilicate (z. B. Tonminerale: Kaolin, Montmorillonit), Calcit, Aragonit, Eisen- und Manganoxide und -hydroxide, Gaukonit und Pyrit. Beim Härtprozess reagieren nicht nur die Quarzkörner, sondern auch die Begleitminerale des Sandes mit dem eingesetzten Kalk [17].

Wegen ihrer Feinheit sind diese Stoffe im Allgemeinen am Reaktionsprozess im Härtkesel stark beteiligt und können unter Umständen das Verhalten der Rohlinge oder später die Kalksandsteinprodukte beeinflussen [24 bis 32]. Inerte Gesteinskörnungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie unter Hydrothermalbedingungen nicht mit den anderen Rezepturbestandteilen reagieren. Ihr Einfluss auf die Steineigenschaften beruht, ebenso wie es bei den aktiven Gesteinskörnungen ist, auf einer Veränderung der Korngrößenverteilung. Bei günstiger Zusammensetzung kann es zu einer Steigerung der Packungsdichte kommen. Umgekehrt ist ebenfalls eine Verschlechterung der Korngrößenverteilung denkbar, wenn beispielsweise durch eine Überdosierung einkörniger Gesteinskörnungen Auseinanderrängungseffekte auftreten.

2.1.3.2 Korngrößenverteilung von Gesteinskörnungen

Die wichtigsten Eigenschaften von Gesteinskörnungen im Hinblick auf die Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmassen sind ihre Korngrößenverteilung und ihre Kornform. Beide Eigenschaften haben einen direkten Einfluss auf die Packungsdichte und damit auf die Scherbenrohdichte. Grundsätzlich gilt, dass mit einem sog. breiter werdendem Kornband und der daraus resultierenden größeren Raumauffüllung höhere Packungsdichten und damit auch höhere Scherbenrohdichten erreicht werden als mit einkörnigen Gesteinskörnungen [17]. Dabei kann die Matrix mit allen Bestandteilen unter $d = 0,112 \text{ mm}$ aus Kalk, Feinkorn (Quarzsand, Füller) und Wasser als viskose Flüssigkeit betrachtet werden, die das gröbere Tragkorngerüst mit $d > 0,112 \text{ mm}$ ausfüllt, siehe Bild 2.3.

Die Menge und das rheologische Verhalten des Feinanteils bestimmen die Verdichtung und die Porosität des Gesamtsystems und damit die Scherbenrohdichte sowie auch maßgeblich die Steindruckfestigkeit. Außerdem bestimmen die Korngrößenverteilung und die Kornform gemeinsam die effektive Oberfläche, die für den Wasseranspruch entscheidend ist.

Im Vergleich zu gröberen Körnungen weisen feinere Körnungen einen höheren Hohlraumgehalt auf, weil feinere Körnungen bei gleichem Volumen aufgrund ihrer zufällig verteilten Kornform und Anordnung niemals völlig hohlraumfrei aneinander liegen können. Für die Praxis der Kalksandsteinproduktion sind die in der Tabelle 2.2 aufgeführten Korngrößenbereiche relevant:

Bezeichnung	Fraktion [mm]	Beispiele
Schluff	$\geq 0,002 \text{ bis } < 0,063$	Kalksteinmehl, Quarzmehl
Feinsand	$\geq 0,063 \text{ bis } < 0,2$	Quarzsande
Mittelsand	$\geq 0,2 \text{ bis } < 0,63$	Quarzsande
Grobsand	$\geq 0,63 \text{ bis } < 2$	Quarzsande
Feinkies	$\geq 2 \text{ bis } < 6,3$	Quarz, Basalt, Diabas, Grauwacke, Kalkstein

Tabelle 2.2: Kornspektrum bei der Kalksandsteinproduktion:

Die Korngrößenverteilung von groben Gesteinskörnungen ("Sieblinie") gibt auf der Basis einer Trocken- oder Nasssiebung mit anschließender Wägung die massebezogene Zusammensetzung der Gesteinskörnung an und wird in der Regel in Diagrammform angegeben. Übliche Darstellungsformen in der Kalksandsteinindustrie sind Diagramme mit unterschiedlicher Skalierung nach DIN 66145 [N3] (Bild 2.3). Diese in der betrieblichen Produktionspraxis verwendeten Diagramme enthalten jeweils eine auf empirischer Basis beruhenden sogenannte "linke und rechte Einhüllende" als äußere Begrenzungslinien.

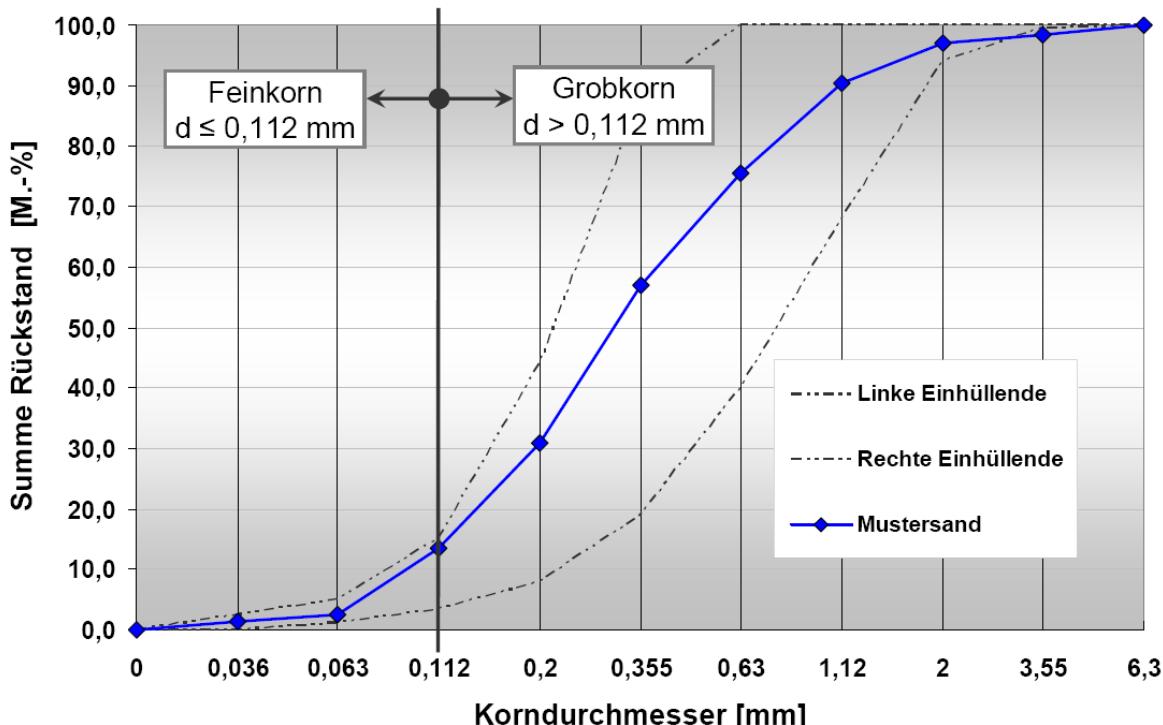


Bild 2.3: Korngrößenverteilungslinie für die Kalksandsteinherstellung mit Streubereich sog. linke und rechte Einhüllende (Beispiel)

Der zwischen diesen beiden Einhüllenden befindliche Bereich wird als sogenannter "günstiger Bereich für Kalksandstein-Standardprodukte" (z.B. Kleinformat, wie DF, NF, 2DF und 3DF) betrachtet. Diese Festlegung für die Kalksandsteinindustrie stammt aus den 60er Jahren und basiert nicht auf einer wissenschaftlichen Ableitung, sondern spiegelt das empirische Wissen dieser Zeit wider. Diese Methode wird in der betrieblichen Produktionspraxis nach wie vor zur Orientierung herangezogen. Des Weiteren wird in der Kalksandsteinindustrie häufig die differenzielle Darstellung der Sieblinie als Kurve oder in Form eines Histogramms verwendet.

Des Weiteren gibt es noch das Dreiecksdiagramm, in dem die Korngrößenverteilung, aus drei vorgewählten Kornfraktionen bestehend, vereinfachend als ein Punkt im Diagramm dargestellt wird. Das Dreiecksdiagramm bietet in der Praxis den Vorteil, dass Änderungen oder Schwankungen der Korngrößenverteilung von Gesteinszuschlägen auf einfache Weise praxisnah sichtbar gemacht werden können.

In der Zementtechnologie werden die Sieblinien mit Hilfe der Kenngrößen Lageparameter x' und Steigungsmaß n beschrieben. Für eine ausreichend genaue Packungsdichteoptimierung mittels Rechenalgorithmen reichen diese beiden Kenngrößen jedoch nicht aus, weil Abweichungen und Unstetigkeiten der Sieblinien große Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit und auf die Festbetoneigenschaften haben und durch diese beiden Kennwerte nicht berücksichtigt werden. Um diese Gegebenheiten ausreichend berücksichtigen zu können, sollte der Kurvenverlauf idealerweise als Funktion vorliegen [22].

2.1.3.3 Kornform von groben Gesteinskörnungen

Die Kornform ist ein direktes Spiegelbild der Beanspruchung der Mineralkörner während ihres geologischen Transportes [1]. In der Vergangenheit wurde in der Kalksandsteinindustrie die Kornform der Gesteinszuschläge entweder gar nicht berücksichtigt oder lediglich nach der in Bild 2.4 dargestellten visuellen Kornformbewertung nach PETTIJOHAN/GUNDLACH durchgeführt [1]. Ebenso wie bei der Korngrößenverteilung stammen diese Bewertungen aus den 1960er Jahren und basieren nicht auf einer exakten wissenschaftlichen Ableitung, sondern spiegeln das empirische Wissen dieser Zeit wider. Exakte morphometrische Messmethoden wurden bislang nicht durchgeführt.

Über die Rundung und die Form von Mineralkörnern liegen zahlreiche aussagekräftige, teils ältere Untersuchungen vor [33]. Hervorzuheben sind laut KöSTER die Arbeiten von TICKEL (1931) [34], SHULITS (1936), [35], ALLING (1950) [36], BERTHOIS (1952) [37, 38], POWERS (1953) [39], TANNER (1956) [40]. Über die Form von Quarzkörnern in Sedimenten verfassten CURRAY und GRIFFITHS (1955) [41] grundlegende Erkenntnisse auf der Grundlage visueller Methoden. Eine Methode zur Untersuchung der Form von Sandkörnern mit Hilfe eines photographischen Vergrößerungsgerätes behandelte MORAWSKI (1956) [42]. HUITT (1954) beschrieb eine dreidimensionale Mineralkornvermessung [43]. Über die Rundung von Sandkörnern schrieben MACKIE bereits (1893/98) [44], ZIEGLER (1911) [45], GALLOWAY (1919) [46], KINDLE (1919) [47], ANDERSON (1926) [48], TWENHOFEL (1945) [49] und ROBSON (1958) [50]. HOFMANN (1956) begründete ein experimentelles Verfahren zur Bestimmung der Kornform von Sanden [51]. Hervorzuheben ist die sehr anschauliche Vergleichstafel zur visuellen Bestimmung des Rundungsgrades von SCHOTTER nach REICHELT (1961), bei der vier verschiedene Kornformtypen mit unterschiedlichem Habitus zusammen mit dem jeweiligen Längs-, Grund- und Queraufriß verknüpft sind [52].

In der Kalksandsteinindustrie hat sich für die Kornformbewertung das nachfolgende Diagramm von PETTIJÖHEN/GUNDLACH bewährt, siehe Bild 2.4.

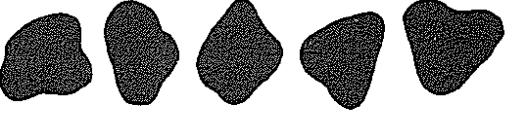
Korn-form	DIE KORNFORM DER MINERALE UND IHRE BEDEUTUNG FÜR DIE KALKSANDSTEINHERSTELLUNG Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.	Polyedr. Ausbild. (Eignung)
1 scharf-kantig		sehr gut (geeignet) +++
2 kantig (eckig)		gut (geeignet) ++
3 mäßig gerundet		befriedigend (geeignet) +
4 gerundet		ausreichend (nur bedingt geeignet) +-
5 stark gerundet		ungenügend (nur bedingt geeignet) +--
Beschreibung der Umrißlinien		
1	Scharfe Ecken, scharf profilierte Großbuchten mit zahlreichen ebenso scharfen Kleinbuchten, hervorragenden Spitzen	+++
2	Beginnende Rundung der Ecken, Großbuchten im wesentlichen erhalten, Kleinbuchten weicher profiliert und weniger zahlreich.	++
3	Ecken stärker gerundet, Großbuchten weich profiliert, Kleinbuchten gering an Zahl und sonst gerundet. Hervorragende Spitzen nicht mehr vorhanden.	+
4	Die ursprünglichen Ecken sanft gerundet, Großbuchten nur noch andeutungsweise, Kleinbuchten nicht mehr vorhanden.	+-
5	Ursprüngliche Ecken und Großbuchten nicht mehr erkennbar, einheitlich nach außen gekrümmte Umrißlinien (untergeordnet ebene Anteile möglich)	+--

Bild 2.4: Kornformbewertung von Sanden nach PETTIJÖHEN / GUNDLACH [1]

Die Kornform kann nicht vereinfachend mit einem einzigen Zahlenwert beschrieben werden. Verbale Beschreibungen (wie z. B.: "rundlich", "plattig", "kantig", "rau", "glatt", "gedrungen") liefern ebenfalls keine eindeutigen Aussagen. Die Realform von Mineralkörnern weicht in fast allen Fällen von geometrischen Idealkörpern (wie z. B. Kugel, Würfel, Zylinder) ab [53]. Nach PROSKE ist grundsätzlich zwischen der Grundform und der Oberflächenbeschaffenheit von Mineralkörnern zu unterscheiden. Dabei wird jede beliebige Kornform zur Charakterisierung in zwei Anteile zerlegt, einen Grundkörper mit einem bestimmten Verhältnis von Kornlänge, zu Kornbreite und Korndicke sowie eine aufmodellierte Rauigkeit. Die Rauigkeit ist im Sinne von Textur und damit als Abweichung des Oberflächenverlaufs von der Oberfläche des Grundkörpers zu verstehen. Diese beiden Begriffe werden im Folgenden näher erläutert.

Grundform von Mineralkörnern

Die Länge, Breite und Dicke eines Kornes ergeben sich durch die Abmessungen eines umhüllenden Prismas mit dem kleinsten Volumen. Die Länge ist die größte dieser Abmessungen, die Breite die zweitgrößte, und die Dicke die kleinste. Wird festgelegt, dass Länge, Breite und Dicke jeweils parallel zu den Achsen eines rechtwinkligen Koordinatensystems verlaufen, so ist das umhüllende Prisma ein Quader. Aus den Verhältnissen von Länge l Breite b und Dicke d lassen sich vier Grundformen der Körner bestimmen (Tabelle 2.3). Als geometrische Grundform der Körner kann ein Ellipsoid angenommen werden, aus dem sich durch Aufmodellieren der Oberflächenrauhigkeit die wirkliche Kornform ergibt. Für den idealen Grenzfall mit den Abmessungsverhältnissen $l = b = d$ und bei gleichzeitig glatter Oberfläche ist das Korn eine Kugel [53]. Natürlich geformte Kiese und Sande, die für die Kalksandsteinherstellung verwendet werden, können mit dieser Annäherung recht realistisch beschrieben werden. Gebrochenes Gesteinsmaterial weist dagegen scharfe Kanten und Ecken auf. Die Abweichungen der realen Kornform vom Ellipsoid werden als Rauigkeit der Kornoberfläche beschrieben.

Verhältnis der Abmessungen	Grundform
$l \approx b \approx d$	kubisch gedrungene Form
$l > b \approx d$	stengelige (spießige) Form
$l \approx b > d$	plattige Form
$l > b > d$	flach-stengelige Form

Tabelle 2.3: Grundformen von Körnern [53]

Oberflächenrauhigkeit (-textur) von groben Mineralkörnern

Die exakte Bestimmung der Rauigkeit (d.h. Oberflächentextur) von groben Mineralkornoberflächen ist deutlich aufwändiger als die Beschreibung der Grundform. Nach DIN 4760 [N4] werden sechs Ordnungen der Gestaltabweichung unterschieden, siehe Bild 2.5. Die DIN EN 933-3 und 933-4 [N5, N6] beschreiben für die Betontechnologie zwei klassische Prüfverfahren für die Ermittlung der geometrischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Die Bewertung der Kornform erfolgt durch zwei Kennzahlen: die Kornform- und die Plattigkeitskennzahl [54].

Kornformkennzahl SI (Shape-Index) nach DIN EN 933-4

Durch das Ausmessen von Gesteinskörnern mit einem Kornform-Messschieber und den Vergleich mit Standardformen wird der Anteil nicht kubisch (ungünstig) geformter Körner (Verhältnis Dicke zu Dicke größer als 3:1) in M.-% berechnet und als Kornformkennzahl SI (Shape-Index) angegeben. Dieses Verfahren ist jedoch aufgrund des großen handwerklichen Aufwands für den Feinkornanteil der für die Kalksandsteinherstellung verwendeten Gesteinskörnungen nicht anwendbar, siehe Bild 2.5.



Bild 2.5: Ermittlung der Kornformkennzahl SI mit dem Kornform-Messschieber
(links: Messung der Kornlänge, rechts: Messung der Korndicke)

Plattigkeitskennzahl nach DIN EN 933-3

Durch Absieben von Gesteinskörnungen verschiedener Kornklassen mit Hilfe eines Stabsiebes wird die Plattigkeitskennzahl als die Masse des Durchgangs durch das entsprechende Sieb in M.-% berechnet. Dieses Verfahren ist für die bei der Kalksandsteinherstellung verwendeten Gesteinskörnungen grundsätzlich anwendbar, siehe Bild 2.6.

GESTALTABWEICHUNG (ALS PROFILSCHNITT ÜBERHÖHT DARGESTELLT)		BEISPIELE FÜR DIE ART DER ABWEICHUNG
1. ORDNUNG: FORMABWEICHUNGEN		UNEVENHEIT UNRUNDHEIT
2. ORDNUNG: WELLIGKEIT		WELLEN
3. ORDNUNG:		RILLEN
4. ORDNUNG:	RAMMEN	RIEFEN SCHUPPEN KUPPEN
5. ORDNUNG: NICHT MEHR IN EINFÄCHER WEISE BILDLICH DARSTELLBAR.		GEFÜGE-STRUKTUR
6. ORDNUNG: NICHT MEHR IN EINFÄCHER WEISE BILDLICH DARSTELLBAR		GITTERAUFBAU DES WERKSTOFFES
		ÜBERLAGE-RUNG DER GESTALTAB-WEICHUNGEN 1. BIS 4. ORDNUNG



Bild 2.6: links: Gestaltabweichungen 1.-6. Ordnung nach DIN 4760 [N4]
rechts: Stabsiebe mit unterschiedlicher Maschenweite [55]

Moderne digitale Messmethoden für grobe Mineralkörner

Durch die Entwicklung und Einführung fotooptischer Messverfahren, die eine parallele Partikelcharakterisierung nach Größe und Form ermöglichen, stehen moderne Methoden zur Bestimmung der Kornform und der Kornformverteilung von groben Mineralkörnungen zur Verfügung. So kann die Kornform jetzt mit Zahlenwerten beschrieben werden [56]. Mit Hilfe einer hochauflösenden digitalen Zeilenkamera, die Schattenprojektionen der Partikel kontinuierlich erfasst, können Kornformen digital gespeichert und ausgewertet werden [53, 57, 58]. Die zu untersuchende grobe Gesteinskörnung wird auf einer Schwingrinne vereinzelt und fällt dann an einer linienförmigen Lichtquelle vorbei, siehe Bild 2.7. Die maximale Auflösung liegt nach Herstellerangaben in der Größenordnung von ca. $a = 0,001$ mm. Das maximale Korn kann einen Durchmesser von bis zu 150 mm aufweisen. Für die Sande der Kalksandsteinproduktion ist eine Kornbandbreite von $d = 0$ bis 8 mm relevant. Dieser Bereich kann mit den heute am Markt erhältlichen Geräten erfasst werden.

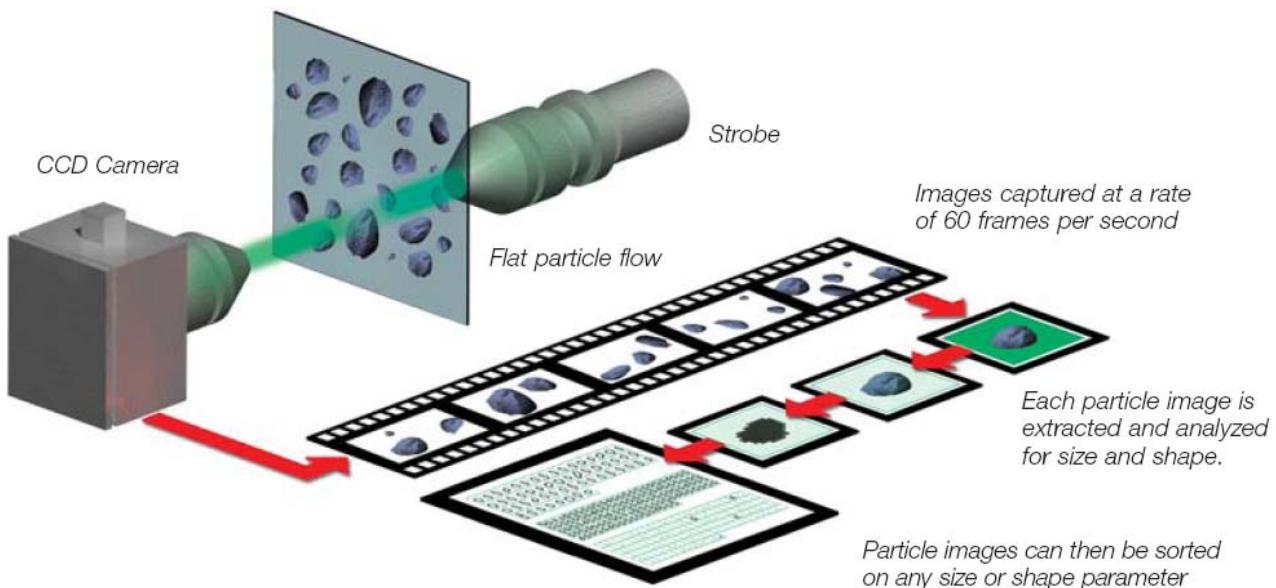


Bild 2.7: Funktionsprinzip der fotooptischen Partikelanalyse [59]

Sphärizität, Circularität und Längen-Breiten-Verhältnis

Im Unterschied zu den bisherigen üblichen genormten Methoden zur Kornformbestimmung [N5, N6] kann das gesamte Schüttgut analysiert und statistisch ausgewertet werden und nicht nur ausgewählte Korngruppen im groben Kornbereich. Weiterhin sind eine Einteilung in Kornformklassen und eine Auszählung der Teilchen in der jeweiligen Formklasse sowie eine Zuordnung der Kornformparameter zur Korngrößenklasse möglich. Zur Beschreibung der Kornform werden zwei **Quotienten** L/B und $SPHT = U/(2 \times \sqrt{\pi} \times A)$ verwendet. Letzterer wird als Sphärizität bezeichnet und ist das Verhältnis von gemessenem Umfang der Schattenprojektion des Teilchens und dem Umfang des flächengleichen Kreises. Der Kehrwert ist die sog. Cirkularität $C_r = 1/SPHT$. Die Zahlenwerte der Sphärizität betragen 1 für kreisförmige Schattenprojektionen und sind < 1 für beliebige Kornformen. Dabei gehen aber auch aufgrund der Definition sowohl der Habitus, d.h. die Länge und Breite des Teilchens, als auch die Oberflächenbeschaffenheit in diesen Parameter ein. Deshalb sind immer beide Parameter, SPHT und L/B , im Zusammenhang zu sehen. Die für die Kornformparameter erforderlichen geometrischen Abmessungen aus der Schattenprojektion zeigt das Bild 2.8 [56, 60].

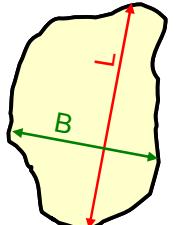
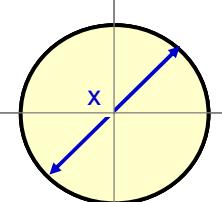
Projektionsfläche	Bildauswertung	Parameter
	→ Umfang der Projektionsfläche U → Flächeninhalt A → Größte Länge L → Größte Breite B	$SPHT = \frac{U}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot A}$
	→ Partikelgröße x = Durchmesser des flächengleichen Kreises	L / B
		(Gleichung 2.2)
		(Gleichung 2.3)

Bild 2.8: Definition der Kornformparameter für grobe Körner [56]

Bei der Auswertung der Schattenprojektionen besteht jedoch ein gewisser Informationsverlust durch die Reduzierung der 3-D-Realität auf ein reines 2-D-Problem. Verlässliche Ergebnisse lassen sich nur durch einen ausreichend großen Probenumfang sicherstellen [53].

Kornform und Kristallaufbau

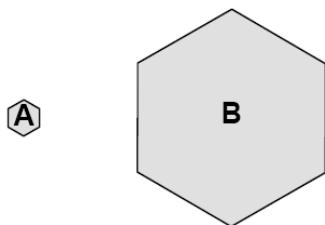
Von PROSKE et al wird darüber hinaus festgestellt, dass die Sphärizität maßgeblich durch die Struktur und das Bruchverhalten der Gesteinskörper beeinflusst wird. Gesteine sind aus Mineralen zusammengesetzt, die unterschiedliche chemisch-mineralische Eigenschaften haben. Der Verlauf der Bruchflächen wird somit durch den kristallinen Aufbau bestimmt. Verschiedene Minerale lassen sich nach einer oder auch mehreren Ebenen mehr oder weniger glatt spalten. Zumeist liegen diese Ebenen parallel zu den gewachsenen Kristallaußenflächen. Eine sehr gute Spaltbarkeit in einer Ebene besitzen beispielsweise Glimmer. Sie lassen sich parallel zu ihrem Schichtgitter in dünne Plättchen aufspalten. Flußspat spaltet nach dem Oktaeder, Kalkspat spaltet nach dem Rhomboeder. Quarz hat so gut wie keine Spaltbarkeit. Quarze spalten mit muscheligem Bruch. Die Spaltbarkeit von Kristallen wird unmittelbar durch die Geometrie ihrer Kristallgitter bestimmt, da sich bestimmte Netzebenen des Gitters leichter als andere voneinander trennen lassen [61, 62]. Während des mechanischen Zerkleinerungsprozesses von gebrochenen Gesteinskörnungen bricht das Gestein an seinen Schwachstellen an den Korngrenzen.

Einfluss der Korngröße auf die Sphärizität

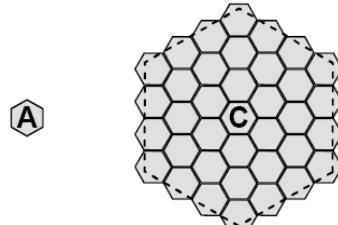
An dieser Stelle ist gemäß den Überlegungen aus [53] noch auf den Einfluss der Korngröße auf die Sphärizität und damit auf die Kornform hinzuweisen, siehe dazu das Denkmmodell in Bild 2.9. Das kleine Partikel A und das große Partikel B haben die gleiche Form und folglich den gleichen Wert der Sphärizität SHPT. Da in der Realität das große Partikel C jedoch aus den kleineren Bausteinen A aufgebaut ist, weist es trotz gleicher geometrischer Grundform eine größere Oberfläche auf als das theoretische Partikel B. Die Sphärizität von Partikel C ist also trotz gleicher Grundform größer als die Sphärizität von A. Bei den in [53] berücksichtigten Gesteinskörnern mit einer auf natürliche Weise geschliffenen Oberfläche (z. B. Rheinkies) war keine signifikante Zunahme der Sphärizität mit steigender Korngröße zu beobachten.

In diesem Fall wurde die Oberfläche der Gesteinskörner nicht in erster Linie durch den inneren Aufbau des Gesteins bestimmt, sondern durch den Abrieb, den die Körner durch den Transportprozess in Gewässern erfahren. Durch die glatte abgeschliffene Oberfläche ergibt sich somit ein nur geringer Einfluss der Korngröße auf die Sphärität.

Theorie:



Praxis:



$$SPHT(A) = SPHT(B)$$

$$SPHT(A) < SPHT(C)$$

Bild 2.9: Einfluss der Korngröße auf die Sphärität [53]

Da in dieser Arbeit die gleichen mineralischen Ausgangsmaterialien wie in [53] verwendet werden (Quarzsande und sedimentäre Gesteine) und da die Kornbandbreite der bei der Kalksandsteinherstellung verwendeten Gesteinskörnungen ($d = 0 \text{ mm}$ bis $6,3 \text{ mm}$) um eine Größenordnung kleiner ist als in der Betontechnologie ($d = 0 \text{ mm}$ bis 63 mm), kann der Einfluss der Korngröße auf die Sphärität hier vernachlässigt werden.

Bedeutung der Kornform für die Kalksandsteintechnologie

Neben der Korngrößenverteilung hat auch die Kornform der groben Gesteinskörnungen einen Einfluss auf die Packungsdichte und damit auf die Scherbenrohdichte von Kalksandsteinen. Zur Wirkung der Kornform auf die Herstellung und die Eigenschaftswerte von Kalksandsteinen liegen folgende Erfahrungen aus der betrieblichen Produktionspraxis und dem Laborbetrieb vor:

- Mit zunehmender Scharfkantigkeit der Körner ergibt sich eine größere Verzahnung im Kalksandsteingefüge. Daraus resultiert erfahrungsgemäß eine größere Rohlingsstandfestigkeit und eine größere Druck- und Zugfestigkeit des Kalksandsteinmaterials.
- Scharfkantige Gesteinskörnungen führen tendenziell zu höheren Packungsdichten.
- Die Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmischungen mit rundem Korn vergleichsweise einfacher durchzuführen.
- Scharfkörnige harte Zuschläge führen zu einem schnelleren Formwerkzeugverschleiß.
- In [17] ist dargelegt, dass die Kornform von betriebsüblichen Gesteinskörnungen im allgemeinen recht unterschiedlich ist. Abgesehen von Splitten mit einer homogenen, splittrigen Kornform, die durch eine mechanische Zerkleinerung gewonnen wurden, ist die Kornformverteilung von herkömmlichen Quarzsanden heterogen. In der betrieblichen Produktionspraxis kommen kaum Gesteinskörnungen vor, die ausschließlich eine einzige Kornform aufweisen.

2.1.4 Dosierung der Rohstoffe

Die Genauigkeit des Dosievorgangs hat bezüglich des Verdichtungsvorgangs und der Produktqualität eine große Bedeutung. Je genauer und je gleichmäßiger die Dosierung durchgeführt wird, desto gleichmäßiger wird die Qualität des Endproduktes und um so rationeller kann der kostenintensive Kalk eingesetzt werden. [1]. Bei der Erzeugung von Kalksandsteinen mit hohen Rohdichten spielt die Genauigkeit der Einhaltung von Rezepturen eine besonders wichtige Rolle, weil bereits relativ kleine Änderungen der mengenmäßigen Zusammensetzung der Rezeptur einen deutlichen Einfluss auf die Packungsdichte und somit auf die qualitätsrelevante Steineigenschaft Rohdichte haben.

2.1.5 Mischvorgang

Dem Mischvorgang kommt ebenfalls eine große Bedeutung zu. Eine der wichtigsten Voraussetzungen für ein homogenes Gefüge von Kalksandsteinen und für einen möglichst hohen Ausnutzungsgrad des eingesetzten Kalkes ist die gleichmäßige Verteilung der Komponenten in der Rohmischung [1]. Abweichungen von der gewünschten Zielkorngrößenverteilung müssen insbesondere bei Kalksandsteinen mit hohen Rohdichten gering gehalten werden. Bei der Kalksandsteinherstellung erfolgt die Homogenisierung der Rohstoffkomponenten in der Regel in zwei Stufen: in einer Vor- und einer Nachmischung. Die Aufbereitung von homogenen Mischungen zur Herstellung von Kalksandsteinen hat zwei Funktionen:

- Verteilungsvorgänge zur Vermischung der Rohstoffkomponenten zu einer homogenen Masse
- Zerteilungsvorgänge, um vorhandene oder sich beim Mischen bildende Agglomerate in Form von Tonknollen, Feinstandsknollen oder Kalkklumpen zu zerreiben und gleichmäßig in der Mischung zu verteilen

2.1.6 Ablöschen der Kalk-Sand-Rohmischung

Der Ablöschprozess beginnt bei Branntkalken unmittelbar nach Zutritt des Wassers, also bereits im Mischer. Bei der Calciumhydratbildung aus Branntkalk und Wasser tritt eine Volumenvergrößerung auf. Die heute für die Kalksandsteinherstellung eingesetzten Branntkalke benötigen für ihre vollständige Hydratation eine Löschezeit, die in der Regel über die Mischzeit hinausgeht. Damit von vornherein die Gefahr einer eventuellen Zerstörung der Rohlinge durch spät löscheinde Kalkpartikel ausgeschlossen werden kann, müssen die Kalk-Sand-Rohmischungen zwischengelagert werden. Dies erfolgt in Pufferbehältern, den sog. Reaktoren. Bei Einhaltung der Mindestlagerungsdauer der Kalk-Sand-Rohmischung in den Reaktoren (ca. 1 Stunde) hat der Löscheffekt für den Verdichtungsvorgang keine Bedeutung.

2.1.7 Aspekte der Verdichtung der Kalk-Sand-Rohmischung

Grundsätzlich werden drei mögliche Arten der mechanischen Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmischungen unterschieden. Alle drei Verdichtungsarten können miteinander kombiniert werden [63, 64, 65].

- Druckverdichtung:
Übertragung der Verdichtungsenergie über das Aufbringen einer Presskraft auf die Kalk-Sand-Rohmischung
- Rüttelverdichtung:
Übertragung der Verdichtungsenergie durch das Versetzen der Kalk-Sand-Rohmischung in eine harmonische Schwingung, Parameter: Amplitude und Frequenz
- Schlagverdichtung:
Übertragung der Verdichtungsenergie durch einen oder mehrere Impulse auf die Kalk-Sand-Rohmischung

Die Schlagverdichtung hat aufgrund der beobachteten erheblichen Kornzertrümmerungseffekte und der damit einhergehenden Erzeugung von Gefügestörungen im Rohling bzw. Kalksandstein heute jedoch keinerlei Bedeutung mehr. Heute werden in der Kalksandsteinindustrie Kalksandsteinrohlinge fast ausschließlich unter Anwendung der Druckverdichtung erzeugt. Die Verdichtung erfolgt in der Regel durch den Einsatz von Hydraulikpressen mit einer Maximalkraft von bis zu maximal $F = 12.000 \text{ kN}$. In wenigen Fällen, insbesondere bei der Herstellung von Kalksandsteinen mit hoch ausgelösten Lochbildern, werden zur Unterstützung der Druckverdichtung Rüttler mit einer Leistungsaufnahme in der Größenordnung von bis zu ca. $P = 15 \text{ kW}$ eingesetzt. Die Rüttelfrequenz liegen zwischen $\omega = 1$ und 100 Hz .

Pressdruck

Die Formgebung der Rohlinge in einer Presse erfolgt dadurch, dass eine festgelegte Menge an Kalk-Sand-Rohmischung in einem Formkasten durch zwei mit einer ausreichend hohen Kraft drückenden Stempel auf das gewünschte Maß verdichtet wird. Beim Verdichten der Kalk-Sand-Rohmassen wird die maximale Presskraft ($F_{\max} = 12.000 \text{ kN}$) innerhalb weniger Sekunden aufgebaut. Die Rohlinge werden in der Regel in Richtung der Steinhöhe verdichtet. Die auf die Rohmischung übertragenen Druckspannungen verteilen sich nicht gleichmäßig über die Presshöhe, sondern nehmen mit der Entfernung von den Druckstempeln ab. Bei kleinformatigen Kalksandsteinen und beim Pressen in Richtung der Steinbreite hat dies keinerlei Auswirkungen auf die Homogenität der Dichteverteilung. Um auch bei mittel- und großformatigen Kalksandsteinen einen Dichtegradienten in Richtung der Steinhöhe zu vermeiden, werden die Rohlinge doppelseitig, das heißt mit einem beweglichen Ober- und Unterstempel gleichzeitig verdichtet [1, 66].

Durch Steigerung des Höchstdruckes wird die Packungsdichte und damit die Scherbenrohdichte der Rohlinge erhöht. Da mit steigendem Pressdruck auch der Verschleiß der Pressenteile steil anwächst, ist eine Erhöhung des Pressdruckes weit über den Optimalwert hinaus durchweg unwirtschaftlich. Hinzu kommt, dass eine höhere Rohdichte der gehärteten Steine aufgrund des Einflusses der Menge und der Beschaffenheit der CSH-Bindemittelphasen nicht zwangsläufig auch eine höhere Druckfestigkeit bedeutet [1, 5, 6, 17, 66].

Die den Formkästen zugeführte Kalk-Sand-Rohmischung enthält immer Luftporen, die beim Verdichtungsvorgang entweichen müssen. Bei breit abgestuften Korngrößenverteilungen mit ausreichend hohen Anteilen an Schluff, Fein-, Mittel- und Grobkorn bereitet die Entlüftung der Rohmassen keine Schwierigkeiten. Beim Verpressen der Mischung zu KS-Rohlingen wird das Einfüllvolumen etwa auf 2/3 reduziert. Das restliche 1/3 des Ausgangsvolumens entweicht als Luft.

Auf die Verdichtungswilligkeit einer Rohmischung haben vor allem die Korngrößen- und Kornformverteilungen der darin enthaltenen Stoffe sowie der Feuchtigkeitsgehalt einen Einfluss. Aus der betrieblichen Produktionspraxis ist bekannt, dass die erreichbare Packungsdichte mit kleiner werdendem mittleren Korndurchmesser und enger werdendem Korngrößenband zurückgeht. Mit zunehmender Dispersität der Rohmischung wird deren Entlüftung immer schwieriger. Die in der sich verdichtenden Rohmischung eingeschlossene Luft wird beim Verdichtungsvorgang zunächst komprimiert und dehnt sich nach Rückzug der Druckstempel wieder aus, was zu Gefügeschäden führen kann. Deshalb muss die in der Rohmasse enthaltene Luft aus dem Formwerkzeugkasten entweichen können. Dies erfolgt in der Regel über Entlüftungslöcher. Ebenfalls ist eine ausreichend langsame Verdichtung erforderlich. Bei sehr feinkörnigen Kalk-Sand-Rohmischungen (mittlerer Sandkorndurchmesser $\varnothing \leq 0,5$ mm) kann die Entlüftung durch eine Haltezeit ($t_h = 1$ bis 5 s) bei Erreichen der Maximalkraft unterstützt werden [1, 17].

Pressfeuchte

Weil das in der Rohmischung enthaltene Wasser, das für die Festigkeitsbildung im Rohling benötigt wird, bei der verdichtenden Formgebung ebenso wie der Branntkalk als "Schmiermittel" wirkt, nimmt die erreichbare Packungsdichte mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt der Mischung bis zu einem spezifischen Maximalwert zu. Nach Überschreiten dieses Maximums tritt durch das überschüssige Wasser ein Auseinanderdrängungseffekt auf, so dass die Packungsdichte und damit auch die Scherbenrohdichte wieder abnimmt. Geht der Feuchtigkeitsgehalt der Rohmischung weit über den optimalen Wert hinaus, wird ein Teil des überschüssigen Wassers aus der Rohmischung herausgepresst. Die geformten Rohlinge besitzen dann i.d.R. keine ausreichende Stabilität mehr [1, 17].

Vermeidung von Materialanbackungen an den Formwerkzeugen

Der optimale Feuchtigkeitsgehalt der Rohmischung wird ebenfalls von der Neigung der Mischung zum Anbacken an den Formwerkzeugen bestimmt. Ausgehend von einer trockenen Mischung ist die Neigung zum Anbacken zunächst äußerst gering, wächst mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt sehr schnell bis auf einen Maximalwert und nimmt bei weiterer Erhöhung des Feuchtigkeitsgehaltes wieder ab. Anbackungen an den Formwerkzeugen können daher oft allein durch eine geringe Erhöhung der Pressfeuchte der Rohmischung beseitigt werden. Bei modernen Pressen spielt die Neigung zum Anbacken häufig keine wesentliche Rolle mehr, da die am stärksten betroffenen Kopfplatten des Presswerkzeuges heute durchweg beheizt werden. Der an der heißen Plattenoberfläche entstehende Wasserdampf bildet eine Trennschicht, mit der Anbackungen vermieden werden können.

Kornzerkleinerungseffekte (Grobkorn)

Unter der Einwirkung des auf die Kalk-Sand-Rohmischung einwirkenden mechanischen Verdichtungsdrucks kommt es in jedem Fall zu mehr oder weniger großen, ungewollten Kornzertrümmerungseffekten, durch die die Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung während des Verdichtungsdrucks verändert (verfeinert) und die Oberfläche der Gesteinskörnung größer wird. In der mechanischen Verfahrenstechnik werden je nach Anzahl der beanspruchten Körner drei Beanspruchungsarten unterschieden: Einzelkorn-, Mehrkorn- und Gutbettbeanspruchung, siehe Bild 2.9. Die Einzelkornbeanspruchung ist der theoretische Idealfall und kommt in der Praxis nur bei sehr großen Körnern vor. Mit zunehmender Anzahl an Körnern und Kontaktstellen wird die zugeführte Verdichtungsenergie zum Teil zum gegenseitigen Verschieben der Körner ohne Bruchergebnis aufgebraucht (Mehrkornbeanspruchung).

Das kann soweit führen, dass ein von vielen kleineren Körnern eingebettetes großes Korn nicht zerkleinert werden kann (sog. "Gutbetteffekt"). Durch die Reibung werden aber auch bei Gesteinskörnungen zahlreiche Mikrorisse erzeugt, die einen nachfolgenden Bruch erleichtern. Die Beschreibung der Zerkleinerungsvorgänge erfolgt aufgrund der Komplexität der Bruchvorgänge mit Hilfe der halbempirischen Beziehungen, die in der Literatur als Gesetze von KICK, BOND und RITTINGER eingegangen sind [67, 68, 69, 70, 71, 72]. Hier sind modellierende Untersuchungen mittels Finite-Elemente-Methoden wünschenswert.

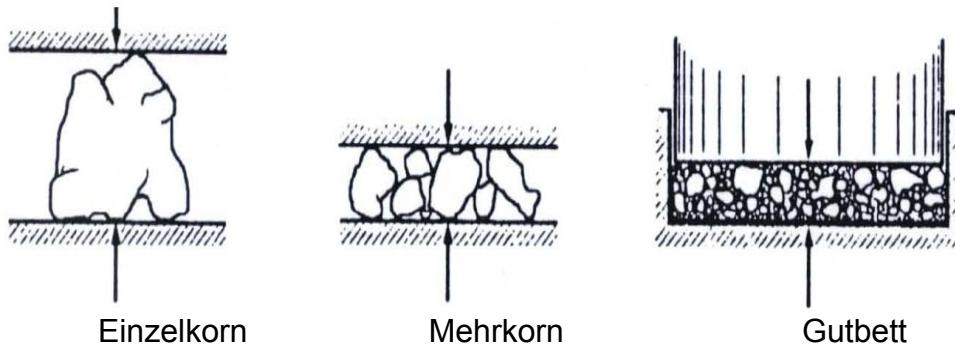


Bild 2.9: Beanspruchungsarten in mechanischen Zerkleinerungsmaschinen [70]

Die Beanspruchungsart bei der Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmischungen kann als Gutbettbeanspruchung betrachtet werden. Im "normalen" Betriebsablauf mit geringen Streugut-rückführungsralten (Rate < 2 M.-%) spielt dieser Verfeinerungseffekt keine Rolle. Ist der über die Reaktoren in die Produktionskette zurückgeföhrte Anteil an Streugut jedoch hoch (z. B. Rate > 20 M.-%), kann dieser Effekt so groß werden, dass er bei der Produktionsplanung durch entsprechende produktionstechnische Maßnahmen (z. B. Erhöhung der Kalkdosis) berücksichtigt werden muss. Die Größe dieses Effektes hängt direkt von der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung ab. Bei einer breit abgestuften Korngrößenverteilung liegt eine vergleichsweise große Anzahl an Korn-zu-Korn-Kontakten vor. Die Koordinationszahl ist entsprechend groß. (siehe auch Abschnitt 2.2.3). Bei engen Kornbändern, z. B. bei einkörnigen Feinsanden aus der Norddeutschen Tiefebene, ist die Koordinationszahl wesentlich geringer, so dass die lokalen mechanischen Spannungen an den Kontaktpunkten entsprechend größer ist. Wird die aufnehmbare Spannung am Gesteinskorn überschritten, kommt es zum Bruch und in der Folge tritt der Verfeinerungseffekt auf [73]. Dieser Effekt nimmt jedoch bei wiederholter Verpressung mit stufenweise ansteigendem Pressdruck auf Grund des "Gutbetteffektes" (siehe unten) stetig ab. Hinzu kommt, dass jedes Mineral eine spezifische Härte aufweist [62]. Das nachfolgende Bild 2.10 zeigt anhand eines Beispiels den verfeinernden Einfluss der Kornzertrümmerung auf die Korngrößenverteilung einer Gesteinskörnung. Durch diesen Effekt steigt der Anteil des Feinkorns, der wiederum Auswirkungen auf den Ausfüllungsgrad des Hohlraumgehaltes und auf die Konsistenz der Feinkormatrix hat.

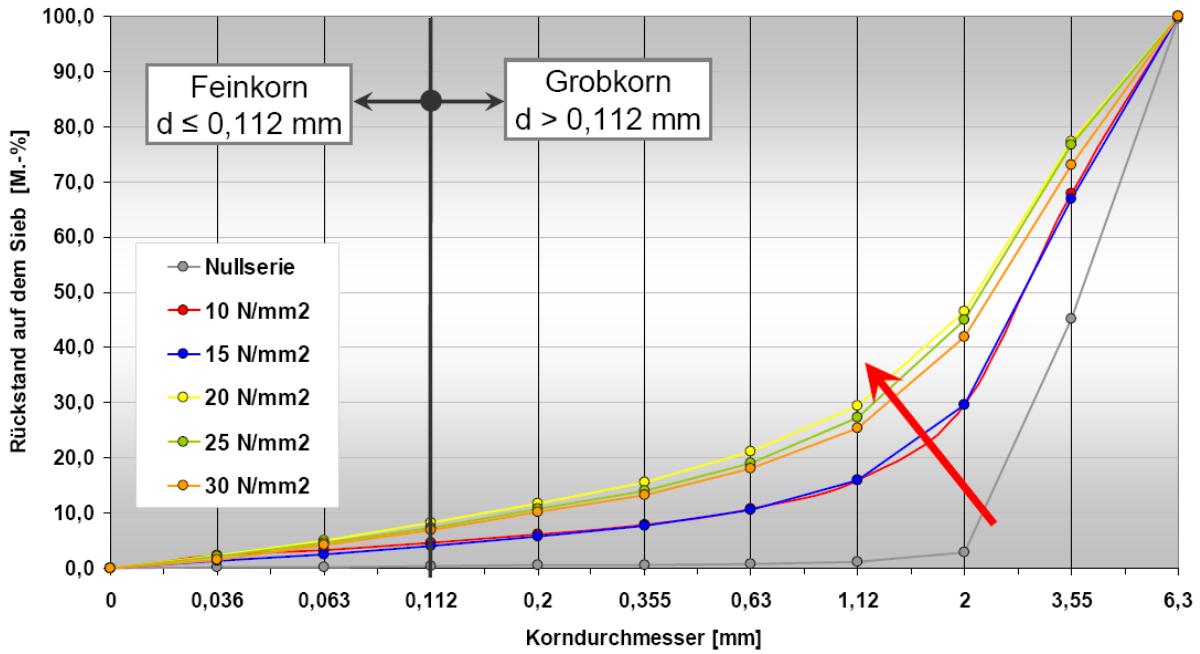


Bild 2.10: Effekt der Kornverfeinerung durch den Pressvorgang [73] - einkörniger Basalt-
splitt mit großem Verfeinerungseffekt

2.1.8 Hydrothermalhärtung

Bedeutung der Hydrothermalhärtung

Die bei der Härtung ablaufenden und zum Teil sehr komplexen physikalischen und chemischen Vorgänge sind für die qualitätskennzeichnenden Eigenschaftswerte von Kalksandsteinen (Steindruckfestigkeit, Frostwiderstandsfähigkeit) von wesentlicher Bedeutung. Das Ziel der Dampf härtung ist, die im Rohling durch den Pressvorgang aufgebauten, relativ leicht abbaubaren physikalischen Bindungen zwischen den einzelnen Rohstoffkörnern durch eine feste und haltbarere chemische Bindung zu ersetzen. Diese feste Bindung entsteht durch die chemische Reaktion zwischen den Rohstoffen Kalk (CaO), Sand (SiO_2) und Wasser (H_2O) sowie etwaigen Zuschlagstoffen zu den gewünschten langzeitstabilen Calciumsilikathydraten (CSH-Phasen) [1].

Einfluss der Verdichtung auf die Dampfhärtung

Eine Voraussetzung für eine ausreichende Synthese der Calciumsilikhydrate ist eine vollständige Füllung des Porenraums der Rohlinge mit Wasser, das als Lösungsmittel und Wärmeüberträger für die Reaktionspartner CaO und SiO_2 dient. Während der Aufheizphase nehmen die Rohlinge über Kapillarkräfte den auf ihrer Oberfläche kondensierenden Wasserdampf bis zur vollständigen Wassersättigung auf. Um zu gewährleisten, dass das Porenvolumen innerhalb der praxisrelevanten Härtezeiten vollständig mit Wasser gefüllt wird, ist eine Mindestporosität erforderlich. Diese liegt nach [74] bei $V_{\min} \approx 10 \text{ Vol.}\%$. Die wasserfüllbare Porosität liegt bei handelsüblichen Kalksandsteinen innerhalb einer Bandbreite von 10 bis 20 Vol.%. Mit abnehmender Hohlraumgröße werden die Bedingungen für die Dampfhärtung ungünstiger. Das Maß für die Qualität der Dampfhärtung ist die Menge an gebildeten Calciumsilikathydraten, die sich direkt auf die Festigkeit auswirkt. Je höher die Menge an Calciumsilikathydraten ist, desto höher ist die Festigkeit, siehe Bild 2.11.

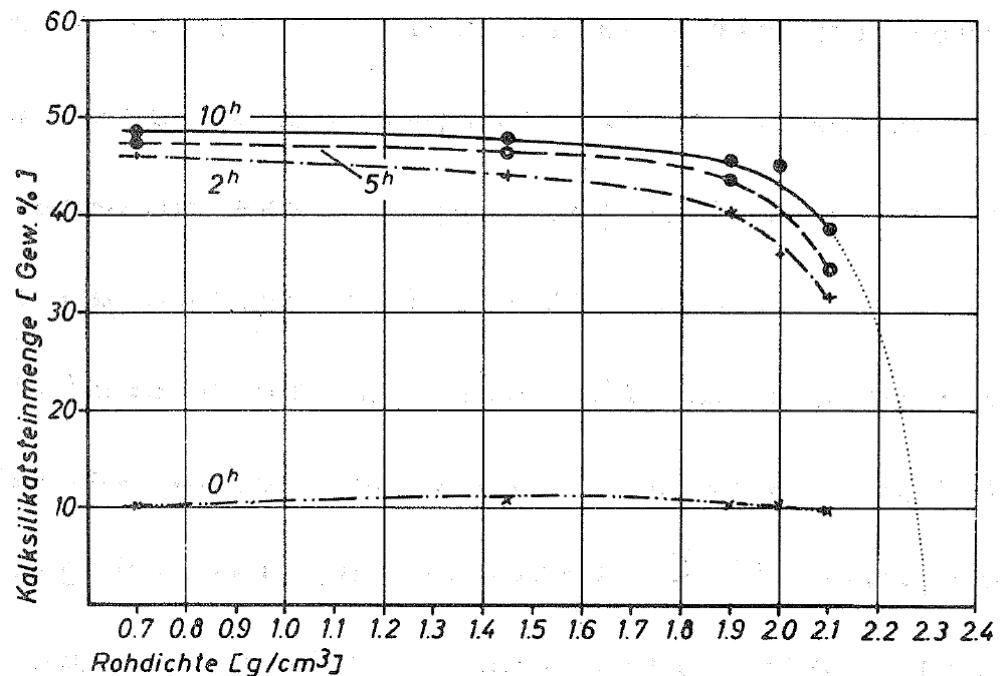


Bild 2.11: Menge an Calciumsilikathydrat in Abhangigkeit von der Rohdichte [74]

Die Scherbenrohdichte der Kalksandsteine wird durch den Härtevorgang selbst nur geringfügig verändert. Bei der Rezepturauslegung ist lediglich zu beachten, dass die Masse der fertigen Kalksandsteinprodukte i. d. R. geringfügig über der Masse der trockenen Rohstoffe (Kalk und Gesteinskörnung) der Kalksandsteinrohlinge liegt. Der Grund für diese Erscheinung ist die Tatsache, dass ein Teil des als Pressfeuchte in den Rohlingen enthaltenen Wassers in die sich bei der Dampfhärtung bildenden Calciumsilikathhydrate eingebunden wird. [17, 75].

2.2 Packungsdichte

2.2.1 Allgemeines

Definition der Packungsdichte

Die Packungsdichte Φ ist definiert als das Verhältnis des Feststoffvolumens zum Gesamtvolumen eines betrachteten Raums [22]. Es gilt folgende Definition:

$$\Phi = F_v / R_v \quad [\text{Vol.}-\%] \quad (\text{Gleichung 2.4})$$

mit: F_v = Volumen des Feststoffs
 R_v = Volumen des betrachteten Raums

Definition der Porosität

Die Porosität ϵ und die Packungsdichte Φ hängen direkt über folgende Beziehung zusammen:

$$\epsilon = 1 - \Phi \quad [\text{Vol.}-\%] \quad (\text{Gleichung 2.5})$$

In der Betontechnologie wird seit langem der Effekt genutzt, dass feinere Partikel Hohlräume zwischen größeren Partikeln ausfüllen, so dass es auf diese Weise gelingt, die Rohdichte des Betons zu erhöhen. Dabei können durch möglichst weitgestufte Korngrößenverteilungen genügend feinere Körner zur Ausfüllung des größeren Korngerüsts verwendet werden. Durch diese Methode wird in der Regel ebenfalls die Festigkeit, die Dauerhaftigkeit und der Elastizitätsmodul des Betons erhöht. Die Grundlagen dieser Vorgehensweise sind bereits 1907 von FULLER und THOMPSON [76] beschrieben worden.

Weitere wichtige Untersuchungen wurden 1930 von ANDREASEN und ANDERSEN [77] gefertigt. FURNAS [78], DINGER und FUNK [79] sowie SCHWANDA [80] und DE LARRARD [81] haben diese Arbeiten vertieft. RESCHKE zeigt in [82, 83], dass eine optimale Kornverteilung der Feinstoffe im Beton zu höheren Festigkeiten und zu einer höheren Dichte führt. Ebenso ist eine hohe Gleichmäßigkeit der feinen und der groben Bestandteile der Korngrößenverteilung aller beteiligten Stoffe für die Packungsdichte und den Hohlraumgehalt relevant.

SCHMIDT weist in [84] darauf hin, dass vor allem im Korngrößenbereich $< 10 \mu\text{m}$ ein optimal angepasster, erhöhter Feinkornanteil nützlich ist, weil sich dadurch der Wasseranspruch des frischen Betons verringert. Gleichzeitig werden die Verarbeitbarkeit und das Wasserrückhaltevermögen verbessert.

DE LARRARD und SEDRAN führen in [85, 86] aus, dass durch eine Steigerung der Packungsdichte die festigkeitsreduzierenden Hohlraumanteile reduziert werden. Ebenfalls wird durch die Steigerung der Packungsdichte des Betons die Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen erhöht und somit die Dauerhaftigkeit gesteigert. In [84] wird erläutert, dass die Packungsdichte von Betonmischungen sich in einfacher Weise über den volumetrischen Wasser-Feststoffwert w/F_v darstellen lässt. Eine Zunahme des w/F_v -Wertes führt zu einem größeren Hohlraumvolumen und damit zu einer Abnahme der Packungsdichte. Umgekehrt resultiert aus einer Reduzierung des w/F_v -Wertes eine Abnahme des festigkeitsmindernden Hohlraumvolumens und eine entsprechende Steigerung der Packungsdichte.

BORNEMANN hat in [87] ein Modell für erdfeuchte Betone entwickelt, das den Zusammenhang zwischen der Packungsdichte, dem Wasser-Feststoffwert und seiner Gründruckfestigkeit beschreibt. Für diese meist sehr steifen Betone mit vergleichsweise niedrigen Leimgehalten kann der für die Verdichtung und die Grünstandsfestigkeit optimale Wassergehalt mit dem Kasseler Rüttelproctorverfahren praxisnah festgestellt werden. Die Grünstandsfestigkeit nimmt mit ansteigender Packungsdichte deutlich zu. Ähnliche Ergebnisse sind aufgrund der stofflichen Ähnlichkeit auch für erdfeuchte Kalk-Sand-Rohmischungen zu erwarten.

In der Betontechnologie werden seit einiger Zeit sog. "selbstverdichtende Betone" (SVB) eingesetzt, die sich ohne äußere Energiezufuhr (Innen- oder Außenrüttler) allein verdichten. OKAMURA und OUCHI haben in [88] die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung für SVB definiert:

- reduzierter Grobanteil der Gesteinskörnung
- erhöhter Feinstoffanteil
- begrenzter Sandgehalt
- reduzierter Wasser-Feststoffwert
- höhere Zugabe von Hochleistungsfließmitteln

Dadurch ist es möglich, dass sich zwischen den Körnern des Grobkörnergerüstes eine ausreichend dicke Zementleimschicht bildet, die eine gegenseitige Behinderung der Körner bei deren Bewegung verhindert [22]. Weitere wichtige Untersuchungen zum Einfluss der Packungsdichte auf die physikalischen Eigenschaften von Betonen von hochfesten und ultrahochfesten Betonen wurden 1994 von DE LARRARD und SEDRAN [86] veröffentlicht. Der aktuelle Stand des Technik der UHPC-Technologie ist in den Tagungshandbüchern zu den "Internationalen Symposien des Ultra High Performance Concrete" (2004 und 2008) beschrieben [89, 90].

SCHMIDT und GEISENHANSLÜKE berichten in [91] über die Bedeutung der Kornverteilung in zu optimierenden Mischungen. Diese bestimmt in hohem Maße die Packungsdichte und den Hohlraumgehalt. Deshalb müssen die eingesetzten Feinstoffe im Festbetongefuge durch einen geeigneten Mischprozess gleichmäßig verteilt werden. Werden Feinstoffe mit deutlich unterschiedlicher Kornverteilung gemischt, so kann die Packungsdichte deutlich gesteigert werden.

2.2.2 Bedeutung der Packungsdichteoptimierung in der Kalksandsteintechnologie

Die Zusammenhänge zwischen der Korngrößenverteilung von Gesteinskörnungen, der Packungsdichte von Kalk-Sand-Rohmischungen und der Rohdichte von Kalksandsteinen, so wie sie in der Beton- bzw. Zementtechnologie bekannt sind [22, 53, 57], wurden in der Kalksandsteinindustrie bislang nicht angewendet. Eine sinngemäße Übertragung dieser Erkenntnisse auf die Kalksandsteintechnologie ist aufgrund der stofflichen Nähe zwischen Beton und Kalksandsteinen grundsätzlich möglich. In der Vergangenheit wurden in der Kalksandsteinindustrie keine exakten Berechnungen zur Optimierung der Packungsdichte durchgeführt. Die Auslegung der Rezepturen erfolgte ausschließlich auf der Basis von Erfahrungswissens und auf den Ergebnissen aufwändiger und kostenintensiver Versuchsreihen.

Bild 2.12 und die zugehörige Tabelle 2.4 gestatten einen Eindruck über den bisherigen empirischen Ansatz von QUINCKE zur Optimierung des Kalksandsteingefüges aus den 1970er Jahren [17]. Analog zur Betontechologie werden auch bei Kalksandsteinen die mechanischen Eigenschaften durch einen sog. "günstigen" Kornaufbau nach QUINCKE verbessert. Insbesondere wird durch eine Erhöhung der Packungsdichte auch der Frostwiderstand erhöht, was für Kalksandstein-Verblender relevant ist, die direkt der Witterung ausgesetzt sind und eine hohe Dauerhaftigkeit aufweisen müssen [92, 93, 94].

Der positive Einfluss und die Bedeutung der Packungsdichteerhöhung auf die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit von Kalksandsteinmaterial wurde ebenfalls bei der Entwicklung der sog. Kalksand-Werksteine festgestellt, die als Fassadenplatten für den Außenbereich dienen können [95]. Die Packungsdichteoptimierung erfolgte hier jedoch noch sehr aufwändig auf empirischen Wege. Hier wurden immerhin Würfeldruckfestigkeiten von bis zu rd. $\beta_D = 100 \text{ N/mm}^2$ erreicht.

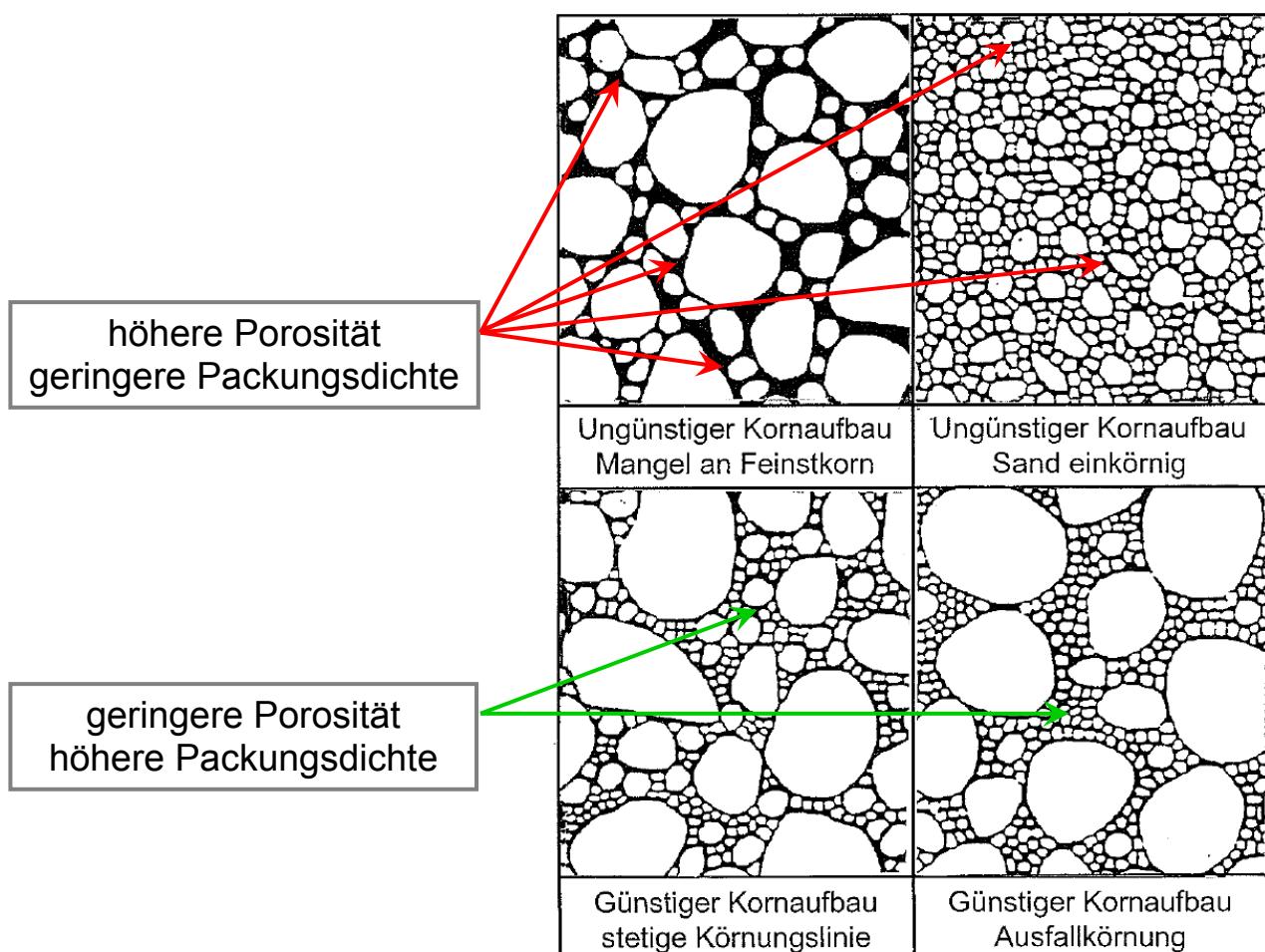


Bild 2.12: Qualitative Bewertung des Kornaufbaus von Gesteinskörnungen für die Kalksandsteinindustrie nach QUINCKE (1970) [17]

Eigenschaft des Rohlings bzw. des Kalksandsteins	Ungünstiger Kornaufbau	Günstiger Kornaufbau
Rohlingsstandfestigkeit	geringer	höher
Steindruckfestigkeit	geringer	höher
Steinrohdichte	geringer	höher
Elastizitätsmodul	geringer	höher

Tabelle 2.4: Kornaufbau von Sanden - Tendenzieller Einfluss auf die Steinqualität [17]

Für die Beschreibung von zu verdichtenden Kalk-Sand-Rohmischungen kann ein 2-Stufen-Modell angenommen werden. Der Grobkornanteil mit $d > 0,112 \text{ mm}$ bildet das Stützkorngerüst. Die Feinkornmatrix mit $d \leq 0,112 \text{ mm}$ kann als homogener "flüssiger" Stoff angesehen werden, der das Grobkorn umhüllt und dessen Poren füllt. Innerhalb der Feinkornmatrix umhüllt das Wasser die Feinpartikel und füllt deren Hohlräume, siehe Bild 2.13. Insbesondere der Feinmörtelanteil weist interpartikuläre Kräfte auf, die sein rheologisches Verhalten deutlich bedingen, siehe Abschnitt 2.3.

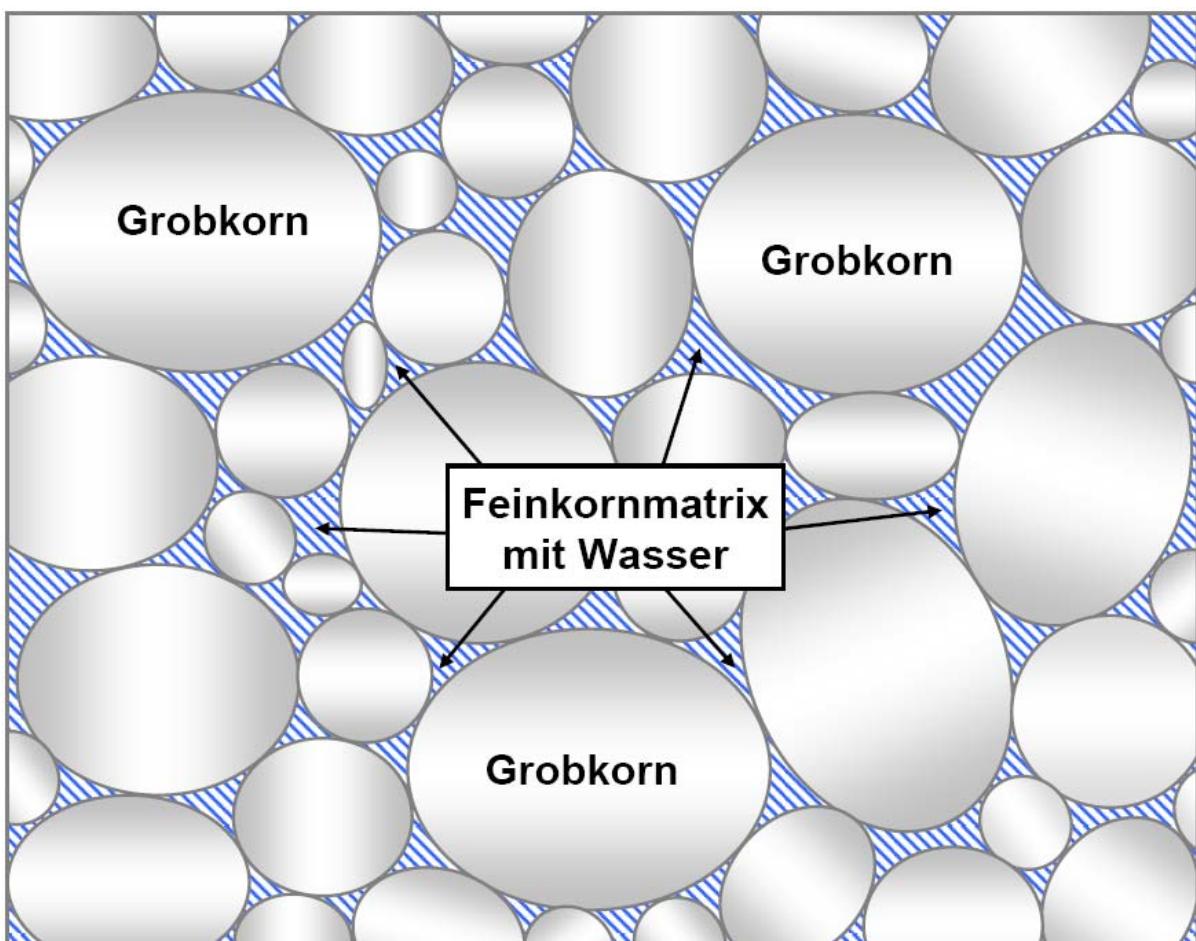


Bild 2.13: 2-Stufen-Modell einer Kalk-Sand-Rohmischung
- Grobkorn $d > 0,112 \text{ mm}$ (grau)
- Feinkornmatrix aus Kalk, Füller Feinkorn und Wasser $d \leq 0,112 \text{ mm}$ (schraffiert)

2.2.3 Koordinationszahl

Die Koordinationszahl ist nach POWELL ein wichtiger Parameter zur Beschreibung von Partikelpackungen [96]. Sie zeigt auf, wie groß die mittlere Anzahl der Kontaktstellen zwischen einem Partikel und einem benachbarten Partikel ist. Die Anzahl der Kontaktstellen hat beim Frischbeton einen großen Einfluss auf die Größe der inneren Reibung im Partikelsystem [22]. Für die Einstellung einer bestimmten Frischbetonkonsistenz liegt mit ansteigender Koordinationszahl ein entsprechend höherer Wasseranspruch vor. Dieses Phänomen kann mit der inneren Reibung infolge auftretender Kohäsions- und Adhäsionskräfte erklärt werden, die bei Vorliegen einer großen Koordinationszahl aufgrund der größeren Anzahl an Korn-zu-Korn-Kontakten höher ist als bei einer kleinen Koordinationszahl.

Beim erhärteten Beton und auch bei Kalksandsteinen ist eine möglichst hohe Anzahl an Kontaktstellen für eine hohe Festigkeit und Rohdichte jedoch günstig. Dabei ist darauf zu achten, dass die feinen Körner das Grobkörnergerüst möglichst vollständig ausfüllen und nicht - wie im Fall einer Überdosierung - auseinandertreiben.

Dieses Modell ist aufgrund der stofflichen Ähnlichkeit zwischen Frischbeton (Gesteinskörnungen + Zement + Wasser) und erdfeuchten Kalk-Sand-Rohmassen (Gesteinskörnungen + Kalk + Wasser) sinngemäß auf die Kalksandsteintechnologie übertragbar; Bild 2.14 veranschaulicht die Koordinationszahl. Auf der linken Seite ist ein zentrales Gesteinskorn A zu sehen, das von 7 kleineren Gesteinskörnern B umgeben ist, so dass 7 Kontaktstellen vorliegen. Auf der rechten Seite sind in den Hohlräumen zwischen den Gesteinskörnern A und B noch weitere kleinere Gesteinskörner C vorhanden, so dass die Packungsdichte in diesem Fall höher ist. Hier liegen sogleich 14 Kontaktstellen vor.

Bei der Übertragung dieses Denkmodells auf das Kalksandsteingefüge ist zu beachten, dass GEISENHANSLUKE sich in [22] auf weiche bis fließfähige Betone mit höherem Feinstkorngehalt bezieht. Kalk-Sand-Rohmischungen haben dagegen eine steife bis erdfeuchte Konsistenz. Deshalb sei an dieser Stelle auch auf die Arbeit von BORNEMANN [87] verwiesen, in der das Frisch- und Festbetonverhalten erdfeuchter Betone modelliert wird. Bornemann zeigt unter anderem auf, wie sandreiche Gesteinskörnungen auf eine feinststoffliche Optimierung reagieren und wie sandreiche Betone mit hoher Packungsdichte und niedrigem Wasseranspruch hergestellt werden können. Des Weiteren gelang es ihm, ein Modell zu entwickeln, mit dem auf der Basis von w/z- und w/f-Werten Prognosen über die Festigkeit und Dauerhaftigkeit erdfeuchter Betone getroffen werden können.

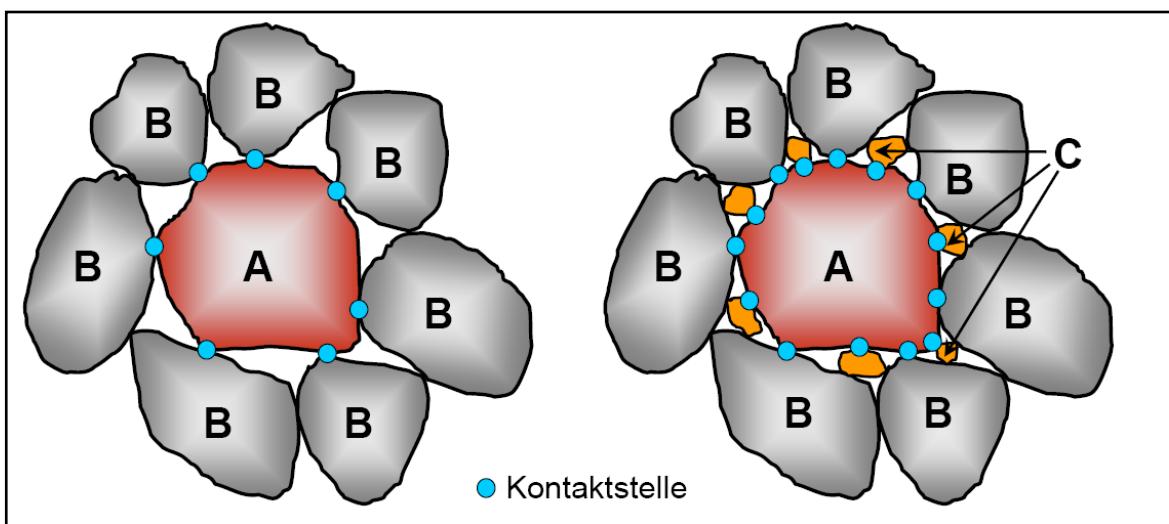


Bild 2.14: Definition der Koordinationszahl

2.2.4 Wand- und Auflockerungseffekt

In der Nähe von Begrenzungswänden des betrachteten Raumes tritt der sog. Wandeffekt auf. Die Wände wirken als Hindernisse, so dass eine regelmäßige Anordnung der angrenzenden Partikel wie im Inneren der Mischung nicht möglich ist [22, 86, 97]. Diese Wände entsprechen den Formwerkzeugoberflächen bei der Verdichtung der Kalk-Sand-Rohmassen in den Kalksandsteinpressen. In der Folge ist in den der Wand nahen Bereichen der Hohlraumgehalt aufgrund der auftretenden Häufung der größeren Körner im Vergleich zu den ungestörten Bereichen größer. Das bedeutet, dass die Packungsdichte des größeren Kornanteils dort im Vergleich zu den Bereichen mit größerem Abstand zu den Formkastenwänden geringer ist [98]. Poren treten somit vermehrt an der Kalksandsteinoberfläche auf (Bilder 2.15 und 2.16). In der Nähe des mit (1) bezeichneten Grobkorns und zwischen den mit (2) bezeichneten mittelgroßen Körnern sind vergleichsweise große Hohlräume zu erkennen (sog. Wand- oder Wall-Effekt).

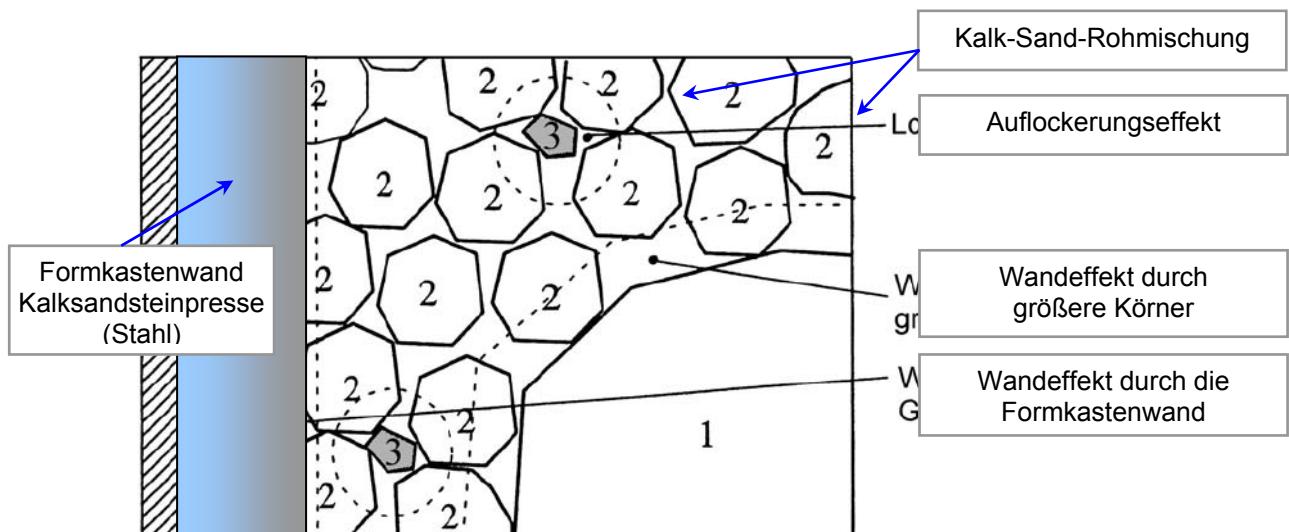


Bild 2.15: Wandeffekt: größerer Hohlraumgehalt nahe der Wand [78]

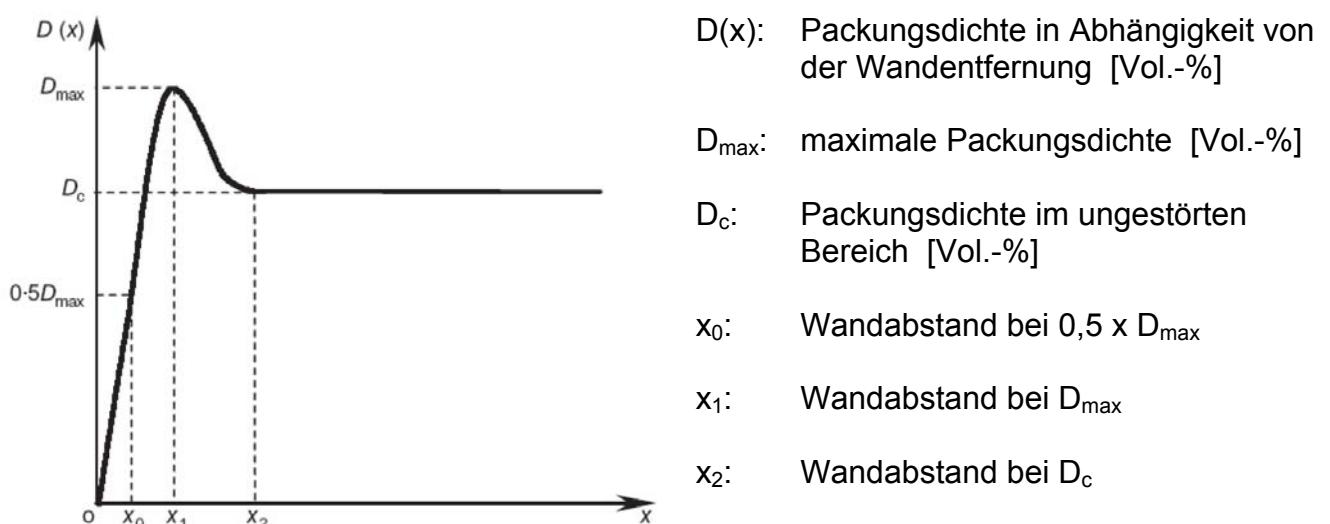


Bild 2.16: Abhängigkeit der Packungsdichte vom Abstand der Formkastenwand [22, 98]

2.2.5 Berechnung der Packungsdichte von groben Partikelgemischen

Rein geometrisch gelten die folgenden Betrachtungen für das gesamte bei der Kalksandsteinherstellung verwendete Kornspektrum. Gemäß dem im Abschnitt 2.2.2 dargestellten Modell für das Kalksandsteingefüge bilden die Grobkornanteile das Stützkorngerüst, dessen Hohlraum von der Feinkornmatrix und dem Wasser ausgefüllt wird. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf den groben Partikelanteil ($d > 0,112 \text{ mm}$).

An dieser Stelle werden zunächst die grundsätzlichen Zusammenhänge zur Packungsdichte von groben Partikelgemischen vorgestellt. Anschließend werden verschiedene Berechnungsmodelle genannt und die Auswahl eines Berechnungsmodells begründet. Packungen können nach der Anzahl der beteiligten Komponenten unterschieden werden. Zunächst werden Einkornpackungen mit Kugeln und mit realer Kornform betrachtet. Anschließend werden Binärpackungen und schließlich Mehrkornpackungen erläutert.

Bild 2.17 gibt einen Überblick über die Systematik von Partikelpackungen. In der Literatur ist keine umfassende Systematik beschrieben. Um die vielfältigen, zum Teil komplexen Gesichtspunkte bei der Modellierung von Partikelpackungen zu berücksichtigen, sind Ansätze aus mehreren Arbeiten zu betrachten. Im Folgenden wird auf die Arbeiten von DE LARRARD, HUMMEL, KESSLER, GEISENHANSLÜKE und RESCHKE (Feinkorn) sowie PROSKE, MÜLLER und STARK (Grobkorn) auf der Basis von und SCHWANDA eingegangen [22, 53, 56, 57, 86, 99, 100, 101, 102, 103].

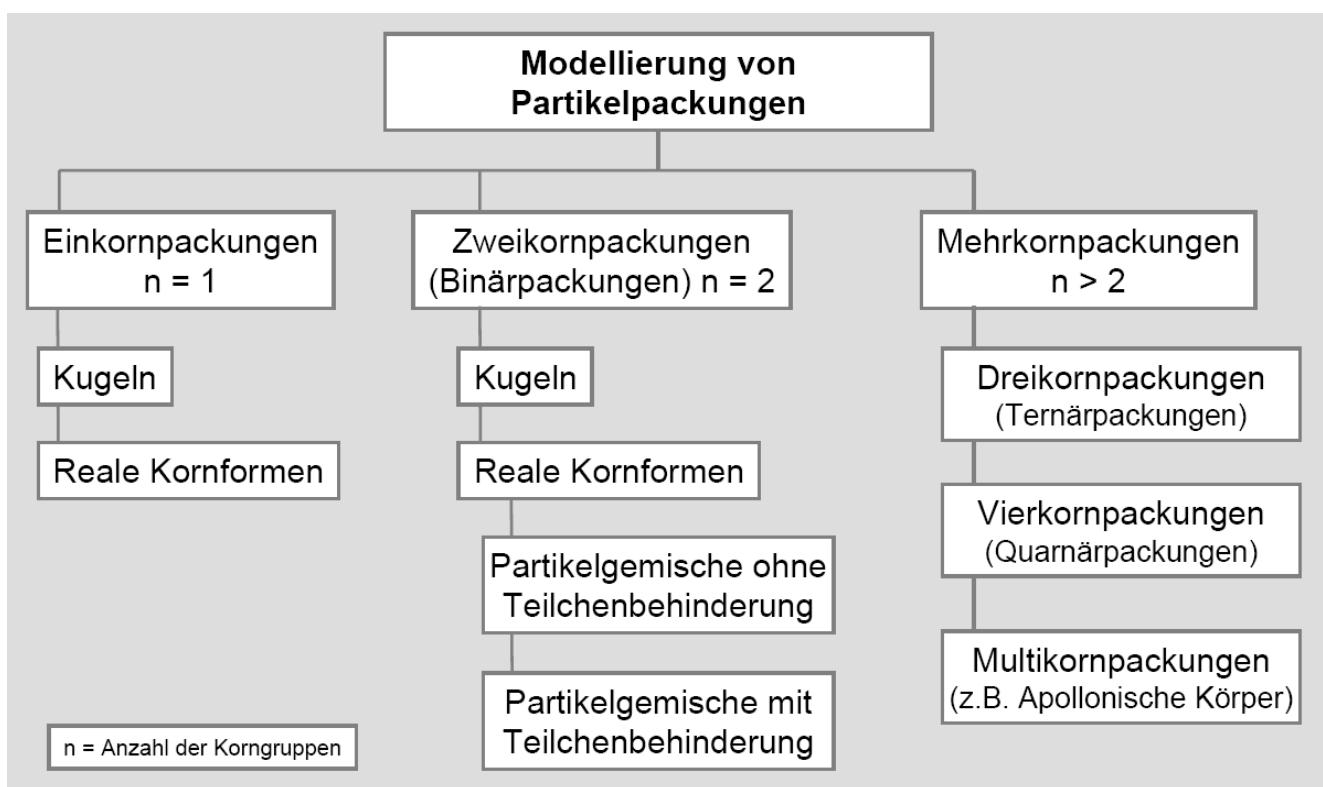


Bild 2.17: Ordnung der Modellierung von Partikelpackungen

2.2.5.1 Modellierung von Einkornpackungen

Kugeln:

Das grundlegende geometrische Modell ist die Einkorn-Kugelpackung. In derartigen Packungen aus gleich großen Kugeln können die gedachten Verbindungslien der Mittelpunkte drei verschiedene geometrische Grundformen bilden [99], siehe Bild 2.18.

- kubische Mittelpunktstellung
- oktaedrische Mittelpunktstellung
- tetraedrische Mittelpunktstellung

Das Spatelement ist ein Kombinationsfall. Zwei Tetraeder werden zu einem Oktaeder verknüpft. Mit dem Spatelement ist im Gegensatz zum Oktaeder- und Tetraedermodell die Ausfüllung eines Raumes möglich. Die größte Packungsdichte wird bei der tetraedrischen und oktaedrischen Mittelpunktstellung oder beim Spatelement mit $\Phi \approx 0,74$ erreicht. Für die kubische Mittelpunktstellung ergibt sich im Vergleich lediglich $\Phi \approx 0,524$ [99]. In einer dichtensten Kugelpackung hat jede Kugel 12 direkte Nachbarn, sechs in der eigenen Schicht, sowie drei je darüber und darunter. Die Packungsdichte einer dichtensten Kugelpackung beträgt

$$\Phi \approx \pi / (3 \times \sqrt{2}) \approx 0,74048 \quad [\text{Vol.-\%}] \quad (\text{Gleichung 2.6})$$

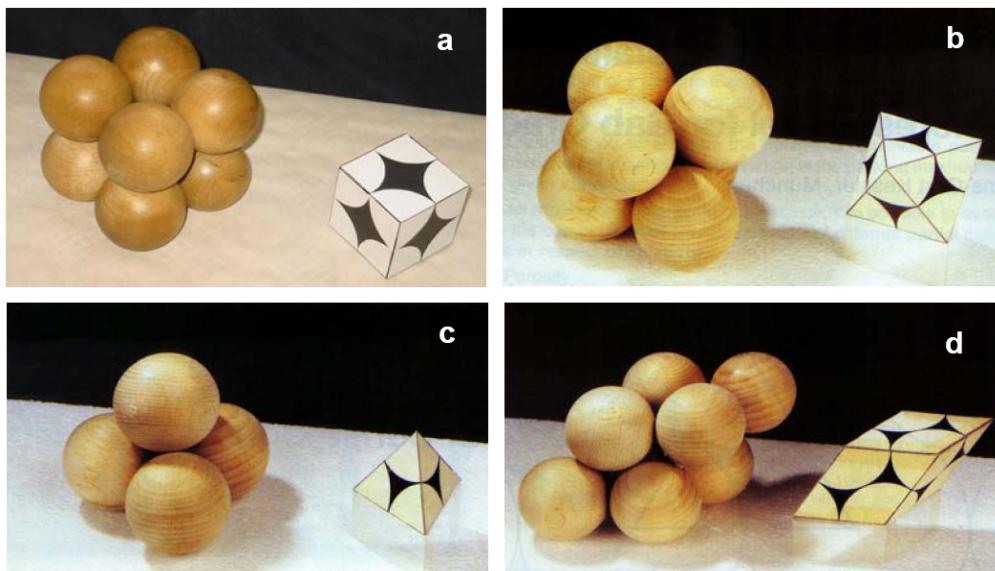


Bild 2.18: Beispiele für Einkorn-Kugelpackungen [99, 100]

Kubische Mittelpunktstellung (a), oktaedrische Mittelpunktstellung (b), tetraedrische Mittelpunktstellung (c), Spatelement (d)

In [104] wird über Experimente mit Stahlkugeln in zylindrischen Behältern berichtet. Die maximal erreichbare Packungsdichte wurde für dichte Zufallspackungen mit $\Phi = 63,7$ Vol.-% und für lose Zufallspackungen mit $\Phi = 60,1$ Vol.-% angegeben. Eine Steigerung sind nur mit Mehrkornpackungen möglich, siehe unten. In [105] wird über Computersimulationen über Zufallspackungen berichtet, in denen sog. "stabile" und "nicht stabile" Kugelpackungsbereiche unterschieden werden. In nicht stabilen Kugelpackungsbereichen können stabile Hohlräume (sog. stabile Brückenlagen) vorhanden sein, die durch einen Energieeintrag in eine stabile Packung überführt werden können, siehe Bild 2.19.

Dieser Vorgang entspricht dem Verdichten der Kalk-Sand-Rohmasse in den Formkästen in den Kalksandsteinpressen. Lose Zufallspackungen weisen im Vergleich zu dichten Zufallspackungen geringere Koordinationszahlen auf.

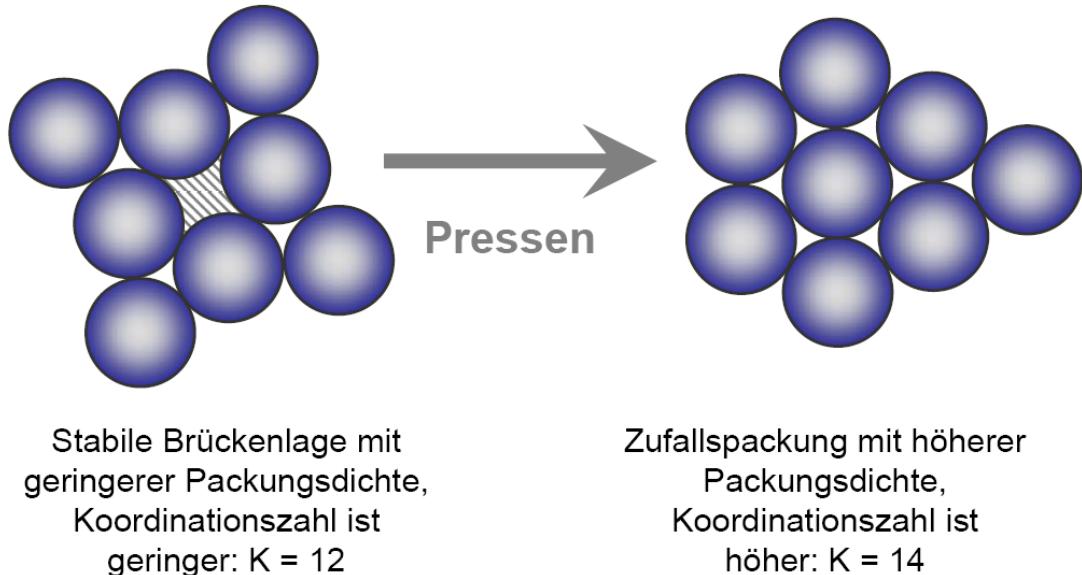


Bild 2.19: Auflösung von sog. stabilen Brückenlagen durch Verdichtung

In [104] wird über einen mathematischen Ansatz zur Berechnung des Hohlraumgehaltes von dichten Zufallspackungen auf Kugeln gleichen Durchmessers berichtet. Ein wichtiges Ergebnis dieser Untersuchung ist die Erkenntnis, dass mit kleiner werdendem Kugeldurchmesser der Hohlraumgehalt aufgrund der zunehmend dominierenden interpartikulären abstoßenden Kräfte stark ansteigt.

2.2.5.2 Modellierung von Binärpackungen

Binärpackungen bestehen aus zwei Komponenten mit unterschiedlichem Partikeldurchmesser. Wie bei den Einkornpackungen werden die relevanten Zusammenhänge zunächst an Kugeln und dann an realen Kornformen erläutert. Grundsätzlich ist zwischen Packungen mit und ohne Teilchenbehinderung zu unterscheiden.

Reale Kornformen:

Mit "realen Kornformen" sind in diesem Zusammenhang die Kornformen von Gesteinskörnungen für die Kalksandsteinproduktion zu verstehen. Die idealisierten Modelle zur Packungsdichte mit Kugeln gleichen Durchmessers haben zwar eine grundsätzliche Bedeutung für Einkornpackungen mit realen Kornformen, jedoch sind sie nicht direkt auf Kalksandsteinzuschläge übertragbar. Für die Berücksichtigung der Kornform ist für die Anwendung in der Kalksandsteintechnologie ebenso wie bei GEISENHANSLÜKE [22] die Definition und Einführung von zwei Größen erforderlich [53, 57].

Hohlraumgehalt k

Der Hohlraumgehalt k ist definiert als Quotient aus der Porosität ε und dem Feststoffgehalt $(1 - \varepsilon)$ [57].

$$k = \varepsilon / (1 - \varepsilon) \quad [-] \quad \text{(Gleichung 2.7)}$$

mit:

ε Porosität [Vol.-%]

Reichweite der Teilchenbehinderung w

Für Partikel mit realer Kornform ist die Einführung der Reichweite der Teilchenbehinderung w erforderlich. Sie ist definiert als der Logarithmus aus dem Quotienten aus der Größe des Grundkorns und der Größe des Grenzkorns. Sie gibt an, inwieweit Feinmaterial aufgrund des Korngrößenverhältnisses und der Korngeometrie nicht mehr die Zwischenräume der größeren Partikel ausfüllen kann [57]. Die Grenzkorngröße gibt den Wert an, bei dem gerade keine Teilchenbehinderung mehr auftritt.

$$w = \log(x_s/x_w) \quad [-] \quad \text{(Gleichung 2.8)}$$

mit:

x_s Größe des Grundkorns [mm]

x_w Größe des Grenzkorns [mm]

Kugeln:

Bild 2.20 zeigt ein Ergebnis der Experimente an binären Kugelpackungen von OGER [22, 107]. Bei diesem Beispiel ist erkennbar, dass bei einem Volumenverhältnis von $v \approx 0,27$ zwischen den 2 betrachteten Kugelsorten mit dem Durchmesserverhältnis $d_2 : d_1 = 4 : 1$ das Porositätsminimum vorliegt. Bei anderen Durchmesserrelationen liegt das Porositätsminimum an entsprechend anderer Stelle. Beim Porositätsminimum liegt das zugehörige Packungsdichtemaximum vor.

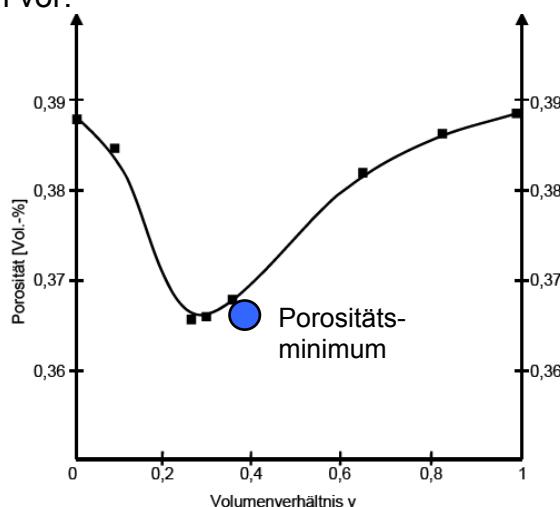


Bild 2.20: Einfluss der Volumenverhältnisse einer binären Kugelpackung mit einem Durchmesserverhältnis von $d_2 : d_1 = 1: 4$ [107]

Reale Kornformen:

Bei binären Partikelmischungen, die nicht aus Kugeln bestehen, sind die Zusammenhänge entsprechend komplexer. RESCHKE [57] zeigt anhand von Beispielberechnungen an verschiedenen Feinstoffen unterschiedlicher Kornform, in welcher Weise die sich ergebenden Packungsdichten bzw. Hohlraumgehalte vom Verhältnis der Partikeldurchmesser abhängen. Die Wirkung ist um so größer, je weiter sich die Korndurchmesser der beiden Komponenten unterscheiden. Ideal sind theoretisch nicht überlappende Korngrößenverteilungen, wobei das Größtkorn der feinen Komponente nicht größer sein darf als die sog. "Schlüpfkorndurchmesser". Das ist der Durchmesser des kleinsten Korns der groben Komponente, siehe Bilder 2.21 und 2.22. Entscheidend sind ebenfalls die Mengen der beteiligten Stoffe.

