

Björn-Axel Dose

**Untersuchungen an
Sand-Zement-Agglomeraten zum Einsatz
als grobe Gesteinskörnung in Beton**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Untersuchungen an
Sand-Zement-Agglomeraten zum Einsatz als
grobe Gesteinskörnung in Beton





***Untersuchungen an
Sand-Zement-Agglomeraten zum Einsatz als
grobe Gesteinskörnung in Beton***

Dem Promotionsausschuss
der Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Björn-Axel Dose

aus Rostock

2013



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.

1. Aufl. – Göttingen: Cuvillier, 2013

Zugl.: (TU) Hamburg-Harburg, Univ., Diss. 2013

978-3-95404-343-9

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Holle
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Frank Schmidt-Döhl
Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr. E.h. Dr.-Ing. habil. Josef Schlattmann

Tag der mündlichen Prüfung: 20.11.2012

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2013
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2013

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-95404-343-9



Danksagung

Die Forschungsarbeit zu der hier vorliegenden Arbeit durfte ich während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Angewandte Bautechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg leisten. Ich danke hiermit all denen, die mich auf meinem Weg begleitet und unterstützt haben. Dies waren vor allem:

- mein Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Holle durch geduldige, detaillierte und vertrauensvolle Betreuung meiner Arbeit
- der Zweitgutachter Prof. Dr.-Ing. F. Schmidt-Döhl durch richtungsweisende Beratung und vertiefendes Prüfen
- der Prüfungsvorsitzende Prof. Dr. E.h. Dr.-Ing. habil. J. Schlattmann durch die würdige Gestaltung der mündlichen Prüfung
- die Doktoranden des Institutes: Dr.-Ing. C. Rullán Lemke, W. Kaul, M. Kulcke, D. Blome und T. Wahner durch Verständnis, Gespräche und Zusammenhalt
- die Mitarbeiter des Institutes für Angewandte Bautechnik: Ober-Ing. M. Ludolph, B. Wolf, A. Grund-Kindler, F. Switon durch das Schaffen einer angenehmen Arbeitsumgebung und die Entlastung von Verwaltungsaufgaben
- die Mitarbeiter und Doktoranden des Institutes für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie durch die freundliche, kompetente und vertrauensvolle Aufnahme
- N. Laude und M. Stegemeier, die als HiWi's eine wesentliche Stütze bei der Durchführung der Versuche bildeten
- das Ausbildungszentrum Bau Hamburg, das durch das Bereitstellen einer Halle und die Unterstützung der Mitarbeiter den Umfang der Versuche ermöglichte
- Philine, Nadine, Martin, Susann, und Jörg durch Geduld, Rückmeldung und Verständnis
- meine Familie mit Verständnis, Unterstützung und Rückhalt





Kurzfassung

Untersuchungen an Sand-Zement-Agglomeraten zum Einsatz als grobe Gesteinskörnung in Beton

In Norddeutschland als einem Gebiet mit einem Mangel an natürlich vorkommendem Grobkorn wird dieser zur Betonherstellung benötigte Zuschlag entweder durch Sieben der anstehenden Kiesvorkommen gewonnen (Grobkorngehalt ca. 20 %) oder z.B. als Splitt aus Skandinavien importiert. Anstatt die Überschusssande für untergeordnete Verfüllaufgaben einzusetzen, können sie durch Bindemittelzugabe mit bekannten Granulierverfahren zu größeren Agglomeraten geformt werden und lassen sich wie normales Grobkorn als Zuschlag für Beton verwenden. Die Sand-Agglomerate haben eine geringere Kornfestigkeit als natürlicher Zuschlag, sind aber dauerhafter als die Matrix üblicher Betone. Aus ihnen lässt sich dauerhafter Normalbeton herstellen, der den bekannten Bemessungsregeln gehorcht und nicht die üblichen Schwächen eines „Sandbetons“ zeigt.

Dem Energieaufwand und Anlageneinsatz bei der Herstellung der Granulate stehen der technische Gewinnungsaufwand und die Einsparung des Transportes von grober Gesteinskörnung über große Entfernungen gegenüber.

In der Forschungsarbeit wurde bei der Untersuchung des Einflusses verschiedener Sande und Bindemittelmengen auf die Eigenschaften der Agglomerate nachgewiesen, dass die in der Region anstehenden Sande in einem weiten Bereich der Kornzusammensetzungen für das Verfahren geeignet sind. Zur Steuerung des Herstellprozesses und zur Güteüberwachung der erhärteten Agglomerate wurden von einer großen Anzahl von frischen und erhärteten Einzelkörnern die Kraft-Verformungs-Linien ermittelt und auf die Eignung als Steuerungs- und Qualitätsparameter untersucht.

Schlagwörter: Agglomerat, Beton, Dauerhaftigkeit, Feinstkorn, Festigkeit, Gesteinskörnung, Gefüge, Kies, Packungsdichte, Poren, Sand, Verformung, Wassergehalt, Zement, Zuschlag



Nomenklatur

a) Lateinische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
$a_{s,i}$	Hohlraumanteil	1
d	Untere Nennsiebgröße der gewählten Korngruppe oder Sieblinie (Kleinsttkorndurchmesser) oder Durchmesser eines runden Probekörpers	mm
d_m	Mittlerer Korndurchmesser einer Kornklasse	mm
$d_{\text{Füll}}$	Füllkorndurchmesser	mm
d_{Schlupf}	Schlupfkorndurchmesser	mm
f_{cm}	Mittelwert der Betonfestigkeit einer Probenserie	N/mm ²
f_{ck}	charakteristischer Wert der Betonfestigkeit einer Betonmenge (5%-Fraktile)	N/mm ²
h	Höhe eines Probekörpers	mm
m	Steigung einer Kurve als Quotient dx/dy	1
m_{D1}, m_{SFA}	Masse des im Index genannten Materials, hier Sand D1 und Steinkohlenflugasche	g
n	Exponent zur Berücksichtigung der Kornform oder Anzahl der Messungen	1
s	Standardabweichung	Verschiedene, je nach Ausgangsgröße
s^2	Varianz	Verschiedene, je nach Ausgangsgröße
\bar{x}, \bar{x}_{D1}	Mittlere Korngröße des im Index genannten Stoffes	mm, μm
A	Gesamtsiebdurchgang durch ein Prüfsieb	M%
D	Obere Nennsiebgröße der gewählten Kornklasse oder Größtkorndurchmesser einer Sieblinie oder Druckwert kollektiver Druckprüfung Prüfung grober Gesteinskörnung in Anlehnung an DIN 4226-3)	mm kN
E_{dyn}	dynamisches E-Modul	N/mm ²
MW	Mittelwert der Anteile	Verschiedene, je nach Ausgangsgröße
L	Länge z.B. einer Probe zur Schwindmessung	mm



L/B	Verhältnis von Länge zu Breite eines Körpers	mm/mm
V_F	Volumen der Feststoffes	cm ³
V_R	Volumen des betrachteten Raumes	cm ³
V_{Por}	Volumen des Hohlraumes	cm ³
VK	Variationskoeffizient	1

b) Griechische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
Φ	Packungsdichte	1
β_D, β_{D1}	Betondruckfestigkeit hier von quader- und würfelförmigem Probekörper	N/mm ²
ε	Hohlraumgehalt	1
ε	Dehnung = $\Delta l / l$ (Längenänderung / Ausgangslänge)	% oder ‰
$\rho_{0,D2}$	Rohdichte von Partikeln im trockenen Zustand, nähere Bezeichnung durch zweiten Index, hier Sand D2	g/cm ³
$\rho_{0,rechn}$	Rechnerische Rohdichte von Partikeln im trockenen Zustand, nähere Bezeichnung durch weiteren Index	g/cm ³
$\rho_{0Fr,rechn}$	Frischdichte von Partikeln, schließt den aktuellen Wassergehalt mit ein, nähere Bezeichnung durch weiteren Index	g/cm ³
ΔL	Längenänderung = Ausgangslänge – aktuelle Länge (gem. Wesche, T. 1, S. 78)	mm
$\rho_{0,D1}, \rho_{0,CEM}$	Rohdichten der Ausgangsstoffe	g/cm ³
ρ_{Sch}	Schüttdichte eines Korngemenges	g/cm ³
‰	Promille (ein Tausendstel)	1/1000



c) Abkürzungen, Kurzbezeichnungen und Formatierungen

D1, K2	Sand D1, Sand K2
D1-1, D2-5, K1-3	Sand D1, Probe 1 und Sand D2, Probe 5 und Sand K1, Probe 3
D01	Agglomeratrezeptur D01
K07 16/32 -2	Agglomeratrezeptur K07, Kornklasse 16/32, Probe 2
D04 8/16 Sek	Agglomeratrezeptur D04, Kornklasse 8/16, Sekundäragglomerate
D06xFM 8/16 -2	Agglomeratrezeptur D06x mit Fließmittel, Kornklasse 8/16, Probe 2
K04 FM 4.Misch. 8/16 -2	Agglomeratrezeptur K04 mit Fließmittel, vierte Mischung, Kornklasse 8/16, Probe 2
K04 8/16 Beton	Agglomeratrezeptur K04, Kornklasse 8/16, Probe 1
VV6* 4/8 -2	Agglomeratrezeptur VV6, Kornklasse 4/8, Probe 2, Wiederholungsprüfung
VV21 8/16 -1	Agglomeratrezeptur VV21 aus Restsand 1, Kornklasse 8/16, Probe 1
Naturkies 4/8 -1	Naturkies, Kornklasse 4/8, Probe 1
B08K04tr	Betonrezeptur: Größtkorn 8mm, Agglomerat der Rezeptur K04 bei trockener Zugabe als grobe Gesteinskörnung
B16D05b	Betonrezeptur: Größtkorn 16 mm, Agglomerat der Rezeptur D05 und Prozesszustand b als grobe Gesteinskörnung
SB D05b-1	Sand-Betonrezeptur auf Basis der Betonrezeptur B32D05b; → gleiche Summe der Inhaltsstoffe aber ohne den Zwischenschritt der Agglomeratherstellung
U8K02	Betonrezeptur: Größtkorn 8 mm, Ausfallkörnung mit Agglomerat der Rezeptur K02 als grobe Gesteinskörnung
25-2	Betonprobekörper 25-2, Die Betonrezeptur ist laut <i>Anlage 37</i> die U8K03.
S04-7	Sand-Betonprobekörper Sandbetonrezeptur 4, Probekörper 7
(22 - 257 µm]	Halboffener Bereich: 22 µm gehört nicht dazu. 257 µm gehört dazu.
Standardtext	Standardtextformat dieser Arbeit
<i>Verweis</i>	Format für Verweise innerhalb dieser Arbeit. Dies können Verweise auf Kapitel, Abschnitte, Bilder oder Tabellen sein.
Fachbegriff	Format für Fachbegriffe die im <i>Kapitel 6.1</i> erläutert sind
Quelle: Eigene	Format für Quellenangaben von Bildern oder Tabellen
1d, 3d, 28d, ...	Alter von Proben (Agglomerate oder Beton) seit Herstellung in Tagen
<i>[German (1989)]</i>	Literaturverweis auf die Quelle: „German, R. M. (1989): Particle Packing Characteristics ...” in <i>Kapitel 6.4</i>

33 % bedeutet in dieser Arbeit Massenprozent also 33 % der betrachteten Masse, während 33 % Trockenmasse immer als 33 %TM geschrieben und Volumenanteile als 33 Vol% bezeichnet werden.



Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1	Einleitung	5
1.1	Motivation	5
1.2	Arbeitsansatz.....	6
1.3	Aufgabenstellung und Eingrenzung der Forschungsfrage.....	8
Kapitel 2	Aufbau der Arbeit	11
2.1	Struktur der Arbeit	11
2.2	Methode	12
2.3	Versuchsstruktur.....	14
Kapitel 3	Grundlagen	15
3.1	Normalbeton	15
3.1.1	Kies und Splitt.....	15
3.1.2	Sande	15
3.1.3	Bindemittel (Zement)	16
3.1.4	Wasser.....	16
3.1.5	Betonzusatzstoffe	16
3.1.6	Betonzusatzmittel	17
3.2	Sandbeton	17
3.3	Packungsdichte von Partikeln und Partikelgemischen	18
3.3.1	Berechnung des Hohlraumgehaltes der Sande	19
3.3.2	Empirisch-numerische Berechnung von Packungsdichten in Sanden und Feinkorngemischen	24
3.3.3	DEM-Modellierung	27
3.3.4	Feinkornhaufwerke in Anwesenheit von Wasser	27
3.3.5	Experimentelle Bestimmung der Packungsdichte von Sanden und Feinkorngemischen und Punkte-Verfahren.....	28
3.4	Granulierverfahren und -anlagen.....	29
3.5	Bisherige agglomerierte Zuschläge für Beton.....	30



Kapitel 4	Versuche und Ergebnisse	31
4.1	Verwendete Ausgangsstoffe.....	32
4.1.1	Sande der Region und Auswahl der Sande für Versuche.....	32
4.1.2	Mineralogische Eigenschaften.....	35
4.1.3	Granulometrische Eigenschaften der Sande.....	35
4.1.4	Verwendetes Bindemittel (Zement).....	39
4.1.5	Verwendeter Zusatzstoff (SFA).....	39
4.1.6	Verwendetes Wasser.....	40
4.1.7	Verwendetes Betonzusatzmittel.....	40
4.2	Granulieranlage und Messgeräte.....	41
4.2.1	Maschinentechnische Parameter.....	43
4.2.2	Stoffliche und technologische Parameter und Einflüsse auf das Agglomerierverhalten.....	43
4.2.3	Einschränkung der maschinentechnischen und technologischen Parameter.....	44
4.2.4	Messgeräte und Verfahren.....	45
4.3	Rezepturen.....	49
4.3.1	Überlegungen zur Festlegung der Rezepturen.....	50
4.3.2	Dreistoffdiagramm zur Rezepturdarstellung, Aufteilung in Feinstkorn, Feinkorn und Mittelkorn.....	53
4.3.3	Festlegung und Darstellung der Korngrößenverteilung der Agglomerat-Rezepturen.....	59
4.4	Packungsdichte der Sande und Rezepturen.....	63
4.4.1	Bewertung der Ausgangssande.....	63
4.4.2	Darstellung der Ergebnisse des Verfahrens nach Puntke und dessen Erweiterung.....	68
4.4.3	Ergebnisse der DEM-Modellierung.....	72
4.4.4	Körnungsziffern zur Beschreibung von Korngrößenverteilungen.....	74
4.4.5	Zusammenfassung Packungsdichte.....	75
4.5	Agglomeriervorgang und Eigenschaften der Frischlinge.....	76
4.5.1	Zugaberegime, Granulierverhalten, Ausbeute, Restsand, Nachbehandlung.....	77
4.5.2	Rohdichte, Porengehalt.....	94
4.5.3	Wassergehalt und w/z-Wert.....	97
4.5.4	Verhalten der Frischlinge bei Druckprüfung.....	99
4.5.5	Zusammenfassung von Versuchsergebnissen an Frischlingen.....	116



4.6	Eigenschaften der Festlinge	118
4.6.1	Erscheinungsbild	118
4.6.2	Verhalten bei der Druckprüfung - Einzelkorndruckprüfung und Drucktopffestigkeit	118
4.6.3	Rohdichte, Porengehalt und Packungsdichte	128
4.6.4	Widerstand von Agglomeraten gegen Frost-Tau-Beanspruchung	137
4.6.5	Bewertung der AKR-Empfindlichkeit der Agglomerate	137
4.6.6	Nachbehandlung.....	139
4.6.7	Zusammenfassung zu den Festlingen	139
4.7	Agglomeratbeton	140
4.7.1	Betonrezepturen mit Agglomerat als grobe Gesteinskörnung.....	142
4.7.2	Frischbetoneigenschaften des Agglomeratbetons	143
4.7.3	Druckfestigkeit, Dauerhaftigkeit, Strukturmerkmale, Verformungskennwerte	144
4.7.4	Stellungnahme zum Betonprojektierungsverfahren	160
Kapitel 5	Bewertung / Analyse / Diskussion	162
5.1	Generelle Machbarkeit	163
5.2	Überprüfung der Thesen aus dem Arbeitsansatz	164
5.3	Abhängigkeit Frischlinge - Festlinge.....	166
5.4	Abhängigkeit Festlinge - Agglomeratbeton.....	168
5.5	Abhängigkeit Frischlinge - Agglomeratbeton	170
5.6	Ökonomische, ökologische, energetische, finanzielle und weitere Gesichtspunkte	171
5.7	Zusammenfassung	172
5.8	Ausblick	173
Kapitel 6	Verzeichnisse.....	174
6.1	Begriffsdefinitionen und Erläuterung von Fachbegriffen	174
6.2	Abbildungsverzeichnis.....	179
6.3	Tabellenverzeichnis.....	184
6.4	Literaturverzeichnis	186
Anlagen 1 bis 44	193





Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Norddeutschland ist ein Kiesmangelgebiet. Das heisst, es liegt ein Mangel an natürlich vorkommendem Grobkorn, wie es zur Betonherstellung eingesetzt wird, vor. Die dafür benötigte grobe Gesteinskörnung wird durch Sieben der anstehenden Kiesvorkommen gewonnen, als Flusskies aus Mitteldeutschland oder als Splitt aus Skandinavien und Schottland importiert. Die zurzeit erschlossenen, regionalen Kies-Sand-Vorkommen haben einen Grobkorngehalt von 15 bis 30 %. Dabei wird die gesamte Aushubmenge gesiebt, um die gewünschte, grobe Gesteinskörnung zu erhalten. Trotz der häufig sehr reinen und gleichmäßigen Qualität wird nicht die gesamte anfallende Sandmenge einer hochwertigen Verwendung zugeführt. Der beträchtliche Anteil von 30-50 % wird verworfen und wieder in die Aushubstellen gefüllt. Ein weiterer Anteil findet bei Verfüllaufgaben eine untergeordnete Verwendung.

Diese Überschusssande stellen für die Unternehmen nicht nur ein logistisches Problem dar, sondern sind auch unter energetischen Gesichtspunkten eine zusätzliche Belastung des hauptsächlich gewonnenen Wertstoffes Kies. Die Abtrennung, Um- und Zwischenlagerung sowie Entsorgung des Überschusssandes erzeugt auch Mehraufwand der Maschinenteknik durch den hohen Mengendurchsatz und damit erhöhten Verschleiß.

Bei überregionaler Betrachtung fällt auf, dass lokal vorkommende feine Gesteinskörnungen verworfen werden, während in Skandinavien Festgestein zerkleinert und per Schiff nach Norddeutschland transportiert wird. Demnach steht dem Aufwand für Abbau und Brechen von Festgestein und dem Transport des gewonnenen Splittes der betontechnologische Mehraufwand gegenüber, der notwendig ist, um aus der lokal vorhandenen feinen Gesteinskörnung einen Beton herzustellen, der die Anforderungen für Einsatzgebiete abdeckt, für die zum Beispiel Splittbetone verwendet werden.



Ein naheliegender Ansatz ist, auf die grobe Gesteinskönung vollständig oder teilweise zu verzichten und Sandbeton oder sandreichen Beton herzustellen. Dazu gab es in den letzten Jahren sowohl Untersuchungen in Norddeutschland [Sievers (1997)] als auch an der TU München [Spengler (2006)]. Außerdem zeigen die Entwicklungen von hochfestem Beton als „Pulverbeton“, dass sich hochwertige mineralisch gebundene Baustoffe auch ohne grobe Gesteinskönung herstellen lassen.

Jedoch hat sich der Einsatz von Sandbeton oder sandreichem Beton bisher nicht als wirtschaftliche Alternative etabliert. Dies liegt zum einen an der geringen Langzeiterfahrung damit und dem dafür fehlenden Regelwerk, aber auch an einigen vom Kies- oder Splittbeton abweichenden Eigenschaften des Sandbetons. Dies sind unter anderem die höhere Verformungsneigung, also geringeres E-Modul und höheres Schwindmaß, sowie der erhöhte Wasseranspruch und damit - bei gleichbleibendem w/z-Wert - auch höherer Zementbedarf.

Wenn nun die Sande durch Bindemittelzugabe zu größeren Agglomeraten geformt werden, können diese anstatt Naturkies als grobe Gesteinskönung für Beton eingesetzt werden.

Dem Energieaufwand und Anlageneinsatz bei der Herstellung solcher Agglomerate steht dann die Einsparung der Aufbereitung und des Transportes von Festgestein über große Entfernungen gegenüber. Es kommt zu einer Stärkung der lokalen Unternehmen und die Nutzung lokaler Rohstoffe wird gefördert.