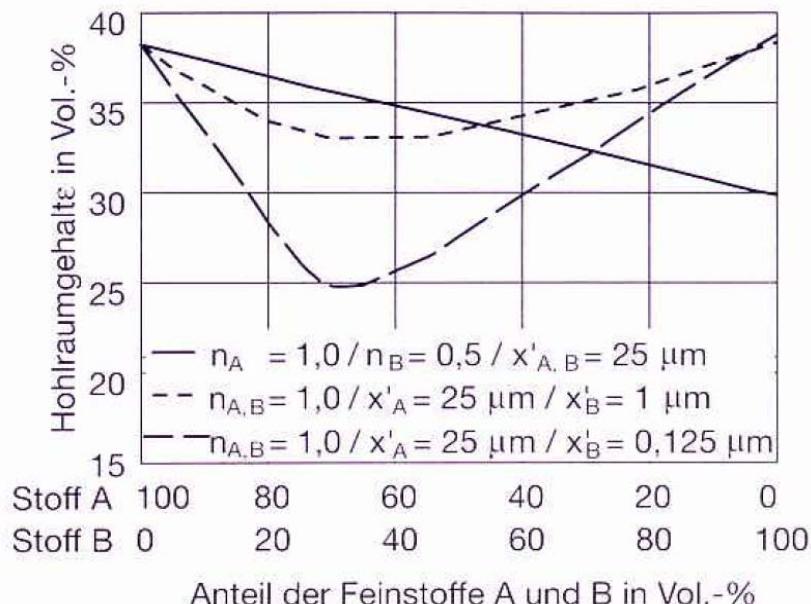


Bild 2.21: Hohlraumgehalte von Mischungen zweier Feinstoffe A und B unterschiedlicher Korngrößenverteilung [57]

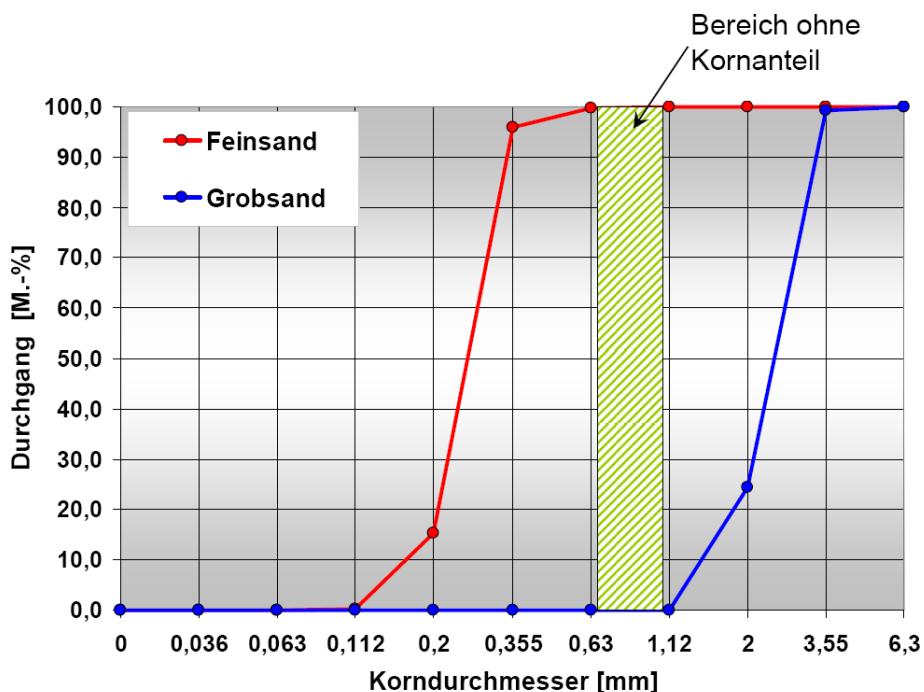


Bild 2.22: Zwei nicht überlappende Korngrößenverteilungen [17]

Bei der Steigerung der Packungsdichte von Beton wirken sich Körner besonders günstig aus, deren Durchmesser so gering ist, dass sie zwischen den angrenzenden größeren Körnern hindurchbewegen können ("Schlüpfkörner"). Körner, die zwar in die Kornzwischenräume hineinpassen, jedoch nicht zwischen den angrenzenden größeren Körnern in den Hohlraum gelangen können, werden als "Füllkörner" bezeichnet. Die Befüllwahrscheinlichkeit steigt im Fall der Verwendung von Schlüftkörnern deutlich an. Körner mit einem größeren Durchmesser führen zu einem Auseinanderdrängen des Grobkorngerüstes ("Sperrkorn"). Siehe Bild 2.23. Beim Verpressen von Kalk-Sand-Roh-massen kann von den gleichen Zusammenhängen ausgegangen werden.

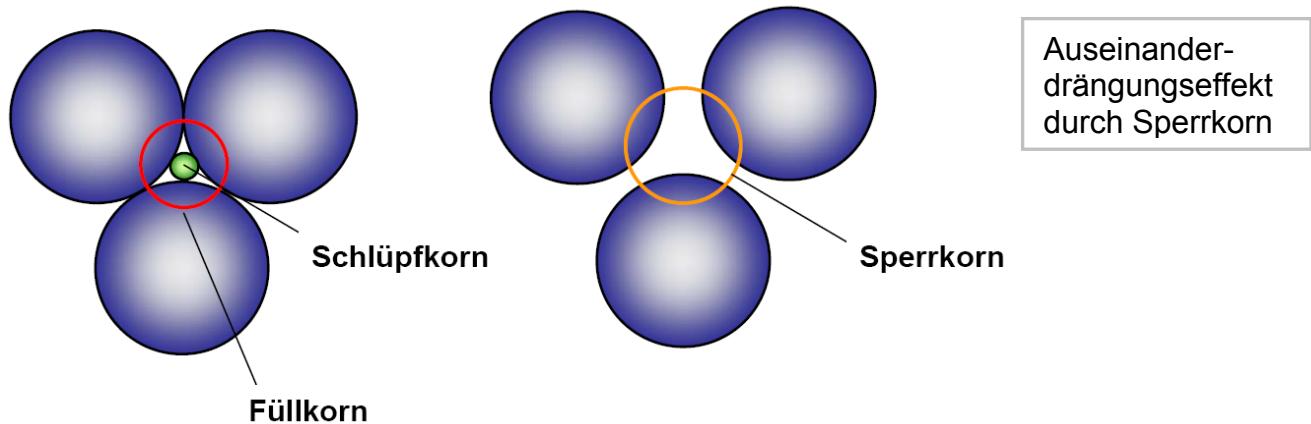


Bild 2.23: Darstellung von Füllkorn, Schlüpfkorn und Sperrkorn sowie Auseinanderdrängungseffekt [108]

YERAZUNIS et al. entwickelten für die Berechnung von Packungsdichten binärer Komponenten unterschiedlicher Körngrößen Näherungsgleichungen, auf die an dieser Stelle verwiesen wird [109]. RODRIGUEZ und ALLIBERT zeigen auf, dass ab einem Verhältnis der Partikeldurchmesser von 1: 4,64 kleinere Partikel hohlräumfähig sind [110]. Nach Mc GEARY werden bei binären Partikelmischungen die höchsten Packungsdichten dann erreicht, wenn der Korngrößenunterschied maximal ist [111], so dass die feinen Partikel leicht in die Hohlräume zwischen den Grobpartikeln gelangen können. PALM bestätigt diese Beobachtung und weist auf die leichte Verdichtbarkeit von Ausfallkörnungen hin [112].

a) Partikelgemische ohne Teilchenbehinderung

Eine höchstmögliche Packungsdichte Φ_{\max} entsteht, wenn die zwischen den größeren Partikeln vorliegenden Hohlräume (Zwickelräume) komplett mit gerade hineinpassenden kleineren Partikeln ausgefüllt sind. Mit zunehmender Anzahl jeweils kleiner werdender Füllkomponenten nähert man sich dem Grenzwert der Packungsdichte $\Phi = 1$. Der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Komponenten n und der Packungsdichte Φ kann gemäß [113], wie nachfolgend dargestellt, formuliert werden:

$$\Phi_{\max} (n) = 1 - (\varepsilon_0 / 100)^n = 1 - (1 - \Phi_0)^n \quad [\text{Vol.-\%}] \quad (\text{Gleichung 2.10})$$

mit:

- $\Phi_{\max} (n)$ Maximale Packungsdichte der Mischung aus n Komponenten [Vol.-%]
- Φ_0 Packungsdichte der einzelnen Komponenten [Vol.-%]
- ε_0 Hohlräumgehalt der Komponenten [Vol.-%]
- n Anzahl der Komponenten [-]

Bild 2.24 zeigt den Einfluss der Anzahl der Partikelkomponenten auf die Packungsdichte Φ . Für verschiedenen Ausgangspackungsdichten D_0 sind jeweils die theoretisch höchstmöglichen Packungsdichten Φ_{\max} in Abhängigkeit von der Anzahl der Komponenten n dargestellt. Die für die komplette Ausfüllung der jeweiligen Hohlräume erforderlichen Mengenanteile lassen sich aus der Gleichung 2.10 berechnen. Der Anteil der Füllkomponenten muss dabei schrittweise exponentiell verringert werden [57].

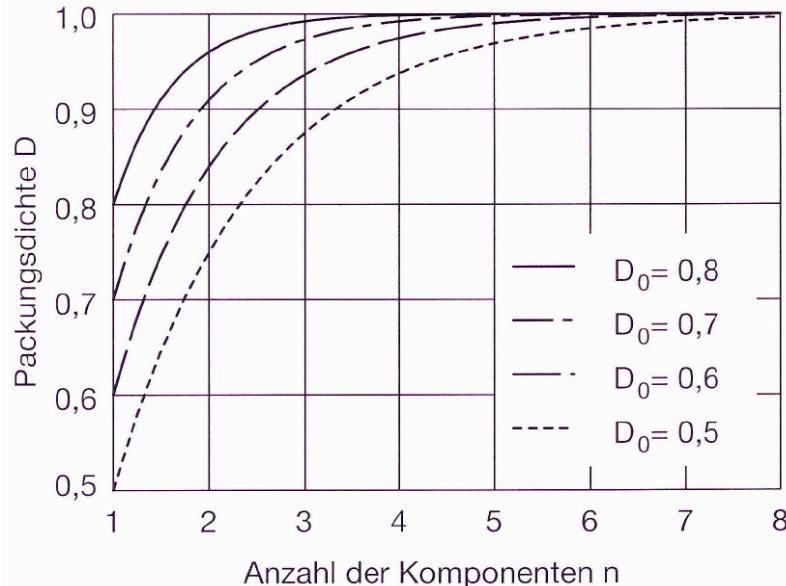


Bild 2.24: Einfluss der Anzahl der Partikelkomponenten n auf die Packungsdichte Φ [57]

Partikelgemische ohne Teilchenbehinderung haben jedoch für die Kalksandsteinproduktion keine praktische Bedeutung oder können nur mit aufwändig erzeugten Korngemischen entstehen.

b) Partikelgemische mit Teilchenbehinderung

RESCHKE unterscheidet Partikelgemische mit und ohne **Teilchenbehinderung**. Teilchenbehinderungen können durch Störungseffekte bestimmter Teilchenkomponenten auftreten [57] oder durch begrenzende Wände zustande kommen [97] (siehe Abschnitt 2.2.4 "Wandeffekt"). DE LARRAD unterscheidet bei binären Packungen drei Fälle der **Wechselwirkung** zwischen den zwei Komponenten [86]. Diese beiden Ordnungsansätze werden aufgrund ihrer Überlagerung nachfolgend ineinandergreifend erläutert: Unter Teilchenbehinderung versteht man der Effekt, der auftritt, wenn ein feineres Partikel nicht in den Zwischenraum der groben Partikel hineinpasst und diese auseinanderdrängt. Die mengenmäßige Zusammensetzung der groben und feinen Partikel hat einen entscheidenden Einfluss auf das Gesamtvolumen der Partikelmischung. Bild 2.25 aus [81, 114] verdeutlicht die Zusammenhänge. Es sind drei Fälle zu unterscheiden:

- **Fall 1: Der Feinkornanteil dominiert.**
Ist der Anteil feiner Partikel zu hoch, werden die groben Partikel auseinander gedrängt. Die Grobkörner "schwimmen" im Feinkorn. [57].
- **Fall 2: Der Grobkornanteil dominiert.**
Ist der Anteil feiner Partikel zu gering, verbleiben unausgefüllte Hohlräume im Grobkorngerüst. [57].
- **Fall 3: Maximale Packungsdichte**
Füllt der Anteil der feinen Partikel gerade den Hohlraum zwischen den groben Partikeln aus, liegt für diese zwei betrachteten Komponenten ein Packungsdichtemaximum vor. Dieser Sonderfall ist zudem ein Partikelgemisch ohne Teilchenbehinderung [57, 91].

Die Formeln für die Berechnung der Packungsdichten zu den drei zu unterscheidenden Fällen sind in [86] wiedergegeben.

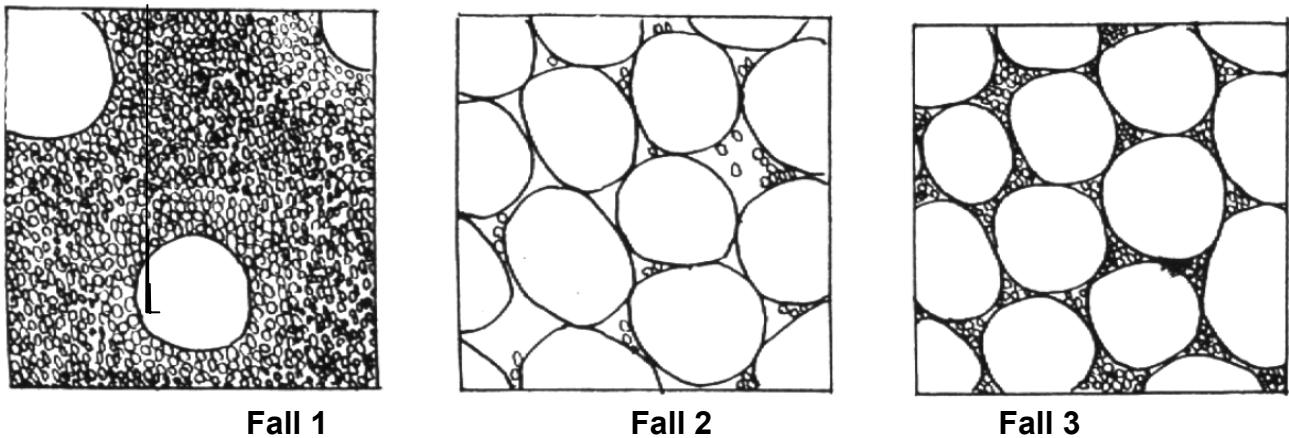


Bild 2.25: Einfluss des Volumenverhältnisses auf die Packungsdichte Φ bei einer Binärpackung [78, 114]

In [91] wird dies exemplarisch anhand von Mischungen zweier unterschiedlich feiner Quarzmehle belegt. In Experimenten konnte eine um rd. 5,5 Vol.-% höhere Packungsdichte erzielt werden, wenn die Mehle im Verhältnis 30 : 70 zusammengemischt wurden, siehe dazu Bild 2.26. Mit der Packungsdichteerhöhung ergibt sich ebenfalls eine deutliche Festigkeitssteigerung des Betons. Durch diese gezielte Zusammensetzung könnte z.B. in 1 m³ Beton ein Hohlraumgehalt von 55 dm³ gefüllt werden, wenn die Quarzmehle als Zusatzstoffe eingesetzt werden.

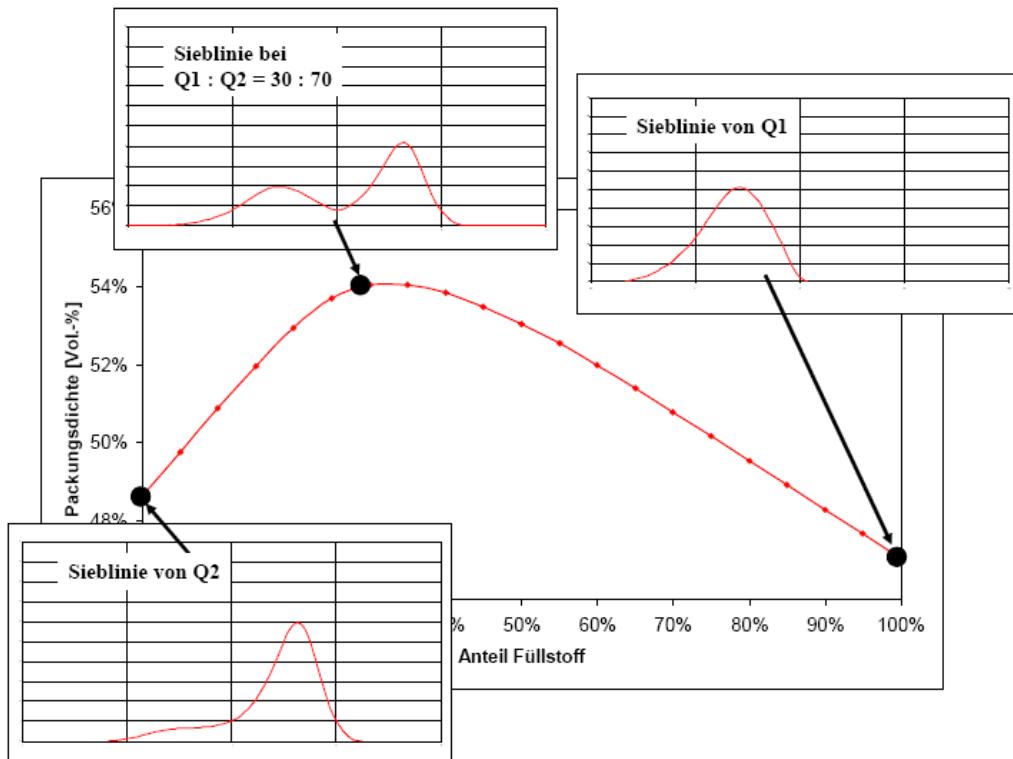


Abb. 2.2: Einfluss unterschiedlicher Kornverteilungen auf die Packungsdichte
(Mischung aus zwei Quarzmehlen mit $d'_{Q1} = 2,9 \mu\text{m}$ und $d'_{Q2} = 42,0 \mu\text{m}$) [3]

Bild 2.26: Beispiel zum Einfluss unterschiedlicher Kornverteilungen auf die Packungsdichte [91]

DE LARRAD [86] unterscheidet bei binären Packungen bezüglich der Verhältnisse der Partikeldurchmesser drei Fälle der Wechselwirkung zwischen den zwei Komponenten und gibt dort die zugehörigen Berechnungsformeln an, siehe Bild 2.27.

- **Fall A: Keine Wechselwirkung: $d_1 >> d_2$**

Die beiden Komponenten sind aufgrund des Verhältnisses der Partikeldurchmesser $d_1 >> d_2$ ohne Wechselwirkung, siehe Bild 2.27a.

A1: Die Grobfraktion dominiert. Die Position der Grobpartikel wird nicht von den vergleichsweise wenigen Feinkornpartikeln beeinflusst.

A2: Die Feinfaktion dominiert. Die Grobfraktion "schwimmt" in der Feinfaktion.

- **Fall B: Teilweise Wechselwirkung: $d_1 > d_2$**

Binärpackungen mit teilweiser Wechselwirkung treten bei der Kalksandsteinproduktion häufig auf. Zwei Effekte stellen infolge der Wechselwirkungen ein. Das Korngrößenverhältnis ist definiert als $d_1 > d_2$. Siehe Bild 2.27b.

B1: Dominiert die grobe Komponente und die feineren Partikel passen nicht in die Hohlräume zwischen den groben Partikeln so werden die groben Körner auseinander gedrängt.

B2: Dominiert die feine Komponente, lassen sich in unmittelbarer Nähe der Grobkörper aufgrund des sog. "Wandeffektes" (siehe Abschnitt 2.3.5) die feinen Partikel nicht ungehindert dicht packen.

- **Fall C: Volle Wechselwirkung: $d_1 = d_2$**

Bei binären Packungen liegt eine vollständige Wechselwirkung vor, wenn der Partikeldurchmesser identisch ist ($d_1 = d_2$) und die Packungsdichten dieser beiden Komponenten unterschiedlich sind. Die beiden Kornfraktionen können durch eine Sedimentation getrennt werden und beeinflussen sich nicht in ihrer Lage, siehe Bild 2.27-C. In der Kalksandsteintechnologie kommt der Fall mit voller Wechselwirkung nicht vor, weil in diesem Fall die Porosität zu groß ist und die Kalkdosis unwirtschaftlich hoch würde.

DE LARRARD verwendet folgende abweichende Formelzeichen [86]:

d_1 :	Durchmesser der Fraktion 1
d_2 :	Durchmesser der Fraktion 2
γ :	Packungsdichte des Gesamtgemisches [Vol.-%]
$F_{v,i}$:	Feststoffgehalt der Fraktion i
β_1 :	Packungsdichte der groben Fraktion
β_2 :	Packungsdichte der feinen Fraktion
y_1 :	Volumenanteil der groben Fraktion
y_2 :	Volumenanteil der feinen Fraktion
a_{12} :	Auflockerungs-Koeffizient
b_{12} :	Wandeffekt-Koeffizient

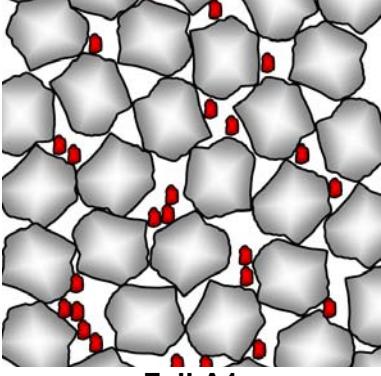
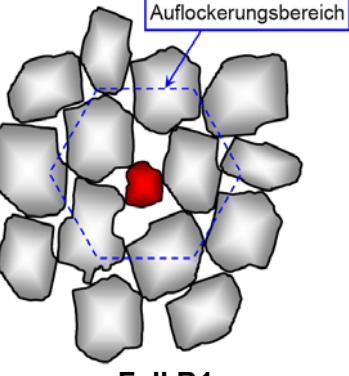
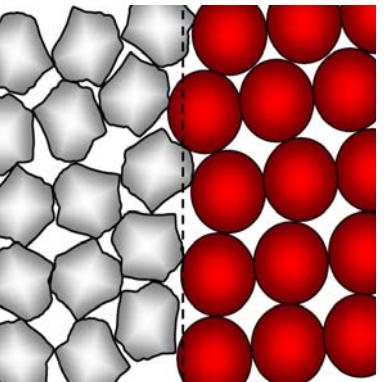
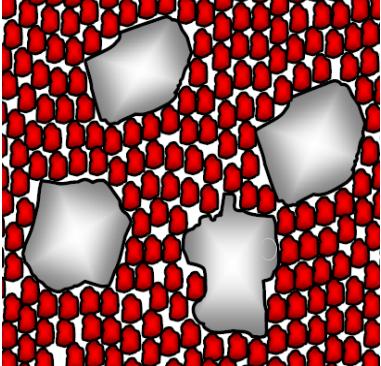
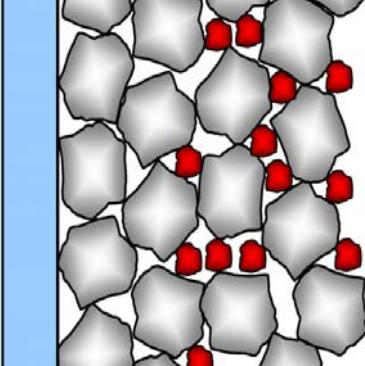
Fall A: Keine Wechselwirkung $d_1 \gg d_2$	Fall B: Teilweise Wechselwirkung $d_1 > d_2$	Fall C: Volle Wechselwirkung $d_1 = d_2$
 <p>Fall A1 Dominanz der Grobfraktion: Die Position der Grobpartikel wird nicht von den Feinpartikeln beeinflusst.</p> <p>Berechnung der Packungs-dichte: (Gleichungen 2.11 und 2.12)</p> $\gamma = \frac{\sum_{i=1}^2 F_{v,i}}{V}$ $\gamma = \gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - y_2} = \frac{\beta_1}{y_1}$	 <p>Fall B1 Dominanz der Grobfraktion: Auflockerungseffekt um ein feines Korn</p> <p>Berechnung der Packungs-dichte: (Gleichung 14)</p> $\gamma = \frac{\beta_1}{1 - \left(1 - a_{12} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right)\right) y_2}$	 <p>Die Packungsdichten sind unterschiedlich.</p> <p>Berechnung der Packungs-dichte: (Gleichung 2.16)</p> $\gamma = \frac{\beta_1}{1 - \left(1 - \left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right)\right) y_2}$
 <p>Fall A2 Dominanz der Feinfaktion: Die Grobfraktion "schwimmt" in der Feinfaktion</p> <p>Berechnung der Packungs-dichte: (Gleichung 2.13)</p> $\gamma = \gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - (1 - \beta_2) y_1}$	 <p>Fall B2 Dominanz der Feinfaktion Wandeffekt: keine dichte Feinkornpackung in der Nähe der Wand möglich</p> <p>Berechnung der Packungs-dichte: (Gleichung 2.15)</p> $\gamma = \gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - \left[1 - \beta_2 + b_{21} \beta_2 \left(1 - \frac{1}{\beta_1}\right)\right] y_1}$	

Bild 2.27: Wechselwirkungsfälle bei binären Packungen nach DE LARRARD [86]

c) Modellierung von Mehrkornpackungen

Mehrkornpackungen verfügen über mehr als zwei Komponenten. Bei der Kalksandsteinherstellung wird lediglich in den seltensten Fällen neben dem Bindemittel Branntkalk eine einzige Sandsorte eingesetzt. In den allermeisten Fällen werden zur Erzielung von hohen Scherbenrohdichten zwei, drei oder sogar 4 verschiedene Gesteinskörnungen verwendet. Insofern sind Kalk-Sand-Rohmischungen als Mehrkornpackungen anzusehen.

Dreikornpackungen

Dreikornpackungen können anschaulich mit Dreiphasendiagrammen dargestellt werden. STANDISH und BORGER stellen in ihrer Arbeit eine Reihe an Dreiphasendiagrammen vor, aus denen die Porosität ausgewählter Dreikornpackungen abgelesen werden können [115]. Ein Beispiel zeigt das Bild 2.28. Das Bereichsfeld mit den höchsten Packungsdichten ergibt sich in diesem Fall, wenn der Volumenanteil der feinsten Komponente ($d = 6 \text{ mm}$) um 50 Vol.-% liegt. Die geringsten Packungsdichten liegen vor, wenn die drei Komponenten separat betrachtet werden. Verallgemeinernde Dreistoffdiagramme sind in dieser Arbeit jedoch nicht entwickelt worden. STOVALL und DE LARRAD haben ein Dreistoffdiagramm entwickelt (Bild 2.29), aus dem die optimale Packungsdichte für Zwei- und Dreistoffsysteme abgelesen werden kann [116]. Nach GEISENHANSLÜKE [22] stimmen dieser Ergebnisse gut mit denen von STANDISH und BORGER überein. Für Zweistoffsysteme können die optimalen Packungsdichten an den mit α' bezeichneter Linien abgelesen werden. Für Dreistoffsysteme gelten entsprechend die mit α'' bezeichneten Flächen. GEISENHANSLÜKE weist darauf hin, dass Anhaben zu den zugehörigen Korngrößenverteilungen der Gesteinskörnungen und zur Kornform fehlen und dass deshalb mit diesem Diagramm lediglich überschlägige Angaben zur Packungsdichte vorgenommen werden können. [22]

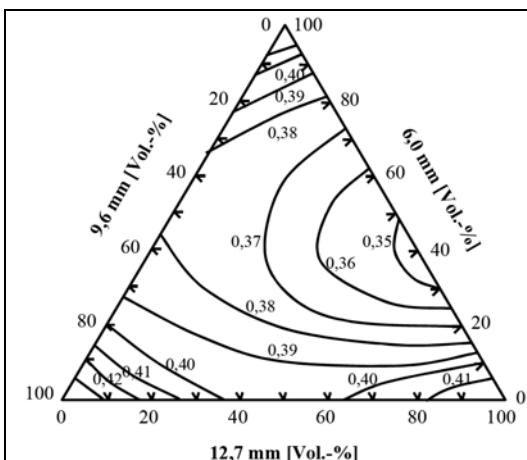


Bild 2.28: Beispiel zur Darstellung der Porosität einer ternären Mischung, [116]

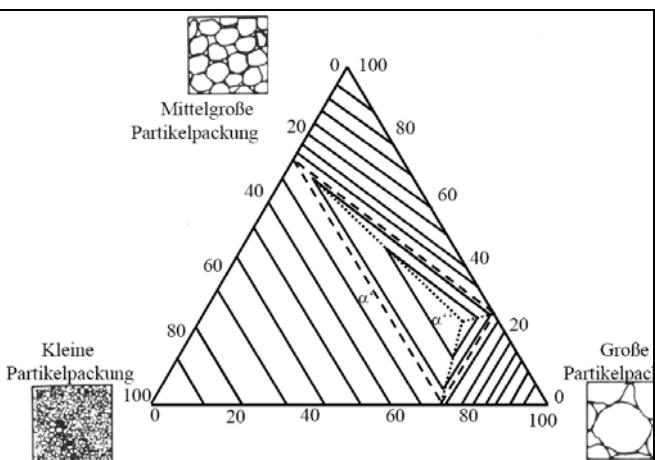


Bild 2.29: Dreiphasendiagramm zur Bestimmung der optimalen Packungsdichte, [116]

Maximale Packungsdichte bei einer 4-Komponenten-Packung

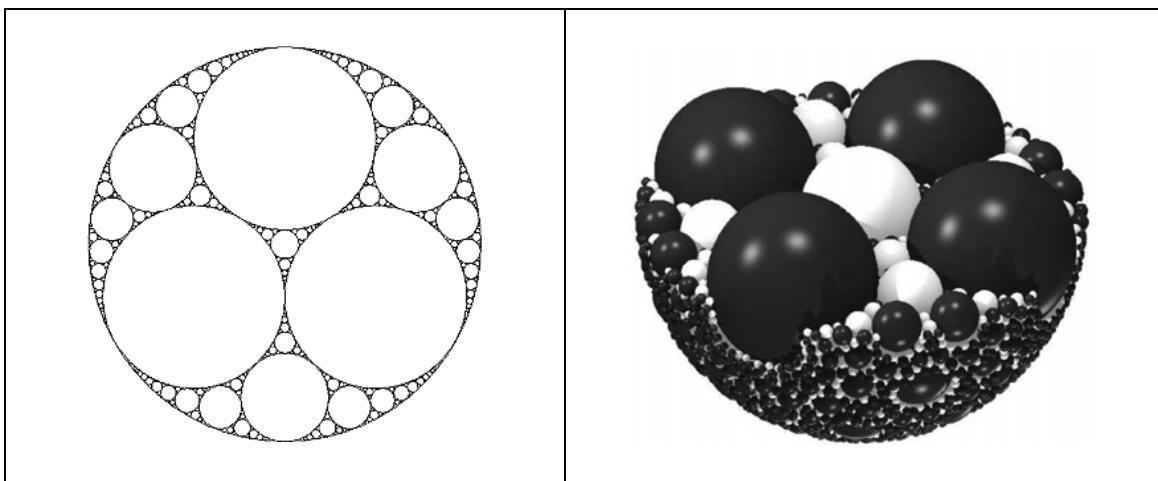
Ein eindrucksvolles Beispiel zur Packungsdichteberechnung von Kugeln unterschiedlicher Durchmesser liefert Mc GEARY. Er fand mit seinen Berechnungen für eine Vier-Komponenten-Packung, dass eine theoretisch/rechnerisch maximale Packungsdichte von $\Phi = 95,1$ erreicht werden konnte, wenn die Verhältnisse der Kugeldurchmesser folgende Abstufung aufweisen und die Volumenanteile der Einzelkomponenten wie folgt gewählt sind [111], siehe Tabelle 2.5.

Verhältnis der Kugel-durchmesser [-]	Volumenanteile der Komponente [Vol.-%]
1	6,1
7	10,2
38	23,0
316	60,7
Summe	100,0

Tabelle 2.5: Parameter für die Erzeugung einer maximalen Packungsdichte aus vier verschiedenen Kugel-Komponenten [111]

Ideale Apollonische Packungen

In der theoretischen Mathematik wird die sog. "Ideale 2-D- / 3-D-Packung" (Apollonische Kreispackung) beschrieben [117 bis 120]. Sie entsteht aus einer Folge von Kreisen stufenweise kleiner werdender Radien, die innerhalb eines vorgegebenen Kreises plaziert werden. Dabei werden die Durchmesser den nächst kleineren Kreise jedes mal so ausgewählt, dass diese gerade den durch die nächst größeren Kreise entstandenen Hohlraum ausfüllen und diese tangential berühren. Durch ein fortschreitendes Vorgehen - theoretisch bis ins Unendliche fortlaufend - entsteht stufenweise eine Annäherung an eine vollständige Ausfüllung der Ausgangskreisfläche. Das Porenvolumen strebt gegen Null. Die Anzahl der Kreise bzw. Kugeln zu Beginn des Füllvorgangs ist theoretisch unbegrenzt. Dem zweidimensionalen Modell steht ein dreidimensionales Kugelmodell mit einer kompletten Raumausfüllung (Packungsdichte $\Phi = 100 \text{ Vol.-%}$) gegenüber. Das Bild 2.30 zeigt beispielhaft eine Apollonische Kreispackung mit drei gleich großen Ausgangskugeln. Das Bild 2.31 veranschaulicht exemplarisch eine dreidimensionale "Bruchfläche" in einer Apollonischen Kugelpackung.



Bilder 2.30 und 2.31:

links: 2-D-Apollonische Kreispackung, Ausgangsbasis: 3 Kreis-System

rechts: 3-D-Apollonische Kugelpackung, Ausgangsbasis: 4 Kugel-System [117 bis 120]

Das nachfolgende Bild 2.32 zeigt ergänzend den sukzessiven Ausfüllvorgang in einem Zwickel zwischen drei Kreisflächen (hellgrau).

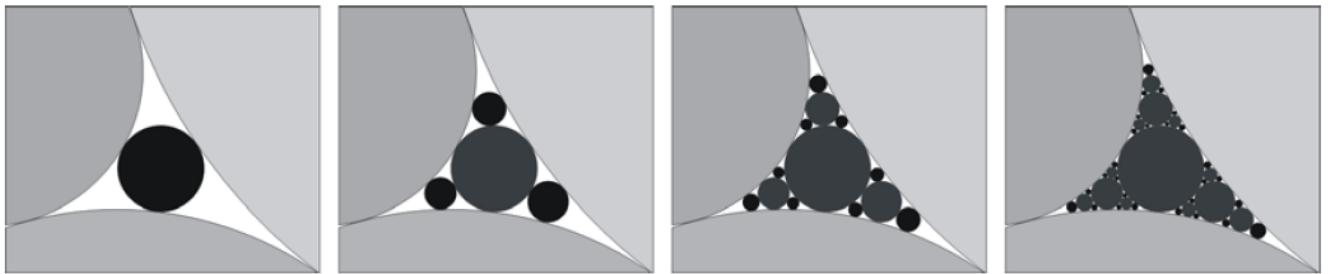


Bild 2.32: Stufenweise Ausfüllung eines Hohlraums zur Erzeugung einer Apollonischen Packung [121]

Das Bild 2.33 zeigt eine stufenweise Ausschnittvergrößerungen aus einer Kreisflächenpackung, die die Ausfüllung des Hohlraums zwischen größeren Kreisen durch kleinere Kreise illustriert [122]. Über vergleichbare Untersuchungen an Kugeln wird in [123, 124] berichtet.

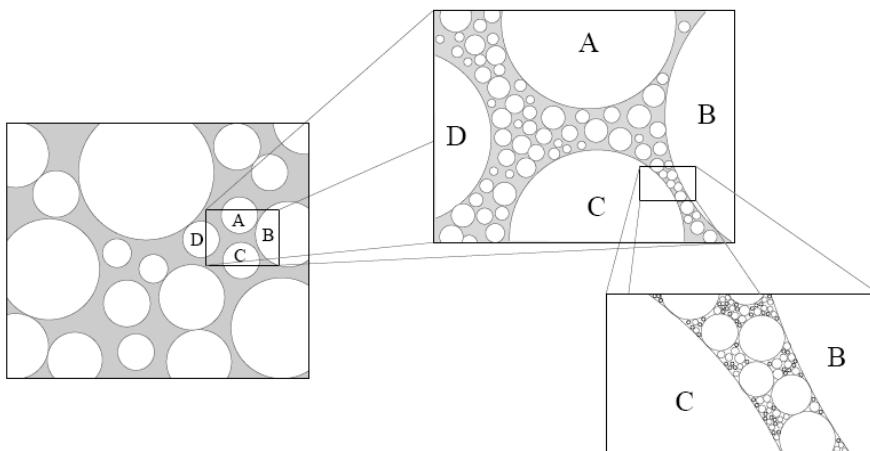


Bild 2.33: Stufenweise Vergrößerung des Gefüges [113]

2.2.6 Kornform und der Packungsdichte

Die Kornform hat einen deutlichen Einfluss auf die Packungsdichte von Partikelgemischen. So lassen sich runde Partikel einfacher als splittrige oder plattige Partikel verdichten [125]. Macht und NISCHER zeigen auf, dass bei kugeligen Partikeln weniger Feinstoff benötigt wird als bei nicht-kugeligen Partikeln, um die gleiche Packungsdichte zu erreichen [126]. GEISENHANSLÜKE unterscheidet in [22] die Kornform grober und feiner Gesteinskörnungen von der Kornform von Feinststoffen (hier: Füller, Kalk).

2.2.6.1 Kornform von groben Gesteinskörnungen

SYBERTZ ermittelte, dass bei Kugelmischungen eine wesentlich größere Packungsdichte erreicht werden konnte als bei Sanden gleicher Korngrößenverteilung, die keine kugelige Form haben [127]. RAO und JAMKAR zeigten auf, dass der Wasseranspruch bei Gesteinskörnungen mit zunehmender Abweichung von der idealen Kugelform ansteigt. Um eine gleich gute Verarbeitbarkeit zu erzielen, muss bei Verwendung von gebrochenen Gesteinskörnungen im Vergleich zu runden Körnern eine größere Menge an Feinmaterial zugegeben werden [128]. GEIKEN et al bestätigen diese Ergebnisse und zeigen auf, dass Betone mit gebrochener Gesteinskörnung eine vergleichsweise schlechtere Verarbeitbarkeit aufweisen als Betone mit runder Gesteinskörnung [129].

Hinweise zum Zusammenhang zwischen der Kornform und der Packungsdichte geben STARK und MÜLLER sowie GRAUBNER und PROSKE. In [130] wird erläutert, dass die Packungsdichte von der Breite der Korngrößenverteilung (Parameter = Fullerexponent n) und der Kornform abhängt. Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass die Einflüsse der Kornform und der Korngrößenverteilung sich überlagern, und dass diese Einflüsse nur gefunden werden können, wenn jeweils eine Einflussgröße konstant gehalten wird. Das nachfolgende Bild 2.34 zeigt den Zusammenhang zwischen der Packungsdichte und dem Fullerexponenten n ("Steilheit" der Korngrößenverteilung) mit der Sphärizität SPHT als beschreibenden Kornformparameter. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,7.

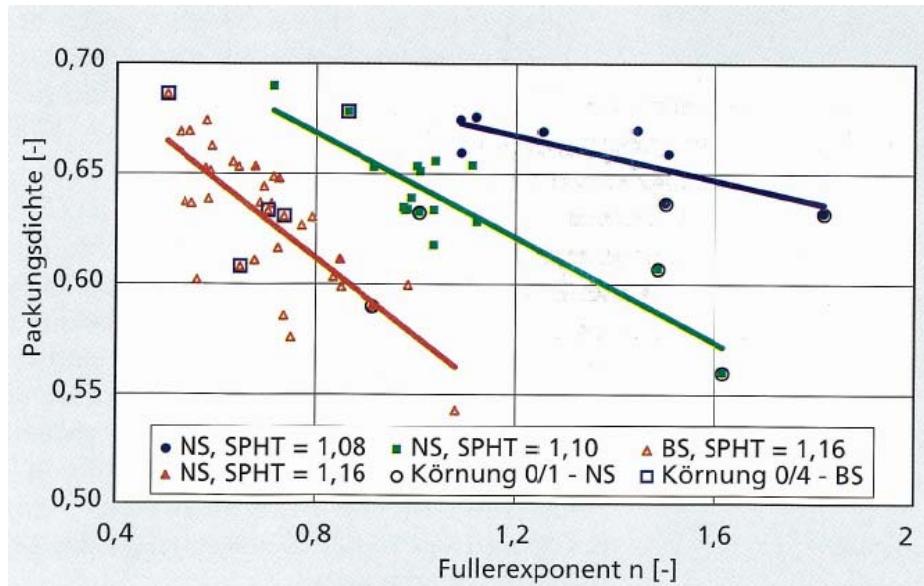


Bild 2.34: Zusammenhang zwischen der Packungsdichte und dem Fullerexponent n für die in [130] untersuchten Natur- und Brechsande (Kornformparameter = SPHT)

STARK und MÜLLER leiten aus den von ihnen gewonnenen Zusammenhängen an Natur- und Brechsanden ab, dass bei konstanter Kornform die Packungsdichte mit sinkendem Fullerexponenten steigt. In der Kalksandsteinindustrie ist dies als empirischer Zusammenhang ebenfalls bekannt: mit breiter werdendem Kornband steigt die erreichbare Packungsdichte. Dies gilt unabhängig von der Korngröße der Verteilung. Andererseits steigt die Packungsdichte bei Sanden mit konstantem Fullerexponenten n mit sinkenden Sphärizitätswerten.

- Natursande: Somit können hohe Packungsdichten bei Natursanden mit engen Korngrößenverteilungen (Hoher Wert des Fullerexponenten n) und einer gut gerundeten Kornform (= niedrige SPHT-Wert) erreicht werden.
- Brechsande: Mit Brechsanden lassen sich gleich hohe Packungsdichten mit breiten Verteilungen (= niedrige n-Werte) trotz kantiger Formen (= hohe SPHT-Werte) erzielen. Die ungünstigere Kornform der Brechsande kann durch eine breitere Korngrößenverteilung kompensiert werden.

Diese Erkenntnisse werden von GRAUBNER, PROSKE und RUMGE bestätigt. Im Rahmen ihrer Untersuchungen zum Einfluss von Gesteinskörnungen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften von selbstverdichtendem Beton wurden feine und grobe Gesteinskörnungen unterschiedlicher Zusammensetzung mit Korndurchmessern von 0,125 mm bis 32 mm berücksichtigt.

Dabei konnten Korrelationen zwischen dem Kornformparameter Sphärizität (SPHT), der Korngröße und der Kornform gefunden werden, siehe Bild 2.35. Die Autoren stellen fest, dass die berechnete Packungsdichte tendenziell mit steigendem SPHT-Wert abnimmt. Die Oberflächenrauigkeit hat lediglich einen zweitrangigen Einfluss [53]. Die Autoren leiten aus den Versuchsdaten einen Zusammenhang zwischen der Packungsdichte und der gemessenen Sphärizität ab. Sie definieren die sog. "virtuellen Packungsdichte", die den Einfluss der Korngröße berücksichtigt. Es gilt:

$$\beta_i = 0,8 - (1,46 - 0,27 \times \ln [d_m]) \times (\text{SPHT}-1) \quad [-] \quad (\text{Gleichung 2.17})$$

mit:

β_i : virtuelle Packungsdichte [Vol.-%]
 SPHT^* : wirksame Sphärizität [1/m]

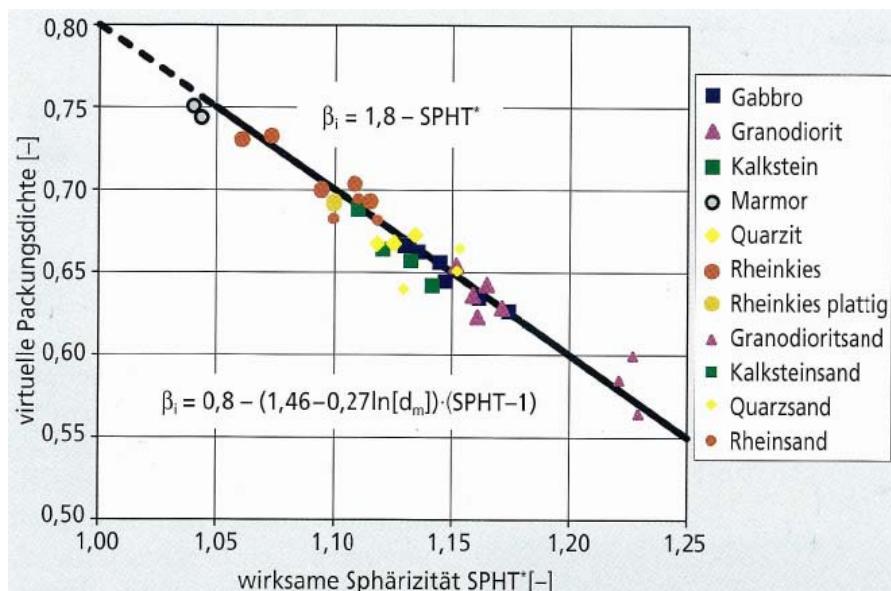


Bild 2.35: Virtuelle Packungsdichte der Korngruppen in Abhängigkeit des Hilfswertes SPHT* [53]

2.2.6.2 Kornform von Feinstoffen

MIJAJIMA et al stellen in [131] an feineren Gesteinskörnungen ($0,117 \leq d \leq 1 \text{ mm}$) fest, dass sich unter sonst gleichen Bedingungen (Korngrößenverteilung) unterschiedlich hohe Packungsdichten einstellen, die von der Kornform abhängen. Diese Ergebnisse decken sich mit den unter Abschnitt 2.2.6.1 dargestellten Effekten der von ihnen untersuchten groben Körnungen. DILEK und LUMING bestätigen diese Erkenntnisse mit Untersuchungen an Sanden innerhalb einer Kornbandbreite von $d = 2$ bis $4,75 \text{ mm}$ [132].

GEISENHANSLÜKE führt in [22] aus, dass es heute möglich ist, mit Hilfe der Mikrocomputertomographie die Form von Zementpartikeln detailliert mit einer Auflösung bis unter $3 \mu\text{m}$ darzustellen. Für Kalke liegen im Hinblick auf die Kalksandsteinproduktion deratige Untersuchungen noch nicht vor. BIGAS und GALLIAS stellen in ihren Untersuchungen zum Wasseranspruch und zur Packungsdichte verschiedene Zement-Zusatzstoff-Mischungen fest, dass sowohl die Kornform als auch die Oberflächentextur und auch die Feinheit der Stoffe einen entscheidenden Einfluss auf den Wasseranspruch und die Packungsdichte haben.

Den geringsten Wasseranspruch besaßen runde Partikel. Mit zunehmender Oberfläche war der Wasseranspruch zum Erreichen einer bestimmten Verdichtbarkeit größer. Zusatzstoffe mit irregulärer Kornform (z.B. Gesteinsmehle) weisen einen wesentlich höheren Wasseranspruch auf als runde Partikel und führen zu entsprechend geringeren Packungsdichten [133]. Diese Erkenntnisse wurden von ABDULLAH und GELDART an zwei Pulvern unterschiedlicher Feinheit und Kornform bestätigt [134].

2.2.7 Auswahl des Berechnungsmodells

Die in der Literatur genannten Packungsdichtemodelle beruhen auf Mischungsrechnungen mit einer festgelegten Anzahl an Komponenten unterschiedlicher Korngrößenverteilungen, deren Hohlraumanteil vor der Berechnung experimentell aufwändig und unter Inkaufnahme der von prüftechnischen Unsicherheiten bestimmt werden muss [114, 134 bis 139]. Da Ungenauigkeiten, Abweichungen und Unstetigkeiten bei der Angabe von Korngrößenverteilungen große Auswirkungen auf die Packungsdichteberechnung haben können, sollte der Kurvenverlauf der Gesteinskörnungen idealerweise als Funktion vorliegen [22, 57, 106]. Die in der Kalksandsteinindustrie vorliegenden Korngrößenverteilungen der verwendeten Gesteinskörnungen liegen nicht als Funktionen vor.

Deshalb muss für die Packungsdichteberechnung ein Modell ausgewählt werden, welches unabhängig von bestimmten Verteilungsfunktionen einsetzbar ist und auch unstetig verlaufende Sieblinien (z.B. Ausfallkörnungen) korrekt berücksichtigen kann [57]. Von verschiedenen, dieser Anforderung genügenden Modellen [80, 101, 102, 103, 123, 124, 138] wurde das **Modell von SCHWANDA** ausgewählt. Dieses Modell wurde auch in den Arbeiten von GEISENHANSLÜKE und RESCHKE aufgegriffen [22, 57] und hat sich bereits bei verschiedenen anderen Untersuchungen bewährt [136, 140]. Neben der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung werden für die Berücksichtigung der Kornform und der Oberflächenrauigkeit zwei weitere Parameter benötigt. Dies sind der Hohlraumgehalt der Einkornschrüttung k und die Reichweite der Teilchenbehinderung w , vergleiche Abschnitt 2.2.5.2. Diese Werte wurden von RESCHKE anhand der granulometrischen Kennwerte der Stoffe (Korngrößenverteilung, spezifische Oberfläche und Kornform) rechnerisch abgeschätzt. Für den Rahmen dieser Untersuchungen wurden folgende Werte festgelegt, die aus [57] entnommen wurden. Diese Werte haben sich für die weitgehend sphärischen Kornformen der Gesteinskörnungen der Kalksandsteinindustrie als geeignet erwiesen und passen ebenfalls zu den für diese Untersuchungen eingesetzten Stoffen.

- Hohlraumanteil der Einkornschrüttung: $k = 0,82$
- Reichweite der Teilchenbehinderung: $w = 2,0$

2.2.8 Beschreibung des Berechnungsverfahrens

Das Berechnungsverfahren 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 **Beikörner** kleiner oder gleich dem Hohlraumvolumen der Grundkornpackung, wodurch sich das Gesamtvolume der Mischung nicht ändert, die Packungsdichte jedoch erhöht wird. Im zweiten Fall wird das Gesamtvolume durch das Volumen der hinzugefügten Partikel erhöht, womit die Grundkornpackung auseinandergedrängt wird, siehe Bild 2.37. Einzelheiten sind in [57] und [80, 101, 102, 103] zusammengefasst.

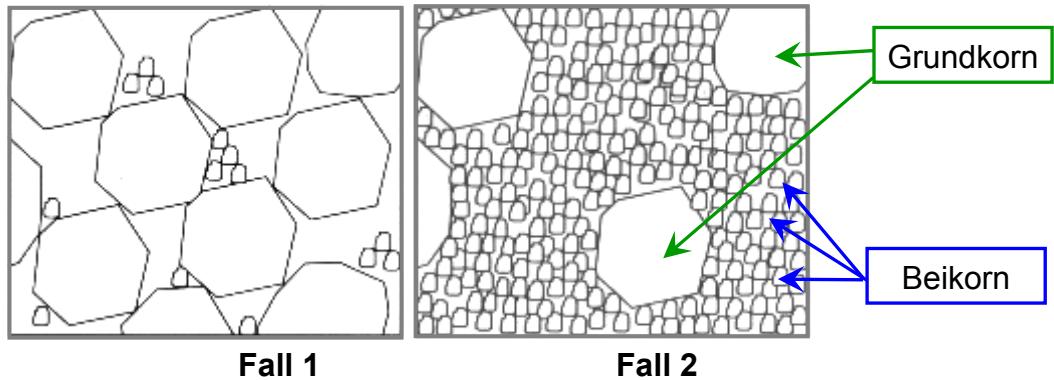


Bild 2.37: Einfluss des Anteils der Feinkornfraktion in einer Zweikornmischung

Zusätzlich besteht in einem Übergangsbereich zwischen Fall 1 und 2 ein teilweises Auseinanderdrängen des Grundkorngerüstes. Mit der Reichweite der Teilchenbehinderung wird der Einfluss der Kornform bzw. des Größenverhältnisses berücksichtigt (siehe Abschnitt 2.3.6.2.2). Ein kleiner Verhältniswert zwischen den zwei betrachteten Korngruppen sagt aus, dass eine Teilchenbehinderung in Form eines Auseinanderdrängens stattfindet. Berechnet wird die mögliche Vergrößerung des Gesamtvolumens der Partikelmischung.

Bezogen auf eine Kornmischung mit einer bekannten, beliebig fein unterteilten Korngrößenverteilung wird jede Korngruppe mit den anderen Korngruppen verrechnet, so dass eine Berechnungsmatrix entsteht. Jeder der Kornklassen wird vereinfachend als Einkornschüttung betrachtet. Als Beispiel sei eine Kornmischung in 5 Korngruppen unterteilt. Somit werden 25 Berechnungen durchgeführt, die jeweils den Einfluss der Beikörner auf die 5 Grundkörner und damit das Volumen der Gesamtmasse wiedergibt. In [57] sind dazu Rechenbeispiele aufgeführt.

2.2.9 Übertragbarkeit auf die Kalksandstein-Technologie

Der für die Produktionspraxis der Kalksandsteinherstellung relevanten Korngrößenbereich ($d = 0,036 \text{ mm}$ bis $d = 6,3 \text{ mm}$) kann mit einer entsprechenden Modellierung abgedeckt werden. Eine völlig dichte Packung ohne jegliche Porosität ist aus den nachfolgend genannten technischen Gründen nicht erzeugbar und aus technischen Gründen nicht sinnvoll. Eine komplette Raumausfüllung, d.h. ein Gefüge ist aus folgenden Gründen nicht möglich:

1. Insbesondere im Feinstkornbereich ($\varnothing < 0,112 \text{ mm}$) wirken zusammen mit dem vorhandenen Wasser (Pressfeuchte: $F_p = 5 \pm 1,5 \text{ M.-\%}$) interpartikuläre Kräfte (Adhäsion und Kohäsion), durch die ein fortschreitendes Ausfüllen der Hohlräume verhindert wird. Dabei haften feinste Partikel an der Oberfläche größerer Gesteinskörner und stehen damit nicht für die ihnen zugesetzte Hohlräumfüllung zur Verfügung. Durch den Agglomerationseffekt haften feine Partikel bereits beim Mischen an größere Partikel, so dass die theoretische Kornverteilung verändert wird.
2. Die Bewegung der zahllosen einzelnen Gesteinskörner während des Verdichtungsvorgangs ist hochkomplex und nicht technisch steuerbar. Eine gezielte Positionierung aller Gesteinskörner auf ihre optimalen Positionen ist deshalb nicht möglich.

3. Für den Transport des gespannten Wasserdampfes in die zu härtenden Steinrohlinge ist eine Mindestporosität erforderlich ($V_{\min} \approx 10$ Vol.-%). Im Fall einer Unterschreitung der Mindestporosität kommt es infolge einer nicht ausreichenden Ausbreitung der erforderlichen Reaktionstemperatur im Kern der Rohlinge ($T_{\min} = 150$ °C) zu einer Verschlechterung der Ausbildung der Calciumsilikathhydrate mit der Folge deutlicher Festigkeitseinbußen [74].
4. Ebenfalls ist die Porenradienverteilung in den Rohlingen wichtig. Je kleiner der mittlere Porenradius ist, desto größer ist der Diffusionswiderstand für den in die Rohlinge eindringenden Dampf.

Diese Überlegungen decken sich mit den Untersuchungsergebnissen aus [141]. Die im Rahmen der Optimierungsversuche ermittelte maximale Packungsdichte liegt erwartungsgemäß nicht bei den theoretischen 100 Vol.-%, sondern maximal bei rd. 80 Vol.-%.

2.3 Interpartikuläre Kräfte

2.3.1 DLVO-Theorie

Kalk-Sand-Rohmischungen werden mittels hydraulischen Pressen verdichtet. Auf die Partikel einer Kalk-Sand-Rohmischung wirken beim Verpressvorgang neben der sehr hohen Presskraft ($F_{\max} = 12.000$ kN) Gravitationskräfte und interpartikuläre Kräfte. Je nach Partikeldurchmesser liegt ein unterschiedliches Verhältnis dieser Kräfte vor. Während grobe Gesteinskörnungen (gemäß Modellvorstellung definiert: Partikeldurchmesser $\geq 0,112$ mm) sich überwiegend durch ihre räumliche Anordnung und kaum durch interpartikuläre Kräfte gegenseitig beeinflussen, dominieren die interpartikulären Kräfte bei den verwendeten Feinstoffen mit Partikeldurchmessern mit $d < 0,112$ mm und kleiner werdendem Durchmesser immer mehr. Bei den Rohstoffen der Kalksandsteinherstellung sind die feinen Stoffe der Kalk und Füller, so dass erdfeuchte Kalk-Sand-Rohmischungen in Anlehnung an [141] als kolloidale Suspension betrachtet werden können. Anziehende und abstoßende Kräfte sind zu unterscheiden. Überwiegen die abstoßenden Kräfte, liegt eine Suspension als "Dispersion" vor. Dominieren die anziehenden Kräfte, wird die Suspension als "verflockt" oder "kumuliert" bezeichnet [142].

Mit Hilfe der DLVO-Theorie (benannt nach DERJAGUIN, LANDAU, VERWEY, OVERBEEK) kann das Verhalten von Kalk-Sand-Rohmischungen beschrieben werden [143, 144]. Diese Theorie ist eine theoretische Beschreibung, die sich mit der Stabilität kolloidaler Systeme beschäftigt. Nach dieser Theorie ergibt sich die interpartikuläre Kraft V_T zwischen zwei betrachteten Partikeln aus der Summe der elektrostatischen Abstoßungskraft V_R , der BORN'schen Abstoßungskraft V_B und dem Energieanteil aus den anziehenden VAN-DER-WAALS-Kräften V_A .

$$V_T = V_A + V_R + V_B \quad (\text{Gleichung 2.20})$$

Van-der-Waals-Kräfte V_A

VAN-DER-WAALS-Kräfte sind Anziehungskräfte zwischen Molekülen, die durch ungleichmässige (asymmetrische) Ladungsverteilungen innerhalb deren Elektronenhülle entstehen. Van-der-Waals-Kräfte haben nur eine sehr geringe Reichweite und sind deutlich schwächer als die bei Atom- oder Ionenbindungen auftretenden Kräfte.

$$V_A = A / 12^x (a / d) \quad (\text{Gleichung 2.21})$$

mit:

- A:** HAMAKER-Konstante (materialabhängig) [J]
- a:** Partikelradius [m]
- d:** Abstand zweier Teilchen [m]

LAGALY et al [145, 146] geben für Partikel in wässrigen Suspensionen die in der nachfolgenden Tabelle 2.9 aufgeführten Werte für die HAMAKER-Konstante an:

Verbindung	Hamaker-Konstante [10^{-20} J]
SiO_2	1,7
Al_2O_3	4,2
MgO	1,8
CaCO_3	2,2
Zementpartikel	0,168

Tabelle 2.9: HAMAKER-Konstante [146]

Die HAMAKER-Konstante für CaCO_3 ist etwas größer als die von SiO_2 , so dass nach [22] auch die anziehend wirkenden VAN-DER-WAALS-Kräfte bei gleicher Partikelgröße für CaCO_3 entsprechend größer ausfallen muss. In der Folge werden die CaCO_3 -Partikel stärker angezogen, was zu einer entsprechend größeren Agglomeration führen muss.

BORN'sche Abstoßungskräfte V_B

Die BORN'schen Abstoßungskräfte wirken bei sehr kleinen Abständen oder direktem Kontakt von Teilchen und können in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden.

Elektrostatische Abstoßungskräfte V_R

Partikel in einem polaren Medium (z.B. Wasser, Wassermoleküle = Dipole) verfügen über eine elektrische Oberflächenladung, aus der eine gerichtete Anordnung der im Wasser befindlichen Ionen resultiert. Gleichartig geladene Teilchen stoßen sich gegenseitig ab und entgegengesetzt geladene Teilchen ziehen sich an. Dies führt zur Ausbildung einer elektrischen Doppelschicht mit der Folge elektrostatisch abstoßender Kräfte zwischen den Partikeloberflächen [145, 146]. Die Doppelschicht setzt sich aus zwei Einzelschichten zusammen, Bild 2.38:

- 1) schmale Innenschicht, sog. "Sternschicht" aus entgegengesetzt geladenen, oberflächlich adsorbierten Ionen. Auf ihrer Außenseite wirkt das sog. "Stern-Potenzial" Ψ_d .
- 2) breitere Außenschicht, sog. "Diffusionsschicht", in der die Anzahl entgegengesetzt geladener Teilchen mit zunehmendem Abstand von der Partikeloberfläche abnimmt. Das Potenzial ψ in dieser Schicht wird mit der "POISSON-BOLTZMANN-Gleichung" beschrieben und fällt mit zunehmender Entfernung von der Partikeloberfläche exponentiell ab.

Die Oberflächenladung (Zeta-Potenzial [mV]) hängt vom pH-Wert ab [143]. GEISENHANSLÜKE schildert in [22], dass bei angemischten Zementleimen, die stets einen hohen pH-Wert ($\approx 13,5$) aufweisen, mit einer Änderung der Oberflächenladungen zu rechnen ist. Beispielsweise kann im sauren Bereich ein Protonenüberschuss zu einem positiven Zeta-Potenzial beitragen. Das Fließverhalten einer Suspension wird vom Zeta-Potenzial beeinflusst. Liegt ein negatives oder positives Zeta-Potenzial vor, kommt es zu einer elektrostatischen Abstoßung. Es bilden sich keine Agglomerate und die Suspension weist eine höhere Fließfähigkeit auf als eine Suspension, die deren Partikel ein Zeta-Potenzial von Null aufweisen. Liegen keine abstoßenden Kräfte vor, führt dies zu einer Agglomeratbildung und zu einer geringeren Fließfähigkeit.

Bei der Herstellung von Kalksandsteinen wird Branntkalk verwendet, der pH-Wert liegt in diesem Fall etwa bei 12, so dass für Kalk-Sand-Rohmischungen eine vergleichbare Situation wie bei Zementleimen vorliegt. Bei Quarz liegt der pH-Wert bei $> 3,7$ mit einem negativen Zeta-Potenzial [147]. Das Zeta-Potenzial von Kalkhydratpartikeln (wie auch beim Zement) ist positiv. WITTNEBEN gibt einen Wert 28,9 mV an. Begleitonen (Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Al^{3+} , Si^{4+}) verändern das Potenzial nur in relativ geringem Maße. Alkaliionen wirken potenzialsteigernd, die anderen untersuchten Ionen wirkten mindernd [21].

In Kalk-Sand-Rohmischungen liegen somit Zeta-Potenziale mit unterschiedlichem Vorzeichen vor, so dass es nicht ausschließlich zu Abstoßungsreaktionen kommt. Die elektrostatische Abstoßungskraft V_R ist nachfolgend definiert:

$$V_R = 2 \pi \epsilon_r \epsilon_0 r \psi_d \ln(1 + \exp(-\kappa h)) \quad (\text{Gleichung 2.22})$$

mit:

- ϵ_r : Dielektrizitätskonstante der Suspension [78 für Wasser bei $T = 25^\circ\text{C}$]
- ϵ_0 : absolute Dielektrizitätskonstante [$8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{Jm}$]
- ψ_d : Stern-Potential [-]
- r : Partikelradius [m]
- h : kleinster Abstand der Partikeloberflächen [m]
- κ : Faktor zur Berücksichtigung der Faraday-Konstante, der Boltzmann-Konstante, sowie der Wertigkeit und der Konzentration der Ionen [-]

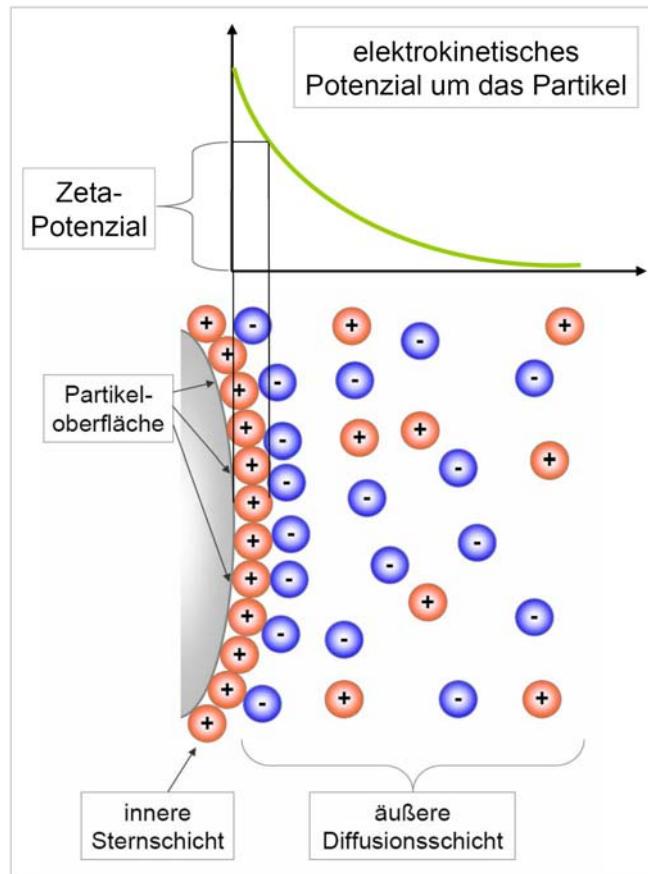


Bild 2.38: Elektrochemische Doppelschicht und Zeta-Potenzial [nach 146, 147, 148]

Die drei Kräfte überlagern sich zu der gesamt wirkenden interpartikulären Kraft V_T , die im nachfolgenden Bild 2.39 graphisch dargestellt ist. Die Kraft V_T sinkt mit zunehmendem Abstand gegen Null ab.

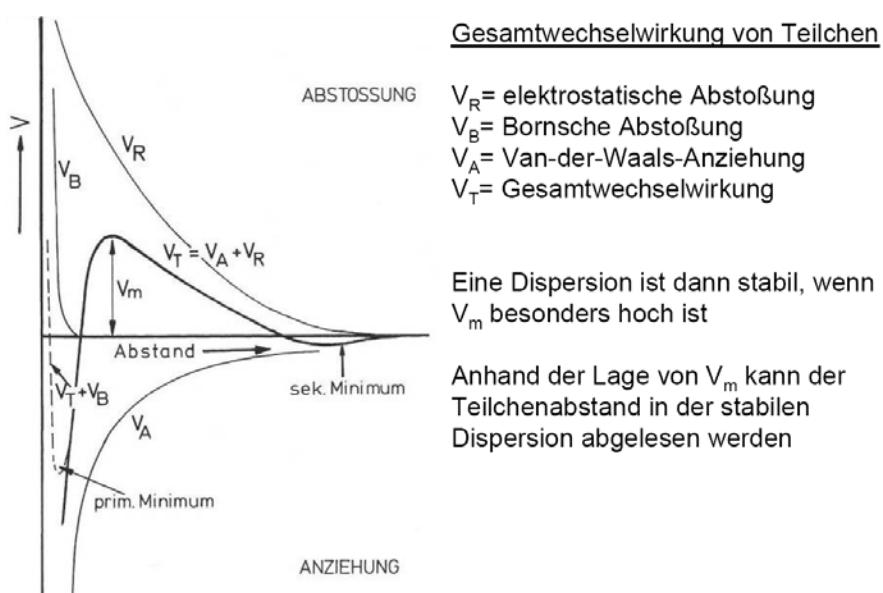


Bild 2.39: DLVO-Theorie - Überlagerung der interpartikulären Kräfte [145, 146]

Eine Möglichkeit zur Steigerung der Packungsdichte beim Verdichtungsvorgang von Kalk-Sand-Rohmassen besteht in der Erhöhung ihrer Fließfähigkeit. Oberflächenladungen sind für den Verdichtungsvorgang von Kalk-Sand-Rohmassen deshalb von Bedeutung, weil deren Fließverhalten unter anderem von den Wechselwirkungen zwischen den Feinstoffpartikeln (Kalk, Gesteinsmehl) und von eventuell verwendeten Fließmitteln beeinflusst wird. Bei großen Abständen tendiert die interpartikuläre Gesamtkraft gegen Null. Mit fortschreitender Annäherung der Partikel untereinander steigt die interpartikuläre Gesamtkraft an. Unter der Voraussetzung, dass die Ladungen der Partikel unterschiedliche Vorzeichen haben, sind nach [22] zwei praxisrelevante Fälle zu unterscheiden:

- Fall 1: Liegen größere interpartikuläre Kräfte vor, kommt es zu einer stärkeren Anziehung der Teilchen und somit zu einer geringeren Fließfähigkeit der Suspension.
- Fall 2: Liegen geringere interpartikuläre Kräfte vor, kommt es zu einer geringeren Anziehung der Teilchen und somit zu einer größeren Fließfähigkeit der Suspension.

Grundsätzlich gilt: In Abhängigkeit von der Ionenkonzentration bilden sich ein primäres und ein sekundäres sowie ein primäres Maximum (sog. Energie-Barriere). Partikel dürfen in einer stabilen kolloiden Suspension nicht verflocken und müssen folglich auf Abstand gehalten werden. Befinden sich die Partikel im sekundären Minimum, überwiegen leicht die anziehenden Kräfte. Der Partikelabstand ist jedoch relativ groß, so dass die Suspension als stabil gelten kann. Um den Partikelabstand weiter verringern zu können, muss zunächst die Energiebarriere (primäres Maximum) durchbrochen werden. Ist dies erreicht, z.B. durch aufgezwungenes Zusammenstoßen der Partikel, nähern sich die Partikel bis auf den geringsten Abstand im primären Minimum und die Partikel verflocken. Eine Suspension ist um so stabiler je größer die zu überwindende Energiebarriere ist. Günstig wirkt dabei eine hohe Oberflächenladung der Partikel [53].

Sterischer Abstoßungseffekt

Eine Möglichkeit zur Steigerung der Packungsdichte beim Verdichtungsvorgang von Kalk-Sand-Rohmassen besteht in der Erhöhung deren Fließfähigkeit. Die Stabilität einer Suspension lässt sich durch den sog. "sterische Abstoßungseffekt" erhöhen. Dabei werden Fließmittel, bestehend aus Makromolekülen mit langen Seitenketten an die Partikelloberflächen angelagert. Die Seitenketten verhindern eine räumliche Annäherung der Partikel durch einen mechanischen Widerstand, der aus der Verformungsbehinderung hervorgerufen wird. In der DLVO-Theorie kann der sterische Widerstand über einen weiteren Summanden (V_S) berücksichtigt werden.

$$V_{\text{tot}} = V_A + V_R + V_B + V_S \quad (\text{Gleichung 2.23})$$

Das Bild 2.40 zeigt verschiedene Überlagerungsfälle der einzelnen Kräfte. Durch die sterische Hinderung kann vermieden werden, dass die Partikel ins primäre Minimum übergehen und verflocken.

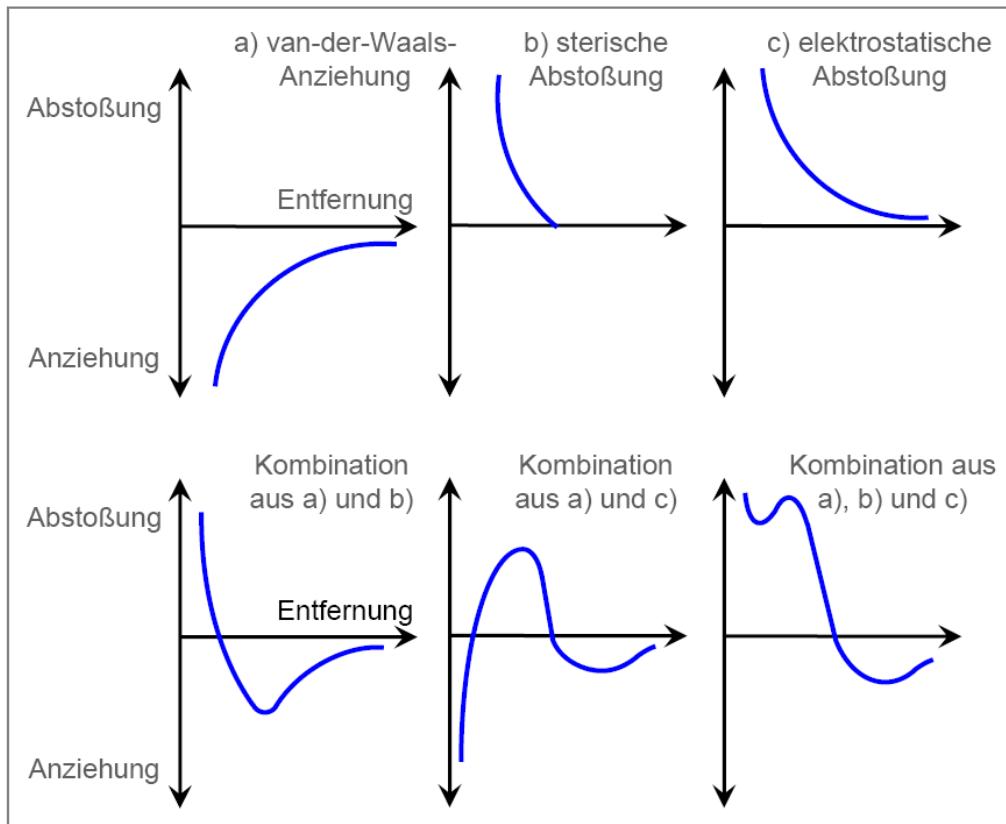


Bild 2.40: Überlagerungsfälle der interpartikulären Kräfte - sterischer Wirkung
[nach 145,146]

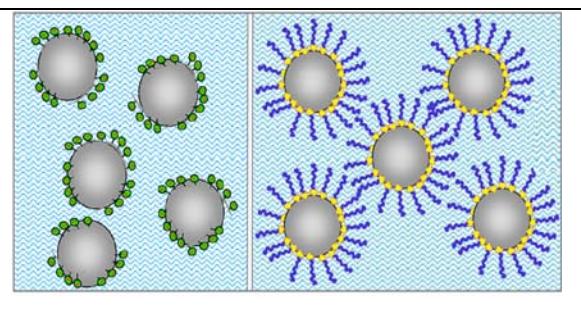
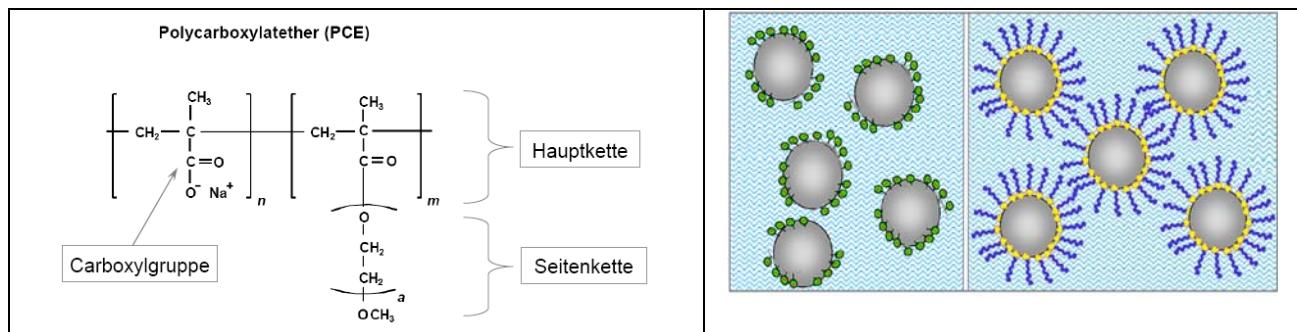
2.3.2 Wirkung von Fließmitteln

Bereits im Jahr 1936 wurden Fließmittel auf der Basis von Naphthalinsulfonat entwickelt, in den 1960er-Jahren folgte die zweite wichtige Rohstoffklasse, das Melaminsulfonat. Bis in die 1990er-Jahre bildeten diese beiden Substanzklassen die Grundlage für nahezu alle Fließmittel. In verschiedenen Konzentrationen und Abmischungen untereinander oder mit Ligninsulfonaten standen dem Betontechnologen eine Vielzahl von Produkten aus diesen beiden Wirkstoffen zur Verfügung. Ihr Einsatzbereich erstreckte sich vom Massenbeton über den Fließbeton bis hin zu Betonen für Fertigteile, Spannbeton und Hochleistungsbeton. Die Anpassung eines Fließmittels an seinen speziellen Anwendungsbereich erfolgte durch Variation der Kationen, der Wirkstoffkonzentration und der Mischungsverhältnisse der Rohstoffe.

Bedingt durch ihren molekularen Aufbau lassen Naphthalin- und Melaminsulfonate wenig Möglichkeiten für Modifikationen. Beide Substanzklassen sind lineare, elektrisch negativ geladene Polymere. Ihre verflüssigende Wirkung beruht auf der Adsorption der negativ geladenen Polymermoleküle an der Zementkornoberfläche und einer daraus resultierenden elektrostatischen Abstoßung der Zementteilchen.

Mitte der 1990er Jahre wurden in Japan Fließmittel auf Polycarboxylatether-Basis auf den Markt gebracht. In Deutschland wurden die ersten Produkte dieser Art Ende der 1990er Jahre angeboten. Diese Substanzklasse, hat aufgrund ihres molekularen Aufbaus (Kammoleküle) einen erweiterten Wirkmechanismus. Der schematische Aufbau eines exemplarischen Polycarboxylatether-Moleküls sind in den Bildern 2.41 und 2.42 dargestellt. An der Hauptkette des Polymers befinden sich elektrisch negativ geladene Molekülgruppen, die so genannten Carboxylatgruppen (COO^-). Neu sind die an der Hauptkette angehängten Seitenketten.

Durch Variation der Länge der Haupt- und Seitenketten sowie der Anzahl von Carboxylatgruppen und Seitenketten können eine Vielzahl unterschiedlicher Produkte hergestellt werden. Das Polymermolekül lagert sich, wie es von den Naphthalin- und Melaminsulfonaten bereits bekannt ist, aufgrund seiner negativen Ladungen an der Zementkornoberfläche an, es wird adsorbiert. Dabei erfolgt bei den Sulfonaten eine schnelle und nahezu vollständige Anlagerung, während das Adsorptions-Verhalten der PCE-Fließmittel durch die Anzahl der Carboxylatgruppen gezielt gesteuert werden kann. Zusätzlich zu der Dispergierung infolge der elektrostatischen Abstoßung der Zementkörner untereinander, werden diese nun noch durch die langen Seitenketten auf Distanz zueinander gehalten. Dieser Wirkmechanismus wird „sterische Dispergierung“ oder "sterische Abstoßung" genannt [94, 148 bis 152]. Siehe Bilder 2.41 und 2.42.



2.3.3 Rheologie von Kalk-Sand-Rohmassen

Über die Rheologie von Kalk-Sand-Rohmassen liegen bislang keine Untersuchungen vor. Die Rheologie charakterisiert die Fließ- und Verformungseigenschaften deformierbarer Systeme. Kalk-Sand-Rohmassen bestehen aus drei Stoffarten (Gesteinskörnungen unterschiedlicher mittlerer Korngröße, Branntkalk und Wasser), so dass es sich um ein komplexes Mehrphasensystem handelt. Kalk-Sand-Rohmischungen können aufgrund ihres Wassergehaltes (Pressfeuchte) von durchschnittlich $w = 5 \text{ M.-%}$ als "erdfeuchte Suspension" betrachtet werden. Sie befinden sich beim Verdichtungsvorgang in den Formkästen bis zum Erreichen der Sollhöhe der Kalksandstein-Rohlinge in einem fließenden Zustand. Kalk-Sand-Rohmassen werden deshalb vereinfachend im Folgenden als Fluid betrachtet. Bild 2.43 gibt einen Überblick über die zu betrachtenden Einflussgrößen.

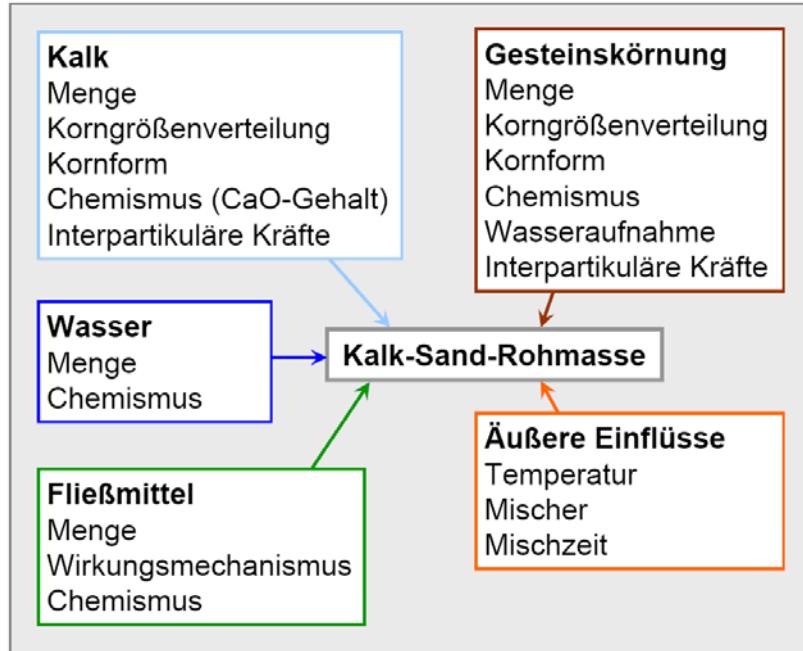


Bild 2.43: Einflussgrößen auf die Rheologie von Kalk-Sand-Rohmassen

Rolle des Wassers

Aus der Tatsache, dass Kalksandstein-Rohlinge ihre Festigkeit verlieren, wenn zu viel oder zu wenig Wasser vorhanden ist, zeigt, dass Wasser Bindekräfte verursachen kann. Kapillarwasser und Adsorptionswasser sind zu unterscheiden. Dies wird am Beispiel [aus 1] eines druckverdichteten Formkörpers aus reinem Quarzsand (0/5 mm) mit einer Rohdichte von $\rho = 1,90 \text{ kg/dm}^3$ erläutert. Bei einem Wassergehalt von 5 M.-% ist sein Hohlraum zu etwa 20 % ausgefüllt. Dieses Wasser bildet zwickelartige Brücken zwischen den einzelnen Körnern, wie sie Bild 2.44 schematisch zeigt [1]. An der Berührungsstelle Quarzkorn-Wasser-Luft wirkt die Zugkraft der Oberflächenspannung in Richtung der Wasseroberfläche und im Inneren der Wasserzwischenräume herrscht ein kapillarer Unterdruck. Daraus resultiert eine Anziehungskraft zwischen den beiden vom Wasserzwischenraum getrennten Quarzkörnern. Diese Anziehungskraft nimmt stark ab, wenn die Hohlräume zwischen den Quarzkörnern zunehmend mit Wasser gefüllt sind und sie wird ganz aufgehoben, wenn die Quarzkörner vollständig von Wasser umgeben sind. Auch das Adsorptionswasser trägt zur Haftung zwischen den Quarzkörnern bei.

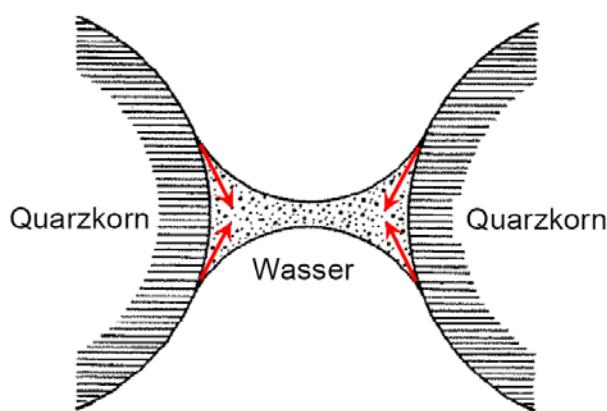


Bild 2.44: Schematische Darstellung der Wasserzwischenräume zwischen zwei Quarzkörnern [1]

Oberfläche der Feinstoffe und Wassergehalt

Die Größe der Oberflächen der bei der Kalksandsteinherstellung verwendeten Feinstoffe (Kalk, Feinsand, Füller) und der Wassergehalt der Mischung (Pressfeuchte) haben auf die Verdichtungswilligkeit von Kalk-Sand-Rohmischungen einen großen Einfluss. Das geringsste Oberflächen-Volumen-Verhältnis weist eine ideale Kugel auf. Reale Partikel haben eine von der Kugelform abweichende Oberfläche und das Oberflächen-Volumen-Verhältnis ist je nach Kornform höher, so dass entsprechend mehr Wasser an die Oberfläche gebunden wird. Bei gleichem Wassergehalt weisen deshalb Betone mit größeren Feinstkornoberflächen eine schlechtere Verarbeitbarkeit auf [154, 155, 156]. Nach BORNEMANN wird bei erdfeuchten Betonen durch eine höhere Feststoffkonzentration des Zementleims ein Anstieg der Viskosität ausgelöst [87].

Effektive Wasserfilmdicke

Nach ZHANG et al [157] hängt die Fließfähigkeit des Zementleims direkt von der sog. effektiven Wasserfilmdicke (Gleitfilmdicke) ab. Das in den Hohlräumen zwischen den Partikeln befindliche Wasser hängt dagegen nicht mit der Verarbeitbarkeit zusammen. Nach [22] hängt neben der Wasserbenetzung der Partikelloberflächen ebenfalls die Fließmittel-Absorption von der Größe der Feinstkornoberfläche ab. Mit ansteigender Feinheit der Partikel steigt einerseits die angelagerte Wasser- und Fließmittelmenge an. Andererseits wachsen aber auch mit ansteigender Partikelfeinheit die zu Agglomerationen führenden interpartikulären Kräfte an. Der Wasseranspruch und die Fließmittelmenge sind deshalb beim Beton primär auf die Feinststoffoberfläche abzustimmen. Aufgrund der stofflichen Ähnlichkeit zwischen Frischbetonen und Kalk-Sand-Rohmischungen sind die hier geschilderten Zusammenhänge prinzipiell auf Kalk-Sand-Rohmassen übertragbar, siehe Bild 2.36.

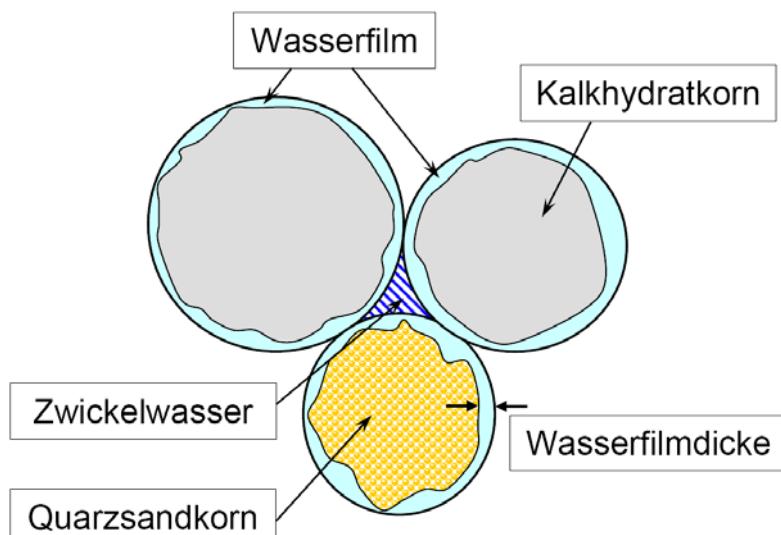


Bild 2.36: Schematische Darstellung der Feinststoffpartikel mit der effektiven Wasserfilmdicke und dem Zwischenwasser (nach KRELL [156])

Rolle des Kalkhydrats in der Kalk-Sand-Rohmischung

In den Kalksandstein-Rohlingen ist neben der überwiegenden Menge an Gesteinskörnungen (im Mittel ca. 93 ± 2 M.-%) immer der Kalkhydratanteil in Form homogen verteilter plättchenförmiger Partikel enthalten (ca. 7 ± 2 M.-%), der sich in einem hohen Maße steigernd auf die Rohlingsfestigkeit auswirkt. Diese nehmen im Rohling eine Oberfläche ein, die mindestens gleich der Oberfläche der Quarzkörner oder größer als diese ist. Die Quarzkörner sind deshalb in der Regel vollständig mit Kalk belegt. Aufgrund der gegensätzlichen Ladung von Quarz- und Kalkpartikeln (Quarzpartikel: negativ / Kalkpartikel: positiv), kommen noch größere Bindekräfte in den Rohlingen zustande [1].

Newton'sches Fluid

Die Feinstoffmatrix, die den Hohlraumgehalt des Grobkorngerüstes ausfüllt, kann als NEWTONSCHES Fluid betrachtet werden. Sie wird dann als eine Flüssigkeit angesehen, deren Scherspannung τ proportional zur Verzerrungsgeschwindigkeit ist. Es gilt:

$$\tau = \eta \cdot \gamma \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{Gleichung 2.24})$$

mit:

η :	Dynamische Viskosität	$[\text{Ns/mm}^2]$
γ :	Schergeschwindigkeit	$[\text{m/s}]$

Die innere Reibung von Fluiden wird durch ihre dynamische Viskosität η beschrieben. Die dynamische Viskosität η eines Fluids stellt dessen Widerstand gegen einen erzwungenen, irreversiblen Ortswechsel seiner Volumenelemente dar. Bei NEWTON'schen Flüssigkeiten ist die dynamische Viskosität η unabhängig von der Schergeschwindigkeit $\gamma = dv/dy$. Der Graph verläuft durch den Koordinatenursprung. Die dynamische Viskosität von Fluiden ist außer vom Strömungszustand von der Temperatur und vom Druck abhängig. Das Fließverhalten von Suspensionen kann mit dem Modell der laminaren Schichtenströmung beschrieben werden. Die Messung erfolgt mit einem Rheometer, siehe Bild 2.45-a.

Bingham-Körper

Zementleim, Mörtel und Betone werden hinsichtlich ihres rheologischen Verhaltens vereinfacht als BINGHAM-Körper geschrieben [22]. Wird auf einen Stoff eine äußere Scherkraft aufgebracht, muss zum Eintritt des Fließvorgangs zunächst seine Fließgrenze τ_0 überschritten werden. Bei zunehmender Schergeschwindigkeit steigt die Schubspannung τ proportional an. In diesem Fall wird der Proportionalitätsfaktor als Bingham-Viskosität η_B bezeichnet, siehe Bild 2.45-b. Es gilt:

$$\tau = \tau_0 + \eta_B \cdot \gamma \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{Gleichung 2.25})$$

mit:

τ_0 :	BINGHAM-Fließgrenze	$[\text{N/mm}^2]$
η_B :	BINGHAM-Viskosität	$[\text{Ns/mm}^2]$
γ :	Schergeschwindigkeit	$[\text{m/s}]$

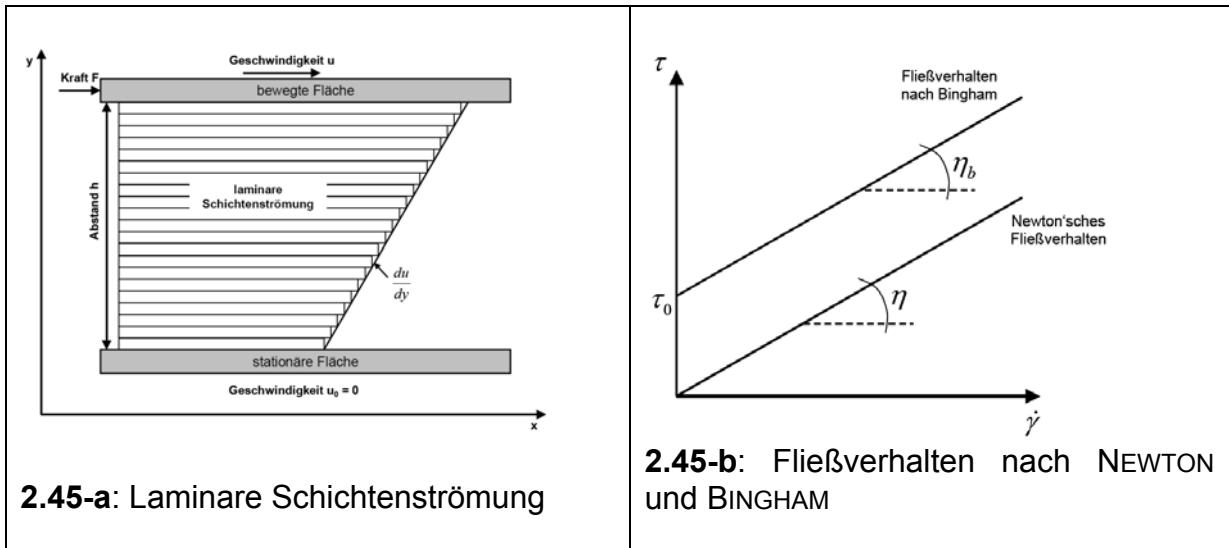


Bild 2.45: Modelle zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens von Zementleim, Mörtel und Betonen, aus [22]

Nimmt die Viskosität mit ansteigender Schergeschwindigkeit ab, liegt ein pseudoelastisches Fließverhalten vor (z.B. bei Zementleimen). Steigt die Viskosität mit zunehmender Schergeschwindigkeit an, liegt ein dilatantes Fließverhalten vor, siehe Bild 2.46 [158]. Es gilt:

$$\tau = \tau_0 + \mu_H \cdot \dot{\gamma}^b \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{Gleichung 2.26})$$

mit:

- | | | |
|------------------|--|-----------------------|
| τ_0 : | Fließgrenze | [N/mm ²] |
| μ_H : | Viskositätskoeffizient nach HERSCHEL-BULKLEY | [Ns/mm ²] |
| $\dot{\gamma}$: | Schergeschwindigkeit | [m/s] |
| b : | Schergeschwindigkeitsindex | |

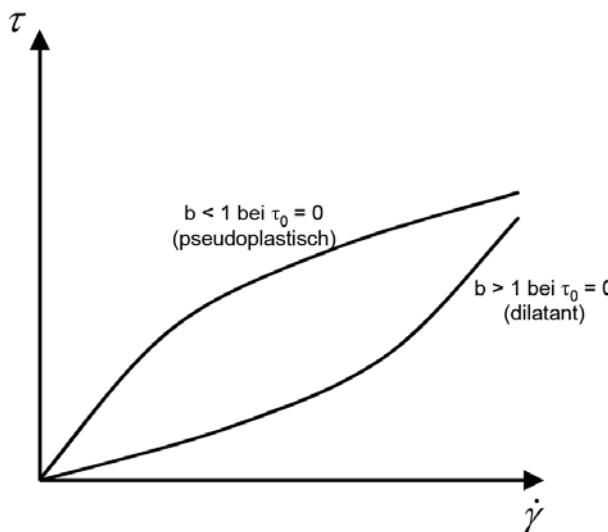


Bild 2.46: Fließkurven nach HERSCHEL-BULKLEY [159]

2.4 Zusammenfassung zum Stand des Wissens

Die vorliegende Literatur zum Thema „Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmassen“ sowie zu den dazugehörigen Modellen und Berechnungsmethoden wird im Folgenden zusammengefasst:

- **Granulometrie der Gesteinskörnungen:**

Die granulometrischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen und die mengenmäßige Zusammensetzung der Rezepturen beeinflussen die Verdichtbarkeit von Kalk-Sand-Rohmassen und damit die Scherbenrohdichte des Kalksandsteinmaterials. Für die Bewertung der Korngrößenverteilung von Gesteinskörnungen lagen bislang lediglich grobe Orientierungshilfen aus den 1960er Jahren vor. Der Einfluss der Kornform von groben und feinen Gesteinskörnungen auf die Verdichtbarkeit und die Scherbenrohdichte wurde bisher lediglich qualitativ abgeschätzt oder gar nicht berücksichtigt. Allgemeingültige Modelle zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen der Granulometrie der Gesteinskörnungen, dem Bindemittel Kalk, den verfahrenstechnischen Herstellparametern und den qualitätskennzeichnenden Eigenschaftswerten von Kalksandsteinmaterial sind bislang nicht entwickelt worden.

- **Packungsdichte:**

Durch eine Steigerung der Packungsdichte von Kalk-Sand-Rohmischungen (optimale Auffüllung des Hohlraumanteils von groben Gesteinskörnungen) bis zum Erreichen der sog. Sättigungspackungsdichte können analog zur Betontechnologie höhere Scherbenrohdichten und entsprechend geringere Porositäten des Kalksandsteinscherbens erreicht werden.

Mit einer Steigerung der Scherbenrohdichte kann in den meisten Fällen ebenfalls die Steindruckfestigkeit erhöht werden. An Kalk-Sand-Rohmischungen wurden bislang keine Packungsdichteberechnungen durchgeführt. Deshalb werden entsprechende Untersuchungsreihen zum Einfluss der Packungsdichte auf die Scherbenrohdichte und die anderen relevanten Steineigenschaftswerte durchgeführt.

- **Algorithmen zur Berechnung der Packungsdichte:**

Für die Berechnung der Packungsdichte der Ausgangsstoffe von Frischbetonen werden in der Literatur verschiedene Algorithmen beschrieben, die seit geraumer Zeit in der Betontechnologie Anwendung finden. Dabei können heute Ein- und Mehrkornpackungen durch die Abbildung von Korngrößen- und Kornformverteilungen als Funktionen deutlich genauer als in der Vergangenheit berechnet und die Auswirkung auf die Betoneigenschaften besser abgeschätzt werden. Insbesondere können die Auswirkungen kleiner Änderungen von Korngrößenverteilungen auf die Betoneigenschaften sehr viel genauer prognostiziert werden. Für die Packungsdichteberechnung von Kalk-Sand-Rohmischungen lagen derartige Berechnungsalgorithmen noch nicht vor. Als vielversprechende Berechnungsmethode wurde für diese Arbeit die Methode nach SCHWANDA ausgewählt und wird hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf Kalk-Sand-Rohmassen untersucht.

- **Interpartikuläre Kräfte - Rheologie der Kalk-Sand-Rohmasse - Fließmittel:**

Bei der Verarbeitung von Beton, insbesondere von UHPC und SVB mit optimiertem Feinkorngehalt nehmen Feinststoffe (Zement, Gesteinsmehle, Flugaschen, Silikastaub) und Fließmittel aufgrund der interpartikulären Kräfte eine wichtige Rolle ein. Das Kräftespiel zwischen anziehenden und abstoßenden Kräften kann mit Hilfe der DLVO-Theorie beschrieben werden. Aufgrund der stofflichen Verwandtschaft zwischen Beton und Kalksandsteinen ist zu erwarten, dass diese Zusammenhänge in ähnlicher Weise für die Kalksandsteintechnologie gelten. Aus der Literatur geht hervor, dass die Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmassen durch produktionstechnische Maßnahmen gesteigert werden kann. Diese sind neben der Zusammensetzung der Mischung der Gesteinskörnungen die Optimierung der Wasser- und der Kalkdosis sowie die Zugabe von Fließmitteln. Für Hochleistungsbetone werden Fließmittel auf der Basis von Poly-carboxylatethern mit neuen Wirkungsmechanismen (sog. "sterischer Abstoßungseffekt") eingesetzt, deren Anwendung auf die Verdichtbarkeit von Kalk-Sand-Rohmassen noch nicht praktiziert wird. Rheologische Untersuchungen an Kalk-Sand-Rohmassen und der Einfluss der Kornform sind bislang noch nicht durchgeführt worden.

- **Unterschied zwischen dem Beton- und dem Kalksandsteingefüge:**

Beton besteht aus mindestens drei Ausgangsstoffen (Zement, Gesteinskörnungen und Wasser). Mit Zusatzmitteln und Zusatzstoffen bildet er ein 5-Stoff-System. Der fertig gemischte und verarbeitbare Beton wird als Frischbeton bezeichnet, der als flüssige Suspension betrachtet werden kann. Beton erlangt dadurch seine Festigkeit, dass der Zementleim erhärtet und die Gesteinskörnung zu einem festen Gerüst verbindet (Festbeton). Der Festbeton verfügt über eine Gesamtporosität von ca. 15 Vol.-%.

Kalksandsteine sind künstliche Mauersteine, die aus einer erdfreudigen Mischung aus Branntkalk, Gesteinskörnungen und Wasser hergestellt werden. Dabei werden die vermischten Kalk-Sand-Rohmassen mechanisch verdichtet und anschließend hydrothermal gehärtet. Im Unterschied zum Beton beteiligen sich die silikatischen Gesteinskörnungen während des Dampfhärtevorgangs am Reaktionsgeschehen und fungieren als SiO₂-Spender für die CSH-Binde-mittelphasen, die die restliche Gesteinskörnung zu einem festen Gefüge verbinden. Für die Hydrothermalhärtung von Kalksandsteinen ist eine Mindestporosität von ca. 10 Vol.-% erforderlich. Gehärtete Kalksandsteine verfügen wie Beton ebenfalls über eine Porosität von ca. 15 Vol.-%.

Die Steigerung der Scherbenrohdichte und der Festigkeit wird sowohl bei Betonen als auch bei Kalksandsteinen entscheidend durch die Erhöhung der Packungsdichte bzw. durch die Reduzierung der Porosität erreicht.

- **Maschinentechnische Verdichtungsparameter:**

Die maschinentechnischen Verdichtungsparameter sind der Pressdruck, die Pressfeuchte und die Pressgeschwindigkeit. In der Literatur sind mehrere Hinweise auf die Auswirkung der Variation der Verdichtungsparameter auf die Scherbenrohdichte, die Steindruckfestigkeit und die weiteren Steineigenschaftswerte enthalten. Eine systematische Analyse des Verdichtungsvorgangs unter Berücksichtigung aller Einflussgrößen wurde jedoch noch nicht durchgeführt und wird in dieser Arbeit erstmals realisiert.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Literaturrecherche und den aufgezeigten offenen Fragen gliedert sich der Untersuchungsablauf in folgende Abschnitte:

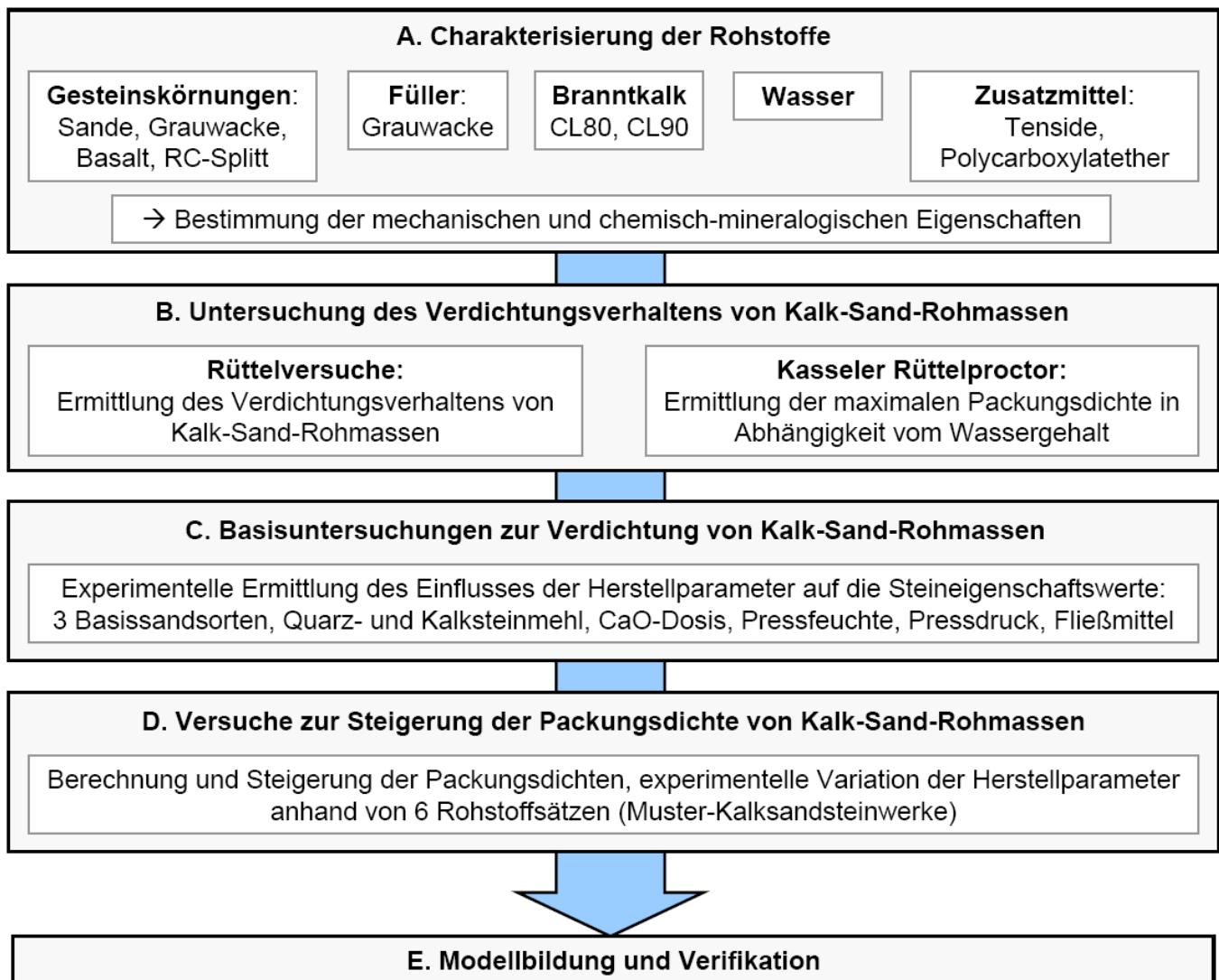


Bild 2.47: Überblick über das Versuchsprogramm und die experimentellen Untersuchungen

3 UNTERSUCHUNGSMETHODEN

3.1 Untersuchung der Rohstoffe

3.1.1 Gesteinskörnungen

3.1.1.1 Korngrößenverteilung mittels Siebung

Die Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnungen wurde nach DIN EN 933-1 [N7] bestimmt. Das Material wurde durch Siebung in einzelne Kornklassen zerlegt, gewogen und in Masseprozent [M.-%] angegeben. Mit der Trockensiebung wurde der Korngrößenbereich von $d = 0,036 \text{ mm}$ bis $6,3 \text{ mm}$ abgedeckt. (Durchführung: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.1.1.2 Korngrößenverteilung mittels Lasergranulometer

Die Korngrößenverteilungen der feineren Stoffe wurden mit Hilfe eines Lasergranulometers LS 230 Beckman-Coulter gemessen. Dieses Lasergranulometer misst die Korngrößen feiner Partikel im Messbereich von $0,04$ bis $2000 \mu\text{m}$. Das von einer Laserdiode ausgestrahlte Licht wird über ein optisch gebündelt. Die in der Probe enthaltenen Partikel werden bestrahlt und das Licht wird dabei gebeugt. Die Größe der Teilchen hat dabei einen direkten Einfluss auf den Beugungswinkel. Die entstehende Beugungsbilder werden von Detektoren gemessen. Mit Hilfe verschiedener Berechnungsgleichungen werden daraus die Partikelgrößen in 117 Größenklassen aufgeteilt. Für die Messung sehr feiner Partikel, deren Korngröße im Bereich von $0,04$ bis $0,4 \mu\text{m}$ liegt, wird im gleichen Gerät die PIDS-Technologie (Polarization Intensity Differential Scattering) mit einer anderen Lichtquelle genutzt, die eine Messung der Partikelgrößen auch im Größenbereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichts ermöglicht (400 bis 750 nm). (Durchführung: Bauhaus-Universität Weimar).

3.1.1.3 Spezifische Oberfläche nach FISCHER

Die Oberfläche von Mischungen aus groben Gesteinskörnungen hängt von der Korngrößenverteilung und der Kornform ab. Sie beeinflusst die in Lösung gehende SiO_2 -Menge und ist deshalb für die Bindemittelsynthese von hoher Bedeutung [17]. Die Bestimmung der spezifischen Oberfläche der Gesteinskörnungen erfolgt mit der Methode nach FISCHER. Dabei wird die Oberfläche aus dem Strömungswiderstand von Luft bei ihrem Durchfluss durch eine geschüttete „Sandsäule“ rechnerisch ermittelt. (Durchführung: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.1.1.4 Gehalt an abschlämmbaren Bestandteilen und organischen Störstoffen

Die Bestimmung des Gehaltes an abschlämmbaren Bestandteilen und organischen Störstoffen erfolgt durch einen Absetzversuch in Glasstandzylinern. Organische Bestandteile sind in den meisten Fällen Verbindungen aus tierischen oder pflanzlichen Abbaustoffen im Quarzsand. [17]. Mit dem Schnelltest nach POST wurden die Gesteinskörnungsproben hinsichtlich ihres Huminstoffgehaltes abgeschätzt und bewertet. Von der zu prüfenden Gesteinskörnung werden 100 g in einen 250 ml -Standzylinder mit einer 3%-igen NaOH -Lösung (Natronlauge) bis zum Erreichen der 250 ml -Marke gegeben. Nach mehrmaligem Durchschütteln wurde der Standzylinder für einen Zeitraum von 24 Stunden stehen gelassen. Der Farnton der über dem Sand stehenden Lösung bildet das Kriterium für die Beurteilung des Humussäuregehaltes. Je dunkler der Farnton ist, desto größer ist der Gehalt an organischen Störstoffen. Als Ergebnis wurde der Farnton angegeben. Der Gehalt an abschlämmbaren Bestandteilen wird visuell abgelesen und in Vol.-% angegeben [17, 160 bis 162]. (Durchführung: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.1.1.5 Kornformbestimmung mittels Computer Particle Analyzer

Von 12 Sandproben unterschiedlicher Korngrößen und Formen wurde die Kornform analysiert (Doppelbestimmung). Die Untersuchungen zur Kornform wurden mit dem Messgerät "HAVER CPA 4 2MB real time" durchgeführt. Die Funktionsweise des Gerätes ist in Abschnitt 2.2.3.3. beschrieben. Die Korngröße des Teilchens wird als Äquivalentdurchmesser eines flächengleichen Kreises definiert. Als typische Kornformparameter wurden die Sphärizität SPHT bzw. der Kehrwert Cirkularität und das Verhältnis von größter zu kleinsten Abmessung eines Teilchens L/B ausgewählt. (Durchführung: Bauhaus-Universität Weimar).

3.1.1.6 Röntgenpulverdiffraktometrie

Der Phasenbestand der betrachteten Gesteinskörnungen wurde mit Hilfe der Röntgenpulverdiffraktometrie röntgenographisch bestimmt. Eingesetzt wurde ein Pulverdiffraktometer der Firma Philips, Typ PW 1830/3020 unter Verwendung von Cu Ka-Strahlung und Monochromatoren. (Durchführung: Universität Kassel).

3.1.1.7 Chemische Zusammensetzung mittels Röntgenfluoreszenzanalyse

Die chemische Zusammensetzung der Gesteinskörnungen wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmt. Das Probenmaterial wurde bei einer Temperatur von $T = 105^{\circ}\text{C}$ im Wärmeschrank bis zur Massekonstanz getrocknet und der Feuchtegehalt bestimmt. Anschließend wurde eine repräsentative Teilprobe des Probenmaterials entnommen und für die Untersuchung in einer Laborkugelmühle analysenfein aufgemahlen. Für die Röntgenfluoreszenzanalyse wurde von der aufgemahlenen Probesubstanz eine repräsentative Teilprobe entnommen und mit Lithiumtetraborat als Aufschlussmittel eine Schmelztablette hergestellt. Diese wurde im Röntgenspektrometer analysiert. Der Glühverlust wurde parallel zu dieser Untersuchung an gesondert entnommenem Probenmaterial bestimmt. (Durchführung: TU Clausthal).

3.1.2 Kalke

3.1.2.1 Chemische Zusammensetzung mittels Röntgenfluoreszenzanalyse

Die chemische Zusammensetzung des Branntkalke wurde wie im Abschnitt 3.1.1.7 beschrieben, mittels Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmt. (Durchführung: TU Clausthal).

3.1.2.2 Bestimmung der Reaktivität mittels Nasslöschkurvenverfahren

Die Reaktionsfähigkeit des Kalkes wurde mittels Nasslöschkurvenverfahren nach DIN EN 459-2 [20] ermittelt. Als Reaktionsfähigkeit wird die Umsetzungsgeschwindigkeit des Branntkalks beim Löschen mit Wasser bezeichnet. Sie wird nach dem Nasslöschkurvenverfahren durch Umsetzung einer definierten Kalkmenge im festen Verhältnis mit destilliertem, CO_2 -freiem Wasser in einem genormten Reaktionsgefäß bestimmt. Die Messung der Reaktionsfähigkeit erfolgt bis zum Erreichen der Maximaltemperatur. Angegeben wird die Temperaturzeitkurve des Löschkorgangs (sog. Löschkurve). Durchführung: (Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.1.2.3 Bestimmung der Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der zwei berücksichtigten Kalke wurden mittels Lasergranulometer der Fa. BECKMANN COULTER festgestellt. Als Fluid diente wasserfreies Isopropanol, in dem jeweils eine Menge von rd. 0,1 g Branntkalk mittels Ultraschall dispergiert wurde. Pro Probe wurden jeweils zwei Teilproben analysiert und mittels gerätespezifischer Software ausgewertet. Durchführung: (Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.1.3 Wasser - chemische Zusammensetzung

Das maßgebende Kriterium beim Anmachwasser bezüglich der Steinqualität ist sein Gehalt an gelösten Fremdionen. Um im Rahmen dieser Untersuchungen den Einfluss von Störstoffen im Anmachwasser auszuschließen, wurde für die Untersuchungen ausschließlich demineralisiertes Wasser verwendet. Die chemische Analyse erfolgte mittels Spektralphotometrie mit einem Gerät von Dr. Lange, Typ DR 5000. (Durchführung: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.2 Untersuchungen zum Verdichtungsvorgang

3.2.1 Bestimmung der Temperatur der Kalk-Sand-Rohmischung

Die Bestimmung der Temperatur der Kalk-Sand-Rohmischung erfolgte mit Hilfe eines berührungslos arbeitenden Infrarot-Thermometers im Mischer; Hersteller: Voltcraft, Typ: IR 380. (Durchführung: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.2.2 Messung des hydraulischen Verdichtungsdrucks und der Verdichtungszeit

Der hydraulische Verdichtungsdruck (Pressdruck) wurde an den eingesetzten Kalksandsteinpressen mit Hilfe eines digitalen Manometers gemessen. Die Bestimmung der Verdichtungsdauer erfolgte manuell mit Hilfe einer Stoppuhr mit einer Genauigkeit von 1 s. (Durchführung: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.2.3 Rüttelversuche zum Verdichtungsverhalten der Kalk-Sand-Rohmischungen

Die Herstellparameter von Kalk-Sand-Rohmischungen sind die CaO-Dosis, die Anmachwassermenge und die Zugabe von Fließmitteln unterschiedlichen chemischen Aufbaus sowie deren Dosierung. Um den Einfluss dieser Herstellparameter auf das Verdichtungsverhalten zu untersuchen, wurden diese unter Variation der CaO-Dosis (5 / 7 / 9 M.-%), der Pressfeuchte (5 / 7 / 8 / 9 M.-%) sowie durch unterschiedliche Zugabemengen an Fließmitteln (0 / 1 / 3 / 5 M.-%) verändert. Anschließend wurden pro Serie jeweils Rüttelversuche mit Standzylindern durchgeführt. Für den Versuch wurden jeweils Mischungen mit einer Masse von $m = 250$ g in Standzylinder mit einem Volumen von $V = \text{ca. } 300$ ml bei einem Innendurchmesser von $d = 40$ mm geschüttet und durch anschließendes Rütteln auf einer Rüttelplatte (Fritzschi, Typ: "T-1000") ohne Auflast bis zu Erreichung der Volumenkonstanz gerüttelt. Die Zeitspanne bis zum Erreichen der Volumenkonstanz lag zwischen $t = 20$ und 45 s. Die Rüttelfrequenz lag bei $\omega = 50$ Hz und die Amplitude bei $A = 1$ mm. Als mögliche Maße für die Verdichtungswilligkeit der Rohmischung wurde die "Schüttichte" (S_G), die "Rütteldichte" (S_R) und deren Differenz ΔS in Betracht gezogen. Erkennbare Zusammenhänge zu den Herstellparametern liefert jedoch ausschließlich der Kennwert „Rütteldichte“ (S_R). Pro Serie wurden 3 Versuche durchgeführt. Angegeben sind die Mittelwerte. (Durchführung: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.2.4 Versuche zur Rüttelverdichtung mittels Kasseler Rüttelproctorversuch

Zur Ermittlung des Verdichtungsverhaltens von Kalk-Sand-Rohmischungen in Abhängigkeit vom Wassergehalt wurde ein Rüttelproctorgerät eingesetzt. Mit diesem Gerät kann der optimale Wassergehalt und die damit verbundene maximale Packungsdichte für die verschiedenen Kalksandsteinmischungen ermittelt werden. Der "Kasseler Rüttelproctor", welcher von BORNEMANN für die Optimierung von erdfeuchten Betonen auf Basis des Proctorversuchs aus der Geotechnik entwickelt wurde [87], besteht aus einem Rütteltisch, einem Standard-Zylinder ($h = 300 \text{ mm}$; $\varnothing = 150 \text{ mm}$) sowie einem Auflastgewicht von $m = 27,5 \text{ kg}$. Die Verdichtung der Proben erfolgte durch Rütteln mit einer Schwingbreite von $b = 0,75 \text{ mm}$ und einer Frequenz von 60 Hz für einen Zeitraum von $t = 1 \text{ min}$. Die Versuchsanordnung ist in Bild 3.1 dargestellt.

Um die Proctor-Kurven zur Ermittlung des optimalen Wassergehaltes und zugehöriger maximaler Packungsdichte zusammenzustellen, wurden die Ausgangsstoffe für die Kalksandsteine mit unterschiedlichen Wassergehalten gemischt. Diese Einzelmischungen wurden mit dem dargestellten Proctorversuch verdichtet. Mit dem Volumen und der Masse des Zylinders sowie der Mischungszusammensetzung (Anteil der Einzelstoffe, Dichten) wird die Packungsdichte des Prüfkörpers berechnet, der sich mit dem jeweils eingestellten Wassergehalt ergibt. Die Packungsdichte wurde für alle Mischungen ermittelt. Der technisch relevante Bereich, der für die Optimierung der Kalksandsteine angesetzt wurde, enthält ein Maximum im Funktionsverlauf, siehe Bild 3.2. Dieser Punkt definiert die individuelle maximale Packungsdichte für die Kalksandsteinmischung, der auch ein optimaler Wassergehalt zugeordnet ist. (Durchführung: Universität Kassel).

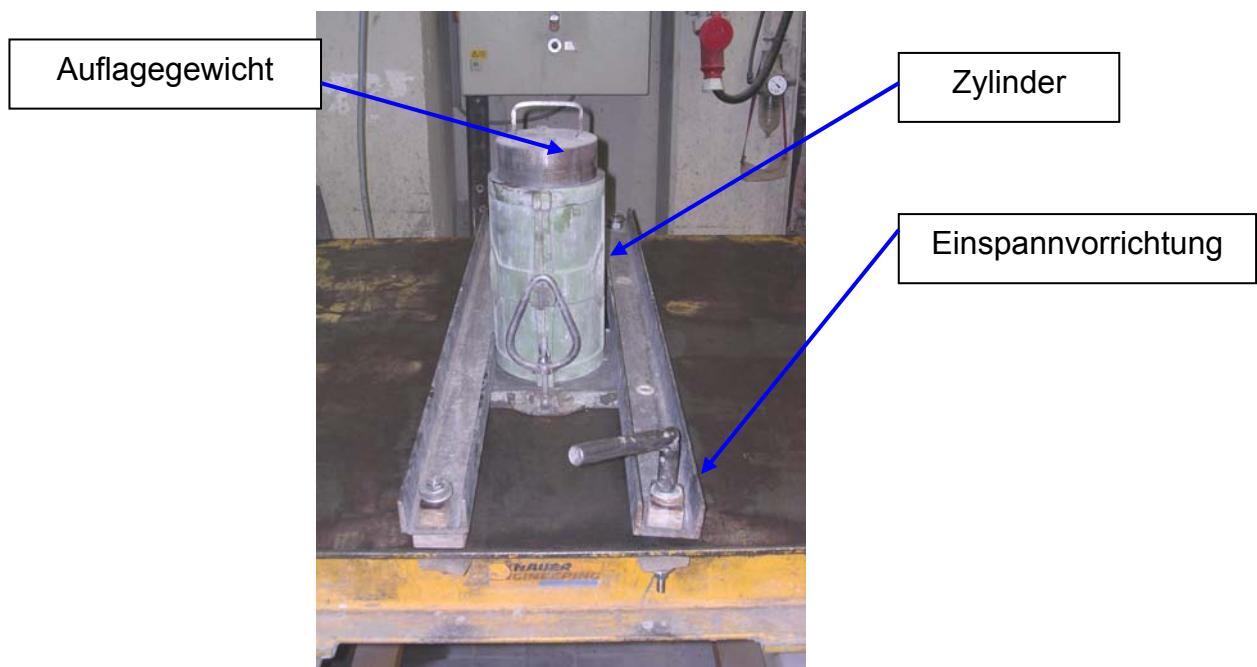


Bild 3.1: Rüttelproctor-Versuch, auf dem Rütteltisch eingespannter Zylinder mit Auflastgewicht

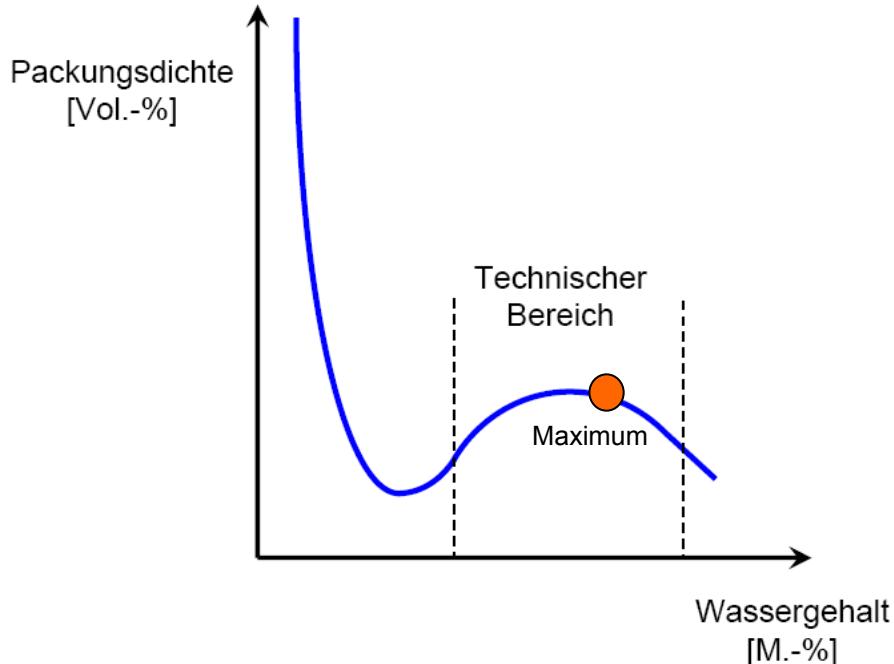


Bild 3.2: Prockorkurve, allgemeine Darstellung

3.3 Untersuchungen an Kalksandsteinen

3.3.1 Festigkeitseigenschaften

3.3.1.1 Rohlingsstandfestigkeit

Die Ermittlung der Rohlingsstandfestigkeit erfolgte an Kalksandstein-Rohlingen des Formats 2DF ($l \times b \times h = 240 \times 115 \times 113 \text{ mm}$) mittels eines Druckversuchs an einer Druckprüfmaschine mit einer Maximalkraft von $F_{\max} = 10 \text{ kN}$ in Richtung der Steinhöhe. Die Rohlinge wurden aus den jeweiligen Rohstoffmischungen hergestellt und unter Verwendung einer hydraulischen Presse (Dorstener Maschinenfabrik, Typ: T-1000) verdichtet. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 30 N/s. Die Druckplatten dieser Druckprüfmaschine sind mit den an den Greiferplatten der Stapelautomaten an Kalksandsteinpressen verwendeten Rechteckprofilen aus Moosgummi-Schaumstoff belegt. Material: PE-Schaum, Dicke: $d = 5 \text{ mm}$. (Durchführung: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.3.1.2 Steindruckfestigkeit

Die Ermittlung der Steindruckfestigkeit erfolgte für jede Serie nach EN 772-1 an 3 bis 6 Prüfkörpern [N8]. (Durchführung: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.3.2 Gefügeeigenschaften

3.3.2.1 Steinrohdichte/Scherbenrohdichte

Die Ermittlung der Steinrohdichte bzw. Scherbenrohdichte erfolgte für jede Serie nach EN 772-13 an jeweils 3 bis 6 Prüfkörpern [N9]. Die Steinrohdichte ist ein normungstechnischer Begriff, mit dem die Masse eines Mauersteins, bezogen auf das von Rechtecken umschlossene Volumen ist. Die Scherbenrohdichte bezieht sich auf das Kalksandsteinmaterial ohne jegliche Lochung. Im Folgenden wird ausschließlich die Scherbenrohdichte betrachtet. (Durchführung: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.3.2.2 Frostwiderstand

Die Ermittlung der Frostwiderstandsfähigkeit erfolgte nach EN 772-18 an jeweils 3 Prüfkörpern [N10]. (Durchführung: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.3.2.3 Wasseraufnahme

Die Ermittlung der Wasseraufnahme dient der Ermittlung der wasserfüllbaren Porosität Sie wurde unter Normalluftdruck gemäß EN 772-7 an jeweils 3 Prüfkörpern ermittelt [N11]. (Durchführung: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.3.2.4 Porosität mittels Quecksilberhochdruckporosimetrie

Die Porosität und die Porenradienverteilung wurde mittels Quecksilberhochdruckporosimetrie (MIP) an den Proben gemessen. Für die Messungen wurden aus den Kalksandsteinen kleine Bohrkerne mit einem Durchmesser von $d = 8 \text{ mm}$ und einer Länge von ca. $l = 20 \text{ mm}$ aus der Steinmitte herausgebohrt. Bei Kalksandsteinen, welche keine Entnahme eines zusammenhängenden Bohrkerns zuließen, wurde durch Zerkleinerung mit einer Beißzange ein Granulat des Kalksandsteins mit der Korngröße $2/4 \text{ mm}$ hergestellt. Diese Art der Probenpräparation erzeugt keine zusätzlichen Mikrorisse (= zusätzliche Porosität) in der Probe, was durch umfangreiche Reihenuntersuchungen belegt ist. Für die Granulatsherstellung wurde aus der Mitte des Kalksandsteins eine Scheibe mit einer Dicke von ca. $d = 10 \text{ mm}$ dicke herausgesägt. Aus dieser Scheibe wurde dann mittig eine Teilprobe präpariert, die dann mit einer Beißzange zerkleinert wurde. Die herauspräparierten Bohrkerne sowie die Granulate wurden vor den MIP-Messungen im Trockenschrank bei einer Temperatur von $T = 40^\circ\text{C}$ bis zur Massekonstanz getrocknet. Die Porositätsbestimmungen wurden anschließend mittels MIP jeweils am Bohrkern oder Granulat durchgeführt. Die Messungen wurden mit einem Porosimeter Typ AUTOPORE II 9220 der Firma MICROMETRICS durchgeführt, welches Poren mit Radien von $r = 2,23 \times 10^5 \text{ nm}$ erfassen kann. Vor den eigentlichen Messungen wurden die Proben 15 min lang einem Vakuum von $p = 6,7 \times 10^{-6} \text{ MPa}$ ausgesetzt. Auf der Grundlage der gemessenen Daten lassen sich Summenkurven und Porenradien berechnen und grafisch darstellen. Die gemessenen Porositätsdaten wurden nach ROMBERG [163] je nach Porenradius wie folgt eingeteilt:

- $> 10.000 \text{ nm}$ Luftporen
- $30 \text{ nm bis } 10.000 \text{ nm}$ Kapillarporen
- $< 30 \text{ nm}$ Gelporen

(Durchführung: Universität Kassel).

3.3.2.5 Gefügeuntersuchung mittels Lichtmikroskopie

Die Probenentnahme und -präparation zur Dünnschliffherstellung für lichtmikroskopische Untersuchungen (LM) wurde aus Kalksandsteinen des Formats NF durchgeführt. Für die Herstellung der Dünnschliffe wird jeweils eine Teilprobe aus dem Kern des KS-Prüfkörpers entnommen. Die nass gesägten Teile des KS-Steins wurden nach dem Sägen unter fließendem Wasser gründlich gereinigt. Die für die Dünnschliffe verwendeten Teilstücke wurden vor der Präparation bei 40°C bis zu ihrer Massekonstanz getrocknet. Anschließend wurden die Proben unter Vakuum mit farbigem Epoxydharz (gelb) vergossen, plan geschliffen und im Ultraschallbad von eventuellen Rückständen gereinigt. Nach der Trocknung wurden die Proben auf ein Objektträgerglas ($l \times b = 48 \times 28 \text{ mm}^2$) geklebt und auf eine Dicke von ca. 20 µm planparallel zum Objektträger geschliffen. Nach einer erneuten Reinigung im Ultraschallbad und anschließender Trocknung wurde der Dünnschliff mit einem Deckgläschen abdeckt. (Durchführung: Universität Kassel).

3.3.2.6 Gefügeuntersuchung mittels Rasterelektronenmikroskopie

Die Probenentnahme und –präparation für die Rasterelektronenmikroskopie (REM) wurde ebenfalls aus Kalksandsteinen des Formats NF durchgeführt. Aus den zuvor gesägten Steinen wurden Proben aus der zur Mitte des Steins gewandten Seite entnommen. Die Größe der Probe entspricht max. $V = 1 \text{ cm}^3$. Die Kalksandsteinproben wurden mit einem Spezialkleber auf die Aluminium-Objektträger fixiert, danach wurden sie mit Kohle bedampft und zusätzlich mit Gold besputtert, damit die Elektronen von der Probenoberfläche während der REM-Untersuchung abfließen können. Die Proben der einzelnen Steine wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop der Firma Philips Typ "XL30i" untersucht. Neben dem großen Vergrößerungsbereich ist insbesondere die hohe Tiefenschärfe im REM vorteilhaft. Hierbei wurden, wie auch bei der Lichtmikroskopie, besonders die Ausbildung der CSH-Reaktionssäume und die Packungsdichte der Bestandteile untersucht. (Durchführung: Universität Kassel).

3.3.2.7 Massenverteilung mittels Computertomographie

Um Aussagen über die räumliche Homogenität der DichteVerteilung der Prüfkörper und das mögliche Auftreten von Gefügestörungen (Lunker, Risse, etc) zu erlangen, wurden zusätzlich ausgewählte Proben mittels Computer-Tomographie (CT) untersucht. Diese Methode ist insbesondere in der Medizin als ein röntgendiagnostisches, computergestütztes bildgebendes Untersuchungsverfahren mit nachfolgend erläutertem Prinzip bekannt. Mittels einer speziellen rotierenden Röntgenröhre wird ein aufgefächelter Röntgenstrahl durch das zu prüfende Material gesandt und anschließend von einem Detektorkranz empfangen. Die Röntgensignale werden elektronisch aufbereitet und einem Rechner zur Analyse zugeführt. Hier werden dann die räumlichen Bilder schichtweise erzeugt. Insgesamt wurden 330 CT-Aufnahmen an den im Kalksandsteinwerk B hergestellten Prüfkörpern unterschiedlicher Verdichtungsparameter (Höhe der Prüfkörper $h = 250 \text{ mm}$) in Pressrichtung durchgeführt [164]. Zusätzlich sind am International Neuroscience Institute in Hannover mit einem hochauflösenden medizinischen Computertomographen (Gerät der Fa. Siemens) Voruntersuchungen an zwei gezielt „überverdichteten“ KS-Laborprüfkörpern des Formates KS[°]2°DF und KS-L[°]2°DF durchgeführt worden (Schrittweite: $s = 2 \text{ mm}$). (Durchführung: TU Clausthal).

3.3.3 Mineralogische Eigenschaften

3.3.3.1 Differenzial-Thermo-Analyse

An allen Serien wurde mit Hilfe der Differential-Thermo-Analyse der Gehalt an nicht umgesetztem Kalkhydrat in den gehärteten Prüfkörpern abgeschätzt. Die Entwässerung des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ im Mineralgemisch eines handelsüblichen Kalksandsteinmaterials verläuft im Allgemeinen in einem Temperaturbereich von $T = 400$ bis 600°C . Die Quantifizierung der Menge an $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wurde unter Verwendung von Kalibrierkurven vorgenommen. Ein Gehalt an nicht umgesetztem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Freikalk) liegt in Kalksandsteinen dann vor,

1. wenn die Kalkdosis zu hoch angesetzt ist,
2. wenn die Härtetemperatur nicht ausreichend hoch angesetzt ist,
3. wenn die Hydrothermalhärtung nicht ausreichend lang bemessen ist bzw.
4. wenn die Hydrothermalhärtung (z. B. durch Fremdionen) gestört ist.

Ein $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt von 0,1 bis 0,2 M.-% (bezogen auf die Steinmasse) kann als gering angesehen werden. Gehalte von 0,5 M.-% und höher gelten als deutlicher Hinweis auf eine nicht ausreichende Hydrothermalhärtung bzw. eine für die verwendete Mischung zu hohe Kalkdosis.

(Durchführung: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV).

3.3.3.2 Röntgenpulverdiffraktometrie

Mit Hilfe der Röntgenpulverdiffraktometrie wurde der Mineralbestand der untersuchten Kalksandsteine röntgenographisch bestimmt. Die jeweilige Gesamtprobe wurde für die Untersuchungen bei einer Temperatur von $T = 40^\circ\text{C}$ bis zur Massekonstanz getrocknet und auf eine Korngröße $d = \leq 40 \mu\text{m}$ aufgemahlen. Der Phasenbestand ist aus den Peakhöhen und der Peakhalbwertsbreite semiquantitativ abgeschätzt worden. Die röntgenographische Phasenanalyse ist mit den im Folgenden angegebenen Parametern durchgeführt worden:

o Gerät Typ	Philips PW 1830/3020
o Scan-Achse	Gonio
o Startposition [$^{\circ}\text{2}\theta$]	5,00
o Endposition [$^{\circ}\text{2}\theta$]	65,00
o Schrittweite [$^{\circ}\text{2}\theta$]	0,02
o Schrittzeit [s]	1,0
o Scan Modus	kontinuierlich
o Anodenmaterial	Cu
o K-Alpha1 [\AA]	1,54060
o K-Alpha2 [\AA]	1,54443
o K-Beta [\AA]	1,39225
o Generatoreinstellung	30 mA, 40 kV

(Durchführung: Universität Kassel).

4 CHARAKTERISIERUNG DER AUSGANGSSTOFFE

4.1 Allgemeines

Da die Rohstoffeigenschaften einen maßgeblichen Einfluss auf den Produktionsprozess und auf alle Steineigenschaftswerte haben, wurden sie vor Beginn der Prüfkörperherstellung eingehend untersucht. Die Rohstoffauswahl erfolgte nach betriebspraktischen Gesichtspunkten. Die mittels Röntgenfluoreszenzanalyse ermittelte chemische Zusammensetzung der Rohstoffe sind in den Tabellen 10.3a und 10.3b auf der Seite 153 zusammengestellt. Die Schattenprojektionen der Gesteinskörnungen sind im Anhang in Bild 10.27 (Seite 191 ff.) wiedergegeben.

4.2 Gesteinskörnungen

4.2.1 Quarzsande

Für die grundlegenden Untersuchungen zur Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmassen [165] sind drei Basissande (Fein-, Mittel- und Grobsand) zum Einsatz gekommen. Bei diesen drei gezielt ausgewählten Betriebssanden mit unterschiedlichem Verdichtungshohlraum liegt hinsichtlich ihrer Komprimierung ein jeweils spezifisches Optimierungspotential vor. Alle drei Sande weisen aufgrund ihrer geologischen Entstehungsbedingungen in Bezug auf die Erreichung maximaler Packungsdichten keine optimale Korngrößenverteilung auf. Die Körner haben weitgehend runde Formen und einheitlich nach außen gekrümmte Umrißlinien. Die Tabellen 10.2 und das Bild 10.3 im Anhang enthalten die Kennwerte der drei verwendeten Sande. Die drei verwendeten Sande sind im Folgenden näher beschrieben: Der rundkörnige Feinsand "G12" wurde von einer Quarzsand-Lagerstätte in Norddeutschland bezogen. Dieser feine Sand zeichnet sich durch einen sehr geringen Anteil an störenden Fremdmineralen aus. Er weist einen Feinstkornanteil $d < 0,125 \text{ mm}$ von ca. 58 M.-% (mittlerer Korndurchmesser $\bar{\varnothing}_m = 0,14 \text{ mm}$) und auf Grund seiner einkörnigen Sieblinie einen relativ großen Verdichtungshohlraum und damit eine vergleichsweise geringe Packungsdichte auf. Der mittels Nassförderung gewonnene und rundkörnige Mittelsand "N" stammt aus einem Kalksandsteinwerk in der Norddeutschen Tiefebene. Bei der Nassgewinnung wird der erwünschte CSH-Phasen bildende und hohlraumfüllende Feinstkornanteil weitgehend ausgespült, so dass auch dieser Sand eine entsprechend geringe Packungsdichte aufweist. Der Grobsand "B" stammt aus einer Lagerstätte in Hessen, die ebenfalls zu einem Kalksandsteinwerk gehört. Dieser Sand wird mittels Trockenabbau gewonnen. Er verfügt aufgrund seiner stetigen Korngrößenverteilung über einen geringen Verdichtungshohlraum und weist eine entsprechend höhere Packungsdichte als der Feinsand und der Mittelsand auf. Für die Versuche zur Erhöhung der Packungsdichte sind folgende Gesteinskörnungen zum Einsatz gekommen:

- | | |
|------------------------------------|--------------------------|
| ○ Quarzmehl "W3" | (Nordrhein-Westfalen) |
| Quarzsande "G0/0,35" bis "S2/3,5T" | (Norddeutsche Tiefebene) |
| ○ Feinsand "N" 0/2 mm | (Norddeutsche Tiefebene) |
| ○ Feinsand "R" 0/0,3 mm | (Süddeutschland) |
| ○ Mittelsand "S" 0/2 mm | (Süddeutschland) |
| ○ Grobsand "B" 0/4 mm | (Süddeutschland) |
| ○ Grauwackefüller 0/0,9 mm | (Nordrhein-Westfalen) |
| ○ Grauwackesplitt 0/2 mm | (Nordrhein-Westfalen) |
| ○ Basalt "T" 0/2 mm | (Hessen) |
| ○ Kalksteinmehl | (Nordrhein-Westfalen) |
| ○ Recyclingsplitt 2/5 mm | (Nordrhein-Westfalen) |

Die Quarzkörnungen "W3" und "G0/0,35" bis "S 2-3,5 T" stammen aus einem Quarzsandvorkommen aus der norddeutschen Tiefebene. Diese sehr reinen Sande sind mehrfach gewaschen und hydroklassiert. Sie sind pH-neutral, frei von Huminstoffen, löslichen Salzen oder sonstigen Verunreinigungen. Diese Sande weisen einen Quarzgehalt von > 99,5 M.-% SiO₂ auf und enthalten keine nennenswerten Gehalt an Nebenmineralen. Die nachfolgende Tabelle 4.1 enthält die Kennwerte (Mittelwerte) für alle verwendeten Gesteinskörnungen.

Gesteinskörnung	Packungs-dichte (berechnet gemäß Algorhythmus nach SCHWANDA [91-93]) [Vol.-%]	Sphäri-zität SPHT [-]	Circu-larität C_r (=1/SPH T) [-]	L/B-Verhältnis [-]	Rein-dichte mittels Pyknometer [dm ³]	Hg-füllbare Porosität (siehe Abschnitt 3.3.2.4) [Vol.-%]
Quarzmehl "W3"	59,0	1,118	0,894	1,550	2,65	n.b.
Quarzsand "G 0/0,35"	56,7	./.	./.	./.	2,65	n.b.
Quarzsand "G 0,7/1,2 T"	59,3	./.	./.	./.	2,65	n.b.
Quarzsand "G 12"	56,9	1,058	0,954	1,409	2,65	n.b.
Quarzsand "G 34 T"	59,3	./.	./.	./.	2,65	n.b.
Quarzsand "S 1/2 T"	56,9	./.	./.	./.	2,65	0,019
Quarzsand "S 40 T"	56,7	1,066	0,938	1,380	2,65	0,015
Quarzsand "S 2/3,5 T"	56,7	1,088	0,919	1,438	2,65	0,015
Feinsand "R" 0/0,3 mm	57,3	1,100	0,909	1,513	2,65	0,014
Mittelsand "N" 0/2 mm	59,0	1,065	0,934	1,422	2,65	n.b.
Mittelsand "S" 0/2 mm	58,9	1,069	0,935	1,370	2,65	0,033
Grobsand "B" 0/4 mm	60,9	1,109	0,902	1,446	2,65	0,028
Grauwackefüller 0/0,9 mm	59,1	./.	./.	./.	2,70	n.b.
Grauwackesplitt 0/2 mm	67,2	1,166	0,858	1,631	2,70	0,008
Basalt "T" 0/2 mm	63,0	1,197	0,835	1,769	3,05	0,005
Recyclingsplitt 2/5 mm	58,6	1,221	0,819	1,692	2,56	0,220
KSM 1	61,7	./.	./.	./.	2,70	./.
KSM 2	69,8	./.	./.	./.	2,70	./.
KSM	59,0	./.	./.	./.	2,70	./.

n.b.: nicht bestimmbar

Tabelle 4.1: Kennwerte der eingesetzten Gesteinskörnungen

4.2.2 Grauwacken

Als sedimentäre Gesteine, die auch bei der Kalksandstein-Produktion Verwendung finden, wurden zwei Grauwacken unterschiedlicher Körnung (Grauwackefüller: 0,09 mm und Grauwacke-sand: 0/2 mm) aus Nordrhein-Westfalen verwendet.

4.2.3 Basalt

Als Basalt-Sand wurde ein basisch-silikatisches Material der Körnung 0/2 mm mit der Bezeichnung "T 0/2 mm" aus Hessen in die Untersuchungen einbezogen.

4.2.4 Recyclingsplitt

Im Baubereich werden Umweltaspekte zukünftig eine weiter ansteigende Bedeutung erlangen. Im Rahmen dieser Versuche wurde deshalb ein Recycling-Splittmaterial (Fraktion 2/5 mm) berücksichtigt. Hierbei handelt es sich um ein Granulat aus mineralischen Abbruchmaterialien, bestehend aus Ziegel-, Beton-, Mörtel-, Kalksandstein-Material, ohne erkennbare Anteile organischer Verunreinigungen.

4.2.5 Kalksteinmehle

Im Teil 1 der Untersuchungen wurde als Füller ein Kalksteinmehl mit der Bezeichnung KSM in den Versuchsplan aufgenommen (97,5 M.-% CaCO₃). Im Teil 2 wurden als Füller zwei Kalksteinmehle unterschiedlicher Korngrößenverteilung und chemischer Zusammensetzung mit den Bezeichnungen KSM 1 (80,2 M.-% CaCO₃) und KSM 2 (98,8 M.-% CaCO₃) in die Versuchsreihen aufgenommen.

4.3 Kalke

Um eine praxisnahe Berücksichtigung der Bandbreite von Kalkeigenschaften zu erreichen, wurden drei verschiedene Kalksorten berücksichtigt. Die Vorversuche haben ergeben, dass die Kalksorte (hier: CL80, CL90-1 bzw. CL90-2) keinen entscheidenden Einfluss auf die Verdichtung und die Packungsdichte hat, so dass für die weiteren Serien ausschließlich der Branntkalk CL90-1 eingesetzt wurde.

4.4 Wasser

Das maßgebende Kriterium beim Anmachwasser bezüglich der Steinqualität ist sein Gehalt an gelösten Fremdionen. Um im Rahmen dieser Untersuchungen den Einfluss von Störstoffen im Anmachwasser auszuschließen, wurde für die Untersuchungen ausschließlich entmineralisiertes Wasser verwendet.

4.5 Fließmittel

Es wurden zwei verschiedene Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylatether (PCE A und PCE B) mit unterschiedlich langen Seitenketten sowie ein Tensid (BV 8) in die Untersuchungen einbezogen. Diese Mittel sind nach bisherigen Erkenntnissen „härtekesseltauglich“. Die Fließmittel wurden entweder direkt dem Anmachwasser bzw. dem Sand zugegeben. Im einem Fall wurde ein Polycarboxylatether direkt dem als Anmachwasser verwendetem Härtekesselkondensat zugegeben, das eine Temperatur von rd. T = 80 °C hatte. Nach Auskunft des Herstellers sind diese Mittel bis über eine Temperatur von rd. T = 100 °C temperaturstabil. Auswirkungen der Temperatur auf die Wirksamkeit waren nicht erkennbar. Erkennbare Störungen der Aufbereitung der Rohmischung, des Kalklöschprozess sowie der CSH-Phasen-Synthese waren ebenfalls nicht erkennbar.

5 EXPERIMENTELLER TEIL

5.1 Allgemeines

Um die Einflussgrößen der Gefügeeigenschaften möglichst vollständig und praxisnah zu erfassen, wurden für alle Serien Kalksandstein-Laborprüförper mit den Abmessungen $l \times b \times h = 240 \times 115 \times 113$ mm hergestellt und deren physikalisch-mechanische und chemisch-mineralo-gische Eigenschaften untersucht. Die Haupteinflussgrößen sind zum einen die Eigenschaften der Ausgangsmaterialien und zum anderen die Verdichtungsparameter. Mit dem Ziel der Simulation einer möglichst praxisnahen Herstellsituation im Kalksandsteinwerk werden die Herstellparameter, wie im Folgenden erläutert, variiert [166]. Die Herstellparameter und Untersuchungsergebnisse zu allen durchgeführten Varianten sind in den Tabellen 10.4 bis 10.7 zusammengestellt.

5.2 Kalkdosis

Eine Steigerung der Kalkdosis hat über den Aufbau von Kohäsionskräften einen erhöhen- den Einfluss auf die Rohlingsstandfestigkeit und wegen der direkten Beteiligung an der CSH-Phasen-Synthese einen Einfluss auf die Steindruckfestigkeit. Zusätzlich wird durch die Erhöhung der Kalkdosis die Viskosität der Kalk-Sand-Rohmischung reduziert und da- mit deren Fließfähigkeit erhöht. Deshalb wurde die Kalkdosis für die Untersuchungen innerhalb folgender Bandbreite variiert: $\text{CaO} = 5 / 7 / 9 \text{ M.-\%}$.

5.3 Pressfeuchte

Bei der Kalksandsteinproduktion ist der Wassergehalt der Kalk-Sand-Rohmischung auf- grund verschiedener Rohstoffeigenschaften und verfahrenstechnischer Möglichkeiten und Gegebenheiten unterschiedlich hoch einzustellen. Da die Pressfeuchte einen maßgeblichen Einfluss auf alle weiteren Produktionsschritte hat, wurde sie innerhalb einer praxisüb- lichen Bandbreite stufenweise erhöht: (5 / 6 / 7 / 8 M.-%). Resultierend aus den Ergebnis- sen der Vorversuche und auch im Hinblick auf eine bessere Vergleichbarkeit der Serien untereinander wurde die Pressfeuchte global auf 5 M.-% festgelegt und nur bei ausge- wählten Serien variiert.

5.4 Pressdruck

Ebenfalls hat der Verdichtungsgrad der Rohlinge einen wesentlichen Einfluss auf die Fes- tigkeitswerte. Um die damit verbundenen Eigenschaftsveränderungen der Rohlinge bzw. Kalksandsteine zu erfassen, wurde bei der Herstellung der Prüfkörper der Pressdruck wie folgt variiert: $\sigma_p = 8 / 10 / 15 / 20 / 32 \text{ N/mm}^2$. Mit den Extremwertem $\sigma_p = 8$ und 32 N/mm^2 wurde im Rahmen von Zusatzversuchen eine Unter- bzw. eine Überverdichtung der Kalk- Sand-Rohmasse provoziert.

5.5 Pressgeschwindigkeit / -dauer

Aus der betrieblichen Praxis ist bekannt, dass eine langsame Entlüftung der Kalk-Sand- Rohmasse einfacher zu höheren Scherbenrohdichten führt. Die Häufigkeit von risserzeu- genden gespannten Luftblasen im Steininneren wird verringert bzw. sogar vermieden und das sogenannte "elastische Reexpansionsmaß" nach dem Ausstoßen der Rohlinge aus den Formwerkzeugen wird verringert. Zur Erkundung dieses Einflussfaktors wurde die Verdichtungsdauer (Haltezeit bei Erreichen des Maximaldrucks) variiert:

- Teil 1: $t_p = 3 / 30 / 60$ s
- Teil 2: $t_p = 5 / 10 / 15$ s

Im Rahmen der Laborversuche wurde die Haltezeit bei Erreichen des Maximaldrucks einheitlich auf $t_p = 10$ s festgelegt.

5.6 Maschinentechnische Parameter

Bei den Versuchen zum Verdichtungsverhalten von Kalk-Sand-Rohmassen wurden neben den Versuchen zur Druckverdichtung (Standardfall) in einem Kalksandsteinwerk zusätzliche Versuche zur Berücksichtigung der Rüttelverdichtung durchgeführt. Die Rüttelfrequenz beträgt $\omega = 50$ Hz und die Amplitude bei $A = 2$ mm. Nach Auskunft von Pressenherstellern wurde die Vibrationsverdichtung aufgrund des mit ihr einher gehenden wesentlich höheren Materialverschleißes und der für die Maßhaltigkeit der Produkte erforderliche Notwendigkeit einer „starr“ geführten Formwerkzeuglagerung im Pressenrahmen und auch aufgrund mangelnder Erfahrungen bislang kaum praktiziert.

In den meisten Fällen erfolgt bei der Kalksandsteinerstellung eine einstufige Befüllung der Formwerkzeugkästen. Es ist jedoch ebenfalls möglich, den Füllvorgang bei großformatigen Kalksandsteinprodukten in zwei Schritten ablaufen zu lassen. Im Rahmen der Werksversuche wurden deshalb zusätzlich eine zweistufige Befüllung berücksichtigt. Ein Einfluss auf die Verdichtung wurde in keinem Fall festgestellt. Einer Rüttelverdichtung wurde ausschließlich im Rahmen der Werkversuche in einem Kalksandsteinwerk durchgeführt.

5.7 Härteparameter

Die Auswirkungen der Härteparameter auf die Steineigenschaftswerte sind für die Standardbedingungen weitgehend erforscht [168]. Deshalb wurden bei den Laborversuchen für sämtliche Serien die nachfolgend aufgeführten Standardbedingungen angesetzt:

- | | |
|--------------------------------|----------------|
| • Dauer der Aufheizphase: | $t_a = 1$ h |
| • Dauer der Haltephase: | $t_h = 4$ h |
| • Dauer der Entspannungsphase: | $t_e = 1$ h |
| • Härtedruck: | $p_e = 16$ bar |
| • Härtetemperatur: | $T_h = 203$ °C |

5.8 Fließmitteldosis

Die Fließmitteldosis wurde bei den Laborversuchen und auch bei den Versuchen in den Werken zu 1 / 2 / 3 / 5 M.-% (bezogen auf die gesamte Anmachwassermenge) festgelegt. Die Anmachwassermenge wurde um den entsprechenden Betrag reduziert. Da die Fließmittel aus betriebspraktischen Gründen (gravimetrische Dosierung) am einfachsten der Anmachwassermenge zugegeben werden können, wird die Dosierung auf die Anmachwassermenge bezogen. Die Varianten zu den Experimenten mit den Fließmitteln sind in den Tabellen 10.4 bis 10.7 zusammengestellt.

6 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

6.1 Optimierung des Verdichtungswilligkeit von Kalk-Sand-Rohmischungen

6.1.1 Allgemeines

Diese Versuchsreihen dienten als Vorversuche zur Eignungsbeurteilung der berücksichtigten Fließmittel und geben ebenfalls Hinweise zum Einfüllverhalten der Rohmischungen in die Formwerkzeuge (Übersicht der Versuche: siehe Anhang Tabelle 10.1, Eigenschaftswerte der Sande: siehe Anhang Tabelle 10.2 und Bild 10.3). Das Verdichtungsverhalten von Kalk-Sand-Rohmassen wurde von folgenden, voneinander unabhängigen Einflussgrößen bestimmt:

- Korngrößenverteilung und Kornform der Gesteinskörnungen (Fein-, Mittel- und Grobsand)
- CaO-Dosis in der Kalk-Sand-Rohmischung (hier: Branntkalk CL 90-1)
- Anmachwassermenge (Pressfeuchte)
- Pressdruck
- Art und Menge der zugegebenen Fließmittel (interpartikuläre Kräfte), siehe Abschnitt 4.5.

Rüttelversuche ohne Auflast:

Beim Verpressvorgang dominieren die sehr hohen Presskräfte ($F_{max} = 12 \text{ MN}$) das Verdichtungsgeschehen. Dennoch lassen sich die durch die anderen Einflussgrößen erzielten Effekte deutlich erkennen und experimentell voneinander trennen. In diesem Untersuchungsabschnitt werden die ermittelten Wirkungen der oben genannten Herstellparameter auf die Verdichtung der Kalk-Sand-Rohmischung erläutert. Als Kenngröße für das Verdichtungsergebnis durch den Rüttelversuch wird die "Rütteldichte S_R " gewählt. Bis auf den Faktor Fließmittel treten immer alle genannten Einflussgrößen gleichzeitig auf. Der Fließmitteleinfluss kann daher isoliert untersucht werden. Um die Wirkung der Fließmittel zu analysieren, muss der Einfluss der mechanischen Verdichtung ausgeblendet werden. Deshalb wurden die Rüttelversuche an Kalk-Sand-Rohmischungen ohne Auflast durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse zu den Zusammenhängen zwischen den Herstellparametern von Kalk-Sand-Rohmischungen und deren Fließverhalten beim Rüttelversuch lassen verschiedene Tendenzen deutlich erkennen. Sie werden im Folgenden vorgestellt. Die Einzelwerte enthält die Tabelle 10.1 im Anhang.

Druckverdichtung:

Die Wirkung der o. g. Verdichtungsparameter auf die Dichte der verpressten Rohlinge ist identisch mit deren Wirkung auf die Scherbenrohdichte der gehärteten Kalksandsteine. Hierüber wird in den Abschnitten 6.3 sowie auch im Abschnitt 7 (Modellbildung) berichtet.

6.1.2 Einfluss der CaO-Dosis - Rüttelversuche ohne Auflast

Der reine Einfluss der CaO-Dosis auf das Verdichtungsverhalten der Kalk-Sand-Rohmischungen wurde ohne Zugabe von Fließmitteln ermittelt. Der Wassergehalt wurde für diese Serien konstant gehalten ($F_p = 5 \text{ M.-\%}$). Deutlich erkennbar ist der Zusammenhang zwischen der CaO-Dosis in der Kalk-Sand-Rohmischung und der Rütteldichte S_R . Bei den drei einbezogenen Sanden zeigen sich mit zunehmender CaO-Dosis abnehmende Werte für die Rütteldichte S_R . Die Ursache für diesen Effekt liegt möglicherweise in den elektrostatisch abstoßenden (positiven) Kräften zwischen den Kalkpartikeloberflächen, die mit ansteigender CaO-Dosis deutlich ansteigen und zu einer zunehmenden Viskosität und einer entsprechenden Verdichtungsunwilligkeit der erdfeuchten Kalk-Sand-Rohmischung führen.

Um den Einfluss der Oberflächenvergrößerung durch die Steigerung der CaO-Dosis zu beschreiben, wurde die BET-Oberfläche von Kalken und Sanden aus der Literatur herangezogen und die BET-Oberflächen von Kalk-Sand-Rohmischungen in Abhängigkeit der CaO-Dosis überschlägig berechnet. OHNEMÜLLER und HUPE haben in [167] u.a. die BET-Oberflächen von Kalken und Quarzsanden untersucht. Die BET-Oberflächen von handelsüblichen Kalkhydraten liegen bei $A_{Kalk} = 20 \text{ bis } 30 \text{ m}^2/\text{g}$. Für diese Betrachtung wurde ein Mittelwert von $A_{Kalk\varnothing} = 25 \text{ m}^2/\text{g}$ angesetzt. Die BET-Oberflächen der Kalk-Sand-Rohmassen liegen aufgrund der Mengenanteile der groben Gesteinskörnungen mit ihren geringeren Oberflächen mit Werten zwischen $A_{KS-\text{Mischung}} = 2 \text{ bis } 3 \text{ m}^2/\text{g}$ deutlich darunter. An dieser Stelle wird mit einem Mittelwert von $A_{KS-\text{Mischung}\varnothing} = 2,5 \text{ m}^2/\text{g}$ gerechnet. Anhand dieses Vergleichs ist deutlich erkennbar, dass die Oberfläche der Rohmischungen mit ansteigender Kalkmenge aufgrund der großen Feinheit des Kalkes stark zunimmt, was die Zunahme der abstoßenden Kräfte erklärt. Bild 6.1 zeigt für die drei berücksichtigten CaO-Dosisstufen die Ergebnisse zur Rütteldichte S_R und die überschlägig berechneten BET-Oberflächen der Kalk-Sand-Rohmischungen in den Rohmischungen.

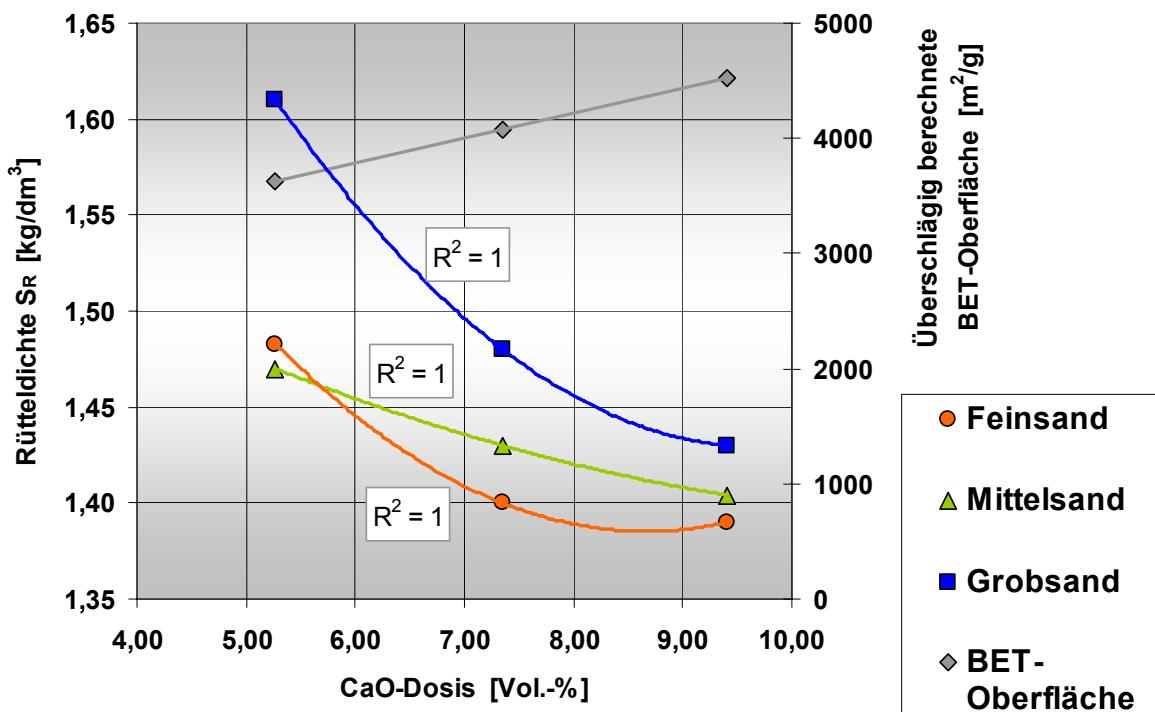


Bild 6.1: Einfluss der CaO-Dosis auf die Rütteldichte S_R - ohne Auflast, ohne Fließmittel

Unter mechanischem Druck verdichtete Kalk-Sand-Rohmassen zeigen dieses Verhalten nicht. Im Gegenteil: unter Zwangsverdichtung tritt aufgrund der höheren Raumausfüllung durch die feinen Kalkpartikel und wegen des Schmiermitteleffektes die erwartete Dichterhöhung auf.

6.1.3 Einfluss der Pressfeuchte - Rüttelversuche ohne Auflast

Der reine Einfluss der Pressfeuchte auf das Verdichtungsverhalten der Kalk-Sand-Rohmischung wurde ohne Zugabe von Fließmitteln ermittelt. Die CaO-Dosis wurde bei diesen Serien mit 7 M.-% ($\approx 7,22$ Vol.-%) konstant gehalten. Wie sich zeigt, hat die Pressfeuchte ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf die Rütteldichte S_R . Mit zunehmender Pressfeuchte nimmt die Rütteldichte S_R bei allen drei in diese Untersuchungen einbezogenen Sanden kontinuierlich analog zum sogenannten „aufsteigenden Ast“ der Proctor-Kurve zu. Als Obergrenze wurde ein maximaler Wassergehalt von 8 M.-% ($\approx 8,22$ Vol.-%) gewählt. Dieser Effekt ist wahrscheinlich eine Folge der zunehmenden von Wasser benetzten Feinpartikeloberflächen (effektive Wasserfilmdicke), die zu einer schlechteren Verarbeitung führt, siehe Bild 6.2.

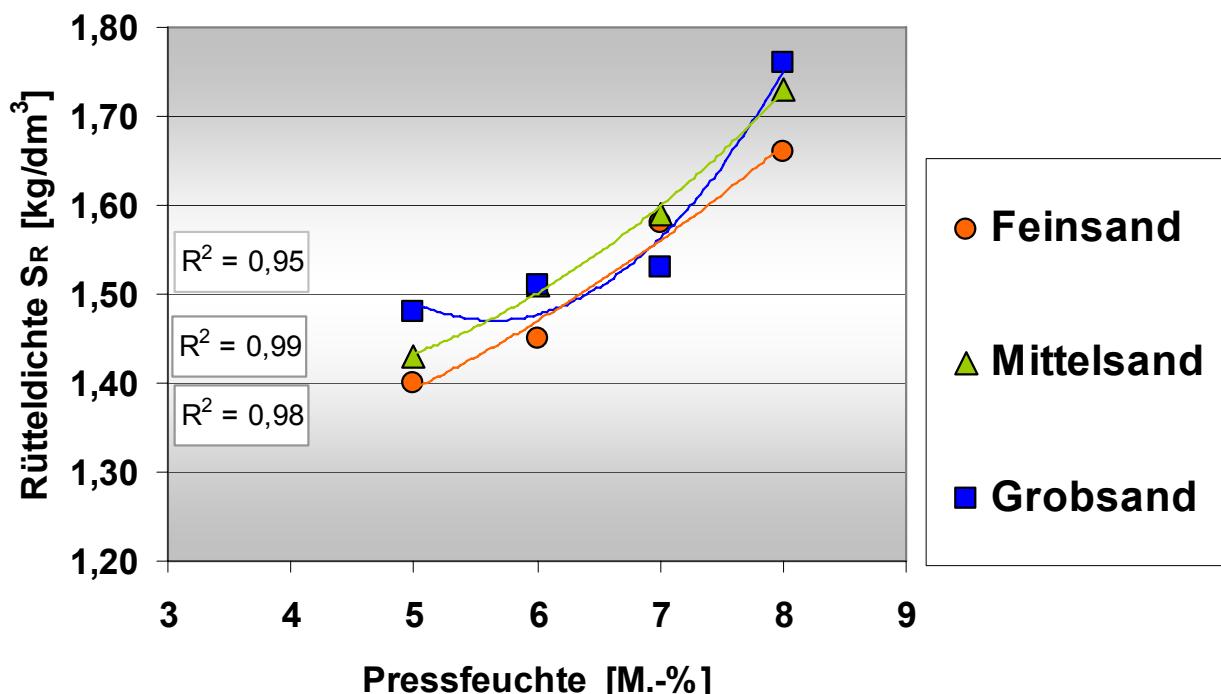


Bild 6.2: Einfluss der Pressfeuchte auf die Rütteldichte S_R - ohne Auflast, ohne Fließmittel

6.1.4 Einfluss der Zugabe von Fließmitteln - Rüttelversuche ohne Auflast

Variation der Fließmitteldosis:

Um den Einfluss der Fließmittel isoliert zu untersuchen, wurden bei diesen Serien die CaO-Dosis (7 M.-%) und die Pressfeuchte ($F_p = 5$ M.-%) konstant gehalten. Die Fließmitteldosis bezieht sich in allen Fällen auf die zugegebene Wassermenge. Das Polycarboxylatether (Sorte B) wurde als einziges Mittel zusammen mit allen drei Sanden getestet. Die anderen beiden Sorten wurden lediglich mit dem Grobsand kombiniert.

Der Zusammenhang zwischen der Fließmitteldosis und dem jeweils erreichten Verdichtungsergebnis ist deutlich erkennbar. Die erwünschte Fließfähigkeitserhöhung durch die Zugabe des Polycarboxylatethers tritt beim Rüttelversuch fast durchgängig auf. Die Rütteldichte S_R nimmt bei allen drei Sanden mit ansteigender Dosis zu. Beim Grobsand steigt die erreichbare Rütteldichte S_R bei im oberen Dosisbereich (5 M.-%) sogar noch deutlich an. Das nachfolgende Bild 6.3 zeigt die Wirkung der Fließmittel für die drei Sande bei ansteigender Fließmitteldosis.

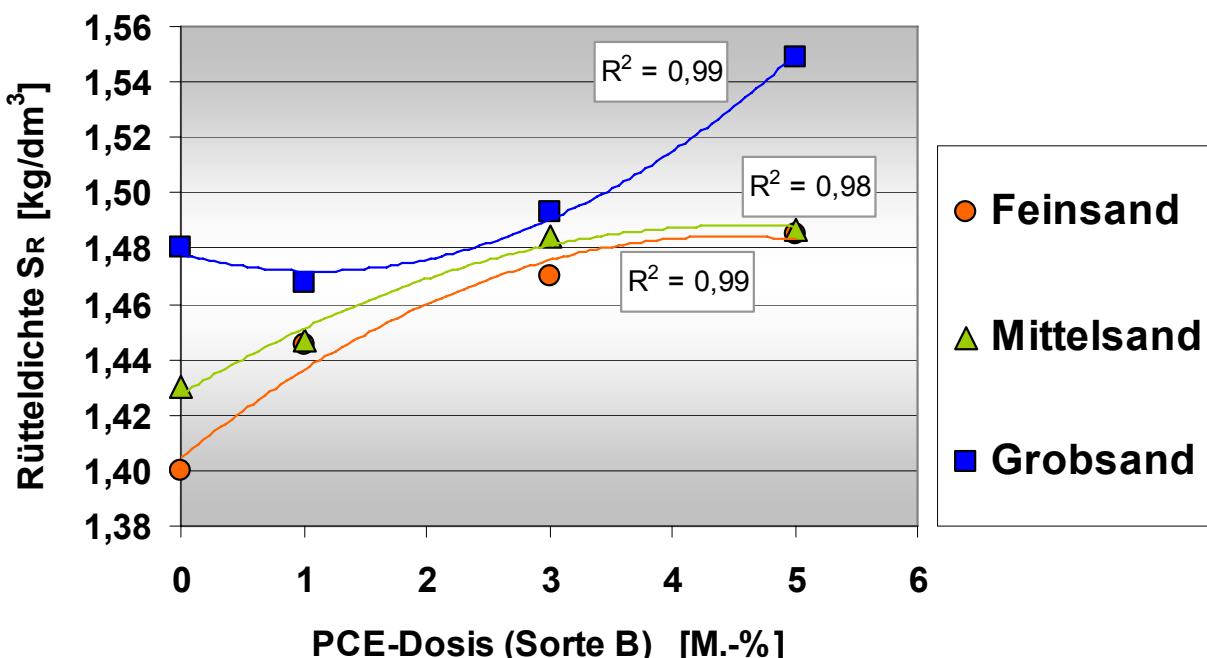


Bild 6.3: Einfluss der Polycarboxylatether-Dosis (Sorte B) auf die Rütteldichte S_R der drei Kalk-Sand-Rohmischungen (ohne Auflast)

Die Ursachen für die beobachteten Effekte liegen im Einzelnen im Zusammenspiel der anziehenden (van-der-Waals-Kräfte) und abstoßenden (elektrostatische Kräfte und sterischer Dispergierungseffekt) Kräfte und werden neben der Größe der Feinpartikeloberflächen der beteiligten Komponenten von der chemischen Beschaffenheit und der Menge der Fließmittel und durch die effektive Wasserfilmdicke beeinflusst. Folgende grundsätzlichen Zusammenhänge liegen vor:

Die anziehenden van-der-Waals-Kräfte V_A nehmen mit ansteigender Oberfläche der Stoffe zu und behindern die Verdichtung. Die Sandoberfläche ist beim Grobsand am geringsten und beim Feinsand am höchsten. Der Mittelsand nimmt erwartungsgemäß eine Mittelstellung ein. Die spezifische Oberfläche der Sande nach FISCHER beträgt:

- Feinsand: $A_{\text{spez}} = 182 \text{ cm}^2/\text{g}$
- Mittelsand: $A_{\text{spez}} = 141 \text{ cm}^2/\text{g}$
- Grobsand: $A_{\text{spez}} = 42 \text{ cm}^2/\text{g}$

Die abstoßenden elektrostatischen Kräfte V_R und der sterische Dispergierungseffekt V_S nehmen mit ansteigender Oberfläche der Stoffe und mit ansteigender Fließmitteldosis ebenfalls zu. Sie erleichtern die Rüttelverdichtung. Die Ergebnisse zeigen, dass die abstoßenden Kräfte den Prozess anscheinend dominieren.

Fein- und Mittelsand: Im unteren und mittleren Dosisbereich (1,0 und 3,0 M.-% PCE-B) nehmen infolge der zunehmender Dispergierwirkung durch das Fließmittel die abstoßenden Kräfte zu, so dass die Rüttelverdichtung infolge weitgehender Disagglomerierung einfacher abläuft. Bei der höchsten Dosis (5 M.-%) tritt jedoch kein Zuwachs bei der Rütteldichte S_R mehr auf.

Grobsand: Abgesehen von der geringsten Zugabedosis (1 M.-%) nimmt die erreichbare Rütteldichte S_R mit ansteigender Fließmitteldosis infolge der damit verbundenen Steigerung des sterischen Dispergierungseffektes deutlich zu. Hier überwiegen die abstoßenden Kräfte.

Variation des Fließmittels:

Bild 6.4 zeigt für den Grobsand die Wirkung der drei verschiedenen Fließmittel auf die Rütteldichte S_R . Bei der Nullserie ohne Zugabe von Fließmitteln wurde eine Rütteldichte S_R mit einem Wert von rd. 1,48 kg/dm³ erreicht. Bei allen drei Mitteln ergeben sich in Abhängigkeit von der Dosierung aufgrund des Disagglomerierungseffektes unterschiedlich hohe Zuwächse bei der Verdichtung. Beim Tensid 8 steigt die Rütteldichte erst bei 3 M.-% auf einen Maximalwert von $S_R = 1,58$ kg/dm³ an und fällt bei einer Dosis von 5 M.-% wieder auf einen Wert von $S_R = 1,56$ kg/dm³ etwas ab. Beim Einsatz des Polycarboxylatether (Sorte A) stellt sich bereits bei der geringsten Dosistufe von 1 M.-% des Anmachwassers eine vergleichsweise hohe Rütteldichte mit einem Wert von $S_R = 1,55$ kg/dm³ ein. Dieses Niveau wird bei einer Dosis von 3 M.-% etwa gehalten und fällt bei einer Zugabemenge von 5 M.-% wieder auf einen Wert von $S_R = 1,50$ kg/dm³ ab. Die Wirkung des Polycarboxylatethers (Sorte B) wurde bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben. Es hat sich im Rahmen der berücksichtigten Fließmittel als das Erfolg versprechenste der drei berücksichtigten Fließmittel herausgestellt.

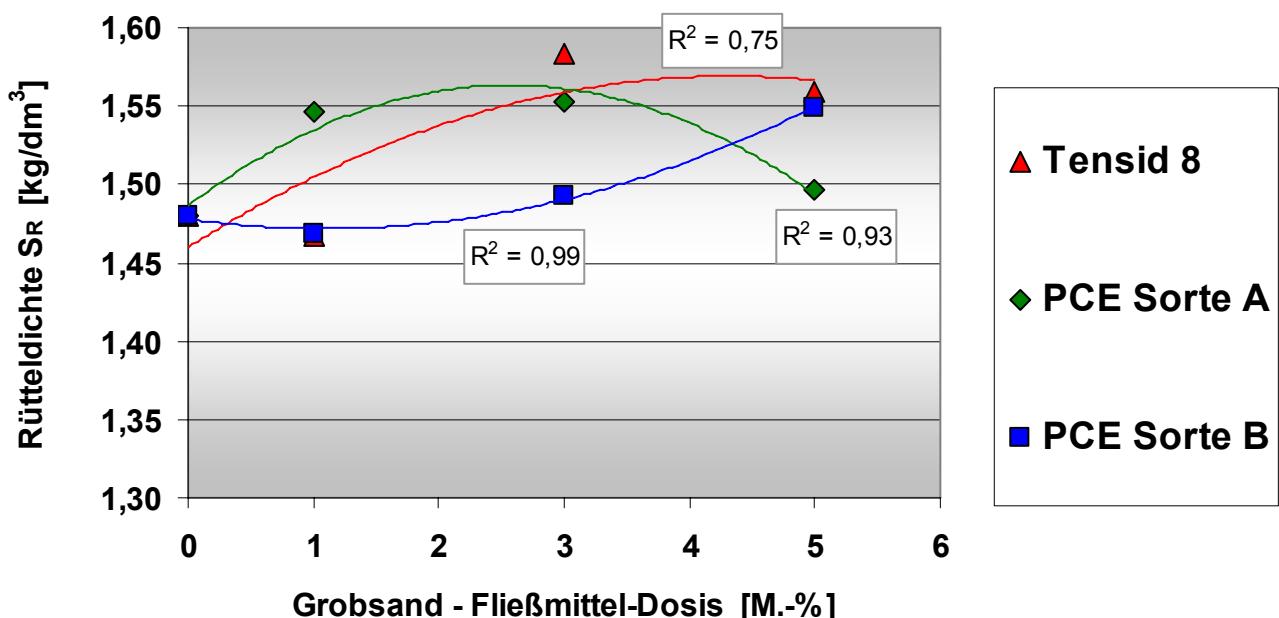


Bild 6.4: Einfluss der verschiedenen Fließmittel auf die Rütteldichte S_R der unter Verwendung von Grobsand erzeugten Kalksand-Rohmischungen (ohne Auflast)

Fazit:

Insgesamt zeigen die Versuche zur Verdichtungswilligkeit von Kalk-Sand-Rohmassen, dass bei den berücksichtigten Fließmitteln ein Disagglomerierungseffekt auftritt, der zu einer Reduzierung der Viskosität von Kalk-Sand-Rohmassen führt. Es wurde beobachtet, dass eine Zugabe von Fließmitteln, je nach Art und Dosis, in fast allen Fällen zu einer Erhöhung der Rütteldichte S_R führt. Daher werden die hier erprobten Fließmittel bei den Versuchen zur Herstellung von Kalksandstein-Prüfkörpern eingesetzt. Siehe Abschnitt 6.3.

6.1.4 Kasseler Rüttelproctor-Versuche

Die Ergebnisse der Untersuchungen am Rüttelproctor können den Bildern 10.1 und 10.2 im Anhang entnommen werden. In Bild 10.1 sind die maximalen Packungsdichten aus den Rüttel-proctor-Versuchen aufgetragen. In Bild 10.2 sind die Wasser-Feststoff-Verhältnisse aufgeführt, für die eine maximale Packungsdichte ermittelt wurden. Zwischen den Ergebnissen der Packungsdichteberechnung und den Proctorversuchen konnte kein Zusammenhang gefunden werden, was Wiederholungsversuche bestätigt haben. Die Ursache dafür ist nicht bekannt.

6.2 Untersuchungsergebnisse zur Erhöhung der Scherbenrohdichte

6.2.1 Allgemeines

Die Auswertung der Ergebnisse zu diesem Untersuchungsabschnitt erfolgt hauptsächlich hinsichtlich der für die betriebliche Produktionspraxis wichtigsten Eigenschaftswerte Scherben-rohdichte und Steindruckfestigkeit. Des Weiteren werden die wichtigsten Kennwerte zur Rohlingsstandfestigkeit, Wasseraufnahme und Frostwiderstand sowie zur Porosität und zur Gefügebeschaffenheit betrachtet. Die Basisgrößen für Bewertungen der Kalksandstein-Prüfkörper sind die "Basiseigenschaften der Nullserien" (Definition: siehe Seite 149), die unter folgenden Herstellparametern erzeugt wurden:

- | | | |
|--------------------|------------------------------------|--|
| • Kalkdosis: | $\text{CaO} = 7 \text{ M.-\%}$ | Härtedruck: $p_e = 16 \text{ bar}$ |
| • Pressfeuchte: | $U_p = 5 \text{ M.-\%}$ | Pressdruck: $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$ |
| • Härtetemperatur: | $T_h = 203 \text{ }^\circ\text{C}$ | Härtedauer $t_h = 1-4-1 \text{ h}$ |

Die Tabellen 10.4 bis 10.7 im Anhang geben einen Überblick über die Versuchsansätze und die Ergebnisse. Die Einzelergebnisse sind in den Bildern 10.3 bis 10.13 und Tabellen 10.2 bis 10.10 im Anhang dargestellt. Angegeben sind jeweils Mittelwerte aus 3 bis 6 Einzelwerten.

6.2.2 Rohlingsstandfestigkeit

Die Einflussgrößen der Rohlingsstandfestigkeit sind in erster Linie die Korngrößenverteilung der Sande, die CaO-Dosis, die Pressfeuchte, der Pressdruck sowie die Art und die Dosis des eingesetzten Fließmittels. Für die Standard-Herstellparameter der Nullserien ohne Zusatzstoffe und Fließmittel (siehe Abschnitt 4.2) ergeben sich bei den drei Sanden folgende Basis-Rohlingsstandfestigkeiten:

- Kalksandsteine aus Feinsand: $\beta_{D,RSF} = 0,06 \text{ N/mm}^2$
- Kalksandsteine aus Mittelsand: $\beta_{D,RSF} = 0,11 \text{ N/mm}^2$
- Kalksandsteine aus Grobsand: $\beta_{D,RSF} = 0,14 \text{ N/mm}^2$

Für die drei im Rahmen dieses Untersuchungsabschnitts betrachteten Basissande ergeben sich insgesamt tendenziell gleiche Effekte. Die Beobachtungen zur Rohlingsstandfestigkeit werden für die drei Sande nachfolgend beschrieben. Die einzelnen Untersuchungsergebnisse können den Tabellen 10.4 ff. im Anhang entnommen werden.

Feinsand: Die Rohlingsstandfestigkeit kann mit einer Anhebung des Pressdrucks und vor allem mit einer Erhöhung der CaO-Dosis gesteigert werden. Mit zunehmender Pressfeuchte nimmt die erreichbare Rohlingsstandfestigkeit (rechts vom PROCTOR-Optimum) wieder ab, weil dann der Wassergehalt zu hoch ist. Durch die Zugabe der Fließmittel sind infolge der Viskositätssteigerung entsprechende Einbußen bei der Rohlingsstandfestigkeit zu erkennen.

Mittelsand: Der Einfluss des Pressdrucks auf die Rohlingsstandfestigkeit ist gering. Eine Erhöhung der CaO-Dosis sowie die Zugabe von Quarzmehl bzw. Kalksteinmehl wirken steigernd. Mit zunehmender Pressfeuchte nimmt die erreichbare Rohlingsstandfestigkeit (rechts vom PROCTOR-Optimum) ab, weil der Wassergehalt dann zu groß ist. Durch die Zugabe der Fließmittel sind ebenfalls geringe Einbußen bei der Rohlingsstandfestigkeit zu erkennen.

Grobsand: Auch hier ist der steigernde Einfluss höherer Pressdrücke und der positive Einfluss höherer CaO-Mengen zu erkennen. Mit zunehmender Pressfeuchte nimmt die erreichbare Rohlingsstandfestigkeit (rechts vom PROCTOR-Optimum) ebenfalls aufgrund der zu großen Wassermenge ab. Durch die Fließmittelzugabe wird die Rohlingsstandfestigkeit tendenziell erhöht.

6.2.3 Steindruckfestigkeit

Die Einflussgrößen der Steindruckfestigkeit sind in erster Linie die Korngrößenverteilung der Sande, die CaO-Dosis, der Pressdruck, die Pressfeuchte, indirekt über die Reduzierung der Porosität die Art und die Dosis des eingesetzten Fließmittels sowie die Zugabe von Zuschlägen (hier: Quarzmehl und Kalksteinmehl) sowie die Härteparameter (Härtetemperatur und -dauer). Für die Standard-Herstellparameter der Nullserien (Definition: siehe Seite 149) ohne Zusatzstoffe und Fließmittel ergeben sich bei den drei Sanden folgende Basis-Steindruckfestigkeiten:

- Kalksandsteine aus Feinsand: $\beta_{D,St} = 19,1 \text{ N/mm}^2$
- Kalksandsteine aus Mittelsand: $\beta_{D,St} = 26,4 \text{ N/mm}^2$
- Kalksandsteine aus Grobsand: $\beta_{D,St} = 24,7 \text{ N/mm}^2$

In den nachfolgenden Diagrammen sind für die drei exemplarisch betrachteten Basissande die wichtigsten Änderungen der Steindruckfestigkeit aufgeführt. Zunächst werden die Auswirkungen der Änderung der mechanischen Verdichtungsparameter (Pressdruck, Pressfeuchte, Verdichtungsdauer) betrachtet. Danach erfolgt die Diskussion der Ergebnisse zur Zugabe der Fließmittel und der Zusatzstoffe (Tensid und Polycarboxylatether, Quarzmehl und Kalksteinmehl). Die Ergebnisse werden nachfolgend im Einzelnen vorgestellt. Die einzelnen Untersuchungsergebnisse können den Tabellen 10.4 bis 10.7 im Anhang entnommen werden.

Einfluss der CaO-Dosis

Der bekannte und in der Literatur [17] beschriebene Zusammenhang zwischen der Kalkmenge (hier: CaO-Dosis) und der erreichbaren Steindruckfestigkeit ist im nachfolgenden Diagramm (Bild 6.5) wiedergegeben. Mit zunehmender CaO-Dosis steigen die Scherbenrohdichte und die Steindruckfestigkeit bis zu einem optimalen Höchstwert an, der erreicht wird, wenn der Hohlraumgehalt des Grobkorngerüsts gerade von der Feinstoffmatrix ausgefüllt wird und fällt dann bei weiterer Zunahme der CaO-Dosis aufgrund des dann auftretenden Auseinanderdrängungseffektes wieder ab.

Ebenfalls hat die Ausbildung der CSH-Bindemittelphasen einen deutlichen Einfluss auf die Steindruckfestigkeit, die von der Höhe der CaO-Dosis, der Oberfläche der in Lösung gehenden SiO_2 -Träger, der lokalen Porosität in den Rohlingen (Reaktionsraum nach GUNDLACH, HÖRSTER, und RADERMACHER [74] und den Härteparametern (Härtetemperatur und -dauer) abhängen [1, 17]. Der Einfluss ist für alle drei Sande unterschiedlich.

Beim **Feinsand** liegt bei einer CaO-Dosis von 7 M.-% ($\approx 7,35$ Vol.-%) die im Rahmen der hier betrachteten Bandbreite mit einem Wert von $\beta_{D,St} = 19,1 \text{ N/mm}^2$ maximale Steindruckfestigkeit vor. Bei der geringeren CaO-Dosis und bei der höheren CaO-Dosis liegen die erreichten Druckfestigkeitswerte mit $\beta_{D,St} = 16,1 \text{ N/mm}^2$ (bei 5 M.-% $\approx 5,27$ Vol.-%) und $\beta_{D,St} = 17,3 \text{ N/mm}^2$ (bei 9 M.-% $\approx 9,41$ Vol.-%) auf einem etwas niedrigeren Niveau.

Beim **Mittelsand** steigt die erreichbare Steindruckfestigkeit mit zunehmender CaO-Dosis von $\beta_{D,St} = 15,5 \text{ N/mm}^2$ bei 5 M.-% CaO ($\approx 5,27$ Vol.-%) über $\beta_{D,St} = 26,4 \text{ N/mm}^2$ bei 7 M.-% CaO ($\approx 7,35$ Vol.-%) auf einen Höchstwert von $\beta_{D,St} = 33,3 \text{ N/mm}^2$ bei einer CaO-Menge von 9 M.-% ($\approx 9,41$ Vol.-%) an.

Beim **Grobsand** fällt der Zuwachs geringer aus. Hier steigt die erreichbare Steindruckfestigkeit mit zunehmender CaO-Dosis von $\beta_{D,St} = 21,0 \text{ N/mm}^2$ bei 5 M.-% CaO ($\approx 5,27$ Vol.-%) über $\beta_{D,St} = 24,7 \text{ N/mm}^2$ bei 7 M.-% CaO ($\approx 7,35$ Vol.-%) auf einen Höchstwert von $\beta_{D,St} = 25,4 \text{ N/mm}^2$ bei einer CaO-Menge von 9 M.-% ($\approx 9,41$ Vol.-%) an.

Beim Mittel- und Grobsand wurden die Maximalwerte möglicherweise noch nicht erreicht.

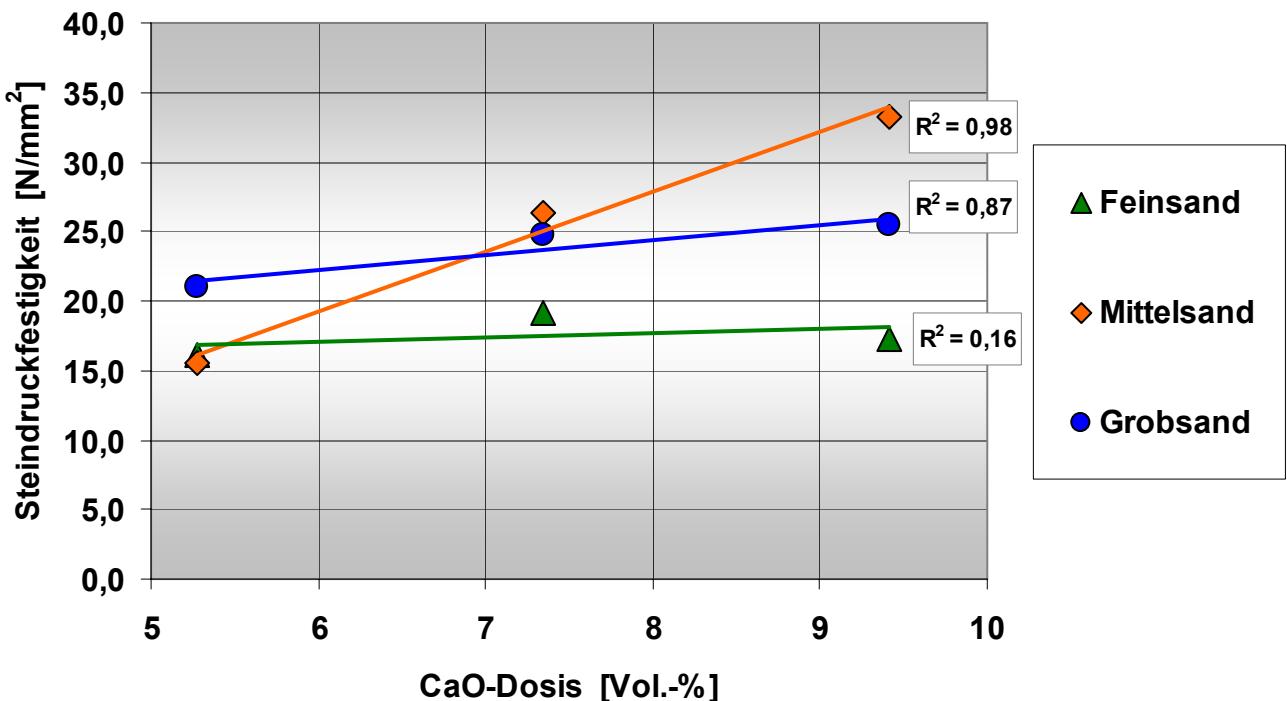


Bild 6.5: Einfluss der CaO-Dosis auf die Steindruckfestigkeit

Einfluss des Pressdrucks

Das Bild 6.6 zeigt den Einfluss des Pressdrucks auf die Steindruckfestigkeit. Bei allen drei Sanden ergeben sich bei höheren Pressdrücken infolge der daraus resultierenden höheren Packungsdichte bzw. Scherbenrohdichte höhere Werte der Steindruckfestigkeit (siehe auch: Abschnitt 6.2.4: Scherbenrohdichte). Die Zuwächse sind sandspezifisch. Bei Ansatz des sehr niedrigen ($\sigma_{p,\min} = \text{ca. } 8 \text{ N/mm}^2$) und des überaus hohen ($\sigma_{p,\max} = \text{ca. } 32 \text{ N/mm}^2$) Pressdrucks war unter Ansatz praxisüblicher Produktionsparameter keine Prüfkörperherstellung möglich. Die Bestimmtheitsmaße liegen zwischen $R^2 = 0,82$ und $0,92$.

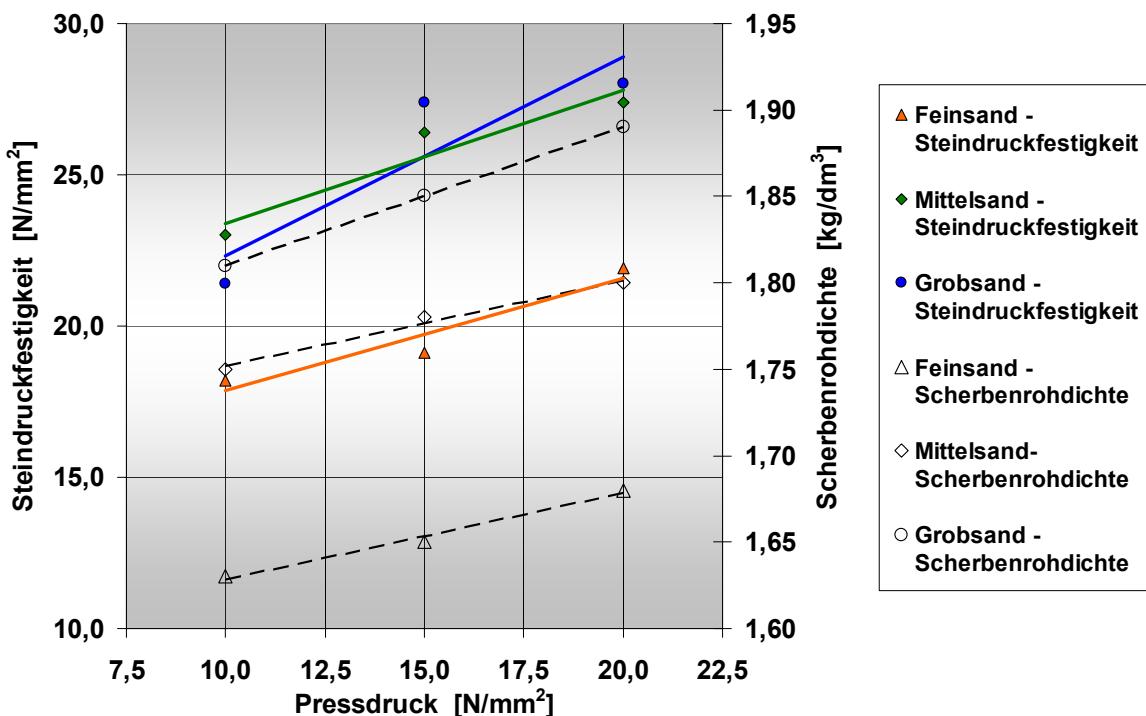


Bild 6.6: Einfluss des Pressdrucks auf die Steindruckfestigkeit: Die Steindruckfestigkeit nimmt mit steigendem Verdichtungsdruck zu.

Einfluss der Pressfeuchte

Das Bild 6.7 zeigt den sandspezifischen Einfluss der Pressfeuchte auf die Steindruckfestigkeit. Beim Feinsand und beim Grobsand ist das jeweilige Proctor-Maximum deutlich zu erkennen. Die Prüfkörper aus Mittelsand sind von vorn herein mit einer zu hohen Pressfeuchte hergestellt worden, so dass das Proctor-Maximum in allen Fällen überschritten wurde.

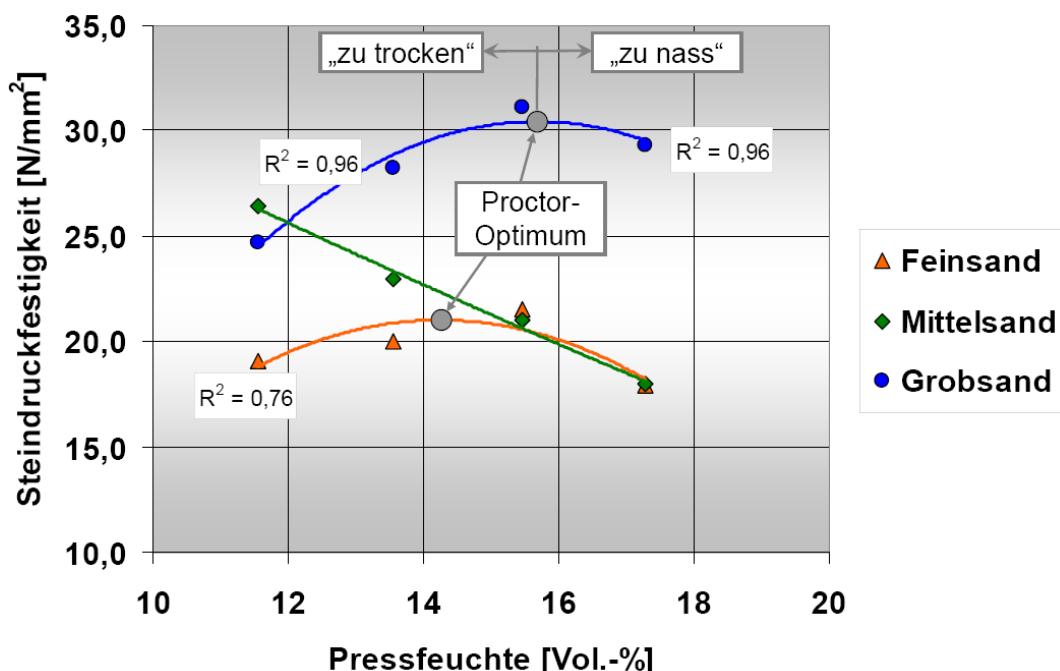


Bild 6.7: Der Einfluss der Pressfeuchte auf die Steindruckfestigkeit ist sandspezifisch.

Einfluss der Pressdauer:

Die Erhöhung der Pressdauer, ausgehend von $t_p = 3$ s über $t_p = 30$ s bis zu maximal $t_p = 60$ s Sekunden für jeden einzelnen Verdichtungsvorgang, hat im Rahmen der hier zugrunde liegenden Versuchsparameter keinen erkennbaren Einfluss auf die erreichte Steindruckfestigkeit gezeigt und wurde deshalb nicht weiter verfolgt.

Fließmittel:

Der festigkeitserhöhende indirekte Einfluss durch die in die Untersuchungen einbezogenen Fließmittel trat bei den aus Grobsand hergestellten Kalksandsteinen am deutlichsten auf und wird deshalb an den entsprechenden Serien erläutert. Die zugehörigen Scherbenrohdichten sind jeweils zusätzlich angegeben. Die Wirkung der Verdichtungshilfsmittel auf die unter Verwendung von Grobsand hergestellten Kalksandstein-Prüfkörper ist deutlich erkennbar. Bei einem bereits vergleichsweise hohen Pressdruck von $\sigma_p = 15$ N/mm² wird durch die Zugabe von 1 M.-% des Fließmittels mit der Bezeichnung PCE B eine Steigerung der Steindruckfestigkeit von rd. $\beta_{D,St} = 24,7$ N/mm² (Scherbenrohdichte $\rho_{tr} = 1,85$ kg/dm³) um 5 N/mm² auf $\beta_{D,St} = 29,7$ N/mm² (Scherbenrohdichte $\rho_{tr} = 1,90$ kg/dm³) erreicht. Dagegen konnte eine vergleichsweise geringere Steigerung auf $\beta_{D,St} = 28,0$ N/mm² (Scherbenrohdichte $\rho_{tr} = 1,89$ kg/dm³) nur durch eine enorme Anhebung des Pressdrucks auf $\sigma_p = 20$ N/mm² erreicht werden. Siehe Bild 6.8. Die Ursache für diesen Effekt ist die Reduzierung des Hohlräumvolumens im Grobkörnergerüst aufgrund der günstigeren Konsistenz (geringere Viskosität) des Feinmörtels.

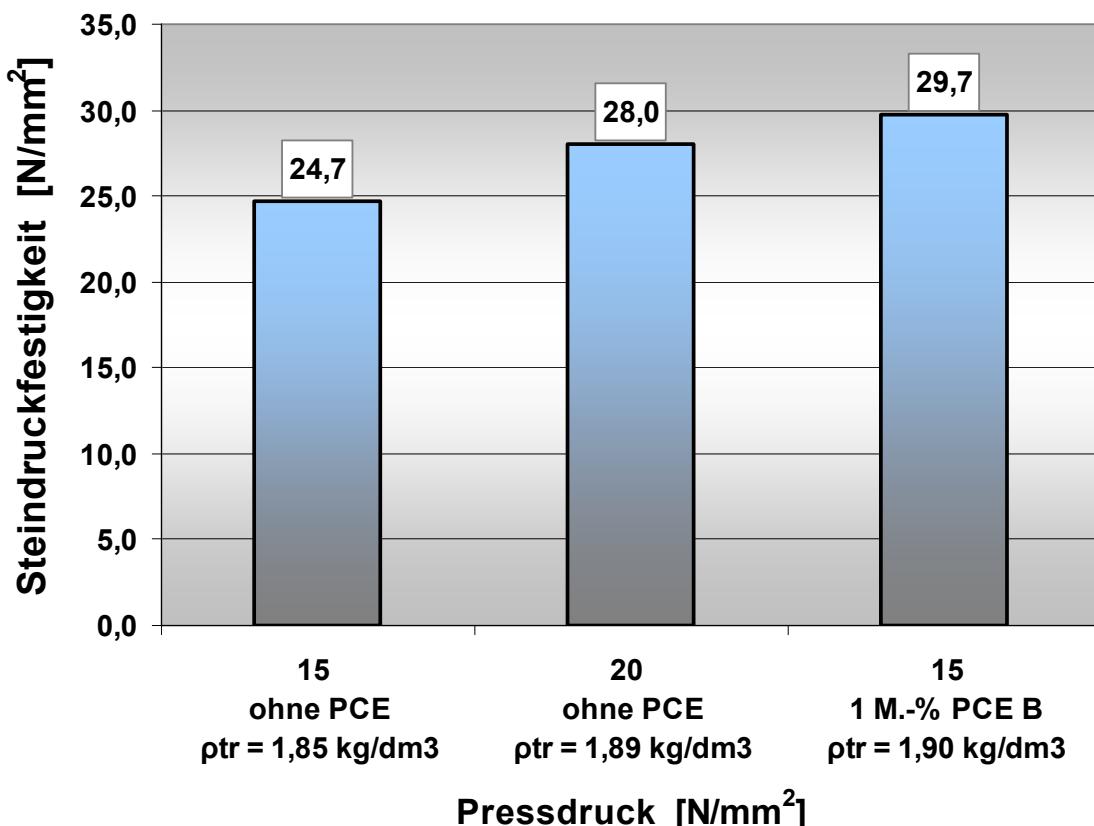


Bild 6.8: Einfluss des Fließmittels PCE B auf die Steindruckfestigkeit der unter Verwendung von Grobsand hergestellten Kalksandsteine

Das nachfolgende Bild 6.9 zeigt exemplarisch an den Laborserien zur Verwertung des Grobsand, zu welchen Änderungen bei der Steindruckfestigkeit die verschiedenen verwendeten Fließmittel bei unterschiedlicher Dosierung zu Änderungen führen.

Das **Tensid B** führt bei einer Dosierung von 1 M.-% des Zugabewassers gegenüber der Nullserie ohne Fließmittel zu einer Erhöhung der Scherbenrohdichte und dadurch zu einer Druckfestigkeitssteigerung auf $\beta_{D,St} = 28,3 \text{ N/mm}^2$ (Scherbenrohdichte $\rho_{tr} = 1,88 \text{ kg/dm}^3$). Bei einer Steigerung auf 3 M.-% zeigt sich keine wesentliche Änderung ($\beta_{D,St} = 28,2 \text{ N/mm}^2$ mit $\rho_{tr} = 1,89 \text{ kg/dm}^3$). Bei einer weiteren Erhöhung auf 5 M.-% geht der erwünschte Effekt anscheinend wieder verloren, weil dann wahrscheinlich eine Überwässerung des Porenvolumens vorliegt. Die Steindruckfestigkeit liegt wieder auf dem Niveau der Nullserie ($\beta_{D,St} = 24,7 \text{ N/mm}^2$), sie beträgt $\beta_{D,St} = 24,5 \text{ N/mm}^2$. Die Scherbenrohdichte geht auf $\rho_{tr} = 1,86 \text{ kg/dm}^3$ zurück.