1.2 Arbeitsansatz

Bei Machbarkeitsstudien ist die grundsätzliche Möglichkeit des Ersatzes von Naturkies durch in einem Granulierteller hergestellte Sand-Zement-Agglomerate gezeigt worden. [Holle (2008)], [Holle (2007)]

Vor dem Hintergrund des Wunsches nach höherer Energieeffizienz, also auch der Vermeidung unnötiger Transporte, vor allem von Massengütern, erscheint es notwendig, die Leistungsfähigkeit und möglichen Einsatzbereiche von Sand-Zement-Agglomeraten bei der Verwendung als grobe Gesteinskönung einzugrenzen und den bisherigen Erfahrungen mit Sandbeton gegenüberzustellen.

Dabei werden Potentiale im Bereich der Energieeinsparung und der Ressourcenschonung durch Verwendung lokaler Rohstoffe und in der Stärkung lokaler Unternehmen gesehen.

Aus den oben dargestellten Überlegungen und aus den Ergebnissen der Machbarkeitsstudien ergeben sich folgende Arbeitsansätze zur Verwendung von Sand-Zement-Agglomeraten als künstliches Grobkorn in Beton:

- Die Zugabe der Ausgangsstoffe in den Granulierteller in etwa erdfeuchtem Zustand ist charakteristisch für diesen Agglomerierprozess. Betone mit erdfeuchter Konsistenz können durch niedrige w/z-Werte sehr dauerhaft sein. → Die Frostbeständigkeit und Dauerhaftigkeit der Agglomerate sind durch ihren geringen w/z-Wert gesichert (ähnlich wie bei Betonpflastersteinen).



- Die norddeutschen Sande werden üblicherweise als E1 (unbedenklich hinsichtlich der Alkali-Kieselsäure-Reaktion) eingestuft. Durch die Erfahrungen der letzten Jahre, dass einige Sande trotz E1-Einstufung bei hohem Zementgehalt und hohem Na_2O -Äquivalent Treiberscheinungen zeigen, sind zementreiche Agglomerate auf ihre Alkaliempfindlichkeit zu überprüfen.
- Die Agglomerate bestehen aus demselben Material wie die das Grobkorn umgebende Betonmatrix. Dieser „Mörtel“ hat ein geringeres E-Modul als natürlicher Zuschlag. → Sand-Zement-Agglomerate als grobe Gesteinskörnung erzeugen einen „homogeneren“ Beton, in dem keine Spannungsspitzen wie an den großen, steiferen natürlichen Gesteinskörnern von Kies- oder Splittbeton entstehen. Stattdessen zeigen die künstlichen Agglomerate als Zuschlag ein ähnliches Verhalten bei Verformung und Ausbildung von Mikrorissen wie die sie umgebende Betonmatrix.
- Sand-Zement-Agglomerate sind überwiegend rund oder leicht abgeflacht.
→ Diese günstige Kornform verbessert die Verarbeitbarkeit des Agglomeratbetons.
- Sand-Zement-Agglomerate haben Haufwerksporen und eine raue Oberfläche.
→ Die Rauigkeit der Oberfläche verbessert die Verzahnung der Grobkörner mit der Betonmatrix. Durch die Porigkeit entsteht ein leichtes Saugen der Agglomerate. Deshalb werden weniger Fehlstellen an den Korngrenzen, zum Beispiel durch aufsteigendes Wasser als im Vergleich zu dichtem, natürlichem Grobkorn erwartet.
- Ein Beitrag zur Festigkeitsentwicklung des Betons durch die chemische Aktivität der Oberfläche der Agglomerate ist denkbar.
- Je nach individueller Arbeitsauslastung des Kieswerkes kann die Herstellung der Granulate als „Zwischenbeschäftigung“ in Zeiten geringerer Auslastung „auf Vorrat“ erfolgen.



1.3 Aufgabenstellung und Eingrenzung der Forschungsfrage

Die Aufgabenstellung besteht im Überprüfen der Grundidee, dass aus einem „künstlichen Grobkorn“, das durch Agglomerieren aus lokal vorhandenen Überschusssanden und Zement erzeugt wird, dauerhafter und normgerechter Beton hergestellt werden kann.

Forschungsfragen

Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit ist, dass die Versuche, die im Zuge der Machbarkeitsstudien an der Hochschule Wismar durchgeführt wurden, den Charakter von Tastversuchen haben, mit denen die grundsätzliche Möglichkeit der Herstellung von Agglomeraten aus Sand mit verschiedenen mineralischen Bindemitteln und ihre Verwendung in Beton gezeigt wurde. Die Auswirkungen wechselnder Zusammensetzungen der Ausgangssande sowie verschiedene Bindemittelgehalte der Agglomeratrezepturen wurden dabei nicht systematisch erfasst.

Daraus ergibt sich eine zentrale Problematik, die sich in der folgenden Fragestellung zusammenfassen lässt:

Lassen sich aus wirtschaftlich konkurrenzfähigen Agglomeratrezepturen - vor allem solchen mit niedrigem Bindemittelgehalt - Agglomerate erzeugen, die einen dauerbeständigen Normal-Beton ergeben?

Diese Fragestellung erfordert zu ihrer Beantwortung die Untersuchung folgender Teilbereiche:

- Variation der Zusammensetzung der Ausgangssande, um die in Norddeutschland auftretende Schwankungsbreite der Sandqualität zu erfassen (Sind die in Norddeutschland vorkommenden Sande – speziell die Überschusssande – zur Herstellung von Agglomerat geeignet?)
- Variation des Bindemittelgehaltes und der Bindemittelzusammensetzung, um Grenzwerte für eine verfeinerte Wirtschaftlichkeitsberechnung zu gewinnen (Wie ist der Mindestgehalt an Bindemittel, um Agglomerate mit ausreichender Festigkeit zu erzeugen?)
- Nachweis der Optimierungsmöglichkeiten durch Variation und Zusammensetzung der Sande und Einsatz von Füller
- Eingrenzen der technologischen Randbedingungen für die Agglomeriertechnik
- Nachweis der spezifischen Eigenschaften der Agglomerate als Zuschlag für die Betonherstellung (Durch das Herstellverfahren der Agglomerate entfallen viele der nach DIN für eine Gesteinskörnung erforderlichen Prüfungen.)
- Entwicklung qualitätssichernder Prüfverfahren bei der Herstellung der Agglomerate (Gibt es geeignete Parameter zur Qualitätsüberwachung der Agglomerate schon während ihrer Herstellung?)



Eingrenzung

Nach den erfolgreichen Machbarkeitsstudien dient dieses Forschungsvorhaben:

- der Optimierung der Zusammensetzung der Agglomerate und der Eingrenzung der in Frage kommenden Rezepturen (Prüfung und Beurteilung verschiedener Sande auf ihre Eignung, Bestimmung des erforderlichen Bindemittelgehaltes, Auswirkung des Feinststoffanteils)
- der Ermittlung von grundlegenden Kennwerten des Granuliertellers, jedoch ohne allgemeingültige Optimierung der Anlagentechnik
- der Prüfung der geforderten Eigenschaften zum Einsatz als grobe Gesteinskörnung in Beton
- der Suche nach Qualitätskriterien der Agglomerate und einem geeigneten Regelkriterium zur Überwachung der Herstellung

Dabei stehen neben der grundlegenden Machbarkeit auch die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und ein Vergleich der Energieeffizienz von Sand-Zement-Agglomeraten mit importierter grober Gesteinskörnung im Blickpunkt. Hier soll diese Untersuchung Daten für eine Abschätzung liefern, inwieweit die Agglomeration von Sanden mit Zement ein Potential zur Energieeinsparung im Vergleich mit Kies- und Splittbeton bietet.

Die zweite Arbeit von Holle [Holle (2008)] beschränkt sich auf die Erprobung verschiedener Bindemittelrezepturen und die Bestimmung grundlegender Eigenschaften der Agglomerate.

Das Ziel der hier vorliegenden eigenen Untersuchungen besteht im Aufzeigen der inneren baustofflichen Struktur und den daraus resultierenden Eigenschaften der Sand-Zement-Agglomerate. Dabei wird versucht, den Anforderungen der Betonpraxis Rechnung zu tragen und Grenzen der Wirtschaftlichkeit abzuschätzen.

Eine grundlegende Annahme in dieser Arbeit ist, dass sich am Verformungsverhalten der frischen Agglomerate Unterschiede in ihrer Packungsdichte erfassen lassen. So sollte sich zum Beispiel ein erdfeuchtes Haufwerk aus Schluff (nur Feinstkorn) anders verhalten als ein erdfeuchtes Haufwerk aus gewaschenem Mittelsand (ohne Feinstkorn) und außerdem auch von einem Haufwerk mit für die maximale Packungsdichte optimierter Korngrößenverteilung unterscheidbar sein. In diesem Denkmodell wird davon ausgegangen, dass jedes dieser Beispielhaufwerke in seiner charakteristischen, dichtesten Packung vorliegt.

Weiterhin wird angenommen, dass bei einem Haufwerk, das jeweils locker gepackt, mitteldicht gepackt und in dichtester Packung vorliegt, auch diese Zustände durch unterschiedliches Verformungsverhalten unterschieden werden können. Bei einem Haufwerk gegebener Korngrößenverteilung, das bei gleichbleibender Packungsdichte aber unterschiedlichen Wassergehalten verformt wird, sollten diese Wassergehalte Unterschiede im Verformungsverhalten erzeugen.

Damit ergibt sich ein mehrdimensionales Wertefeld, das für diese Untersuchungen zunächst reduziert wird.



Die Eingangsparameter sind:

- Korngrößenverteilung der Rezeptur
- Packungsdichte des Haufwerkes
- Wassergehalt des Haufwerkes

Durch das Agglomerieren im Granulierteller entstehen annähernd kugelförmige Agglomerate, die aus den zugegebenen Ausgangsstoffen bestehen und während des Abrollvorgangs durch Auflast sowie die Zusammenstöße mit den Wänden und anderen Partikeln verdichtet werden.

Es wird die These aufgestellt, dass optimal verdichtete Agglomerate einen höheren inneren Zusammenhalt aufweisen und auch bei einer verformenden Belastung einen höheren Widerstand zeigen. Damit sollten diese Partikel innerhalb des Gemenges im Granulierteller beständig sein und - beginnend als Agglomeratkeim - weitere Gemengeteile anlagern und dadurch wachsen.

Diese annähernd kugelförmigen Agglomerate lassen sich aus dem laufenden Prozess entnehmen und auf ihr Verformungsverhalten bei Druckbelastung prüfen. Daraus werden als Ergebnissparameter die folgenden Informationen für den jeweiligen Agglomeratpartikel erwartet: - Steifigkeit

- Bruchkraft
- Nach-Bruch-Verhalten
- Rissbild, Oberflächenrauhigkeit, Homogenität oder Schalenbildung

Nachdem die Korngrößenverteilung der Rezeptur durch die zugegebene Mischung vorgegeben wird, soll durch die Prozessführung sichergestellt werden, dass keine Entmischungen auftreten, sondern der Agglomerierprozess sicher stattfindet.

Aus den bei der Druckprüfung der Agglomerate gewonnenen Informationen soll der Bereich von optimaler Verdichtung und Wassergehalt identifiziert und als Regelgröße für die Prozesssteuerung zur Verfügung gestellt werden. Dazu sind die aus der Prüfung der frischen Agglomerate gewonnenen Informationen mit maßgebenden Qualitätsparametern der erhärteten Agglomerate und von Beton aus Agglomeraten zu korrelieren.

Diese Arbeit legt ihr Hauptaugenmerk auf die Untersuchung der baustofflichen Zusammenhänge und der Suche nach Abhängigkeiten zwischen den Eigenschaften der Frischlinge und denen des Agglomeratbetons. Verfahrenstechnische Fragen werden nur soweit behandelt, wie es in diesem Rahmen notwendig ist, um für die baustofflichen Untersuchungen erforderlichen Ausgangsmengen zu erzeugen. Dabei wird ganz bewusst eine große Schwankungsbreite der Eigenschaften der erzeugten Agglomerate auch innerhalb einer Rezeptur in Kauf genommen. Diese Schwankungsbreite soll zunächst mit der von natürlicher grober Gesteinskörnung verglichen werden. Außerdem wird sie als die maximale Schwankungsbreite angesehen, die für Agglomerate vorkommen kann und beim großtechnischen Einsatz des Verfahrens durch die verfahrenstechnische Optimierung verringert wird.



Kapitel 2 Aufbau der Arbeit

2.1 Struktur der Arbeit

Nach der Einleitung und Aufgabenstellung in *Kapitel 1* und der Erläuterung des Aufbaus der Arbeit in *Kapitel 2*, werden in *Kapitel 3* die fachlichen Grundlagen zum Forschungsthema zusammengestellt. Die im Zuge der vorliegenden Arbeit durchgeführten Laborversuche teilen sich in die Sandphase, die Agglomeratphase und die Betonphase auf. Diese Struktur findet sich, wie in *Abbildung 2.1* dargestellt, im Aufbau des *Hauptkapitels 4* wieder. Die zu messenden Parameter und Messverfahren werden in *Kapitel 4.2* besprochen, während die herzustellenden Rezepturen nach den in *Kapitel 4.3* angestellten Überlegungen festgelegt wurden. Dabei werden in den *Kapiteln 4.4 bis 4.7* die durchgeführten Untersuchungen beschrieben und die Ergebnisse dargestellt. In *Kapitel 5* erfolgt dann der Quervergleich der Ergebnisse, die Bewertung von Korrelationen und Diskussion der Erkenntnisse.



Abbildung 2.1: Übersicht zur Struktur der Arbeit
Quelle: Eigene



2.2 Methode

Es wird von der Situation ausgegangen, dass regional ein Überschuss von Sand vorliegt, Zement als Bindemittel frei verfügbar ist und Beton mittlerer Güte das angestrebte Endprodukt ist. In *Abbildung 2.2* ist der sich daraus ergebene Argumentationsbogen dargestellt.

Anstatt der direkten Herstellung eines Feinkornbetons aus Sand und Zement erfolgt in dieser Untersuchung der Zwischenschritt der Herstellung von Sand-Zement-Agglomeraten, die dann wiederum als Gesteinskörnung für die Betonherstellung eingesetzt werden. Bei der Suche nach Abhängigkeiten zwischen den Ausgangsstoffen und dem angestrebten Beton muss ein weiterer Zwischenschritt gemacht werden, indem die frischen Agglomerate (*Frischlinge*) und die erhärteten Agglomerate (*Festlinge*) jeweils gesondert betrachtet werden.

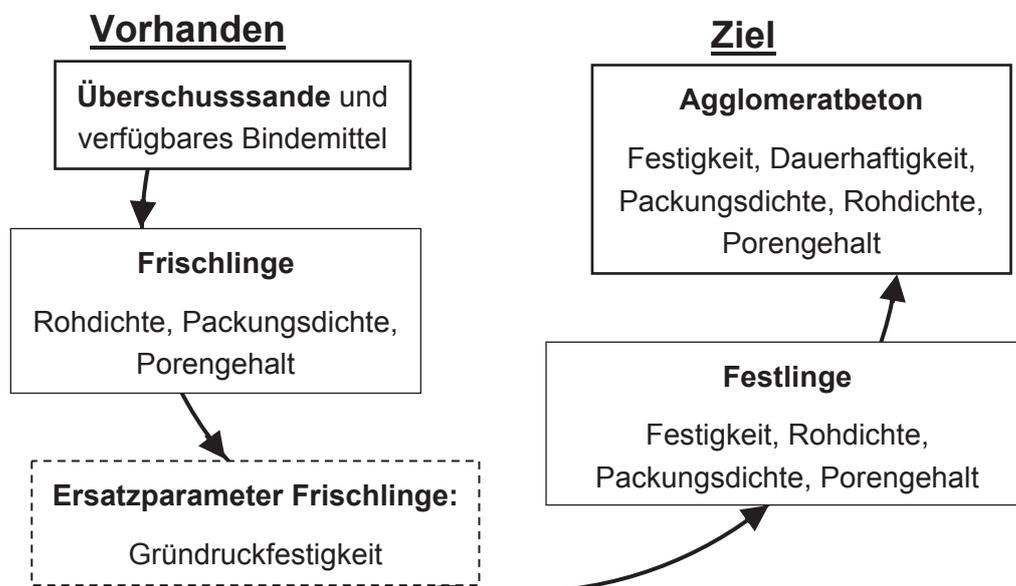


Abbildung 2.2: Argumentationsbogen von Eigenschaften der Frischlinge über die der Festlinge zum Agglomeratbeton

Quelle: Eigene

Zur Beschreibung der Eigenschaften der Frischlinge ist zum Beispiel das Ermitteln ihrer Packungsdichte oder ihres Porengehaltes naheliegend. Die Bestimmung dieser Eigenschaften ist wegen der Eigenarten der zu untersuchenden Sand-Zement-Agglomerate auch im Labormaßstab sehr aufwendig. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit versucht, das Verhalten der Frischlinge bei Druckprüfung als Parameter für ihre Qualität (stellvertretend für Packungsdichte und Porengehalt) zu etablieren.

Dementsprechend geht der Argumentationsbogen dieser Arbeit nicht den direkten Weg von „Vorhanden“ (Sand) zu „Ziel“ (Beton) sondern folgt dem Umweg entlang der Zwischenschritte von Sand über Frischlinge über deren Ersatzparameter zu Festlingen und



Beton. Dabei wird jeweils die Auswirkung der Streuung der Eigenschaften auf den nächsten Schritt entlang des Argumentationsbogens berücksichtigt.

Ausgehend von den Rezepturen, dargestellt durch ihre Positionen im Dreistoffdiagramm, werden jeweils die Eigenschaften der Frischlinge und Festlinge, zum Beispiel Rohdichte und Porengehalt, sowie ihr Wasseranspruch (Wassersättigungspunkt aus Puntke-Versuch) aufgetragen. Der These folgend, dass diese abhängig von den Rezepturen sind, wird durch die Darstellung im Dreistoffdiagramm das Auffinden von Isolinien gleicher Eigenschaften sowie das Erkennen von Maxima und Minima erwartet. Daraus sollten sich optimale Rezepturen ableiten lassen. Die Versuchsergebnisse werden außerdem mit den Simulationsberechnungen und den Ergebnissen der Puntke-Versuche sowie üblichen Modellen zur Packungsdichte verglichen.

Hierbei wird geprüft, ob klare Abhängigkeiten zwischen den Eigenschaften der Agglomerate und den Rezepturen nachgewiesen werden können oder ob diese durch Schwankungen anderer Parameter im Herstellsystem überdeckt werden.



2.3 Versuchsstruktur

Im Zuge der Vorversuche dieser Untersuchung erfolgte zunächst ein Testen der Agglomerieranlage nach der Übernahme, dem Wiederaufbau und den baulichen Änderungen. Dazu wurden zunächst Rezepturen eingesetzt, über die aus der Machbarkeitsstudie in Wismar [Holle (2007), (2008)] bereits Erfahrungen vorlagen. Außerdem wurden Agglomeratrezepturen verarbeitet, die ihrer Zusammensetzung nach Extremwerte der überhaupt in Frage kommenden Rezepturen darstellen.

Parallel dazu erfolgten die Punkte-Versuche zur Bestimmung der maximal erreichbaren Packungsdichten der verschiedenen Rezepturen, aus deren Ergebnissen sich Empfehlungen für die herzustellenden Agglomeratrezepturen ergeben sollten.

Gemäß dem Argumentationsbogen erfolgten die Versuche, um zunächst die Eigenschaften der Agglomeratrezepturen zu bestimmen und Werte für die Suche nach Zusammenhängen zwischen Frischlings- und Festlingseigenschaften (sowie den Vergleich der Eigenschaften einzelner Agglomeratkörner mit denen natürlicher Zuschläge) bereitzustellen.

- Festigkeiten: Bruchkraft, Bruchverhalten, Einzelkornfestigkeit und Drucktopfmethode
- Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit: Porengehalt, Wasseraufnahme, Frost-Tauwiderstand, AKR-Empfindlichkeit
- Untersuchungen zu Formänderungen an Einzelkörnern werden wegen der schwankenden Geometrien als nicht sinnvoll angesehen.

Anschließend erfolgte die Herstellung und Prüfung von Agglomeratbeton, um das generelle Verhalten der Agglomerate als Gesteinskörnung zu erfassen und den Zusammenhang zu den Eigenschaften der Agglomerate herzustellen.