Beim **Polycarboxylatether A** der stellen sich bei allen drei Dosierstufen Zuwächse bei der Steindruckfestigkeit von bis zu 5 N/mm^2 ein. Es werden Steindruckfestigkeiten von $\beta_{D,St} = 29,1 \text{ N/mm}^2$ bis $29,6 \text{ N/mm}^2$ mit $\rho_{tr} = 1,88 \text{ kg/dm}^3$ bis $\rho_{tr} = 1,89 \text{ kg/dm}^3$ erreicht.

Beim **Polycarboxylatether B** der ergeben sich bei geringer Dosierung (1 und 3 M.-% der Anmachwassermenge) deutliche Zuwächse bei der Steindruckfestigkeit von $5,0$ bzw. $6,2 \text{ N/mm}^2$ auf $\beta_{D,St} = 29,7 \text{ N/mm}^2$ bis $30,9 \text{ N/mm}^2$ mit jeweils $\rho_{tr} = 1,89 \text{ kg/dm}^3$. Bei der höchsten Dosierstufe (5 M.-% der Anmachwassermenge) stellt sich wieder ein geringerer Steindruckfestigkeitswert in Höhe von $\beta_{D,St} = 22,3 \text{ N/mm}^2$ ein, was möglicherweise auf eine Überwässerung des Porenvolumens zurückzuführen ist. Auffällig ist hier die vergleichsweise geringere Scherbenrohdichte, die mit $1,87 \text{ kg/dm}^3$ noch etwas oberhalb der der Nullserie ($1,85 \text{ kg/dm}^3$) liegt. Siehe dazu Abschnitt 5.2.4 und Bild 6.9.

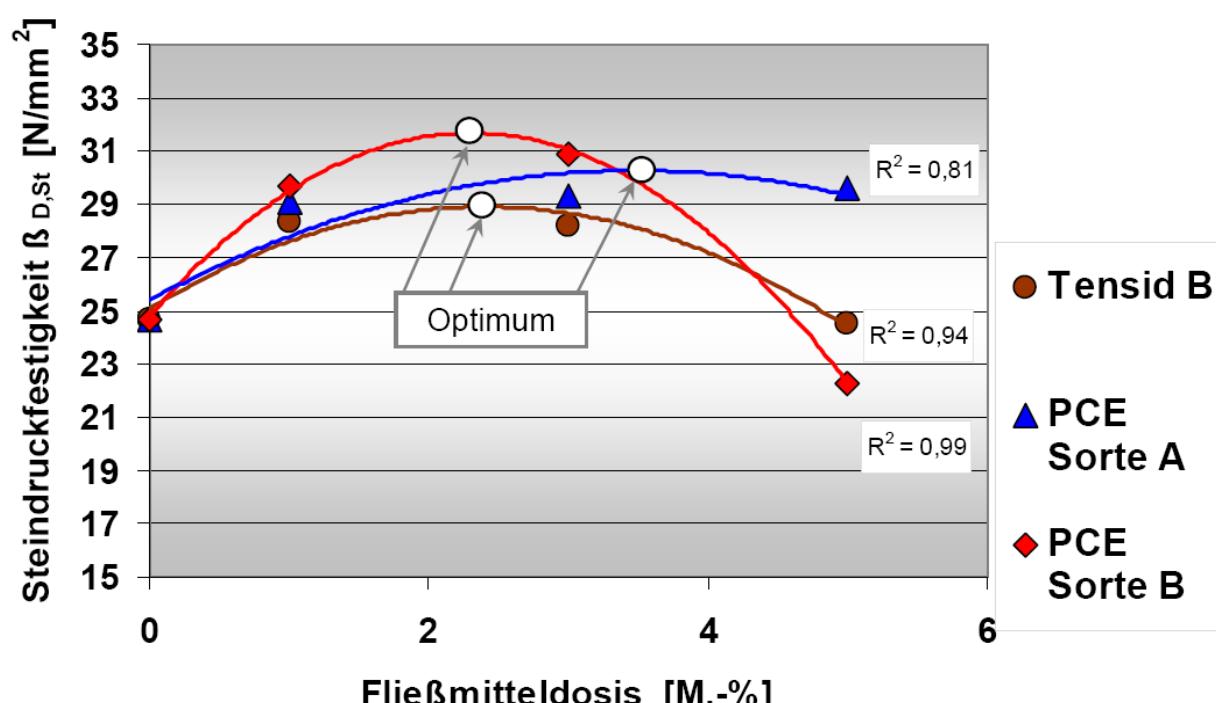


Bild 6.9: Der Einfluss der verschiedenen Fließmittel auf die Steindruckfestigkeit der mit Grobsand hergestellten Kalksandstein-Prüfkörper ist unterschiedlich. Eine deutliche Erhöhung der Steindruckfestigkeit kann bereits mit einer Fließmitteldosierung von 1 M.-% des Anmachwassers erreicht werden.

Versuchsergebnisse aus dem Musterwerk A:

Im Musterwerk A wurden unter Verwendung der gleichen Kalksand-Rohmischung folgende zwei Zielprodukte hergestellt:

- Kalksandsteine KS-L-R 20-1,4-8DF (248 x 240 x 238)
- Kalksandsteine KS-R (P) 20-2,0-8DF (248 x 240 x 248)

Zur Erreichung einer hohen Steindruckfestigkeit bzw. Scherbenrohdichte wurde der (hydraulische) Pressdruck ausgehend von einem Starwert von $p = 160$ bar stufenweise erhöht bzw. das Fließmittel Polycarboxylatether der Sorte B wurde dem Sand der Kalk-Sand-Rohmischung mit einer Dosierung von 1 bzw. 2 M.-% zugegeben. Das Produktionsziel, bei beiden Sorten die Steindruckfestigkeitsklasse 20 sicher zu erreichen, konnte durch die Kombination der Zugabe Fließmittel und die Erhöhung des Pressdrucks erreicht werden.

Für die drei Pressdruckstufen zeigen die nachfolgenden Diagramme die Ergebnisse im Einzelnen. Mit zunehmendem Pressdruck und durch die Zugabe des Fließmittels mit einer Dosissteigerung über 1 M.-% bis 2 M.-% des Anmachwassers werden Scherbenrohdichtesteigerungen von bis zu $0,05 \text{ kg/dm}^3$ und Zuwächse bei der Steindruckfestigkeit von bis zu $8,9 \text{ N/mm}^2$ erreicht. Die Ursache für diesen Effekt ist wiederum die Reduzierung des Hohlräumvolumens im Grobkörnergerüst aufgrund der durch das Fließmittel bewirkten günstigeren Konsistenz des Feinmörtels. Siehe auch Abschnitt 6.2.4 (Scherbenrohdichte) und Bilder 6.10 und 6.11 sowie Tabelle A4 im Anhang A.

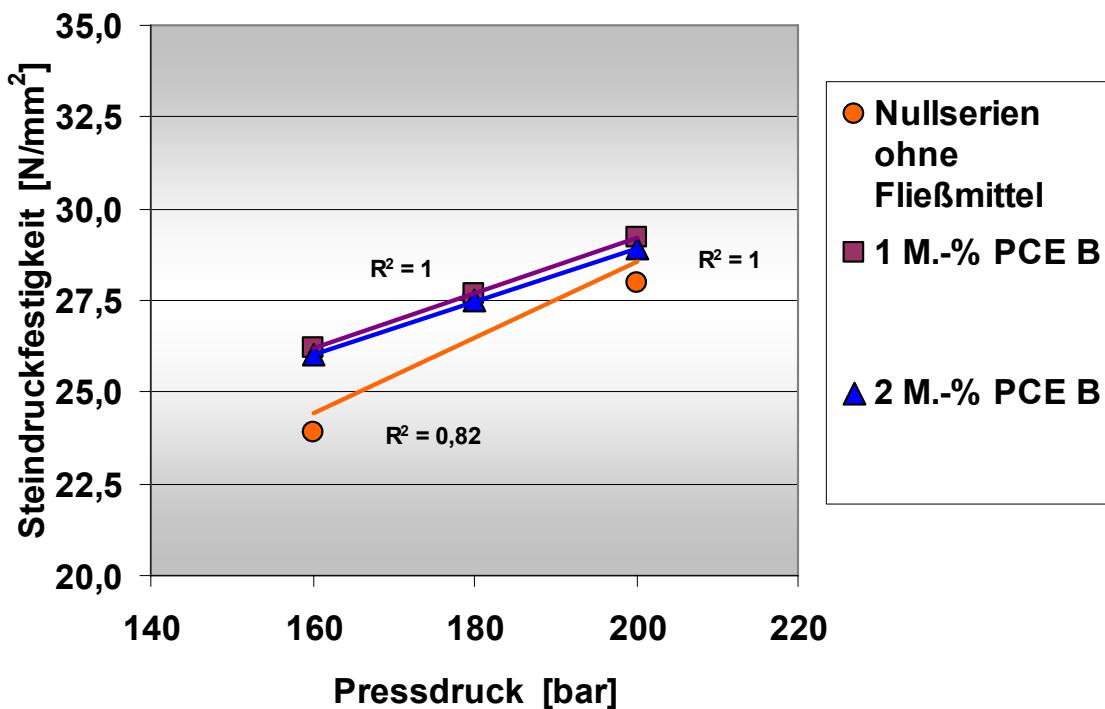


Bild 6.10: Produkt KS-L-R 20-1,4-8DF: Einfluss des Fließmittels PCE B und der Pressdrucksteigerung auf die Steindruckfestigkeit

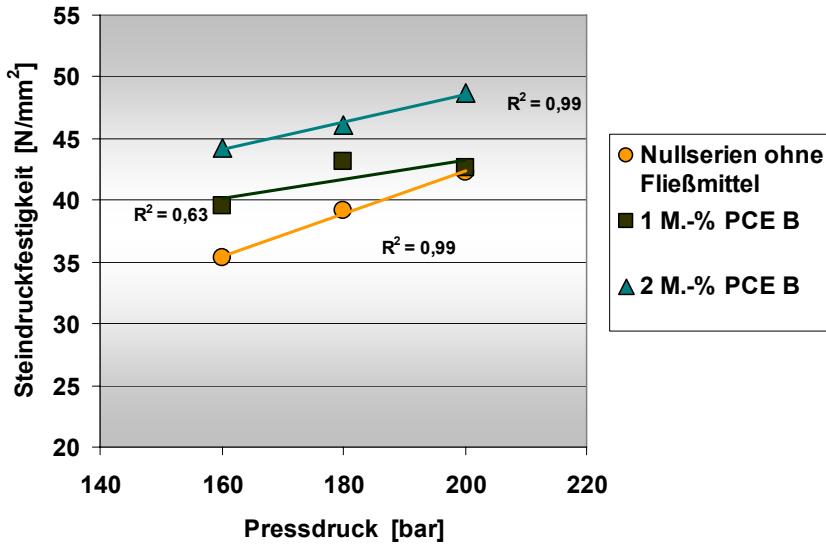


Bild 6.11: Produkt KS-R (P) 20-2,0-8DF: Einfluss des Fließmittels PCE B und der Pressdrucksteigerung auf die Steindruckfestigkeit

Versuchsergebnisse aus dem Musterwerk B:

Das Fließmittel wurde der Kalk-Sand-Rohmischung über eine Dosierstation am Vormischer zugegeben. Als Anmachwasser wurde Härtekesselkondensat mit einer Temperatur von ca. $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingesetzt. Dieses Polycarboxylatether ist nach Herstellerangaben bis zu einer Maximaltemperatur von ca. $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperaturstabil. Aus der durch die Zugabe des Fließmittels bedingten Packungsdichte-Erhöhung resultiert eine Zunahme der Steindruckfestigkeit. Bild 6.12 zeigt für die drei Pressdruckstufen die erreichten Werte der Steindruckfestigkeit für das Produkt KS XL-RE 20-2,0. Im Rahmen dieser Werksversuche wurde ebenfalls das Polycarboxylatether der Sorte B eingesetzt. Durch die Zugabe des Fließmittels wurde die Steindruckfestigkeit maximal um $2,4\text{ N/mm}^2$ angehoben. Die maximale Steigerung der Scherbenrohdichte lag bei $0,03\text{ kg/dm}^3$. Die Ursache für diesen Effekt ist die Reduzierung des Hohlraumvolumens im Grobkörnergerüst aufgrund der günstigeren Konsistenz des Feinmörtels.

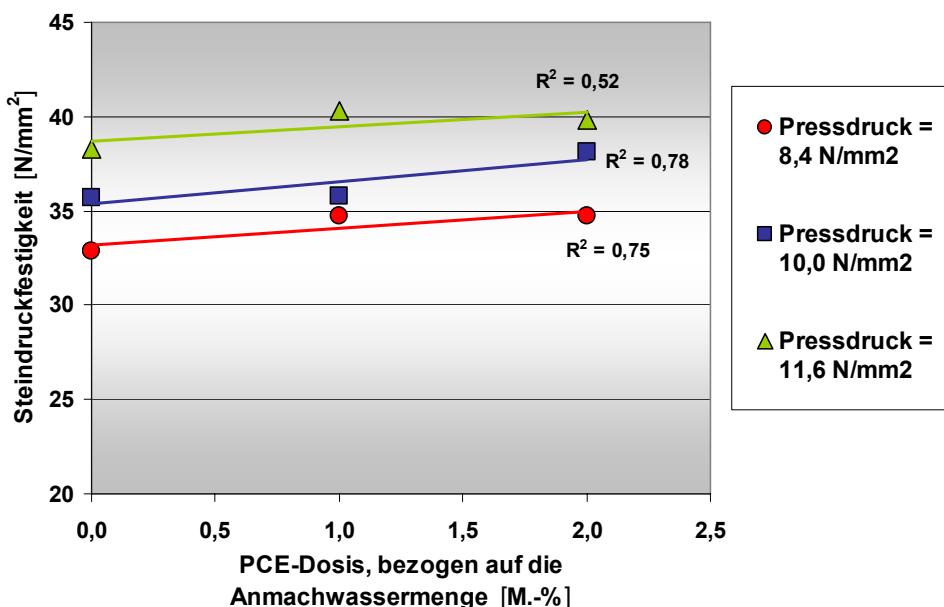


Bild 6.12: Produkt KS XL-RE 20-2,0: Einfluss des Fließmittels auf die Steindruckfestigkeit

Eine Verringerung der Verdichtungsgeschwindigkeit (Erhöhung der Taktzeit von $t = 30$ s auf $t = 40$ s) hat nicht zu einer höheren Steindruckfestigkeit geführt. Offenbar hat die werksspezifische Taktzeit von $t = 30$ s für eine genügend hohe Entlüftung der Kalksand-Rohmasse ausgereicht. Der Einsatz eines Rüttlers hat ebenfalls nicht zu einer signifikanten Erhöhung der Steindruckfestigkeit geführt.

Versuchsergebnisse aus dem Musterwerk C:

Im Rahmen von Vorversuchen im Labor mit den Rohstoffen des Musterwerkes C wurde als Zielprodukt die Sorte KS-20-2,2-2DF hergestellt. Das Hauptziel dieser Versuche liegt in der Erreichung der Rohdichteklasse 2,2. Siehe dazu Abschnitt 6.2.4. Die Steindruckfestigkeit steht in enger Abhängigkeit von den Herstellparametern. Sie erreicht in diesem Fall ihren Maximalwert von $\beta_{D,St} = 41,2 \text{ N/mm}^2$. Siehe Tabelle 10.6 und 10.7 im Anhang. Die Werksversuche haben zu folgendem Ergebnis geführt: Die Kennwerte der Nullserie betragen $\beta_{D,St} = 37,6 \text{ N/mm}^2$ und $\rho_{tr} = 1,95 \text{ kg/dm}^3$. Die Zugabe von 1 M.-% des PCE B hat noch nicht zu einer wesentlichen Steigerung Scherbenrohdichte bzw. der Steindruckfestigkeit geführt ($\beta_{D,St} = 37,2 \text{ N/mm}^2$ und $\rho_{tr} = 1,96 \text{ kg/dm}^3$). Durch die Zugabe von 2 M.-% des PCE B konnte jedoch gegenüber der Nullserie eine deutliche Steigerung der Steindruckfestigkeit erreicht werden ($\beta_{D,St} = 39,0 \text{ N/mm}^2$ und $\rho_{tr} = 1,98 \text{ kg/dm}^3$). Bei gleichzeitiger Steigerung des Pressdrucks von $\sigma_p = 140$ bar auf 160 bar konnte der „Sprung“ in die nächst höhere Rohdichteklasse 2,2 mit folgenden Kennwerten erreicht werden: ($\beta_{D,St} = 39,0 \text{ N/mm}^2$ und $\rho_{tr} = 2,01 \text{ kg/dm}^3$). Die Ursache für diesen Effekt ist wiederum die Reduzierung des Hohlräumvolumens im Grobkörnergerüst aufgrund der günstigeren Konsistenz des Feinmörtels.

Zugabe von Quarzmehl und Kalksteinmehl:

Eine Erhöhung der Steindruckfestigkeit über eine Steigerung der Packungsdichte des Gefüges ist ebenfalls durch die Zugabe von feinem Quarzsand bzw. **Quarzmehl W3** bzw. durch den Einsatz von **Kalksteinmehl** möglich (Füllereffekt). Die nachfolgenden zwei Diagramme verdeutlichen die Wirkung dieser beiden Stoffe auf die Steindruckfestigkeit für die drei Versuchssande mit ihren jeweiligen Korngrößenverteilungen (Feinsand, Mittelsand und Grobsand). Die Pressfeuchte wurde mit 5 M.-% ($\approx 11,55$ Vol.-%) konstant gehalten, Fließmittel wurden bei diesen Versuchen nicht eingesetzt, siehe Bild 6.13.

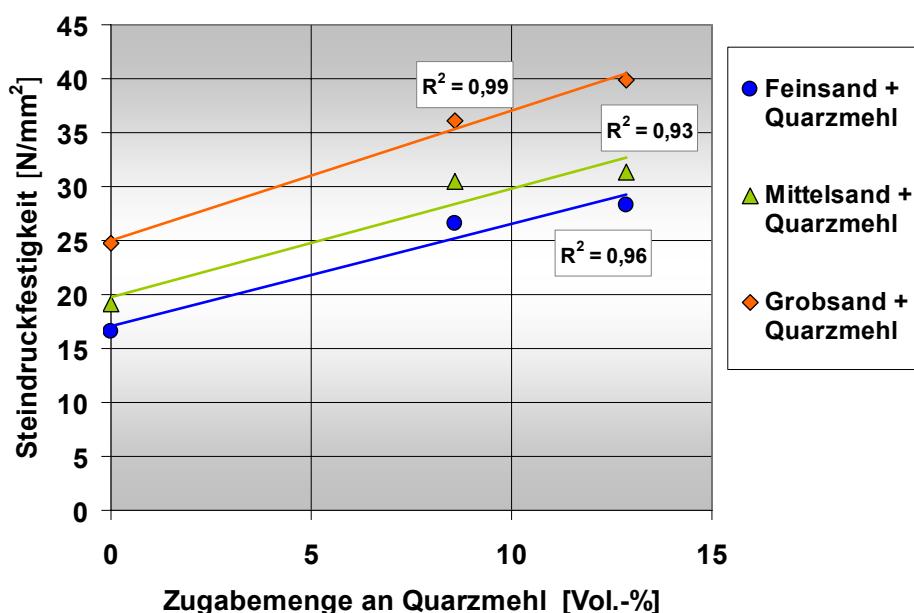


Bild 6.13: Beispiele für den Einfluss der Zugabe von Quarzmehl W3 auf die Steindruckfestigkeit: Zunahme der Steindruckfestigkeit mit steigender Quarzmehl-Dosis

Zugabe von Quarzmehl:

Durch die Zugabe von Quarzmehl zur Rohmischung wird infolge der Rohdichtesteigerung und auch insbesondere wegen des höheren SiO₂-Angebotes und des daraus resultierenden höheren Stoffumsatzes bei der Bildung der CSH-Bindemittelphasen die Steindruckfestigkeit in allen hier betrachteten Fällen deutlich erhöht. Diese Effekte sind prinzipiell bekannt und in der Literatur dargestellt [3, 4].

Kalksandsteine aus Feinsand: Bei einer Zugabemenge von 10 M.-% ($\approx 8,57$ Vol.-%) Quarzmehl W3 wurde ausgehend von der Nullserie ($\beta_{D,St} = 16,6$ N/mm² und $\rho_{tr} = 1,65$ kg/dm³) eine Druckfestigkeitssteigerung auf $\beta_{D,St} = 26,6$ N/mm² (mit $\rho_{tr} = 1,70$ kg/dm³) erreicht. Bei der im Rahmen dieser Versuche höchsten Zugabemenge von 15 M.-% ($\approx 12,86$ Vol.-%) Quarzmehl W3 wurde eine Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 28,3$ N/mm² (mit $\rho_{tr} = 1,73$ kg/dm³) erzielt.

Kalksandsteine aus Mittelsand: Bei einer Zugabemenge von 10 M.-% ($\approx 8,57$ Vol.-%) Quarzmehl W3 wurde ausgehend von der Nullserie ($\beta_{D,St} = 19,1$ N/mm² und $\rho_{tr} = 1,78$ kg/dm³) eine Druckfestigkeitssteigerung auf $\beta_{D,St} = 30,5$ N/mm² (mit $\rho_{tr} = 1,81$ kg/dm³) erreicht. Bei der im Rahmen dieser Versuche höchsten Zugabemenge von 15 M.-% ($\approx 12,86$ Vol.-%) Quarzmehl W3 wurde eine Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 31,3$ N/mm² (mit $\rho_{tr} = 1,82$ kg/dm³) erzielt.

Kalksandsteine aus Grobsand: Bei einer Zugabemenge von 10 M.-% ($\approx 8,57$ Vol.-%) Quarzmehl W3 wurde ausgehend von der Nullserie ($\beta_{D,St} = 24,7$ N/mm² und $\rho_{tr} = 1,85$ kg/dm³) eine Druckfestigkeitssteigerung auf $\beta_{D,St} = 36,1$ N/mm² (mit $\rho_{tr} = 1,91$ kg/dm³) erreicht. Bei der im Rahmen dieser Versuche höchsten Zugabemenge von 15 M.-% ($\approx 12,86$ Vol.-%) Quarzmehl W3 wurde eine Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 39,9$ N/mm² (mit $\rho_{tr} = 1,92$ kg/dm³) erzielt.

Zugabe von Kalksteinmehl:

Bei der Zugabe von Kalksteinmehl, das als inerter Füller fungiert, sind unterschiedliche Effekte erkennbar. Bei der Zugabe des Kalksteinmehles zum Fein- und Mittelsand sind Steigerungsmöglichkeiten bei der Steindruckfestigkeit erkennbar. Beim Einsatz des hier verwendeten Grobsandes ist dies hingegen nicht der Fall, siehe Bild 6.14. Die volumetrische Berechnung und die gemessene Steigerung der Scherbenrohdichte zeigen zwar, dass es zu einem Anstieg der Hohlräumausfüllung des Grobkörnergerüstes gekommen ist, jedoch ergibt sich nicht in jedem Fall eine höhere Steindruckfestigkeit. Möglicherweise kann das Kalksteinmehl durch eine Blockierung der Synthese der festigkeitsbildenden CSH-Bindemittelphasen geführt haben. Die jeweilige Wirkung in der betrieblichen Praxis kann in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung der verwendeten Sande und ihrer mengenmäßigen Zusammenfügung ausschließlich durch Labor- oder Werksversuche ermittelt werden.

Kalksandsteine aus Feinsand: Bei einer Zugabemenge von 10 M.-% ($\approx 8,57$ Vol.-%) Kalksteinmehl wurde ausgehend von der Nullserie ($\beta_{D,St} = 16,6$ N/mm² und $\rho_{tr} = 1,65$ kg/dm³) eine Druckfestigkeitssteigerung auf $\beta_{D,St} = 26,5$ N/mm² (mit $\rho_{tr} = 1,74$ kg/dm³) erreicht. Bei der im Rahmen dieser Versuche höchsten Zugabemenge von 15 M.-% ($\approx 12,86$ Vol.-%) Kalksteinmehl wurde trotz höherer Scherbenrohdichte wieder eine etwas geringere Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 25,5$ N/mm² mit einer Scherbenrohdichte von $\rho_{tr} = 1,79$ kg/dm³ erreicht.

Kalksandsteine aus Mittelsand: Bei einer Zugabemenge von 10 M.-% ($\approx 8,57$ Vol.-%) Kalksteinmehl wurde ausgehend von der Nullserie ($\beta_{D,St} = 19,1$ N/mm 2 und $\rho_{tr} = 1,78$ kg/dm 3) eine Druckfestigkeitssteigerung auf $\beta_{D,St} = 30,9$ N/mm 2 (mit $\rho_{tr} = 1,84$ kg/dm 3) erreicht. Bei der im Rahmen dieser Versuche höchsten Zugabemenge von 15 M.-% ($\approx 12,86$ Vol.-%) Kalksteinmehl wurde wiederum trotz höherer Scherbenrohdichte eine etwas geringere Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 29,7$ N/mm 2 mit einer Scherbenrohdichte von $\rho_{tr} = 1,88$ kg/dm 3 erzielt.

Kalksandsteine aus Grobsand: Bei einer Zugabemenge von 10 M.-% ($\approx 8,57$ Vol.-%) Kalksteinmehl wurde ausgehend von der Nullserie ($\beta_{D,St} = 24,7$ N/mm 2 und $\rho_{tr} = 1,85$ kg/dm 3) eine Druckfestigkeitssteigerung auf $\beta_{D,St} = 23,3$ N/mm 2 (mit $\rho_{tr} = 1,90$ kg/dm 3) erreicht. Bei der im Rahmen dieser Versuche höchsten Zugabemenge von 15 M.-% ($\approx 12,86$ Vol.-%) Kalksteinmehl wurde erneut trotz höherer Scherbenrohdichte eine etwas geringere Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 20,8$ N/mm 2 mit einer Scherbenrohdichte von $\rho_{tr} = 1,93$ kg/dm 3 ermittelt.

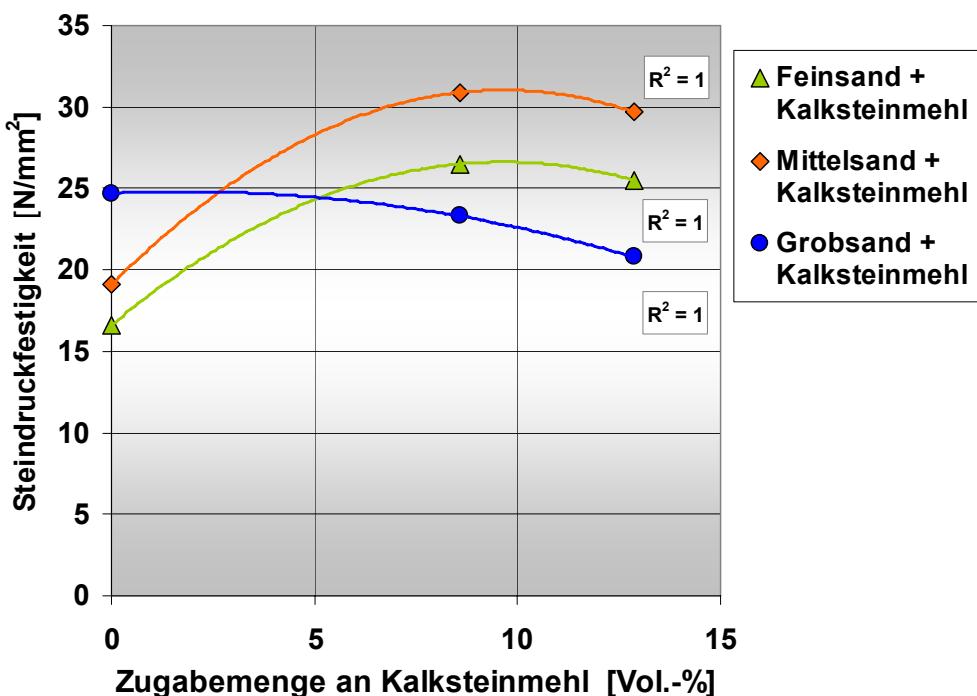


Bild 6.14: Einfluss der Zugabe vom Kalksteinmehl auf die Steindruckfestigkeit: Die Wirkung ist sandspezifisch unterschiedlich.

6.2.4 Scherbenrohdichte

Die Einflussgrößen der Scherbenrohdichte sind in erster Linie die Korngrößenverteilung der Sande, die CaO-Dosis, der Pressdruck, die Pressfeuchte, die Art und die Dosis des eingesetzten Fließmittels sowie die Zugabe von feinen Zuschlägen (hier: Quarzmehl und Kalksteinmehl). Für die Standard-Herstellparameter der Nullserien ohne Zusatzstoffe und ohne Fließmittel ergeben sich bei einer konstanten CaO-Dosis von 7 M.-% ($\approx 7,35$ Vol.-%) und einer konstanten Pressfeuchte von 5 M.-% ($\approx 11,59$ Vol.-%) für die drei eingesetzten Sande folgende Basis-Scherbenrohdichten (Bild 6.15), siehe Tabellen 10.4 bis 10.7 im Anhang

- Kalksandsteine aus Feinsand $\rho_{tr} = 1,65 \text{ kg/dm}^3$
- Kalksandsteine aus Mittelsand $\rho_{tr} = 1,78 \text{ kg/dm}^3$
- Kalksandsteine aus Grobsand $\rho_{tr} = 1,85 \text{ kg/dm}^3$

Einfluss der CaO-Dosis:

Mit zunehmender CaO-Dosis nimmt innerhalb dieser betrachteten Dosis-Bandbreite die Verdichtung der Kalksand-Rohmischung unter sonst gleichen Bedingungen zu. Das nachfolgende Bild 6.15 zeigt die ermittelten Steindruckfestigkeitswerte für einen konstanten Pressdruck von $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$. Für den Zusammenhang zwischen der Scherbenrohdichte und dem CaO-Gehalt kann für den praxisrelevanten Dosisbereich von 5 bis 9 M.-% CaO ($\approx 5,3$ bis $9,4$ Vol.-%) ein lineare Ansatz gewählt werden.

Analog zu den Erläuterungen im Abschnitt 6.2.3 repräsentiert der durch die Experimente abgedeckte praxisrelevante Dosisbereich lediglich den ansteigenden Ast einer Funktion, die nach Durchlaufen eines Maximalwertes mit optimal gefülltem Hohlraumvolumen durch die Feinkornmatrix wieder abfällt. In keinem der drei Fälle ist das Maximum erreicht worden. Für den Zusammenhang zwischen der Scherbenrohdichte und der CaO-Dosis kann von einem quadratischen Ansatz ausgegangen werden.

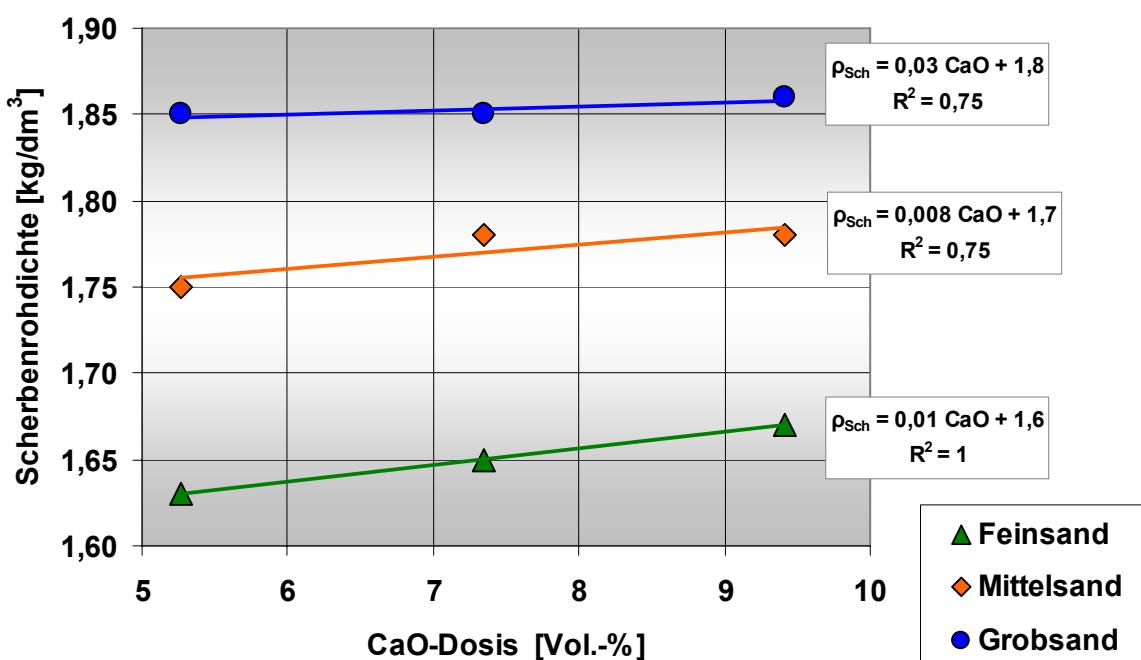


Bild 6.15: Einfluss der CaO-Dosis auf die Scherbenrohdichte

Bei den aus Feinsand erzeugten Kalksandsteinen wird durch die Erhöhung der CaO-Dosis ein maximaler Rohdichtezuwachs von $0,04 \text{ kg/dm}^3$ erreicht. Beim Mittelsand sind es ebenfalls maximal $0,04 \text{ kg/dm}^3$ und beim Grobsand sind es lediglich $0,01 \text{ kg/dm}^3$.

Einfluss des Pressdrucks:

Es ist deutlich zu erkennen, wie bei den drei exemplarisch verwendeten Sanden durch eine Steigerung des Pressdrucks von $\sigma_p = 10 \text{ N/mm}^2$ (mittelhoch) über $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$ (hoch) auf bis zu $\sigma_p = 20 \text{ N/mm}^2$ (sehr hoch!) die Scherbenrohdichte spezifisch erhöht werden kann. Siehe Bild 6.16. Für den Zusammenhang zwischen der Scherbenrohdichte und dem Pressdruck kann von einem linearen Ansatz ausgegangen werden.

Bei den aus Feinsand erzeugten Kalksandsteinen wird durch die Erhöhung des Pressdrucks ein maximaler Rohdichtezuwachs von $0,05 \text{ kg/dm}^3$ erreicht. Beim Mittelsand sind es ebenfalls maximal $0,05 \text{ kg/dm}^3$ und beim Grobsand sind es sogar $0,08 \text{ kg/dm}^3$. Die Erreichung hoher Scherbenrohdichten ist zwar mit einer enormen Steigerung des Pressdrucks möglich. Es sind jedoch die aus der betrieblichen Praxis vorliegenden Hinweise zu beachten, wonach der Verschleiß bei hohen Pressdrücken stark zunimmt.

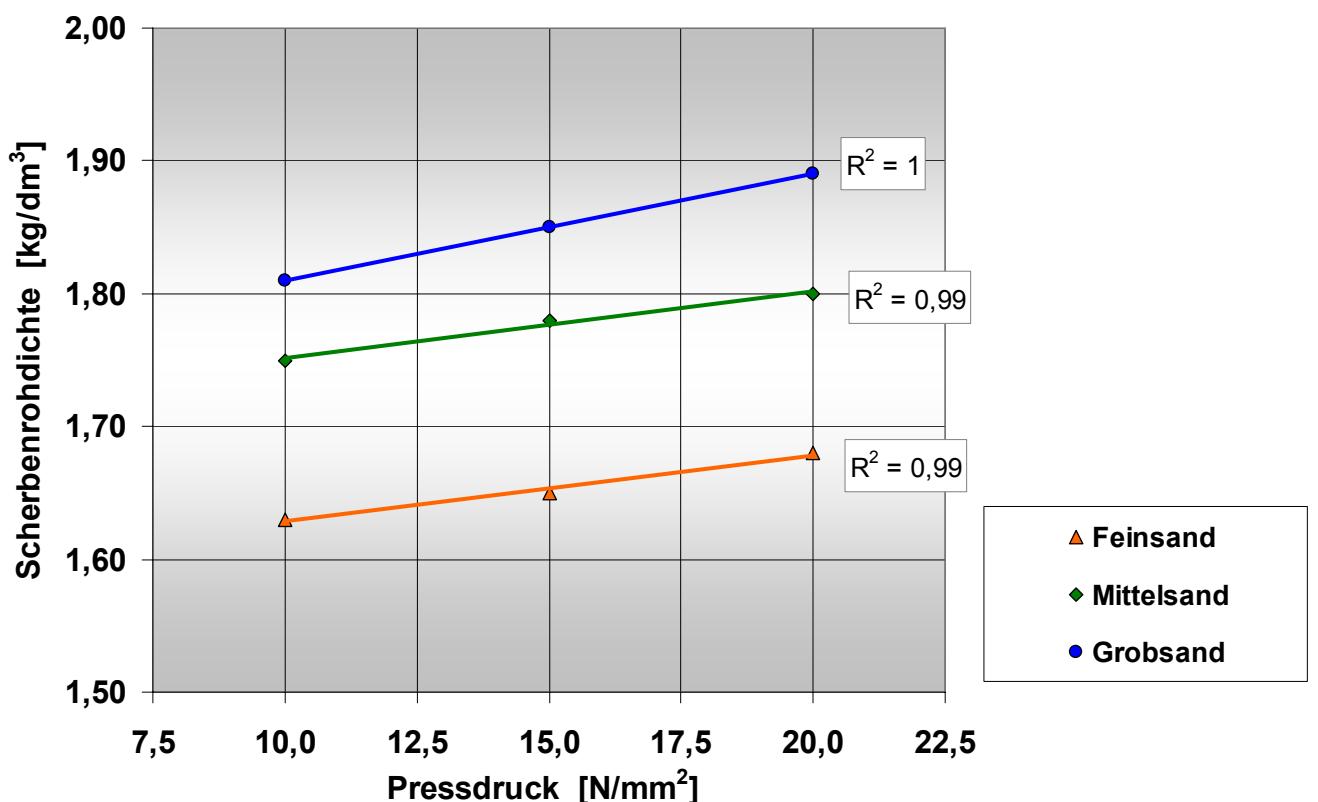


Bild 6.16: Einfluss des Pressdrucks auf die Scherbenrohdichte.

Einfluss der Pressfeuchte:

Es ist bekannt, dass die erreichbare Scherbenrohdichte bei ansteigender Pressfeuchte eine Maximumfunktion durchläuft [17]. Das Wasser benetzt zu Einen die Partikel im feinen Bereich und bestimmt die Viskosität der Matrix. Zum Anderen ändert sich auch das Mör telvolumen, was die Verarbeitbarkeit der Gesamt mischung beeinflusst.

Bis zum Erreichen des Maximums nimmt die Scherbenrohdichte zu, nach ihrem Durchschreiten nimmt sie wieder ab. Hier besteht eine Analogie zu der aus der Bodenmechanik bekannten PROCTOR-Kurve. Untersucht wurde der Einfluss der Pressfeuchte innerhalb einer Bandbreite von 5 bis 8 M.-% (jeweils bezogen auf die Trockengesamtmasse aller Feststoffe). Der Einfluss der Pressfeuchte auf die Scherbenrohdichte ist sandspezifisch unterschiedlich zu sehen. Beim **Feinsand** hat die Änderung der Pressfeuchte lediglich einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Rohdichte. Das Maximum lässt sich bei etwa 6 M.-% ($\approx 13,55$ Vol.-%) erkennen. Beim **Mittelsand** liegt das Maximum etwa bei 5 .-% ($\approx 11,55$ Vol.-%) und nimmt mit ansteigender Pressfeuchte etwas ab. Beim **Grob-sand** ist der Einfluss der Pressfeuchte auf die Scherbenrohdichte bereits deutlicher zu erkennen. Hier liegt das Maximum wiederum bei etwa 7 M.-% ($\approx 15,45$ Vol.-%). Siehe Bild 6.17. Für den Zusammenhang zwischen der Pressfeuchte und der Scherbenrohdichte kann von einem quadratischen Ansatz ausgegangen werden.

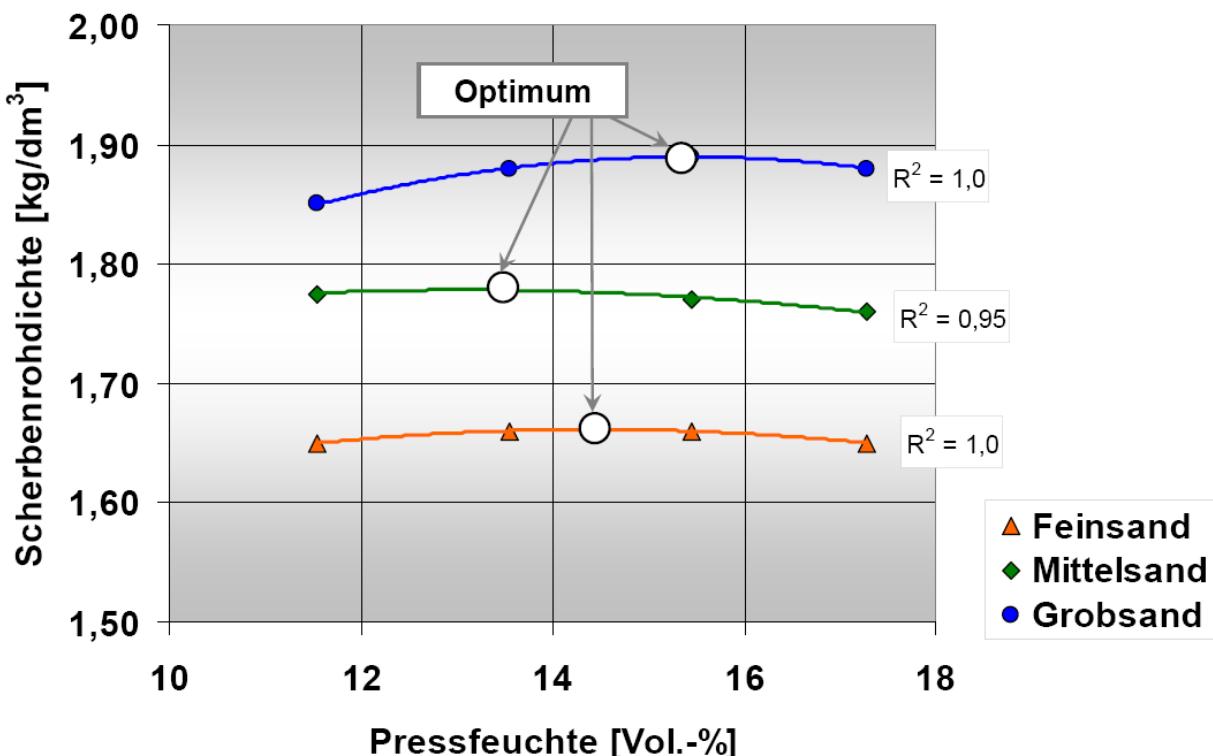


Bild 6.17: Der Einfluss der Pressfeuchte auf die Scherbenrohdichte ist sandspezifisch unterschiedlich.

Einfluss der Fließmittel:

Im Laborversuch hat sich die Scherbenrohdichte steigernde Wirkung der Fließmittel sehr deutlich gezeigt. Hier konnten bei den aus Grobsand hergestellten Kalksandsteinen (vgl. Nullserie: $\rho_{tr} = 1,85 \text{ kg/dm}^3$) in Abhängigkeit der Zugabedosis an Fließmitteln deutliche Steigerungen von $\Delta\rho_{tr} = 0,02 \text{ kg/dm}^3$ bis zu maximal $\Delta\rho_{tr} = 0,05 \text{ kg/dm}^3$ erreicht werden. Siehe Bilder 6.18 und 6.19. Die Ursache für diesen Effekt ist die Reduzierung des Hohlräumvolumens im Grobkörnergerüst aufgrund der günstigeren Konsistenz des Feinmörtels. Bei Verwendung des Fein- und Mittelsandes waren die Rohdichtezuwächse vergleichsweise gering. Es wurden lediglich Steigerungen von $\Delta\rho_{tr} = 0,01 \text{ kg/dm}^3$ (Streubereich) festgestellt. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Experimenten in der betrieblichen Praxis.

Jedes Fließmittel benötigt eine vom Feinkorn abhängige, spezifische Dosiermenge. Bei dem untersuchten Tensid B tritt die Scherbenrohdichte steigernde Wirkung bei Verwendung von Grobsand bereits ab einer Zugabemenge von 1 M.-% des Anmachwassers auf ($\rho_{tr} = 1,88 \text{ kg/dm}^3$) und wird bei einer Anhebung der Dosis von 3 M.-% noch weiter gesteigert ($\rho_{tr} = 1,89 \text{ kg/dm}^3$). Bei einer Dosis von 5 M.-% des Tensids B fällt die Wirkung jedoch wieder etwas ab ($\rho_{tr} = 1,87 \text{ kg/dm}^3$), liegt aber noch über dem Wert der Nullserie. Bei dem Polycarboxylatether der Sorte A nimmt die erreichte Rohdichtesteigerung mit ansteigender Dosierung kontinuierlich bis auf einen Wert von ($\rho_{tr} = 1,90 \text{ kg/dm}^3$) zu. Am Erfolg versprechensten hat sich im Rahmen der Laborversuche das Polycarboxylatether der Sorte B erwiesen. Bereits bei einer Dosis von 1 M.-% tritt bei Verwendung des Grobsandes eine hohe Scherbenrohdichtesteigerung von $\rho_{tr} = 1,85 \text{ kg/dm}^3$ (Nullserie) auf $\rho_{tr} = 1,90 \text{ kg/dm}^3$ ein. Dieses hohe Niveau wird bei einer Dosierung von 3 M.-% noch voll beibehalten und fällt erst bei einer Zugabemenge von 5 M.-% zur Kalksand-Rohmischung wieder auf $\rho_{tr} = 1,87 \text{ kg/dm}^3$ erkennbar ab. Für den Zusammenhang zwischen der Scherbenrohdichte und der Fließmittel-Dosis kann von einem quadratischen Ansatz ausgegangen werden.

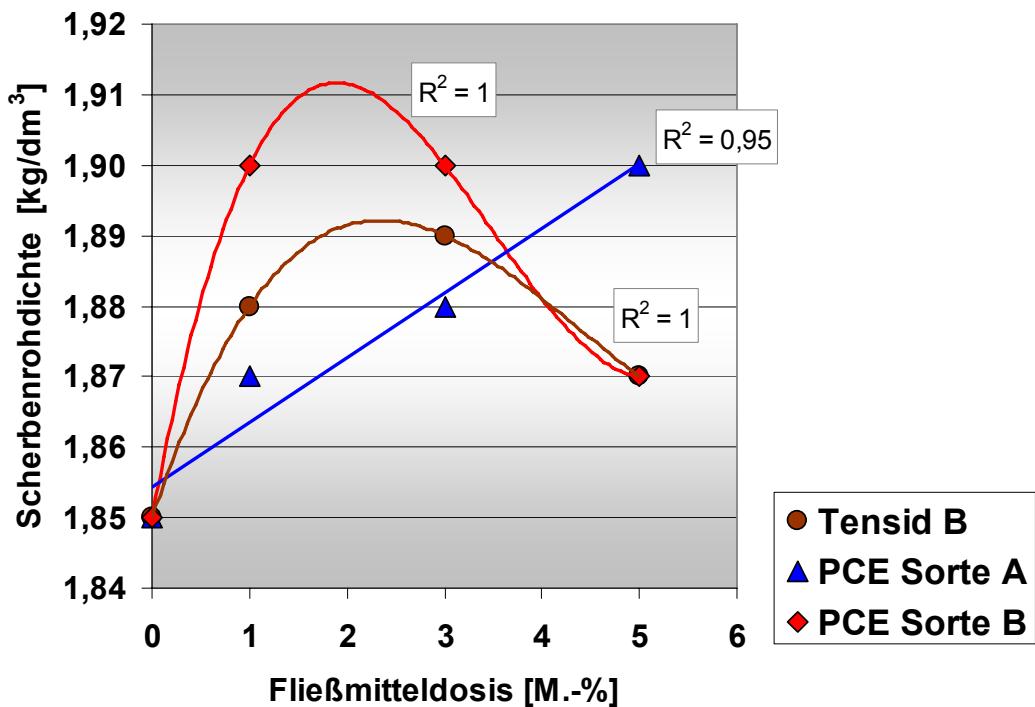


Bild 6.18: Verschiedene Fließmittel zeigen unterschiedliche Wirkungen auf die erreichbare Scherbenrohdichte, Verwendung von Grobsand.

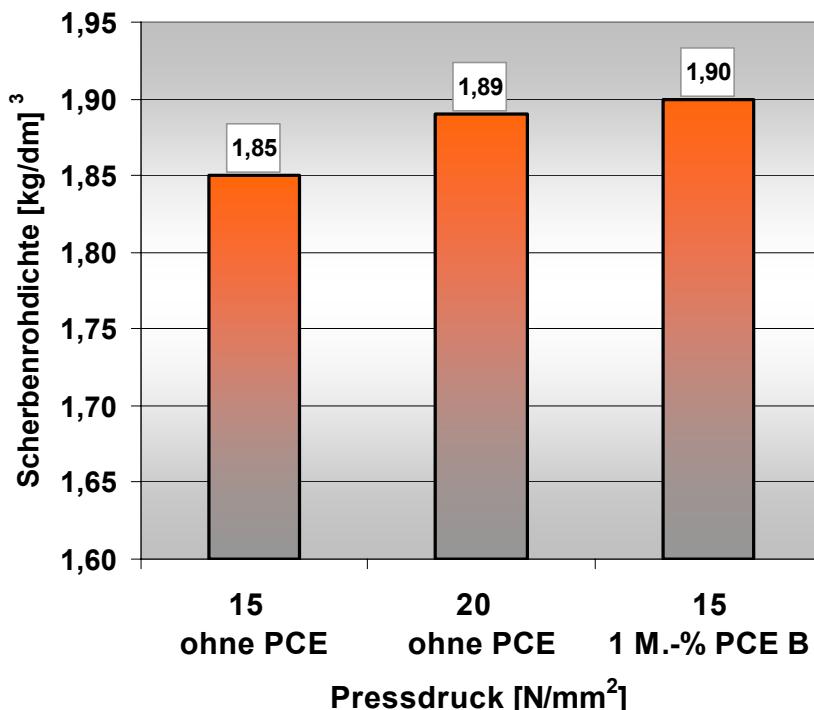


Bild 6.19: Einfluss des Fließmittels PCE B auf die Scherbenrohdichte der unter Verwendung von Grobsand hergestellten Kalksandsteine

Aufgrund dieser Laborergebnisse wurde das Fließmittel PCE-Sorte B für die nachfolgenden Werksversuche verwendet. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Werksversuche vorgestellt:

Einfluss der Pressdauer

Die Erhöhung der Pressdauer, ausgehend von $t_p = 3$ s über $t_p = 30$ s bis zu maximal $t_p = 60$ s Sekunden für jeden einzelnen Verdichtungsvorgang, hat im Rahmen der hier zugrunde liegenden Versuchsparameter weder in Labor noch bei den Werksversuchen zu einem erkennbaren eindeutigen Einfluss auf die erreichte Scherbenrohdichte geführt. Dieser Ansatz wurde deshalb nicht weiterverfolgt.

Versuchsergebnisse aus dem Musterwerk A:

Im Musterwerk A wurden unter Einsatz von 2 mit der selben Kalksand-Rohmischung beschickten Kalksandstein-Pressen folgende zwei Zielprodukte hergestellt:

- KS-L-R 20-1,4-8DF (248 x 240 x 238)
- KS-R (P) 20-2,0-8DF (248 x 240 x 248)

Hierzu wurde der Pressdruck stufenweise erhöht bzw. das Fließmittel **Polycarboxylatether** der **Sorte B** wurde der Kalksand-Rohmischung in zwei Dosisstufen zugegeben. Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Ergebnisse zur Scherbenrohdichte im Einzelnen. Siehe nachfolgende Bilder 6.20 und 6.21 und Tabellen 10.6 und 10.7 im Anhang.

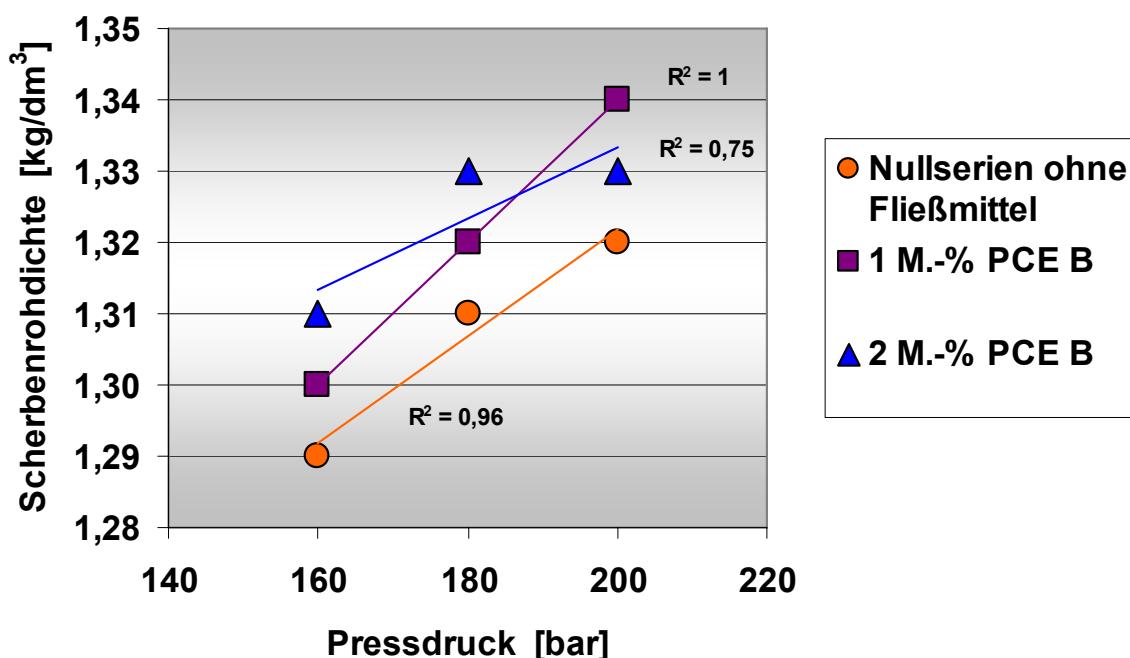


Bild 6.20: Produkt KS-L-R 20-1,4-8DF: Einfluss des Fließmittels PCE B und des Pressdrucks auf die Scherbenrohdichte

Es ist deutlich erkennbar, dass sowohl durch eine Steigerung des Pressdrucks als auch durch die Zugabe des Polycarboxylatethers der Sorte B (PCE B) bei beiden Produkten eine Erhöhung der Scherbenrohdichte erfolgt. Durch die Zugabe des PCE B wurde maximal eine Scherbenrohdichtesteigerung von $0,02 \text{ kg/dm}^3$ erreicht. Durch die Steigerung des Pressdrucks konnte eine maximale Scherbenrohdichte-Steigerung von $0,04 \text{ kg/dm}^3$ erzielt werden. Die Kombination beider Maßnahmen liefert in Summe eine Scherbenrohdichte-Steigerung von $0,05 \text{ kg/dm}^3$.

Bei den Versuchen zum Vollstein KS-R(P)-20-2,0-8DF ist folgendes Ergebnis hervorzuheben: Durch die Zugabe des PCE B wurde eine maximale Steigerung der Scherbenrohdichte in Höhe von $0,05 \text{ kg/dm}^3$ erreicht. Mit der Pressdruck-Steigerung konnte ein Zuwachs von ebenfalls $0,05 \text{ kg/dm}^3$ erreicht werden. Die Kombination beider Maßnahmen liefert gegenüber dem Lochstein einen Zuwachs von maximal $0,07 \text{ kg/dm}^3$.

Versuchsergebnisse aus dem Musterwerk B:

Die Werksversuche mit dem **Polycarboxylatether** der **Sorte B** (PCE B) haben zum gleichen Ergebnis wie im Musterwerk A geführt: Bei der Zugabe des Fließmittels zur Kalksand-Rohmischung ist der erwünschte Scherbenrohdichte steigernde Effekt deutlich zu erkennen, siehe Bild 6.22. Bei einer KS-Rohmischung mit einem bereits werkseitig „abgestuften Körnungsband“ konnte und Zugabe des PCE B die Scherbenrohdichte noch um einen Wert von bis zu $0,03 \text{ kg/dm}^3$ gesteigert werden. Für drei vorgewählte Pressdruckstufen ergeben sich für die werkseitig optimal voreingestellte Sandmischung Steigerungsmöglichkeiten bei der Scherbenrohdichte. Die maximale Scherbenrohdichte-Steigerung ergab sich bei der Kombination der Erhöhung des Pressdrucks von $\sigma_p = 8,4 \text{ N/mm}^2$ auf maximal $\sigma_p = 11,6 \text{ N/mm}^2$ bei einer gleichzeitigen Zugabe des Polycarboxylatether der Sorte B mit einer Zugabemenge von 2 M.-% des Anmachwassers. Die maximale

Scherbenrohdichte-Steigerung lag in diesem Fall bei $0,06 \text{ kg/dm}^3$. Die maximale Scherbenrohdichte beläuft sich für diese Versuche auf $\rho_{tr} = 1,87 \text{ kg/dm}^3$.

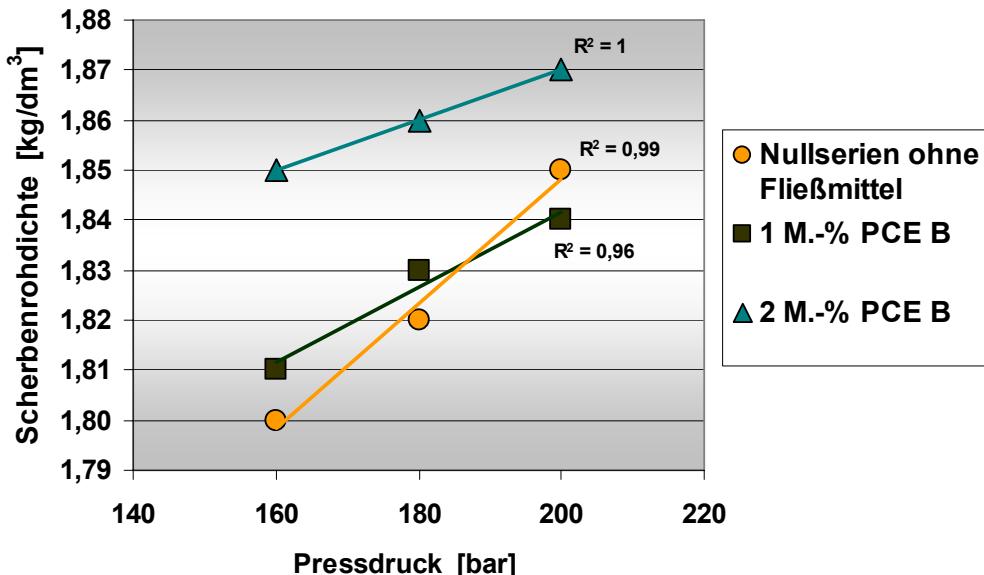


Bild 6.21: Produkt KS-R (P) 20-2,0-8DF: Einfluss des Fließmittels PCE B und des Pressdrucks auf die Scherbenrohdichte

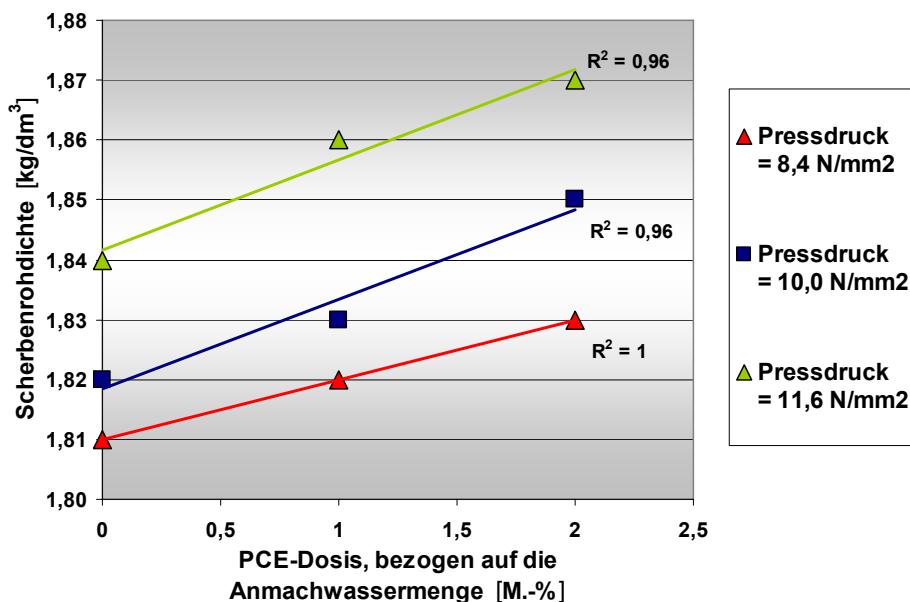


Bild 6.22: Einfluss des Fließmittels auf die Scherbenrohdichte bei zunehmendem Pressdruck

Versuchsergebnisse aus dem KS-Werk C:

Im Rahmen von Vorversuchen im Labor mit den Rohstoffen des KS-Werkes C wurde als Zielprodukt Kalksandsteine der Sorte KS-20-2,2-2DF hergestellt. Nach mehreren Rezepturansätzen konnte mit einer zusammengesetzten Zuschlagmischung aus feinem und grobem Quarzsand und einer Kieskörnung 4/8 mm sowie einem sehr hohen Pressdruck von $\sigma_p = 20 \text{ N/mm}^2$ die **Scherbenrohdichteklasse 2,2** mit einer Ist-Rohdichte von $2,02 \text{ kg/dm}^3$ gerade erreicht werden. Mit den Werksversuchen im Kalksandsteinwerk C wurden stufenweise Versuche zur Erreichung der Scherbenrohdichteklasse 2,2 durchgeführt. Unter Einsatz einer Mischung aus vier Sandkomponenten (Fein-, Mittel- und Grobsand sowie Basaltsplitt der Fraktion 4/8 mm) und des **Polycarboxylatethers** der **Sorte B** (PCE B) wurde bei einer Zugabemenge von 2 M.-% und einem gegenüber der Nullserie ($\sigma_p = 140 \text{ bar}$) etwas erhöhten Pressdruck von $\sigma_p = 160 \text{ bar}$ ebenfalls die **Scherbenrohdichteklasse 2,2** gerade erreicht. Auch in diesem Fall ergab sich die höchste Scherbenrohdichte-Steigerung von $0,06 \text{ kg/dm}^3$ durch die Kombination beider Maßnahmen. Siehe nachfolgendes Bild 6.23 und Tabelle 10.4 im Anhang.

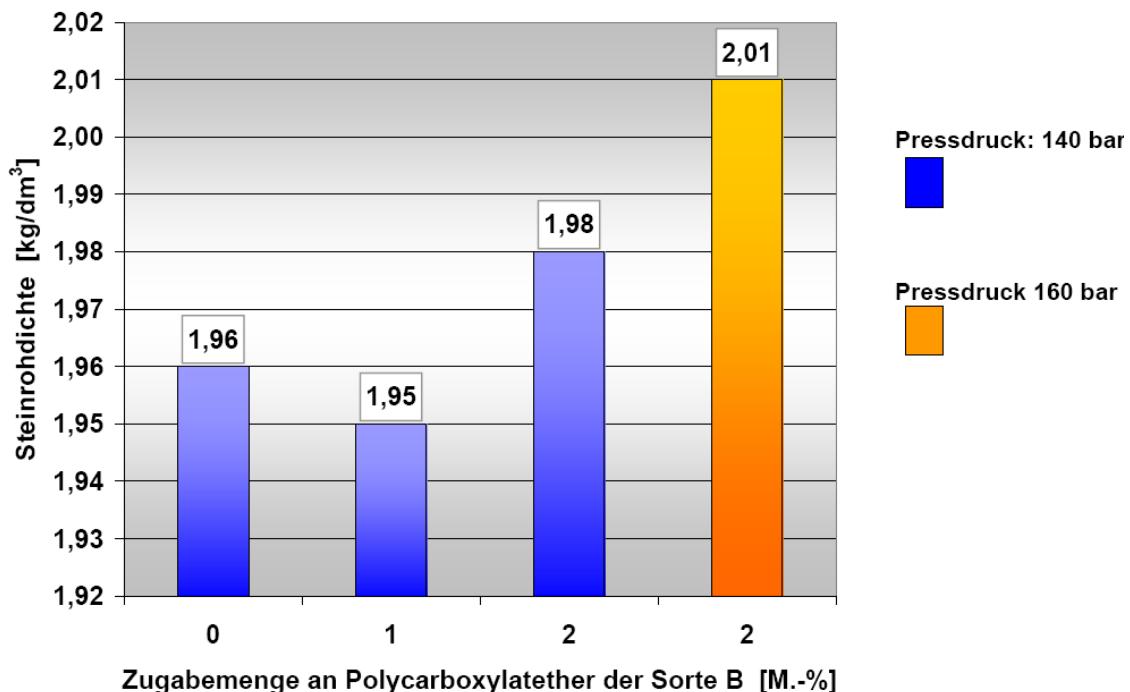


Bild 6.23: Produkt KS XL-RE 20-2,2: Einfluss der Kombination aus einer Pressdruckerhöhung und einer Zugabe von Fließmittel

Einfluss des Quarz- und Kalksteinmehls:

Eine bekannte Möglichkeit zur Erhöhung der Scherbenrohdichte ist die Zugabe von feinem reaktivem Quarzmehl bzw. durch den Einsatz von Füllern (hier: Kalksteinmehl) möglich. Der Pressdruck beträgt bei diesen Versuchsansätzen einheitlich 15 N/mm^2 . Die nachfolgenden zwei Diagramme (Bilder 6.24 und 6.25) verdeutlichen die Wirkung dieser beiden Stoffe auf die Scherbenrohdichte für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens verwendeten drei groben Versuchssande mit ihren jeweiligen Korngrößenverteilungen (Feinsand, Mittelsand und Grobsand). Bei allen drei Sanden wurde die optimale Füllung des Hohlräumvolumens durch die Füllermenge noch nicht erreicht. Nach Überschreiten des Maximums nimmt die Scherbenrohdichte wieder ab. Für den Zusammenhang zwischen der Scherbenrohdichte und der Füller-Dosis kann somit von einem quadratischen Ansatz ausgegangen werden.

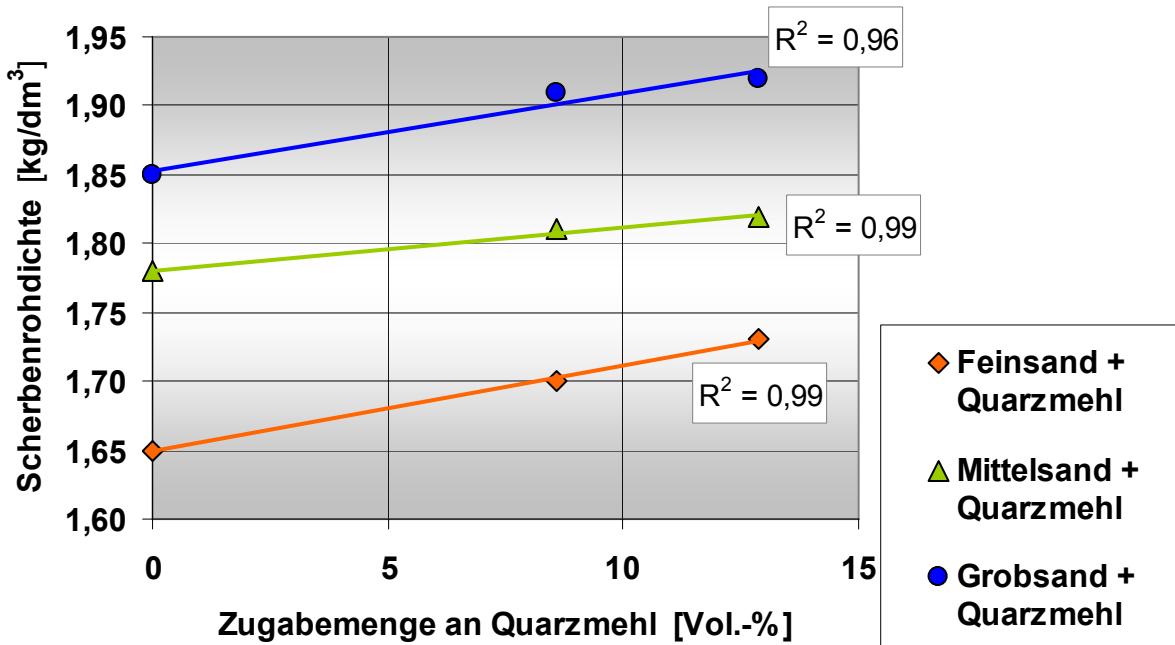


Bild 6.24: Beispiele für den Einfluss der Zugabe vom Quarzmehl W3 auf die Scherbenrohdichte.

Die maximale Steigerung der Scherbenrohdichte lag für die aus Feinsand hergestellten Prüfkörper bei 0,08 kg/dm³. Bei Verwendung des Mittelsandes wurde eine maximale Scherbenrohdichte-Erhöhung von 0,04 kg/dm³ und beim Einsatz des Grobsandes von 0,07 kg/dm³ erreicht.

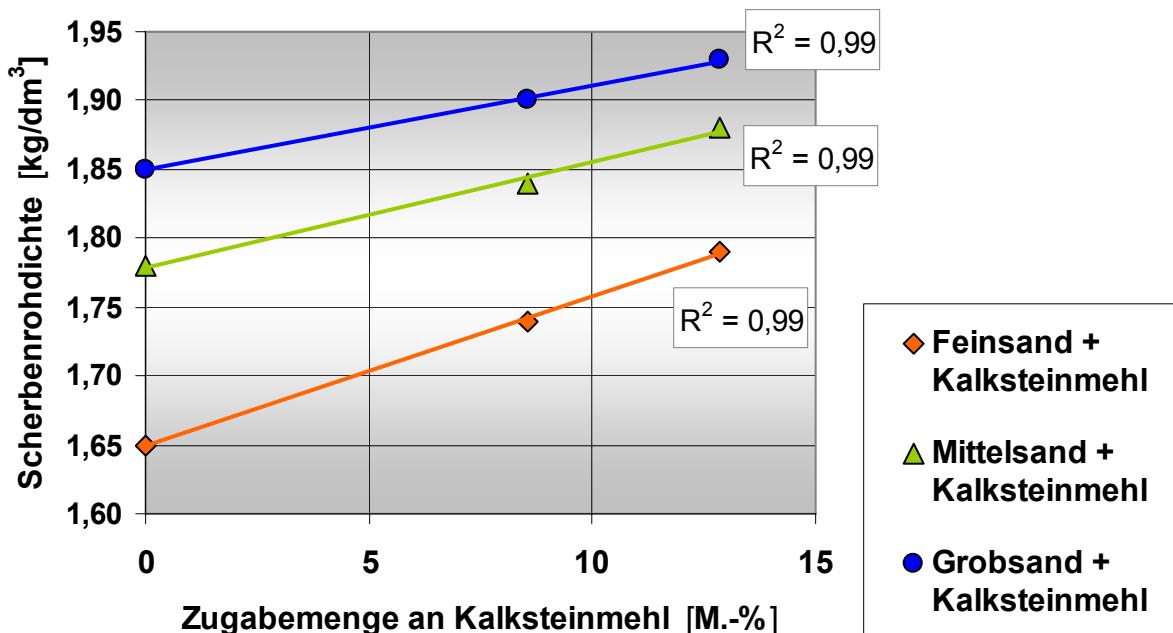


Bild 6.25: Einfluss der Zugabe von Kalksteinmehl auf die Scherbenrohdichte: Die Scherbenrohdichte nimmt bei Einsatz des Kalksteinmehles zu (Füllereffekt).

Die erreichten Scherbenrohdichte-Zuwächse sind bei Zugabe des Kalksteinmehles vergleichsweise hoch. Die maximale Steigerung der Scherbenrohdichte lag für die aus Feinsand hergestellten Prüfkörper bei $0,14 \text{ kg/dm}^3$. Bei Verwendung des Mittelsandes wurde eine maximale Scherbenrohdichte-Erhöhung von $0,10 \text{ kg/dm}^3$ und beim Einsatz des Grobsandes von $0,08 \text{ kg/dm}^3$ erreicht. Vergleiche Abschnitt 6.2.3 (Steindruckfestigkeit). Die hier gefundenen Ergebnisse bestätigen die Ergebnisse zum Einfluss der Herstellparameter auf die Scherbenrohdichte und decken sich mit denen älterer Untersuchungen mit anderen Aufgabenstellungen [168 bis 172], siehe Tabellen 10.4 bis 10.7 im Anhang.

6.2.5 Wasseraufnahme

Die Einflussgrößen der Wasseraufnahme sind in erster Linie die Korngrößenverteilung der Sande, die CaO-Dosis und der Pressdruck. Für die Standard-Herstellparameter der Nullserien ohne Zusatzstoffe und Fließmittel ergeben sich bei einer konstanten CaO-Dosis von 7 M.-% ($\approx 7,35 \text{ Vol.}-\%$) und einer konstanten Pressfeuchte von 5 M.-% ($\approx 11,59 \text{ Vol.}-\%$) für die drei eingesetzten Sande folgende Werte der Wasseraufnahme.

- Kalksandsteine aus Feinsand: 16,0 M.-%
- Kalksandsteine aus Mittelsand: 13,5 M.-%
- Kalksandsteine aus Grobsand: 12,3 M.-%

Die Variation der Herstellparameter zeigt, dass eine Erhöhung der Verdichtung erwartungsgemäß zu einer Reduzierung der Wasseraufnahme führt. Mit zunehmender CaO-Dosis in der Kalksandstein-Rohmischung (5 / 7 / 9 M.-%) nimmt die Wasseraufnahme aufgrund der durch die Steigerung der Kalkdosis hervorgerufenen höheren Ausfüllung des Hohlraumvolumens bei Verwendung aller drei Sandsorten entsprechend ab, siehe Bild 6.26. Die Änderung des Pressdrucks zeigt ebenfalls einen deutlichen Effekt: mit ansteigendem Pressdruck wird die Verdichtung erhöht ($\sigma_p = 10 / 15 / 20 \text{ N/mm}^2$) und in der Folge reduziert sich die Wasseraufnahme. Siehe Bilder 6.27. Analog zu den Erläuterungen im Abschnitt 6.2.3 repräsentiert der durch die Experimente abgedeckte praxisrelevante CaO-Dosisbereich lediglich den ansteigenden Ast einer Funktion, die nach Durchlaufen eines Maximalwertes mit optimal gefülltem Hohlraumvolumen durch die Feinkornmatrix wieder abfällt. In keinem der drei Fälle ist das Maximum erreicht worden. Die Pressfeuchte und die Pressdauer haben keinen nennenswerten Einfluss auf die Wasseraufnahme.

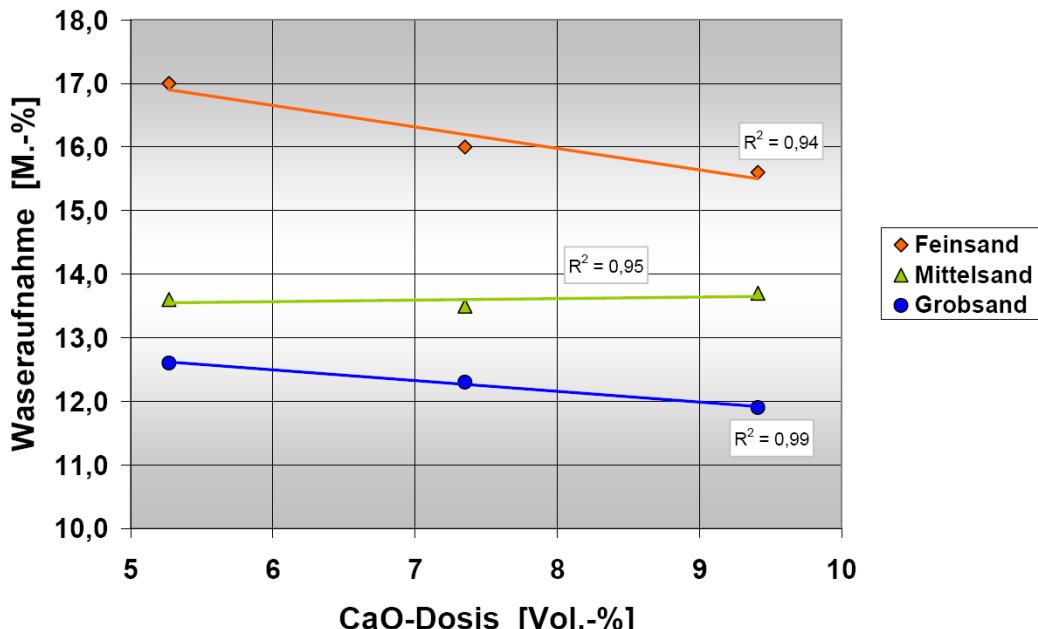


Bild 6.26: Einfluss der CaO-Dosis auf die Wasseraufnahme

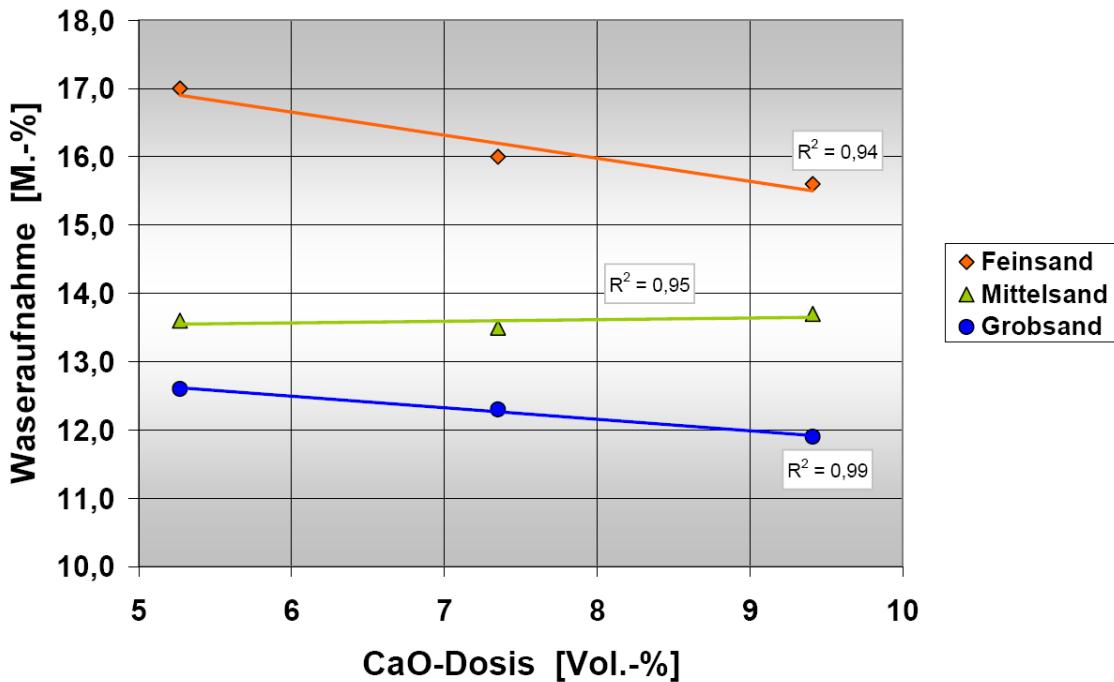


Bild 6.27: Einfluss des Pressdrucks auf die Wasseraufnahme

6.2.6 Porositäts mittels Quecksilberdruckporosimetrie

Für die unterschiedlichen Versuchsreihen (insgesamt 47 Proben) sind in den Bildern 10.4-a bis 10.4-h (Anhang) exemplarisch 8 charakteristische Porenradienverteilungen dargestellt. Die Daten der Proben aus Bild 10.4 sind mittels des Software Pore-Cor[®] von der Firma Micro-metrics visualisiert dargestellt. Die Bilder 10.5-a bis 1.5-h (Anhang) veranschaulichen die Porosität. In den Tabellen 10.8 bis 10.10 sind die quecksilberdruckporosimetrischen Daten der gemessenen Kalksandstein-Prüfkörpern zusammenfassend aufgelistet. Die grün (bzw. hell) hinterlegten Tabellenfelder enthalten Messwerte, die im Hinblick auf die Erhöhung der Packungsdichte positiv (Abnahme der Hg-füllbaren Porosität) zu bewerten sind. Die rot (bzw. dunkel) hinterlegten Tabellenfelder enthalten hingegen Messwerte, die im Hinblick auf die Erhöhung der Packungsdichte negativ (Zunahme der Hg-füllbaren Porosität) zu bewerten sind. In der zweiten Spalte der Tabelle sind als Steinbezeichnungen die Herstellparameter der Einfachheit halber abgekürzt.

Eine Betrachtung der mittels Quecksilberdruckporosimetrie gemessenen Porositätsdaten lässt erkennen, dass die Variation der Pressfeuchte und der Pressdauer keinen nennenswerten Einfluss auf die mittels Quecksilberdruckporosimetrie festgestellte Porosität der Kalksandsteine hat. Die Änderung der Porosität als Funktion des Pressdrucks und der CaO-Dosis sind mittels Quecksilberdruckporosimetrie nicht in jedem Fall eindeutig erkennbar. Ein Einfluss ist jedoch aus den Ergebnissen der Messungen der Wasseraufnahme ersichtlich (vgl. Abschnitt 6.2.5). Bei den Grobsandproben wurden mit der CaO-Dosis von 5 M.-% die geringste Porosität erzielt. Es variierten vielmehr die Porositäten und Porenradienverteilungen von Kalksandsteinen, die mit unterschiedlichen Sanden und unter Zugabe von Fließmittel hergestellt worden sind.

Vergleicht man die Porositäten von Kalksandsteinen, die sich in den Herstellparametern nur durch die Art des zugegebenen Sandes unterscheiden, so zeigen die Ergebnisse, dass die Kalksandsteine, die unter Verwendung von Grobsand hergestellt wurden, die geringste Gesamtporosität besitzen (vergleiche dazu die Porositäten der Serien 3, 49 und 95).

Die Gesamtporositäten der untersuchten Kalksandsteine mit Grobsand sind deutlich geringer als die Porositäten der untersuchten Kalksandsteine mit Mittelsand und mit Feinsand.

- Gesamtporosität der Steine mit Feinsand: $V = \text{rd. } 34,1 \text{ bis rd. } 36,9 \text{ Vol.-%}$
- Gesamtporosität der Steine mit Mittelsand: $V = \text{rd. } 28,6 \text{ bis rd. } 33,7 \text{ Vol.-%}$
- Gesamtporosität der Steine mit Grobsand: $V = \text{rd. } 22,3 \text{ bis rd. } 26,4 \text{ Vol.-%}$

In Bild 10.4 im Anhang sind exemplarisch die Unterschiede der Porenradienverteilung von Kalksandsteinen mit unterschiedlichen Sanden – bei sonst gleichen Herstellbedingungen – und unter Zugabe von Fließmitteln vergleichend dargestellt. In Bild 10.5 im Anhang sind die Porenräume der in Bild 10.4 betrachteten Kalksandsteine mit dem Software-Paket Pore-Cor[®] in visualisierter Form dargestellt. Der sandspezifische Einfluss der Zugabe des Polycarboxylatethers der Sorte B auf die Quecksilber füllbare Porosität ist mittels Quecksilberdruckporosimetrie gut erkennbar:

Feinsand:

Der mit Feinsand hergestellte Kalksandstein (Serie 49) hat mit $V = 36,1 \text{ Vol.-%}$ eine vergleichsweise hohe Gesamtporosität, weil seine Kornzusammensetzung nicht optimal ist. Durch die Zugabe des Polycarboxylatethers der Sorte B (PCE B) zur Kalksand-Rohmischung wird diese lediglich auf $V = 35,4 \text{ Vol.-%}$ reduziert (Serie 88b). Bei Betrachtung der Bilder 10.4-c und 10.4-d (Anhang) fällt auf, dass die Fließmittelzugabe bei dem mit Feinsand hergestellten Kalksandstein nur geringste Änderungen in der Porenradienverteilung bewirkt. Auch die berechneten Porenraumsimulationen zeigen keine signifikanten Unterschiede (Siehe Bilder 10.5-c und 10.5-d im Anhang).

Mittelsand:

Auffallend ist, dass der mit Mittelsand hergestellte Kalksandstein (Serie 3) eine Gesamtporosität von $V = 29,4 \text{ Vol.-%}$ hat und dass durch Zugabe des Polycarboxylatethers der Sorte B (PCE B) diese sich auf $V = 33,7 \text{ Vol.-%}$ erhöht (Serie 42b). Diese Erhöhung spiegelt sich im Luftporengehalt jedoch nicht wider, was auch in den Bildern 10.4-a und 10.4-b im Anhang aus der Darstellung der Porenradienverteilung abgelesen werden kann. Der Peak im Porenradienbereich um etwa 50 µm liegt bei Zugabe des Polycarboxylatethers auf einem niedrigeren Werteneveau. Der Kapillarporen- und Gelporenanteil verändert sich durch die Zugabe des Fließmittels vergleichsweise wenig.

Grobsand:

Die Untersuchung ausgewählter mit Grobsand herstellter Kalksandsteine mittels Quecksilberdruckporosimetrie, die durch Fließmittelzugabe eine höhere Packungsdichte erhalten sollen, haben gezeigt, dass die Fließmittelzugabe eine zusätzliche Reduzierung der Porosität von ca. $V = 2 \text{ bis } 3 \text{ Vol.-%}$ gegenüber vergleichbaren Proben, die ohne Fließmittel hergestellt wurden, bewirkt.

Vergleiche Serien 95 (Nullserie: $V_{Hg} = 25,4$ Vol.-%) mit 134b (3 M.-% PCE B: $V_{Hg} = 24,3$ Vol.-%), 131 (3 M.-% Tensid B: $V_{Hg} = 24,0$ Vol.-%) und 134a (3 M.-% PCE A: $V_{Hg} = 22,3$ Vol.-%). Als wirkungsvollstes Fließmittel erwiesen sich die Polycarboxylatether A und B (vergleiche Serien 134a, 134b). Das Fließmittel Tensid B bewirkte dagegen nur eine vergleichsweise geringe Reduzierung des Porenvolumens.

6.2.7 Gefügeuntersuchung mittels Lichtmikroskopie

In den Bildern 10.6-a bis 10.6-p sind die Ergebnisse der Dünnschliffuntersuchungen an den auch in den Bild 10.4 behandelten Proben wiedergegeben. Auf den Einzelaufnahmen ist jeweils links eine Übersichtsaufnahme des Mikrogefüges des Kalksandsteins zu sehen, auf der der Verbund zwischen KS-Matrix und Quarzkörnern erkennbar ist. Die jeweils rechte Abbildung der Einzelprobe zeigt eine vergrößerte Darstellung der jeweiligen Verbundzone Quarzkorn – CSH-Matrix und somit einen detaillierten Ausschnitt der Mikrostruktur.

Kalksandsteine aus Feinsand: Betrachtet man die einzelnen Abbildungen in Bild 10.6 vergleichend, so fällt auf, dass sich die Matrix der Probe 49 (Bild 10.6-c - Nullserie) deutlich von denen der anderen Proben unterscheidet. Visuell betrachtet hat der Kalksandstein eine hohe Porosität (gelb), was auch die lichtmikroskopische Detailaufnahme zeigt und was sich auch mit den Ergebnissen aus der Quecksilberdruckporosimetrie deckt. Auch die Serie 88b (Bild 10.6-g) mit Feinsand und dem Fließmittel Polycarboxylatether der Sorte PCE B zeigt eine hohe Porosität. Diese lichtmikroskopische Beobachtung deckt sich allgemein mit den Ergebnissen der Quecksilberdruckporosimetrie-Untersuchungen, die gezeigt haben, dass die Feinsandprobe 49 eine im Vergleich zu den anderen untersuchten Kalksandsteinen hohe Porosität ($V = 36,13$ Vol.-%) aufweist. Die Serie 88 b (mit 3 M.-% PCE B) hat mit $V = 35,4$ Vol.-% ebenfalls eine – verglichen mit den anderen hergestellten Proben – hohe Porosität.

Kalksandsteine aus Mittelsand: Die mit Mittelsand hergestellten Kalksandsteine (hier: Serie 3, Nullserie, Bild 10.6-a) weist eine Porosität von $V = 29,40$ Vol.-% auf, was auch an geringeren Korn-zu-Korn-Abständen ablesbar ist. Die lichtmikroskopische Detailaufnahme zeigt jedoch keine vollflächige Ausbildung von CSH-Phasen zwischen den einzelnen Quarzkörnern. Die Detailaufnahme der KS-Probe mit Mittelsand und dem Fließmittel Polycarboxylatether der Sorte B (Serie 42b, Bild 10.6-b) dagegen zeigt deutlich, dass sich CSH-Phasen im Porengefüge ausgebildet haben, welche den Kapillarporenraum, trotz höherer Gesamtporosität, reduziert haben.

Kalksandsteine aus Grobsand: Die mit Grobsand hergestellten Kalksandsteine (Serie 95, Nullserie, Bild 10.6-i) und die mit Grobsand und Polycarboxylatether der Sorte B (Serie 134a, Bild 10.6-o), dem Tensid B (Serie 131, Bild 10.6-m), und dem Polycarboxylatether der Sorte A (Serie 134a, Bild 10.6-h) hergestellten KS-Proben zeigen eine deutliche CSH-Phasen-Ausbildung an den Korngrenzen und zwischen den Quarzkörnern, was auch die relativ geringe Porosität erklärt, welche bei diesen Proben im Bereich von $V = 22,3$ bis $24,1$ Vol.-% liegt. Die Übersichtsaufnahmen der genannten Proben zeigen, bedingt durch die geringere Porosität, einen deutlich kleineren Korn-Korn-Abstand. Die CSH-Phasen lassen sich als schwarze Füllungen in der mit gelb gefüllten Poren eindeutig erkennen.

6.2.8 Gefügeuntersuchung mittels Rasterelektronenmikroskopie

Die Ergebnisse der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen sind an ausgewählten Proben in den Bildern 10.7-a bis 10.7-p wiedergegeben. Es werden dort die gleichen Proben wie in den zuvor dargestellten Bildern behandelt.

Kalksandsteine aus Feinsand und Mittelsand: Bei Betrachtung der Übersichtsaufnahmen der Kalksandstein-Proben mit Fein- und Mittelsand (Bilder 10.7-a bis 10.7-h) erkennt man, dass die Quarzkörner mit einem CSH-Saum umschlossen sind und nur an vergleichsweise wenigen Stellen sichtbar miteinander verbunden sind. Diese Beobachtungen sind deckungsgleich mit den Ergebnissen der Porositätsmessungen und den lichtmikroskopischen Untersuchungen. Auf den Detailaufnahmen der genannten Bildern 10.7-b, -d, -h erkennt man die feinstrukturierten CSH-Phasen auf den angelösten Quarzkornoberflächen. Mikrostrukturelle Unterschiede in deren Ausbildung (Tracht und Habitus) sind nicht quantifizierbar.

Kalksandsteine aus Grobsand: Die Betrachtung der Übersichtsaufnahmen der Kalksandstein-Proben mit Grobsand (Bild 10.7-i bis 10.7-p) zeigt, dass das Kalksandstein-Gefüge, verglichen mit den aus Fein- und Mittelsand erzeugten Kalksandstein-Proben, wohl auf Grund der günstigeren (breiteren) Korngrößenverteilung des Zuschlags deutlich dichter erscheint. Die Kontaktzonen sind besser ausgeprägt und die Porosität ist niedriger, so dass man von einem gut „verschweißtem“ Gefüge sprechen kann. Rasterelektronenmikroskopisch lassen sich keine Unterschiede durch die unterschiedlich zugegebenen Fließmittel erkennen.

6.2.9 Computertomographie

Die nachfolgenden Bilder 10.8 bis 10.13 zeigen die ergänzend mit Hilfe der Computer-Tomographie („Schichtenröntgen“) gewonnenen Einblicke ins Innere der Kalksandstein-Prüfkörper [164]. Insgesamt wurden rd. 330 Aufnahmen angefertigt. An dieser Stelle werden ausgewählte charakteristische Bilder wiedergegeben. Mit Hilfe der im Bereich der Kalksandstein-Forschung erstmals angewandten Computer-Tomographie sind die Strukturen im Inneren von Kalksandstein-Prüfkörpern deutlich abbildbar und auch interpretierbar. Insbesondere können Gefügeänderungen, wie z. B. weniger verdichtete Bereiche, qualitativ gut erkannt werden. Ebenso sind Aussagen zur Homogenität der räumlichen Verteilung der Zuschläge möglich. Quantifizierende Aussagen zur Partikelverteilung waren nicht möglich. Bei den vorliegenden CT-Aufnahmen konnte in fast allen Fällen eine fast durchgehend homogene Verteilung der groben Zuschlagkörner ($d \approx 2$ bis 6 mm) festgestellt werden. Auf verschiedenen Aufnahmen war jedoch deutlich zu erkennen, dass das Gefüge der untersuchten Prüfkörper Hohlräume aufweist. Diese sind entweder lokal (punktuell) vorhanden oder sind flächig verteilt, die sich durch das Material ziehen. Die räumliche Verteilung der damit vorliegenden lokalen Optimierungsbereiche insbesondere durch die vergleichsweise kleine Schrittweite von $d = 1$ mm erkannt werden. Die Auswertung der CT-Bilder 10-8 bis 10-13 bestätigen die Ergebnisse der Rohdichtemessungen: Durch die Zufügung des Fließmittels (hier: Polycarboxylatether der Sorte B) konnte eine erkennbare Steigerung der Verdichtung und in der Folge eine um 0,02 bis 0,03 kg/dm³ höhere Rohdichte erreicht werden. Die CT-Aufnahmen der Nullserie ohne PCE (Serie 165) zeigen ebenfalls Hohlräume. Diese Hohlräume weisen auf den CT-Aufnahmen der Serien 175 (1 M.-% PCE B) und 178 (2 M.-% PCE B) einen qualitativ erkennbar geringeren Flächenanteil auf den Aufnahmen auf. Diese Untersuchungen haben ergeben, dass wichtige Aspekte der Gefügebeschaffenheit auf den Röntgenfilmen optisch deutlich zu erkennen sind:

- Hinweise auf die räumliche Dichteverteilung
- Größere Zuschlagkörner und deren räumliche Verteilung sind aufgrund ihrer vergleichsweise höheren Dichte gut zu erkennen.
- Risse und Lunker infolge von provozierten Verdichtungsstörungen.

6.3 Untersuchungsergebnisse zur Packungsdichteberechnung

6.3.1 Allgemeines

Nachfolgend sind die Ergebnisse zu den Zusammenhängen zwischen den Rohstoffeigenschaften, den berechneten Packungsdichten und den Steineigenschaftswerten für die betrachteten Musterwerke zusammengestellt. Die Tabellen 10.18 bis 10.23 im Anhang geben einen Überblick über die Versuchsansätze und die Ergebnisse. Die Einzelergebnisse sind in den Bildern 10.14 bis 10.22 im Anhang dargestellt. Angegeben sind jeweils Mittelwerte aus 3 bis 6 Einzelwerten. Den Schwerpunkt der Betrachtungen bilden die Ergebnisse zur Scherbenrohdichte und zur damit im Zusammenhang stehenden Packungsdichte.

Musterwerk 1: Kombination Feinsand - RC-Splitt - KSM-Füller

Bei diesem Werk wurden für die Kalksandstein-Produktion ein Feinsand ein RC-Splitt 2/5 mm und als Füller ein Kalksteinmehl eingesetzt. Die Tabelle 10.11 und 10.14 sowie Bild 10.15 im Anhang enthalten die Herstellparameter und Untersuchungsergebnisse. Die Rezeptur, die CaO-Dosis und der Pressdruck wurden kombinatorisch variiert. Die Serien 113-115 werden aufgrund der vorhergehenden Berechnungen mit dem Ziel maximaler Packungsdichten ($\Phi = 72$ Vol.-%) als "optimierte" Serien bezeichnet.

Musterwerk 2: Kombination Feinsand - Mittelsand - Grobsand

Bei diesem Werk wurden für die Kalksandstein-Produktion ein Feinsand, ein Mittelsand und ein Grobsand eingesetzt. Die Tabelle 10.12 und 10.15 sowie Bild 10.15 im Anhang enthalten die Herstellparameter und die Ergebnisse. Die Rezeptur, die CaO-Dosis und der Pressdruck wurden variiert. Die durchgeföhrten Berechnungen haben bei der Kombination dieser 3 Zuschläge zu keinen wesentlichen Unterschieden bei den Packungsdichten geführt. Die berechneten Unterschiede liegen lediglich in einer Spannweite zwischen 60,1 Vol.-% und 60,6 Vol.-%.

Musterwerk 3: Kombination Mittelsand-Grobsand -Grauwackefüller bzw. -sand 0/2 mm

Bei diesem Werk wurden ein Mittelsand, ein Grobsand und alternativ zwei verschiedene Grauwacken (Grauwackefüller und -sand 0/2 mm) eingesetzt. Die Tabellen 10.14 und 10.15 sowie die Bilder 10.14 und 10.20 sowie 10.17 im Anhang enthalten die Herstellparameter und die Untersuchungsergebnisse. Die Rezeptur, die CaO-Dosis und der Pressdruck wurden variiert. Die Serien 161 bis 163 sowie 173 bis 175 werden aufgrund der vorausgegangenen Berechnungen mit Packungsdichten von 61,1 Vol.-% und 62,5 Vol.-% als "optimierte" Serien bezeichnet.

Musterwerk 4: Kombination Feinsand - Mittelsand - Basaltsand

Bei diesem Werk wurden für die Kalksandstein-Produktion ein Feinsand, ein Mittelsand und ein Basaltsplitt eingesetzt. Die Tabelle 10.15 und 10.18 sowie Bild 10.18 im Anhang enthalten die Herstellparameter und Untersuchungsergebnisse. Die Rezeptur, die CaO-Dosis und der Pressdruck wurden variiert. Die Serien 136 - 138 sowie 148 - 150 werden aufgrund der vorausgegangenen Berechnungen mit Packungsdichten von 62,2 Vol.-% als "optimierte" Serien bezeichnet.

Musterwerk 5: Kombination von Quarzsanden

Bei diesem Werk wurden ein Feinsand, ein Mittelsand und ein Grobsand eingesetzt. Die nachfolgende Tabelle 10.17 und die Bilder 10.16, 10.19 und 10.22 im Anhang enthalten die Herstellparameter und die Untersuchungsergebnisse. Die Rezeptur wurde variiert.

Musterwerk 6: Breite Variation der CaO-Dosis

Bei diesem Werk wurden für die Kalksandstein-Produktion lediglich ein Mittelsand eingesetzt. Zur Ermittlung des Einflusses der Kalkmenge auf die Verdichtung wurde die CaO-Dosis stufenweise von 5 M.-% jeweils in 2 M.-%-Schritten auf maximal 13 M.-% ($\approx 15,3$ Vol.-%) erhöht. Die nachfolgende Tabelle 10.17 und Bild 10.21 im Anhang enthalten die Herstellparameter und die Untersuchungsergebnisse.