- Betonrezepturen: Rechnerischer Betonentwurf / Empfehlungen zum Mischungsentwurf (welches Betonprojektierungsverfahren? → Festigkeit, Konsistenz und Verarbeitbarkeit, w/z-Wert)
- Vergleich der Eigenschaften von Granulatbeton mit Normalbeton (Vergleich der Eigenschaften von Granulatbeton verschiedener Rezepturen - Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit: Porengehalt, Frost- und Frost-Tausalz widerstand)
- Untersuchungen zu Formänderungen: Schwinden, E-Modul

Einige Probekörper wurden zur Langzeitbeobachtung unter freier Bewitterung ausgelagert.



Kapitel 3 Grundlagen

3.1 Normalbeton

3.1.1 Kies und Splitt

Als grobe Gesteinskörnung (früher Grobzuschlag) wird Naturkies und gebrochene Gesteinskörnung (Splitt) im Korngrößenbereich von 4 bis 31,5 mm bezeichnet. Ein Normalbeton besteht zu etwa 50 % seines Volumens aus grober Gesteinskörnung.

Die Bewertung der Festigkeit von natürlichen Gesteinskörnungen erfolgt anhand des Vergleiches der vorhandenen Gesteinsarten mit Tabellenwerten der Druckfestigkeit, die an Zylinder- oder Würfelproben des Festgesteins ermittelt wurden. Für Splitt wird eine Druckfestigkeit ab 100 N/mm^2 als ausreichend für die Herstellung von Normalbeton angesehen. Bei Kiesen und Sanden wird durch die vorausgegangene, natürliche Beanspruchung der Körner davon ausgegangen, dass eine ausreichende Tragfähigkeit gegeben ist. Anteile von gering tragfähigen Gesteinen sind dabei zu vermeiden.

Zusätzlich liefert auch der Widerstand gegen Zertrümmerung Anhaltswerte über die Festigkeit von Gesteinskörnungen zur Verwendung im Beton.

Aufgrund der immer mehr als ausreichend hohen Festigkeit der üblichen, natürlichen Gesteinskörnungen für Beton wird die Eigenfestigkeit der Zuschläge in der Betonindustrie im Allgemeinen nicht geprüft.

3.1.2 Sande

Der Korngrößenbereich des Zuschlages von 0 bis 4 mm wird als feine Gesteinskörnung bezeichnet (früher Sand). Ein Normalbeton besteht zu etwa 25 % seines Volumens aus



feiner Gesteinskörnung. Es stehen Sande aus natürlichen Vorkommen mit überwiegend gerundeten Körnern und Brechsande, die durch Gesteinszertrümmerung gewonnen werden, zur Verfügung.

Sande sind ein Endprodukt der Gesteinsverwitterung und bestehen im Allgemeinen in Deutschland zu über 90 % aus Quarz.

In Norddeutschland enthalten die Kiessandvorkommen einen überdurchschnittlich hohen Anteil an Sand oder Feinsand.

3.1.3 Bindemittel (Zement)

Zement ist ein *hydraulisches Bindemittel*, das mit Wasser vermischt die Körner der groben und feinen Gesteinskörnung in Beton und Mörtel wasserunlöslich miteinander verbindet. Er entsteht aus Verbindungen von CaO , SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 , die zunächst fein aufgemahlen und miteinander vermischt bis zum Sintern oder Schmelzen gebrannt werden. Der entstehende Zementklinker wird in Kugelmühlen mit verschiedenen Zumahlstoffen, wie einem Sulfatträger zur Steuerung des Erstarrens und gegebenenfalls Hüttensand, Traß, Ölschiefer, Kalkstein oder Flugasche, gemahlen. Dabei werden die Eigenschaften wesentlich von Art und Menge der Zumahlstoffe sowie der Mahlfeinheit beeinflusst. Ein CEM I (Portlandzement) besteht aus mindestens 95 % Portlandzementklinker, während zum Beispiel ein Hochofenzement aus 64 bis 15 % Portlandzementklinker und dem Rest Hüttensand besteht. Eine höhere Mahlfeinheit des Zementes beschleunigt seine Erhärtungsgeschwindigkeit und erhöht die Festigkeit, während gleichzeitig die Nacherhärtung vermindert wird.

Durch das energieintensive Brennen des Zementklinkers und den anschließenden aufwändigen Mahlvorgang ist die eingesetzte Zementmenge ein wesentlicher Kostenfaktor bei der Betonherstellung.

3.1.4 Wasser

Wasser ist der notwendige Baustein für die Zementhydratation und erfüllt darüber hinaus die Funktion der Erzeugung einer Verarbeitungskonsistenz des Frischbetons.

Das sogenannte Zugabewasser muss einer Mindestqualität genügen, die durch Grenzwerte des Gehaltes an Salzen und organischen Verbindungen charakterisiert wird. Bei Nichteinhaltung der Grenzwerte kann dieses zu Störungen der Erstarrung und der Erhärtung des Zementes und einer Verminderung der Dauerhaftigkeit des Betons führen.

3.1.5 Betonzusatzstoffe

Zusatzstoffe sind überwiegend mineralische, fein aufgemahlene Stoffe, die dem Beton aber auch Mörteln in signifikanter Menge zugegeben werden. Sie sind als Komponente in der Stoffraumrechnung zu berücksichtigen und dienen zum Beispiel zur Verbesserung des Gefüges und der Packungsdichte (*Füller* wie *Gesteinsmehl*), Beteiligung an Festigkeitsbildung durch latent hydraulische Eigenschaften wie bei Traß oder puzzolanische



Eigenschaften wie bei *Steinkohlenflugasche (SFA)*. Außerdem kommen auch mineralische, metallische oder organische Fasern oder Kunststoffdispersionen als Zusatzstoffe zum Einsatz.

Der Einsatz von SFA als Zusatzstoff in Beton und Mörtel hat neben dem Effekt der Verwertung eines zunächst kostengünstigen Reststoffs auch positive Auswirkungen auf die Eigenschaften des Frisch- und des Festbetons und so eine weite Verbreitung in der Betonindustrie gefunden. Die wesentlichen Wirkungen der Steinkohlenflugasche im Beton sind eine dichtende Funktion durch die Verbesserung der Gefügedichtheit, die Erhöhung der chemischen Beständigkeit, Erhöhung der Endfestigkeit des Betons (Nacherhärtung) und die Verbesserung der Verarbeitbarkeit.

3.1.6 Betonzusatzmittel

Der Betonindustrie steht zur zielgerichteten Erzeugung spezieller Frisch- und Festbetoneigenschaften eine breite Palette an Betonzusatzmitteln zur Verfügung. Die Zugabemengen sind im Allgemeinen so gering, dass sie bei der Stoffraumrechnung kaum Berücksichtigung finden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde Fließmittel (FM) zur Korrektur der Betonkonsistenz verwendet.

3.2 Sandbeton

Das Problem eines Sandbetons besteht in der Notwendigkeit, eine sehr große Zuschlagoberfläche mit möglichst wenig Zementleimatrix zu verkitten. Zum Erreichen einer praxistauglichen Konsistenz ist hierbei trotz der Verwendung moderner Hochleistungsverflüssiger eine deutlich größere Wassermenge als bei Normalbeton erforderlich. Bei Einhaltung der für Beton vorgeschriebenen w/z-Werte würde sich daraus eine sehr hohe notwendige Zementmenge ergeben.

Für Sandbeton nachteilige Eigenschaften sind:

- hohes Schwindmaß,
- geringerer Frostwiderstand
- geringe Druckfestigkeit
- hoher Zementverbrauch

Die Betonwarenindustrie stellt zum Beispiel Betonpflastersteine, Dachsteine und Gehwegplatten aus einem extrem steifen Mörtel (erdfeuchte Konsistenz) unter Verwendung von großen Druckkräften für die Verdichtung her. Diese Betonwaren sind zwar frostbeständig, aber eine erdfeuchte Konsistenz ist mit der üblichen Betontechnologie der Baustellen nicht verarbeitbar. Das hohe Schwindmaß ist bei solchen kleinformatischen Waren ohne Belang.



3.3 Packungsdichte von Partikeln und Partikelgemischen

Bei vielen technischen Anwendungen - insbesondere bei Mörtel und Beton - ist es ein Ziel, aus vorhandenen Partikeln ein Haufwerk mit möglichst hoher Packungsdichte zu erzeugen. Dabei werden im Folgenden zunächst „*monomodale Packungen*“ (bestehend aus Partikeln einer *Kornklasse*) und „*multimodale Packungen*“ (bestehend aus mehreren in der Größe verschiedenen Kornklassen) unterschieden.

Ein geringer Porengehalt und bei detaillierter Betrachtung eine höhere Packungsdichte ist ein wesentliches Kriterium für die Verbesserung der physikalischen Eigenschaften der Agglomerate, wie zum Beispiel Erhöhung von Druckfestigkeit und des Widerstandes gegen das Eindringen von Wasser und anderen Stoffen [Bornemann, (2005)], [Teichmann (2007)]. Das Erhöhen der Packungsdichte scheint dabei ein wirtschaftlicherer Parameter zu sein als z.B. die Erhöhung des Zementgehaltes.

Die „*Packungsdichte*“ ist als das Verhältnis von Feststoffanteil zum Gesamtvolumen der betrachteten Probe definiert. Demgegenüber ist der „*Hohlraumgehalt*“ die verbleibende Differenz zum Gesamtvolumen. Die im Folgenden dargestellten Formeln für Packungsdichte und Hohlraumgehalt wurden aus der Arbeit von Geisenhanslüke [Geisenhanslüke (2008)] übernommen. Die Formelzeichen wurden an die in dieser Arbeit verwendeten Bezeichnungen angepasst:

$$\Phi = \frac{V_F}{V_R} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = \frac{V_{Por}}{V_R} = 1 - \Phi \quad (3.2)$$

mit: Φ = Packungsdichte

V_F = Volumen des Feststoffes

V_R = Volumen des betrachteten Raumes

V_{Por} = Volumen des Hohlraumes

ε = Hohlraumgehalt bezogen auf das betrachtete Volumen (Dieses betrachtete Volumen kann die äußere Oberfläche eines Agglomeratkornes sein oder z.B. das Volumen eines Prüfbehälters bei der Bestimmung der Schüttdichte.)

Ein immer noch weithin verwendeter Ansatz zur Optimierung der Packungsdichte von Kornhaufwerken geht auf Arbeiten von Fuller und Thomson / Andreasen (1905, 1925, 1930; Sekundärquelle: [Puntke (2002) S.242, 1. Absatz]) im Rahmen von Untersuchungen zur Optimierung der Gesteinskörnungen von Beton zurück:

Bestimmung der Fuller-Linie:

$$A = \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (3.3)$$



- Mit:
- A – Gesamtdurchgang [M%] durch ein Sieb der Lochweite d
 - d – Lochweite des betrachteten Siebes [mm]
 - D – Größtkorn der gesamten betrachteten Kornverteilung [mm]
 - n – Exponent zur Berücksichtigung der Kornform (n = 0,64 für Kugeln und n = 0,35 für L/B=1,5)
 - L/B – mittleres Verhältnis von Länge zu Breite der Körner der betrachteten Verteilung [mm / mm]

Nach der Formel zu Berechnung der Fuller-Linie lassen sich bei einem gegebenen Größtkorn die Volumenanteile der einzelnen Kornklassen ermitteln, so dass die sich ergebende Mischung maximale Packungsdichte erreichen kann. Dabei besteht die Möglichkeit, über die Variable n die Abweichungen von der Kugelform in Richtung einer Ellipsoidform zu berücksichtigen. Wenn die Körner eher länglich sind, wird ein höherer Feinkornanteil erforderlich. [Wesche (1993)]

Im Verlauf dieser Arbeit wird die Idealverteilung nach Fuller bei verschiedenen Darstellungen als Vergleichswert aufgeführt. (zum Beispiel in *Abbildung 4.5, S. 37*) Dabei werden jeweils drei Linien für Kugeln und Ellipsoide mit einem Verhältnis von Länge zu Breite L/B und mit den Exponenten $n = (0,64$ für Kugeln; $0,4$ für L/B = 1,3; $0,35$ für L/B = 1,5) dargestellt.

Um die Korngröße zu beschreiben, die gerade in die Zwickelräume der nächstgrößeren Kornklasse innerhalb einer Packung passt, wird in [Wesche (1993), S. 134f] der Begriff „Füllkorn“ eingeführt und erläutert, dass der praktisch erforderliche Durchmesser für „Schlüpfkorn“ noch kleiner ist und bei

$$d_{\text{Schlüpf}} \leq \frac{D}{7,15} = 0,14 * D \quad (3.4)$$

liegt. Dies ist für die Verdichtbarkeit von Beton z.B. bei Verwendung einer Ausfallkörnung, erforderlich. Allerdings kommt für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit mit dem speziellen Fall der Aufbauagglomeration auch die Verwendung des echten Füllkorns mit einem Durchmesser $d_{\text{Füll}}$ in Frage, da die Agglomerate von außen aufgebaut werden und daher ein Schlüpfen der kleinen Körner durch die Zwickel der großen nicht oder kaum erforderlich ist.

$$d_{\text{Füll}} = \frac{D}{4,3} = 0,232 * D \quad (3.5)$$

3.3.1 Berechnung des Hohlraumgehaltes der Sande

Monomodale Packungen:

Ein Haufwerk aus Partikeln einer Korngrößenklasse wird als „Einkornpackung“ bezeichnet. Im Zustand dichtester Packung dieser Partikel bleiben zwischen ihnen Zwickelräume frei. Die



maximal erreichbare Packungsdichte von Packungen aus rundlichen Partikeln mit schmaler Korngrößenverteilung wie z.B. in *Abbildung 3.1* liegt bei 0,74 (theoretischer Wert für kubisch flächenzentrierte Kugelpackung). [Kittel (1993)]

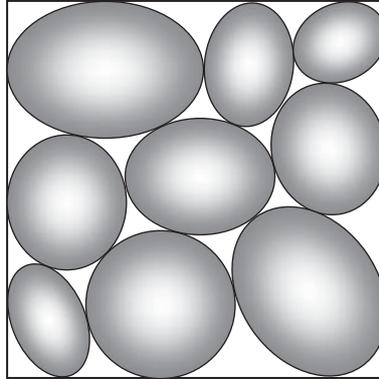


Abbildung 3.1: Packung aus Partikeln einer Kornklasse, z.B. Kies 8/16 mm

Quelle: eigene

Das Füllen der Zwickel der vorherigen Einkorn-Packung mit Partikeln einer wesentlich kleineren Kornklasse z.B. Sand 2/4 mm, führt wie in *Abbildung 3.2* zu einer Erhöhung der Packungsdichte.

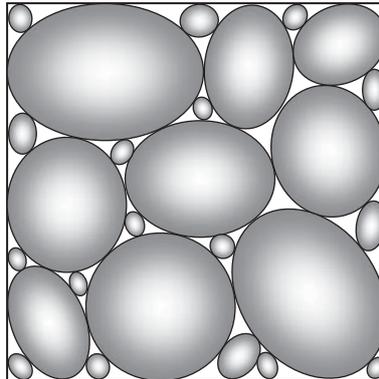


Abbildung 3.2: Bimodale Packung; Die Zwickel zwischen dem Grobkorn werden mit Partikeln einer wesentlich kleineren Kornklasse z.B. Sand 2/4 mm gefüllt.

Quelle: eigene

In dieser schematischen 2D-Darstellung füllen die Partikel der nächstkleineren Kornklasse genau dann die Zwickel zwischen den großen Körnern, wenn sie um den Faktor 4 - 6 kleiner sind als das Größtkorn [Wesche (1993)]. Eine weitere Erhöhung der Packungsdichte lässt sich durch das Füllen der nun verbleibenden Zwickel durch eine weitere, noch kleinere Kornklasse erreichen. Die Idealvorstellung hierfür ist, dass die jeweils nächstkleinere Kornklasse kleiner ist als die Zwickel der vorhergehenden größeren Kornklasse oder diese gerade füllt, ohne das Gerüst der größeren Körner auseinanderzudrücken. (Vergleiche



hierzu *Abbildung 3.3*) Für natürlich vorkommende dreidimensionale Körper wird der erforderliche Größenunterschied zur nächstkleineren Kornklasse noch größer.

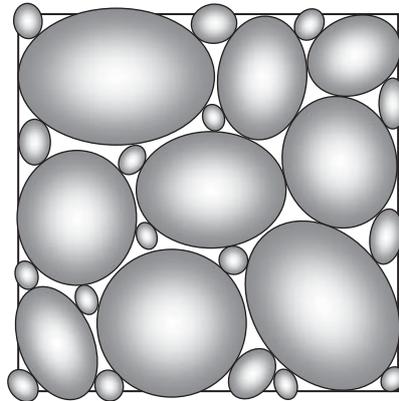


Abbildung 3.3: Kleine Körner sind um ca. 10 % gegenüber *Abbildung 3.2* vergrößert, drängen die großen Körner auseinander und die Packungsdichte verringert sich

Quelle: eigene

Die Betrachtungen in [German (1989)] zeigen für „Ein-Korn-Gemische“ aus 3 Klassen jeweils gleichgroßer, kugelliger Partikel die Abhängigkeiten der maximal erreichbaren Packungsdichte von dem Verhältnis der Mischungsanteile sowie von dem Größenverhältnis der Körner der einzelnen Klassen. Dabei wurde deutlich, dass für das Erreichen hoher Packungsdichten auch ein großer Unterschied zwischen den Korndurchmessern der Komponenten vorteilhaft ist. So wurden bei Untersuchungen von Furnas (Sekundärquelle: [German (1989)]) Gemische verschiedener Kornklassen mit „Spezifischen Packungsdichten“ von 0,6 betrachtet. Dabei ergab sich, dass erst ab einem Größenverhältnis der beteiligten Kornklassen von 100 : 1 (große Partikel : kleine Partikel) das Dreistoffgemisch eine höhere Packungsdichte erreicht als ein Zweistoffgemisch. Ab einem Verhältnis der Korngrößen von größer als 10.000 : 1 ergab sich hier eine Packungsdichte von ca. 0,95.

Aus einer Untersuchung von Dexter und Tanner (Sekundärquelle: [German (1989)]) an kugeligen Partikeln ergab sich die Vorhersage einer maximal erreichbaren Packungsdichte von 0,95 für eine Zusammensetzung von 11 : 14 : 75 % für kleine : mittlere : große Partikel mit einem Größenverhältnis von 1 : 7 : 49. Dabei wurde von Gemischen von Kornklassen ausgegangen, die für sich allein bei zufälliger Anordnung eine „Spezifische Packungsdichte“ von 0,64 erreichten.

In dem Unterschied der Korngrößenverhältnisse von 10.000 : 1 und 49 : 1, die in den beiden oben genannten Untersuchungen jeweils eine maximale Packungsdichte von 0,95 ergaben, zeigt sich, dass die realen physikalischen Eigenschaften der betrachteten Materialien und die Randbedingungen im Gemisch wesentlichen Einfluss auf das Erreichen der maximalen Packungsdichte haben. Dies sind z.B. die Reibung zwischen den einzelnen Partikeln und die Bewegungsfreiheit der Partikel in dem Gemisch sowie Wechselwirkungen mit der



Behälterwand. In realen Stoffgemischen werden diese Einflüsse durch die Rauigkeit, die Kornform und vor allem auch von der Korngrößenverteilung bestimmt.

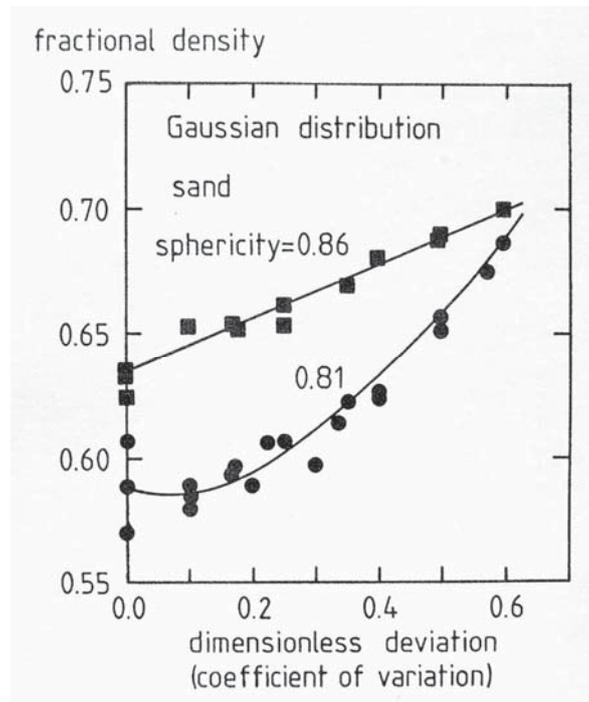


Abbildung 3.4: Packungsdichte als Funktion des Variationskoeffizienten von zwei gaußverteilten Sanden verschiedener Sphärizität (Höhere erreichbare Packungsdichten bei großem Variationskoeffizient)

Quelle: [German (1989)]

Dies führt zur Betrachtung von Korngemischen mit kontinuierlicher Korngrößenverteilung (Multimodale Packungen):

Gemäß [German (1989)] ergeben kontinuierliche Korngemische mit breiter Verteilung siehe *Abbildung 3.4* höhere Packungsdichten und geringere Porositäten als diejenigen mit schmaler Verteilungsbreite. Durch die Kombination von Kornklassen kontinuierlicher Korngrößenverteilung und verschiedener mittlerer Durchmesser kann sich eine Verbesserung der Packungsdichte ergeben. Dazu müssen aber zunächst die mittleren Durchmesser der Kornklassen ausreichend weit auseinander liegen.