6.3.2 Rohlingsstandfestigkeit

Die Festigkeit von mechanisch verdichteten Kalksandstein-Rohlingen wird durch Oberflächen- und Grenzflächenkräfte (Kohäsion und Adhäsion) verursacht. Es ist empirisch bekannt, dass die Rohlingsstandfestigkeit (gemessen als Druckfestigkeit) in Abhängigkeit von den Herstellparametern (Pressdruck, Pressfeuchte, CaO-Dosis, Packungsdichte) Maximumfunktionen folgt. Innerhalb praxisrelevanter Bandbreiten der Herstellparameter (zunehmender Pressdruck, zunehmende Pressfeuchte, ansteigende CaO-Dosis und zunehmende Packungsdichte) steigt die Rohlingsstandfestigkeit bekanntlich an, durchläuft ein Maximum und fällt dann wieder ab. Diese Effekte wurden auch hier festgestellt. Durch hohe Packungsdichten werden offenbar höhere Bindekkräfte zwischen den beteiligten Feststoffen im erdfeuchten Zustand erreicht. Das nachfolgende Bild 6.28 zeigt exemplarisch für das Werk 5 den Zusammenhang zwischen dem Mengenverhältnis Feinsand zu Grobsand und der erreichten Rohlingsstandfestigkeit. Bei diesem Beispiel wird die maximale Packungsdichte ($\Phi = 60,7$ Vol.-%) bei einem Mischungsverhältnis Feinsand zu Grobsand von etwa 10/40 erreicht. Das heißt, dass die Hohlräume zwischen den Grobsandkörnern bei diesem Mischungsverhältnis gerade ausgefüllt werden. Im Fall einer weiteren Steigerung des Feinsandanteils drängt dieser die Grobsandfraktion auseinander und die Packungsdichte Φ sowie die Rohlingsstandfestigkeit β_{RSF} nehmen ab. Bei allen betrachteten Serien ergeben sich die höchsten Rohlingsstandfestigkeiten stets bei den Mischungen mit den höchsten Packungsdichten. Folglich kann die Rohlingsstandfestigkeit über die Packungsdichte gesteuert werden.

6.3.3 Steindruckfestigkeit

Die Steindruckfestigkeit ist in erster Linie von der CaO-Dosis, der Pressfeuchte und der Kornform- und der Korngrößenverteilung der Zuschläge, der Verdichtung, von der erreichten Scherbenrohdichte und somit auch von der Packungsdichte Φ der einzelnen beteiligten Feststoffe und der Gesamtpackungsdichte der jeweiligen Rezeptur abhängig. Bei der Steindruckfestigkeit ist empirisch bekannt, dass sie in Abhängigkeit von den Herstellparametern (Pressdruck, Pressfeuchte, CaO-Dosis, Packungsdichte) und anderen Einflussgrößen (Wassergehalt, Form) Maximumkurven durchläuft.

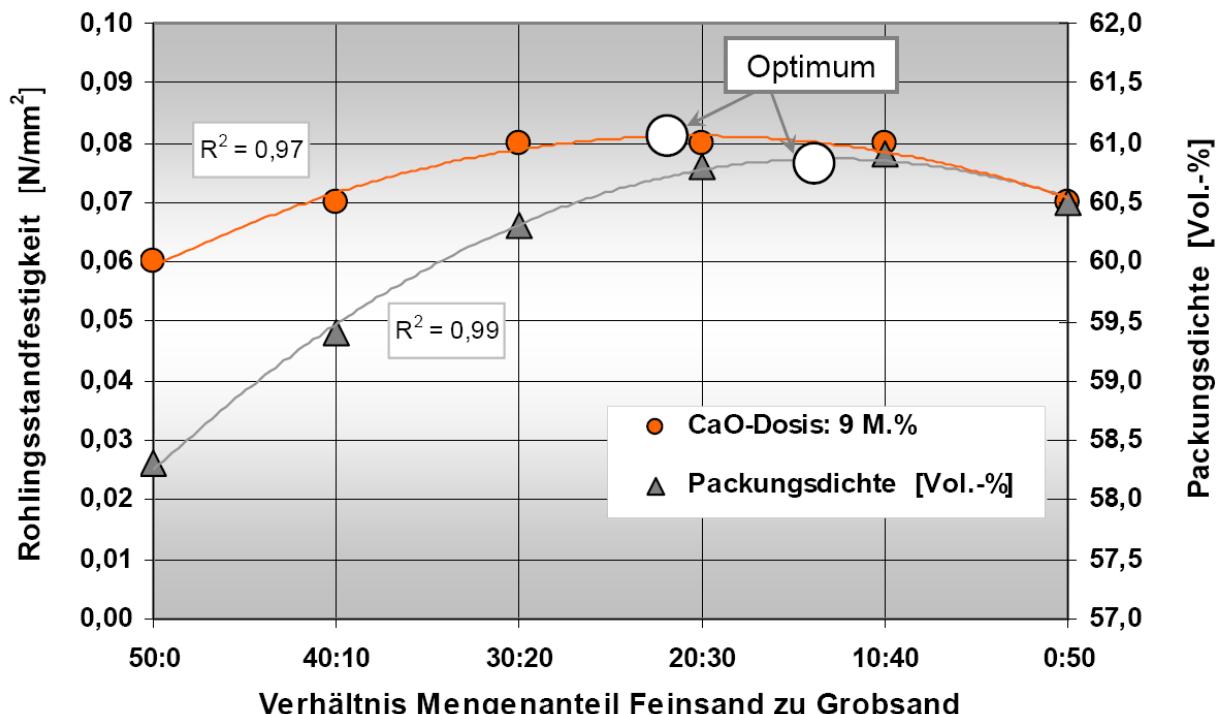


Bild 6.28: Rohlingsstandfestigkeit für die Mengenverhältnisse Feinsand zu Grobsand
Beispiel zum Musterwerk 5

Innerhalb praxisrelevanter Bandbreiten der Herstellparameter (zunehmender Pressdruck bis $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$, zunehmende Pressfeuchte $F_p = 5 \text{ M.-%}$, ansteigende CaO-Dosis (9 M.-%) und zunehmende Packungsdichte Φ steigt die Steindruckfestigkeit in den meisten Fällen an (sog. "ansteigender Ast" der Maximumkurven). Danach durchläuft sie ein Maximum und nimmt dann wieder ab [17]. Die hier gemessenen Steindruckfestigkeiten nehmen erwartungsgemäß mit zunehmender CaO-Dosis und höherem Pressdruck zu (ansteigender Ast). Das Maximum wurde in keinem Fall erreicht. Jedoch werden mit steigender Packungsdichte nicht durchgängig, sondern nur tendenziell höhere Steindruckfestigkeiten erreicht. Die Ursache für diesen Effekt liegt vermutlich darin, dass die Steindruckfestigkeit als sehr komplexe Größe nicht nur von der Scherbenrohdichte, sondern auch von der chemisch-mineralischen Beschaffenheit und der räumlichen Verteilung und Homogenität der CSH-Bindemittelphasen und auch von den kraftdurchleitenden Korn-zu-Korn-Kontakten der Zuschläge und weiteren Einflussgrößen, wie zum Beispiel dem Wassergehalt und der Form des Prüfkörpers abhängt [145].

Dieser Effekt sollte mit weiteren Untersuchungen analysiert werden. Der Wassergehalt der Prüfkörper zum Zeitpunkt der Druckfestigkeitsprüfung lag einheitlich bei rd. 2,5 M.-% und als Format wurden ausschließlich NF-Steine hergestellt, so dass diese beiden Einflussgrößen (Prüfkörperfeuchte und Format) an dieser Stelle nicht weiter diskutiert werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Steindruckfestigkeit für die betrachteten 6 Kalksandsteinwerke im Einzelnen erläutert. Für die betrachteten Serien mit/ohne rechnerisch optimierte Packungsdichte sind jeweils Tabellen mit den Messwerten zur Steindruckfestigkeit und Scherbenrohdichte angegeben.

Musterwerk 1: Kombination Feinsand - RC-Splitt - KSM-Füller

In der Tabelle 10.12 und im Bild 10.15 sind die Steindruckfestigkeit und die Scherbenrohdichte der empirisch ausgewählten und der rechnerisch optimierten Serien für die 3 CaO-Dosisstufen gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die durch die rechnerische Packungsdichteoptimierung ermittelten Rezepturen zu größeren Scherbenrohdichten führen. Bei den Serien 113 bis 115 gelang sogar der "Sprung" in die nächsthöhere Rohdichteklasse 2,2. Eine Steigerung der Steindruckfestigkeit wurde mit diesen 3 optimierten Serien jedoch nicht erzielt. Die Steindruckfestigkeitsklasse 20 wurde bei den optimierten Serien in allen 3 Fällen erreicht. Dies ist vermutlich auf den eingangs beschriebenen Einfluss der Beschaffenheit der CSH-Bindemittelphasen zurückzuführen. Der erhöhende Einfluss der Pressdrucksteigerung auf die Steindruckfestigkeit ist erwartungsgemäß deutlich erkennbar. Die Erhöhung des Pressdrucks von $\sigma_p = 10$ auf 15 N/mm^2 führt zu der erwarteten Festigkeitssteigerung.

Musterwerk 2: Kombination Feinsand - Mittelsand - Grobsand

In der Tabelle 10.19 sind die Steindruckfestigkeit und die Scherbenrohdichte sowie die berechnete Packungsdichte wiedergegeben. Die Steindruckfestigkeiten bei diesen Serien liegen im Vergleich zu den Serien der anderen Werke auf einem deutlich geringeren Werteneck. Dies trifft selbst bei einem hohen Pressdruck und einer relativ hohen CaO-Dosis von 9 M.-% zu. Der Einfluss der Pressdrucksteigerung ist hier uneinheitlich. Die Erhöhung des Pressdrucks von $\sigma_p = 10$ auf 15 N/mm^2 führt nicht in allen Fällen zu einer Festigkeitssteigerung. Die berechneten Werte der Packungsdichten haben nur eine relativ geringe Spreizung, sie liegen sehr eng beieinander ($\Phi = 60,1 \text{ Vol.-%}$ bis $\Phi = 60,6 \text{ Vol.-%}$), so dass für diese ausgewählte Rohstoffkombination trotz der vergleichsweise großen Spannweiten bei der Rezepturvariation offenbar kein relevantes Verdichtungspotenzial vorliegt.

Musterwerk 3: Kombination Mittelsand-Grobsand-Grauwackefüller/-splitt 0/2 mm

In den Tabelle 10.20 sind die Steindruckfestigkeit und die Scherbenrohdichte der empirisch ausgewählten und der rechnerisch optimierten Serien für die 3 CaO-Dosisstufen gegenübergestellt. Die Festigkeiten liegen insgesamt auf einem vergleichsweise hohen Niveau. Bei beiden Grauwackevarianten (Füller und Sand) liegen die Steindruckfestigkeiten bei maximaler Packungsdichte auf einem zum Teil erheblich geringeren, aber ausreichend hohem Werteneck. Bei den Serien mit dem Grauwackefüller lag durch die Optimierungsrechnung lediglich eine geringe Packungsdichtesteigerung vor. Bei den Serien mit Grauwackesand 0/2 mm konnte durch die Optimierungsrechnung gegenüber den empirisch angesetzten Rezepturen eine überraschend hohe Steigerungsmöglichkeit bzgl. der Packungsdichte aufgezeigt werden. In beiden Fällen konnte resultierend aus der Packungsdichteanhebung keine Steigerungsmöglichkeit bei der Steindruckfestigkeit erreicht werden. Die Ursache für diesen Effekt ist nicht genau bekannt. Es ist jedoch zu vermuten, dass die Grauwacken aufgrund ihrer chemisch-mineralischen Zusammensetzung zu einer veränderten Bindemittelbeschaffenheit (Morphologie und Habitus der CSH-Phasen) führen. Zur Klärung dieser Fragen sind weitere detaillierte Untersuchungen unter Einbeziehung verschiedener Grauwackesande und -füller erforderlich.

Musterwerk 4: Kombination Feinsand - Mittelsand - Basaltsand

In der Tabelle 10.21 sind für die zwei angesetzten Pressdruckstufen und für die drei CaO-Dosisstufen die Steindruckfestigkeit und die Scherbenrohdichte der empirisch ausgewählten und der rechnerisch optimierten Serien gegenübergestellt. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die durch die rechnerische Packungsdichteoptimierung ermittelten Rezepturen zu größeren Scherbenrohdichten führen. Bei den Serien 148 bis 150 gelang sogar der "Sprung" in die nächsthöhere Rohdichteklasse 2,2. Durch die rechnerische Optimierung der Packungsdichte wurde ebenfalls eine deutliche Erhöhung der Steindruckfestigkeit erreicht. Der steigernde Einfluss der Pressdruckanhebung auf die Steindruckfestigkeit ist erwartungsgemäß erkennbar. Die Erhöhung des Pressdrucks von $\sigma_p = 10$ auf 15 N/mm^2 führt in allen Fällen zu einer Festigkeitssteigerung. Bei allen durch die Packungsdichteberechnung optimierten Serien sind Steigerungen bei der Steindruckfestigkeit eingetreten.

Musterwerk 5: Kombination von Quarzsanden

In der Tabelle 10.22 sind für die drei CaO-Dosisstufen die Steindruckfestigkeit und die Scherbenrohdichte der gefertigten Serien gegenübergestellt. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die durch die rechnerische Packungsdichteoptimierung ermittelten Rezepturen zu größeren Scherbenrohdichten führen. In allen Fällen wurde als Vorgabe eine Mittelsandmenge von 50 M.-% verwendet. Bei den restlichen 50 M.-% des Zuschlags wurde das Mengenverhältnis Feinsand zu Grobsand stufenweise (10%-Schritte) variiert. Die höchste Steindruckfestigkeit ergibt sich bei der CaO-Dosisstufe von 5 M.-% bei einem Mengenverhältnis von Feinsand zu Grobsand von 20/30 mit $\beta_{D,St} = 32,4 \text{ N/mm}^2$. Bei der CaO-Dosisstufe von 7 M.-% findet sich die höchste Steindruckfestigkeit bei einem Mengenverhältnis von 40/10 mit $\beta_{D,St} = 33,6 \text{ N/mm}^2$. Und bei der Dosisstufe 9 M.-% liegt die höchste Steindruckfestigkeit bei einem Mischungsverhältnis von Feinsand zu Grobsand von 50/0 mit $\beta_{D,St} = 32,8 \text{ N/mm}^2$ vor. Durch die rechnerische Optimierung der Packungsdichte wurden jedoch keine maximalen Steindruckfestigkeiten erreicht. Dies ist vermutlich auf den eingangs beschriebenen Einfluss der Beschaffenheit der CSH-Bindemittelphasen zurückzuführen. Das nachfolgende Bild 6.29 zeigt exemplarisch für das Werk 5 bei den drei berücksichtigten CaO-Dosisstufen die maximal erreichten Steindruckfestigkeiten. Die maximale Packungsdichte betrug $\Phi = 62,9 \text{ Vol.-%}$.

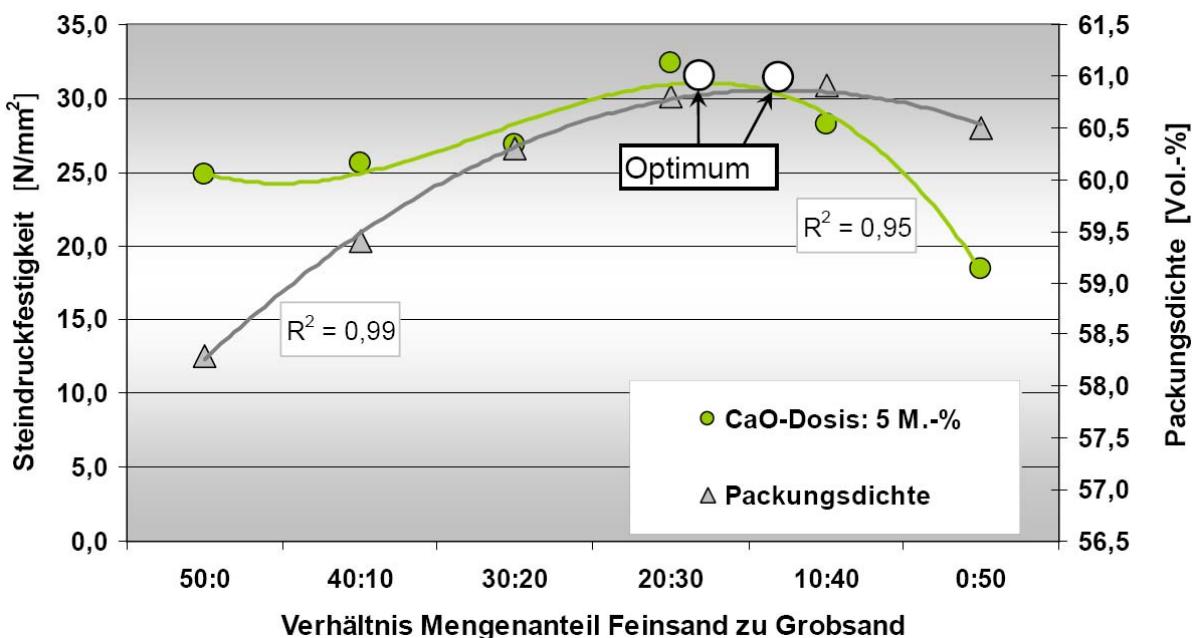


Bild 6.29: Steindruckfestigkeit für die Mengenverhältn. Feinsand zu Grobsand - Werk 5

Musterwerk 6: Breite Variation der CaO-Dosis

Um den Einfluss der CaO-Dosis (bzw. Kalkdosis) auf die Verdichtung und die Steindruckfestigkeit im Rahmen dieser Versuche absichernd zu untersuchen, wurde bei den Serien zum Werk 6 die CaO-Dosis stufenweise erhöht. Alle anderen Herstellparameter wurden dabei konstant gehalten. Das nachfolgende Bild 6.30 zeigt für diese Serien die Abhängigkeit zwischen der Steindruckfestigkeit und der CaO-Dosis. Die Steindruckfestigkeit nimmt mit ansteigender CaO-Dosis bis zu der hier ausgewählten Maximaldosis von 13 M.-% ($\approx 15,34$ Vol.-%) CaO (bezogen auf die Masse aller trockenen Rohstoffe) in bekannter Weise kontinuierlich zu (= sog. "ansteigender Ast" der Maximumkurve). Die Steigerung flacht jedoch mit zunehmender CaO-Dosis ab. Das Maximum der Steindruckfestigkeit wurde nicht erreicht. Die dafür erforderliche CaO-Dosis ist nicht praxisgerecht. Deshalb wurde die maximale CaO-Dosis auf 13 M.-% begrenzt.

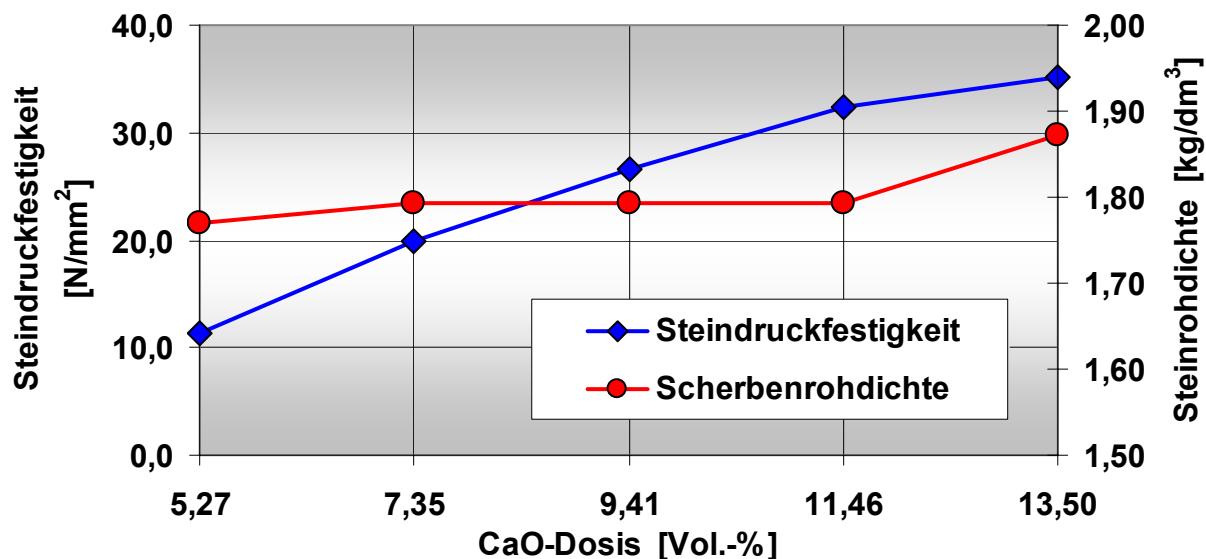


Bild 6.30: Einfluss der CaO-Dosis auf die Steindruckfestigkeit - Werk 6

6.3.4 Scherbenrohdichte und Packungsdichte

Die Scherbenrohdichte ist von der Rezeptur, das heißt von der mengenmäßigen Zusammensetzung der festen Rohstoffe, von deren Reindichte der Gesteinszuschläge, der CaO-Dosis, der Pressfeuchte dem mechanischen Verdichtungsdruck (Pressdruck) und damit von der erreichten Packungsdichte abhängig. In den nachfolgenden Ausführungen ist die Packungsdichte als diejenige der trockenen Gesteinskörnung ohne Wasser definiert. Jeder dieser Herstellparameter kann innerhalb praxisrelevanter Bandbreiten gezielt eingestellt werden.

Musterwerk 1: Kombination aus Feinsand G12 - RC-Splitt 2/5 mm - Kalksteinmehlfüller (KSM)

In den nachfolgenden Bildern 6.31 und 6.32 sind die zu diesem Musterwerk berechneten Packungsdichten und die bei der Prüfkörperherstellung erreichten Scherbenrohdichten zusammengestellt. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Scherbenrohdichte mit zunehmender Packungsdichte in allen Fällen ansteigt. Die überraschend hohen Bestimmtheitsmaße liegen für diese Serien sämtlich oberhalb von $R^2 = 0,97$. Für die praktische Anwendung dieses Zusammenhangs lässt sich für diesen Herstellparametersatz die Scherbenrohdichte aus der Rezeptur und dem Pressdruck direkt ableiten. Ohne rechnerische Optimierung wurden Packungsdichten von bis zu $\Phi = 65,8$ Vol.-% erreicht.

Optimierte Serien: Die drei rechnerisch optimierten Serien (113 bis 115, Rechtecksymbole) liefern vergleichsweise hohe Packungsdichten mit $\Phi_{\max} = 72,0$ Vol.-% mit zugehörigen Scherbenrohdichten von $\rho_{tr} = 2,01$ bis $2,06 \text{ kg/dm}^3$. Auffällig ist, dass die Scherbenrohdichte bei einer CaO-Dosis von 9 M.-% ($\approx 8,75$ Vol.-%) ($2,01 \text{ kg/dm}^3$) gegenüber den Scherbenrohdichten der Dosisstufen 5 M.-% ($\approx 5,06$ Vol.-%) ($2,06 \text{ kg/dm}^3$) und 7 M.-% ($\approx 6,94$ Vol.-%) ($2,05 \text{ kg/dm}^3$) bereits wieder abfällt. Als Erklärung für diesen Effekt kommt das in [166] beschriebene Auseinanderdrängen des Grundkorngerüstes in Betracht. Das nachfolgende Bild 6.31 zeigt den Zusammenhang zwischen den berechneten Packungsdichten und den erreichten Scherbenrohdichten für die 3 CaO-Dosisstufen und die Zugabe von 5 M.-% Kalksteinmehl KSM 1.

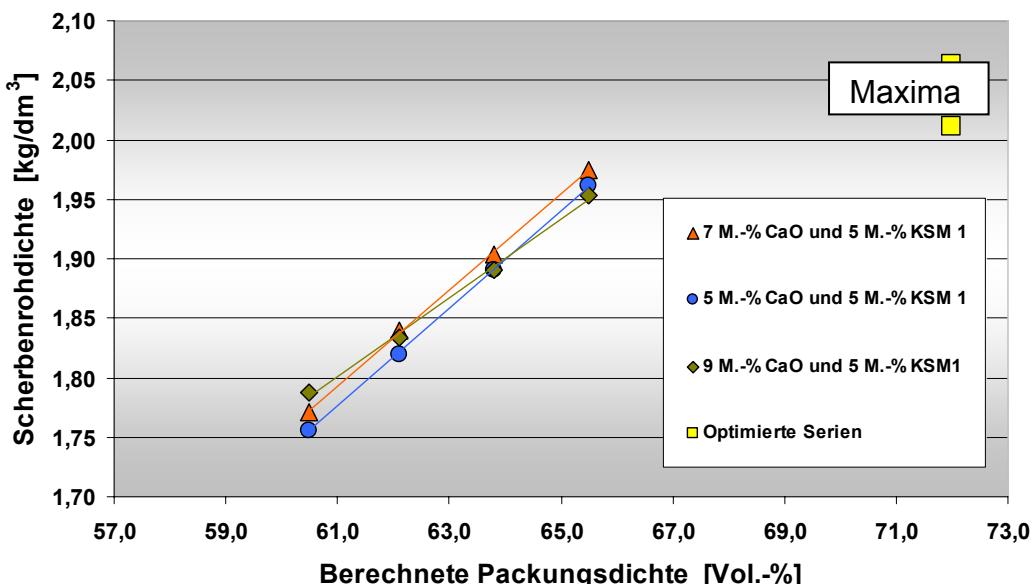


Bild 6.31: Zusammenhang zwischen der Packungsdichte und der Scherbenrohdichte - Musterwerk 1. Einfluss des Pressdrucks bei 5 M.-% Kalksteinmehl (KSM 1)

Das nachfolgende Bild 6.32 zeigt, welche große Rolle der Pressdruck und die Zugabe menge an KSM-1-Füller für die Scherbenrohdichte spielen. Mit einer Steigerung des Pressdrucks von $\sigma_p = 10 \text{ N/mm}^2$ auf $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$ werden durchgängig deutlich höhere Scherbenrohdichten erreicht. Die Scherbenrohdichte nimmt bei diesem Beispiel mit ansteigender KSM-1-Dosis ebenfalls deutlich zu. Auch hier liegen hohe Bestimmtheitsmaße vor.

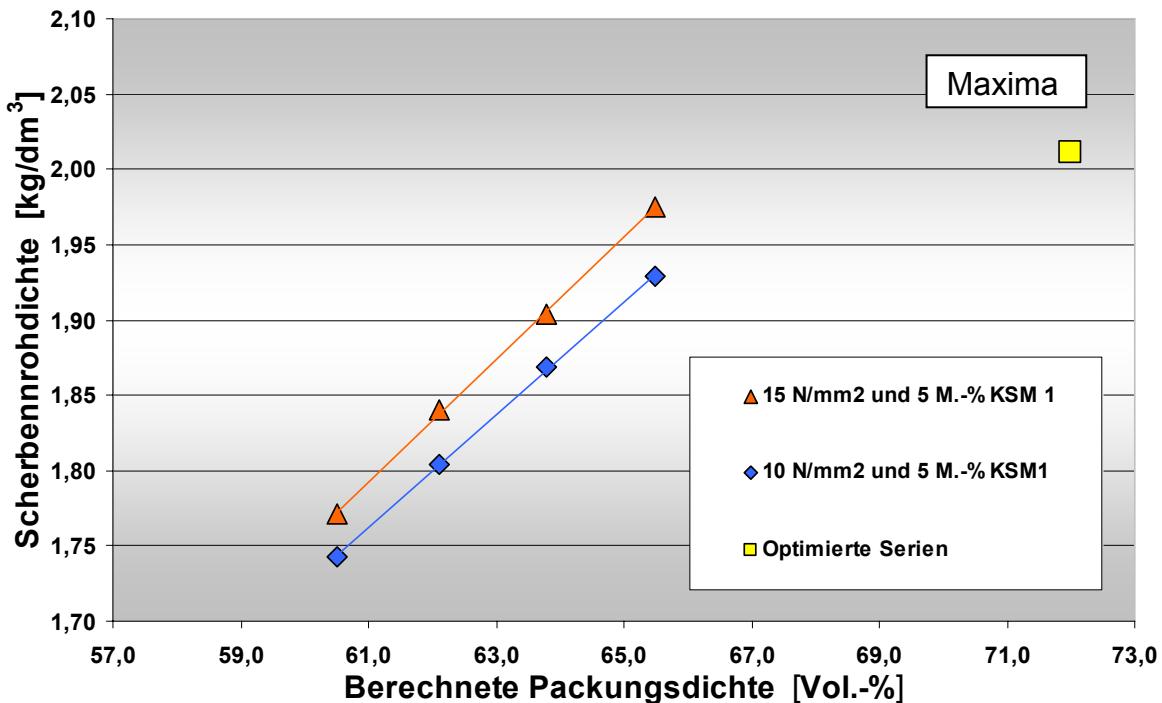


Bild 6.32: Gegenüberstellung der Packungsdichten und der Scherbenrohdichte - Musterwerk 1 Einfluss des Pressdrucks und bei einer KSM-1-Menge von 5 M.-%

Zusätzlich wurde eine Vergleichsserie (Serie 80a) zur Ermittlung des Einflusses der Kornform auf die Packungsdichte untersucht. Dabei wurde die Korngrößenverteilung des vergleichsweise scharkantigen Recycling-Splittes 2/5 mm, der eine Sphärizität von SPHT = 1,221 aufweist, durch eine Mischung aus runden Quarzsandkörnern mit einer Sphärizität von ca. SPHT = 1,070 nachgestellt. Verglichen wurden die Serien 80 und 80a. Die Ergebnisse zu diesem Vergleich sind in der nachfolgenden Tabelle 6.1 wiedergegeben.

Serie	Gesteins-körnung Nr. 2	Sphärizität SPHT	Packungs-dichte Φ [Vol.-%]	Steindruck-festigkeit $\beta_{D, St}$	Scherben-rohdichte ρ_{Sch}
80	Recycling-Splitt 2/5 mm	1,221	67,7	32,8	1,999
80a	Quarzsandmischung	1,070	66,8	36,4	1,992

Tabelle 6.1: Einfluss der Kornform auf die Packungsdichte - Musterwerk 1

Wie aus der Literatur [53] hervorgeht, zeigt dieser Kontrollversuch, dass die Packungsdichte mit zunehmender Rauigkeit der Kornoberfläche lediglich tendenziell zunimmt. Der Packungsdichte- und der Scherbenrohdichtezuwachs ist jedoch relativ gering und wird daher im Folgenden vernachlässigt.

Außerdem zeigte sich bei der Festlegung der Eingangsgrößen der Packungsdichtesoftware, dass die Packungsdichteberechnung und damit die Prognose der Scherbenrohdichte mit einem globalen Parameter "Reichweite der Teilchenbehinderung" mit einem Wert von 2,0 für die in die Untersuchungen einbezogenen Gesteinskörnungen ausreichend genau ist. Die Untersuchung des Einflusses der Kornform auf die Scherbenrohdichte wird deshalb nicht weiterverfolgt.

Für den Zusammenhang zwischen der Scherbenrohdichte und dem das Gefüge auseinanderdrängend wirkenden Anteil an Feinsand G12 (statt Recycling-Splitt 2/5 mm) kann von einem linearen Ansatz ausgegangen werden, siehe Bild 6.33.

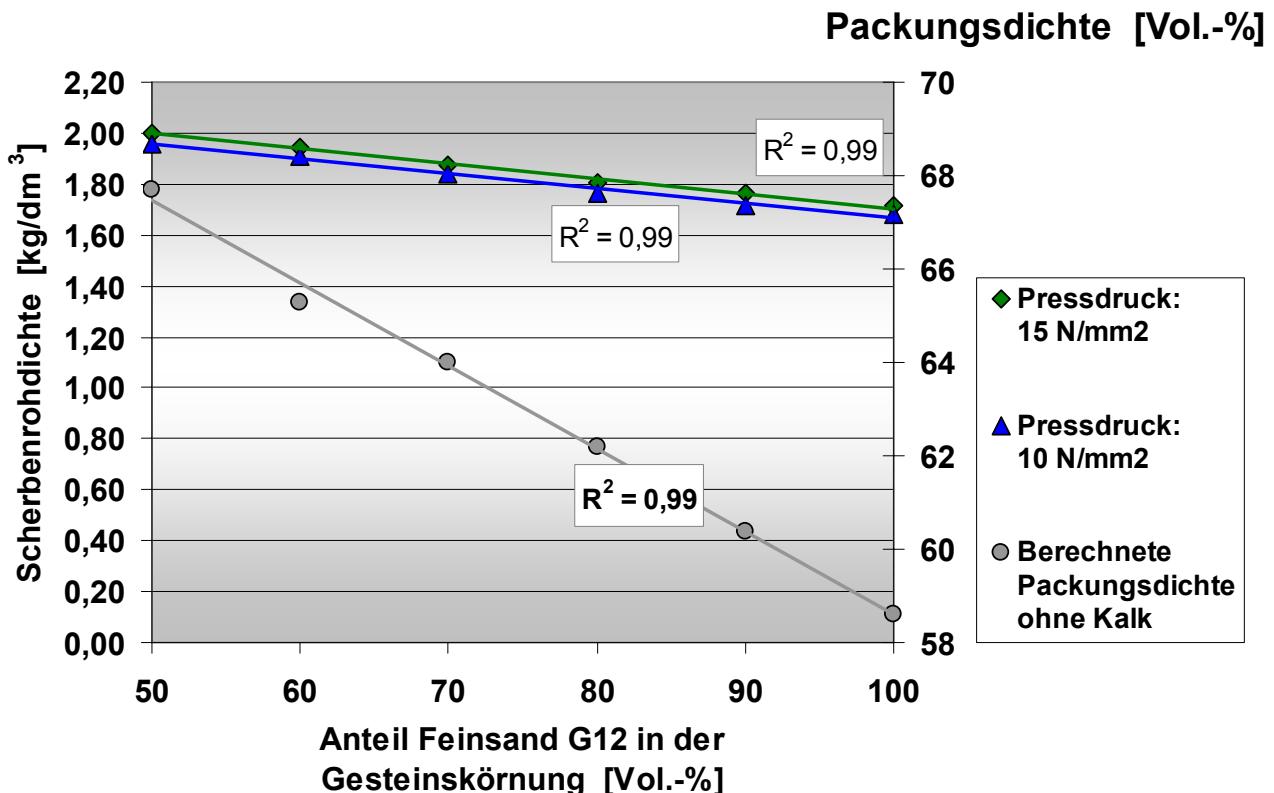


Bild 6.33: Auseinanderdrängungseffekt durch den Feinsand G12 - Werk 1 - Beispiel

Musterwerk 2: Kombination aus Feinsand G12 - Mittelsand S40T - Grobsand B

Beim Musterwerk 2 ist der Einfluss der Packungsdichte auf die Scherbenrohdichte ebenfalls sehr deutlich zu erkennen. Ebenso wird wiederum deutlich, wie groß der Einfluss des Pressdrucks auf die Scherbenrohdichte ist. Die Scherbenrohdichte nimmt bei einer Erhöhung des Pressdrucks von $\sigma_p = 10 \text{ N/mm}^2$ auf $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$ teilweise deutlich zu. Der Einfluss der CaO-Dosis ist jedoch unterschiedlich. Während bei der niedrigeren Pressdruckstufe ($\sigma_p = 10 \text{ N/mm}^2$) kein nennenswerter Einfluss der CaO-Dosis auf die Scherbenrohdichte vorliegt, tritt bei der höheren Pressdruckstufe ($\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$) der Effekt auf, dass sich mit zunehmender CaO-Dosis eine deutlichere Steigerung der Scherbenrohdichte ergibt. Die Ursache für diesen Effekt ist nicht genau bekannt. In Frage kommt die bereits beschriebene Viskositätsabnahme durch den Kalk bei der Verdichtung [166]. Auch in diesem Fall lässt sich im Rahmen der praktischen Anwendung dieses Zusammenhangs die Scherbenrohdichte aus der Rezeptur und dem Pressdruck ableiten, wenn auch nicht mit der hohen Genauigkeit wie beim Werk 1. Das nachfolgende Bild 6.34 zeigt den Zusammenhang zwischen den berechneten Packungsdichten und den erreichten Scherbenrohdichten für eine CaO-Dosis von 7 M.-%.

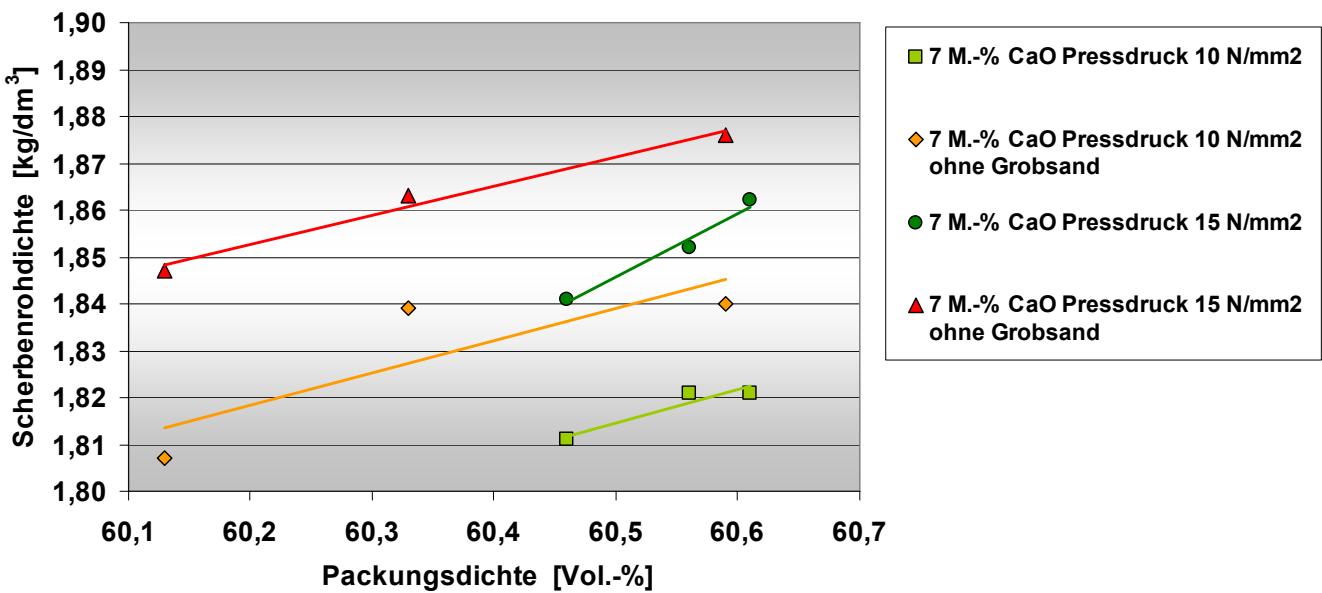


Bild 6.34: Gegenüberstellung der Packungsdichte und der Scherbenrohdichte
Musterwerk 2 - Einfluss des Pressdrucks

Das nachfolgende Bild 6.35 zeigt die Wirkung der Zunahme des Anteils an Mittelsand, bzw. die gleichzeitige Abnahme des Feinsandanteils, mit dem der erwünschte Ausfülleffekt des Hohlraums zwischen den Mittelsandkörnern zunehmend reduziert wird. In der Folge nehmen die Packungsdichte und die Scherbenrohdichte mit steigender Mittelsandmenge deutlich ab (quadratischer Ansatz).

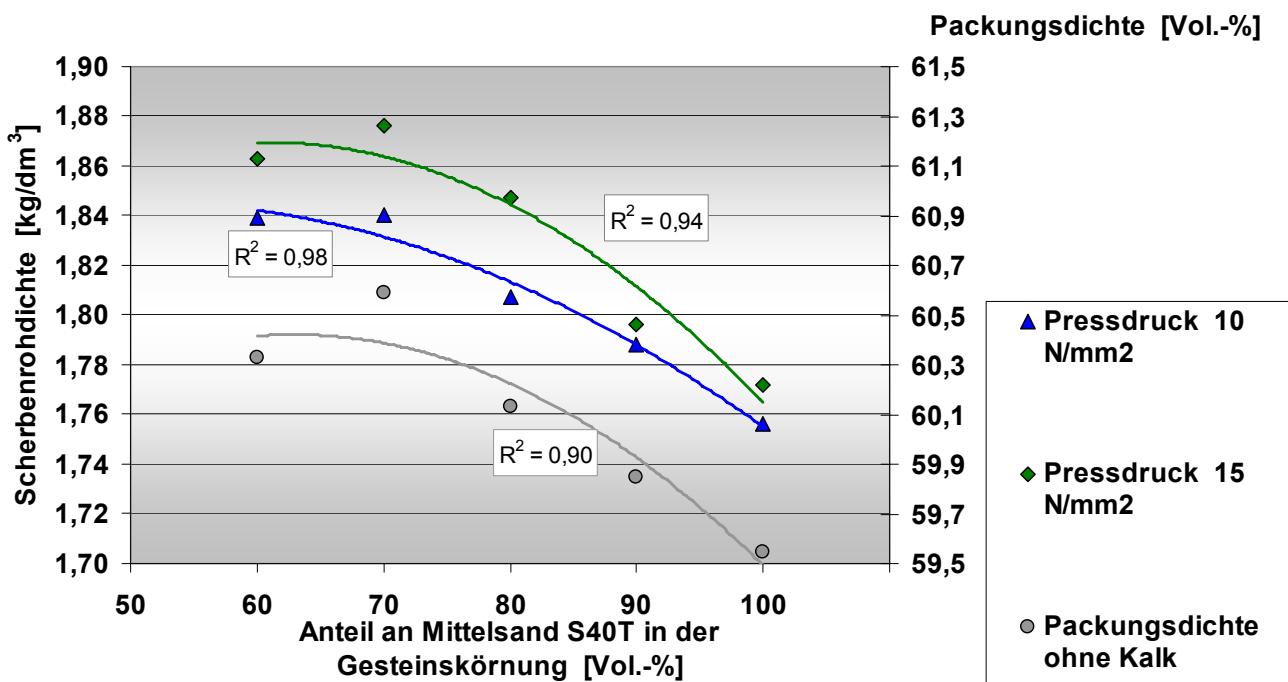


Bild 6.35: Auseinanderdrängungseffekt durch den Mittelsand S40T - Musterwerk 2 - Beispiel

Musterwerk 3: Kombination aus Mittelsand N- Grobsand S2-3,5T Grauwackefüller bzw. Grauwackesplitt 0/2 mm

Auch beim Musterwerk 3 ist der Einfluss der Packungsdichte auf die Scherbenrohdichte deutlich zu erkennen. Die Ursache für diese Effekte liegen wiederum im oben beschriebenen Auseinanderdrängungseffekt. Dieser Effekt ist dafür verantwortlich, dass die Serien mit zunehmender CaO-Menge in der Mischung zu vergleichsweise geringeren Scherbenrohdichten führen. Ohne rechnerische Optimierung werden Packungsdichten von bis zu $\Phi = 60,8$ Vol.-% erreicht. Siehe Bild 6.36.

Optimierte Serien: Die durch die Berechnung optimierten Serien zeigen vergleichsweise höhere Packungsdichten mit $\Phi_{\max} = 61,1$ Vol.-% mit zugehörigen Scherbenrohdichten von $\rho_{tr} = 2,00$ bis $2,04$ kg/dm³ beim Grauwackefüller und mit $\Phi_{\max} = 62,5$ Vol.-% mit zugehörigen Scherbenrohdichten von $\rho_{tr} = 2,04$ bis $2,06$ kg/dm³ beim Grauwackesplitt 0/2 mm.

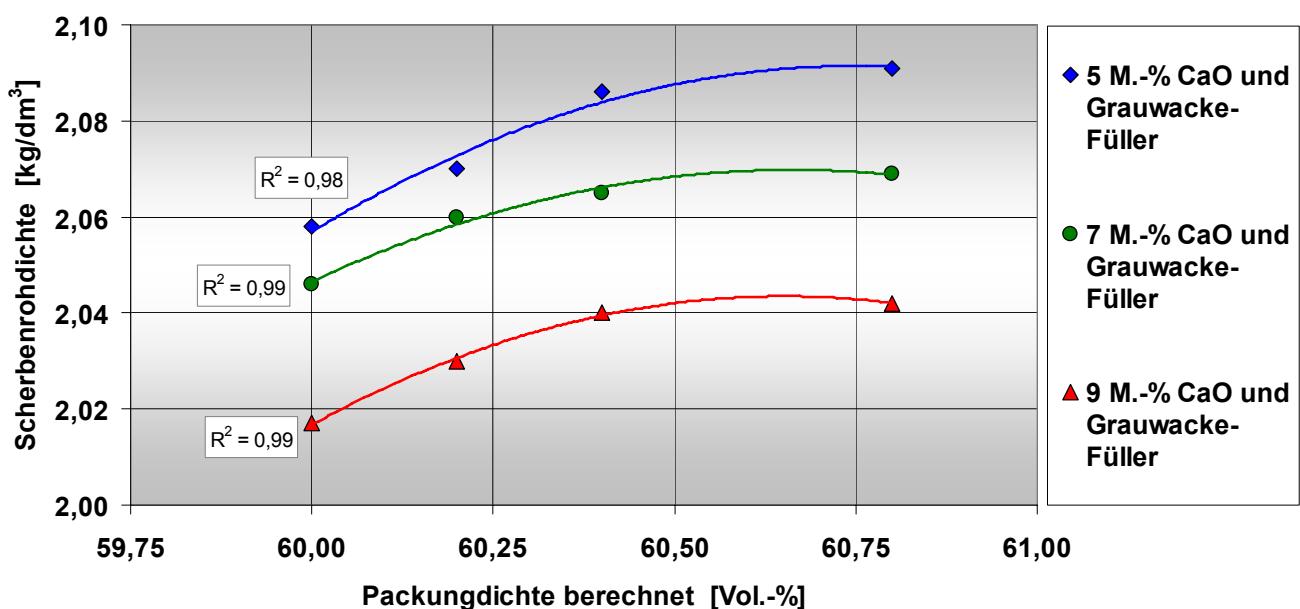


Bild 6.36: Gegenüberstellung der Packungsdichte und der Scherbenrohdichte - Musterwerk 3 - Einfluss der CaO-Dosis und des Grauwackefüllers 0/0,09 mm Beispiel

Das nachfolgende Bild 6.37 zeigt den Einfluss des sukzessiven Austausches des Mittelsandes durch den Grauwackesplitt 0/2 mm in 5 M.-%-Schritten ($\approx 5,5$ bis $5,7$ Vol.-%-Schritten). Hierdurch erfolgt eine Reduzierung des Auseinanderdrängungseffektes durch den Mittelsand bzw. eine Steigerung der Packungsdichte durch die vergleichsweise größeren Grauwackesplittkörner.

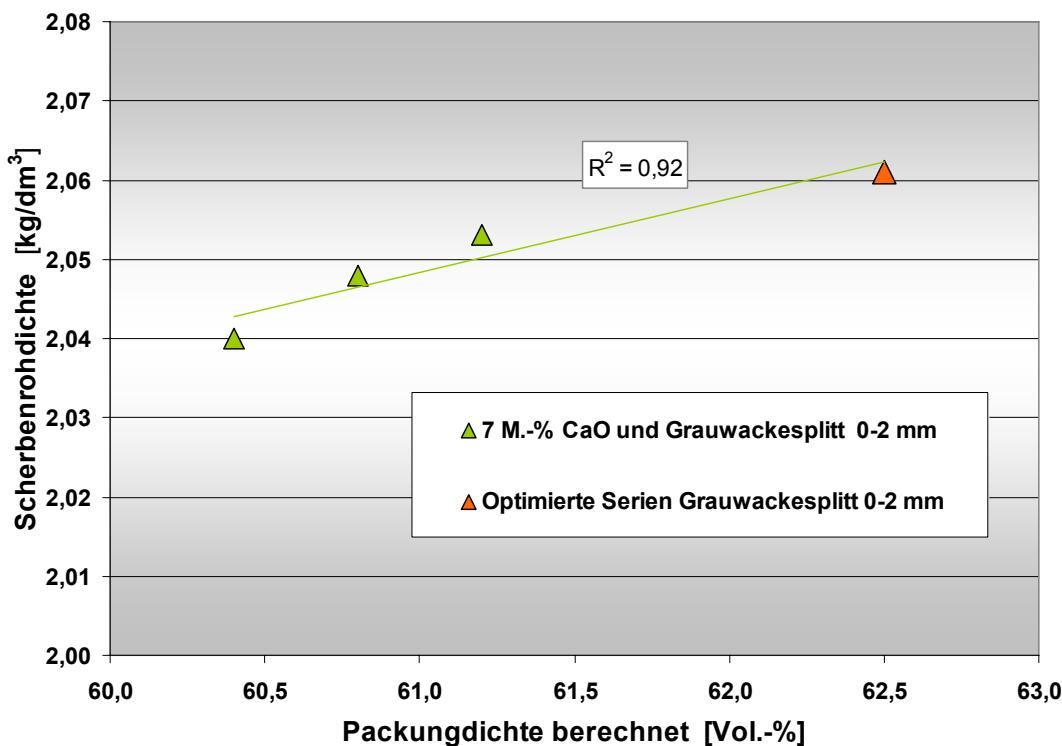


Bild 6.37: Gegenüberstellung der Packungsdichte und der Scherbenrohdichte - Musterwerk 3 - Einfluss der Zunahme des Anteils an Grauwackesplitt 0/2 mm

Musterwerk 4: Kombination aus Feinsand G 0/0,3 mm - Mittelsand 0/2 mm-Basaltsand T 0/2 mm

Auch in diesem Fall ist sehr deutlich zu erkennen, wie die Scherbenrohdichte mit zunehmendem Verdichtungsdruck ansteigt. Bezuglich der CaO-Dosis wurden die höchsten Packungsdichten bei einer Zugabemenge von 7 M.-% ($\approx 7,84$ Vol.-%) CaO erreicht. Bei einer Menge von 5 M.-% ($\approx 5,50$ Vol.-%) CaO liegen offenbar noch ausreichende Hohlräume für ein weiteres Auffüllen im Kalksandsteinengefüge vor und bei 9 M.-% ($\approx 10,26$ Vol.-%) drängt die zu hohe CaO-Feinstoffdosis die größeren Komponenten des Grundkorngerüstes bereits wieder auseinander. Auch hier liegen hohe Bestimmtheitsmaße oberhalb von $R^2 = 0,95$ vor. Im Rahmen einer praktischen Anwendung dieses Zusammenhangs lässt sich auch für diesen Herstellparamettersatz die Scherbenrohdichte aus der Rezeptur und dem Pressdruck recht genau ableiten. Ohne die rechnerische Optimierung werden maximale Packungsdichten von bis zu $\Phi = 60,9$ Vol.-% erreicht.

Optimierte Serien: Die durch Berechnung optimierten Serien liefern erkennbar höhere Packungsdichten mit $\Phi_{\max} = 62,2$ Vol.-% mit zugehörigen Scherbenrohdichten von $\rho_{tr} = 1,97$ bis $1,98$ kg/dm³ bei der Pressdruckstufe $\sigma_p = 10$ N/mm² und $\rho_{tr} = 2,01$ bis $2,04$ kg/dm³ bei der Pressdruckstufe $\sigma_p = 15$ N/mm². Auffällig ist auch bei den optimierten Serien, dass die Scherbenrohdichte bei Ansatz der hier höchsten CaO-Dosisstufe (9 M.-% $\approx 10,26$ Vol.-%) wieder etwas abfällt. Als Erklärung für diesen Effekt kommt wiederum das in [22] beschriebene teilweise eintretende Auseinanderdrängen des Grundkorngerüstes in Betracht. Das nachfolgende Bild 6.37 zeigt den Zusammenhang zwischen den berechneten Packungsdichten und den erreichten Scherbenrohdichten exemplarisch für eine CaO-Dosis von 7 M.-% .

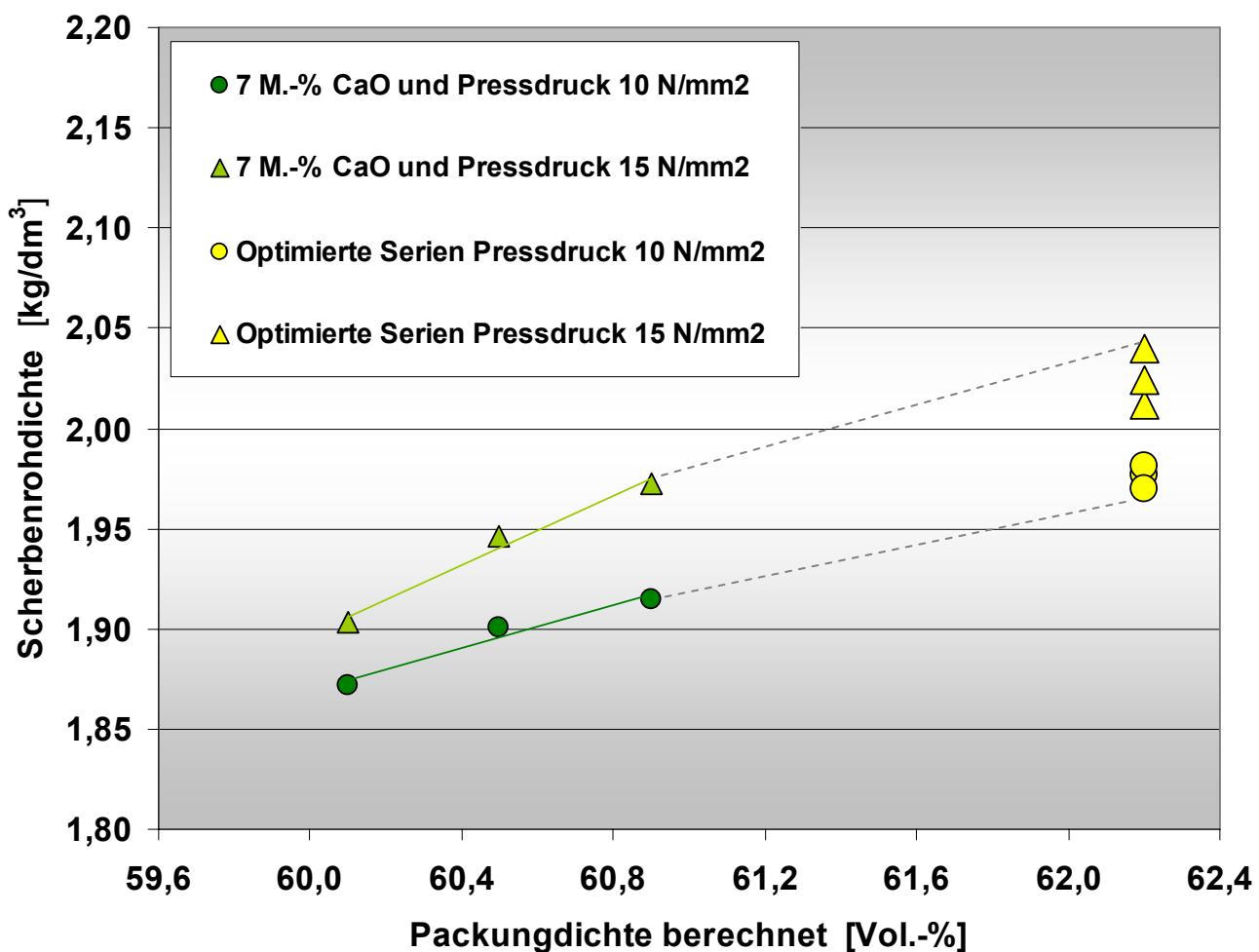


Bild 6.37: Gegenüberstellung der Packungsdichte und der Scherbenrohdichte - Werk 4
Einfluss des Pressdrucks, CaO-Dosis = 7 M.-%

Musterwerk 5: Kombination aus Quarzsanden

In diesem Fall ist sehr deutlich zu erkennen, wie die Scherbenrohdichte mit zunehmender CaO-Dosis ansteigt. Auch hier liegen wiederum hohe Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang zwischen den berechneten Packungsdichten und den erreichten Scherbenrohdichten oberhalb von $R^2 = 0,96$ vor. In der Folge lässt sich auch hier im Rahmen einer praktischen Anwendung dieses Zusammenhangs für diesen Herstellparametersatz die Scherbenrohdichte aus der Rezeptur und dem Pressdruck recht genau ableiten. Ohne rechnerische Optimierung werden Packungsdichten von bis zu von $\Phi = 60,9$ Vol.-% erreicht. Das nachfolgende Bild 6.38 zeigt den Zusammenhang zwischen den berechneten Packungsdichten und den erreichten Scherbenrohdichten.

Optimierte Serien: Die durch Berechnung optimierten Serien liefern wiederum höhere Packungsdichten mit $\Phi_{\max} = 62,9$ Vol.-% mit zugehörigen Scherbenrohdichten von $\rho_{tr} = 1,86$ bis $1,89 \text{ kg/dm}^3$. Das nachfolgende Bild 6.37 zeigt den Zusammenhang zwischen den berechneten Packungsdichten und den erreichten Scherbenrohdichten.

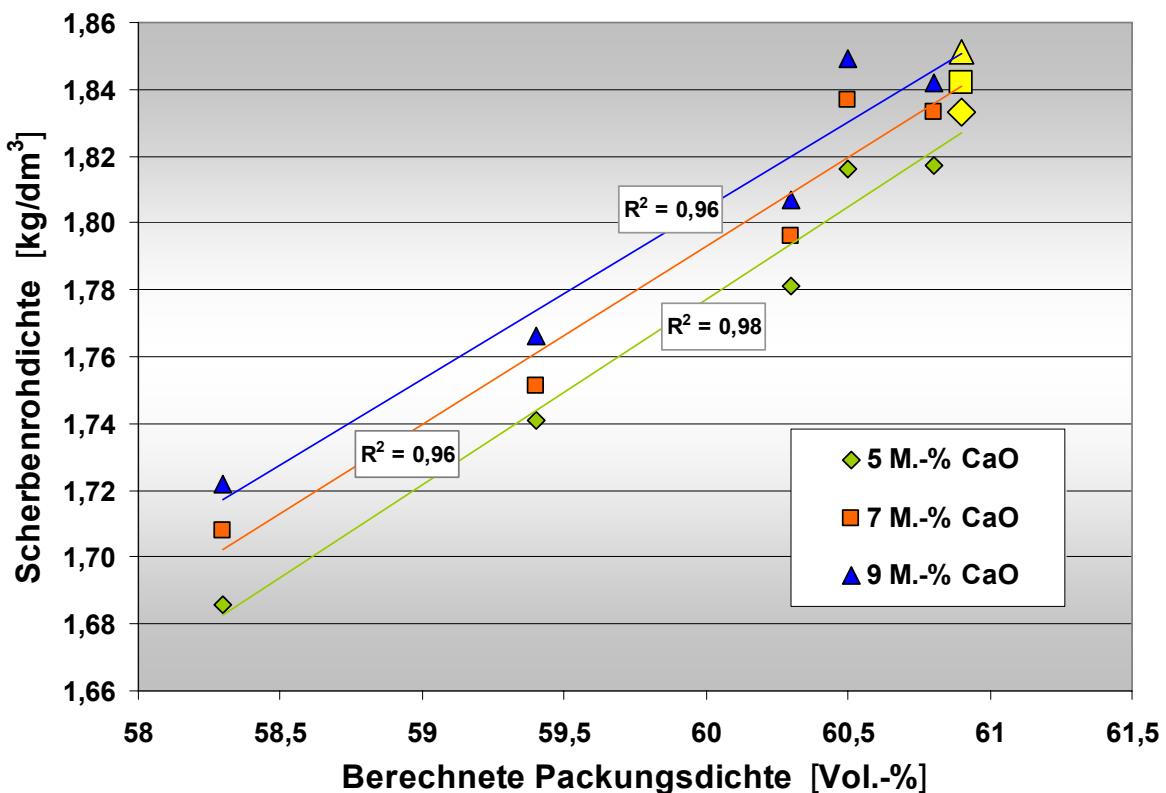


Bild 6.38: Gegenüberstellung der Packungsdichte und der Scherbenrohdichte - Musterwerk 5

Das Bild 6.39 zeigt in der Übersicht für das Werk 5 die erreichten Packungsdichten und die Scherbenrohdichten für das Mengenverhältnis Feinsand zu Grobsand.

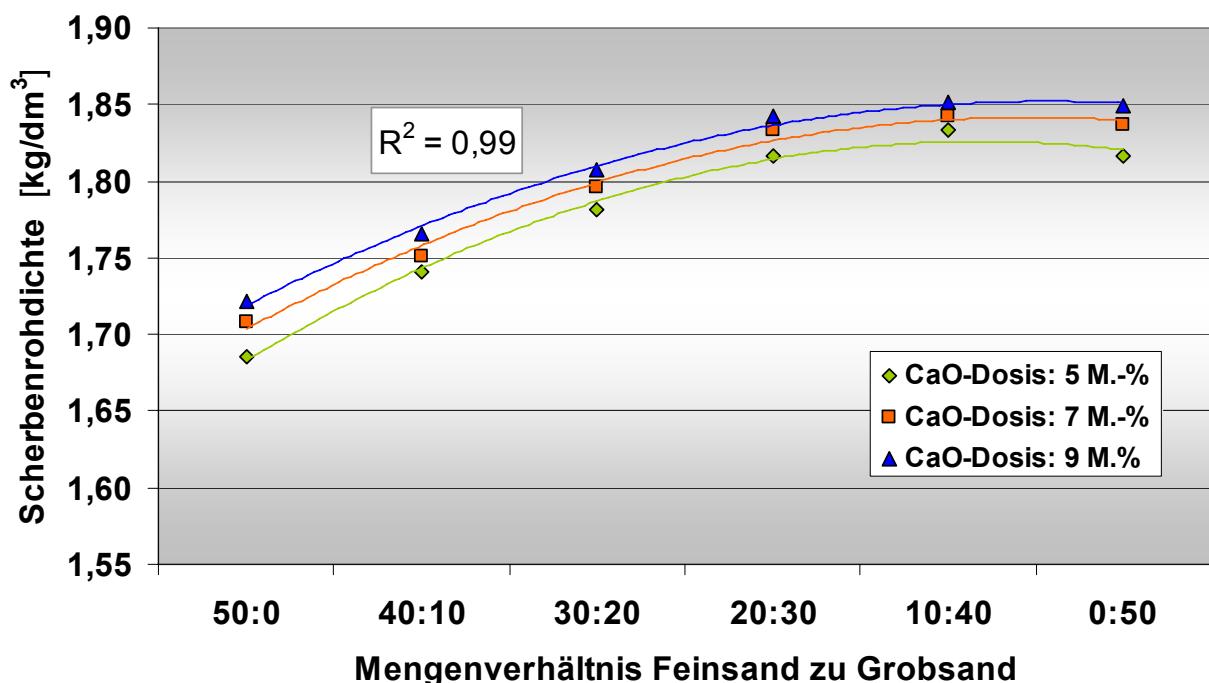


Bild 6.39: Scherbenrohdichte für die Mengenverhältnisse Feinsand zu Grobsand - Musterwerk 5

Musterwerk 6: Breite Variation der CaO-Dosis

Das im Abschnitt 6.3.3 gezeigte Bild 6.30 zeigt für diese Serien die Abhängigkeit der Steindruckfestigkeit und der Scherbenrohdichte von der CaO-Dosis. Die Scherbenrohdichte nimmt mit ansteigender CaO-Dosis bis zu der hier ausgewählten Maximaldosis von 13 M.-% CaO ($\approx 15,34$ Vol.-%) (bezogen auf die Masse aller trockenen Rohstoffe) kontinuierlich zu (= sog. "ansteigender Ast" der Maximumkurve). Die Zunahme der Scherbenrohdichte durch die CaO-Dosissteigerung erklärt sich wiederum aus dem "Schmiereffekt" beim Verdichten der Rohlinge mit Hilfe der hydraulischen Pressen. In [17] wurde darauf hingewiesen, dass eine Steigerung der CaO-Dosis in der Kalk-Sand-Rohmischung zu höheren Scherbenrohdichten führt. Der Kalk scheint sich dabei wie ein Schmiermittel zu verhalten.

6.3.5 Wasseraufnahme

Die Werte der Wasseraufnahme liegen im für Kalksandsteinprodukte üblichen Bereich $w = \text{rd. } 10 \text{ bis } 14$ M.-% (≈ 18 bis 23 Vol.-%). Die Wasseraufnahme ist ein Maß für die Porosität von Kalksandsteinen. Sie wird erwartungsgemäß mit zunehmender Verdichtung reduziert [169 bis 172]. Siehe Tabellen 10.18 bis 10.23 im Anhang.

6.3.6 Frostwiderstandsfähigkeit

Der Frostwiderstand nimmt steigt generell erkennbar mit zunehmender CaO-Dosis und zunehmendem Pressdruck, also mit zunehmender Festigkeit und geringer werdender Porosität an [173]. Dies trifft auch auf die im Rahmen dieser Untersuchungen hergestellten Kalksandsteine zu. Siehe Tabellen 10.18 bis 10.23 im Anhang.

6.3.7 Porosität mittels Quecksilberdruckporosimetrie

Die Werte der quecksilberfüllbaren Porosität liegen im für Kalksandsteinprodukte üblichen Bereich. Sie wird mit zunehmender Verdichtung reduziert. Beispielsweise ist an den Ergebnissen zum Werk 3 deutlich erkennbar, dass die Porosität mit zunehmender Packungsdichte abnimmt. Zwei Beispiele zu den Daten der Werke 3 und 4 sollen diesen Zusammenhang verdeutlichen:

Werk 3: a) Vergleiche Serie 156 mit Grauwackefüller mit der optimierten Serie 162 :

- Serie 156: Packungsdichte $\Phi = 63,6$ Vol.-% und Hg-füllbare Porosität $V_{Hg} = 42,3$ Vol.-%
- Serie 162: Packungsdichte $\Phi = 64,6$ Vol.-% und Hg-füllbare Porosität $V_{Hg} = 38,4$ Vol.-%

Werk 3: b) Vergleiche Serie 168 mit Grauwackesplitt mit der optimierten Serie 174

- Serie 168: Packungsdichte $\Phi = 64,0$ Vol.-% und Hg-füllbare Porosität $V_{Hg} = 48,6$ Vol.-%
- Serie 174: Packungsdichte $\Phi = 67,4$ Vol.-% und Hg-füllbare Porosität $V_{Hg} = 42,7$ Vol.-%

Werk 4: a) Vergleiche Serie 131 mit Basaltsand mit der optimierten Serie 137 :

- Serie 131: Packungsdichte $\Phi = 60,5$ Vol.-% und Hg-füllbare Porosität $V_{Hg} = 41,1$ Vol.-%
- Serie 137: Packungsdichte $\Phi = 62,2$ Vol.-% und Hg-füllbare Porosität $V_{Hg} = 40,4$ Vol.-%

Werk 4: b) Vergleiche Serie 143 mit Grauwackesplitt mit der optimierten Serie 149

- Serie 143: Packungsdichte $\Phi = 60,5$ Vol.-% und Hg-füllbare Porosität $V_{Hg} = 42,5$ Vol.-%
- Serie 149: Packungsdichte $\Phi = 62,2$ Vol.-% und Hg-füllbare Porosität $V_{Hg} = 39,2$ Vol.-%

Die Einzeldaten zur Porosität sind in den Tabellen 10.20 und 10.21 im Anhang zusammengestellt.

6.3.8 Gefügeuntersuchung mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie

Die mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie exemplarisch untersuchten 23 Kalksandsteinproben stammen aus den vier verschiedenen Musterwerken (Werke 1, 3, 4 und 5). Im Folgenden werden beispielhaft markante Proben der einzelnen Werke miteinander verglichen. Im Anhang sind in den Bildern 10.23 bis 10.26 zu allen untersuchten Proben die Ergebnisse in Form von eingescannten Dünnschliffen, lichtmikroskopischen (LM) und rasterelektronenmikroskopischen Bildern (REM) zusammengestellt.

Musterwerk 1: Kombination: Feinsand / RC-Splitt / Kalksteinmehlfüller KSM 1

Aus dem Musterwerk 1 wurden 9 Proben untersucht, wobei drei der Proben hinsichtlich ihrer Mischungsverhältnisse der Gesteinskörnungen optimiert wurden (Serien 113, 114 und 115). Bei gleich bleibendem Mischungsverhältnis der Zuschläge hat die Probe mit einer Kalkdosis von 7 M.-% stets die höchste Druckfestigkeit. Höhere Scherbenrohdichten bedeuten nicht zwangsweise auch eine höhere Druckfestigkeit. Die optimierten Serien 113, 114 und 115 weisen die höchsten Scherbenrohdichten auf, aber nicht die höchsten Druckfestigkeiten aller Proben aus Werk 1. Die Erhöhung des Anteils an RC-Splitt hat eine Erhöhung der Scherbenrohdichte zur Folge, der Feinsandanteil sinkt, dadurch können die geringeren Druckfestigkeiten der optimierten Proben (113, 114 und 115) im Vergleich zu den Proben 98, 80 und 89 entstehen. Ein Vergleich der Proben 78, 80 und 114 (alle 7 M.-% (\approx 6,94 Vol.-%) CaO-Dosis) mittels LM lässt keine wesentlichen Veränderungen in der Ausbildung der Reaktionssäume und der CSH-Phasen erkennen. In den Bildern der REM scheinen bei Probe 80 (höchste Druckfestigkeit der Proben aus Werk 3) die Reaktionssäume der Quarzkörner stärker verwachsen zu sein als bei Probe 78. Vergleiche: bei der Probe 114 scheint eher ein „Verklumpen“ der Körner als ein „Verwachsen“ stattgefunden zu haben. Weiterhin kann man in den Aufnahmen der REM bei Probe 80 gut miteinander verwachsene kurz- und langfaserige CSH-Phasen erkennen, bei den Proben 78 und 114 lediglich kurzfaserige.

Musterwerk 3: Kombination: Mittelsand-Grobsand-Grauwackefüller bzw. -splitt

Aus dem Werk 3 wurden 5 Proben untersucht, wobei zwei der Proben hinsichtlich ihrer Mischungsverhältnisse der Gesteinskörnungen optimiert wurden (Proben 162 und 174). Die optimierte Probe 174 hat die höchste Scherbenrohdichte, die Probe 155 jedoch die höchste Druckfestigkeit. Die optimierte Probe 162 hat die geringste Scherbenrohdichte und Druckfestigkeit. Ein Vergleich der Proben 162 und 155 (beide ohne Grauwackesplitt 0/2 mm) zeigt, dass die Probe 155 mit einem höheren Gehalt an Mittelsand eine ausgeprätere CSH-Phasenbildung („Verschweißen“ der Quarzkörner) aufweist, als Probe 162 mit höherem Gehalt an Grauwackefüller (LM: vergleiche. Der Vergleich der Proben 155 (ohne Grauwackesplitt 0/2 mm) und 174 (40 M-% Grauwacke 0/2 mm) wiederum zeigt, dass die optimierte Probe 174 (höchste Scherbenrohdichte aller Proben aus Werk 3) eine bessere Packungsdichte aufweist, die CSH-Phasenbildung aber nicht so ausgeprägt ist, wie die der Probe 155. Die Quarzkörner der Probe 155 scheinen flächig miteinander „verschweißt“, die der Probe 174 lediglich „verklebt“.

Musterwerk 4: Kombination: Feinsand - Mittelsand - Basaltsand

Aus dem Werk 4 wurden 6 Proben untersucht, wobei zwei der Proben hinsichtlich ihrer Mischungsverhältnisse der Gesteinskörnungen optimiert wurden (Serien 137 und 149). Sowohl die Scherbenrohdichte als auch die Steindruckfestigkeit ließen sich bei gleicher Rezeptur durch Erhöhung des Pressdrucks (10 auf 15 N/mm²) steigern. Die beiden optimierten Proben (137 und 149) weisen sowohl höhere Dichten als auch höhere Steindruckfestigkeiten im Vergleich zu den übrigen Proben auf. In den Aufnahmen der LM und der REM ließen sich bei den nicht optimierten Steinen keine wesentlichen Unterschiede in den Ausbildungen der Reaktionssäume mit ihren CSH-Phasen erkennen.

Der Vergleich der nicht optimierten Probe 144 mit der optimierten Probe 149 zeigt in den Aufnahmen der LM und der REM, dass die CSH-Phasen bei Probe 149 stärker ausgebildet und stärker miteinander verwachsen sind als bei Probe 144. In den Aufnahmen der REM ist ebenfalls deutlich die höhere Packungsdichte der optimierten Probe 149 im Vergleich zur Probe 144 zu erkennen.

Musterwerk 5: Kombination von Quarzsanden - Anteil der Mittelsand = const.

Aus dem Werk 5 standen insgesamt drei Proben zur Verfügung. Hierbei handelt es sich um nicht optimierte KS-Mischungen. Der Pressdruck und die Kalkdosis sind bei allen drei Proben gleich. Bei abnehmenden Anteil des Feinzuschlags und gleichzeitiger Erhöhung des Grobzuschlags nimmt die Scherbenrohdichte zwar zu, die Druckfestigkeit jedoch ab. Sowohl die Aufnahmen aus der LM als auch die der REM zeigen Unterschiede in der Ausbildung der Reaktionssäume bzw. CSH-Phasen. Die Reaktionssäume und die fein ausgebildeten CSH-Phasen der Probe MS-7 sind miteinander verwachsen. Die Reaktionssäume der Probe MS-12, mit eher blättchenförmigen CSH-Phasen, scheinen die Quarzkörner miteinander zu „verklumpen“.

6.3.9 Modell-Werksversuche

An den Rohstoffen aus bislang 6 Kalksandsteinwerken wurden unter Einsatz der entwickelten Software der Universität Kassel (FB 14, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, FG Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie) jeweils Berechnungen zur Packungsdichte durchgeführt. Diese Resultate wurden um Berechnungsergebnisse aus insgesamt 11 weiteren Muster-Werken ergänzt. Die zusätzlichen Ergebnisse bestätigen die Berechenbarkeit der erreichbaren Packungsdichten. Im nachfolgenden Bild 6.41 und in der zugehörigen Tabelle 6.7 ist das Rechenergebnis für ein exemplarisches Werk (Ifd. Nr. 7) wiedergegeben.

Aus den bei der Packungsdichteberechnung erzeugten relativ großen Datenmengen der resultiert verständlicherweise eine sehr eingeschränkte Ablesbarkeit der Rezepturen aus den Übersichtsdiagrammen. Daher erfolgt die Darstellung der Ergebnisse sinnvollerweise anhand von Diagrammen und Tabellen, in denen die Variation der Rezepturen in 10-Vol.-%-Schritten aufgeführt ist.

In der Tabelle 6.7 ist exemplarisch der Ausschnitt aus der Berechnungstabelle wiedergegeben, der die für das Beispiel 1 (Musterwerk 7) ermittelte maximale Packungsdichte enthält. Der Maximalwert ist markiert. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass die Berechnung der Packungsdichte mit Hilfe der auf MS-Excel-Basis entwickelten Software erfolgreich durchgeführt werden kann.

Beispiel 1: Musterwerk 7

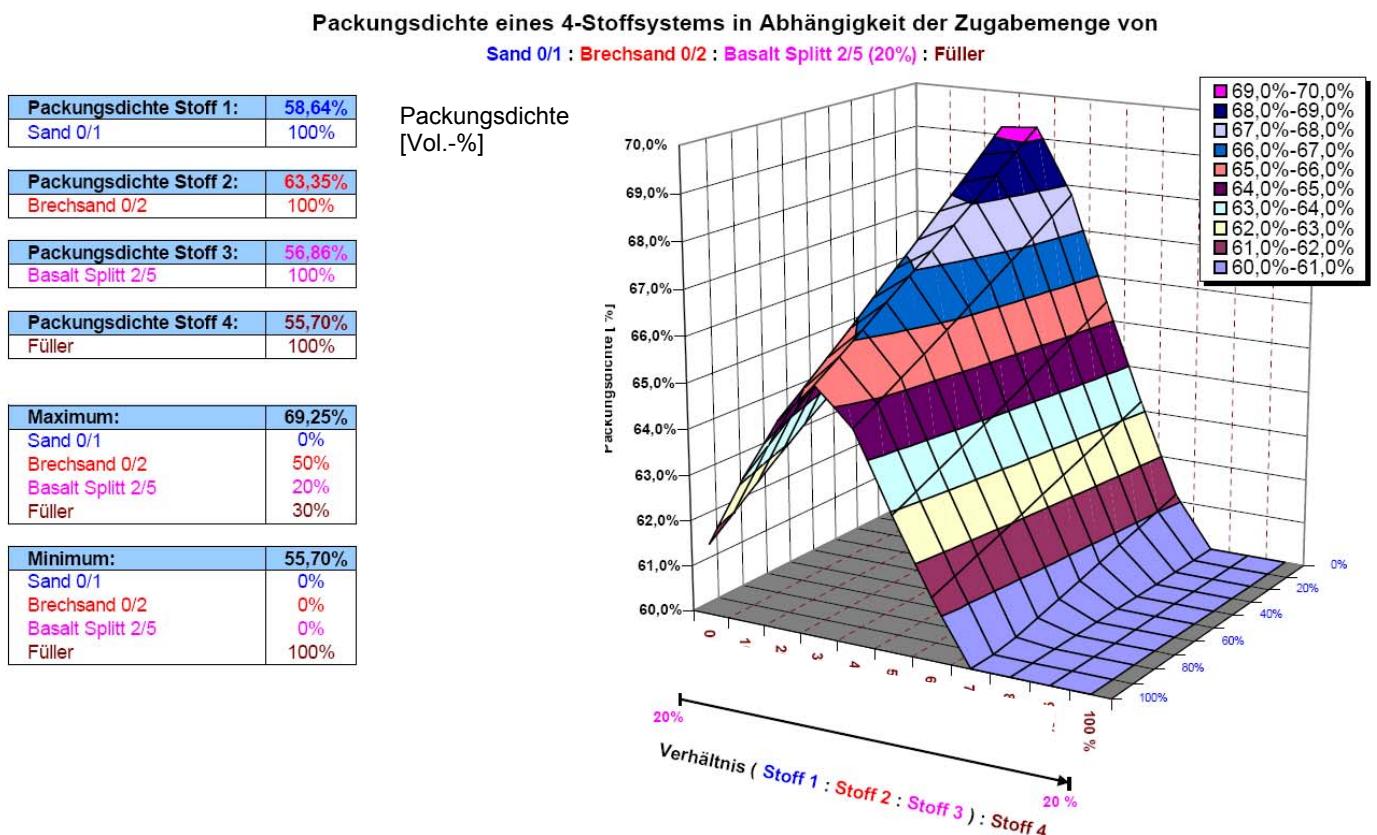


Bild 6.41: Beispiel einer Packungsdichteberechnung für 4 Stoffe

Die maximale Packungsdichte beträgt $\Phi_{\max} = 69,3$ Vol.-% und ergibt sich bei folgenden volumetrischer Zusammensetzung der Gesteinskörnungen:

- Sand 0/1 mm: 0 Vol.-%
- Brechsand 0/2 mm: 50 Vol.-%
- Basaltsplitt 2/5 mm: 20 Vol.-%
- Kalksteinmehlfüller: 30 Vol.-%

Die minimale Packungsdichte beträgt $\Phi_{\min} = 55,7$ Vol.-% und ergibt sich rechnerisch bei ausschließlicher Verwendung des Kalksteinmehlfüllers.

Packungsdichte in [%] : 4-Stoffsystem												Minimum: 55,70%	Maximum: 69,25%
Verhältnis in [%]:			Stoff 1 Sand 0/1 Stoff 2 Brechsand 0/2									Anteil Stoff 3 Basalt Splitt 2/5 Auswahl [%]	Anteil Stoff 4 Füller Auswahl [%]
100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%	100%		
61,6%	62,0%	62,4%	62,9%	63,3%	63,7%	64,0%	64,2%	64,4%	64,5%	64,4%	64,4%	20 %	0 %
63,1%	63,6%	64,1%	64,5%	65,0%	65,4%	65,8%	66,3%	66,7%	67,0%	67,3%	67,3%	20 %	10 %
64,5%	65,0%	65,4%	65,9%	66,3%	66,8%	67,3%	67,7%	68,2%	68,7%	69,2%	69,2%	20 %	20 %
65,4%	65,8%	66,1%	66,5%	66,9%	67,3%	67,7%	68,1%	68,5%	68,9%	69,3%	69,3%	20 %	30 %
64,6%	64,9%	65,2%	65,5%	65,8%	66,2%	66,5%	66,8%	67,1%	67,4%	67,9%	67,9%	20 %	40 %
62,9%	63,2%	63,4%	63,7%	63,9%	64,2%	64,4%	64,7%	64,9%	65,2%	65,4%	65,4%	20 %	50 %
61,3%	61,5%	61,7%	61,9%	62,1%	62,3%	62,4%	62,6%	62,8%	63,0%	63,2%	63,2%	20 %	60 %
59,8%	60,0%	60,1%	60,2%	60,3%	60,5%	60,6%	60,7%	60,9%	61,0%	61,1%	61,1%	20 %	70 %
58,4%	58,5%	58,5%	58,6%	58,7%	58,8%	58,9%	59,0%	59,0%	59,1%	59,2%	59,2%	20 %	80 %
57,0%	57,0%	57,1%	57,1%	57,2%	57,2%	57,3%	57,3%	57,4%	57,4%	57,4%	57,4%	20 %	90 %
55,7%	55,7%	55,7%	55,7%	55,7%	55,7%	55,7%	55,7%	55,7%	55,7%	55,7%	55,7%	20 %	100 %

Tabelle 6.7: Berechnete Packungsdichten des 4-Stoffsystems
(Ausschnitt aus der Datentabelle, der Maximalwert ist markiert, Ellipse)

7 MODELLBILDUNG

7.1 Prognose der Scherbenrohdichte - Grundlagen für ein numerisches Modell

Das im Folgenden dargestellte Modell beschreibt die Zusammenhänge zwischen den Rohstoffeigenschaften, den verfahrenstechnischen Herstellbedingungen und der Scherbenrohdichte von Kalksandsteinmaterial. Für die in der Kalksandsteintechnologie verwendeten Rohstoffe und Herstellparameter kann auf der Basis des Modells innerhalb der jeweils praxisrelevanten Bandbreiten die gewünschte Scherbenrohdichte aus den Stoffkennwerten und den verfahrenstechnischen Herstellparametern prognostiziert werden.

Um ein möglichst vollständiges Modell zu erhalten, müssen sämtliche Einflussgrößen, deren Wirkungsrichtungen und Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Dazu ist im ersten Schritt eine Sichtung und Erläuterung aller Einflussgrößen erforderlich. Anschließend wird eine Beschränkung auf die relevanten Einflussgrößen vorgenommen. Bild 7.1 zeigt eine Übersicht über alle rohstoff- und verfahrenstechnisch bedingten Einflussgrößen und weist alle qualitätsrelevanten Eigenschaftswerte des Kalksandsteinmaterials aus. Auf der Basis der vorliegenden Untersuchungsergebnisse haben sich bezüglich der Zielgröße Scherbenrohdichte folgende Einflussgrößen als primär herausgestellt; diese sind in Bild 7.1 hervorgehoben.

- **Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen:**
 - Je breiter die Kornstufung ist, desto höher ist aufgrund des dadurch entsprechend reduzierten Porenraums die erreichbare Scherbenrohdichte.
 - Je höher die sich aus der mengenmäßigen Zusammensetzung der einzelnen Kornfraktion ergebende Packungsdichte ist, desto höher ist die Scherbenrohdichte.
- **Kornform der Gesteinskörnungen:**
 - Je höher die Sphärität der Gesteinskörnungen ist, desto höher ist tendenziell die erreichbare Scherbenrohdichte.
- **Reindichte der Gesteinskörnungen:**
 - Je höher die Reindichte der eingesetzten Gesteinskörnungen ist, desto höher ist die erreichbare Scherbenrohdichte.
- **Mischungszusammensetzung:**
 - Die Scherbenrohdichte wird maßgeblich durch die Mischungszusammensetzung beeinflusst.
 - Je nach Korngrößenverteilung der beteiligten Gesteinskörnungen und mengenmäßiger Zusammensetzung der Kalk-Sand-Rohmischung werden entsprechend unterschiedlich hohe Packungsdichten erreicht.
 - Das theoretische volumetrische Packungsdichtemaximum einer Mischung ergibt sich prinzipiell dadurch, dass die Hohlräume zwischen größeren Partikeln durch jeweils feine Partikel ausgefüllt werden. Dabei ist zu beachten, dass die füllenden Teilchen die Hohlräume auch erreichen können.
 - Im Fall einer Reduzierung dieser Menge an feineren Partikeln sind die Hohlräume zwischen den größeren Partikeln nicht vollständig ausgefüllt und in der Folge liegt eine vergleichsweise geringere Packungsdichte vor.

- Im Fall einer weiteren Anhebung der Menge an feineren Partikeln drängen diese die größeren Partikel auseinander und in der Folge liegt wiederum eine vergleichsweise geringere Packungsdichte vor.
- **Branntkalkgehalt in der Mischung:**
 - Branntkalke reduzieren die Viskosität von Kalk-Sand-Rohmischungen.
 - Branntkalke liefern entsprechend ihrer Dosis ihren Beitrag zur Hohlraumausfüllung im Grobkörnergerüst: Mit zunehmender Kalkmenge nimmt die erreichbare Scherbenrohdichte zu (Hohlräume werden zunehmend ausgefüllt), durchläuft ein Maximum (maximale Packungsdichte) und nimmt anschließend wieder ab (Auseinanderdrängungseffekt).
 - Wichtig ist neben der Menge das Volumen der Feinkornmatrix und das Wasser. Vgl. Punkt "Mischungszusammensetzung".
- **Pressdruck:**
 - Je höher der Pressdruck ist, desto kleiner wird der zwischen den Feststoffkomponenten entstehende Hohlraum und desto höher ist die erreichbare Scherbenrohdichte.
 - Ab einem materialspezifischen Grenzwert treten Kornzertrümmerungseffekte auf, die zu einer Verfeinerung der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen und zu einer Veränderung der Packungsdichte führen.
- **Pressfeuchte:**
 - Mit zunehmender Pressfeuchte nimmt die erreichbare Scherbenrohdichte aufgrund des Viskositätszuwachses der Feinkornmatrix zu, durchläuft ein Maximum und nimmt bei weiterer Steigerung infolge des Auseinanderdrängungseffektes wieder ab.
 - Für jede Kalk-Sand-Rohmischung existiert, je nach mengenmäßiger Zusammensetzung der Rezeptur, der Korngrößenverteilung der Feststoffkomponenten und der daraus resultierenden Packungsdichte, ein spezifisches Maximum für die Scherbenrohdichte in Abhängigkeit von der Pressfeuchte.
- **Art und Dosis des Fließmittels:**
 - Durch die Zugabe von Fließmitteln wird die Viskosität der Kalk-Sand-Rohmasse reduziert und die Scherbenrohdichte wird erhöht.
 - Der durch die Fließmittel erzielte Effekt beruht auf dem Aufbau der Molekülstruktur der Fließmittel, insbesondere durch den Effekt der sterischen Hinderung durch die Seitenketten bei Polycarboxylatethern.

Eine Steigerung der Packungsdichte von Kalk-Sand-Rohmassen kann grundsätzlich durch alle oben aufgezählten Maßnahmen erreicht werden. Ist die für eine Kalk-Sand-Rohmischung spezifische maximale Packungsdichte erreicht, kann diese nicht durch weitere Maßnahmen gesteigert werden. Alle Maßnahmen sind miteinander kombinierbar, addieren sich jedoch lediglich in Grenzen.

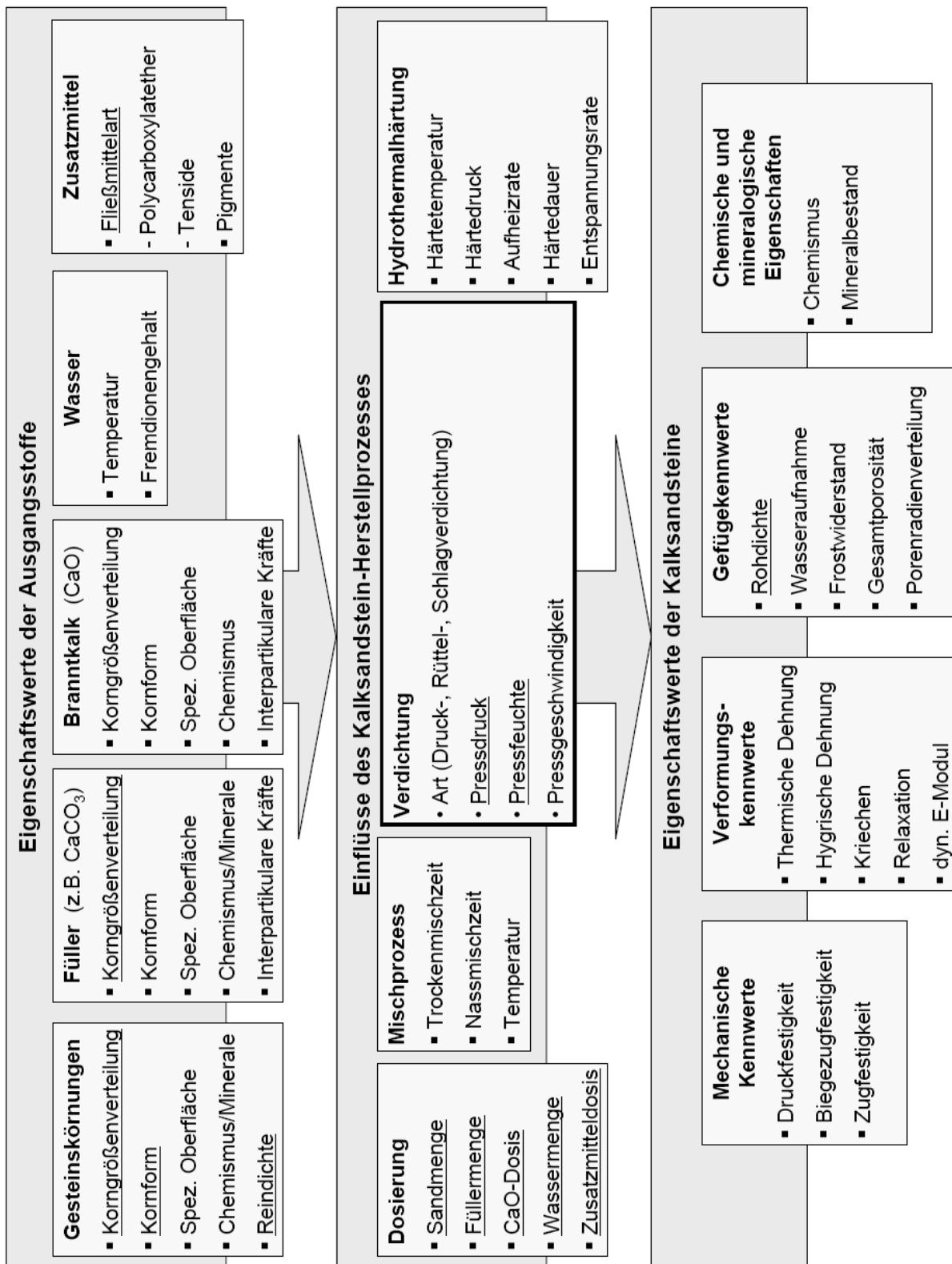


Bild 7.1: Einflussgrößen der Scherbenrohdichte. Die wichtigsten Einflussgrößen sind unterstrichen.

7.2 Einflussgrößen

Im Folgenden werden alle primären Einflussgrößen hinsichtlich ihrer qualitativen Wirkung auf die Scherbenrohdichte aufgeführt. Neben dem qualitativ dargestellten Funktionsverlauf für die jeweiligen Zusammenhänge werden für jede Einflussgröße die zugehörigen allgemeinen Gleichungen (Polynome) und der durch die Untersuchungen abgedeckte Gültigkeitsbereich angegeben, siehe Bild 7.2.

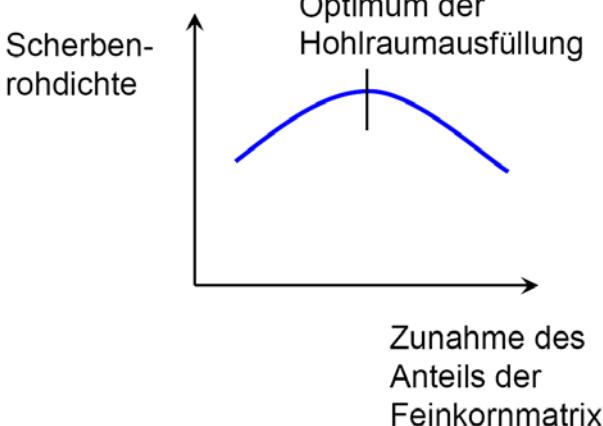
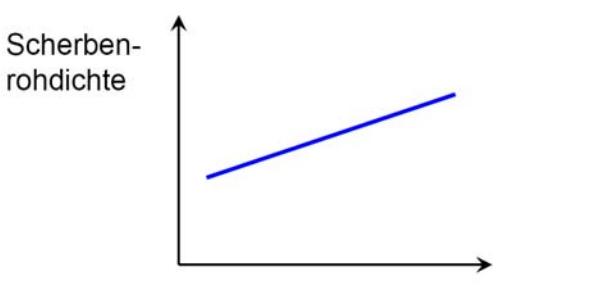
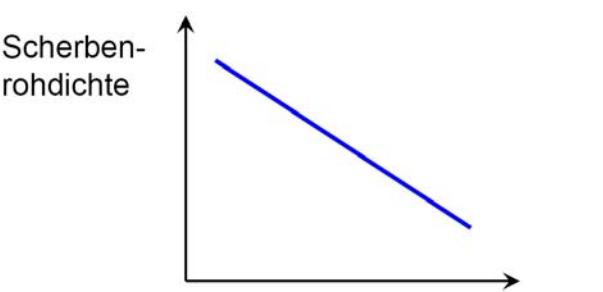
Einflussgröße	Zusammenhang (qualitativ)	Funktion (qualitativ)
1) Mischungs-zusammensetzung - Auffüllung des Hohlraums einer groben Körnung durch eine Feinkornkomponente und Auseinanderdrängung des Hohlraums einer groben Körnung durch eine Feinkornkomponente [Vol.-%] Ansatz: quadratisch	 <p>Scherbenrohdichte</p> <p>Optimum der Hohlraumausfüllung</p> <p>Zunahme des Anteils der Feinkornmatrix</p>	<p>Gleichung 7.1</p> $\rho_{Sch} = a_1 \times F_p^2 + b_1 \times F_p + c_1$ <p><u>Gültigkeitsbereich:</u></p> <p>Korndurchmesser Feinkornmatrix $d = 0$ bis $0,112$ mm</p> <p>Korndurchmesser Grobkörnerüst $d = 0,112$ bis 8 mm</p>
2) Reindichte der Gesteinskörnungen ρ_G [kg/dm³] Ansatz: linear	 <p>Scherbenrohdichte</p> <p>Reindichte der Gesteinskörnungen</p>	<p>Gleichung 7.2</p> $\rho_{Sch} = a_2 \times \rho_{Rein} + b_2$ <p><u>Gültigkeitsbereich:</u></p> <p>Reindichte $\rho_{Rein} = 1,0$ bis $3,2$ kg/dm³</p>
3) Kornform SPHT [-] Ansatz: linear	 <p>Scherbenrohdichte</p> <p>Sphärität SPHT</p>	<p>Gleichung 7.3</p> $\rho_{Sch} = a_3 \times SPHT + b_3$ <p><u>Gültigkeitsbereich:</u></p> <p>Sphärität $SPHT = 1,06$ bis $1,22$</p>

Bild 7.2: Modellierung der Einflussgrößen der Scherbenrohdichte - qualitative Wirkung

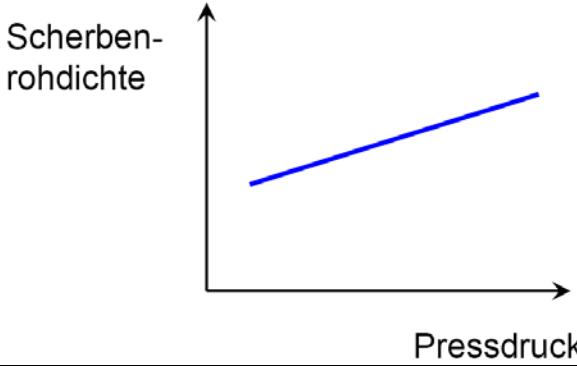
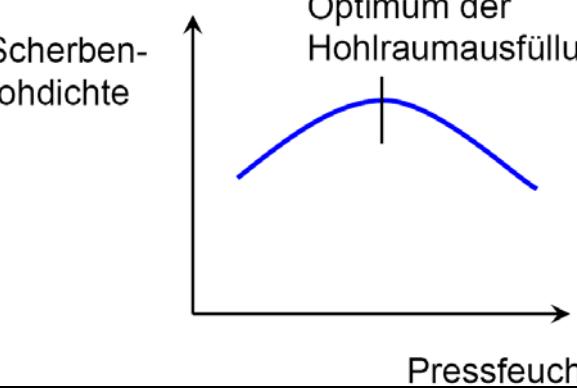
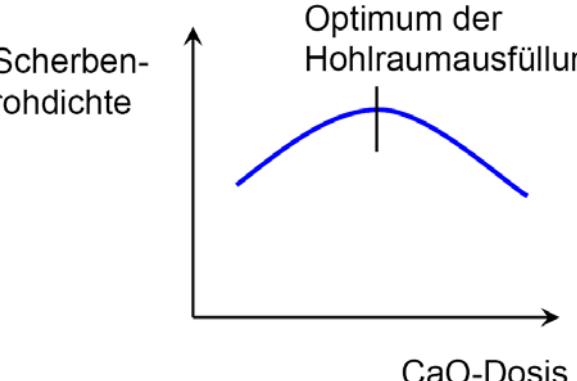
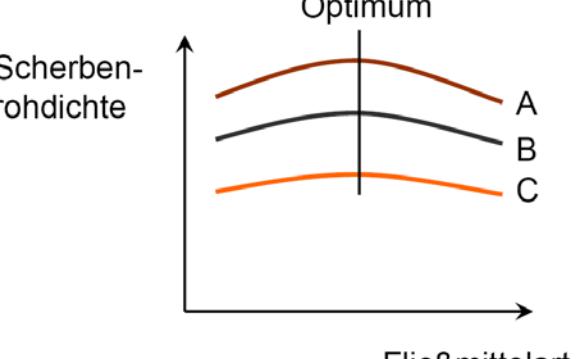
Einflussgröße	Zusammenhang (qualitativ)	Funktion (qualitativ)
4) Pressdruck σ_p [N/mm ²] Ansatz: linear		Gleichung 7.4 $\rho_{Sch} = a_4 \times \sigma_p + b_4$ <u>Gültigkeitsbereich:</u> Pressdruck $\sigma_p = 8$ bis 32 N/mm ²
5) Pressfeuchte F_p [Vol.-%] Ansatz: quadratisch		Gleichung 7.7 $\rho_{Sch} = a_5 \times F_p^2 + b_5 \times F_p + c_5$ <u>Gültigkeitsbereich:</u> Pressfeuchte $F_p = 4$ bis 8 M.-%
6) CaO-Dosis [Vol.-%] Ansatz: quadratisch		Gleichung 7.6 $\rho_{Sch} = a_6 \times CaO + b_6$ <u>Gültigkeitsbereich:</u> CaO-Dosis $CaO = 5$ bis 13 M.-%
7) Fließmitteldosis [Vol.-%] Fließmittelart: A und B: Polycarboxylatether C. Tensid Ansatz: quadratisch		Gleichung 7.7 $\rho_{Sch} = a_7 \times F_p^2 + b_7 \times F_p + c_7$ <u>Gültigkeitsbereich:</u> $m_{FM} = 0$ bis 5 M.-% des Anmachwassers

Bild 7.2 (Fortsetzung)

Anmerkung: Die Angaben in M.-% bezieht sich auf die Rezepturansätze.