Gemäß *Abbildung 3.5* ergeben sich z.B. bei zwei Kornklassen mit gleichbreiter lognormaler Verteilung umso höhere Packungsdichten, je weiter die mittleren Durchmesser der Klassen auseinander liegen.

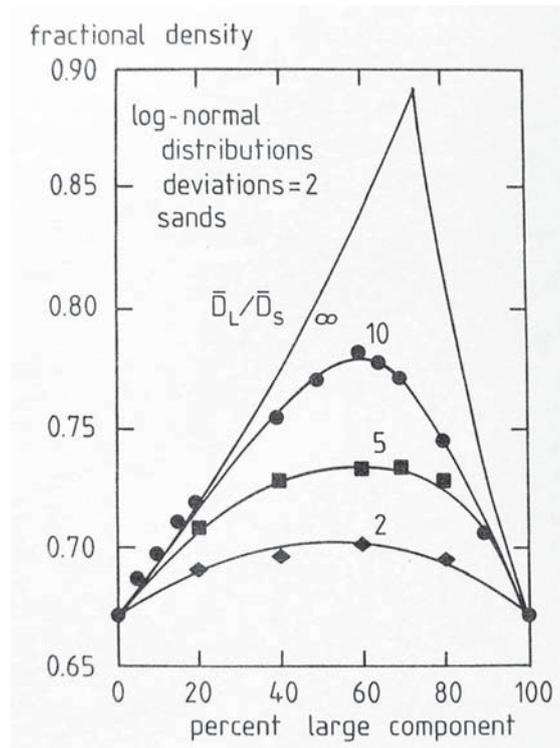


Abbildung 3.5: Abhängigkeit der erreichbaren Packungsdichte von Größenverhältnis der Mittelwerte der beteiligten Kornklassen und ihren Volumenanteilen

Quelle: [German (1989)]

Außerdem ergeben sich bei Gemischen aus Kornklassen mit kontinuierlicher Korngrößenverteilung größere Verbesserungen der Packungsdichte, wenn die Kornklassen eine schmale Verteilungsbreite haben. Währenddessen kann es sein, dass die Kombination von Kornklassen mit sehr breiter Verteilung zu keiner Verbesserung der Packungsdichte führt. [German (1989), S. 205]

Mit dem Ziel, möglichst hohe Packungsdichten zu erreichen, führt das zur Kombination mehrerer enggestufter Kornklassen - also unter Auslassung von Zwischengrößen. Dieses Konzept ist z.B. nach DIN 1045-2 in dem Sieblinienbereich 2 als Ausfallkörnung umgesetzt worden und findet außerdem bei der Projektierung von hochfestem Beton Anwendung. In *Abbildung 3.6* sind Beispiele optimierter Korngrößenverteilungen für Dreistoffgemische angegeben. Diese bestehen aus drei Kornklassen mit jeweils schmaler Verteilungsbreite.

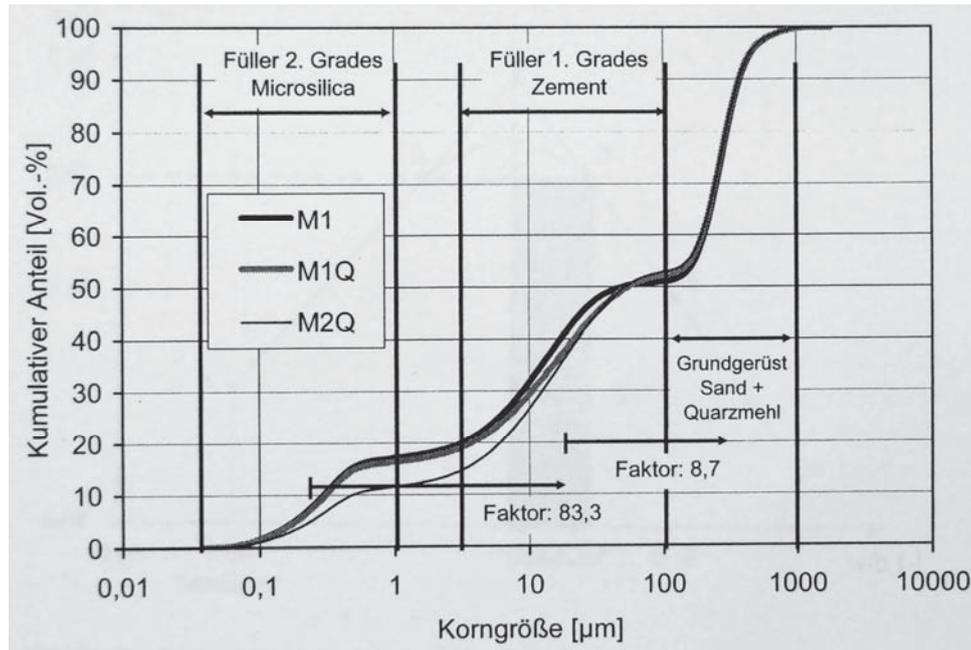


Abbildung 3.6: Optimierte Korngrößenverteilungen aus drei Komponenten für UHPC (Ultrahochfester Beton)

Quelle: [DAfStb (2008)]

3.3.2 Empirisch-numerische Berechnung von Packungsdichten in Sanden und Feinkornmischungen

Grundsätzlich sind die folgenden 2 Zustände in Gemischen unterschiedlich großer Partikel zu unterscheiden. Sie werden hier an dem vereinfachenden Modell der Zweikornmischung beschrieben:

Ein Beikorn kleinen Durchmessers (Minderheit gemäß der Volumenanteile) füllt die zwischen dem großen Hauptkorn bleibenden Zwickelräume mehr oder weniger vollständig auf, ohne dabei das Gefüge des Hauptkorns aufzulockern. (rechts in *Abbildung 3.8*) Als Extremwert ist dies eine Einkornpackung ohne kleines Beikorn, wie z.B. eine Drainschicht im Straßenbau. Hier kann maximal die *spezifische Packungsdichte* der Kornklasse erreicht werden. Bei einer Erhöhung des Anteils des Beikorns füllt dieses die möglichen Hohlräume in der Grobkornpackung und das Haufwerk nähert sich dem Punkt maximaler Packungsdichte.

Ein Beikorn großen Durchmessers (Minderheit gemäß der Volumenanteile) schwimmt¹ zwischen dem kleinen Hauptkorn, ohne dass sich die groben Körner gegenseitig behindern oder ein Gefüge bilden. (links in *Abbildung 3.8*) In diesem Fall kann das Gemenge als Suspension angesehen werden, mit den groben Partikeln als „dispergierte Phase“ und den kleinen Partikeln als Dispersionsmittel. Der Extremzustand dieses Gemenges ist das Verhalten der ausschließlich kleinen Partikel wie eine Flüssigkeit. Dabei erreicht eine Packung von ausschließlich kleinen Partikeln ihre *spezifische Packungsdichte*. Bei Erhöhung des Anteils von großen Partikeln werden immer mehr Volumenelemente, bestehend aus

¹ Bezeichnung „schwimmen“ nach [Reschke (2000)]



kleinen Partikeln und Poren, durch große Partikel ersetzt. Dadurch erhöht sich die Packungsdichte. Bei weiterer Erhöhung des Grobanteils kommt es zunächst zu Kontakten und gegenseitigen Behinderungen der groben Partikel, bis diese sich zu einem Gefüge aufbauen und sich das Gemisch dem Punkt maximaler Packungsdichte annähert.

Außerdem treten weitere Effekte wie *Brückenbildung* zwischen einzelnen Partikeln und der *Wandeffekt* an Behälterwänden und sehr großen Körnern auf. (siehe *Abbildung 3.7*)

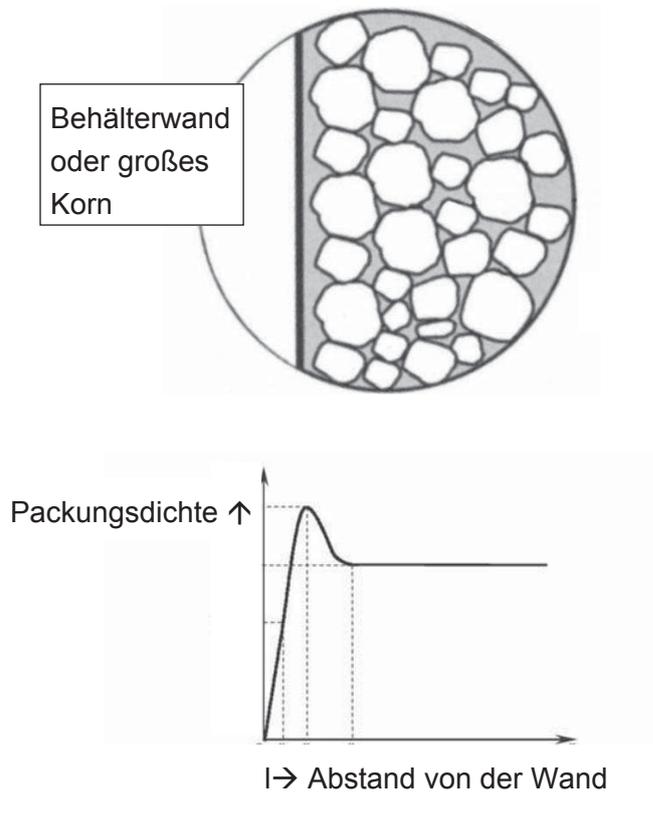


Abbildung 3.7: Skizze des Wandeffektes in Kornhaufwerken

Quellen: [Sekundärquelle Geisenhanslüke (2008): oben: Moosberg-Bustnes, Lagerblad, Forssberg; unten: Zeng, Li, Jones]

Ausgehend von diesen beiden Zuständen eines bimodalen Gemisches mit vorwiegend großen oder vorwiegend kleinen Partikeln stellt sich bei den dazwischen möglichen Mischungszuständen ein Maximum der Packungsdichte und damit Minimum des Porenraumes ein. Diese modellhafte Überlegung wird z.B. durch die in *Abbildung 3.5* dargestellten Ergebnissen bestätigt.