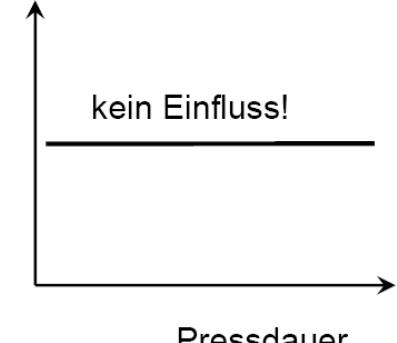
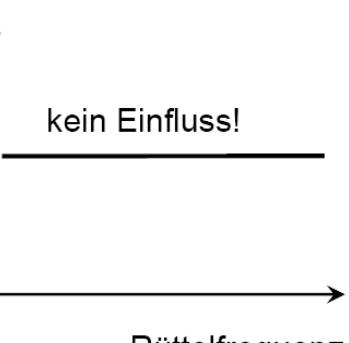
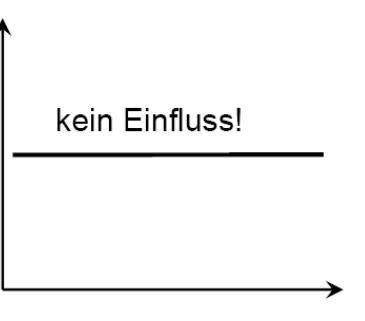
Einflussgröße	Zusammenhang (qualitativ)	Funktion (qualitativ)
8) Pressdauer t_p [s]	 <p>Scherbenrohdichte</p> <p>kein Einfluss!</p> <p>Pressdauer</p>	<p>Gleichung 7.8</p> <p>$\rho_{sch} = const.$</p> <p><u>Gültigkeitsbereich:</u> Pressdauer $t_p = 3$ bis 60 s</p>
9) Rüttelfrequenz ω [Hz]	 <p>Scherbenrohdichte</p> <p>kein Einfluss!</p> <p>Rüttelfrequenz</p>	<p>Gleichung 7.9</p> <p>$\rho_{sch} = const.$</p> <p><u>Gültigkeitsbereich:</u> Rüttelfrequenz $\omega = 40$ bis 60 Hz</p>
10) Rüttelamplitude A [m]	 <p>Scherbenrohdichte</p> <p>kein Einfluss!</p> <p>Rüttelamplitude</p>	<p>Gleichung 7.10</p> <p>$\rho_{sch} = const.$</p> <p><u>Gültigkeitsbereich:</u> Rüttelamplitude $A = 1$ bis 3 mm</p>

Bild 7.2: (Fortsetzung)

Die nachfolgenden Bilder 7.2-11 bis 7.2-13 zeigen exemplarisch Modellausschnitte zu den für die betriebliche Produktionspraxis wichtigen Kombinationen der Herstellparameter CaO-Dosis, Pressdruck, Pressfeuchte, Fließmitteldosis und der Zielgröße Scherbenrohdichte:

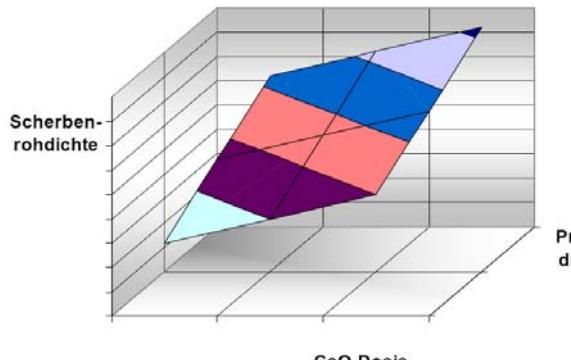
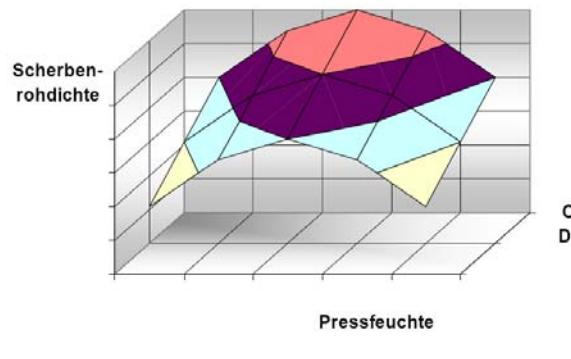
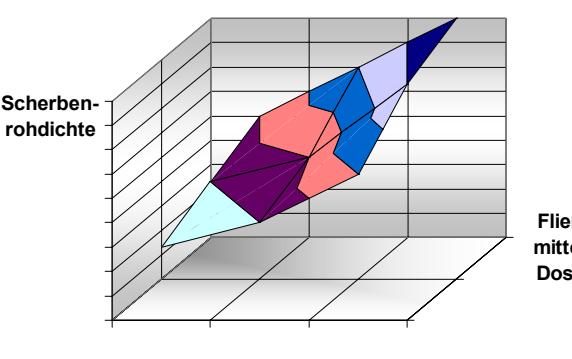
Einflussgröße	Zusammenhang (qualitativ)	Funktion (qualitativ)
11) Beispiel-Kombination CaO-Dosis (ansteigender Ast vor Erreichen des Optimums) und Pressdruck σ_p [N/mm ²] Ansatz: linear-linear		Gleichung 7.11 $\rho_{Sch} = a_{11} \times \sigma_p + b_{11} \times CaO_p + c_{11}$ <u>Gültigkeitsbereich:</u> CaO-Dosis CaO = 5 bis 9 M.-% Pressdruck $\sigma_p = 8$ bis 32 N/mm ²
12) Beispiel-Kombination CaO-Dosis (ansteigender Ast vor Erreichen des Optimums) und Pressfeuchte F_p [M.-%] Ansatz: linear-quadratisch		Gleichung 7.12 $\rho_{Sch} = a_{12} \times F_p^2 + b_{12} \times CaO_p + c_{12}$ <u>Gültigkeitsbereich:</u> CaO-Dosis CaO = 5 bis 9 M.-% Pressfeuchte $F_p = 4$ bis 8 M.-%
13) Beispiel-Kombination Fließmittel-Dosis und Pressdruck σ_p [N/mm ²] Ansatz: linear-linear		Gleichung 7.13 $\rho_{Sch} = a_{13} \times FM + b_{13} \times \sigma_p + c_{13}$ <u>Gültigkeitsbereich:</u> Fließmittel-Dosis $FM = 0$ bis 2 M.-% Pressdruck $\sigma_p = 8$ bis 32 N/mm ²

Bild 7.2 (Fortsetzung)

Anmerkung: Die Angabe in M.-% bezieht sich auf die Rezepturansätze.

Die nachfolgenden Diagramme (Bild 7.3-1 bis 7.3-3) zeigen die Ergebnisse zur Scherbenrohdichte der Kalksandsteine, die unter Verwendung der drei Sande "Fein-, Mittel- und Grobsand" hergestellt wurden. Es ist deutlich erkennbar, dass die Scherbenrohdichte mit zunehmender CaO-Dosis und zunehmenden Pressdruck im praxisrelevanten Gültigkeitsbereich dieser Parameter ansteigt.

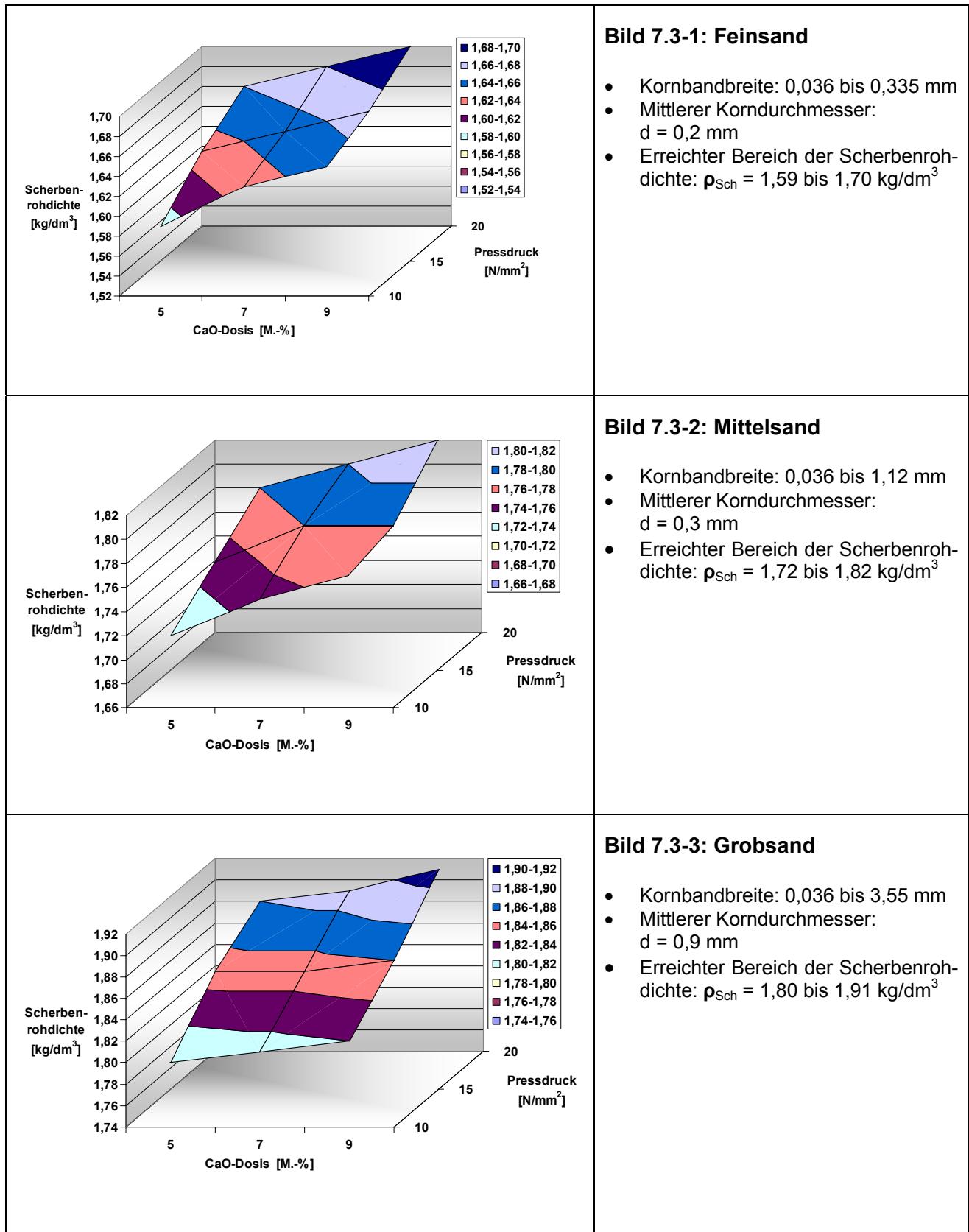


Bild 7.3: Einfluss des CaO-Gehaltes und des Pressdrucks auf die Scherbenrohdichte
Anmerkung: Die Angabe in M.-% bezieht sich auf die Rezepturansätze.

7.3 Stoffraumrechnung für Kalk-Sand-Rohmassen:

Für die Prognose der Scherbenrohdichte muss eine Beziehung gefunden werden, die alle primären Einflussgrößen berücksichtigt. Grundlage für die Ableitung dieser Beziehung für Kalk-Sand-Rohmassen ist die allgemein bekannte Stoffraumrechnung aus der Betontechnologie, die dem Mischungsentwurf dient [174, 175]. Die Errechnung der Mischungsbestandteile von Kalk-Sand-Rohmassen erfolgt analog der Stoffraumrechnung in der Betontechnologie. Es ergibt sich folgende allgemeine Darstellung:

$$V_{\text{ges}} = \frac{m_{\text{GKi}}}{\rho_{\text{GKi}}} + \frac{m_{\text{Ki}}}{\rho_{\text{Ki}}} + \frac{m_w}{\rho_w} + P \quad (\text{Gleichung 7.14})$$

mit:

i:	Zählindex ($i = 1$ bis n)	
V_{ges} :	Volumen der Kalk-Sand-Rohmischung	[dm ³]
m_{GKi} :	Masse der jeweiligen Gesteinskörnung GK	[kg]
ρ_{GKi} :	Reindichte der jeweiligen Gesteinskörnung	[kg/dm ³]
m_{Ki} :	Masse des Calciumhydroxids Ca(OH) ₂	[kg]
ρ_{Ki} :	Reindichte des Calciumhydroxids Ca(OH) ₂	[kg/dm ³]
m_w :	Masse des Wassers	[kg]
ρ_w :	Dichte des Wassers ($\rho_w = 1,00$ kg/dm ³)	[kg/dm ³]
P:	Luftgehalt der verdichteten Kalk-Sand-Rohmischung	[dm ³]

Die Eigenporosität der Feststoffe (Quarzsande, Basalt, Grauwacke, Branntkalk, Kalksteinmehl) ist mit Werten von $P = 0,014$ bis $0,019$ Vol.-% (vgl. Tab. 4.1) relativ gering. Lediglich beim Recyclingsplitt ist die Eigenporosität mit einem Wert von $0,22$ Vol.-% erheblich höher. Insgesamt wird die Eigenporosität nur einen geringen Einfluss auf die Packungsdichte haben. Sie wird deshalb bei den nachfolgenden Berechnungen vernachlässigt.

Die Scherbenrohdichte der Kalk-Sand-Rohmischung ρ_{KSR} ergibt sich zu:

$$\rho_{\text{KSR}} = m_{\text{KSR}} / V_{\text{ges}} \quad (\text{Gleichung 7.15})$$

Die Gesamtmasse der Kalk-Sand-Rohmischung m_{KSR} ergibt sich zu:

$$m_{\text{KSR}} = m_{\text{GKi}} + m_{\text{Ki}} + m_w \quad (\text{Gleichung 7.16})$$

Unter der Voraussetzung einer vollständigen Verdichtung ergibt sich die Scherbenrohdichte der Kalk-Sand-Rohmischung ρ_{KSR} damit zu:

$$\rho_{\text{KSR}} = \frac{m_{\text{GKi}} + m_{\text{Ki}} + m_w}{\frac{m_{\text{GKi}}}{\rho_{\text{GKi}}} + \frac{m_{\text{Ki}}}{\rho_{\text{Ki}}} + \frac{m_w}{\rho_w} + P} \quad (\text{Gleichung 7.17})$$

Für den theoretischen Fall einer vollständigen Verdichtung beträgt der Luftgehalt $P = 0$ Vol.-%, d. h. die Scherbenrohdichte wird maximal. Nun ist jedoch bei Kalksandsteinen im Gegensatz zum Frischbeton, und insbesondere beim UHPC mit seinem äußerst geringem Porenvolumen, eine Mindestporosität erforderlich. Dieser Porenraum wird bei der Hydrothermalhärtung für den Transport des gespannten heißen Wasserdampfes ins Innere der Kalksandstein-Rohlinge benötigt und sollte $V_{\text{poro-min}} = 10$ Vol.-% [74] nicht unterschreiten, weil sonst sowohl die Reaktions- als auch die Kristallisationsbedingungen der sich bildenden Calciumsilikathhydrate deutlich verschlechtert würden.

Zahlenbeispiel zur Stoffraumrechnung:

Das nachfolgende Zahlenbeispiel enthält typische Zahlenwerte aus der Kalksandsteinproduktion für den exemplarischen Fall, dass drei Gesteinszuschläge (Quarzsand, Kalkstein und Basalt) und zwei Kalke verwendet werden. Alle 5 Feststoffe (Quarzsand 0/1 mm, Grauwackesplitt 0/2 mm, Basalt 2/5 mm und zwei Kalke (CI 80 und CL 90) haben unterschiedlich hohe Reindichten. Die Gleichung für diese Stoffkombination lautet:

$$V_{\text{ges}} = \frac{m_{\text{GK1}}}{\rho_{\text{GK1}}} + \frac{m_{\text{GK2}}}{\rho_{\text{GK2}}} + \frac{m_{\text{GK3}}}{\rho_{\text{GK3}}} + \frac{m_{\text{K1}}}{\rho_{\text{K1}}} + \frac{m_{\text{K2}}}{\rho_{\text{K2}}} + \frac{m_{\text{W}}}{\rho_{\text{W}}} + P \quad (\text{Gleichung 7.18})$$

Mit den eingesetzten Zahlenwerten ergibt sich exemplarisch für ein Kalk-Sand-Rohmischungs-Volumen von $V = 1000 \text{ dm}^3$ folgende Bestimmungsgleichung für eine Kalk-Sand-Rohmischung mit einer berechneten maximalen Packungsdichte von $\Phi = 0,79 \text{ Vol.-\%}$:

$$1000 = \frac{1200}{2,65} + \frac{390}{2,72} + \frac{400}{3,05} + \frac{80}{2,27} + \frac{60}{2,19} + \frac{110}{1,00} + 100 \quad [\text{dm}^3] \quad (\text{Gleichung 7.19})$$

Quarz-	Grau-	Basalt-	Kalk 1	Kalk 2	Wasser	Luft
sand	wacke	spaltt	CL 80	CL 90		
0/1 mm	0/2 mm	2/5 mm				

Allgemeines numerisches Gesamtmodell:

Das Prognosemodell für die Scherbenrohdichte des Kalksandsteinscherbens basiert auf der allgemeinen Stoffraumrechnung für Beton und ist um die in der Kalksandsteintechnologie relevanten Haupteinflussgrößen anzupassen. Dies sind die Mengenanteile der Gesteinskörnungen und des Kalkes, deren jeweilige Eigenrohdichte, die Kornform, den Pressdruck und die zugegebene Fließmittelmenge. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Kornform der Feststoffe, des Pressdrucks, der Pressfeuchte sowie der Fließmittelart und -menge (hier: PCE) ergibt sich folgende allgemeine Gleichung für die Bestimmung der Scherbenrohdichte:

$$\rho_{\text{Scherben}} = f(m_i, V_i, SPHT_i, \rho_i, \sigma_i, Fp_i, FM_i) \quad (\text{Gleichung 7.20})$$

mit:

i:	Zählindex ($i = 1 \text{ bis } n$)	
ρ_{Scherben} :	Scherbenrohdichte des Kalksandsteinmaterials	$[\text{kg}/\text{dm}^3]$
m_i :	Masse der jeweils eingesetzten Feststoffe	$[\text{kg}]$
V_i :	Volumen der jeweiligen Feststoffe	$[\text{dm}^3]$
SPHT:	Sphärizität	$[-]$
ρ_i :	Reindichte der jeweiligen Feststoffe	$[\text{kg}/\text{dm}^3]$
ρ_0 :	Bezugsdichte ($\rho_0 = 1,00 \text{ kg}/\text{dm}^3$)	$[\text{kg}/\text{dm}^3]$
σ_p :	Pressdruck	$[\text{N}/\text{mm}^2]$
F_p :	Pressfeuchte (bezogen auf die Masse aller Trockenstoffe)	$[\text{M.-\%}]$
FM	Fließmitteldosis (bezogen auf die Pressfeuchte)	$[\text{M.-\%}]$

Mit den im Rahmen der hier durchgeföhrten Untersuchungen liegt keine statistisch ausreichende Anzahl an Messwerten für die Aufstellung ein allgemeingültigen Gleichungssystems vor. Eine praxisnahe Prognose der Scherbenrohdichte kann jedoch trotzdem auf der Basis einer Vereinfachung (ingenieurmäßiges Ersatzmodell) erfolgen, die ausschließlich die primären Einflussgrößen berücksichtigt.

7.4 Vereinfachtes Praxismodell auf der Basis des Herstellparameters

In der industriellen Produktionspraxis ist es erforderlich, über möglichst leicht zu bestimmende und zu kontrollierende Produktionsparameter zu verfügen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Abschätzung der Zielgröße "Scherbenrohdichte" bereits allein auf der Basis der volumetrischen Zusammensetzung der Rezeptur möglich ist. Bei dieser Vorgehensweise müssen die anderen primären Einflussgrößen (Kalkdosis (CaO), Pressdruck und Pressfeuchte, Fließmittel) konstant gehalten werden.

Berücksichtigung des Kalkes bei der Packungsdichteberechnung im Ingenieurmodell:

Die Kalkdosis kann bei der Packungsdichteberechnung vereinfachend als Konstante angenommen werden. Das nachfolgende Bild 7.4a und 7.4b zeigen die hohe Übereinstimmung der Ergebnisse aus der Packungsdichteberechnung mit und ohne Kalk. Die Bestimmtheitsmaße liegen in allen Fällen oberhalb von $R^2 = 0,99$. Erkennbar ist, dass die Kalkmenge in der Rohmischung die Packungsdichte in allen betrachteten Fällen ausschließlich um eine additive, fast gleich hohe Konstante verändert. Folglich ist die exakte Einbeziehung des Kalkes in die Betrachtung der Zusammenhänge zwischen der Packungsdichte, den Herstellparametern und den erreichten Scherbenrohdichten nicht zwangsläufig erforderlich, so dass im Rahmen von Packungsdichteberechnungen von KS-Rohmassen der Einfachheit halber auf die Messung der Korngrößenverteilung von Kalken verzichtet wird.

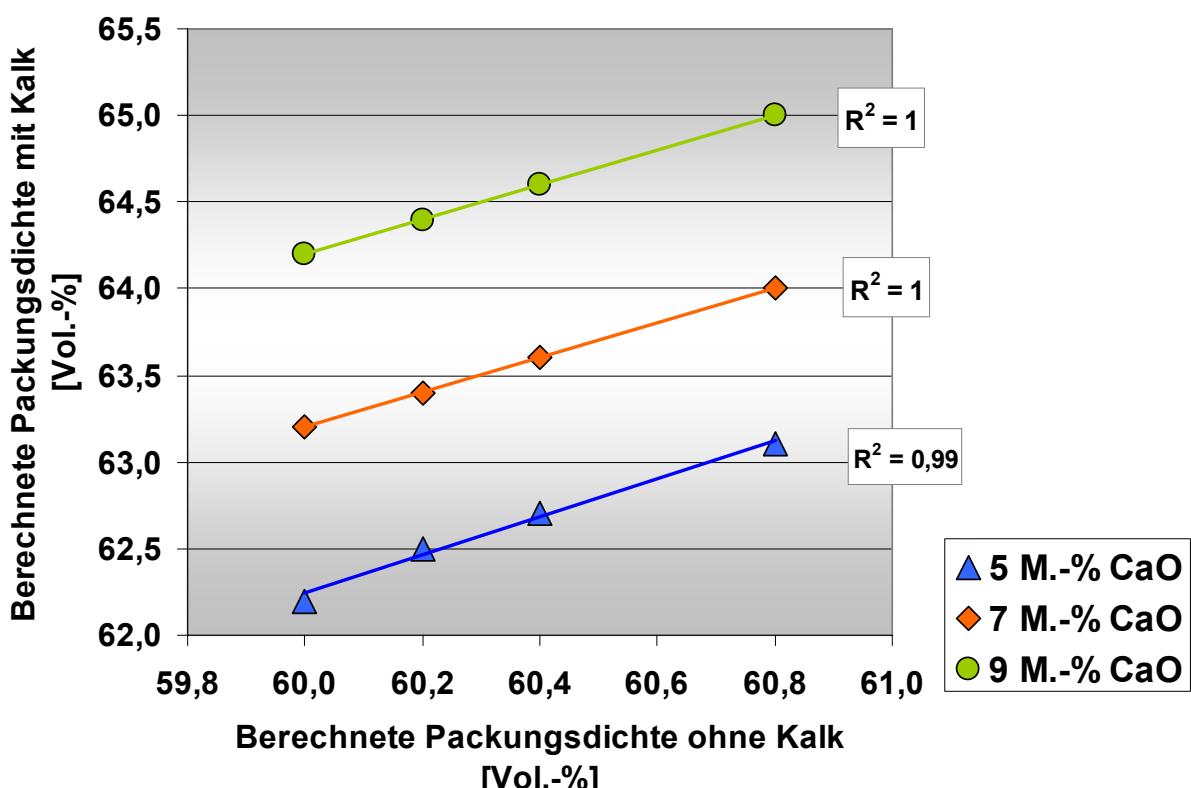


Bild 7.4a: Vergleich der Ergebnisse aus der Packungsdichteberechnung mit und ohne Kalk und Zuwachs der Packungsdichten

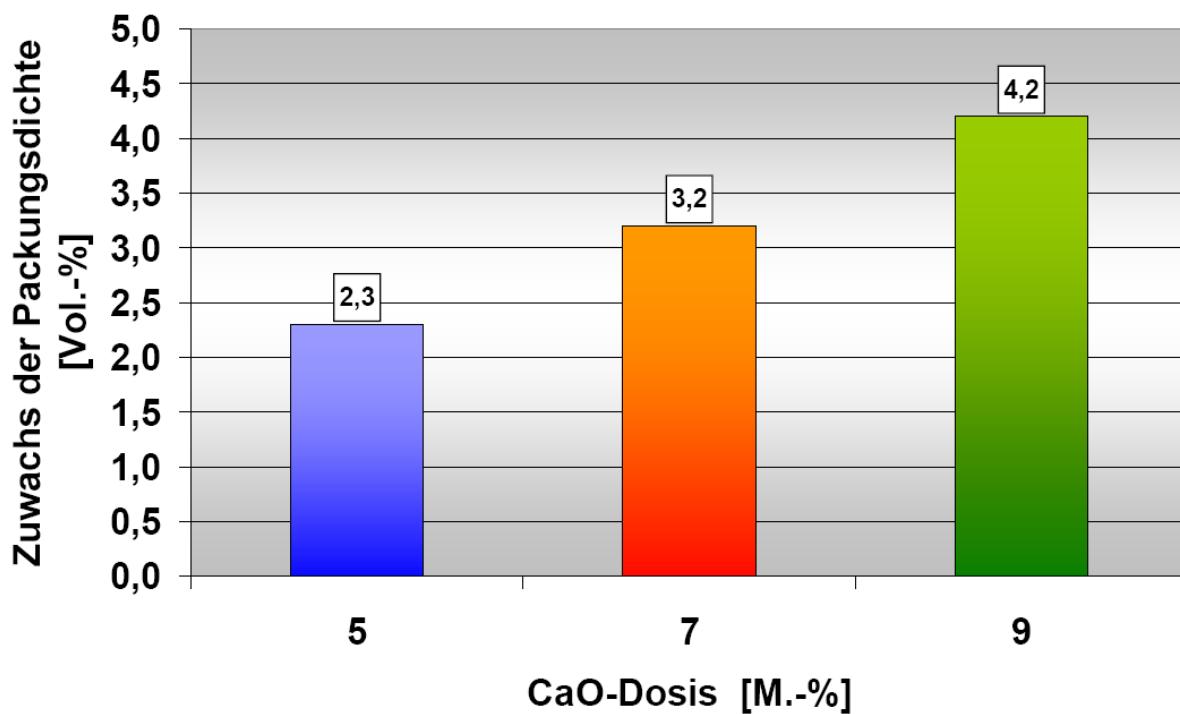


Bild 7.4b: Vergleich der Ergebnisse aus der Packungsdichteberechnung mit und ohne Kalk und Zuwachs der Packungsdichten - Beispiel zu den Daten aus dem Musterwerk 3

Festlegung der Werte für den Packungsdichtezuwachs durch den Branntkalk:

Bei der Kalksandsteinproduktion liegt die CaO-Dosis fertigungstechnisch bedingt stets innerhalb einer Bandbreite von 5 M.-% bis maximal 9 M.-%. Die Korngrößenverteilung von handelsüblichen Branntkalken ist nahezu gleich und die mittlere Korngröße ist im Vergleich zu denen der Gesteinskörnungen sehr gering ($\bar{\varnothing}_{\text{Kalk}} \approx 0,05 \text{ mm}$ zu $\bar{\varnothing}_{\text{Gest.}} \approx 2 \text{ mm}$). Deshalb zeigt sich der Zuwachs der Packungsdichte durch die Zugabe des Branntkalkes zu den Gesteinskörnungen als nahezu rezepturunabhängig und im betrachteten Dosisbereich steigt linear an, siehe Bild 7.4. Dies ist gerade der ansteigende Abschnitt der quadratischen Funktion, mit der die Hohlraumauffüllung des Grobkorngerüstes beschrieben wird (Gleichung 7.7). Der Packungsdichtezuwachs durch den Branntkalk wird nachfolgend zur Vereinfachung als konstant eingesetzt. Der Zuwachs steigt innerhalb des praxisrelevanten Dosisbereichs mit zunehmender CaO-Dosis an.

Tabelle 7.1 enthält die für die weiteren Betrachtungen gewählten empirisch festgelegten Werte für den Packungsdichtezuwachs (Mittelwerte):

CaO-Dosis	Empirischer mittlerer Packungsdichtezuwachs
M.-%	Vol.-%
5	2,0
7	3,0
9	4,0

Tabelle 7.1: Packungsdichtezuwachs durch die Erhöhung der Branntkalkmenge

Abschätzung der Scherbenrohdichte aus der Rezeptur:

Die Vorgehensweise zur vereinfachten Abschätzung der Scherbenrohdichte aus dem Mengenverhältnis der Gesteinskörnungen wird in Folgenden anhand eines Beispiels erläutert.

Schritt 1 - Berechnung der Packungsdichte:

Die Berechnung der Packungsdichte erfolgt gemäß der Beschreibung in Abschnitt 2.2.8. Bild 7.5 zeigt das Beispiel einer Packungsdichteberechnung für die Kombination eines Feinsandes und eines Grobsandes.

Packungsdichte Stoff 1:	$\Phi = 58,91 \text{ Vol.-%}$
Muster-Feinsand	100%

Packungsdichte Stoff 2:	$\Phi = 59,46 \text{ Vol.-%}$
Muster-Grobsand	100%

Maximum:	$\Phi = 66,19 \text{ Vol.-%}$
Muster-Feinsand	30%
Muster-Grobsand	70%

Minimum:	$\Phi = 58,91 \text{ Vol.-%}$
Muster-Feinsand	100%
Muster-Grobsand	0%

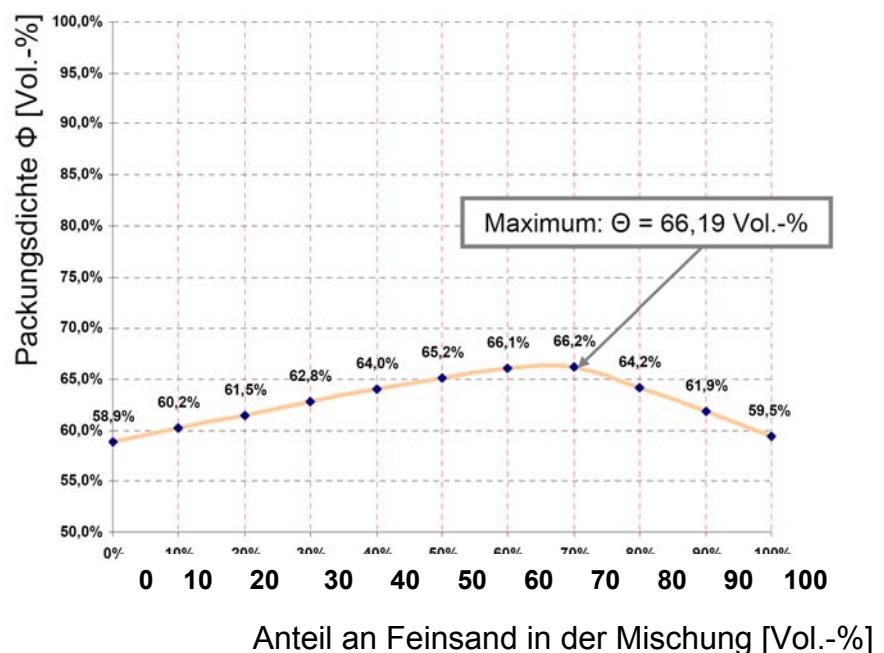


Bild 7.5: Berechnung der Packungsdichte-Kombination Feinsand mit Grobsand - Beispiel

Schritt 2 - Kalibrierfunktion

Eine direkte Berechnung der Scherbenrohdichte allein aus der Packungsdichtekalkulation ist noch nicht möglich, weil die beim Verdichtungsvorgang relevanten weiteren Größen (Pressdruck, Pressfeuchte, Fließmittelart und -dosis sowie der Matrixgehalt und deren Viskosität) noch nicht berücksichtigt wurden. Eine praxisnahe Abschätzung der Scherbenrohdichte ist unter Ansatz einer Kalibrierfunktion (hier: Geradengleichungen) jedoch sehr gut möglich. Die Packungsdichten der Kombination aus den Gesteinskörnungen werden rechnerisch bestimmt und die jeweils zugehörigen Scherbenrohdichten wurden durch die Herstellung von Prüfkörperserien und deren Untersuchung experimentell ermittelt.

Wie die Untersuchungsergebnisse zur Packungsdichteberechnung in allen Fällen zeigen, besteht zwischen der berechneten Packungsdichte und der an Kalksandsteinen gemessenen Scherbenrohdichte ein starker Zusammenhang. In allen untersuchten Fällen lag das Bestimmtheitsmaß bei $R^2 > 0,95$ (vgl. Abschnitt 6.3.4). Somit kann bei Vorliegen der berechneten Packungsdichte und dem zugehörigen Herstellparametersatz (Rezeptur, CaO-Dosis, Pressfeuchte und Pressdruck) mit recht hoher Sicherheit auf die zu erwartete Scherbenrohdichte geschlossen werden. Das nachfolgende Bild 7.6 zeigt diesen Zusammenhang qualitativ.

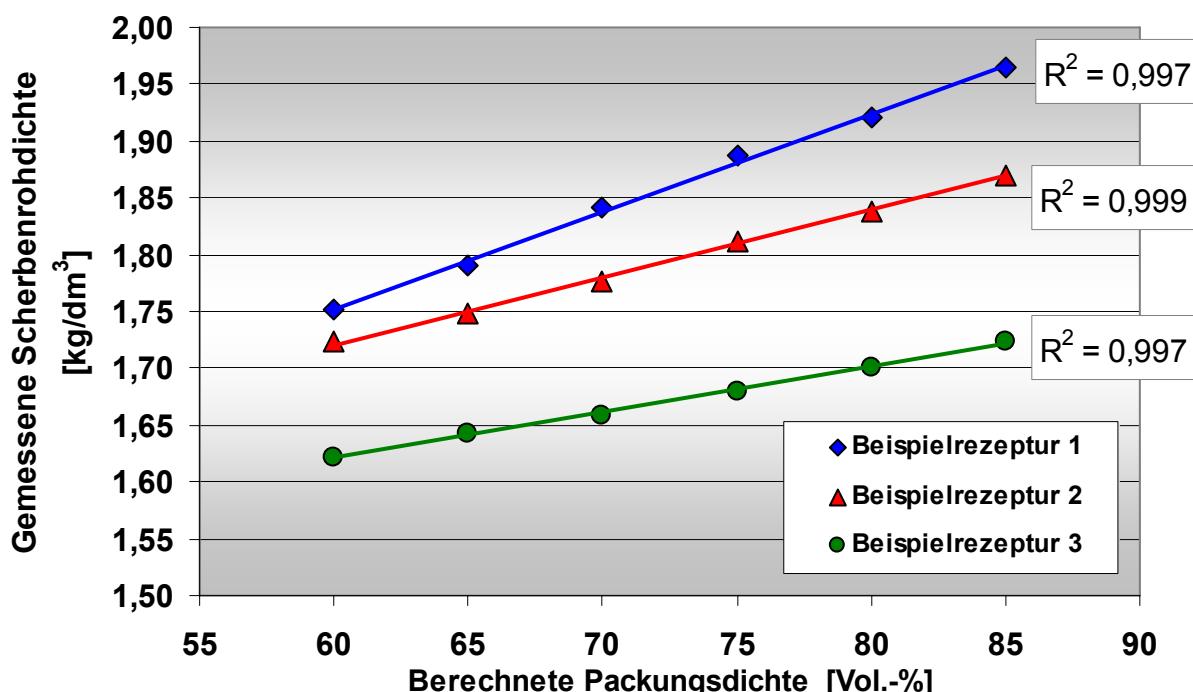


Bild 7.6: Zusammenhang zwischen der berechneten Packungsdichte und der experimentell gemessenen Scherbenrohdichte von Kalksandsteinen

Das nachfolgende Bild 7.7 zeigt diesen Zusammenhang anhand eines Beispiels mit den Mustersanden aus Bild 7.5. Es ergibt sich eine Kalibrierfunktion, mit der die Scherbenrohdichte direkt aus der berechneten Packungsdichte abgeleitet werden kann. Diese Vorgehensweise setzt zwar eine aufwändige Herstellung von mehreren Prüfkörperserien voraus, was in der betrieblichen Produktionspraxis durchaus möglich ist. Diese Vorgehensweise wurde durch Praxisversuche in mehreren Kalksandsteinwerken bestätigt.

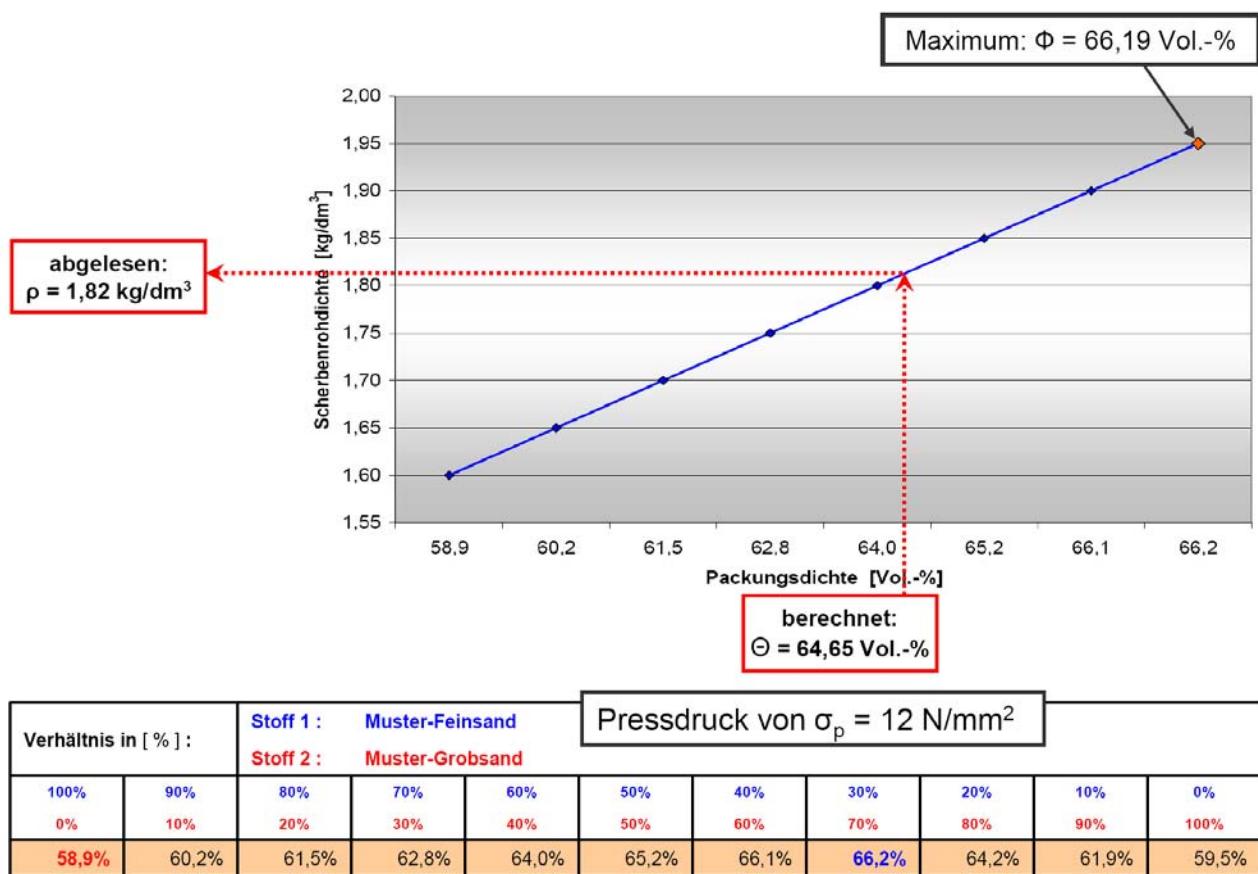


Bild 7.7: Zusammenhang zwischen der Packungsdichte und der Scherbenrohdichte - Kalibriergerade

Umsetzung der Erkenntnisse in den Produktionsstätten:

Im Folgenden werden zwei erläuternde Beispiele für die Umsetzung des vereinfachten Praxismodells in die betriebliche Produktionspraxis vorgestellt, siehe Bilder 7.8 bis 7.11.

Berechnungsbeispiel 1:

Das erste Beispiel ist ein praxisnahes Anwendungsbeispiel und beschreibt eine Kombination aus den Gesteinskörnungen "Feinsand G12"; "Mittelsand S40T" und "Grauwackefüller".

Sandorte / Mischung		Feinsand G12		Mittelsand S 40 T		Grauwacke Füller	
Schüttdichte, geschüttet	kg/dm ³	1,46		1,56		0,94	
Schüttdichte, gerüttelt	kg/dm ³	1,59		1,66		1,23	
Schüttdichtedifferenz	kg/dm ³	0,13		0,10		0,29	
Spezifische Oberfläche	cm ² /g	141		42		3425	
Abschlämmbares	Vol.-%	0		0			
Huminstoffe		farblos		farblos		farblos	
Siebanalyse	X-Daten	Rückstand	Summe D	Rückstand	Summe D	Rückstand	Summe D
< 0,036 mm	0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,4	0,0
> 0,036 mm	0,036	0,0	0,0	0,0	0,0	48,8	15,4
> 0,063 mm	0,063	0,2	0,0	0,0	0,0	31,0	64,2
> 0,112 mm	0,112	15,2	0,2	0,1	0,0	3,7	95,2
> 0,2 mm	0,2	80,6	15,4	0,3	0,1	0,5	98,9
> 0,355 mm	0,355	3,8	96,0	19,1	0,4	0,1	99,4
> 0,63 mm	0,63	0,2	99,8	78,9	19,5	0,5	99,5
> 1,12 mm	1,12	0,0	100,0	1,6	98,4	0,0	100,0
> 2 mm	2	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
> 3,55 mm	3,55	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
> 6,3 mm	6,3	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
Summe		100,0		100,0		100,0	

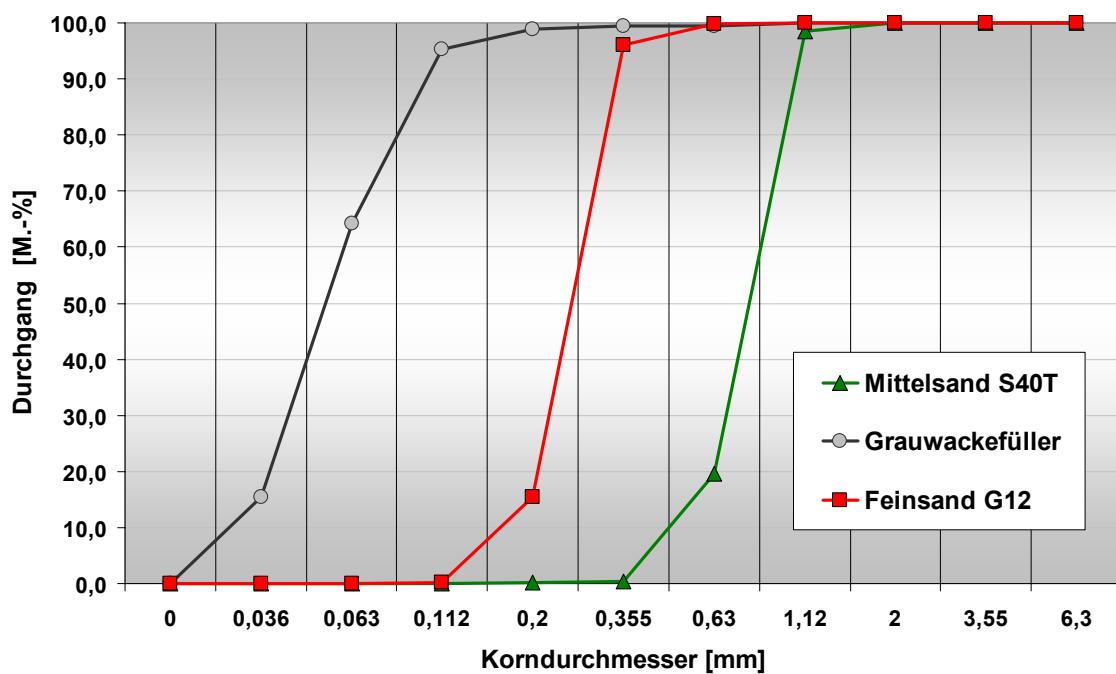
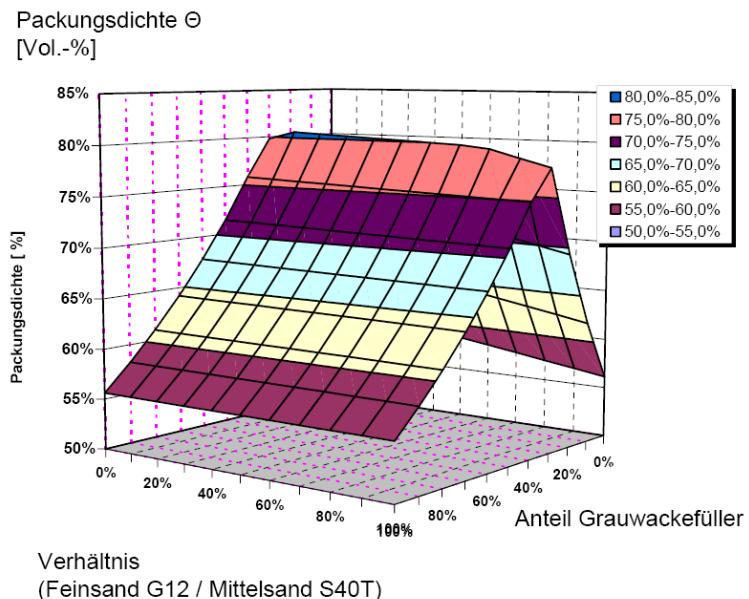


Bild 7.8: Technische Kennwerte der drei Mustersande und Korngrößenverteilungen oben: Physikalische Kennwerte der 3 Sande unten: Korngrößenverteilungen der 3 Sande

Packungsdichte Stoff 1:	56,13%
Feinsand G12	100%
Packungsdichte Stoff 2:	55,84%
Mittelsand S40T	100%
Packungsdichte Stoff 3:	55,62%
Grauwackefüller	100%
Maximum:	80,57%
Feinsand G12	7%
Mittelsand S40T	63%
Grauwackefüller	30%
Minimum:	55,62%
Feinsand G12	0%
Mittelsand S40T	0%
Grauwackefüller	100%



Verhältnis in [%] : Stoff 1 : Feinsand G12												Anteil Stoff 3 Grauwackefüller Auswahl [%]	
Stoff 2 : Mittelsand S40T													
100% 0%	90% 10%	80% 20%	70% 30%	60% 40%	50% 50%	40% 60%	30% 70%	20% 80%	10% 90%	0% 100%			
56,1%	56,6%	57,1%	57,5%	58,0%	58,4%	58,8%	59,0%	58,1%	56,9%	55,8%	0%	0%	
62,1%	62,6%	63,2%	63,7%	64,3%	64,8%	65,3%	65,5%	64,5%	63,3%	62,0%	10%	10%	
69,3%	70,0%	70,6%	71,3%	71,9%	72,6%	73,2%	73,7%	72,6%	71,2%	69,8%	20%	20%	
78,0%	78,8%	79,6%	79,8%	80,0%	80,1%	80,2%	80,3%	80,4%	80,6%	79,8%	30%	30%	
74,9%	75,0%	75,1%	75,2%	75,3%	75,4%	75,4%	75,5%	75,6%	75,7%	75,8%	40%	40%	
70,8%	70,9%	70,9%	71,0%	71,1%	71,1%	71,2%	71,3%	71,3%	71,4%	71,5%	50%	50%	
67,1%	67,2%	67,2%	67,3%	67,3%	67,4%	67,4%	67,5%	67,5%	67,6%	67,6%	60%	60%	
63,8%	63,9%	63,9%	63,9%	64,0%	64,0%	64,0%	64,1%	64,1%	64,1%	64,2%	70%	70%	
60,8%	60,9%	60,9%	60,9%	60,9%	60,9%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	80%	80%	
58,1%	58,1%	58,1%	58,1%	58,1%	58,2%	58,2%	58,2%	58,2%	58,2%	58,2%	90%	90%	
55,6%	55,6%	55,6%	55,6%	55,6%	55,6%	55,6%	55,6%	55,6%	55,6%	55,6%	100%		

relatives Maximum:
 $\Theta = 65,5 \text{ Vol.}-\%$

Maximalwert: $\Theta = 80,6 \text{ Vol.}-\%$

Bild 7.9: Ergebnisse der Packungsdichteberechnung

Die 3 Gesteinskörnungen weisen im Einzelnen folgende Packungsdichte auf:

- Grauwackefüller: $\Phi = 55,62 \text{ Vol.}-\%$
- Feinsand G12: $\Phi = 56,13 \text{ Vol.}-\%$
- Mittelsand S40T: $\Phi = 55,84 \text{ Vol.}-\%$

Die berechneten Extremwerte ergeben sich zu:

- Minimalwert: $\Phi = 55,62 \text{ Vol.}-\%$ (ausschließlich Grauwackefüller)
- Maximalwert: $\Phi = 80,57 \text{ Vol.}-\%$

Durch die Kombination dieser 3 Gesteinskörnungen ist also eine erhebliche Packungsdichtesteigerung von jeweils rd. $\Phi = 55 \text{ Vol.}-\%$ auf maximal $\Phi = 80,57 \text{ Vol.}-\%$ möglich. Das theoretische volumentrische Rezept mit der maximalen Packungsdichte lautet:

- Berechneter Volumenanteil Grauwackefüller: 30 Vol.-%
- Berechneter Volumenanteil Feinsand G12: 7 Vol.-%
- Berechneter Volumenanteil Mittelsand S40T: 63 Vol.-%

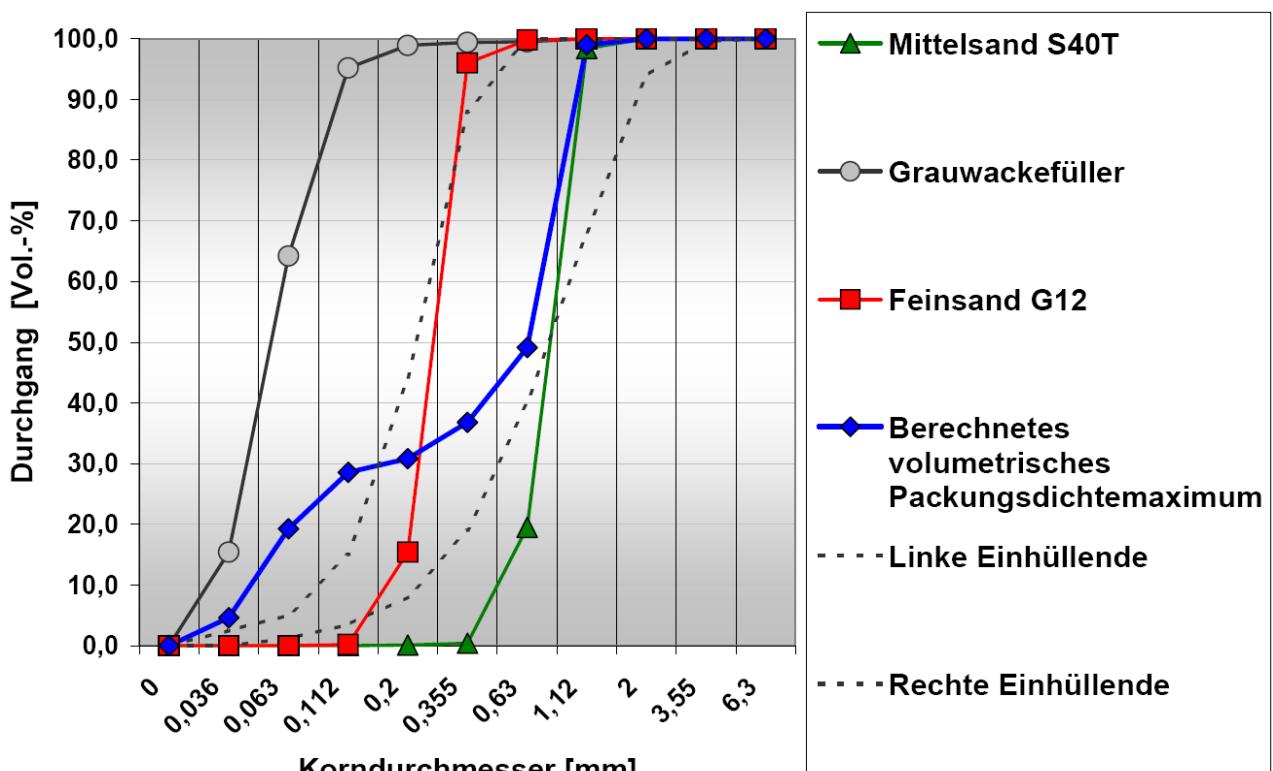


Bild 7.10: Korngrößenverteilungen der drei Gesteinskörnungen und des berechneten volumetrischen Packungsdichtemaximums mit $\Phi = 80,57$ Vol.-%

Eine Kalk-Sand-Rohmischung mit einem derartig hohen Anteil von $V = 30$ Vol.-% an Grauwackefüller ist in der betrieblichen Herstellungsspraxis nicht ohne produktionstechnische Schwierigkeiten (z. B. Auftreten von Agglomerationen, Einbußen bei der Steindruckfestigkeit) möglich. Erfahrungsgemäß sollte die Füllermenge höchstens bei z. B. 10 Vol.-% liegen. Geht man von dem genannten Grenzwert für den Grauwackefüller aus, kann man aus der zweiten Zeile der Berechnungstabelle zu Bild 7.8 in entnehmen, dass dann das Mengenverhältnis zwischen dem "Feinsand G12" und dem "Mittelsand S40T" etwa 30/70 dann betragen muss (siehe grüne Markierungen in der Tabelle). Hier liegt ein relatives Maximum vor. Für diesen Fall wird eine Packungsdichte von $\Phi = 65,5$ Vol.-% erreicht, siehe Bild 7.11. Daraus ergibt sich folgende volumetrische Rezeptur:

- Volumenanteil Grauwackefüller: $\Phi = 10$ Vol.-%
- Volumenanteil Feinsand G12: $\Phi = 27$ Vol.-%
- Volumenanteil Mittelsand S40T: $\Phi = 63$ Vol.-%

Bei der Berechnung der Massenanteile der Mischung muss noch die Eigenrohdichte der verschiedenen Gesteinskörnungen berücksichtigt werden. Für diese Beispiel gilt:

Eigenreindichten der berücksichtigten Gesteinskörnungen:

- Grauwackefüller: $\rho_{GW} = 2,70 \text{ cm}^3/\text{g}$
- Feinsand G12: $\rho_{Quarz} = 2,65 \text{ cm}^3/\text{g}$
- Mittelsand S40T: $\rho_{Quarz} = 2,65 \text{ cm}^3/\text{g}$

Gewählte volumetrische Rezeptur:

- Volumenanteil Grauwackefüller: $\Phi = 10$ Vol.-%
- Volumenanteil Feinsand G12: $\Phi = 27$ Vol.-%
- Volumenanteil Mittelsand S40T: $\Phi = 63$ Vol.-%

Rezeptur in Massenanteilen:

- Massenanteil Grauwackefüller: $V = 10 \text{ Vol.-%}$ mit $\rho = 2,70 \rightarrow m = 10,17 \text{ M.-\%}$
- Massenanteil Feinsand G12: $V = 27 \text{ Vol.-%}$ mit $\rho = 2,65 \rightarrow m = 26,95 \text{ M.-\%}$
- Massenanteil Mittelsand S40T: $V = 63 \text{ Vol.-%}$ mit $\rho = 2,65 \rightarrow m = 62,88 \text{ M.-\%}$
 $\Sigma = 100 \text{ Vol.-%}$ $\Sigma = 100,00 \text{ M.-\%}$

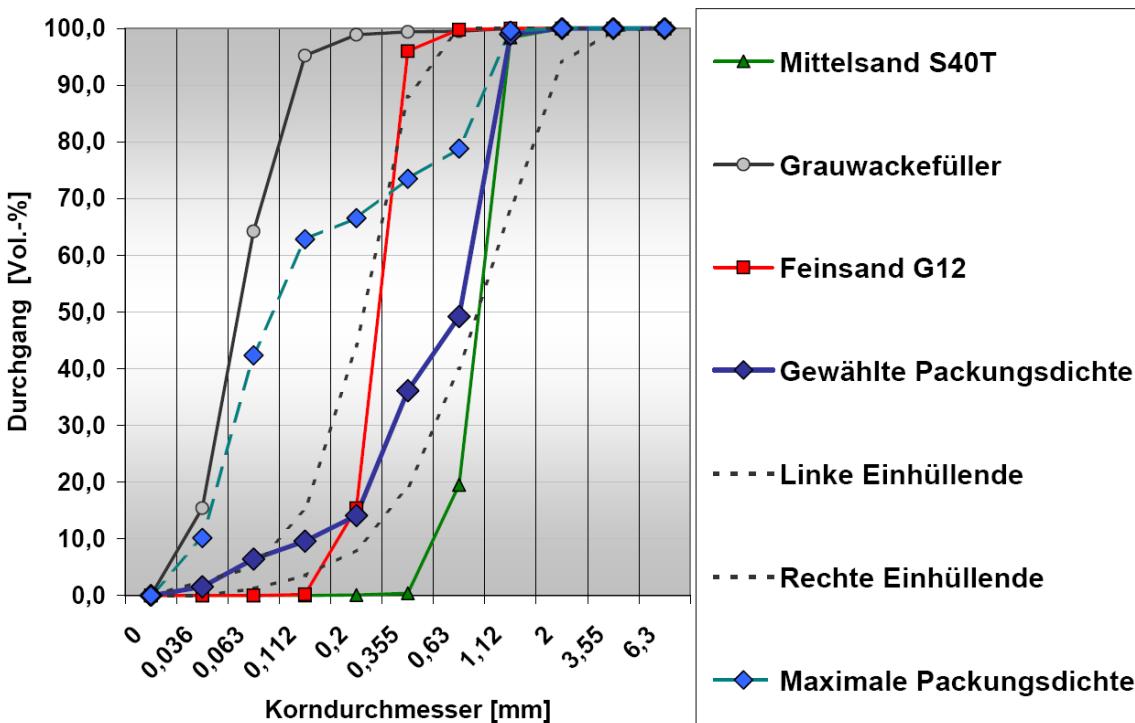


Bild 7.11: Korngrößenverteilungen der drei Gesteinskörnungen und des relativen Volumetrischen Packungsdichtemaximums mit $\Phi = 65,5 \text{ Vol.}-\%$

Bewertung: Der Unterschied zwischen der volumetrischen und der gravimetrischen Rezeptur ist bei diesem Beispiel mit ähnlichen Reindichten relativ gering.

Berechnungsbeispiel 2:

Bei Rezepturen mit Gesteinskörnungen mit einer gegenüber Quarz höheren Reindichte, wie zum Beispiel Basalt ist der Unterschied deutlich größer:

Eigenreindichten der berücksichtigten Gesteinskörnungen:

- Feinsand XY: $\rho_{\text{Quarz}} = 2,65 \text{ cm}^3/\text{g}$
- Basaltsplitt: $\rho_{\text{Quarz}} = 3,20 \text{ cm}^3/\text{g}$
- Grauwackefüller: $\rho_{\text{GW}} = 2,70 \text{ cm}^3/\text{g}$

Gewählte volumetrische Rezeptur:

- Volumenanteil Feinsand XY: $V_1 = 50 \text{ Vol.}-\%$
- Volumenanteil Basalt: $V_2 = 40 \text{ Vol.}-\%$
- Volumenanteil Grauwackefüller: $V_3 = 10 \text{ Vol.}-\%$

Rezeptur in Massenanteilen:

- Massenanteil Feinsand XY: $V_1 = 50 \text{ Vol.}-\%$ mit $\rho = 2,65 \rightarrow m = 46,09 \text{ M.-\%}$
- Massenanteil Basalt: $V_2 = 40 \text{ Vol.}-\%$ mit $\rho = 3,20 \rightarrow m = 44,52 \text{ M.-\%}$
- Massenanteil Grauwackefüller: $V_3 = 10 \text{ Vol.}-\%$ mit $\rho = 2,70 \rightarrow m = 9,39 \text{ M.-\%}$
 $\Sigma V = 100 \text{ Vol.}-\%$ $\Sigma m = 100,00 \text{ M.-\%}$

%

8 ZUSAMMENFASSUNG und AUSBLICK

8.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Zusammenhänge zwischen den Rohstoffeigenschaften von Gesteinskörnungen, der mengenmäßigen Zusammensetzung von erdfeuchten Kalk-Sand-Mischungen und den anderen für die Kalksandsteinerzeugung relevanten Herstellparametern (Korngrößenverteilung und Kornform der Gesteinskörnungen, Verdichtungsdruck, Pressfeuchte, Dampfhärtung, etc.) sowie der erreichbaren Scherbenrohdichte und Druckfestigkeit von Kalksandsteinmaterial untersucht. Eine vorangegangene Literatursichtung hat ergeben, dass zu dieser Fragestellung bislang keine systematischen Untersuchungen unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen stattgefunden haben. Des Weiteren hat die Literaturanalyse gezeigt, dass in der Betontechnologie ein umfangreiches Wissen über die Technik zur Erhöhung der Packungsdichte erdfeuchter Betone vorliegt, welches aufgrund der stofflichen Ähnlichkeit auf Kalk-Sand-Rohmassen übertragen werden kann.

Zur Anwendung dieses know-hows auf die Kalksandsteinherstellung wurden im ersten Schritt unter definierten Bedingungen im Labor bei Variation der Herstellparameter zahlreiche Serien an Kalksandsteinprüfköpfen hergestellt und nach baustofftechnischen Gesichtspunkten untersucht. Der Schwerpunkt der Betrachtungen wurde vor allem auf die Scherbenrohdichte und begleitend die Steindruckfestigkeit und andere Steineigenschaften gelegt. Die Ergebnisse des ersten Teiles lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die für die Packungsdichte und damit für die Scherbenrohdichte relevanten Einflussgrößen sind die Korngrößenverteilung und die Kornform der verwendeten Gesteinskörnungen, die Kalkdosis, die Pressfeuchte, der mechanische Pressdruck und die Wirkung von Fließmitteln. Für drei Quarzsandsorten unterschiedlicher Korngrößenverteilung (Fein-, Mittel- und Grobsand), konnte gezeigt werden, auf welche Weise die oben genannten Größen die Scherbenrohdichte und die Festigkeit von Kalksandsteinen beeinflussen. Im Rahmen der Laborversuche wurden die einzelnen Einflussgrößen zunächst isoliert betrachtet und in verschiedenen Kombinationen untersucht. Folgende Einzelergebnisse werden an dieser Stelle zusammengefasst:

- Eine sehr wirkungsvolle Möglichkeiten zur Erhöhung der Packungsdichte von Kalk-Sand-Rohmassen ist die Zugabe von hohlraumausfüllenden feinen Gesteinskörnungen, wie zum Beispiel Quarz- und Kalksteinmehle.
- Die Pressfeuchte hat ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf die Zielparameter Scherbenrohdichte und Steindruckfestigkeit. Mit ansteigender Pressfeuchte durchläuft die Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmassen ein jeweils spezifisches Maximum.
- Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Packungsdichte und dem damit im Zusammenhang stehenden Anstieg der Scherbenrohdichte und Steindruckfestigkeit ist die Steigerung des mechanischen Pressdrucks. Hier sind jedoch aufgrund des daraus resultierenden Anstiegs der Verschleißteilkosten wirtschaftliche Grenzen gesetzt.
- Es wurden verschiedene Fließmittel in die Untersuchungen einbezogen (Tenside und Poly-carboxylatether). Sie führen in spezifischer Weise zu einer Steigerung der Dichte.
- Die Untersuchung weiterer wichtiger Steineigenschaften (Wasseraufnahme, Porosität und Frostwiderstand) bestätigt die oben genannten Ergebnisse zur Packungsdichteerhöhung.

In der Literatur werden verschiedene Verfahren zur Berechnung und Optimierung der Packungsdichte beschrieben, die in der Betontechnologie angewandt werden. Deshalb wurde im nächsten Schritt anhand von zahlreichen Versuchsanträgen unter Verwendung unterschiedlichster Gesteinskörnungen und Kalken nachgewiesen, dass es möglich ist, ebenso die Scherbenrohdichte von Kalksandsteinen durch Anwendung von EDV-gestützten Rechenalgorithmen zur Bestimmung der Packungsdichte zu optimieren. Diese Untersuchungen haben zu folgenden wesentlichen Ergebnissen geführt:

- Die Berechnung der volumetrischen Packungsdichten von Kalk-Sand-Rohmassen ist mit Hilfe des ausgewählten Rechenalgorithmus reproduzierbar möglich. Die Prognose der Scherbenrohdichte der Kalksandsteine erfolgt auf der Basis der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen, der Reindichte der Zuschläge, der Kalkdosis und dem Pressdruck als Eingangsgrößen der Berechnung. Der Einfluss der Kornform hat sich für die verwendeten Gesteinskörnungen als nachrangig erwiesen, weshalb bei den hier durchgeföhrten Untersuchungen globale Kornformkoeffizienten festgelegt wurden.
- Für das Kalksandsteinengröße wurde ein Modell aufgestellt und durch Untersuchungen bestätigt. Dieses besteht aus einem Grobkörnergerüst, dessen Hohlraumvolumen mit einer Feinkornmatrix aus Feinstkorn, Füller, Kalk und Wasser bis zur sogenannten Sättigungspackungsdichte aufgefüllt werden kann. Bei weiterer Steigerung des Feinstoff- bzw. Wasseranteils tritt ein Auseinanderdrängungseffekt mit der Folge eines Packungsdichteabfalls auf, die in der Konsequenz zu einer Reduzierung der Scherbenrohdichte führt.
- Die Scherbenrohdichte von Kalk-Sand-Rohmassen ist für beliebige Herstellparametersätze vorhersagbar. Für die Prognose wurde ein Modell aus nichtlinearen Gleichungen aufgestellt, die mit Hilfe numerischer Methoden gelöst werden können.
- Mit Hilfe eines vereinfachten ingenieurmäßigen Trendmodells ist es möglich, Packungsdichten mit einer für die betriebliche Produktionspraxis ausreichenden Genauigkeit zu berechnen und Herstellparameter für maximale Scherbenrohdichten zu ermitteln.
- In den meisten Fällen werden mit einer Packungsdichteerhöhung ebenfalls Steigerungsmöglichkeiten bei der Steindruckfestigkeit aufgezeigt. Maximale Steindruckfestigkeiten ergeben sich jedoch nicht zwangsläufig mit maximalen Scherbenrohdichten, weil die Steindruckfestigkeit als komplexe Größe zusätzlich durch weitere Einflussgrößen beeinflusst wird (z.B. chemisch-mineralische Beschaffenheit der Rohstoffe und der CSH-Bindemittelphasen).

8.2 Ausblick

Mit den hier vorliegenden Untersuchungsergebnissen ist nun erstmals eine für die Produktionspraxis der Kalksandsteinherstellung ausreichend genaue Prognose der Scherbenrohdichte von Kalksandsteinmaterial möglich. Eine Vorhersage der Steindruckfestigkeit ist jedoch noch nicht mit der erforderlichen Genauigkeit durchführbar, weil weitere Einflüsse, wie beispielsweise die Reaktionsraumgröße für die CSH-Phasen-Synthese und die chemisch-mineralische Beschaffenheit der Gesteinskörnungen berücksichtigt werden muss. Hier sollten sich weitergehende Untersuchungen und die Schaffung eines sehr viel umfangreicher Datenpools anschließen.

Des Weiteren sollten im Rahmen von Praxistests möglichst zahlreiche reproduzierbar ermittelte Datensätze für eine exakte Bestimmung der Koeffizienten für das aufgestellte numerische Gesamtmodell gesammelt und zur Verfügung gestellt werden.

9 LITERATUR

- [1] GUNDLACH, H.: Dampfgehärtete Baustoffe, Bauverlag, Wiesbaden 1973
- [2] Bundesverband Kalksandsteinindustrie eV: 100 Jahre Kalksandsteinindustrie, Hannover Juni 1994
- [3] ZERNIKOW, F: DRP 502 vom 02.07.1877
- [4] MICHAELIS, W.: DRP 14195 vom 02.06.1881
- [5] HOCHSTETTER, R.: Das Bindemittelskelett hydrothermal gebundener Kalk-Kieselsäure-Massen, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 8, Hannover, 1968
- [6] HOCHSTETTER, R.: Die Beziehung zwischen einigen Gefügeeigenschaften von Kalksandsteinen und deren Verformungseigenschaften, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 15, Hannover, 1969
- [7] KENDEL, F.: Die Eigenschaften großformatiger Kalksandblöcke, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 35, Hannover, 1973
- [8] GORMANN, W.: Modell für die Beziehungen zwischen Bindemittelaufbau und technischen Eigenschaften von KS-Produkten, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 45, Dissertation, Hannover, 1976
- [9] KENDEL, F.: Dampfhärtung von Kalksandstein bei verlängerter Härtezeit und niedrigeren Temperaturen - Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 46, Hannover, 1978
- [10] KENDEL, F.: Einfluss von Nebenmineralen des Sandes auf die mechanischen Eigenschaften von Kalksandsteinen, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 53, Hannover, 1981
- [11] WALK-LAUFFER, B.: Untersuchung des Einflusses von Sulfaten auf das System CaO-SiO₂-Al₂O₃-K₂O-H₂O mittels Wärmefflusskalorimetrie und in-situ Neutronenbeugung unter hydrothermalen Bedingungen, Dissertation, Universität Siegen, 2002
- [12] MÖRTEL, H.: Mineralbestand, Gefüge und physikalische Eigenschaften von Kalksandsteinen, Fortschritte der Mineralogie, Heft 58, Seiten 37 bis 67, Stuttgart, Juli 1980
- [13] Kalksandstein-Information, Planung-Konstruktion-Ausführung, VBT-Verlag, 5. Auflage, 2009
- [14] SCHIELE, E.; BERENS, L. W.: Kalk, Herstellung- Eigenschaften-Verwendung, Verlag Stahleisen m.b.H, Düsseldorf, 1972
- [15] STARK, J.; WICHT, B.: Zement und Kalk, Der Baustoff als Werkstoff, Baupraxis, Birkhäuser, Weimar 2000
- [16] STARK, J.: Anorganische Bindemittel, Zement – Kalk – Spezielle Bindemittel. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Heft 109, 1998.
- [17] EDEN, W.: Handbuch zur Herstellung von Kalksandsteinen, 3. Auflage, Bundesverband Kalksandsteinindustrie eV, Hannover, 2002
- [18] MARBUHN, B.: Kinetik der Hydratation von CaO und MgO, Dissertation, Institut für Nichtmetallische Werkstoffe, Technische Universität Clausthal, 2006
- [19] HOGEWONING, S.; WOLTER, A.: Vorhersage und Beeinflussung der Reaktivität von Branntkalk, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF-14654-N, Institut für Nichtmetallische Werkstoffe, Technische Universität Clausthal, 2008
- [20] Bundesverband Kalksandsteinindustrie eV und Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie eV: Gemeinsame Merkblätter "Kalk für Kalksandsteine", Hannover und Köln, 1994
- [21] WITTNEBEN, U.: Untersuchungen zur Teilchengröße-Verteilung in Kalkhydratsuspensionen, Forschungsgemeinschaft der Deutschen Kalkindustrie e.V., Köln, Forschungsbericht Nr. 1/80, 1980
- [22] GEISENHANSLUKE, C.: Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen, Dissertation, Universität Kassel, Kassel, 2008
- [23] GARBOCZI, E.J.; Bullard, J.W.: Shape analysis of a reference cement, Cement and Concrete Research, Band 34(10), Seiten 1933 bis 1937, 2004

- [24] EBERHARD, E.; EDEN, W.: Mineralische Zusammensetzung von Sanden für die Kalksandstein-Herstellung, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 84, Hannover, 1996
- [25] LORENZ, W.; GWOSDZ, W.: Bewertungskriterien für Industriemineralen, Steine und Erde, Geologisches Jahrbuch, Reihe H, Heft 2, Teil 1: Tone, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1997
- [26] LORENZ, W.; GWOSDZ, W.: Bewertungskriterien für Industriemineralen, Steine und Erde, Geologisches Jahrbuch, Reihe H, Heft 2, Teil 2: Karbonat- und Sulfatgesteine, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1998
- [27] LORENZ, W.; GWOSDZ, W.: Bewertungskriterien für Industriemineralen, Steine und Erde, Geologisches Jahrbuch, Reihe H, Heft 2, Teil 3: Quarzrohstoffe, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1999
- [28] LORENZ, W.; GWOSDZ, W.: Bewertungskriterien für Industriemineralen, Steine und Erde, Geologisches Jahrbuch, Reihe H, Heft 2, Teil 4: Vulkanische Gesteine und Leichtzuschläge, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2000
- [29] LORENZ, W.; GWOSDZ, W.: Bewertungskriterien für Industriemineralen, Steine und Erde, Geologisches Jahrbuch, Reihe H, Heft 2, Teil 5: Gesteinskörnungen, Kies, Sand, gebrochener Naturstein, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2002
- [30] LORENZ, W.; GWOSDZ, W.: Bewertungskriterien für Industriemineralen, Steine und Erde, Geologisches Jahrbuch, Reihe H, Heft 2, Teil 6: Naturwerksteine, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2003
- [31] LORENZ, W.; GWOSDZ, W.: Bewertungskriterien für Industriemineralen, Steine und Erde, Geologisches Jahrbuch, Reihe H, Heft 2, Teil 7: Feldspäte, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2003
- [32] LORENZ, W.; GWOSDZ, W.: Bewertungskriterien für Industriemineralen, Steine und Erde, Geologisches Jahrbuch, Reihe H, Heft 2, Teil 8: Aluminiumoxidreiche und Magnesiumoxidreiche Rohstoffe, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2005
- [33] KÖSTER, E.: Granulometrische und morphologische Messmethoden an Mineralkörnern, Steinen und sonstigen Stoffen, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1964
- [34] TICKEL, F.G.: The examination of fragmental rocks, Stanford University Press. 3. Edit, 1931
- [35] SHULITS, S.: Fluvial morphology in terms of slope, abrasion and bedload., Trans American, Geophysical Union, Teil 2, Seiten 440 bis 444, 1936, in: Siebtechnik, Prüfsiebung und Darstellung der Siebanalyse, 4. Auflage, Mühlheim-Ruhr, 1960
- [36] ALLING, H. L.: Initial shape and roundness of sedimentary rock mineral particles of sand size, J. Sedimental Petrology, Band 20, Seiten 133 bis 147, 1950
- [37] BERTHOIS, L.: Abaques pour le calcul des indices des galets. Revision Géometrique Dynamique, Band 4, Seiten 199 bis 205, 1952
- [38] BERTHOIS, L.: Les sables et les galets et l'études lithologique Casais de Santa Teresa, Bol. Soc. , Geologique, Band 10, Seiten 15 bis 21, 1952
- [39] POWERS, M. C.: A new roundness scale for sedimentary particles, J. Sedimental Petrology, Band 23, Seiten 115 bis 119, 1953
- [40] TANNER, W. F.: Size and roundness in sediments, a discussion, Bulletin of Geological Society, America, Band 67, Seite 535, 1956
- [41] CURRAY, J. R.; GRIFFITHS J. C.: Sphericity and roundness of quartz grain in sediments, Bulletin of Geological Society, America, Band 66, Seiten 1075 bis 1095, 1955
- [42] MORAWSKI, J.: Eine Methode zur Untersuchung der Form von Sandkörnern mit Hilfe eines photographischen Vergrößerungsgerätes, Annalen der Universität Marie Curie Slodowska, Band 10, Seite 199 bis 221, 1956

- [43] HUITT, J. L.: Three dimensional measurement of sand grains, Bulletin of American Association of Petrology and Geology, Band 38, Seiten 159 bis 160, 1954
- [44] MACKIE, W.: On the laws that govern the rounding of particles of sand, Edinburg Geology Society, Band 7, Seiten 298 bis 311, 1893
- [45] ZIEGLER, V.: Factors influencing the rounding of sand grains, American Geology, Band 19, Seiten 645 bis 654, 1911
- [46] GALLOWAY, J. J.: The rounding of grains of sand by solution, American Science Band 47, Seiten 270 bis 280, 1919
- [47] KINDLE, E. M.: A neglected factor in the rounding of sand grains, American Science, Band 197, Seiten 431 bis 434, 1919
- [48] ANDERSON, G. E.: Experiments on the rate of wear of sand grains, J. Geology, Band 34, Seiten 144 bis 158, 1926
- [49] TWENHOFEL, W., H.: The rounding of sand grains, Sediments Petrology, Band 15, Seiten 59 bis 72, 1945
- [50] ROBSON, D. A.: New technique for measuring roundness of sand grains, Sediments Petrology, Band 28, Seiten 108 bis 110, 1958
- [51] HOFMANN, F.: Ein experimentelles Verfahren zur Bestimmung der Kornform von Sanden, Eclogae Geologicae Helvetiae, Band 49, Seiten 506 bis 512, 1956
- [52] REICHELT, G.: Über Schotterformen und Rundungsgradanalyse als Feldmethode, Peterm. Geographische Mitteilungen, Jahrgang 105, Seiten 15 bis 24, 1961
- [53] GRAUBNER, C.-A.; PROSKE, T.; P. RAMGE. Einfluss der Kornform auf die Packungsdichte von Gesteinskörnungen. Beton, 09/2006, Seiten 398 bis 404
- [54] IKEN, H. W.; Lackner, R. R.; Zimmer, U. H.; Wöhnl, U.: Handbuch der Betonprüfung, Anleitungen und Beispiele, Verlag Bau und Technik, 5. Auflage, Düsseldorf, 2003
- [55] Haver & Boecker, Stabsiebe und Kornformanalysatoren, Herstellerprospekt, 2008
- [56] STARK, U.: Kornformanalyse von Sanden unterschiedlicher Korngrößen, Ergebnisbericht zum Auftrag der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. vom 15.08.2006, Weimar, 2006
- [57] RESCHKE, T.: Einfluß der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton. Dissertation, Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 62/2000, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf, 2001
- [58] RAMGE, P.: Untersuchungen zum Einfluss der Kornform auf die Packungsdichte von Gesteinskörnungen. Vertieferarbeit, TU Darmstadt, Institut für Massivbau, Darmstadt, 2004.
- [59] Malvern, Sysmex FPIA-3000, Kornformanalysator, Herstellerprospekt, 2008
- [60] MÜLLER, A.; STARK, U.: Korngröße und Kornform von Gesteinskörnungen und ihr Potenzial für die Betonforschung, Beton, 09/1996, Seiten 390 bis 397
- [61] Institut für Gesteinshüttenkunde der RWTH Aachen, Vorlesungsskript Wintersemester 2000, Aachen, 2000
- [62] RÖSLER, H. J.: Lehrbuch der Mineralogie, 5. Auflage, Bergakademie Freiberg, Deutscher Verlag für die Grundstoffindustrie, 1991, Leipzig
- [63] Maschinen und Geräte für die Kalksandsteinindustrie, Tonindustriezeitung 93, Seiten 116 bis 116, 1969
- [64] SCHLÖSSER, H. G.: Wirtschaftliche Forgerungen für die Kalksandstein-Herstellung mit hydraulischen Pressen, 2. Internationales Symposium für dampfgehärtete Kalziumsilikatbaustoffe, Vortrag Nr. 75, Hannover 1969
- [65] SCHULZ, E.: Geregelte Pressvorgänge und ihr Einfluss auf die Steinrohdichte und Steindruckfestigkeit, Vortrag Nr. 78, Hannover 1969
- [66] OPPERMANN, Hans-Uwe: Der Einfluss der Oberpressung auf die wichtigsten Eigenschaften industriell gefertigter Kalksandsteine, Forschungsbericht Nr. 2, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover 1967

- [67] SOBOL, Roman: Modellierung der Druckzerkleinerung bei unterschiedlichen Kraft-einleitungsbedingungen, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Dissertation, Freiberg, 2008
- [68] SILBERMANN, Falk: Beitrag zur Modellierung der Arbeitsweise von Kegelbrechern in Bezug auf den Materialstrom, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Dissertation, Freiberg, 2004
- [69] STIEß, Matthias: Mechanische Verfahrenstechnik I+ II, Springer Verlag Berlin, Lehrbuch, 2001
- [70] SCHWISTER, Karl: Taschenbuch der Verfahrenstechnik, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 3. Auflage, 2007
- [71] SCHÖNERT, K.: Einzelkorn-Druckzerkleinerung und Zerkleinerungskinetik, Untersuchungen an Kalkstein, Quarz-, und Zementklinkerkörnern des Größenbereichs ,1 bis 3 mm, Dissertation, Technische Hochschule Karlsruhe, 1966
- [72] SCHÖNERT, K.: Mathematische Simulation von Zerkleinerungsprozessen im kontinuierlich betriebenen Mühlen, Habilitationsschrift, Technische Hochschule Karlsruhe, 1971
- [73] EDEN, W.; GÜNTHER, Th. H.; TEMERMANN, F.: Untersuchungen zur Kornverfeinerung von Sanden für die Kalksandstein-Herstellung, Meisterseminar 2008
- [74] GUNDLACH,H.; HÖRSTER, E.; RADEMACHER, G.: Der Einfluss der Reaktionsraumgröße bei der Synthese der Calciumsilikhydrate, 2. Internationales Symposium für dampfgehärtete Kalziumsilikat-Baustoffe, Vortrag 25, Hannover 1969
- [75] WITTNEBEN, U.: Dampfkondensation und Rückverdampfung während des Kalksandstein-Herstellprozesses im Autoklaven, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 63, Hannover, 1990
- [76] FULLER, W.B. and S.E. THOMPSON, The laws of proportioning concrete. American society of civil engineers, 1907. 33: Seiten 223-298.
- [77] ANDREASEN, A.H.M. and J. ANDERSEN, Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). Kolloid-Zeitschrift, 1930. 50: Seiten 217-228.
- [78] FURNAS, C.C.: Relations between Specific Volume, Voids an Size Composition in Systems of Broken Solids of Mixed Sizes, U.S. Bureau of Mines Reports of Investigations, 1928. 2894
- [79] DINGER, D.R.; FUNK, J.E.; FUNK, J.E.jr.: Coal Grinding and Particle Size Distribution Studies for Coal-Water Slurries and High Solids Concentrations, 1980, Empire State Electric Energy Research Corporation (ESEERCO), New York
- [80] SCHWANDA, F.: Der Bestwert der Kornzusammensetzung von Betonzuschlagstoffen. Der Bauingenieur, 1956. 31: Seiten 41-46
- [81] DE LARRARD, F.: Concrete mixture proportioning: a scientific approach, Modern Concrete Technology Series, ed. A.Bentur and S. Mindess, Vol. 9, 1999, London: E&FN Spon
- [82] RESCHKE, T.; SIEBEL, E.: Einfluss der Granulometrie und Reaktivität von Zement und Zusatzstoffen auf die Festigkeits- und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton, Teil 1, beton, 1999, Seiten 719 bis 724
- [83] RESCHKE, T.; SIEBEL, E.: Einfluss der Granulometrie und Reaktivität von Zement und Zusatzstoffen auf die Festigkeits- und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton, Teil 2, beton, 2000, Seiten 47 bis 50
- [84] SCHMIDT, M.: Beton und Betonstahl, in Stahlbeton aktuell - Praxishandbuch 2003, R. Avak und A. Goris, Editors, 2003 Bauwerk-Verlag, Berlin
- [85] DE LARRARD, F.: Ultrafine particles for the making of very high strength concrete by the use of an packing model, Cement and Concrete Research, 1989, Vol. 19, Seiten 161 bis 172

- [86] DE LARRARD, F. and T. SEDRAN, Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, 1994. Vol. 24: p. 997-1009.
- [87] BORNEMANN, R.: Untersuchungen zur Modellierung des Frisch- und Festbetonverhaltens erdfeuchter Betone, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft Nr. 4, Dissertation, Universität Kassel, 2005
- [88] Okamura, H.; Ouchi, M.: Self Compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(1) : Seiten 5 bis 15
- [89] SCHMIDT, M.; FEHLING, E.; GEISENHANSLÜKE, C.: Ultra High Performance Concrete (UHPC), International Symposium on Ultra High Performance Concrete, September 13-15, 2004, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 3, Universität Kassel, 2004
- [90] FEHLING, E.; SCHMIDT, M.; STÜRWALD, S.: Ultra High Performance Concrete (UHPC), Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, March 05-07, 2008, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 10, Universität Kassel, 2004
- [91] SCHMIDT, M.; GEISENHANSLÜKE, C.: Optimierung der Zusammensetzung des Feinstkorns von Ultra-Hochleistungs- und von Selbstverdichtendem Beton. *beton*, 2005(5): Seiten 224-235.
- [92] PREPENS, M.: Frost- und Witterungsbeständigkeit von Anstrichen und Imprägnierungen auf Kalksandstein-Sichtmauerwerk, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 73, Hannover, 1990
- [93] PREPENS, M.: Verbesserung der Frostwiderstands- und Tausalzbeständigkeit und der Duktilität von Kalksandsteinen für hochbeanspruchte Bauteile, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 75, Hannover, 1991
- [94] EDEN, W.: Maßnahmen und Zusatzmittel zur gezielten Verbesserung verschiedener Eigenschaften von Kalksandstein-Spezialbaustoffen, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 79, Hannover, 1994
- [95] EDEN, W.: Eignung von Kalksandstein-Material für witterungsbeanspruchte Gebäude-Außentfassaden - Kalksand-Werksteine, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 102, Hannover, 2006
- [96] POWELL, M. J.: Computer-simulated random packing of spheres, *Powder Technology*, Vol. 25, Seiten 45 bis 52, 1980
- [97] MOOSBERG-BUSTNES, H.; LAGERBLAD, B.; FORSSBERG, E.: The function of fillers in concrete, *Materials and Structure*, Band 37, Seiten 74 bis 81 2004
- [98] ZHENG, J. J.; LI, C.Q.; JONES, M. R.: Aggregate distribution in concrete with wall effect, *Magazine of Concrete Research*, Band 55, Seiten 257 bis 265, 2003
- [99] HUMMEL, A.: Das Beton ABC. Ernst & Sohn Verlag, Seiten 73 bis 76 und 241 bis 243, Berlin, 1959
- [100] KESSLER, H.-G.: Kugelmodell für Ausfallkörnungen dichter Betone, *Betonwerk + Fertigteiltechnik*. Heft 11, Seiten 63 bis 66, 1994
- [101] SCHWANDA, F.: Der Hohlraumgehalt von Korngemischen, *Beton*, Heft 1, Seiten 12 bis 19, 1959
- [102] SCHWANDA, F.: Der Hohlraumgehalt von Korngemischen - Ein Vergleich rechnerisch gewonnener Werte mit versuchsmäßig ermittelten, *Beton*, Heft 12, Seiten 427 bis 431, 1959
- [103] SCHWANDA, F.: Das rechnerische Verfahren zur Bestimmung des Hohlraumes und Zementleimanspruches von Zuschlägen und seine Bedeutung für den Spannbetonausbau. *Zement und Beton*, Seiten 8 bis 17, 1960
- [104] SCOTT, G.D.: Packing of spheres. *Nature*, Band 188, Seiten 908 bis 909, 1960.
- [105] NOLAN, G.T.; Kavanagh, P.E., Computer simulation of random packing of hard spheres. *Powder Technology*, Band 72, Seiten 149 bis 155, 1992

- [106] YU, A.B., et al: On the relationship between porosity and interparticle forces. Powder Technology, Band 130(1-3), Seiten 70 bis 76, 2003
- [107] OGER, L.; TROADEC, F.: Properties of disordered sphere packings, I. Geometric structure: statistical model, numeral simulations and experimental results, Powder Technology, Bands 46, Seiten 121 bis 131, 1986
- [108] SCHIEBL, P.: Gesteinskörnung, Skriptum zur Grundvorlesung in Baustoffkunde, Technische Universität München, 2005
- [109] YERAZUNIS, S.; CORNELL S.W.: Dense random packing of binary mixtures of spheres, Nature, Vol. 207: Seiten 835 bis 837, 1965
- [110] RODRÍGUEZ, J.; ALLIBERT C.H.: A computer method for random packing of spheres of unequal size, Powder Technology, Vol. 47, Seiten 25 bis 33, 1986
- [111] MC GEARY, R.K.: Mechanical Packing of Spherical Particles, Journal of the American Ceramic Society, Band 44(10), Seiten 513 bis 522, 1961
- [112] PALM, S.: Korngrößen- und Phasenoptimierung von Bindemitteln, Vortrag im Rahmen der Arbeitstagung "Glas-Keramik-Bindemittel", Februar 2008
- [113] SCHLÜSER, K.H.; MCEDLOV-PETRO SJAN, O.P.: Der Baustoff Beton - rundlagen der Strukturbildung und der Technologie, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, Seiten 141 bis 164, 1990
- [114] STOVALL, T.; DE LARRARD, F.; BUIL, M.: Linear Packing Density Model of Grain Mixtures, Powder Technology, Heft 48, Seiten 1 bis 12, 1986
- [115] STANDISH, N.; BORGER, D.E.: The porosity of particulate mixtures. Powder Technology, Vol. 22, Seiten 121 bis 125, 1979
- [116] STOVALL, T.; de Larrad, F.: Linear Packing Density Model of Grain Mixtures, Powder Technology, Vol. 48, Seiten 1 bis 12, 1986
- [117] MANDELBROT, B.: Die fraktale Geometrie der Natur, Birkhäuser Verlag, 1987
- [118] HERRMANN, H.; MAHMOODI, R.; WACKENHUT, M.: Searching for the perfect packing, Universität Stuttgart, Institut for Computational Physics, Februar 2003
- [119] HERRMANN, H.; MAHMOODI, R.: Space-Filling Bearings in Three Dimensions, Universität Stuttgart, Institut for Computational Physics, Physical Review Letters, Vol. 92, No. 4, Seiten 044031-1 bis 044031-4, Januar 2004
- [120] HERRMANN, H.; LUDING, S.: Modeling Granular Media on the Computer, Universität Stuttgart, Institut for Computational Physics, März 1998
- [121] WÖHLER, J.: Mathematik und konkrete Kunst - Verbindungen zwischen scheinbar fremden Welten, Würzburg, 2008
- [122] RASCHDORF, S.: Simulation und Optimierung der Raumausfüllung von Korngrößenverteilungen - Erzeugung von Kugelpackungen, TU Clausthal, Institut für Mathematik, Vortrag, April 2008
- [123] DINGER, D.R.; FUNK, J.E.: Predictive Process Control of crowded particulate suspensions, Kluwer Academic Publishers, 1994
- [124] DINGER, D.R.: One-Dimensional Packing of Spheres, Teil I und II, Ceramic Bulletin, Februar 2000, Seiten 71 bis 76 und April 2000, Seiten 83 bis 91, 2000
- [125] ABDULLAH, E.C.; GELDART, D.: The use of bulk density measurements as flowability indicators, Powder Technology, 1999, 102(2): Seiten 151 bis 165
- [126] MACHT, J.; NISCHER, P.: Weiche Betone - kostengünstige Herstellung durch gute Mehlkornabstufung und gute Mischwirkung, Zement und Beton, 2006(1): Seiten 24 bis 29
- [127] SYBERTZ, E.: Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff, Beuth-Verlag, 1993, Berlin
- [128] JAMKAR, S.S.; RAO, C.B.K.: Index of Aggregate Particle Shape and Texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning, Cement and Concrete Research, 2004, 34(11): Seiten 2021 bis 2027

- [129] GEIKER, M.A.; BRANDL, M.; THRANE, L.; NIELSEN, N.F.: On the Effect of Coarse Aggregate Fraction and Shape on the Rheological Properties of Self-Compacting Concrete, *Journal of Cement, Concrete and Aggregates*, 2002, 24(1), Seiten 3 bis 6
- [130] STARK, U.; MÜLLER, A.: Korngröße und Kornform von Gesteinskörnungen und ihr Potenzial für die Betonforschung, *Beton*, Heft 9/2006, Seiten 390 bis 397, 2006
- [131] MIYAJIMA, T.; YAMAMOTO, K.L.; SUGIMOTO, M.: Effect of particle shape on packing properties during tapping, *Advanced Powder Technology*, 2001, 12(1), Seiten 117 bis 134
- [132] DILEK, U.; LEMING, M.L.: Relationship between particle shape and void content of fine aggregate, *Cement, Concrete and Aggregates*, 2004, 26(1), Seiten 14 bis 20
- [133] BIGAS, J.P.; GALLIAS, J.L.: Effect of fine mineral additions on granular packing of cement mixtures, *Magazine of Concrete Research*, 2002, 53(3), Seiten 155 bis 164
- [134] FURNAS, C.C.: Grading Aggregates, Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density, *Industrial and Engineering Chemistry*, Band 23, Nr. 9, Seiten 1052 bis 1058, 1931
- [135] Mc GEARY, R.K.: Mechanical Packing of Spherical Particles, *Journal of the American Ceramic Society*, Band 44, Nr. 10, Seiten 513 bis 522, 1962
- [136] FARRIS, R.J.: Prediction of the Viscosity of Multimodal Suspensions from Unimodal Viscosity Data, *Translations soc., Rheology* 2, Seiten 281 bis 301, 1968
- [137] FEDOR, R.F.; LANDEL, R.F.: An Empirical Method of Estimating the Void Fraction in Mixtures of Uniform Particles of Different Size. *Powder Technology*, Heft 23, Seiten 225 bis 231, 1979
- [138] PALBØL, L.; GOLTERMANN, P.; JOHANNSEN, V.: Optimieren von Zuschlägen im Beton, *Concrete Precasting Plant and Technology*, Band 11, Seiten 58 bis 62, 1994
- [139] TOUFAR, W.; KLOSE, E.; BORN, M.: Berechnung der Packungsdichte von Korgemischen, *Aufbereitungstechnik*, Heft 11, Seiten 603 bis 608, 1977
- [140] SCHNATZ, R.; ELLERBROCK, H.-G.; SPRUNG, S.: Beeinflussung der Verarbeitungseigenschaften von Zement bei der Fertigmahlung mit der Gutbett-Walzenmühle, *Zement-Kalk-Gips*, 48, Nr. 2, Seiten 63 bis 71, 1995
- [141] EDEN, W.; GEISENHANSLÜKE, C.: Voruntersuchungen zur Packungsdichteberechnung von Kalk-Sand-Rohmassen, Kassel, Hannover 2006
- [142] OVERBECK, J.T.G.: Interparticle Forces in Colloid Science. *Powder Technology* 37, Seiten 195 bis 208, 1984
- [143] DERJAGUIN, B.V.; LANDAU, L.: Acta Physiochim (UdSSR). Vol. 14, Seite 633, 1941
- [144] SCHULZE, D.: Pulver und Schüttgüter, Fließeigenschaften und Handhabung, Springer-Verlag, Verfahrenstechnik, VDI, 2006
- [145] LAGALY, G.: COLLOIDS, in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley VCH, Weinheim, 2000
- [146] LAGALY, G.; SCHULZ, O.; ZIMEHL, R.: Dispersionen und Emulsionen, Einführung in die Kolloidik feinverteilter Stoffe einschließlich der Tonminerale, Birkhäuser-Verlag, 1997
- [147] BLANKENBURG, H.-J.; GÖTZE, J.; SCHULZ, H.: Quarzrohstoffe, 2. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1994
- [148] HAUCK, H.-G.: Fließmittel der neuen Generation für die Transportbetonindustrie, *Beton*, 3/2004, Seiten 128 bis 130, 2004
- [149] SPANKA, G.: Zusatzmittel steuern Betoneigenschaften, Beitrag in BFT, Mai 1999
- [150] KLEEN, E.: Zusatzmittel für Hochleistungsbetone, Beitrag in Tiefbau, Juli 1999
- [151] GEISENHANSLÜKE, C., M. SCHMIDT, and R. KRELAUS. Wirkung von Fließmitteln auf Zusatzstoffe im Beton. in 16. ibausil. 2006. Weimar. Literatur 144, ISBN 3000182632, 9783000182631
- [152] VOGEL, R. Stabilität und Fließverhalten von Selbstverdichtendem Beton. Vortrag Ibausil, Weimar, 2006, Druck Band 3, Seiten 1047 bis 1058, ISBN 3000182632/9783000182631

- [153] STROBEL, T.: BASF, Construction Chemicals Austria GmbH, Produktbeschreibung Fließmittel, 2007
- [154] FERRARIS, C.F.; OBLA, K.H.: The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, Cement an Concrete Research, 2001, Vol. 31, Seiten 245 bis 255
- [155] NEHDI, M.; MINDESS, S.; AITCIN, P.C.: Rheology of higt performance concrete. Effects of ultrafine particles, Cement and Concrete Research, 1998, 28(5), Seiten 687 bis 697
- [156] KRELL, J.: Die Konsistenz von Zementleim, Mörtel und Beton und ihre zeitliche Veränderung, Schriftreihe der Zementindustrie, Vol. Band 46, 1985, Düsseldorf, Forschungsinstitut der Zementindustrie
- [157] ZHANG, C.Z.; WANG, A.Q.; TANG, M.S.; LIU, X.O.. The filling role of pozzolanic material, Cement an Concrete Research, 1996 26(6), Seiten 943 bis 947
- [158] BLASK, O., Zur Rheologie von polymermodifizierten Bindemittelleimen und Mörtelsystemen, in Fachbereich 8. 2002, Universität Gh Siegen: Siegen, Seite 234
- [159] MEZGER, Th.: Das Rheologie-Handbuch für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern, Vincentz Verlag Hannove , 2000, ISBN 3-87870-567-0
- [160] ZIECHMANN, W.; ROCHUS, W.; OPPERMANN, H.-U.: Der Einfluss von Huminstoffen auf die Druckfestigkeit von Kalksandsteinen, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 7, Hannover, Januar 1968
- [161] ZIECHMANN, W.; ROCHUS, W.: Über die Bildung und Eigenschaften von Huminstoffen. Die analytische Charakterisierung von Sandvorkommen unter besonderer Berücksichtigung der Bestimmung postmortaler organischer Stoffe (Huminstoffe), Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 24, Hannover, März 1971
- [162] EDEN, W.; GLAUBITT, A.; MIDDENDORF, B.; NIEMEYER, J.: Nutzbarmachung von huminstoff-belasteten Sanden für die Kalksandsteinproduktion, Forschungsbericht Nr. 109, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover 2009
- [163] Romberg, H.: Zementsteinporen und Betoneigenschaften, Beton-Information 18, Heft 5, Seiten 50 bis 55, 1978
- [164] MAYN, K.: Ergebnisbericht über die CT-Untersuchungen an Kalksandsteinproben, TU Clausthal, Oktober 2004
- [165] STIEß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik, Partikeltechnologie 1, 3. Auflage, Springer-Verlag, 2008
- [166] EDEN, W.; MIDDENDORF, B.; SCHMIDT, M.; TESCH, V.: Optimierung der Verdichtung des Kalksandstein-Gefüges unter Berücksichtigung der Rohstoffeigenschaftenun des Herstellprozesses des KS-Scherbens, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 99, Hannover, 2004
- [167] Ohnemüller, W.; Hupe, B.: Die Hydratation des Branntkalkes in der Kalksandstein-Rohmasse und ihre Bedeutung für die Steinfestigkeit vor und nach dem Dampfhärten, Zement-Kalk-Gips, 1969, Heft 3, Seiten 116 bis 121
- [168] EDEN, W.: Einfluss der Unterbrechung des hydrothermalen Härteprozesses auf die Qualitätseigenschaften, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 90, Hannover, 2000
- [169] EDEN, W.; HÖRSTER, E.: Einfluss von schweren Zuschlägen auf die Eigenschaftswerte von Kalksandsteinen, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 89, Hannover, 1999
- [170] EDEN, W.; BUHL, J.-Ch.; COPPENS, M.H.M: Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Kalksandstein-Herstellung durch Verwendung von Tonmineralen als Optimierungs-Zuschlag, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 100, Hannover, 2005

- [171] EDEN, W.; BUHL, J.-Ch.: Entwicklung eines Schnell-Prüfverfahrens auf der Basis der Röntgendiffraktometrie zur Eignungsbeurteilung von Zuschlägen für die Kalksandstein-Produktion, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 105, Hannover, 2007
- [172] EDEN, W.; MANKOWSKI, B.; WALTERMANN, G.: Reduzierung der Produktionskosten und des Primärenergieverbrauchs durch Optimierung der Rezeptur der KS-Rohmischung und der Rohlingsstandfestigkeit, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 88, Hannover, 1998
- [173] EDEN, W.; RADEMAKER, P.: Frostbeurteilung von Kalksandsteinen - Grundlagen des DIN 106-Prüfverfahrens, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 77, Hannover, 1998
- [174] WESCHE, K.: Baustoffe für tragende Baustoffe 2. Beton, Maurerwerk. Nichtmetallisch - anorganische Stoffe Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit, Vieweg+Teubner Verlag, 1993
- [175] WEBER, R.; TEGEALAR, R.: Guter Beton, Ratschläge für die richtige Betonherstellung, Verlag Bau und Technik, 20. Auflage, Erkrath, 2001

Normen und Bestimmungen

- [N1] DIN V 106-1, Kalksandsteine / Vollsteine, Lochsteine, Blocksteine, Hohlblocksteine, Februar 2003
- [N2] DIN V 106-2, Kalksandsteine / Vormauersteine und Verblender, Februar 2003
- [N3] DIN 66145, Darstellung von Korn-(Teilchen-)größenverteilungen; RRSB-Netz, 04/1976
- [N4] DIN 4760, Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem, 06/1982
- [N5] DIN EN 933: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Berlin, Oktober, 1997.
- [N6] DIN EN 933-4, Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung der Kornform - Kornformkennzahl, 2008
- [N7] DIN EN 933: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Berlin, Oktober, 1997
- [N8] DIN EN 772-1 - Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit, 09/2000
- [N9] DIN EN 772-13 - Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 13: Bestimmung der Netto- und Brutto-Trockenrohdichte von Mauersteinen, 09/2000
- [N10] DIN EN 772-18 Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 18: Bestimmung des Frostwiderstandes von Kalksandsteinen, 09/2000
- [N11] DIN EN 772-11 - Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 11: Bestimmung des Feuchtegehaltes von Kalksandsteinen und Mauersteinen aus Porenbeton, 04/1999

10 ANHANG

10.1 Abkürzungsverzeichnis

An dieser Stelle werden die wichtigsten Begriffe und Formelzeichen definiert bzw. kurz erläutert.

Kalksandstein-Herstellparameter:

CaO-Dosis [Vol.-%], [M.-%]	Menge an reaktionsfähigem CaO in der Kalk-Sand-Rohmasse
Pressdruck σ_p [N/mm ²] Rohmasse wirkt	Verdichtungsdruck, der auf die Kalk-Sand-
Pressfeuchte U_p [Vol.-%], [M.-%]	Wassergehalt der Kalksandstein-Rohlinge
Härtedauer t_h [h]	Dauer der Hydrothermalhärtung
Härtetemperatur T_h [°C]	Reaktionstemperatur bei der Hydrothermalhärtung

Basis-Qualitätskennwerte der Kalksandsteine:

• Basis-Steindruckfestigkeit $\beta_{D,st}$ [N/mm ²]	Steindruckfestigkeit der Steinserien mit folgenden Standardherstellparametern (CaO-Dosis: 7 M.-%, Pressdruck: $\sigma_p = 15$ N/mm ² , Pressfeuchte: $U_p = 5$ M.-%) Härtedauer: $t_h = 1-4-1$ h, Härtetemperatur: $T = 203$ °C
• Basis-Steinrohdichte ρ_{tr} [kg/dm ³]	Steinrohdichte der Steinserien mit den oben genannten Standardherstellparametern
• Basis-Rohlingsstandfestigkeit β_{RSF} [N/mm ²]	Rohlingsdruckfestigkeit mit den oben genannten Standardherstellparametern
• Steinrohdichte ρ_{sch} [kg/dm ³]	Dichte des Kalksandsteins (Masse im trockenen Zustand)
• Scherbenrohdichte ρ_{sch} [kg/dm ³]	<u>unter Berücksichtigung des Lochanteils</u> Dichte des Kalksandsteinmaterials in trockenen Zustand
	<u>ohne Berücksichtigung des Lochanteils</u>

Größen zur Packungsdichte und Partikelgeometrie:

• Packungsdichte Φ [Vol.-%]	Verhältnis des Feststoffvolumens zum Gesamtvolumen eines betrachteten Raums
• Porosität ϵ [Vol.-%]	Verhältnis des Hohlraumvolumens zum Gesamtvolumen eines betrachteten Raums
• Hohlraumgehalt k [-]	Quotient aus der Porosität und dem Feststoffgehalt
• Reichweite der Teilchenbehinderung w [-]	Kennwert zur Berücksichtigung des Ausfüllungsgrades der Zwickelräume durch Feinmaterial
• Sphärizität SPHT [-]	Kornformparameter zur Beschreibung des Partikelumfangs und der projizierten Teilchenfläche Kehrwert der Sphärizität: 1/ SPHT
• Cirkularität C [-]	Kornformkennwert zur Beschreibung des Verhältnisses der größten Länge und Breite eines Partikels
• Quotient L/B [-]	

Interpartikuläre Kräfte (DLVO-Theorie: $V_T = V_A + V_B + V_R + V_S$):

- Interpartikulare Kraft V_T [N] Summe aller wirkenden interpartikulären Kräfte
- Van-der-Waals-Kraft V_A [N] Anziehungskräfte zwischen Molekülen infolge ungleich-
- Born'sche Abstoßung V_B [N] mäßiger Ladungsverteilung innerhalb der Elektronenhülle
oder Abstoßungskraft bei sehr kleinen Partikelabständen
- Elektrostatische Abstoßung V_R [N] direktem Partikelkontakt
abstoßende elektrische Oberflächenladung in einem polaren Medium
- Sterische Abstoßung V_S [N] Abstoßungskraft infolge Verformungsbehinderung der Seitenketten von Makromolekülen

10.2 Versuche zur Verdichtungswilligkeit der Kalk-Sand-Rohmassen

Serie	Sand- sorte	CaO- Dosis	Art des Fließ- mittels	Fließ- mittel- dosis	Press- feuchte	Schütt- dichte geschüttet	Schütt- dichte-R (gerüttelt)	Schütt- dichte- differenz
-	M.-%	-	M.-%	M.-%	kg/dm ³	kg/dm ³	kg/dm ³	kg/dm ³
2	Mittel- sand	5		0	5	0,868	1,470	0,602
3		7		0	5	0,888	1,430	0,542
4		9		0	5	1,095	1,404	0,309
5		7		0	6	0,796	1,510	0,714
6		7		0	7	0,848	1,590	0,742
7		7		0	8	1,058	1,730	0,672
41b		7	Polycar- boxylat- ether B	1	5	0,874	1,447	0,573
42b	Fein- sand	7		3	5	0,976	1,484	0,508
43b		7		5	5	0,894	1,487	0,587
48		5		0	5	0,865	1,487	0,618
49		7		0	5	0,908	1,400	0,492
50		9		0	5	1,140	1,390	0,290
51		7		0	6	0,823	1,450	0,627
52		7		0	7	0,854	1,580	0,726
53		7		0	8	0,997	1,660	0,663
87b		7	Polycar- boxylat- ether B	1	5	0,795	1,445	0,650
88b		7		3	5	0,770	1,470	0,700
89b		7		5	5	0,746	1,485	0,699
94	Grob- sand	5	ohne	0	5	0,966	1,610	0,644
95		7		0	5	0,853	1,480	0,627
96		9		0	5	1,050	1,430	0,380
97		7		0	6	0,830	1,510	0,680
98		7		0	7	0,890	1,530	0,640
99		7		0	8	1,000	1,760	0,760
130		7	Tensid BV 8	1	5	0,968	1,467	0,499
131		7		3	5	0,938	1,584	0,646
132		7		5	5	0,923	1,559	0,636
133a		7	Polycar- boxylat- ether A	1	5	0,916	1,547	0,631
134a		7		3	5	0,957	1,553	0,596
135a		7		5	5	0,988	1,496	0,508
133b		7	Polycar- boxylat- ether B	1	5	0,928	1,468	0,540
134b		7		3	5	0,896	1,493	0,597
135b		7		5	5	0,874	1,549	0,675

Tabelle 10.1: Zusammenstellung der Ergebnisse zur Verdichtungswilligkeit der Kalk-Sand-Rohmischungen (Mittelwerte aus zwei Einzelwerten)

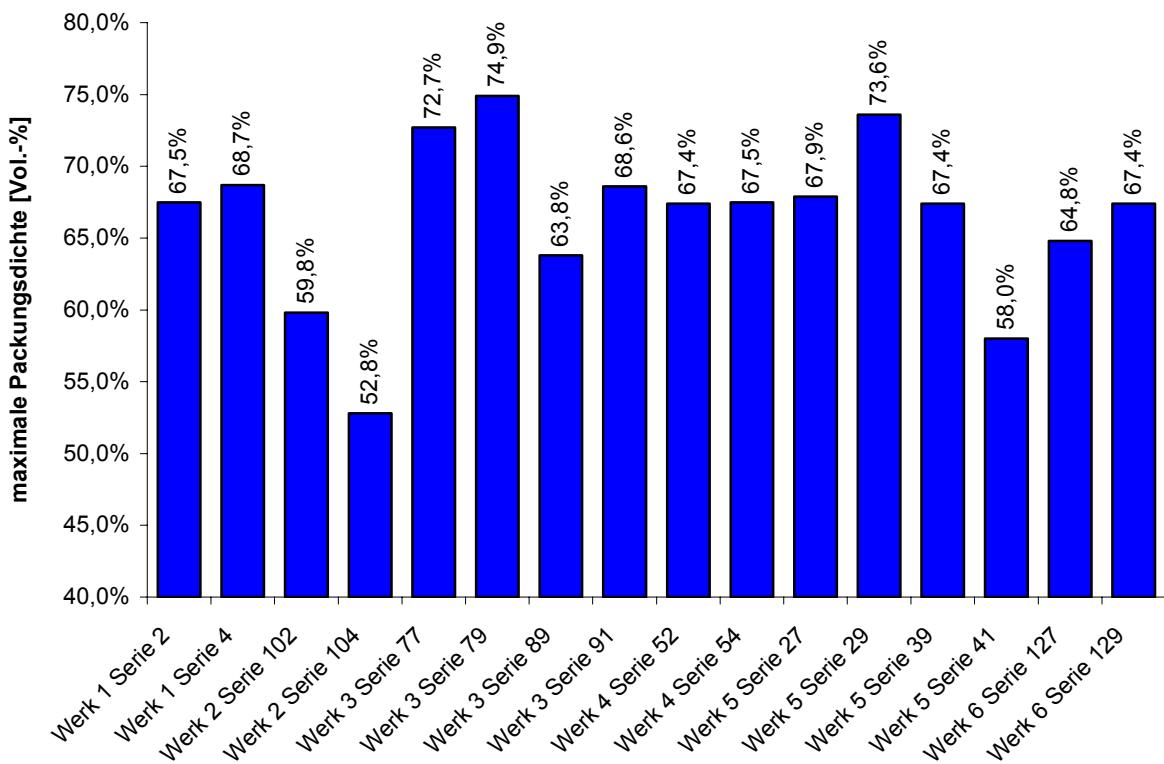


Bild 10.1: Maximale Packungsdichten der Rüttelproctor-Versuche

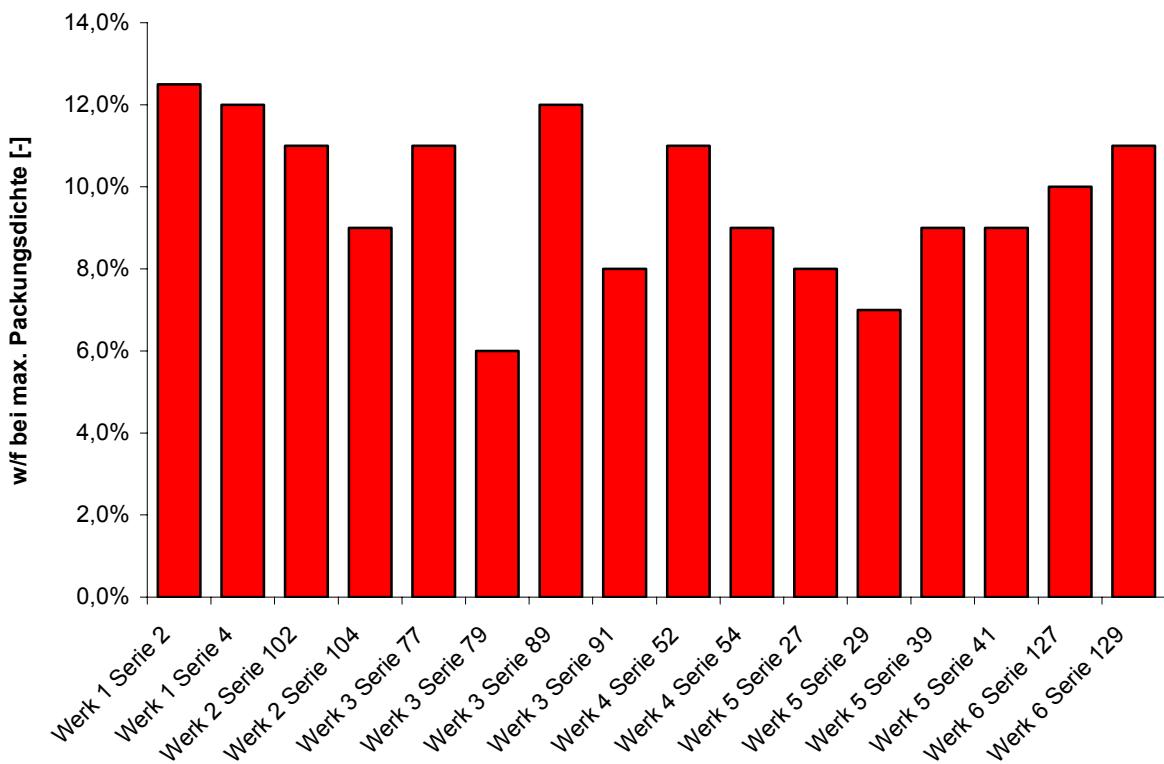


Bild 10.2: Optimale Wasser-Feststoff-Verhältnisse der Proctorversuche

10.3 Ergebnisse zum Teil 1 der Untersuchungen

Sandsorte / Mischung		Quarzmehl W3	Feinsand G12	Mittelsand N	Grobsand B
Schüttdichte, geschüttet	kg/dm ³	1,37	1,44	1,46	1,56
Schüttdichte, gerüttelt	kg/dm ³	1,54	1,61	1,59	1,66
Schüttdichtedifferenz	kg/dm ³	0,17	0,17	0,13	0,1
Spezifische Oberfläche	cm ² /g	304	182	141	42
Siebanalyse	X-Daten	Summe D	Summe D	Summe D	Summe D
< 0,036 mm	0	0,0	0,0	0,0	0,0
> 0,036 mm	0,036	13,0	0,0	0,2	0,2
> 0,063 mm	0,063	38,0	0,2	1,1	0,7
> 0,112 mm	0,112	64,0	1,6	6,4	2,8
> 0,2 mm	0,2	92,0	17,4	39,9	10,5
> 0,355 mm	0,355	100,0	97,1	77,7	28,1
> 0,63 mm	0,63	100,0	99,9	94,9	51,4
> 1,12 mm	1,12	100,0	100,0	98,2	70,6
> 2 mm	2	100,0	100,0	99,0	85,8
> 3,55 mm	3,55	100,0	100,0	99,6	95,3
> 6,3 mm	6,3	100,0	100,0	100,0	100,0

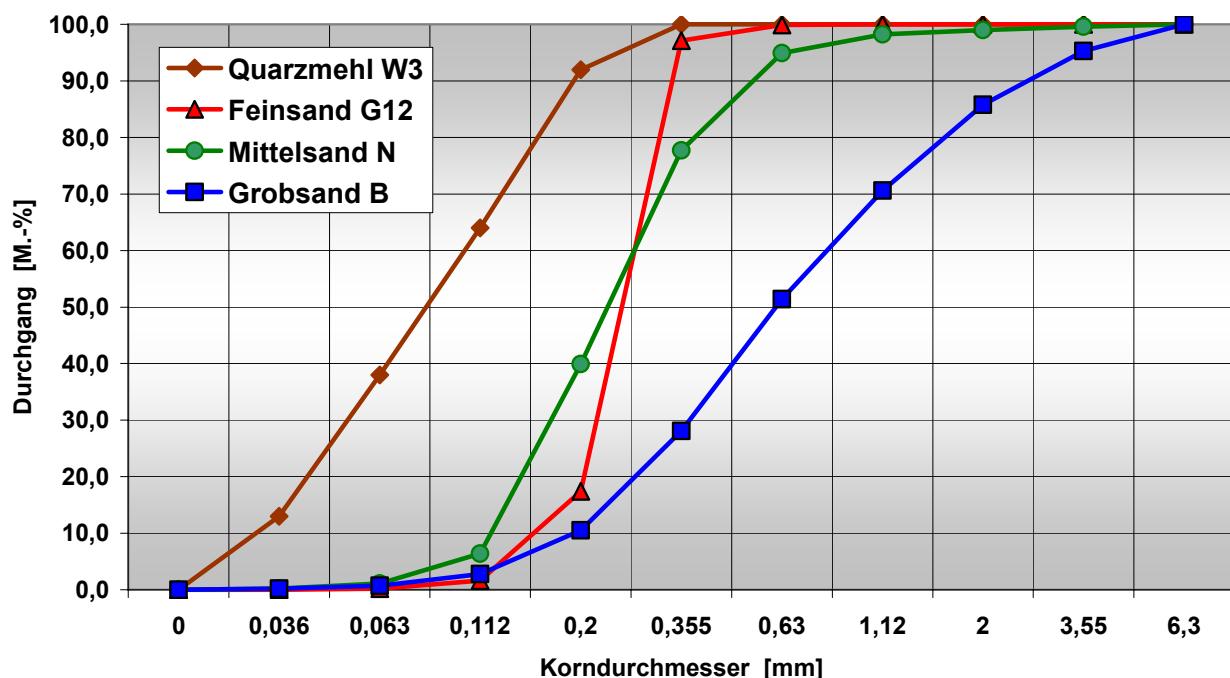


Tabelle 10.2 und Bild 10.3: Physikalische Kennwerte der Sande:

Parameter	Einheit	Branntkalk CL 90	Kalksteinmehl
Glühverlust	M.-%	-	35,5
davon CO ₂	M.-%	-	34,0
SiO ₂	M.-%	0,97	13,7
Al ₂ O ₃	M.-%	0,34	3,9
Fe ₂ O ₃	M.-%	0,22	1,3
Mn ₃ O ₄	M.-%	0,03	-
SO ₃	M.-%	0,12	-
CaO	M.-%	96,6	43,1
MgO	M.-%	0,63	0,6
SO ₃	M.-%	-	0,5
K ₂ O	M.-%	-	0,68
Na ₂ O	M.-%	-	0,10
Cl	M.-%	-	≤ 0,01
CaCO ₃ aus CaO berechnet	M.-%	-	77,1
CO ₂	M.-%	0,50	-
t ₆₀ -Wert	min	4,6	-
T _{max}	°C	75,1	-

Tabelle 10.3a: Chemische Zusammensetzung des Kalkes und des Kalksteinmehls (RFA)

Bezeichnung des Gesteinskörnungen	CaO	MgO	SiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	K ₂ O	Cl	GLV
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
KSM 1	45,06	0,59	10,75	0,08	1,31	3,56	0,11	0,57	0,00	37,62
KSM 2	54,64	0,61	0,98	0,02	0,15	0,10	0,04	0,03	0,00	43,48
Quarzmehl W3	0,00	0,00	99,68	0,00	0,01	0,09	0,01	0,03	0,00	0,12
Grauwacke Füller 0/0,9	1,68	2,27	66,61	0,28	5,46	13,07	0,22	3,44	0,00	4,62
Grauwacke 0/2mm	0,52	1,81	72,32	0,02	5,04	11,82	0,02	2,98	0,00	3,40
Quarzsand G12	0,01	0,00	99,34	0,00	0,18	0,11	0,04	0,03	0,00	0,08
Quarzsand S40 T	0,00	0,00	99,62	0,00	0,24	0,13	0,02	0,03	0,00	0,10
Quarzsand S2-3,5T	0,11	0,00	98,31	0,00	0,43	0,63	0,02	0,11	0,00	0,42
RC-Splitt 2/5 mm	0,47	0,61	72,77	0,00	2,40	12,07	0,02	5,84	0,00	1,25
Feinsand R 0/0,3 mm	0,00	0,00	97,05	0,00	0,36	1,48	0,02	0,06	0,00	0,67
Feinsand N 0/2 mm	0,00	0,00	96,76	0,00	0,36	1,69	0,02	0,92	0,00	0,31
Mittelsand S 0/2 mm	0,00	0,00	95,77	0,00	0,38	2,09	0,02	1,63	0,00	0,24
Grobsand B 0/4 mm	0,65	0,10	89,12	0,00	0,92	4,95	0,03	2,09	0,00	0,69
Basaltsand T 0/2 mm	10,80	14,96	42,88	0,00	12,93	10,15	0,23	1,03	0,00	1,26

Tabelle 10.3b: Chemische Zusammensetzung der Gesteinskörnung (RFA)

Serie	Stufe	Schritt	Zusatz-sand-sorte	CaO-Dosis	Art des Fließ mittels	Fließ mittel-dosis	Press-feuchte	Press-druck	Press-dauer	Rohlings-stand-fest.	tp	Stein-roh-dichte	Stein-druck-festig-keit	Frost-wider-stand (Anzahl)	Was-ser-auf-nahme	DTA Ca(OH) ₂	
			M.-%	M.-%		M.-%	M.-%	N/mm ²	s	N/mm ²		kg/dm ³	N/mm ²	n	M.-%	M.-%	
1		1 (Werk)	-	7,2	-	0	5,5	12	-	-	1,83	26,8	-	-	-	-	
2		-	5	-	0	5	15	30	0,07	1,75	15,5	<25	13,6	0,0	0,0	-	
3		2 (Variation der statistischen Verdichtungsparameter)	-	7	-	0	5	15	30	0,11	1,78	26,4	25	13,5	0,0	0,0	
4		-	9	-	0	5	15	30	0,18	1,78	33,3	50	13,7	0,2	0,2	-	
5		-	7	-	0	6	15	30	0,09	1,78	23,0	<25	13,5	0,0	0,0	-	
6		-	7	-	0	7	15	30	0,06	1,77	21,0	<25	14,2	0,0	0,0	-	
7		-	7	-	0	8	15	30	0,05	1,76	18,0	<25	14,2	0,0	0,0	-	
8		-	7	-	0	10	30	0,11	1,75	23,0	25	14,1	0,0	0,0	0,0	-	
9		-	7	-	0	5	20	30	0,12	1,80	27,4	50	12,8	0,4	0,4	-	
10		-	7	-	0	5	15	3	0,10	1,79	25,6	25	13,3	0,0	0,0	-	
11		-	7	-	0	5	15	60	0,11	1,78	26,2	50	13,3	0,0	0,0	-	
12		-	7	-	0	6	15	3	0,08	1,78	24,2	<25	13,5	0,0	0,0	-	
13		3 (Kombination der statistischen Verdichtungsparameter)	-	7	-	0	6	15	60	0,08	1,79	24,0	<25	13,4	0,0	0,0	-
14		-	7	-	0	6	10	3	0,08	1,76	22,2	<25	14,0	0,0	0,0	-	
15		-	7	-	0	6	10	60	0,09	1,76	23,0	<25	14,0	0,0	0,0	-	
16		-	7	-	0	7	15	3	0,06	1,77	20,7	<25	13,9	0,2	0,2	-	
17		-	7	-	0	7	10	60	0,05	1,74	19,3	<25	14,6	0,0	0,0	-	
18		-	7	-	0	7	10	3	0,04	1,75	17,4	<25	14,1	0,2	0,2	-	
19		-	7	-	0	7	15	60	0,06	1,78	22,2	<25	13,4	0,2	0,2	-	
20		-	7	-	0	8	15	3	0,03	1,76	18,1	<25	14,0	0,0	0,0	-	
21		-	7	-	0	8	10	60	0,03	1,74	16,5	<25	14,4	0,0	0,0	-	
22		-	7	-	0	8	10	3	0,03	1,74	17,6	<25	14,5	0,2	0,2	-	
23		-	7	-	0	8	15	60	0,03	1,76	18,8	<25	14,1	0,0	0,0	-	
24		4 (Füller und Zusatzstoffe)	Q 10	7	-	0	5	15	30	0,14	1,81	30,5	50	12,6	0,0	0,0	-
25		-	KSM 10	7	-	0	5	15	30	0,23	1,84	30,9	50	12,8	0,2	0,2	-
26		-	Q 15	7	-	0	5	15	30	0,14	1,82	31,3	50	12,6	0,0	0,0	-
27		-	KSM 15	7	-	0	5	15	30	0,30	1,88	29,7	50	12,4	0,3	0,3	-
28		-	5 (Extrem-werte Press-druck)	7	-	0	10	ca. 8	30	0,02	1,74	16,8	<25	14,8	0,2	0,2	-
29		-	7	-	0	15	ca. 8	30	0,04	1,83	24,3	<25	12,9	0,2	0,2	-	
30		-	7	-	0	10	ca. 32	30	0,04	1,83	24,3	<25	12,9	0,2	0,2	-	
31		-	7	-	0	15	ca. 32	30	0,04	1,83	24,3	<25	12,9	0,2	0,2	-	

Tabelle 10.4: Versuchssätze zum Mittelsand N

Serie	Stufe	Schritt	Zusatz-sand-sorte	CaO-Dosis	Art des Fließmittels	Fließ-mittel-dosis	Press-feuchte	Press-druck	Press-dauer	Roh-lings-stand-fest.	Stein-roh-dichte	Stein-druck-festig-keit	Frost-wider-stand (Anzahl)	Wasser-auf-nahme	DTA Ca(OH) ₂
			M.-%	M.-%		M.-%	M.-%	N/mm ²	s	N/mm ²	kg/dm ³	N/mm ²	n	M.-%	M.-%
38			-	7	BV 8	1	5	15	30	0,08	1,79	24,7	<25	15,1	0,0
39	Einsatz von	6 (Zugabe von Fließmitteln)	-	7	Tensid	3	5	15	30	0,07	1,79	25,1	<25	15,0	0,0
40			-	7		5	5	15	30	0,08	1,79	24,4	25	14,7	0,0
41a	Fließmittel 2		-	7	Polycarbonylat-ether	1	5	15	30	0,11	1,79	24,2	25	14,4	0,0
42a			-	7		3	5	15	30	0,09	1,73	20,8	<25	16,0	0,0
43a	Labor-versuche		-	7	A	5	5	15	30	0,09	1,73	21,8	25	16,1	0,0
41b			-	7	Polycarbonylat-ether	1	5	15	30	0,10	1,72	20,9	25	16,2	0,0
42b			-	7		3	5	15	30	0,10	1,72	20,9	<25	16,6	0,0
43b			-	7	B	5	5	15	30	0,09	1,73	20,7	25	16,6	0,2

Tabelle 10.4: Versuchsansätze zum Mittelsand N (Fortsetzung)

Serie	Stufe	Schritt	Zusatz-sand-sorte	CaO-Dosis	Art des Fließ mittels	Fließ mittel-dosis	Press-feuchte	Press-druck	Press-dauer	Roh-lings-stand-fest.	Stein-roh-dichte	Frost-wider-stand-(Anzahl)	Wasser-auf-nahme	DTA Ca(OH) ₂
			M.-%	M.-%		M.-%	N/mm ²	N/mm ²	s	kg/dm ³	N/mm ²	n	M.-%	M.-%
47		1 (Werk)	-	6,8	-	0	-	11	-	-	1,68	22,4	-	-
48			-	5	-	0	5	15	30	0,03	1,63	16,1	25	17,0
49	2 (Variation der statischen Verdichtungsparameter)	-	7	-	0	5	15	30	0,06	1,65	19,1	50	16,0	0,2
50			9	-	0	5	15	30	0,09	1,67	17,3	25	15,6	0,7
51			7	-	0	6	15	30	0,05	1,66	20,0	50	16,3	0,2
52			7	-	0	7	15	30	0,04	1,66	21,5	50	16,1	0,3
53			7	-	0	8	15	30	0,03	1,65	17,9	50	16,7	1,1
54			7	-	0	5	10	30	0,05	1,63	18,2	50	16,8	0,2
55			7	-	0	5	20	30	0,07	1,68	21,9	50	15,6	0,3
56	Optimierung der Verdichtungsparameter	-	7	-	0	5	15	3	0,05	1,64	18,6	50	16,4	0,3
57			7	-	0	5	15	60	0,05	1,64	19,3	50	16,3	0,4
58	3 (Kombination der statischen Verdichtungsparameter)	-	7	-	0	6	15	3	0,05	1,65	21,8	50	16,4	0,3
59			7	-	0	6	15	60	0,05	1,65	20,9	50	16,4	0,3
60			7	-	0	6	10	3	0,04	1,63	19,8	50	16,9	0,3
61			7	-	0	6	10	60	0,04	1,63	20,2	50	17,0	0,3
62			7	-	0	7	15	3	0,04	1,66	22,1	25	16,3	0,3
63	1		7	-	0	7	10	60	0,04	1,63	20,5	50	17,0	0,4
64			7	-	0	7	10	3	0,04	1,64	21,6	<25	16,8	0,3
65			7	-	0	7	15	60	0,04	1,65	22,6	50	16,6	0,3
66	Labor-Versuche	-	7	-	0	8	15	3	0,03	1,65	19,9	50	16,8	0,2
67			7	-	0	8	10	60	0,02	1,63	17,3	50	17,4	0,7
68			7	-	0	8	10	3	0,02	1,63	16,5	50	17,3	0,9
69			7	-	0	8	15	60	0,03	1,65	18,6	50	16,9	1,0
70			7	-	0	5	15	30	0,08	1,70	26,6	50	15,8	0,0
71	4 (Füller und Zusatzstoffe)	KSM 10	7	-	0	5	15	30	0,15	1,74	26,5	50	14,5	0,0
72		Q 15	7	-	0	5	15	30	0,10	1,73	28,3	50	15,2	0,0
73		KSM 15	7	-	0	5	15	30	0,21	1,79	25,5	50	14,0	0,2
74	5 (Extrem-werte Press-druck)	-	7	-	0	10	ca. 8	30	0,02	1,64	15,2	<25	18,0	1,1
75			7	-	0	15	ca. 8	30	0,03	1,73	18,2	<25	15,7	1,6
76			7	-	0	10	ca. 32	30	0,03	1,73	18,2	<25	15,7	1,6
77			7	-	0	15	ca. 32	30	0,02	1,64	15,2	<25	18,0	1,1

Tabelle 10.4: Versuchssansätze zum Feinsand G12 (Fortsetzung)

Serie	Stufe	Schritt	Zusatz-sand-sorte	CaO-Dosis	Art des Fließ mittels	Fließ mittel-dosis	Press feuchte	Press druck	Press dauer	Roh lings stand fest.	Stein roh dichte	Frost wider stand (Anzahl)	Wasser auf nahme	DTA Ca(OH) ₂
			M.-%	M.-%		M.-%	N/mm ²	N/mm ²	s	N/mm ²	N/mm ²	n	M.-%	M.-%
84			-	7	BV 8	1	5	15	30	0,04	1,65	19,0	50	18,0
85	Einsatz von Fließmitteln	6 (Zugabe von Fließ mitteln zur Kalksand-Rohmasse)	-	7	Tensid	3	5	15	30	0,03	1,66	15,7	50	17,7
86			-	7		5	5	15	30	0,03	1,66	14,6	50	17,7
87a			-	7	Polycarboxylat-ether A	1	5	15	30	0,05	1,65	18,5	50	17,3
88a			-	7	Polycarboxylat-ether B	3	5	15	30	0,05	1,65	18,3	50	17,9
89a			-	7		5	5	15	30	0,06	1,65	17,0	50	17,9
87b			-	7		1	5	15	30	0,05	1,66	16,6	50	17,4
88b			-	7		3	5	15	30	0,05	1,66	15,5	25	17,9
89b			-	7		5	5	15	30	0,06	1,66	16,6	25	17,8

Tabelle 10.4: Versuchssätze zum Feinsand G12 (Fortsetzung)

Serie	Stufe	Schritt	Zusatz-sand-sorte	CaO-Dosis	Art des Fließ mittels	Fließ mittel-dosis	Press-feuchte	Press-druck	Press-dauer	Roh-lings-stand-fest.	Stein-roh-dichte	Frost-wider-stand-(Anzahl)	Wasser-auf-nahme	DTA Ca(OH) ₂
			M.-%	M.-%		M.-%	N/mm ²	N/mm ²	s	kg/dm ³	N/mm ²	n	M.-%	M.-%
93		1 (Werk)x)	-	7,4	-	0	5,6	10	-	1,82	35,7	-	-	-
94			-	5	-	0	5	15	30	0,09	1,85	21,0	25	12,6
95		2 (Variation der statischen Verdichtungsparameter)	-	7	-	0	5	15	30	0,14	1,85	24,7	50	12,3
96			-	9	-	0	5	15	30	0,21	1,86	25,4	50	11,9
97			-	7	-	0	6	15	30	0,14	1,88	28,2	50	11,8
98			-	7	-	0	7	15	30	0,12	1,89	31,1	50	11,8
99			-	7	-	0	8	15	30	0,10	1,88	29,3	50	12,3
100			-	7	-	0	5	10	30	0,12	1,81	21,4	50	13,2
101			-	7	-	0	5	20	30	0,18	1,89	28,0	50	11,4
102		Optimierung der Verdichtungsparameter	-	7	-	0	5	15	3	0,15	1,85	24,4	50	12,3
103			-	7	-	0	5	15	60	0,16	1,85	24,9	50	12,3
104			-	7	-	0	6	15	3	0,14	1,89	29,8	50	11,6
105		3 (Kombination der statischen Verdichtungsparameter)	-	7	-	0	6	15	60	0,14	1,88	27,7	50	11,9
106			-	7	-	0	6	10	3	0,12	1,86	29,1	25	12,2
107			-	7	-	0	6	10	60	0,13	1,86	28,9	50	12,0
108			-	7	-	0	7	15	3	0,13	1,90	35,1	50	11,4
109		1 Labor-Versuche	-	7	-	0	7	10	60	0,11	1,87	30,4	25	12,1
110			-	7	-	0	7	10	3	0,10	1,86	31,0	<25	12,5
111			-	7	-	0	7	15	60	0,13	1,90	33,9	50	11,5
112			-	7	-	0	8	15	3	0,11	1,91	37,1	50	11,7
113			-	7	-	0	8	10	60	0,10	1,87	31,4	50	12,3
114			-	7	-	0	8	10	3	0,09	1,86	30,8	25	12,6
115			-	7	-	0	8	15	60	0,12	1,89	33,2	50	12,0
116		4 (Füller und Zusatzstoffe)	-	7	-	0	5	15	30	0,20	1,91	36,1	50	10,6
117			KSM 10	7	-	0	5	15	30	0,29	1,90	23,3	50	11,7
118			Q 15	7	-	0	5	15	30	0,22	1,92	39,9	50	10,8
119			KSM 15	7	-	0	5	15	30	0,38	1,93	20,8	25	11,6
120		5 (Extrem-werte Press-druck)	-	7	-	0	10	ca. 8	30	0,08	1,86	33,7	25	12,8
121			-	7	-	0	15	ca. 8	30	0,16			Prüfkörpernicht herstellbar	0,2
122			-	7	-	0	10	ca. 32	30	0,16			Prüfkörpernicht herstellbar	
123			-	7	-	0	15	ca. 32	30					

x) Werkseitig optimierte Sandmischung

Tabelle 10.4: Versuchssätze zum Grobsand B (Fortsetzung)

Serie	Stufe	Schrift	Zusatz-sand-sorte	CaO-Dosis	Art des Fließ mittels	Fließ mittel-dosis	Press feuchte	Press druck	Press dauer	Roh lings stand fest.	Stein roh dichte	Frost wider stand (Anzahl)	Wasser auf nahme	D ^T A Ca(OH) ₂
			M.-%	M.-%		M.-%	N/mm ²	N/mm ²	s	N/mm ²	N/mm ²	n	M.-%	M.-%
130	6	-	7	BV 8 Tensid	1	5	30	0,14	1,88	28,3	50	11,7	0,3	
131	Einsatz von	-	7	-	3	5	30	0,13	1,89	28,2	50	11,6	0,4	
132	Fließmitteln	-	7	-	5	5	30	0,11	1,86	24,5	50	11,8	0,5	
133a	2	-	7	Polycarboxylat ether A	1	5	30	0,16	1,88	29,1	50	11,6	0,4	
134a	Labor versuche	-	7	-	3	5	30	0,15	1,89	29,3	50	11,8	0,3	
135a		-	7	-	5	5	30	0,15	1,90	29,6	50	11,7	0,2	
133b		-	7	-	1	5	30	0,16	1,90	29,7	50	11,6	0,3	
134b		-	7	Polycarboxylat ether B	3	5	30	0,15	1,90	30,9	50	11,6	0,4	
135b		-	7	-	5	5	30	0,15	1,87	22,3	25	12,0	0,6	
136b		-	7	-	3	5	20	0,16	1,89	26,8	50	11,6	0,5	
137b		Q15	7	-	3	5	15	0,20	1,93	41,0	50	11,3	0,0	
138b		-	7	-	3	5	15	0,14	1,85	24,3	50	12,4	0,5	

Tabelle 10.4: Versuchssätze zum Grobsand B (Fortsetzung)

Serie	Zielprodukt	Sand-mischung	CaO-dosis	Fleiß-mittel-dosis PCE B	Press-feuchte	Press-druck	Stein-roh-dichte	Stein-druck-festig-keit N/mm ²
		M.-%	M.-%	M.-%	F _p	□ _p	ρ _{tr}	β _{D,St}
						bar	kg/dm ³	
139		81	9	0	4,53	160	1,29	23,9
140		81	9	0	4,53	180	1,31	27,6
141	KS-L-R 20-1,4-8DF 248 x 240 x 238	81	9	0	4,53	200	1,32	28,0
144		81	9	1	4,53	160	1,30	26,2
145		81	9	1	4,53	180	1,32	27,7
146		81	9	1	4,53	200	1,34	29,2
148		81	9	2	4,53	160	1,31	26,0
149		81	9	2	4,53	180	1,33	27,5
150		81	9	2	4,53	200	1,33	28,9
151		81	9	0	4,53	160	1,80	35,3
152		81	9	0	4,53	180	1,82	39,2
153	KS-R (P) 20-2,0-8DF 248 x 240 x 248	81	9	0	4,53	200	1,85	42,2
156		81	9	1	4,53	160	1,81	39,5
157		81	9	1	4,53	180	1,83	43,1
158		81	9	1	4,53	200	1,84	42,6
160		81	9	2	4,53	160	1,85	44,2
161		81	9	2	4,53	180	1,86	46,1
162		81	9	2	4,53	200	1,87	48,7

Tabelle 10.5: Versuchssätze im Kalksandsteinwerk A

Serie	Sand-mischung	CaO-Dosis	Fließmitteldosis PCE B	Pressfeuchte	Pressdruck	Ziel-taktzeit t_p	Verdichtungsdauer	Rüttler	Steinrohdichte	Steindruckfestigkeit	Frostwiderstand Anzahl n schadenfreier Frost-Tau-Wechsel	Wasser aufnahme	Freikalkgehalt $\text{Ca}(\text{OH})_2$ DTA
	M.-%	M.-%	M.-%	N/mm²	N/mm²	s	s			$\beta_{D,St}$		w	M.-%
163	92,6	7,4	0	5,6	8,4	30	9,6	aus	1,81	32,9	-	-	-
164	92,6	7,4	0	5,4	10,0	30	9,6	aus	1,82	35,7	50	12,7	0,0
165	92,6	7,4	0	5,4	11,6	30	10,6	aus	1,84	38,3	-	-	-
166	92,6	7,4	0	5,4	8,4	30	9,6	Befüllung	1,82	35,4	-	-	-
167	92,6	7,4	0	5,4	8,4	30	9,7	Befüllung und Pressen	1,82	35,9	-	-	-
168	92,6	7,4	0	5,2	10,0	30	9,6	Befüllung und Pressen	1,82	36,8	50	12,5	0,0
169	92,6	7,4	0	5,4	11,6	30	10,6	Befüllung und Pressen	1,83	36,9	-	-	-
170	92,6	7,4	0	5,3	8,4	40	16,2	aus	1,79	32,2	-	-	-
171	92,6	7,4	0	5,3	10,0	40	16,4	aus	1,84	36,5	50	12,5	0,0
172	92,6	7,4	0	5,1	11,6	40	16,3	aus	1,84	36,7	-	-	-
173	92,6	7,4	1	5,1	8,4	30	9,3	aus	1,82	34,7	-	-	-
174	92,6	7,4	1	4,9	10,0	30	9,9	aus	1,83	35,8	50	12,5	0,0-
175	92,6	7,4	1	4,9	11,6	30	12,1	aus	1,86	40,3	-	-	-
176	92,6	7,4	2	5,2	8,4	30	9,6	aus	1,83	34,7	-	-	-
177	92,6	7,4	2	5,3	10,0	30	10,0	aus	1,85	38,1	50	12,3	0,0
178	92,6	7,4	2	5,0	11,6	30	11,4	aus	1,87	39,8	-	-	-

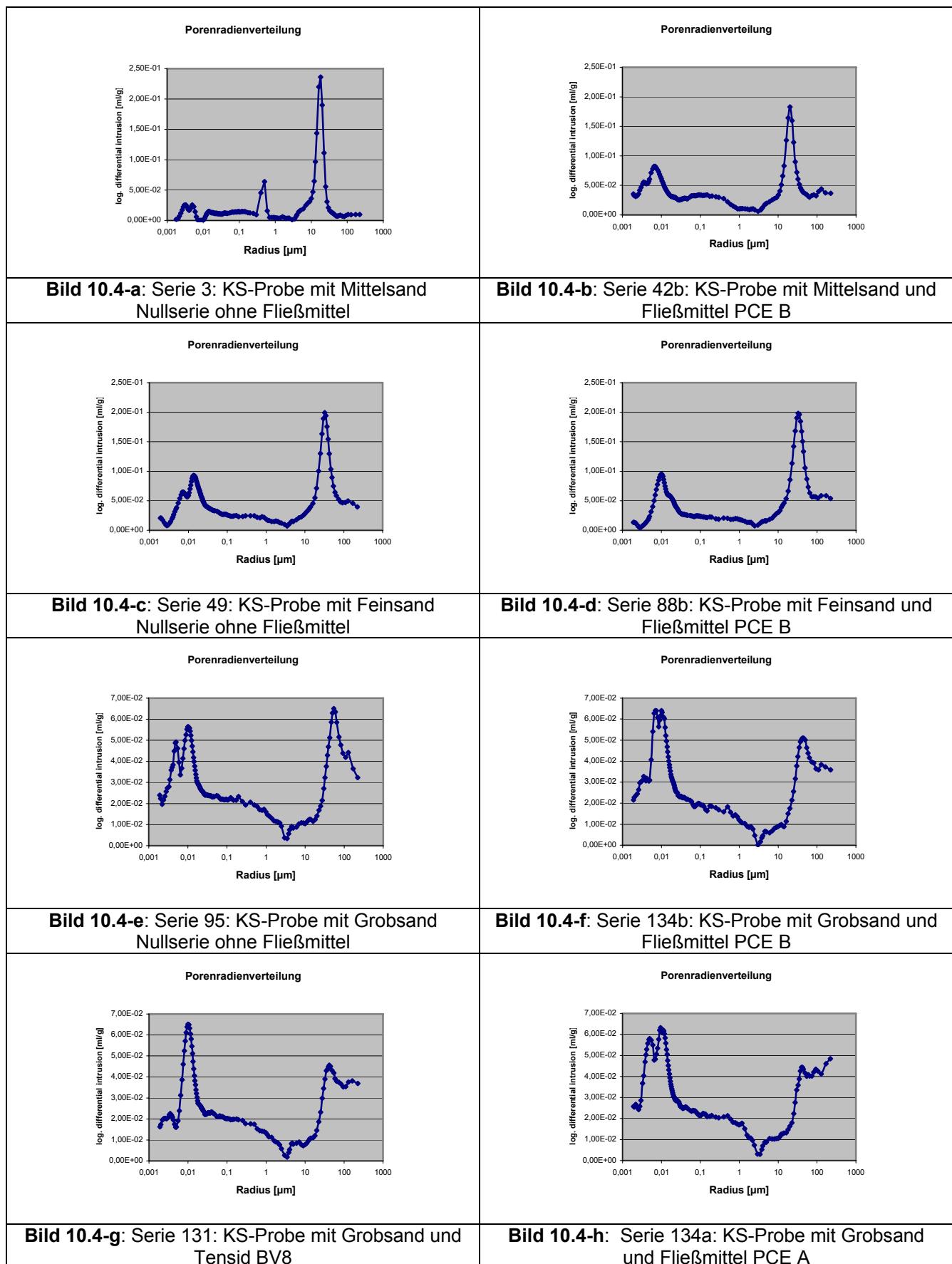
Tabelle 10.5: Versuchssätze im Kalksandsteinwerk B

Serie	Sand 1 Quarz- sand grob	Sand 2 Kies- sand 0/8 mm	Sand 3 Quarz- sand fein	Sand 4 Körnung 2/8 mm	CaO- Dosis	Press- feuchte	Press- druck	Stein- rohdichte, trocken	Stein- druck- festig- keit
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	F _p	σ _p	ρ _{ir}	β _{D,st}
						M.-%	N/mm ²	kg/dm ³	N/mm ²
193	65,1	0	18,6	9,3	7,0	5	15	1,90	34,2
194	74,4	0	9,3	9,3	7,0	5	15	1,90	28,7
195	83,7	0	0	9,3	7,0	5	15	1,87	24,2
196	93,0	0	0	0	7,0	5	15	1,85	24,3
197	65,1	9,3	18,6	0	7,0	5	15	1,88	35,1
200	65,1	0	9,3	18,6	7,0	5	20	1,98	37,0
201	65,1	0	0	27,9	7,0	5	20	2,00	35,9
202	55,8	0	9,3	27,9	7,0	5	20	2,02	41,2

Tabelle 10.6: Vorversuche im Labor mit den Rohstoffen des KS-Werkes C, Zielpunkt: KS-20-2,2-2DF

Serie	Fein- sand	Mittel- sand	Grob sand	Basalt- splitt 4/8 mm	CaO- Dosis	Fließ- mittel- dosis PCE B	Press- feuchte	Press- druck	Verdich- tungszeit	Stein- rohdic- hte	Stein- druck- festig- keit
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	F _p	σ _p	t _p	s	ρ _{ir}	β _{D,st}
						M.-%	N/mm ²	bar	s	kg/dm ³	N/mm ²
181	9,37	23,43	46,85	14,05	6,3	0	9,3	140	6	1,95	37,6
182	9,37	23,43	46,85	14,05	6,3	1	9,3	140	6	1,96	37,2
183	9,37	23,43	46,85	14,05	6,3	2	9,3	140	6	1,98	39,0
184	9,37	23,43	46,85	14,05	6,3	2	9,3	160	6	2,01	39,0

Tabelle 10.7: Versuchssätze im Kalksandsteinwerk C, Zielpunkt: KS XL-RE 20-2,2-498x175x498



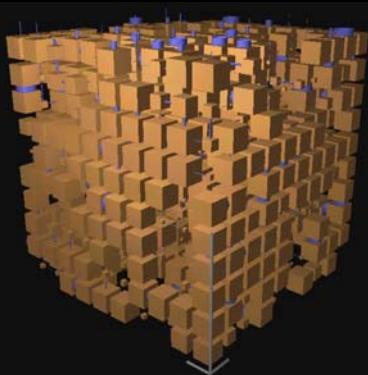


Bild 10.5-a: Serie 3: KS-Probe mit Mittelsand (MS)
Würfelkantenlänge: 2900 µm

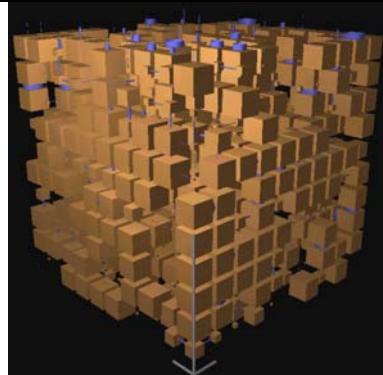


Bild 10.5-b: Serie 42b: KS-Probe mit MS + PCE B
Würfelkantenlänge 2700 µm

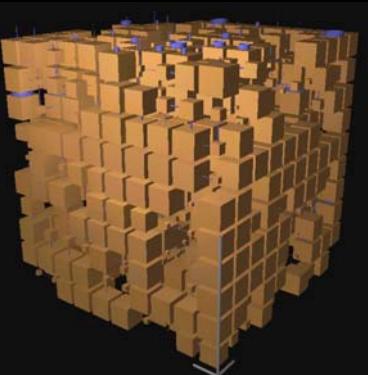


Bild 10.5-c: Serie 49: KS-Probe mit Feinsand (FS)
Würfelkantenlänge 35 µm

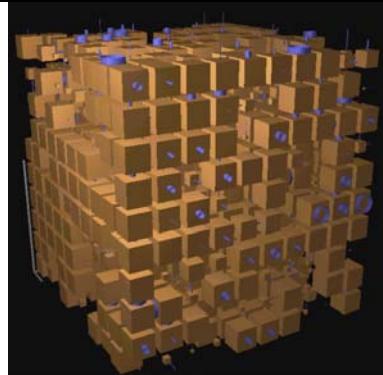


Bild 10.5-d: Serie 88b: KS-Probe mit FS + PCE B
Würfelkantenlänge 31 µm

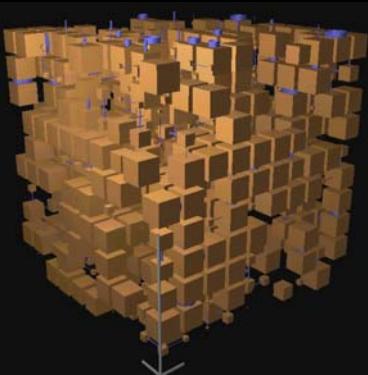


Bild 10.5-e: Serie 95: KS-Probe mit Grobsand (GS)
Würfelkantenlänge 2700 µm

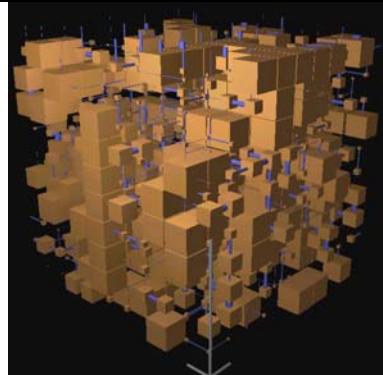


Bild 10.5-f: Serie 134b: KS-Probe mit GS + PCE B
Würfelkantenlänge 2900 µm

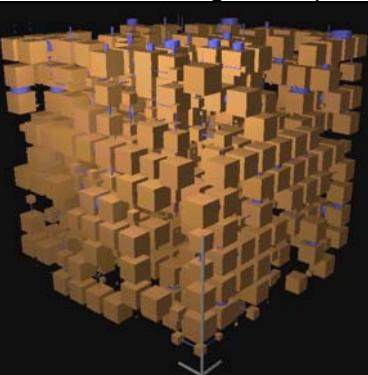


Bild 10.5-g: Serie 131: KS-Probe mit GS + Tensid BV8,
Würfelkantenlänge 2900 µm

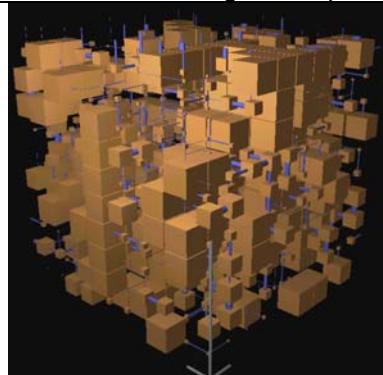


Bild 10.5-h: Serie 134a: KS-Probe mit GS + PCE A
Würfelkantenlänge 2900 µm

Tabelle 11.8: Ergebnisse der Porositätsbestimmung an Kalksandstein-Proben mit Mittelsand

grün = positive Bewertung: Abnahme der Hg-füllbaren Porosität
 rot = negative Bewertung: Zunahme der Hg-füllbaren Porosität

Steinnummer	Steinproben aus der Versuchsreihe AIF 13347									
	Steinbezeichnung		Porosität [Vol.-%]	Luftporen [Vol.-%]	Kapillarporen [Vol.-%]	Gelporen [Vol.-%]	Luftporen relativ [%]	Kapillarporen relativ [%]	Gelporen relativ [%]	Gelporen relativ [%]
	[Vol.-%]	[Vol.-%]								
1	MS / - / 5 / 5 / 15 / 20	30,84	13,16	9,62	8,06	42,68	31,19	26,13	29,39	34,75
2	MS / - / 5 / 5 / 15 / 20	29,42	11,41	9,36	8,65	38,79	32,29	32,95	32,27	34,93
3	MS / - / 5 / 5 / 15 / 20	29,92	9,66	9,86	10,40	37,01	32,60	29,67	32,72	34,64
4	MS / - / 9 / 5 / 15 / 20	31,03	11,49	8,71	10,84	37,91	23,39	23,39	38,70	30,53
5	MS / - / 7 / 6 / 15 / 20	30,81	10,05	9,14	11,63	40,09	33,41	32,24	36,65	31,11
6	MS / - / 7 / 7 / 15 / 20	30,86	11,70	7,22	11,94	34,02	34,02	35,45	30,53	34,93
7	MS / - / 7 / 8 / 15 / 20	30,86	11,70	7,22	11,94	37,91	39,42	39,42	31,30	33,60
8	MS / - / 7 / 5 / 10 / 20	31,81	9,32	12,54	9,96	33,41	32,99	32,99	36,65	32,28
9	MS / - / 7 / 5 / 20 / 20	29,80	9,96	9,83	10,01	36,65	36,65	36,65	36,65	36,65
10	MS / - / 7 / 5 / 15 / 15	30,08	11,03	9,70	9,36	40,09	40,09	40,09	40,09	40,09
11	MS / - / 7 / 5 / 15 / 25	29,82	10,15	10,57	9,10	34,02	34,02	34,02	34,02	34,02
12	MS / - / 7 / 6 / 15 / 15	30,21	11,82	7,84	10,55	39,14	39,14	39,14	39,14	39,14
13	MS / - / 7 / 6 / 15 / 25	30,34	11,31	8,44	10,59	37,27	37,27	37,27	37,27	37,27
14	MS / - / 7 / 6 / 10 / 15	30,50	12,23	8,43	9,85	40,09	40,09	40,09	40,09	40,09
15	MS / - / 7 / 6 / 10 / 25	30,63	11,74	8,89	10,00	38,33	38,33	38,33	38,33	38,33
16	MS / - / 7 / 7 / 15 / 15	29,57	11,46	7,58	10,53	38,76	38,76	38,76	38,76	38,76
17	MS / - / 7 / 10 / 25	31,24	12,32	8,03	10,89	39,45	39,45	39,45	39,45	39,45
18	MS / - / 7 / 10 / 15	31,10	12,72	7,75	10,62	40,91	40,91	40,91	40,91	40,91
19	MS / - / 7 / 7 / 15 / 25	29,95	11,37	8,41	10,17	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96
20	MS / - / 7 / 8 / 15 / 15	30,82	10,64	6,94	13,25	34,51	34,51	34,51	34,51	34,51
21	MS / - / 7 / 10 / 25	30,98	11,36	6,94	12,68	36,68	36,68	36,68	36,68	36,68
22	MS / - / 7 / 10 / 15	31,59	11,64	7,36	12,59	36,85	36,85	36,85	36,85	36,85
23	MS / - / 7 / 8 / 15 / 25	28,90	10,46	6,57	11,88	36,19	36,19	36,19	36,19	36,19
24	MS / Q10 / 7 / 5 / 15 / 20	29,97	10,60	8,94	10,42	35,38	35,38	35,38	35,38	35,38
25	MS / KSM10 / 7 / 5 / 15 / 20	29,09	11,14	8,56	9,39	38,29	38,29	38,29	38,29	38,29
26	MS / Q15 / 7 / 5 / 15 / 20	28,59	10,14	8,55	9,90	35,47	35,47	35,47	35,47	35,47
27	MS / KSM15 / 7 / 5 / 15 / 20	28,97	9,48	9,48	10,01	32,72	32,72	32,72	32,72	32,72
28	MS / - / 7 / 10 / 8 / 20	30,23	10,06	6,26	13,91	33,27	33,27	33,27	33,27	33,27
29	MS / - / 7 / 15 / 8 / 20	32 / 20	28,72	8,66	5,42	14,64	30,16	18,86	18,86	18,86
30	MS / - / 7 / 15 / 32 / 20									
31	MS / - / 7 / 15 / 32 / 20									

FS: Feinsand MS: Mittelsand GS: Grobsand

Q10: Quarzmehl mit einer Zugabemenge von 10 M.-%

Q15: Quarzmehl mit einer Zugabemenge von 15 M.-%

KSM10: Kalksteinmehl mit einer Zugabemenge von 10 M.-%

KSM15: Kalksteinmehl mit einer Zugabemenge von 15 M.-%

PA/PB: Fließmittel: Polycarboxylatether der Sorte A bzw. B

BV8: Fließmittel: Tensid der Sorte BV8

Steinnummer	Steinbezeichnung	Steinproben aus der Versuchsreihe AlF 13347					
		Porosität [Vol.-%]	Luftporen [Vol.-%]	Kapillarporen [Vol.-%]	Gelporen [Vol.-%]	Luftporen relativ [%]	Kapillarporen relativ [%]
48	FS / - / 5 / 5 / 15 / 20	36,93	14,51	12,05	10,37	39,28	32,63
49	FS / - / 7 / 5 / 15 / 20	36,13	17,00	9,17	9,96	47,05	25,38
50	FS / - / 9 / 5 / 15 / 20	35,95	19,23	9,30	7,42	53,48	27,57
70	FS / Q10 / 7 / 5 / 15 / 20	34,09	8,90	12,32	12,87	26,10	25,88
94	GS / - / 5 / 5 / 15 / 20	23,50	8,47	7,66	7,37	36,05	20,64
95	GS / - / 7 / 5 / 15 / 20	25,38	9,00	8,06	8,32	35,45	31,14
96	GS / - / 9 / 5 / 15 / 20	24,96	8,99	8,24	7,72	36,03	31,34
						32,60	32,80
						33,03	30,95

Steinnummer	Steinbezeichnung	Steinproben aus der Versuchsreihe AlF 13347					
		Porosität [Vol.-%]	Luftporen [Vol.-%]	Kapillarporen [Vol.-%]	Gelporen [Vol.-%]	Luftporen relativ [%]	Kapillarporen relativ [%]
42b	MS / 7 / PB / 3 / 5 / 15 / 20	33,72	14,37	9,48	9,88	42,60	28,10
88b	FS / 7 / PB / 3 / 5 / 15 / 20	35,40	18,87	8,19	8,34	53,30	23,10
130	GS / 7 / BV8 / 1 / 5 / 15 / 20	23,48	8,17	7,65	7,67	34,80	23,60
131	GS / 7 / BV8 / 3 / 5 / 15 / 20	22,64	8,03	7,19	7,42	35,50	32,70
133a	GS / 7 / PA / 1 / 5 / 15 / 20	24,01	7,89	7,67	8,45	32,80	32,80
133b	GS / 7 / PB / 1 / 5 / 15 / 20	26,36	8,45	8,09	9,85	32,00	35,20
134a	GS / 7 / PA / 3 / 5 / 15 / 20	22,32	7,81	6,66	7,85	35,00	30,70
134b	GS / 7 / PB / 3 / 5 / 15 / 20	24,32	9,00	8,42	6,90	29,80	35,20
135a	GS / 7 / PA / 5 / 5 / 15 / 20	24,07	8,37	6,56	9,12	34,80	28,40
135b	GS / 7 / PB / 5 / 5 / 15 / 20	23,42	8,87	6,48	8,07	37,90	37,90
					34,60	27,30	34,50
					37,70	34,50	

Tabelle 10.9: Feinsand (links) Ergebnisse der Porositätsbestimmung an Kalksandstein-Proben mit bzw. **Grobsand**
 grün = positive Bewertung: Abnahme der Hg-füllbaren Porosität
 rot = negative Bewertung: Zunahme der Hg-füllbaren Porosität

Tabelle 10.10: (rechts) Ergebnisse der Porositätsbestimmung an Kalksandstein-Proben unter Verwendung von **Fließmittel**
 grün = positive Bewertung: Abnahme der Hg-füllbaren Porosität
 rot = negative Bewertung: Zunahme der Hg-füllbaren Porosität

Legende: gelb: Porenvolumen

weiß: Quarzsandkörner

schwarz: CSH-Phasen

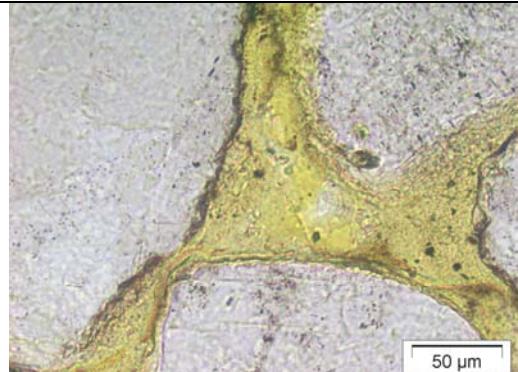
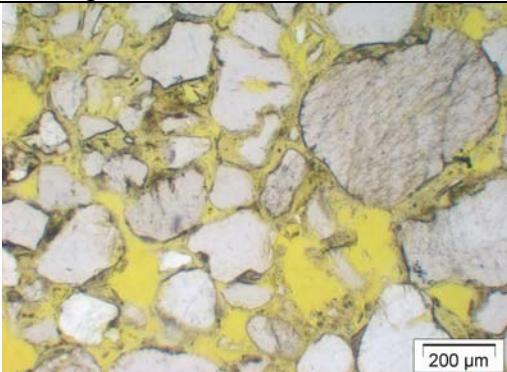


Bild 10.6-a: Serie 3: KS-Probe mit Mittelsand
Übersichtsaufnahme

Bild 10.6-b: Serie 3: KS-Probe mit Mittelsand
Detailaufnahme

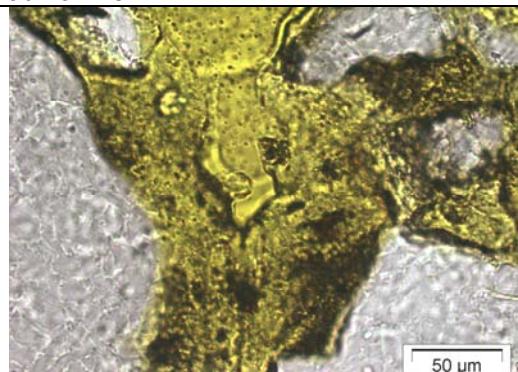
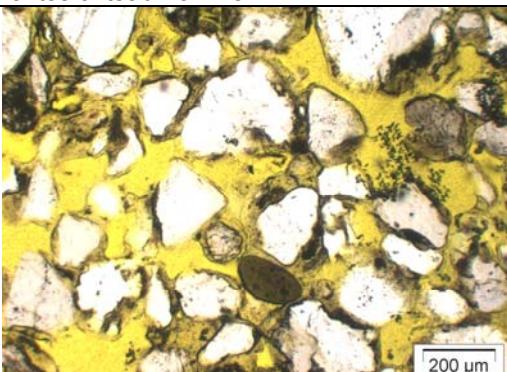


Bild 10.6-c: Serie 42b: KS-Probe mit Mittelsand und
PCE B - Übersichtsaufnahme

Bild 10.6-d: Serie 42b: KS-Probe mit Mittelsand und
Detailaufnahme

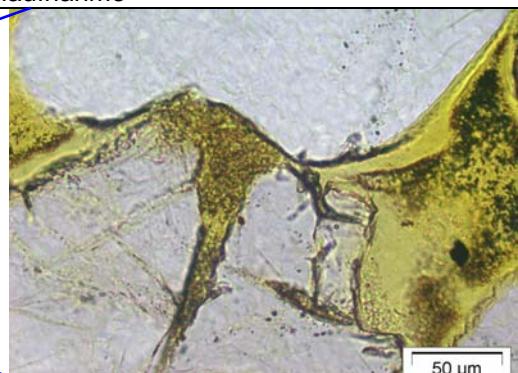
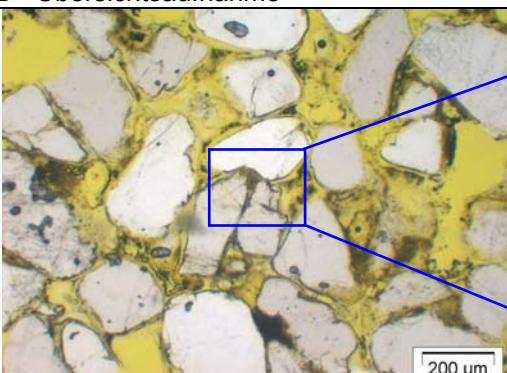


Bild 10.6-e: Serie 49: KS-Probe mit Feinsand
Übersichtsaufnahme

Bild 10.6-f: Serie 49: KS-Probe mit Feinsand
Detailausschnitt

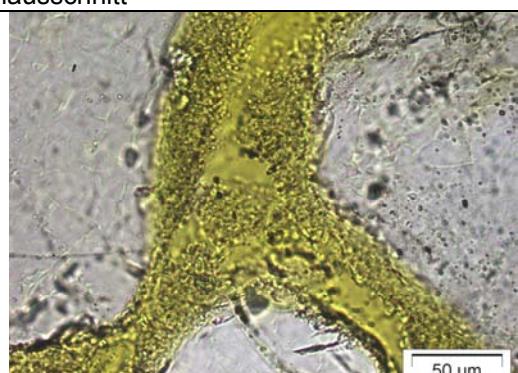
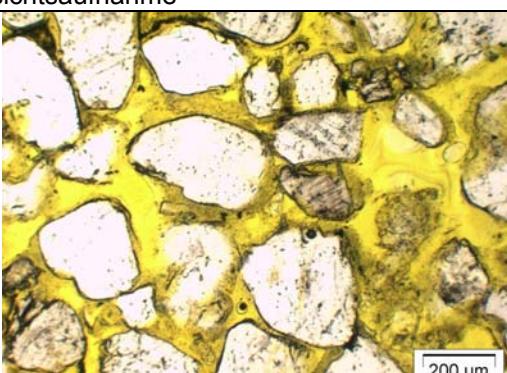


Bild 10.6-g: Serie 88b: KS-Probe mit Feinsand und
PCE B - Übersichtsaufnahme

Bild 10.6-h: Serie 88b: KS-Probe mit Feinsand und
PCE B - Detailaufnahme

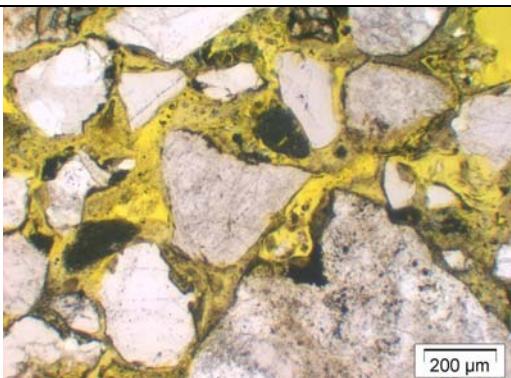


Bild 10.6-i: Serie 95: KS-Probe mit Grobsand
Übersichtsaufnahme

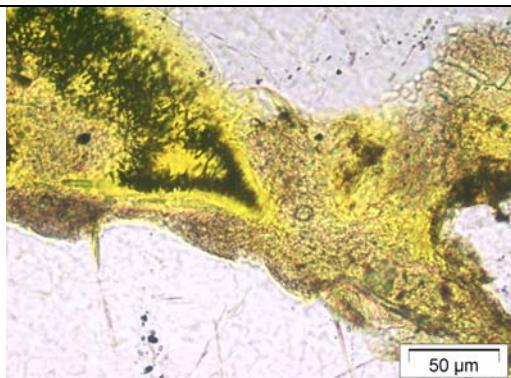


Bild 10.6-j: Serie 95: KS-Probe mit Grobsand
Detailaufnahme

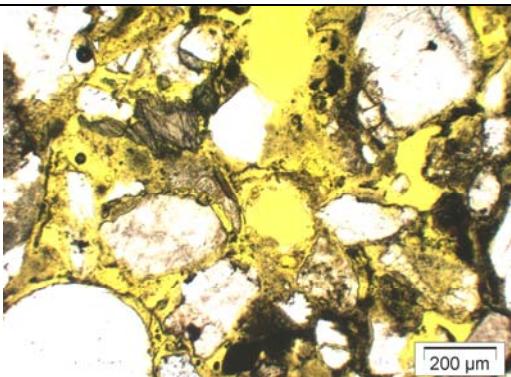


Bild 10.6-k: Serie 95: KS-Probe mit Grobsand
Übersichtsaufnahme Serie 134b: KS-Probe mit
Grobsand und PCE B - Übersichtsaufnahme

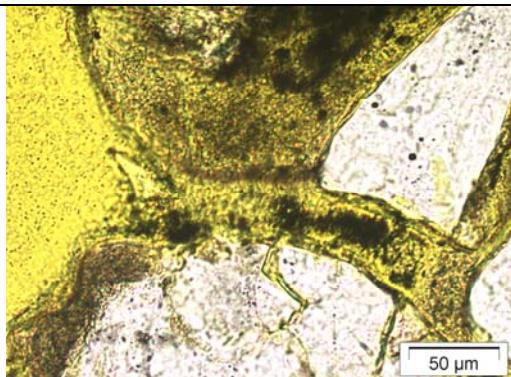


Bild 10.6-l: Serie 95: KS-Probe mit Grobsand
Übersichtsaufnahme Serie 134b: KS-Probe mit
Grobsand und PCE B - Detailaufnahme

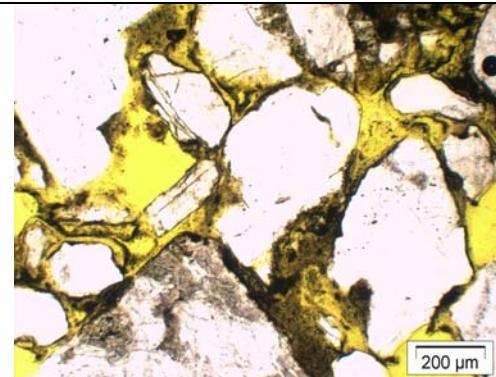


Bild 10.6-m: Serie 131: KS-Probe mit Grobsand und
Tensid B - Übersichtsaufnahme

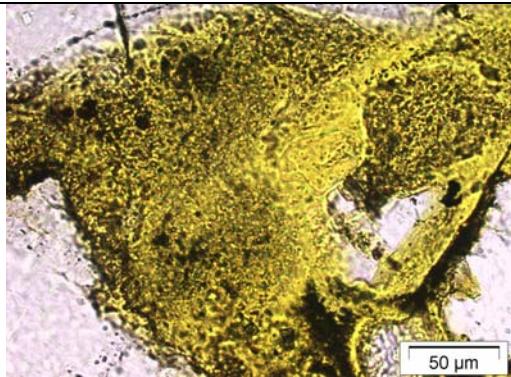


Bild 10.6-n: Serie 131: KS-Probe mit Grobsand und
Tensid B - Detailaufnahme

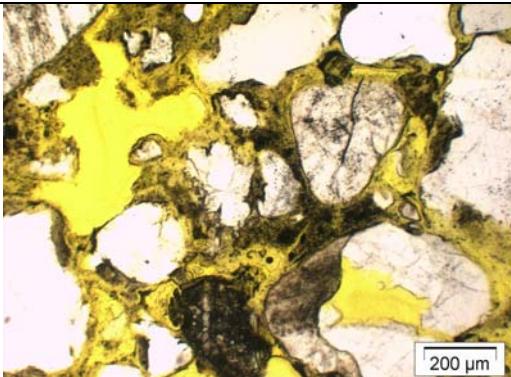


Bild 10.6-o: Serie 134a: KS-Probe mit Grobsand und
PCE A - Übersichtsaufnahme

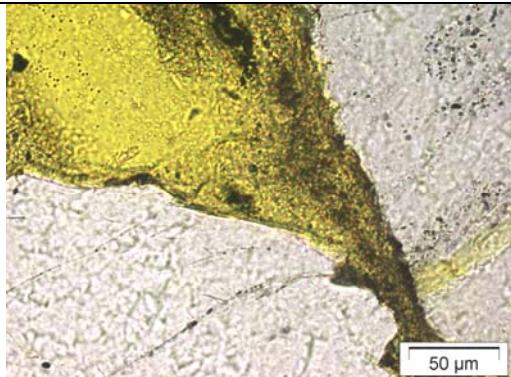


Bild 10.6-p: Serie 134a: KS-Probe mit Grobsand und
PCE A - Detailaufnahme

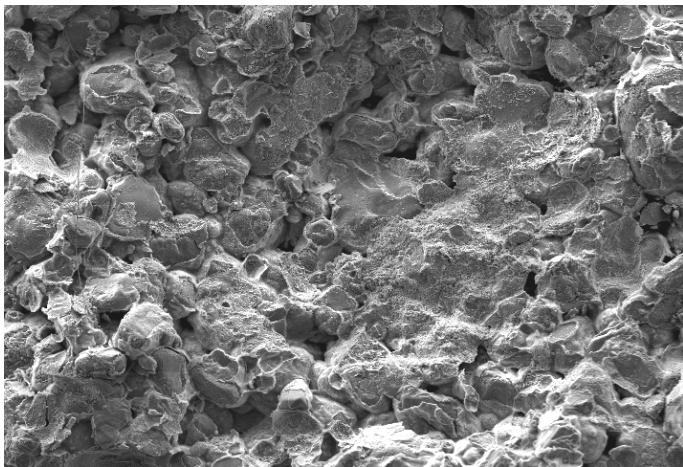


Bild 10.7-a: Serie 3: KS-Probe mit Mittelsand
Nullserie ohne Fließmittel
Übersichtsaufnahme - Bildbreite 2,87 mm

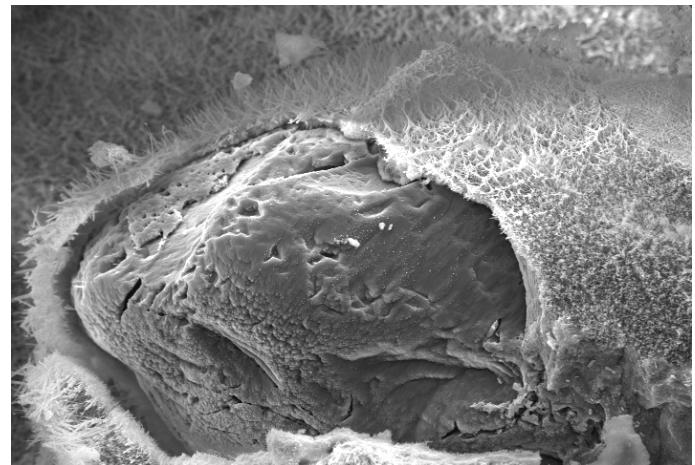


Bild 10.7-b: Serie 3: KS-Probe mit Mittelsand
Nullserie ohne Fließmittel
Detailaufnahme - Bildbreite 145 µm

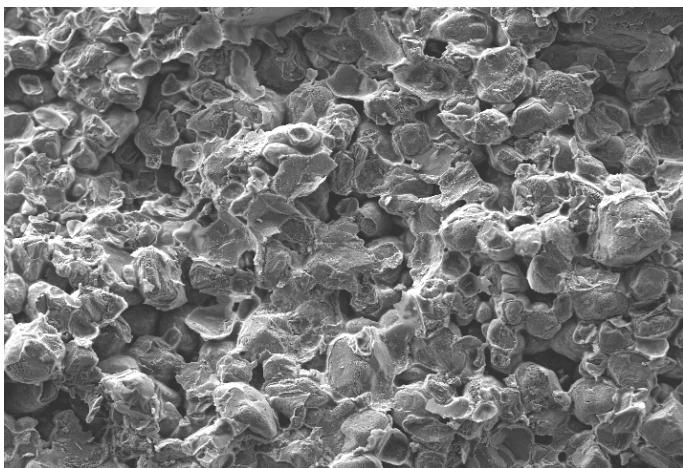


Bild 10.7-c: Serie 42b: KS-Probe mit Mittelsand
und Polycarboxylatether der Sorte B
Übersichtsaufnahme- Bildbreite 2,87 mm

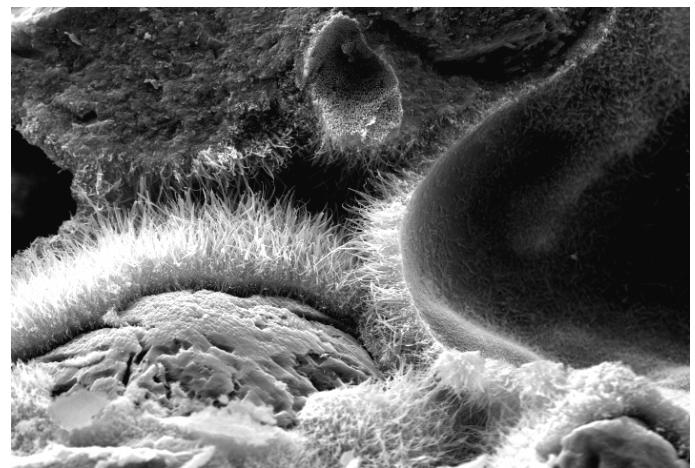


Bild 10.7-d: Serie 42b: KS-Probe mit Mittelsand
und Polycarboxylatether der Sorte B
Detailaufnahme- Bildbreite 145 µm

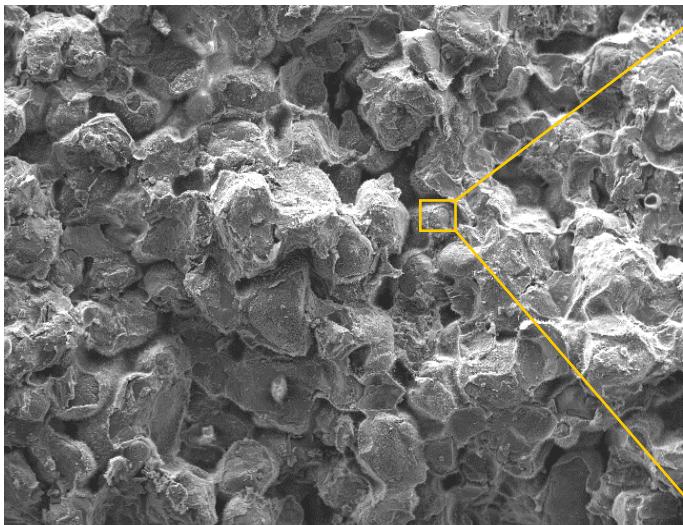


Bild 10.7-e: Serie 49: KS-Probe mit Feinsand
Nullserie ohne Fließmittel
Übersichtsaufnahme - Bildbreite 2,87 mm



Bild 10.7-f: Serie 49: KS-Probe mit Feinsand
Nullserie ohne Fließmittel
Detailausschnitt- Bildbreite 145 µm

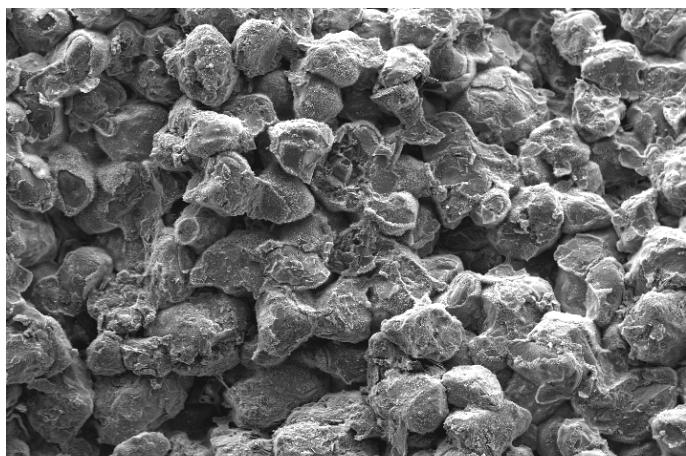


Bild 10.7-g: Serie 88b: KS-Probe mit Feinsand und Polycarboxylatether der Sorte B
Übersichtsaufnahme - Bildbreite 2,87 mm

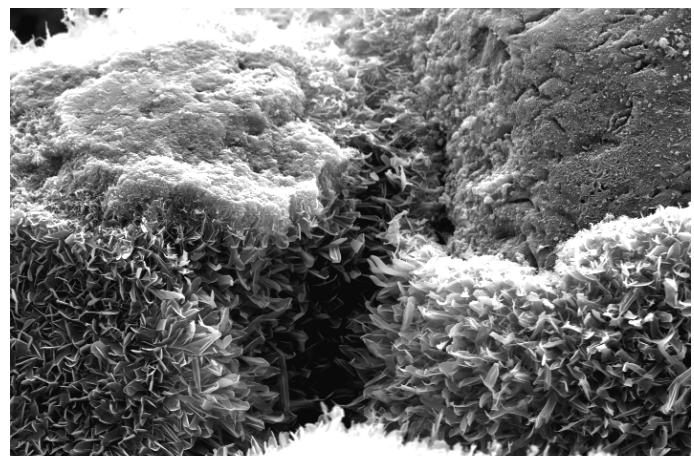


Bild 10.7-h: Serie 88b: KS-Probe mit Feinsand und Polycarboxylatether der Sorte B
Detailaufnahme - Bildbreite 145 µm

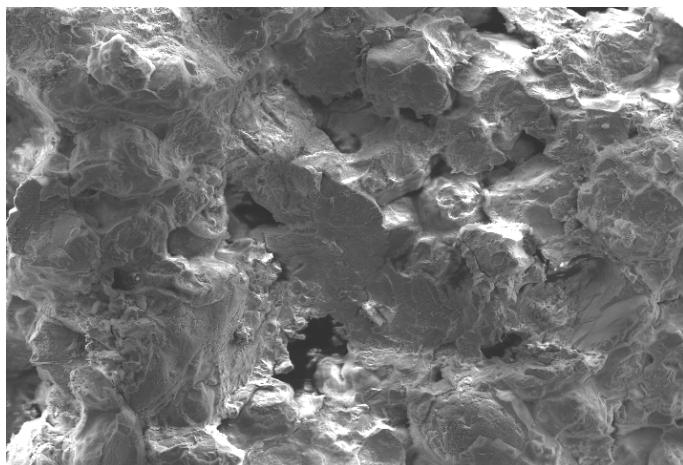


Bild 10.7-i: Serie 95: KS-Probe mit Grobsand
Nullserie ohne Fließmittel
Übersichtsaufnahme - Bildbreite 2,87 mm

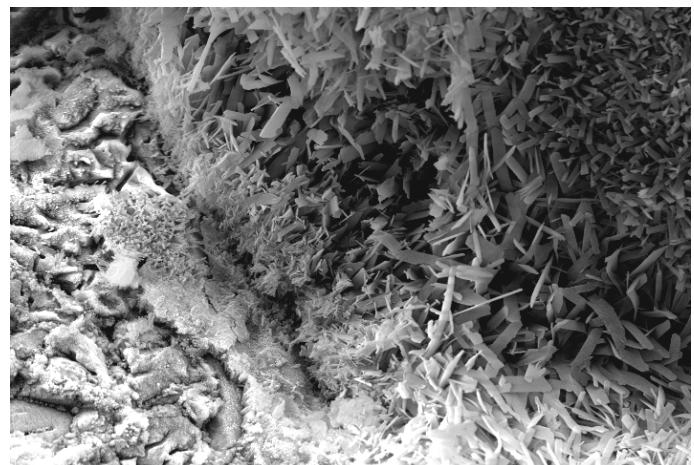


Bild 10.7-j: Serie 95: KS-Probe mit Grobsand
Nullserie ohne Fließmittel
Detailaufnahme - Bildbreite 145 µm

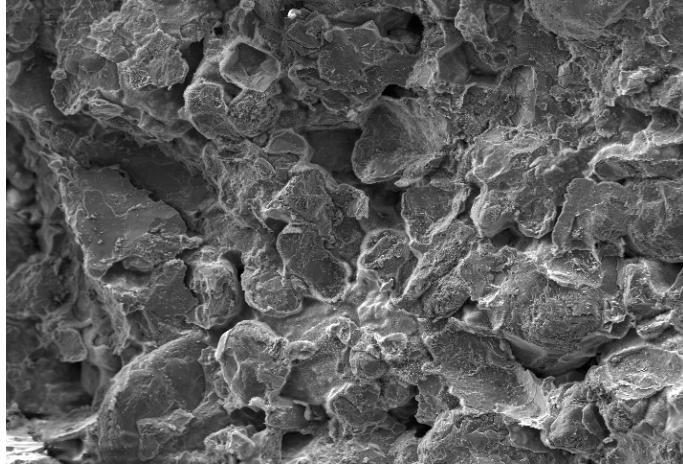


Bild 10.7-k: Serie 134b: KS-Probe mit Grobsand und Polycarboxylatether der Sorte B
Übersichtsaufnahme - Bildbreite 2,87 mm

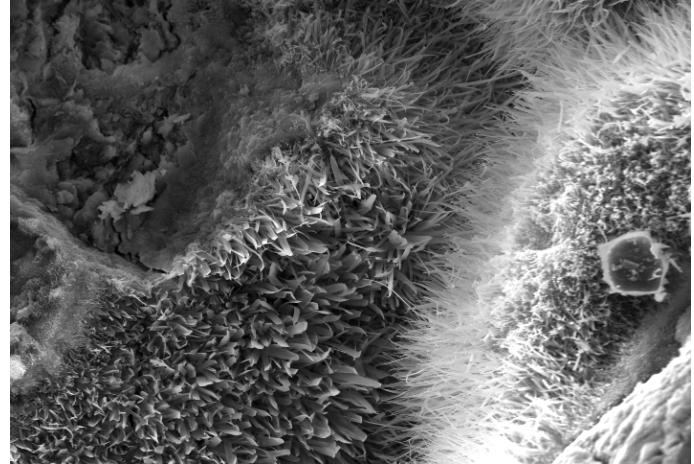


Bild 10.7-l: Serie 134b: KS-Probe mit Grobsand und Polycarboxylatether der Sorte B
Detailaufnahme - Bildbreite 145 µm

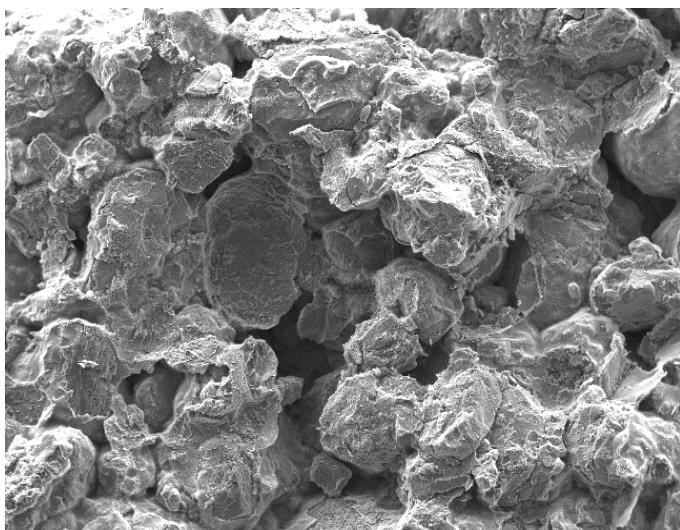


Bild 10.7-m: Serie 131: KS-Probe mit Grobsand und Tensid B
Übersichtsaufnahme - Bildbreite 2,87 mm

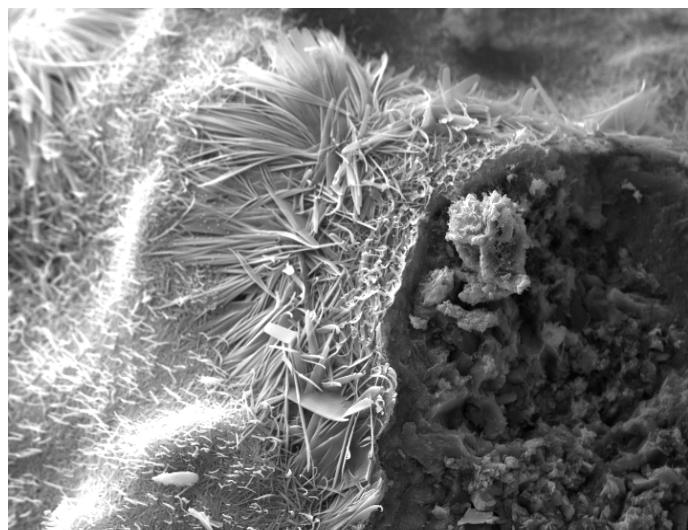


Bild 10.7-n: Serie 131: KS-Probe mit Grobsand und Tensid B
Detailaufnahme - Bildbreite 145 µm

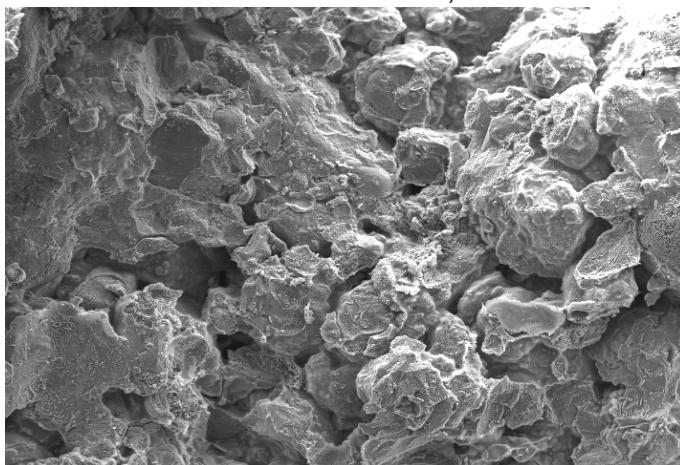


Bild 10.7-o: Probe 134a: KS-Probe mit Grobsand und Polycarboxylatether der Sorte A
Übersichtsaufnahme- Bildbreite 2,87 mm

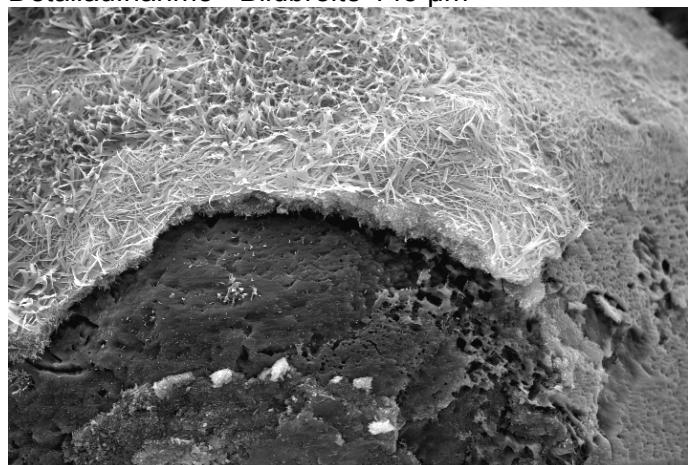


Bild 10.7-p: Probe 134a: KS-Probe mit Grobsand und Polycarboxylatether der Sorte A
Detailaufnahme- Bildbreite 145 µm

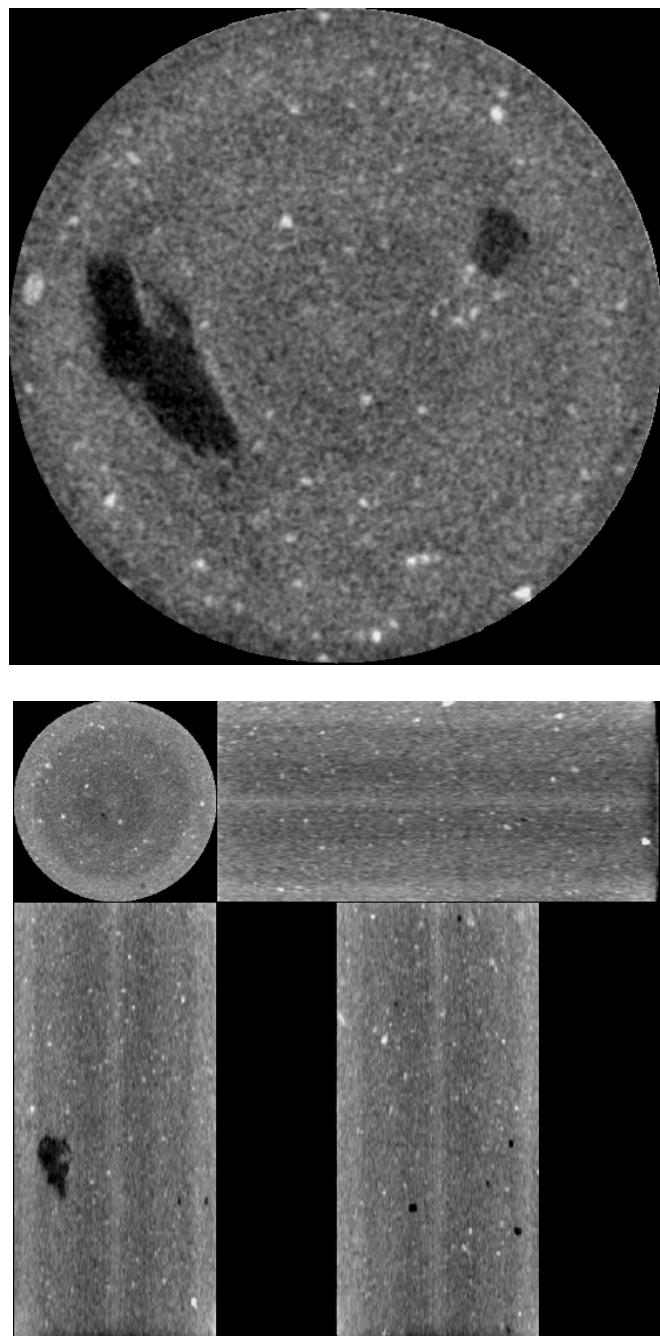


Bild 10.8: CT-Übersichts-Aufnahmen eines Kalksandstein-Prüfkörpers

- helle Flächen: Sand- bzw- Feinkieskörner
- dunkle Flächen: Hohlräume
- helle Streifen: messtechnisch bedingte Erscheinungen (Artefakte)
- Bild oben und unten links: Lunker (einzelner größerer Hohlraum)

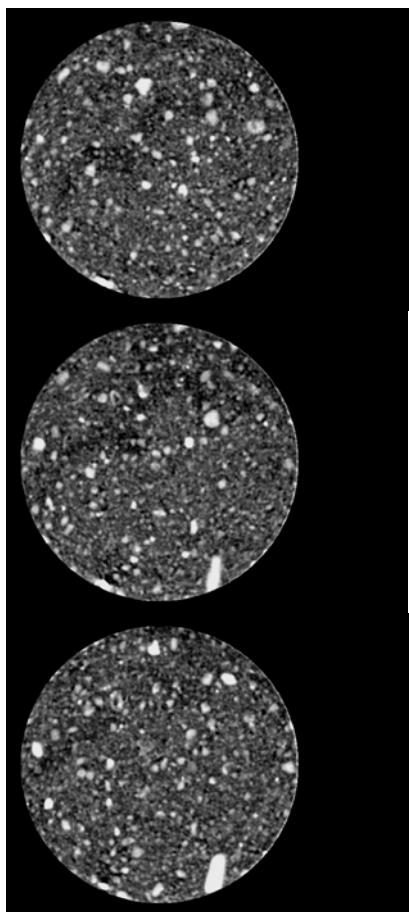


Bild 10.9

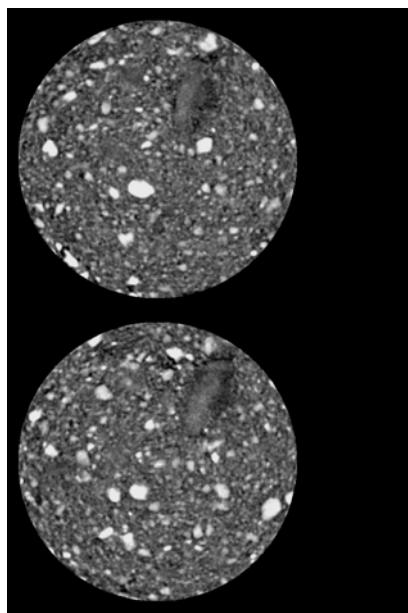


Bild 10.10

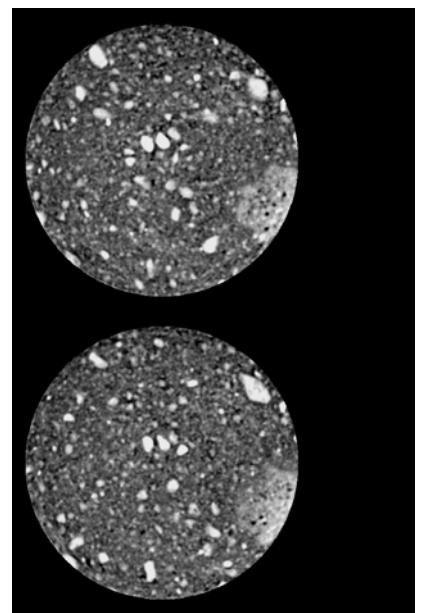


Bild 10.11

Bild 10.9: Folge von CT-Schicht-Aufnahmen eines Kalksandstein-Bohrkerns

- Serie 165, KS-Werk B, Nullserie, ohne Zugabe von Polycarboxylatether
- Scherbenrohdichte: $\rho_{tr} = 1,84 \text{ kg/dm}^3$
- Abstand der Aufnahmen untereinander: $d = 1 \text{ mm}$
- weiße Flächen: Sandkörper
- schwarze, bänderartige Flächen: Hohlräume (\rightarrow „Verdichtungspotenzial“)

Bild 10.10: CT-Schicht-Aufnahme eines Kalksandstein-Bohrkerns

- Serie 175, KS-Werk B, Zugabe von 1 M.-% Polycarboxylatether PCE B
- Scherbenrohdichte: $\rho_{tr} = 1,86 \text{ kg/dm}^3$
- Abstand der Aufnahmen untereinander: $d = 1 \text{ mm}$
- helle Flächen: Sandkörper
- dunkle Flächen: kleine Hohlräume
- oben rechts: Lunker (einzelner größerer Hohlraum)

Bild 10.11: CT-Schicht-Aufnahme eines Kalksandstein-Bohrkerns

- Serie 178, KS-Werk B, Zugabe von 2 M.-% Polycarboxylatether PCE B
- Scherbenrohdichte: $\rho_{tr} = 1,87 \text{ kg/dm}^3$
- Abstand der Aufnahmen untereinander: $d = 1 \text{ mm}$
- weiße Flächen: Sandkörper
- schwarze Flächen: Hohlräume (\rightarrow „Verdichtungspotenzial“)

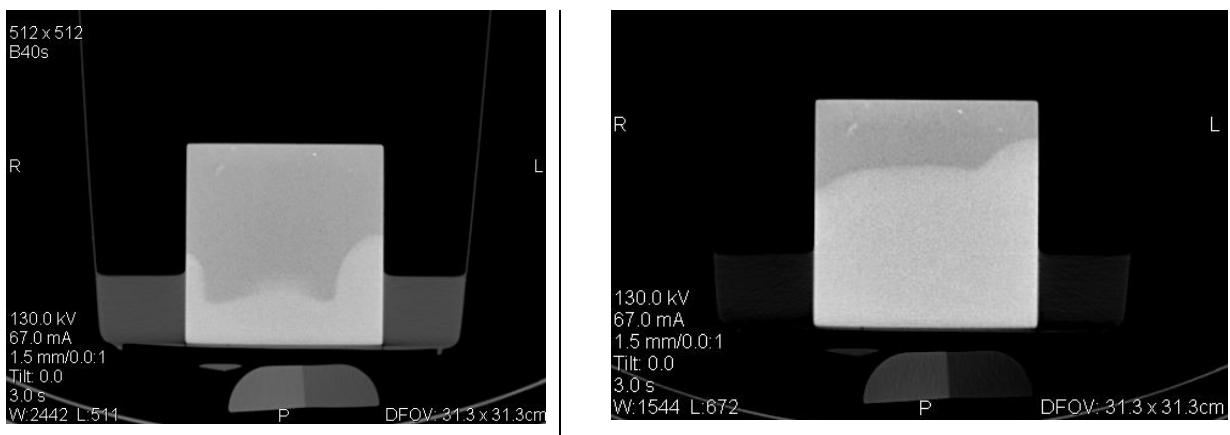


Bild 10.12: CT-Schicht-Aufnahme eines Kalksandstein-Prüfkörpers,

Serie 49, Feinsand

- Der Prüfkörper befindet sich in einem Wasserbad und saugt kapillar Wasser auf (helle Flächen).
- Zeitlicher Abstand zwischen den Aufnahmen; ca. 3 Minuten

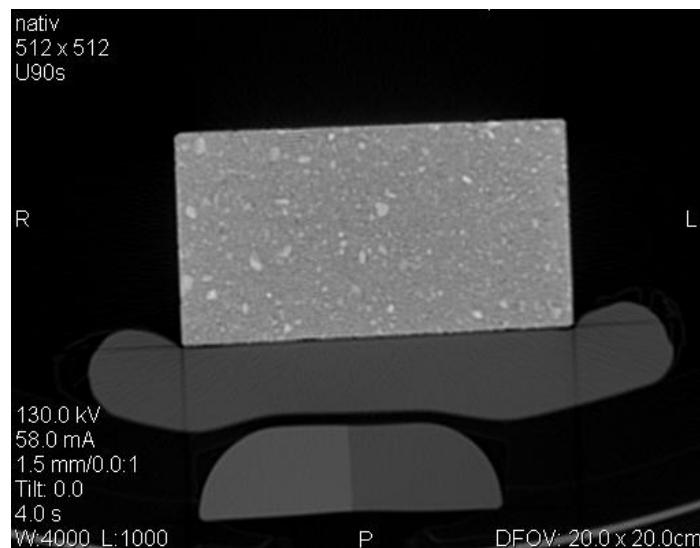


Bild 10.13: CT-Schicht-Aufnahme eines Kalksandstein-Prüfkörpers

hoch auflösende Darstellung

- Serie 95, Grobsand
- Die groben Sandkörner (hell) sind deutlich zu erkennen.

10.4 Ergebnisse zum Teil 2 der Untersuchungen

Werk 1: Kombination Feinsand - RC-Splitt - KSM-Füller

Sandsorte / Mischung		RC-Splitt 2/5 mm		Füller KSM 1		Feinsand G12		Serie 77 80 M.-% G12 10 M.-% Splitt 10 M.-% KSM 1		Serie 78 70 M.-% G12 20 M.-% Splitt 10 M.-% KSM 1		Serie 79 60 M.-% G12 30 M.-% Splitt 10 M.-% KSM 1		Serie 80 50 M.-% G12 40 M.-% Splitt 10 M.-% KSM 1		Opt. Serien 27 M.-% G12 63 M.-% Splitt 10 M.-% KSM 1	
Schüttdichte, geschüttet	kg/dm ³	1,40				1,46											
Schüttdichte, gerüttelt	kg/dm ³	1,50				1,59											
Schütttdifferenz	kg/dm ³	0,10				0,13											
Spezifische Oberfläche	cm ² /g	51				141											
Abschlämmbares	Vol.-%	0				0											
Huminstoffe		farblos		farblos													
Siebanalyse	X-Daten	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe		
< 0,036 mm	0	0,1	0,0	58,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
> 0,036 mm	0,036	0,2	0,1	23,0	58,0	0,0	0,0	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,9	5,8	5,9		
> 0,063 mm	0,063	0,3	0,3	13,0	81,0	0,2	0,0	8,1	8,2	8,2	8,2	8,2	8,3	8,2	8,3		
> 0,112 mm	0,112	0,3	0,6	5,0	94,0	15,2	0,2	9,6	9,7	9,7	9,7	9,7	9,8	9,7	9,8		
> 0,2 mm	0,2	0,5	0,9	1,0	99,0	80,6	15,4	22,3	20,9	19,4	19,4	18,0	14,6	18,0	14,6		
> 0,355 mm	0,355	1,3	1,4	0,0	100,0	3,8	96,0	86,9	77,5	68,0	68,0	58,6	36,8	58,6	36,8		
> 0,63 mm	0,63	1,7	2,7	0,0	100,0	0,2	99,8	90,1	80,4	70,7	70,7	61,0	38,6	61,0	38,6		
> 1,12 mm	1,12	10,1	4,4	0,0	100,0	0,0	100,0	90,4	80,9	71,3	71,3	61,8	39,8	61,8	39,8		
> 2 mm	2	45,7	14,5	0,0	100,0	0,0	100,0	91,5	82,9	74,4	74,4	65,8	46,1	65,8	46,1		
> 3,55 mm	3,55	38,4	60,2	0,0	100,0	0,0	100,0	96,0	92,0	88,1	88,1	84,1	74,9	84,1	74,9		
> 6,3 mm	6,3	1,4	98,6	0,0	100,0	0,0	100,0	99,9	99,7	99,6	99,6	99,4	99,1	99,4	99,1		
Summe		100,0	100,0	100,0	100,0			100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		

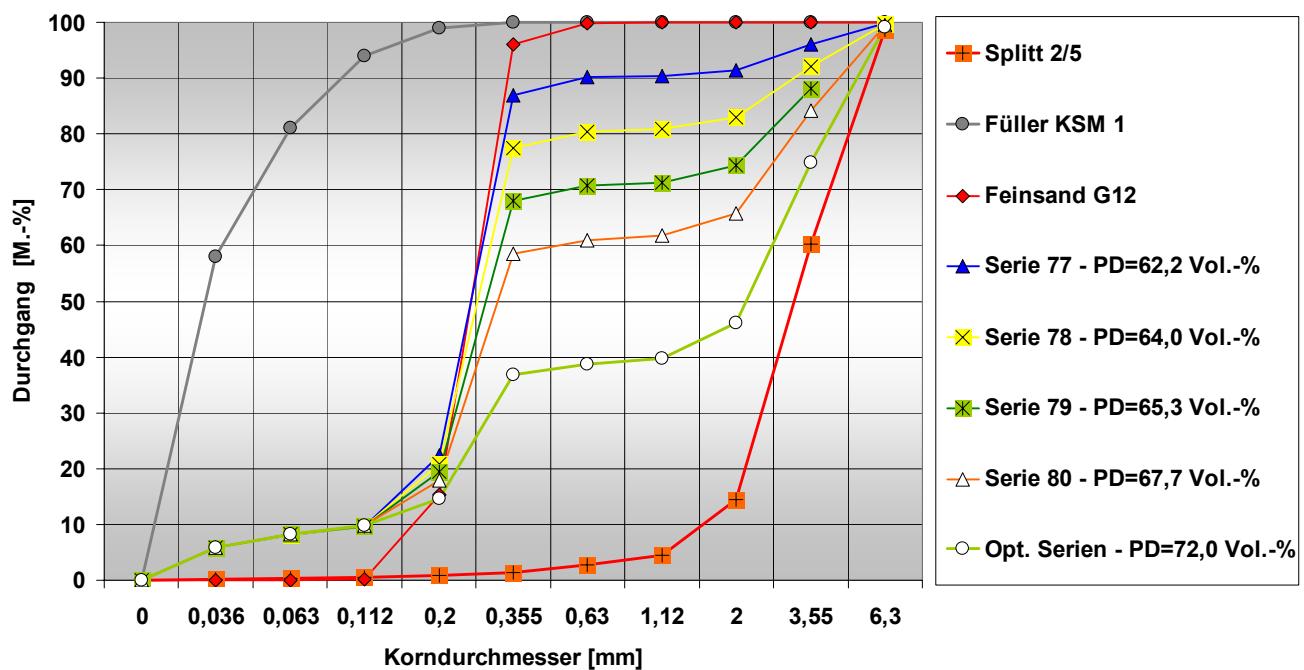


Tabelle 10.11 und Bild 10.14: Ergebnisse der Zuschlaganalysen für das KS-Werk 1

Werk 2: Kombination Feinsand - Mittelsand - Grobsand

Sandsorte / Mischung		Mittelsand S40T		Grobsand B 0/4 mm		Feinsand G12		Serie 52 20 M.-% G12 40 M.-% S40T 40 M.-% Ba		Serie 53 25 M.-% G12 40 M.-% S40T 35 M.-% Ba		Serie 54 30 M.-% G12 40 M.-% S40T 30 M.-% Ba	
Schüttdichte, geschüttet	kg/dm ³	1,56		1,60		1,46							
Schüttdichte, gerüttelt	kg/dm ³	1,66		1,80		1,59							
Schüttdichtedifferenz	kg/dm ³	0,10		0,20		0,13							
Spezifische Oberfläche	cm ² /g	42		87		141							
Abschlämmbares	Vol.-%	0		1		0							
Huminstoffe		farblos		farblos		farblos							
Kornform													
Siebanalyse	X-Daten	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe
< 0,036 mm	0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
> 0,036 mm	0,036	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
> 0,063 mm	0,063	0,0	0,0	0,9	0,3	0,2	0,0	0,4	0,1	0,4	0,1	0,3	0,1
> 0,112 mm	0,112	0,1	0,0	4,9	1,2	15,2	0,2	5,0	0,5	5,6	0,5	6,1	0,4
> 0,2 mm	0,2	0,3	0,1	17,1	6,1	80,6	15,4	23,1	5,6	26,3	6,0	29,4	6,5
> 0,355 mm	0,355	19,1	0,4	28,1	23,2	3,8	96,0	19,6	28,6	18,4	32,3	17,2	35,9
> 0,63 mm	0,63	78,9	19,5	21,2	51,3	0,2	99,8	40,1	48,3	39,0	50,7	38,0	53,1
> 1,12 mm	1,12	1,6	98,4	16,0	72,5	0,0	100,0	7,0	88,4	6,2	89,7	5,4	91,1
> 2 mm	2	0,0	100,0	8,8	88,5	0,0	100,0	3,5	95,4	3,1	96,0	2,6	96,6
> 3,55 mm	3,55	0,0	100,0	2,7	97,3	0,0	100,0	1,1	98,9	0,9	99,1	0,8	99,2
> 6,3 mm	6,3	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
Summe		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0	

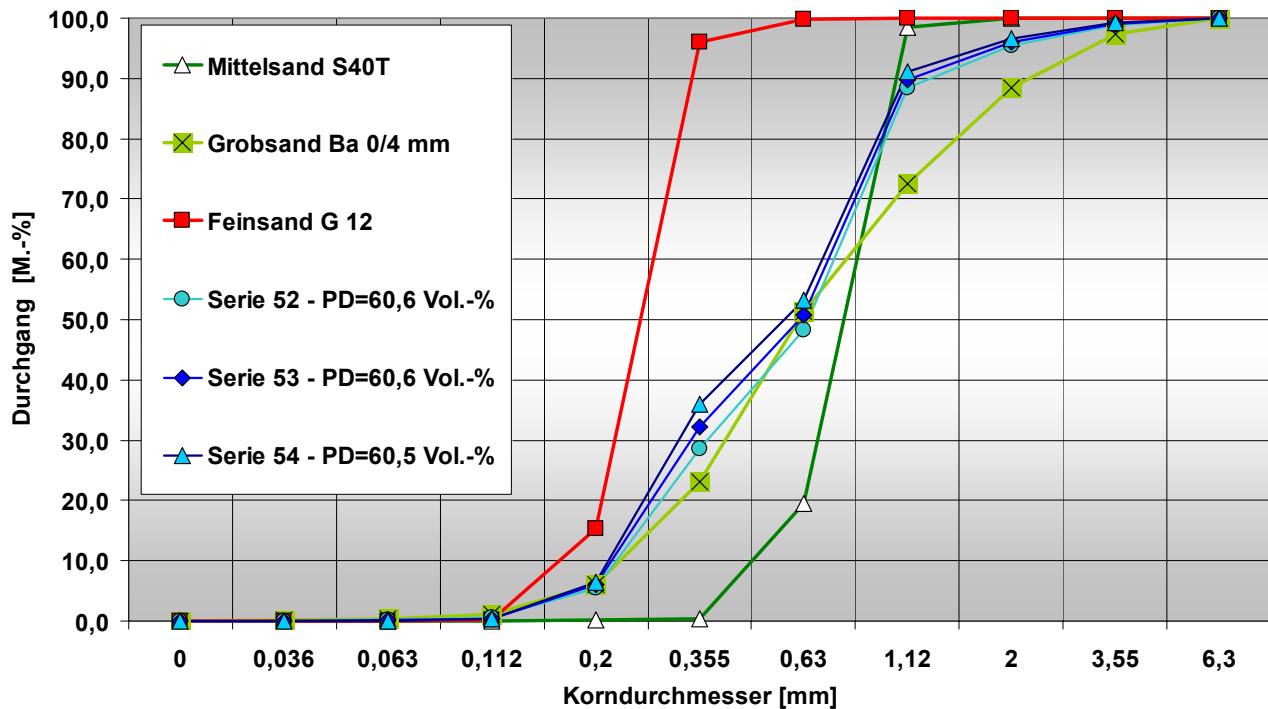


Tabelle 10.12 und Bild 10.15: Ergebnisse der Zuschlaganalysen für das KS-Werk 2

Werk 3: Kombination Mittelsand - Grobsand - Grauwacke-Füller

Sandorte / Mischung		Mittelsand N 0/2 mm	Grobsand S2-3,5T	Grauwacke füller	Serie 152 45 M.-% N 50 M.-% S2-3,5T 5 M.-% GW Füller	Serie 152a 42,5 M.-% N 50 M.-% S2-3,5T 7,5 M.-% GW Füller	Serie 153 40 M.-% N 50 M.-% S2-3,5T 10 M.-% GW Füller	Serie 154 35 M.-% N 50 M.-% S2-3,5T 15 M.-% GW Füller	Optim. Serie 19,1 M.-% N 65,9 M.-% S2-3,5T 15 M.-% GW Füller
Schüttdichte, geschüttet	kg/dm ³	1,50	1,61	0,94					
Schüttdichte, gerüttelt	kg/dm ³	1,80	1,61	1,23					
Schüttdifferenz	kg/dm ³	0,30	0,00	0,29					
Spezifische Oberfläche	cm ² /g	144	22	3425					
Abschlämmbares	Vol.-%	7							
Huminstoffe		farblos	farblos	farblos					
Siebanalyse	X-Daten	Rück-stand Summe	Rück-stand Summe	Rück-stand Summe	Rück-stand Summe	Rück-stand Summe	Rück-stand Summe	Rück-stand Summe	Rück-stand Summe
< 0,036 mm	0	0,1 0,0	0,1 0,0	15,4 0,0	0,9 0,0	1,2 0,0	1,6 0,0	2,4 0,0	2,4 0,0
> 0,036 mm	0,036	0,6 0,1	0,1 0,1	48,8 15,4	2,8 0,9	4,0 1,2	5,2 1,6	7,6 2,4	7,5 2,4
> 0,063 mm	0,063	3,9 0,7	0,1 0,2	31,0 64,2	3,4 3,6	4,0 5,2	4,7 6,8	6,1 10,0	5,5 9,9
> 0,112 mm	0,112	27,3 4,6	0,2 0,3	3,7 95,2	12,6 7,0	12,0 9,2	11,4 11,5	10,2 16,0	5,9 15,4
> 0,2 mm	0,2	38,2 31,9	0,3 0,5	0,5 98,9	17,4 19,6	16,4 21,2	15,5 15,5	22,9 26,3	7,6 21,3
> 0,355 mm	0,355	22,0 70,1	1,4 0,8	0,1 99,4	10,6 36,9	10,1 37,6	9,5 38,4	8,4 39,8	5,1 28,8
> 0,63 mm	0,63	5,1 92,1	2,8 2,2	0,5 99,5	3,7 47,5	3,6 47,7	3,5 47,9	3,3 48,3	2,9 34,0
> 1,12 mm	1,12	2,0 97,2	19,4 5,0	0,0 100,0	10,6 51,2	10,6 51,3	10,5 51,4	10,4 51,5	13,2 36,9
> 2 mm	2	0,4 99,2	74,9 24,4	0,0 100,0	37,6 61,8	37,6 61,9	37,6 61,9	37,6 61,9	49,4 50,0
> 3,55 mm	3,55	0,4 99,6	0,7 99,3	0,0 100,0	0,5 99,5	0,5 99,5	0,5 99,5	0,5 99,5	0,5 99,5
> 6,3 mm	6,3	0,0 100,0	0,0 100,0	0,0 100,0	0,0 100,0	0,0 100,0	0,0 100,0	0,0 100,0	0,0 100,0
Summe		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

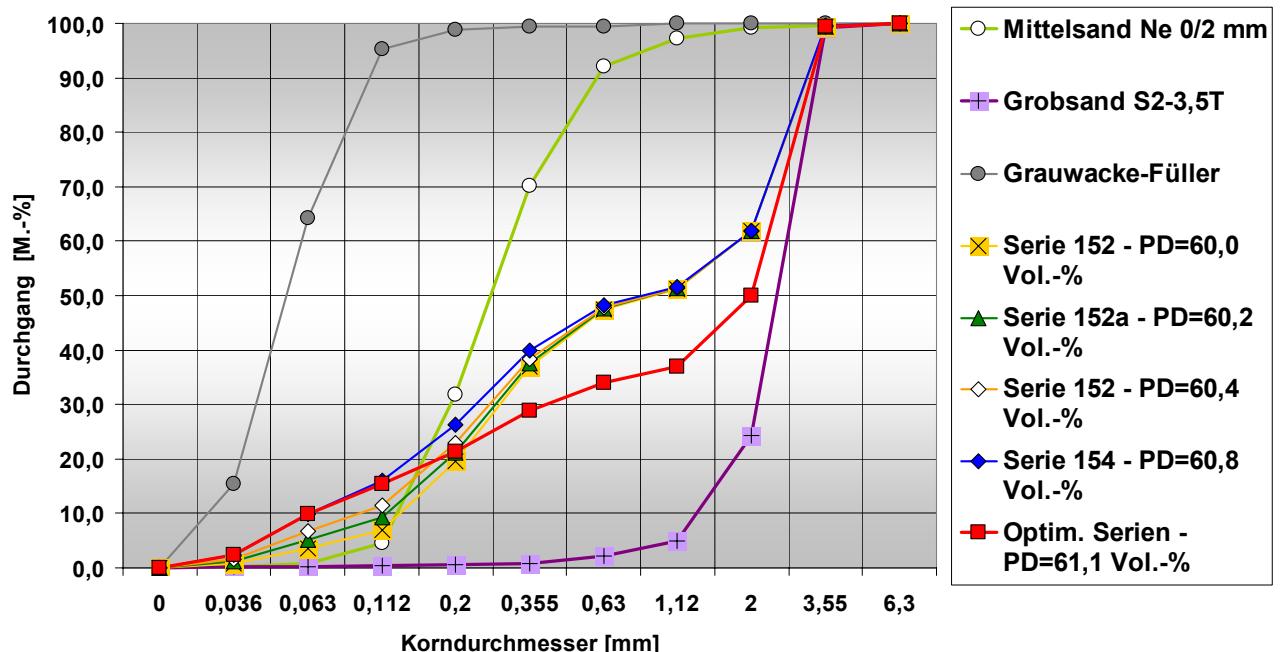


Tabelle 10.13 und Bild 10.16: Ergebnisse der Zuschlaganalysen für das KS-Werk 3

Werk 3: Kombination Mittelsand - Grobsand - Grauwackesplitt 0/2 mm

Sandsorte / Mischung	Mittelsand N 0/2 mm	Grobsand S2-3,5T	Grauwacke 0/2 mm	Serie 164 40 M.-% N 50 M.-% S2-3,5T 10 M.-% GW 0/2	Serie 165 35 M.-% N 50 M.-% S2-3,5T 15 M.-% GW 0/2	Serie 166 30 M.-% N 50 M.-% S2-3,5T 20 M.-% GW 0/2	Optim. Serien 18 M.-% N 42 M.-% S2-3,5T 40 M.-% GW 0/2								
Schüttdichte, geschüttet	kg/dm ³	1,50	1,61	1,54											
Schüttdichte, gerüttelt	kg/dm ³	1,80	1,61	1,89											
Schüttdifferenz	kg/dm ³	0,30	0,00	0,35											
Spezifische Oberfläche	cm ² /g	144	22	576											
Abschlämmbares	Vol.-%	7		24											
Huminstoffe		farblos	farblos	farblos											
Kornform															
Siebanalyse	X-Daten	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe	Rück-stand	Summe		
< 0,036 mm	0	0,1	0,0	0,1	0,0	2,8	0,0	0,4	0,0	0,5	0,0	0,6	0,0	1,5	0,0
> 0,036 mm	0,036	0,6	0,1	0,1	0,1	7,7	2,8	1,1	0,4	1,4	0,5	1,8	0,6	4,1	1,5
> 0,063 mm	0,063	3,9	0,7	0,1	0,2	9,9	10,5	2,6	1,4	2,9	1,9	3,2	2,4	5,5	5,6
> 0,112 mm	0,112	27,3	4,6	0,2	0,3	7,8	20,4	11,8	4,0	10,8	4,8	9,9	5,6	6,3	11,1
> 0,2 mm	0,2	38,2	31,9	0,3	0,5	9,1	28,2	16,3	15,8	14,9	15,6	13,4	15,5	7,9	17,4
> 0,355 mm	0,355	22,0	70,1	1,4	0,8	8,8	37,3	10,4	32,2	9,7	30,5	9,1	28,9	6,9	25,3
> 0,63 mm	0,63	5,1	92,1	2,8	2,2	11,9	46,1	4,6	42,6	5,0	40,3	5,3	38,0	7,7	32,2
> 1,12 mm	1,12	2,0	97,2	19,4	5,0	31,3	58,0	13,6	47,2	15,1	45,2	16,6	43,3	24,2	39,9
> 2 mm	2	0,4	99,2	74,9	24,4	10,3	89,3	38,6	60,8	39,1	60,3	39,6	59,8	35,3	64,1
> 3,55 mm	3,55	0,4	99,6	0,7	99,3	0,4	99,6	0,6	99,5	0,6	99,5	0,6	99,5	0,5	99,5
> 6,3 mm	6,3	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
Summe		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0	

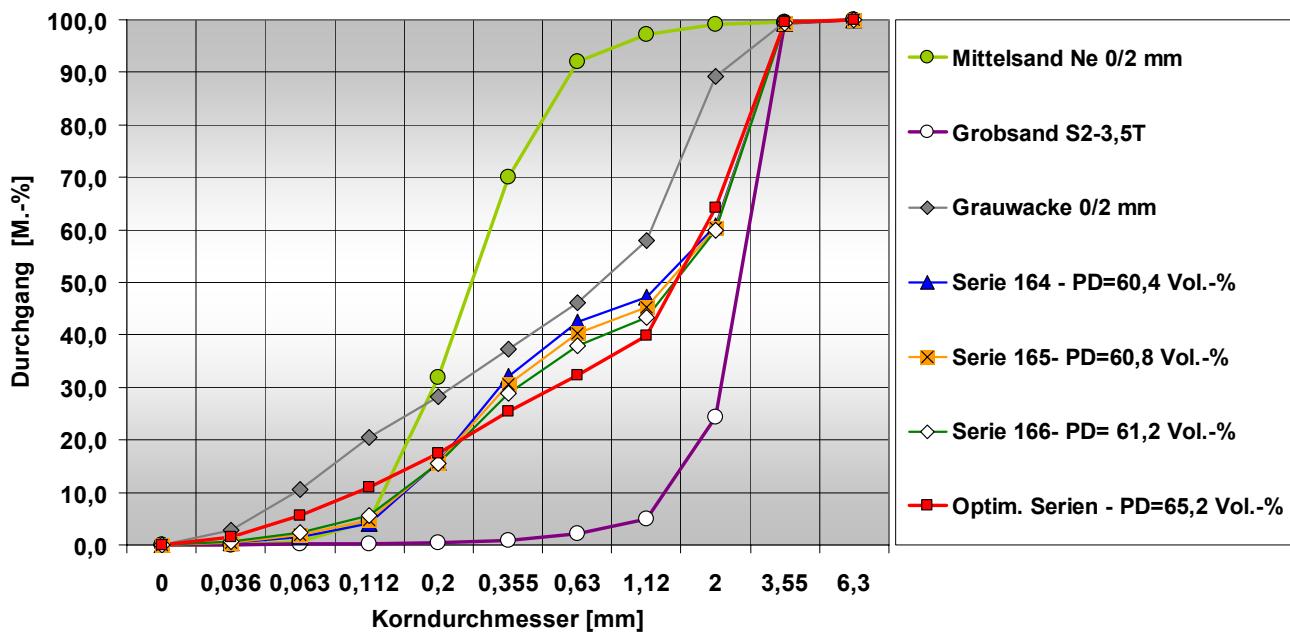


Tabelle 10.14 und Bild 10.17: Ergebnisse der Zuschlaganalysen für das KS-Werk 3

Werk 4: Kombination Feinsand - Mittelsand - Basaltsand

Sandsorte / Mischung		Feinsand R	Mittelsand S	Basaltsand T	Serie 127	Serie 128	Serie 129	Optim. Serien	
		0/0,3 mm	0/2 mm	0/2 mm	10 M.-% R 80 M.-% S 10 M.-% T	10 M.-% R 70 M.-% S 20 M.-% T	10 M.-% R 60 M.-% S 30 M.-% T	24 M.-% R 36 M.-% S 40 M.-% T	
Schüttdichte, geschüttet	kg/dm ³	1,28	1,60	1,70					
Schüttdichte, gerüttelt	kg/dm ³	1,54	1,78	2,00					
Schüttdichtedifferenz	kg/dm ³	0,26	0,18	0,30					
Spezifische Oberfläche	cm ² /g	182	69	87					
Abschlämmbares	Vol.-%	12	4,3	4,3					
Huminstoffe		farblos	hellgelb	farblos					
Kornform									
Siebanalyse	X-Daten	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe
< 0,036 mm	0	0,2	0,0	0,0	1,1	0,0	0,1	0,2	0,0
> 0,036 mm	0,036	1,6	0,2	0,1	0,0	2,6	1,1	0,5	0,1
> 0,063 mm	0,063	22,9	1,8	0,5	0,1	3,8	3,7	3,1	0,6
> 0,112 mm	0,112	74,2	24,7	3,5	0,6	5,9	7,5	10,8	3,7
> 0,2 mm	0,2	0,7	98,9	15,1	4,1	9,6	13,4	13,1	14,5
> 0,355 mm	0,355	0,3	99,6	40,0	19,2	16,2	23,0	33,7	27,6
> 0,63 mm	0,63	0,1	99,9	31,2	59,2	22,8	39,2	27,3	61,3
> 1,12 mm	1,12	0,0	100,0	8,5	90,4	35,3	62,0	10,3	88,5
> 2 mm	2	0,0	100,0	1,0	98,9	2,5	97,3	1,1	98,9
> 3,55 mm	3,55	0,0	100,0	0,1	99,9	0,2	99,8	0,1	99,9
> 6,3 mm	6,3	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
Summe		100,0		100,0		100,0		100,0	
				100,0					100,0

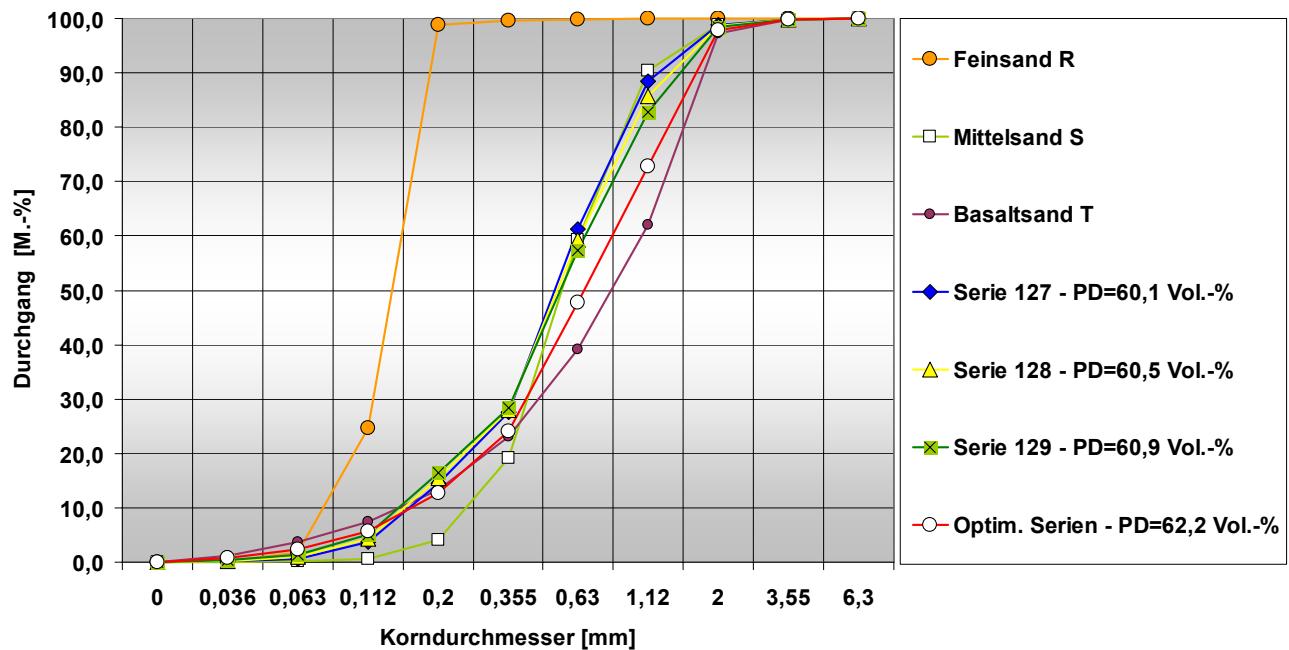


Tabelle 10.15 und Bild 10.18: Ergebnisse der Zuschlaganalysen für das KS-Werk 4

Werk 5: Kombination von Quarzsanden - Anteil der Mittelsandkomponente = const.

Sandsorte / Mischung		G0-0,35 (0,1-0,3) Feinsand		G34T (0,2-0,8) Mittelsand		S0,7-1,2T (0,7-1,2) Grobkomponente 1		S1-2T (1,0-2,0) Grobkomponente 2		S2-3,5T (2,0-3,5) Grobkomponente 3		Mischung Grob 33 M.-% S0,7-1,2T 34 M.-% S1-2T 33 M.-% S2-3,5T		Serie MS-1 50 M.-% G0-0,35 50 M.-% G34T 0 M.-% Grob		Serie MS-2 40 M.-% G0-0,35 50 M.-% G34T 10 M.-% Grob		Serie MS-3 30 M.-% G0-0,35 50 M.-% G34T 20 M.-% Grob		Serie MS-4 20 M.-% G0-0,35 50 M.-% G34T 30 M.-% Grob		Serie MS-5 10 M.-% G0-0,35 50 M.-% G34T 40 M.-% Grob				
Siebanalyse	X-Daten	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe			
< 0,036 mm	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
> 0,063 mm	0,063	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
> 0,125 mm	0,125	84,0	9,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
> 0,250 mm	0,250	7,0	93,0	23,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,0	52,0	14,3	42,7	13,6	33,4	12,9	24,1		
> 0,355 mm	0,355	0,0	100,0	36,0	34,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	67,0	18,0	57,0	18,1	47,0	18,1	37,0		
> 0,500 mm	0,500	0,0	100,0	27,0	70,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,3	13,5	85,0	13,6	75,0	13,7	65,1	13,8	55,1	
> 0,710 mm	0,710	0,0	100,0	3,0	97,0	64,0	4,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,5	1,3	1,5	98,5	3,6	88,6	5,8	78,8	7,9	68,9	
> 1,000 mm	1,000	0,0	100,0	0,0	100,0	32,0	68,0	25,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,1	22,8	0,0	100,0	1,9	92,3	3,8	84,6	5,7	76,8	
> 1,400 mm	1,4	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	68,0	26,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,1	41,8	0,0	100,0	2,5	94,2	5,0	88,4	7,5	82,6	
> 2,000 mm	2,000	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	6,0	94,0	81,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,8	66,9	0,0	100,0	2,9	96,7	5,8	93,4	8,6	90,1	
> 2,800 mm	2,800	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	13,0	87,0	4,3	95,7	0,0	0,0	0,0	0,0	99,6	0,9	99,1	1,3	98,7	1,7	98,3	2,1	97,9
> 4,000 mm	4,000	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
Summe		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0

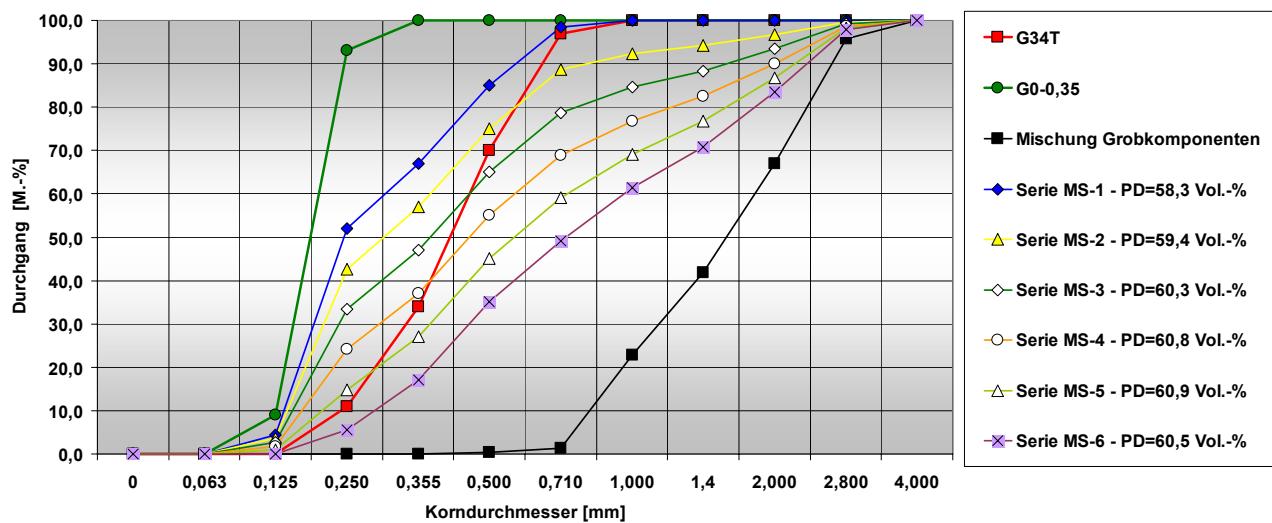


Tabelle 10.16 und Bild 10.19: Ergebnisse der Zuschlaganalysen für das KS-Werk 5

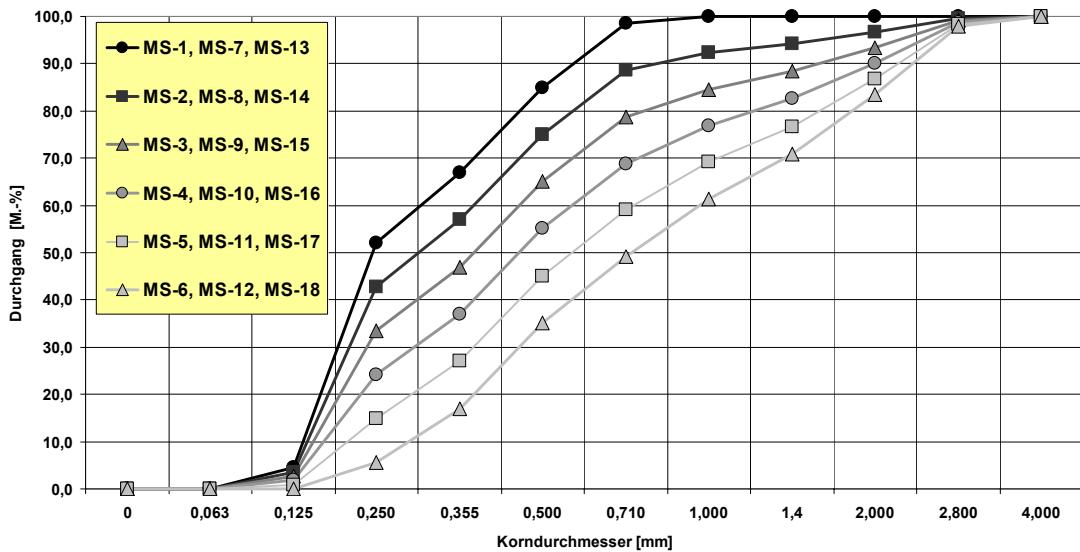


Bild 10.20: Übersicht über die Seriennummern der Mischungen - Werk 5

Werk 6: Breite Variation der CaO-Dosis

Sandorte / Mischung		Mittelsand N 0/2 mm		Theoretisches Optimum		Linke Einhüllende		Rechte Einhüllende	
Schüttdichte, geschüttet	kg/dm ³	1,50							
Schüttdichte, gerüttelt	kg/dm ³	1,80							
Schüttdichtedifferenz	kg/dm ³	0,30							
Spezifische Oberfläche	cm ² /g	144							
Abschlämmbares	Vol.-%	7							
Huminstoffe		farblos							
Kornform									
Siebanalyse	X-Daten	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe	Rückstand	Summe
< 0,036 mm	0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
> 0,036 mm	0,036	0,6	0,1	2,5	2,5	2,5	2,5	1,0	1,0
> 0,063 mm	0,063	3,9	0,7	2,5	5,0	3,5	6,0	3,0	4,0
> 0,112 mm	0,112	27,3	4,6	5,0	10,0	11,0	17,0	5,0	9,0
> 0,2 mm	0,2	38,2	31,9	24,0	34,0	33,0	50,0	12,0	21,0
> 0,355 mm	0,355	22,0	70,1	21,0	55,0	43,0	93,0	20,0	41,0
> 0,63 mm	0,63	5,1	92,1	25,0	80,0	7,0	100,0	32,0	73,0
> 1,12 mm	1,12	2,0	97,2	16,0	96,0	0,0	100,0	22,0	95,0
> 2 mm	2	0,4	99,2	4,0	100,0	0,0	100,0	5,0	100,0
> 3,55 mm	3,55	0,4	99,6	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
> 6,3 mm	6,3	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
Summe		100,0		100,0		100,0		100,0	

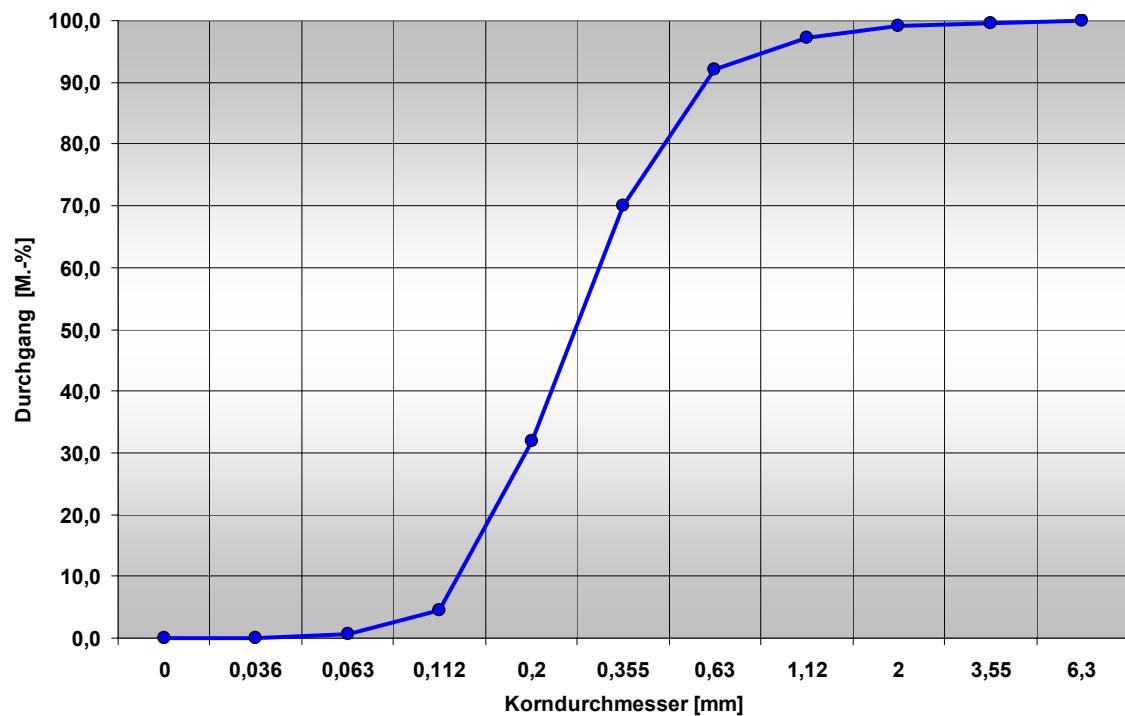


Tabelle 10.17 und Bild 10.21: Ergebnisse der Zuschlaganalyse:Mittelsand N - KS-Werk 6

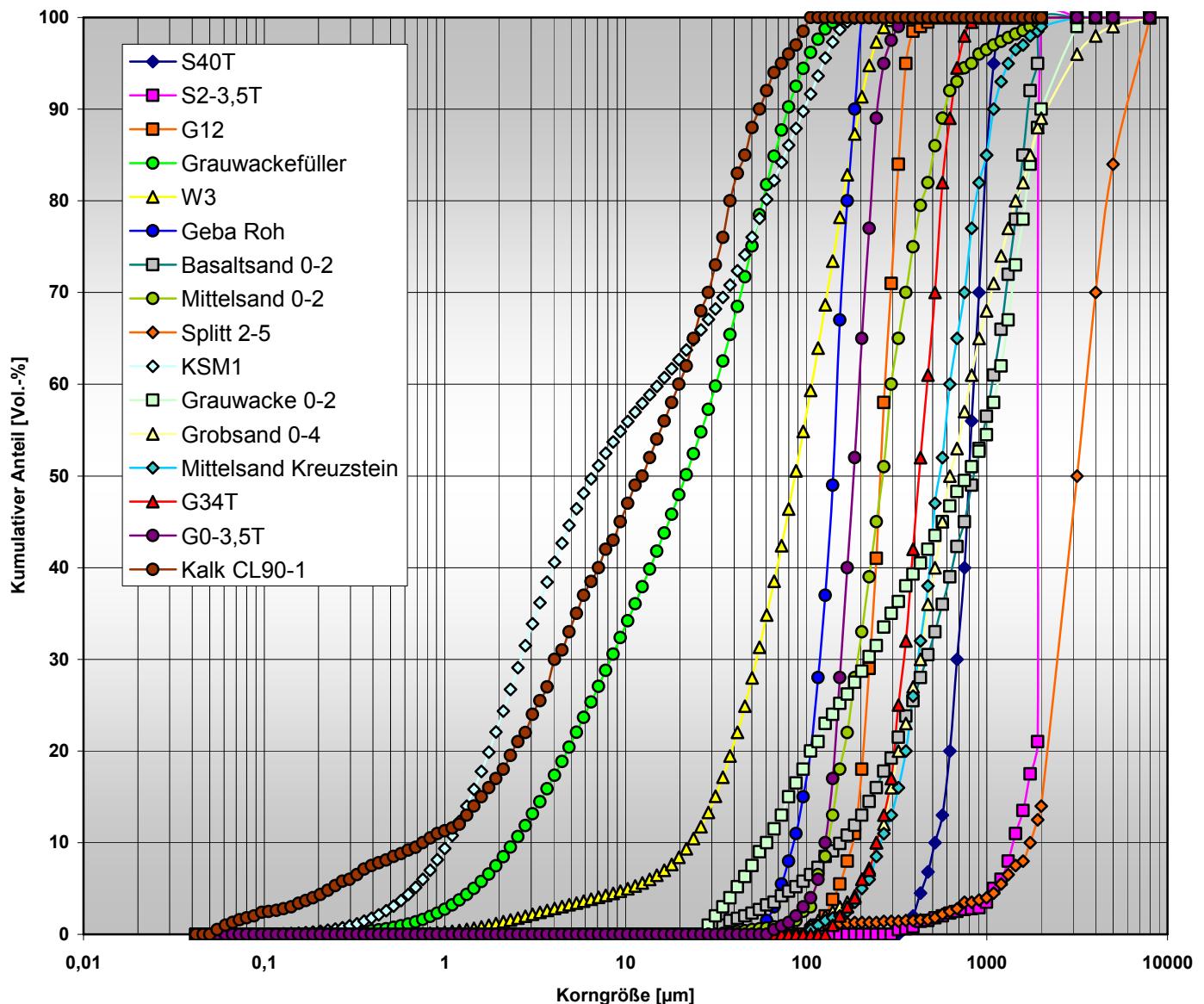


Bild 10.22: Vergleichende Übersichtsdarstellung der Ergebnisse aus der Lasergranulometrie (Feinstoffe) und der Siebanalyse nach DIN EN 933-1 (Grobmaterial)

WERK 1: Kombination aus Feinsand G12 - RC-Splitt und Kalksteinmehl KSM 1

Serie	Herstellparameter							Untersuchungsergebnisse			
	Zuschlag Nr. 1 Feinsand G 12 0/1 mm	Zuschlag Nr. 2 RC-Splitt 2/5 mm	Zuschlag Nr. 3 KSM 1	Packungs- dichte ohne Kalk	Kalk- dosis CaO	Packungs- dichte mit Kalk	Press- druck	Rohlings- stand- festig- keit	Stein- druck- festig- keit	Stein- roh- dichte	Frost: Anzahl schaden- freier FTW
	M.-%	M.-%	M.-%	Vol.-%	M.-%	Vol.-%	N/mm²	N/mm²	N/mm²	kg/dm³	
77	80	10	10	62,2	7	65,0	15	0,12	25,6	1,805	50
78	70	20	10	64,0	7			0,12	25,2	1,877	50
79	60	30	10	65,3	7			0,16	28,2	1,946	50
80	50	40	10	67,7	7			0,18	32,8	1,999	50
81	82,5	12,5	5	60,5	7	63,2		0,08	23,4	1,771	50
82	72,5	22,5	5	62,1	7			0,07	26,4	1,840	50
83	62,5	32,5	5	63,8	7			0,10	29,6	1,904	50
84	52,5	42,5	5	65,5	7			0,13	34,2	1,975	50
85	85	15	0	58,8	7	61,5		0,03	16,6	1,745	50
85-a	75	25	0	60,3	7			0,04	18,8	1,810	25
85-b	65	35	0	61,9	7			0,05	22,0	1,878	25
85-c	55	45	0	63,5	7			0,07	27,6	1,950	50
86	80	10	10	62,2	5	64,2	15	0,06	18,0	1,792	50
87	70	20	10	64,0	5			0,08	20,0	1,866	50
88	60	30	10	65,3	5			0,10	25,6	1,929	50
89	50	40	10	67,7	5			0,14	30,0	2,006	50
90	82,5	12,5	5	60,5	5	62,4		0,04	14,0	1,756	25
91	72,5	22,5	5	62,1	5			0,04	15,0	1,820	< 25
92	62,5	32,5	5	63,8	5			0,07	19,8	1,890	25
93	52,5	42,5	5	65,5	5			0,08	24,2	1,961	25
94	85	15	0	58,8	5	60,7		0,01	11,0	1,724	< 25
94-a	75	25	0	60,3	5			0,02	11,8	1,790	< 25
94-b	65	35	0	61,9	5			0,02	13,4	1,863	< 25
94-c	55	45	0	63,5	5			0,03	18,0	1,919	< 25
95	80	10	10	62,2	9	65,8	15	0,18	22,6	1,809	
96	70	20	10	64,0	9			0,21	21,6	1,870	
97	60	30	10	65,3	9			0,23	26,6	1,923	
98	50	40	10	67,7	9			0,30	29,4	1,974	
99	82,5	12,5	5	60,5	9	64,0		0,12	27,4	1,788	
100	72,5	22,5	5	62,1	9			0,14	28,0	1,834	
101	62,5	32,5	5	63,8	9			0,17	30,8	1,890	
102	52,5	42,5	5	65,5	9			0,22	33,8	1,953	
103	85	15	0	58,8	9	62,4		0,07	23,4	1,748	50
103-a	75	25	0	60,3	9			0,05	26,0	1,811	50
103-b	65	35	0	61,9	9			0,10	27,0	1,877	50
103-c	55	45	0	63,5	9			0,13	32,6	1,944	50
104	80	10	10	62,2	7	65,0	10	0,09	19,6	1,765	50
105	70	20	10	64,0	7			0,11	19,2	1,838	
106	60	30	10	65,3	7			0,14	23,0	1,909	
107	50	40	10	67,7	7			0,19	24,6	1,955	
108	82,5	12,5	5	60,5	7	63,2		0,07	21,2	1,743	
109	72,5	22,5	5	62,1	7			0,08	23,8	1,804	
110	62,5	32,5	5	63,8	7			0,10	26,4	1,869	
111	52,5	42,5	5	65,5	7			0,12	28,4	1,929	
112	85	15	0	58,8	7	61,5		0,03	17,0	1,728	25
112-a	75	25	0	60,3	7			0,04	18,6	1,784	< 25
112-b	65	35	0	61,9	7			0,05	20,8	1,850	50
112-c	55	45	0	63,5	7			0,07	24,0	1,916	x
113	27	63	10	72,0	5		15	0,22	26,4	2,063	50
114	27	63	10	72,0	7			0,27	28,0	2,053	50
115	27	63	10	72,0	9			0,33	27,4	2,011	50

Tabelle 10.18: Herstellparameter und Untersuchungsergebnisse Werk 1

WERK 2: Kombination aus Feinsand G12 - Mittelsand S40T - Grobsand B

Serie	Herstellparameter						Untersuchungsergebnisse				
	Zuschlag Nr. 1 Feinsand G 12	Zuschlag Nr. 2 Mittelsand S40T	Zuschlag Nr. 3 Grobsand B 2/4 mm	Packungsdichte ohne Kalk	Kalk-dosis CaO	Press-druck	Rohlings-stand-festig-keit	Stein-druck-festig-keit	Stein-roh-dichte	Frost: Anzahl schaden-freier FTW	Wasser-auf-nahme
	M.-%	M.-%	M.-%	Vol.-%	M.-%	N/mm²	N/mm²	N/mm²	kg/dm³	M.-%	
52	20	40	40	60,6	5	10	0,03	15,2	1,82		
53	25	40	35	60,6			0,03	15,4	1,82		
54	30	40	30	60,5			0,03	15,6	1,81		
55	20	40	40	60,6			0,05	17,2	1,82		
56	25	40	35	60,6			0,05	19,4	1,82	50	12,5
57	30	40	30	60,5			0,05	17,0	1,81		
58	20	40	40	60,6	7	15	0,09	17,0	1,83		
59	25	40	35	60,6			0,08	18,0	1,82		
60	30	40	30	60,5			0,09	18,2	1,82		
61	40	60	0	60,3			0,05	11,0	1,84	25	11,7
62	30	70	0	60,6			0,05	9,2	1,84	<25	11,8
63	20	80	0	60,1			0,04	6,2	1,81	<25	12,5
64	20	40	40	60,6	5	15	0,03	14,6	1,84		
65	25	40	35	60,6			0,03	14,6	1,84		
66	30	40	30	60,5			0,03	14,6	1,84		
67	20	40	40	60,6			0,06	17,6	1,86		
68	25	40	35	60,6			0,07	19,2	1,85	50	11,8
69	30	40	30	60,5			0,06	18,6	1,84		
70	20	40	40	60,6	9	15	0,10	20,2	1,87		
71	25	40	35	60,6			0,09	20,2	1,88		
72	30	40	30	60,5			0,10	18,8	1,86		
73	40	60	0	60,3			0,05	14,6	1,86	50	11,3
74	30	70	0	60,6			0,05	11,2	1,88	25	11,2
75	20	80	0	60,1			0,05	7,6	1,85	<25	11,9

Tabelle 10.19: Herstellparameter und Untersuchungsergebnisse Werk 2

WERK 3: Kombination Mittelsand N - Grobsand S2-3,5T und Grauwacke-Füller bzw. Grauwackesplitt

Serie	Herstellparameter						Untersuchungsergebnisse						
	Zuschlag Nr. 1 Mittel-sand N 0/2 mm	Zuschlag Nr. 2 Grob-sand S2-3,5T	Zuschlag Nr. 3 Grau-wacke-Füller	Zuschlag Nr. 4 Grau-wacke 0/2 mm	Packungs-dichte ohne Kalk	Kalk-dosis CaO	Packungs-dichte mit Kalk	Press-druck	Rohlings-stand-festig-keit	Stein-druck-festig-keit	Stein-roh-dichte	Frost: Anzahl schaden-freier FTW	Wasser-auf-nahme
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	Vol.-%	M.-%	Vol.-%	N/mm²	N/mm²	N/mm²	kg/dm³	M.-%	mm/m
152	45	50	5	0	60,0	5	62,2	15	0,10	30,0	2,06		
152a	42,5	50	7,5	0	60,2		62,5		0,13	28,1	2,07		
153	40	50	10	0	60,4		62,7		0,17	27,2	2,09		
154	35	50	15	0	60,8		63,1		0,26	24,2	2,07		
155	45	50	5	0	60,0		63,2		0,16	39,2	2,05		
155a	42,5	50	7,5	0	60,2		63,4		0,20	36,7	2,06		
156	40	50	10	0	60,4	7	63,6	15	0,25	35,6	2,07	25	9,9
157	35	50	15	0	60,8		64,0		0,33	28,6	2,06		
158	45	50	5	0	60,0		64,2		0,28	42,4	2,02		
158a	42,5	50	7,5	0	60,2		64,4		0,36	44,6	2,03		
159	40	50	10	0	60,4		64,6		0,41	47,2	2,04		
160	35	50	15	0	60,8		65,0		0,41	37,0	2,02		
161	19,1	65,9	15		61,1	5	63,4	15	0,22	19,6	2,04	50	9,5
162	19,1	65,9	15		61,1	7	64,3		0,27	26,8	2,03	50	10,2
163	19,1	65,9	15		61,1	9	65,3		0,36	28,4	2,00	50	10,4
164	40	50	0	10	60,4	5	62,7	15	0,05	28,0	2,05		
165	35	50	0	15	60,8		63,1		0,11	25,8	2,04		
166	30	50	0	20	61,2		63,5		0,12	26,1	2,05		
167	40	50	0	10	60,4		63,6		0,14	32,6	2,04		
168	35	50	0	15	60,8		64,0		0,21	36,8	2,05	50	9,5
169	30	50	0	20	61,2		64,4		0,20	36,0	2,05		
170	40	50	0	10	60,4	7	64,6	15	0,21	38,4	2,04		
171	35	50	0	15	60,8		65,0		0,25	39,6	2,03		
172	30	50	0	20	61,2		65,4		0,31	39,0	2,03		
173	18	42	0	40	62,5	5	67,4		0,25	24,8	2,06	50	9,8
174	18	42	0	40	62,5	7	67,4		0,26	33,8	2,06	50	9,8
175	18	42	0	40	62,5	9	67,4		0,38	36,4	2,04	50	10,3
													44,3

Tabelle 10.20: Herstellparameter und Untersuchungsergebnisse Werk 3

WERK 4: Kombination Feinsand - Mittelsand- Basaltsand

Serie	Herstellparameter						Untersuchungsergebnisse									
	Zuschlag Nr. 1 Fein- sand GR 0/0,3 mm	Zuschlag Nr. 2 Mittel- sand KS 0/2 mm	Zuschlag Nr. 3 Basalt- sand HT 0/2 mm	Packungs- dichte ohne Kalk	Kalk- dosis CaO	Press- druck	Rohlings- stand- festig- keit	Stein- druck- festig- keit	Stein- zug- festig- keit	Stein- roh- dichte	Frost: Anzahl schaden- freier FTW	Wasser- auf- nahme-	Gehalt an nicht umge- setztem Kalk	Hygrische Schwind- dehnung	Hg-füll- bare Poros- ität < 0,05µm	
M.-%	M.-%	M.-%	Vol.-%	M.-%	N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	kg/dm³		M.-%	M.-%	mm/m	mm/m		
127	10	80	10	60,1			0,04	16,0	1,02	1,86						
128	10	70	20	60,5		5	0,05	15,2	1,05	1,88						
129	10	60	30	60,9			0,05	14,6	0,99	1,90						
130	10	80	10	60,1		7	0,07	20,6	1,16	1,87						
131	10	70	20	60,5			0,07	23,0	1,28	1,90	50	14,0	0,38	0,19	41,1	
132	10	60	30	60,9			0,09	19,8	1,43	1,92						
133	10	80	10	60,1		9	0,12	24,8	1,33	1,87						
134	10	70	20	60,5			0,11	24,2	1,38	1,89						
135	10	60	30	60,9			0,12	24,4	1,55	1,93						
136	24	36	40	62,2	5		0,06	18,4	1,38	1,98	50	11,9	0,23	0,16	35,6	
137	24	36	40	62,2	7		0,13	28,6	2,00	1,98	50	11,8	0,43	0,17	40,4	
138	24	36	40	62,2	9		0,25	34,2	2,29	1,97	50	12,3	0,78	0,22	39,1	
139	10	80	10	60,1		5	0,05	16,0	1,10	1,88						
140	10	70	20	60,5			0,05	16,2	1,11	1,91						
141	10	60	30	60,9			0,06	16,0	1,21	1,93						
142	10	80	10	60,1		7	0,09	23,4	1,50	1,90						
143	10	70	20	60,5			0,10	24,8	1,49	1,95	50	13,2	0,29	0,19	42,5	
144	10	60	30	60,9			0,12	23,6	1,61	1,97						
145	10	80	10	60,1		9	0,13	30,0	1,75	1,92						
146	10	70	20	60,5			0,14	29,2	1,67	1,95						
147	10	60	30	60,9			0,17	29,0	1,89	1,98						
148	24	36	40	62,2	5		0,10	21,4	1,60	2,01	50	11,4	0,22	0,15	36,9	
149	24	36	40	62,2	7		0,17	31,2	2,15	2,04	50	11,4	0,39	0,18	39,2	
150	24	36	40	62,2	9		0,25	38,3	2,40	2,02	50	11,1	0,68	0,21	40,8	

Tabelle 10.21: Herstellparameter und Untersuchungsergebnisse Werk 4

WERK 5: Kombination von Quarzsanden - Anteil der Mittelsandkomponente = const.

Serie	Herstellparameter						Untersuchungsergebnisse									
	Zuschlag Nr. 1 fein G0-0,35	Zuschlag Nr. 2 mittel G34T	Zuschlag Nr. 3 grob S0,7-1,2T S1-2T S2-3-5T	Packungs- dichte ohne Kalk	Kalk- dosis CaO CL90	Press- druck	Rohlings- stand- festig- keit	Stein- druck- festig- keit	Stein- zug- festig- keit	Stein- roh- dichte	Frost: Anzahl schaden- freier FTW	Wasser- auf- nahme-	Gehalt an nicht umge- setztem Kalk	Hygrische Schwind- dehnung	Hg-füll- bare Poros- ität < 0,05µm	
M.-%	M.-%	M.-%	Vol.-%	M.-%	N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	kg/dm³		M.-%	M.-%	mm/m	mm/m		
MS-1	50	50	0	58,3	5		0,01	12,4	24,8	1,69					0,119	
MS-2	40	50	10	59,4	5		0,01	12,8	25,6	1,74						
MS-3	30	50	20	60,3	5		0,01	13,4	26,8	1,78	50	13,4	0,45	0,098		
MS-4	20	50	30	60,8	5		0,02	16,2	32,4	1,82						
MS-5	10	50	40	60,9	5		0,02	14,1	28,2	1,83						
MS-6	0	50	50	60,5	5		0,01	9,2	18,4	1,82					0,096	
MS-7	50	50	0	58,3	7		0,03	16,6	33,2	1,71					0,134	
MS-8	40	50	10	59,4	7		0,03	16,8	33,6	1,75						
MS-9	30	50	20	60,3	7		0,05	14,6	29,2	1,80	50	12,4	1,40	0,072		
MS-10	20	50	30	60,8	7		0,04	12,2	24,4	1,83						
MS-11	10	50	40	60,9	7		0,04	10,2	20,4	1,84						
MS-12	0	50	50	60,5	7		0,04	7,2	14,4	1,84					0,047	
MS-13	50	50	0	58,3	9		0,06	16,4	32,8	1,72					0,072	
MS-14	40	50	10	59,4	9		0,07	14,4	28,8	1,77						
MS-15	30	50	20	60,3	9		0,08	11,0	22,0	1,81	50	11,9		0,021		
MS-16	20	50	30	60,8	9		0,08	10,4	20,8	1,84						
MS-17	10	50	40	60,9	9		0,08	8,2	16,4	1,85					16,8	
MS-18	0	50	50	60,5	9		0,07	7,0	14,0	1,85					-0,015	
MS-19	50	0	50	62,9	5		0,02	17,0	34,0	1,86					0,071	
MS-20	50	0	50	62,9	7		0,05	19,0	38,0	1,89					0,018	
MS-21	50	0	50	62,9	9		0,11	14,6	29,2	1,89					-0,014	

Tabelle 10.22: Herstellparameter und Untersuchungsergebnisse Werk 5

WERK 6: Breite Variation der CaO-Dosis

Serie	Herstellparameter					Ergebnisse	
	Zuschlag Nr. 1 Mittel- sand Ne	Packungs- dichte ohne Kalk	Kalk- dosis CaO CL90	Kalk- dosis CaO CL90	Press- druck	Stein- druck- festig- keit	Stein- roh- dichte
	M.-%	Vol.-%	M.-%	Vol.-%	N/mm ²	N/mm ²	kg/dm ³
MS-a	95	58,8	5	5,27	12	11,4	1,77
MS-b	93	58,8	7	7,35	12	20,0	1,79
MS-c	91	58,8	9	9,41	12	26,6	1,79
MS-d	89	58,8	11	11,46	12	32,4	1,79
MS-e	87	58,8	13	13,50	12	35,2	1,87

Tabelle 10.23: Herstellparameter und Untersuchungsergebnisse Werk 6

Werk 1: Kombination Feinsand - RC-Splitt - KSM-Füller

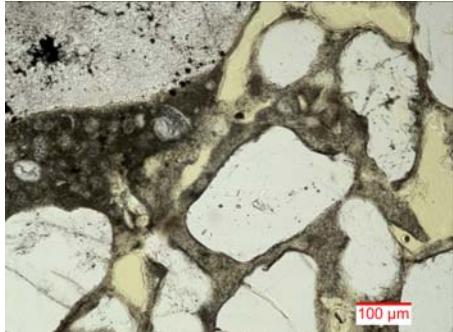


Bild 10-23-a: Serie 78

Bildbreite: 0,8 mm



Bild 10-23-b: Serie 80

Bildbreite: 0,8 mm

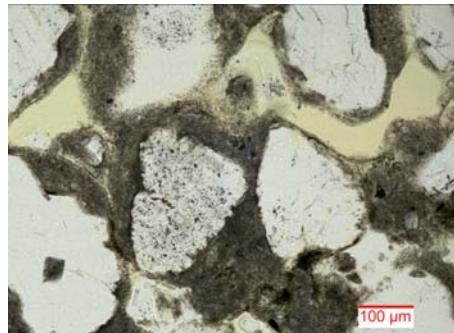


Bild 10-23-c: Serie 114

Bildbreite: 0,8 mm

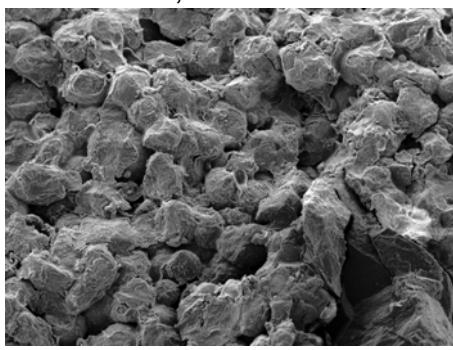


Bild 10-23-d: Serie 80

Bildbreite: 2,89 mm

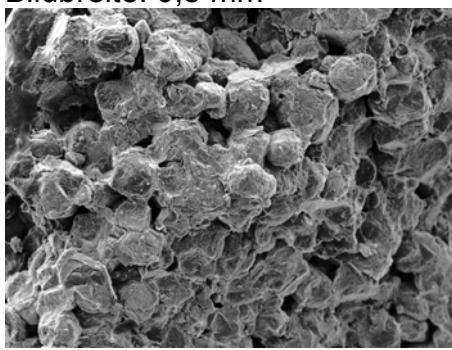


Bild 10-23-e: Serie 78

Bildbreite: 2,89 mm



Bild 10-23-f: Serie 80

Bildbreite: 289 µm

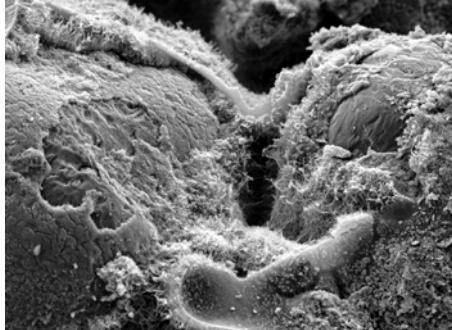


Bild 10-23-g: Serie 78

Bildbreite: 289 µm

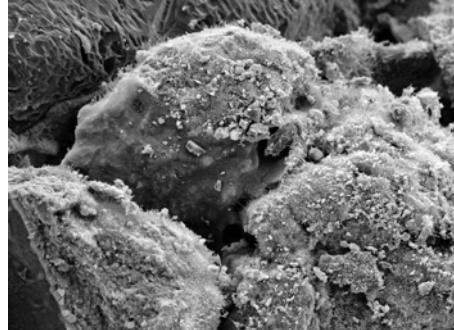


Bild 10-23-h: Serie 114

Bildbreite: 289 µm

Werk 3: Kombination Mittelsand-Grobsand-Grauwacke-Füller bzw. Grauwacke 0/2 mm

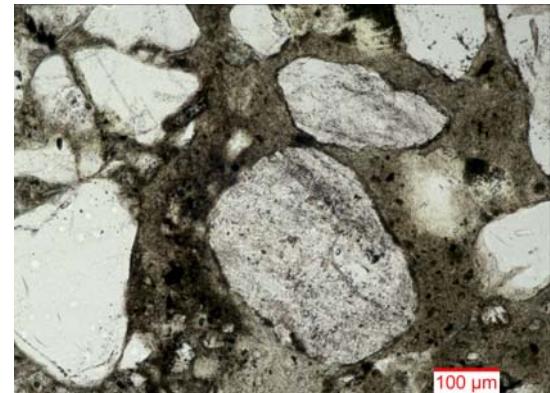
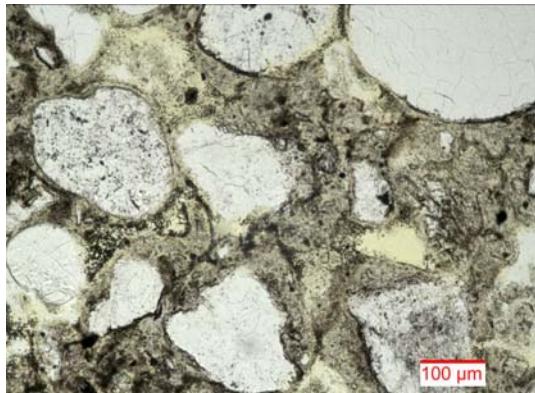


Bild 10-24-a:Serie 155 - Bildbreite: 0,8 mm

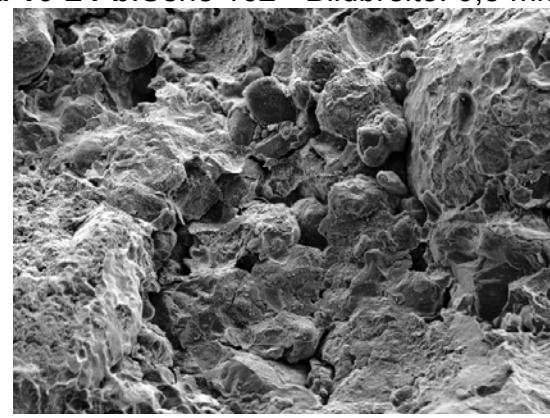
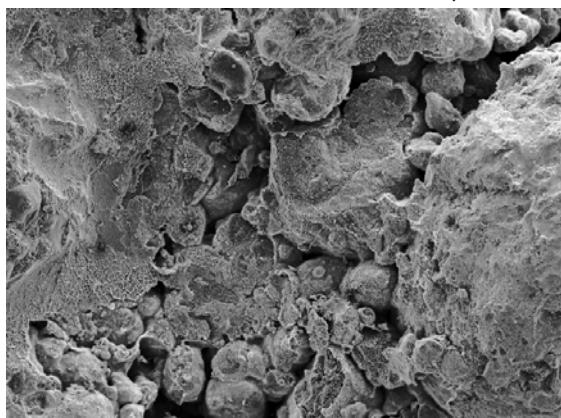


Bild 10-24-c:Serie 155 - Bildbreite 2,89 mm

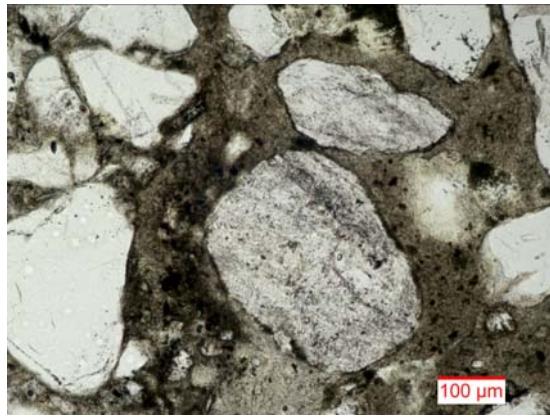
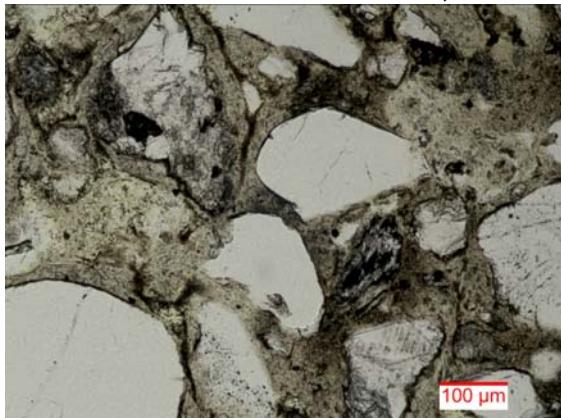


Bild 10-24-e:Serie 155 - Bildbreite: 0,8 mm

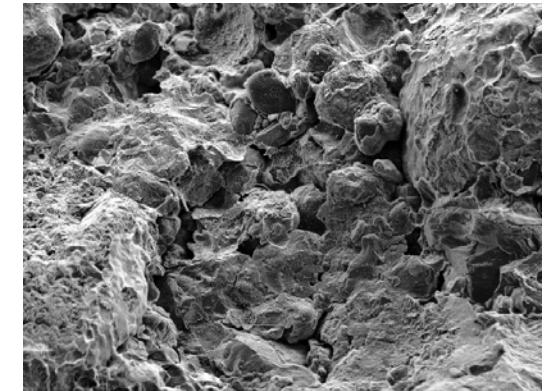
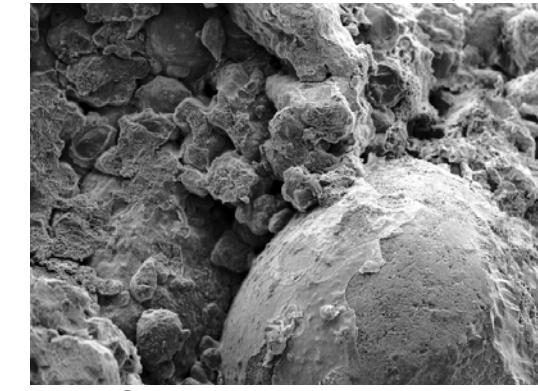


Bild 10-24-g:Serie 155 - Bildbreite 2,89 mm

Bild 10-24-h:Serie 174 - Bildbreite: 0,8 mm

Werk 4: Kombination Feinsand - Mittelsand - Basaltsand

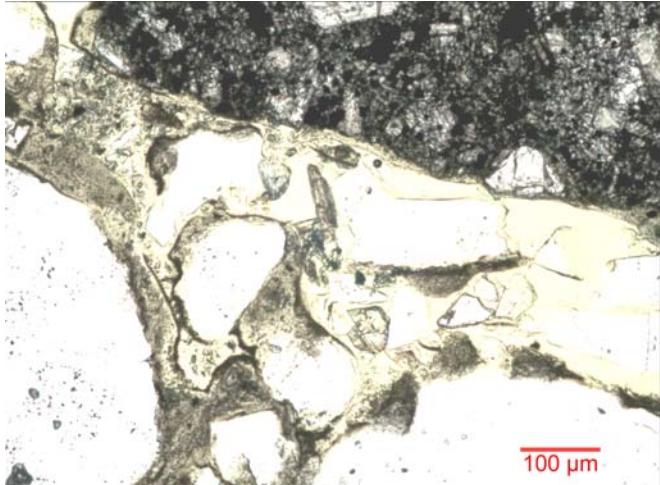


Bild 10-25-a: Serie 144
Bildbreite: 0,8 mm

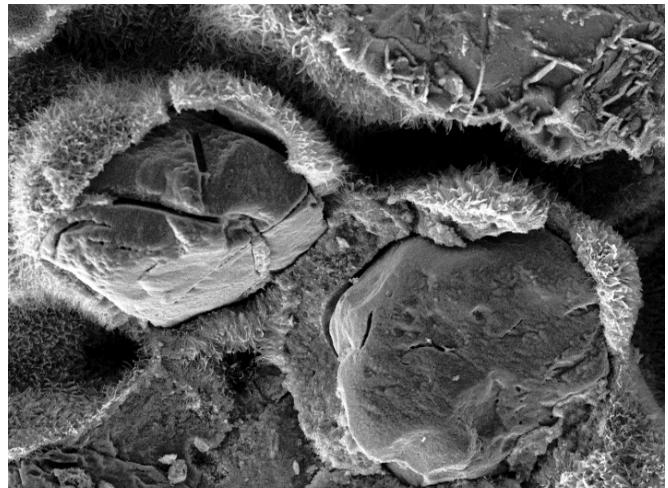


Bild 10-25-b: Serie 144
Bildbreite 289 µm

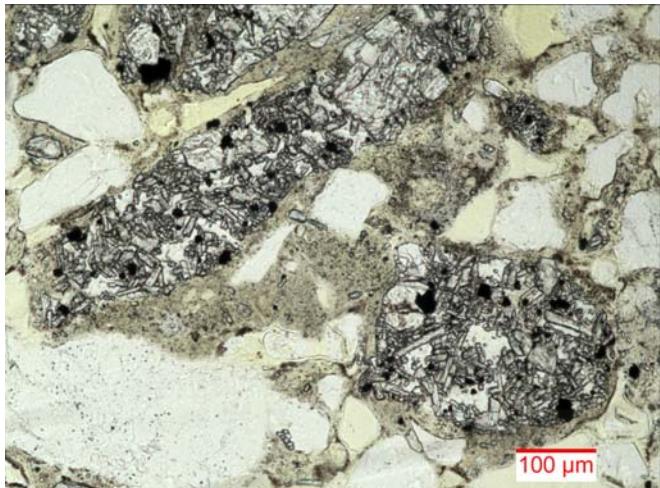


Bild 10-25-c: Serie 149
Bildbreite: 0,8 mm

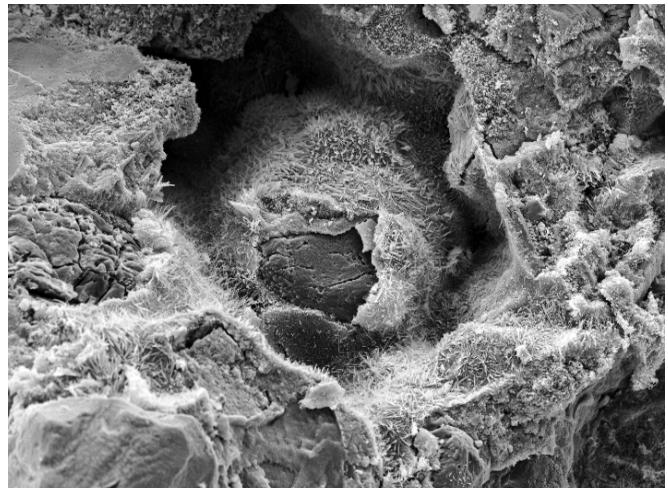


Bild 10-25-d: Serie 149
Bildbreite 289 µm

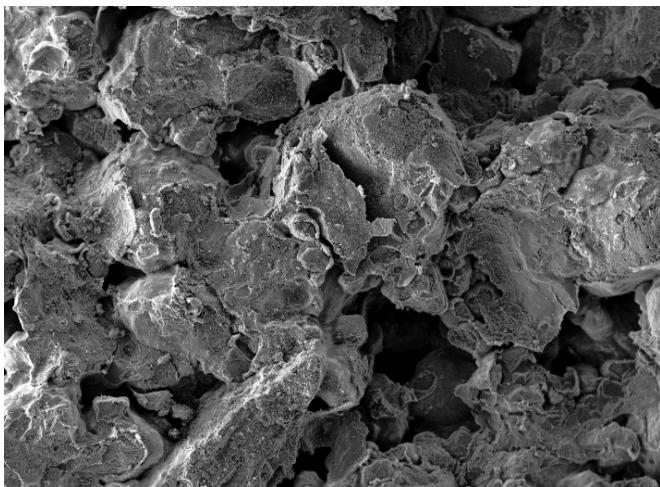


Bild 10-25-e: Serie 144
Bildbreite 2,89 mm

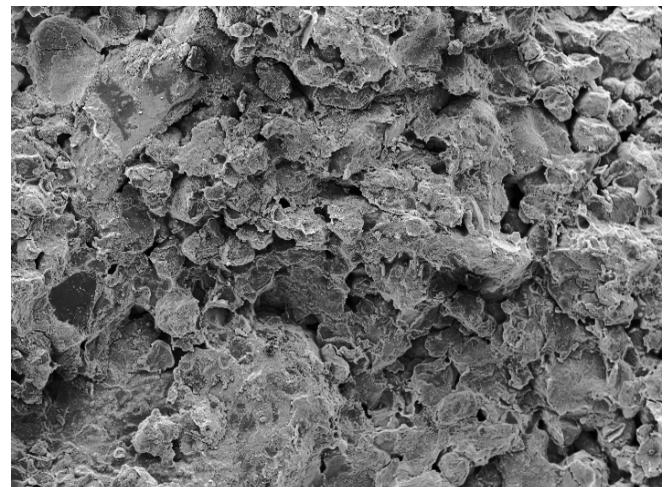


Bild 10-25-f: Serie 149
Bildbreite 2,89 mm

Werk 5: Kombination von Quarzsanden - Anteil der Mittelsandkomponente = const.

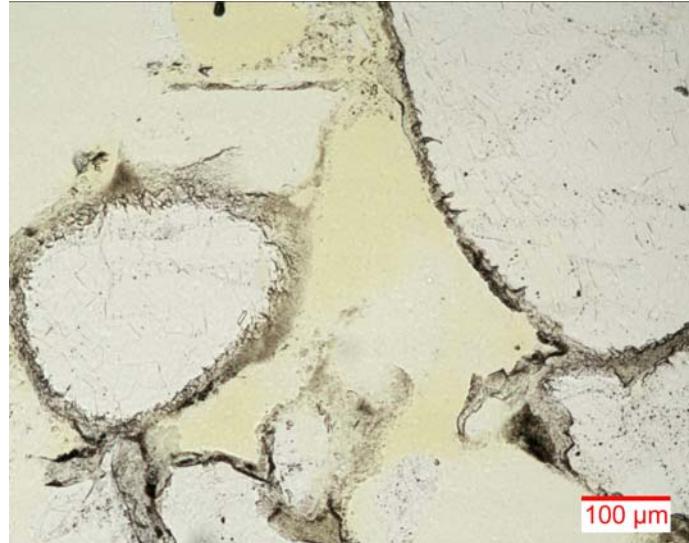


Bild 10-26-a: Serie MS-7

Bildbreite: 0,8 mm

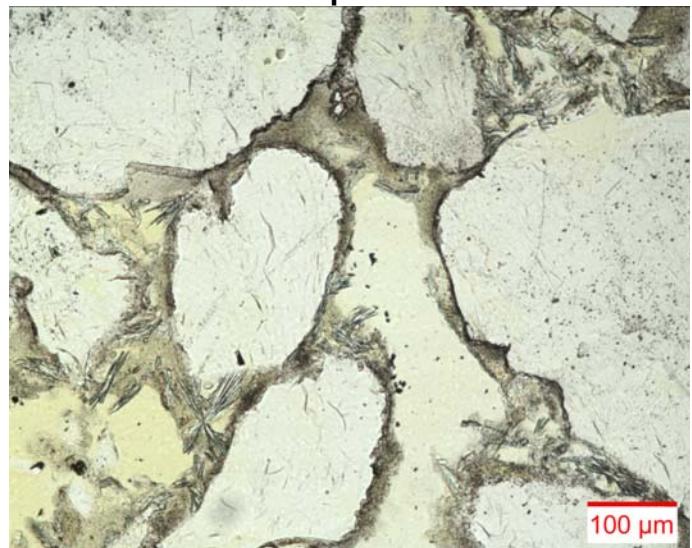


Bild 10-26-b: Serie MS-12

Bildbreite: 0,8 mm

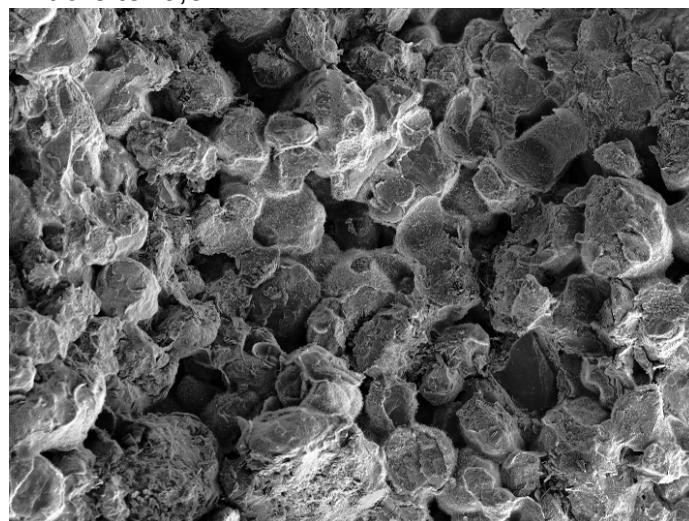


Bild 10-26-c: Serie MS-7 - Bildbreite 2,89 mm

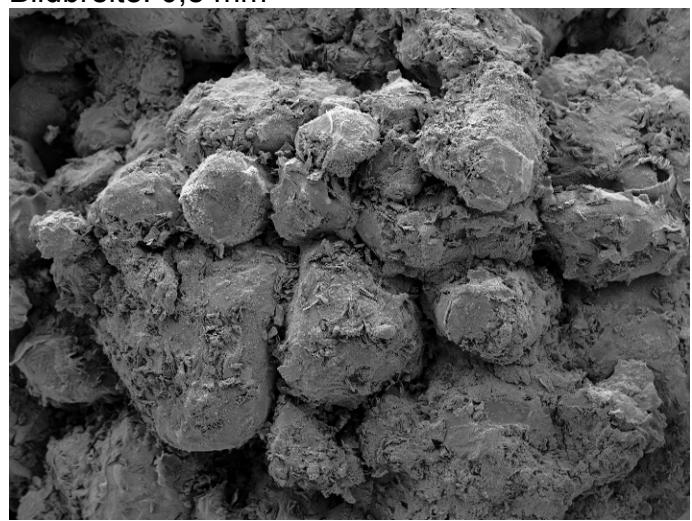


Bild 10-26-d: Serie MS-12 -

Bildbreite 2,89 mm

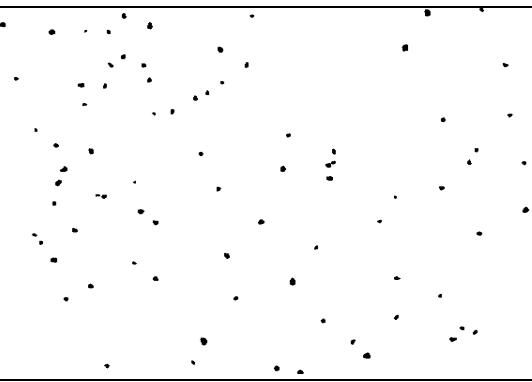
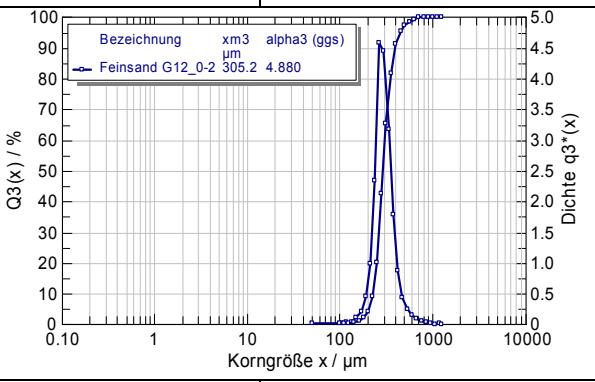
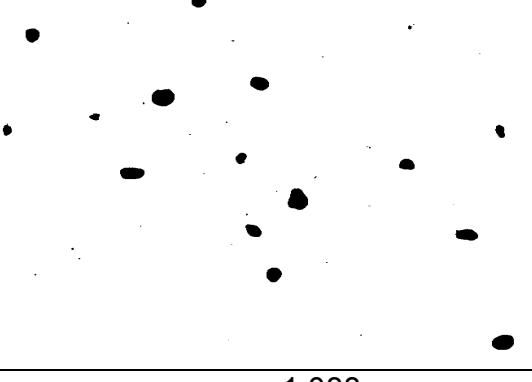
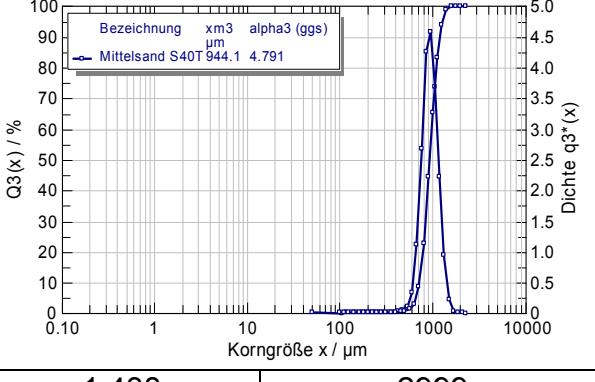
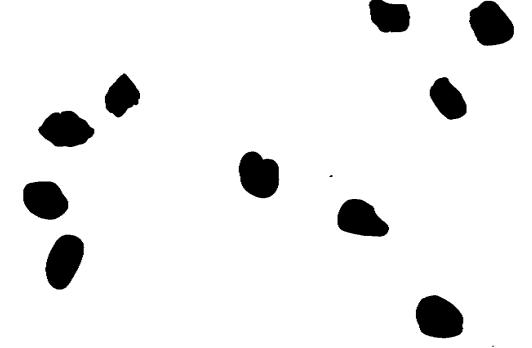
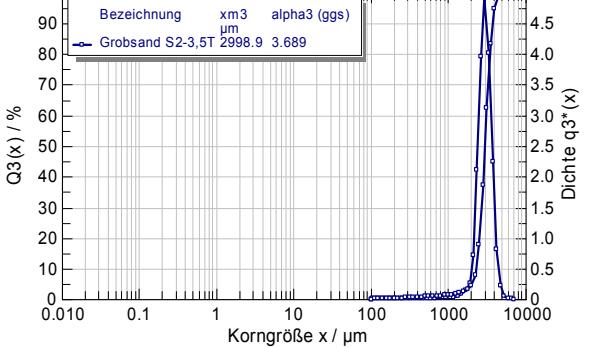
Probe	SPHT [-]	L / B [-]	$x_m [\mu\text{m}]$ der Gesamtprobe
1) Fein-sand G 12	1,058	1,409	305,2
			
2) Mittel-sand S 40 T	1,066	1,380	944,1
			
3) Groß-sand S 2-3,5 T	1,088	1,438	2999
			

Bild 10.27: Ergebnisse der Kornformanalyse für den Anteil $> 100\mu\text{m}$ und Korngrößenanalyse für die Gesamtprobe [56]

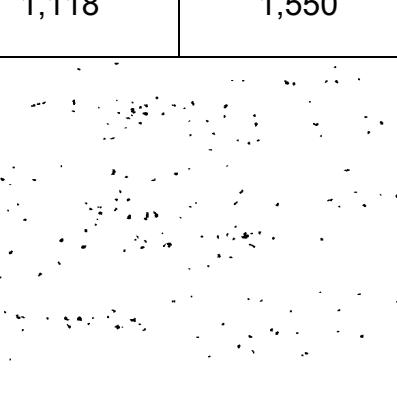
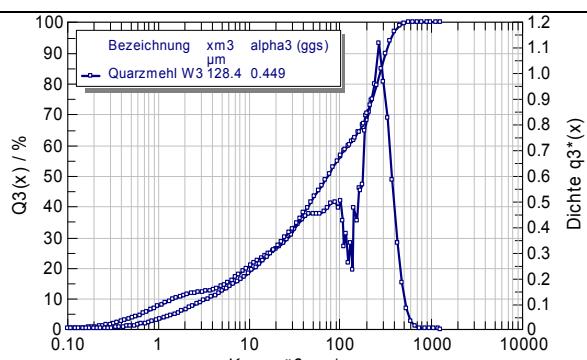
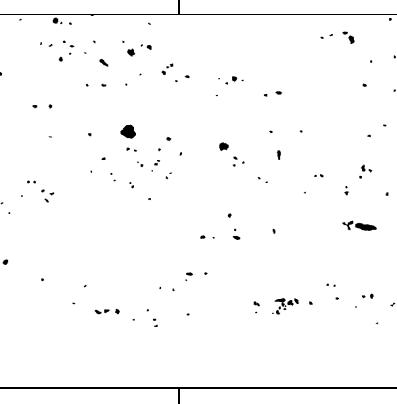
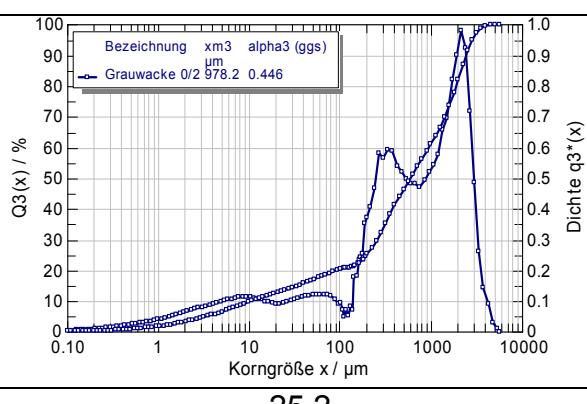
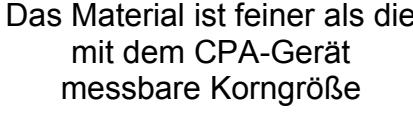
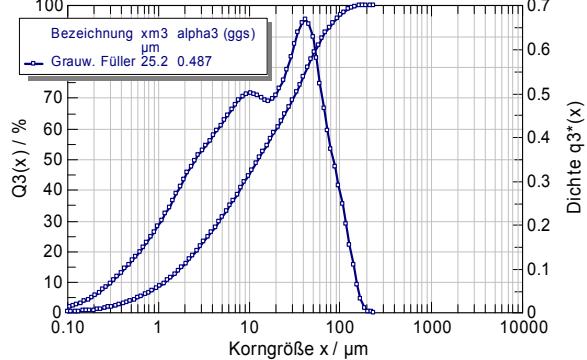
Probe	SPHT [-]	L / B [-]	$x_m [\mu\text{m}]$ der Gesamtprobe
4) Quarz- mehl W3	1,118	1,550	128,4  
5) Grau- wacke 0/2	1,166	1,631	978,2  
6) Grau- wacke Füller	-	-	25,2 Das Material ist feiner als die mit dem CPA-Gerät messbare Korngröße  

Bild 10.27: Ergebnisse der Kornformanalyse für den Anteil > 100µm und Korngrößenanalyse für die Gesamtprobe (Fortsetzung) [56]

Probe	SPHT [-]	L / B [-]	x_m [μm] der Gesamtprobe
7) Fein-sand R	1,100	1,513	204,0
			<p>Bezeichnung xm3 alpha3 (ggs) μm Feinsand GR 204.0 1.585</p>
8) Mittel-sand S	1,069	1,370	714,4
			<p>Bezeichnung xm3 alpha3 (ggs) μm Mittelsand KS 714.4 1.508</p>
9) Basalt-sand T 0/2	1,197	1,769	944,4
			<p>Bezeichnung xm3 alpha3 (ggs) μm Basalt-sand 0/2 944.4 0.762</p>

Bild 10.27: Ergebnisse der Kornformanalyse für den Anteil > 100 μm und Korngrößenanalyse für die Gesamtprobe (Fortsetzung) [56]

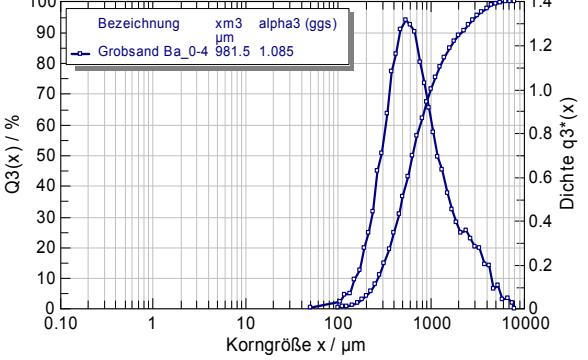
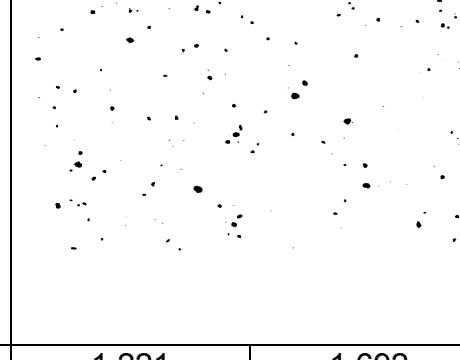
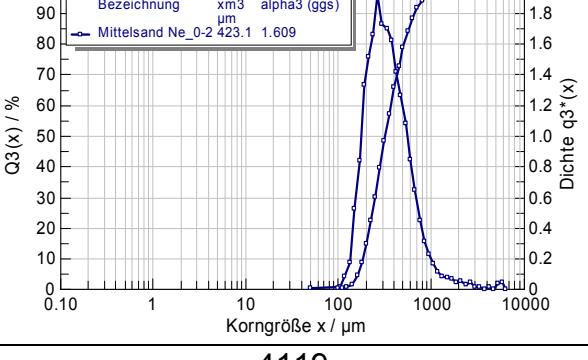
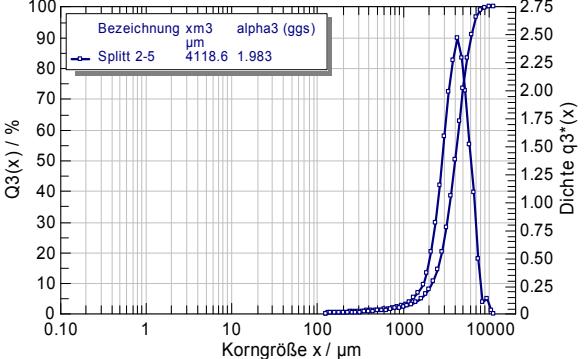
Probe	SPHT [-]	L / B [-]	$x_m [\mu\text{m}]$ der Gesamtprobe
10) Grob- sand B 0/4	1,109	1,446	981,5
			 
11) Mittel- sand N 0/2	1,065	1,422	423,1
			 
12) RC- Splitt 2/5	1,221	1,692	4119
			 

Bild 10.27: Ergebnisse der Kornformanalyse für den Anteil > 100μm und Korngrößenanalyse für die Gesamtprobe (Fortsetzung) [56]

Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau

Structural Materials and Engineering Series

- Heft 1:** **Fehling, E. / Schmidt, M. / Teichmann, T. / Bunje, K. / Bornemann, R. / Middendorf, B. (2005)**
Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht, ISBN 3-89958-108-9, € 18,00
- Heft 2:** **Schmidt , M. / Fehling, E. (Hrsg.) (2003)**
Ultra-Hochfester Beton - Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa. Tagungsbeiträge zu den 3. Kasseler Baustoff- und Massivbautagen am 10. September 2003, ISBN 978-3-89958-518-6, € 18,00
- Heft 3:** **Schmidt, M. / Fehling, E. / Geisenhanslücke, C. (Hrsg.) (2004)**
Ultra High Performance Concrete (UHPC), ISBN 3-89958-086-9, vergriffen
- Heft 4:** **Bornemann, R. (2005)**
Untersuchungen zur Modellierung des Frisch- und Festbetonverhaltens erdfreudter Betone, ISBN 3-89958-132-6, € 24,00
- Heft 5:** **Solyman, M. (2006)**
Classification of Recycled Sands and their Applications as Aggregates for Concrete and Bituminous Mixtures, ISBN 978-3-89958-218-5, € 24,00
- Heft 6:** **Tesch, V. (2007)**
Gefügeoptimierte Instandsetzungsmörtel auf Calciumsulfat-Basis für die Anwendung im Außenbereich, ISBN 978-3-89958-333-5, € 24,00
- Heft 7:** **Schmidt, M. (ed.) (2007)**
Ultra High Performance Concrete (UHPC). 10 Years of research and development at the University of Kassel - 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, ISBN 978-3-89958-347-2, € 49,00
- Heft 8:** **Schmidt, M. (Hg.) (2007)**
Nanotechnologie im Bauwesen Nanooptimized Hightech-Baustoffe. 9. Mai 2007, ISBN 978-3-89958-348-9, € 22,00
- Heft 9:** **Leutbecher, T. (2008)**
Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem Ultrahochfesten Beton (UHPC), ISBN 978-3-89958-374-8, € 39,00
- Heft 10:** **Fehling, E. / Schmidt, M. / Stürwald, S. (eds.) (2008)**
Ultra High Performance Concrete (UHPC). Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, March 05-07, 2008, ISBN 978-3-89958-376-2, € 79,00

Heft 11: Fehling, E. / Leutbecher, T. / Röder, F.-K. (2008)

Zur Druck-Querzug-Festigkeit von Stahlbeton und stahlfaserverstärktem Stahlbeton in scheibenförmigen Bauteilen - Biaxial Compression-Tension-Strength of Reinforced Concrete and Reinforced Steel Fibre Concrete in Structural Panels, ISBN 978-3-89958-440-0, € 39,00

Heft 12: Teichmann, T. (2008)

Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, ISBN 978-3-89958-441-7, € 24,00

Heft 13: Geisenhanslücke, C. (2009)

Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen, Influence of the granulometry of fine particels on the rheology of pastes, ISBN 978-3-89958-706-7, € 24,00

Heft 14: Nöldgen, M. (2010)

Modellierung von ultrahochfestem Beton (UHPC) unter Impaktbelastung. Auslegung eines Hochhauskerns gegen Flugzeuganprall, ISBN 978-3-89958-862-0, € 29,00

Heft 15: Eden, W. (2011)

Einfluss der Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmassen auf die Scherbenrohdichte von Kalksandsteinen, ISBN 978-3-86219-040-9, € 29,00

Bestellungen: www.upress.uni-kassel.de

ISBN 978-3-86219-040-9