Auf Basis dieser Ausgangszustände und des dazwischen liegenden Übergangsbereiches kann die Packungsdichte von Partikelgemischen empirisch-numerisch abgeschätzt werden.

In einem von [Schwanda (1956)] entwickelten und von [Reschke], [Krell] und [Geisenhanslüke] erweiterten Verfahren werden jeweils zwei Einzelkornklassen eines Gemisches miteinander gepaart und die sich ergebende Funktion des Hohlraumgehaltes $a_{s,i}$ gemäß *Abbildung 3.8* ermittelt und entsprechend der vorliegenden volumetrischen Anteile ausgewertet. Daraus



ergibt sich der Anteil dieser Paarung am Gesamthohlraumgehalt des Gemisches. Nach diesem Verfahren werden für alle in dem Gemisch vorkommenden Paarungen von Einzelklassen die anteiligen Hohlraumgehalte ermittelt und daraus Hohlraumgehalt und Packungsdichte des Gemisches bestimmt.

Dabei werden die Korngrößenverteilung und die gegenseitige Behinderung der Körner in dem Haufwerk berücksichtigt. Die Feuchte der Mischung, Wasserhüllen der Partikel und Wechselwirkungen der Partikel durch elektrostatische Kräfte werden in diesem Ansatz nicht erfasst.

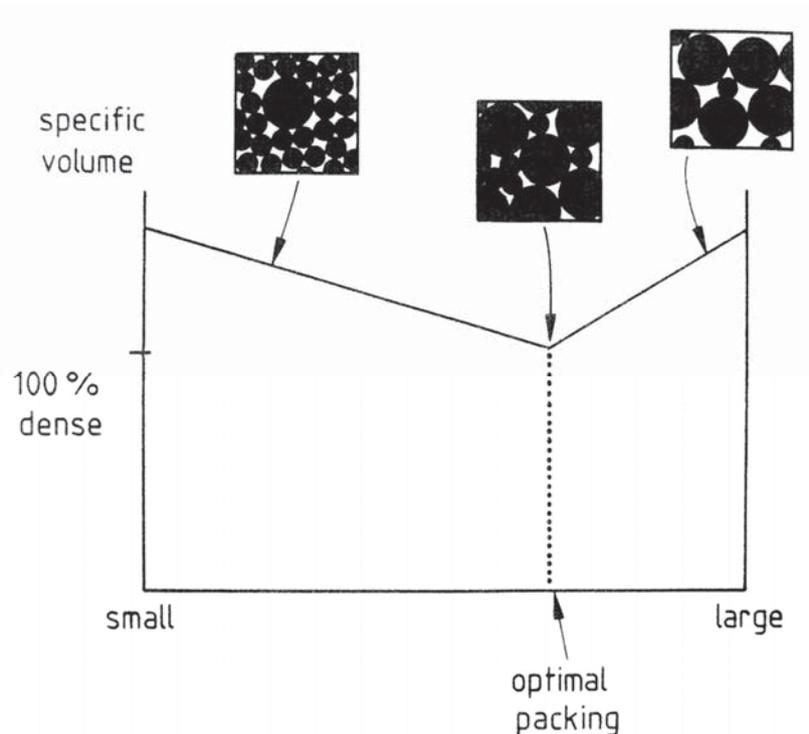


Abbildung 3.8: Prinzipialskizze zum Erreichen maximaler Packungsdichte abhängig von den Anteilen zweier Kornfraktionen

Quelle: [German (1989)]

An der Universität Kassel, FG Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie, wurde für diese Auswertung eine Software erstellt. Dabei werden die Korngrößenverteilungen der jeweiligen Ausgangsstoffe z.B. durch Lasergranulometrie oder Siebanalyse ermittelt und in über 100 Einzelklassen unterteilt. Für all diese Einzelklassen der Ausgangsstoffe erfolgt die Auswertung der miteinander möglichen Paarungen. Nach dem Vorgeben von Grenzen für zulässige Mischungsverhältnisse und den Schrittweiten für die Variationen der Mischungen werden alle damit möglichen Rezepturen ermittelt. Entsprechend der in der jeweiligen Rezeptur vorliegenden Anteile der Einzelkornklassen geht der Anteil ihrer Paarung in den Gesamthohlraumgehalt der Rezeptur ein.

Die Ergebnisse dieser Berechnung für die in diesem Projekt verwendeten Ausgangsstoffe sind in *Abschnitt 4.4.1* beschrieben.



3.3.3 DEM-Modellierung

Zur DEM-Modellierung (Diskrete-Elemente-Modellierung) der theoretischen Packungsdichte wurden am Institut für Feststoffverfahrenstechnik und Partikeltechnologie der TUHH für die Rezepturen D04, D11 und K04 Berechnungen der maximal erreichbaren Packungsdichte durchgeführt.

Dabei wurden ausgehend von den vorliegenden Korngrößenverteilungen der betrachteten Rezepturen und der Vorgabe eines Agglomeratkorns von 16 mm Durchmesser Partikel der jeweiligen Korngrößenklassen innerhalb dieses Kornvolumens verteilt. Die Verteilung erfolgte durch stochastische Anordnung und anschließende Prüfung auf Überschneidungen beginnend bei den Klassen der größten Körner. Beim Auftreten von Überschneidungen wurden die Partikel der jeweils betrachteten Kornklasse neu angeordnet. Während der Berechnung werden je Kornklasse bis zu 50 Millionen Iterationsschritte, also verschiedene Anordnungen getestet.

Durch dieses Verfahren wird eine Anordnung der Partikel des Gemisches mit möglichst geringem Restporenraum ermittelt. Aus dem *Hohlraumgehalt* ε wird gemäß der *Formeln 3.1* und *3.2* die *Packungsdichte* Φ bestimmt.

Die Ergebnisse dieser Simulations-Berechnung werden in *Abschnitt 4.4.3* beschrieben.

3.3.4 Feinkornhaufwerke in Anwesenheit von Wasser

Im Zustand unvollständiger Wassersättigung eines feinen Kornhaufwerkes bestehen Wasserbrücken an den Berührungspunkten der Partikel. Diese erzeugen durch ihre Oberflächenspannung eine zusammenhaltende Kraft für jeden dieser Berührungspunkte und in ihrer Gesamtheit die von z.B. feuchten Sanden bekannte „scheinbare Kohäsion“.

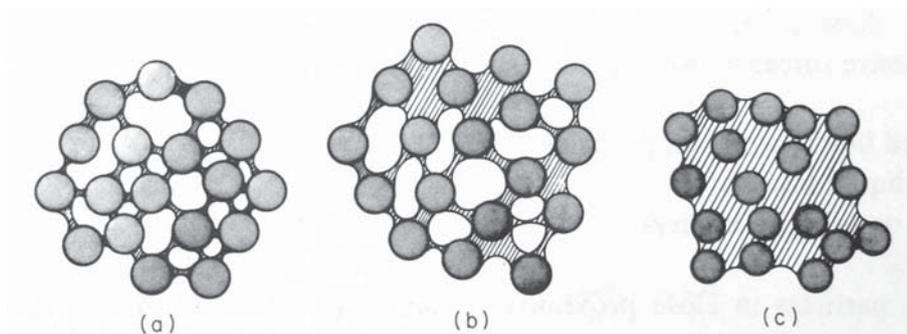


Abbildung 3.9: Kornhaufwerke bei verschiedenen Wassergehalten

Quelle: [Sherrington / Oliver (1981)]

Bei der weiteren Zufuhr von Wasser werden die Porenräume zwischen den Sandkörnern zunehmend aufgefüllt. Die Wasserbrücken verbinden sich zu immer größer werdenden Flüssigkeitsbereichen bis sie den gesamten Porenraum des Kornhaufwerkes füllen. Damit entfällt die aussteifende Wirkung der Wasserbrücken auf das Kornhaufwerk und das Korngemenge beginnt zu „fließen“.



3.3.5 Experimentelle Bestimmung der Packungsdichte von Sanden und Feinkorngemischen und Puntke-Verfahren

In verschiedenen Bereichen der Industrie ist es erforderlich, die Verdichtbarkeit oder maximale Packungsdichte von Fein- und Feinstoffen und deren Gemischen zu bestimmen. Zum Beispiel werden das „Stampfvolumen“ und die „Stampfdichte“ für trockene Pigmente und Füllstoffe ($< 500 \mu\text{m}$) mit einem Stampfvolumeter nach (DIN EN ISO 787-11) bestimmt. Dabei wird das trockene Probenmaterial in einem Messzylinder durch Aufstoßen in einer Fallvorrichtung mit einer Auflast unter definierten Bedingungen verdichtet. Das Aufstampfen des Probengefäßes erfolgt hierbei durch eine Nockenwelle mit 250 Schlägen pro Minute. Nach je 1250 Stampfschlägen erfolgt eine Volumenablesung bis die Änderung dabei kleiner 1 % ist. Bei Kenntnis der „Reindichte“ des Materials kann die Packungsdichte aus der Stampfdichte bestimmt werden.

Bei diesem Verfahren wird der Probe ein Übermaß an Verdichtungsenergie angeboten. Trockene Feinstkornhaufwerke zeigen durch erhöhte Reibung zwischen den Partikeln und interpartikuläre Kräfte einen höheren Verdichtungswiderstand als feuchte Kornhaufwerke.

Ein Ansatz, der das Wegfallen der zusammenhaltenden Wirkung (*scheinbare Kohäsion*) bei steigender Wassersättigung zum Bestimmen der „dichtesten Lagerung“ eines feinen Kornhaufwerkes nutzt, ist das **Puntke-Verfahren** [Puntke (2002), S. 243, oben]:

Dabei wird die Wassermenge bestimmt, die einem feinen Kornhaufwerk zugegeben werden muss, um dessen Porenraum vollständig zu füllen. „...Bei Wassersättigung verliert sich die Kapillarspannung, wodurch sich das Haufwerk zu der charakteristischen dichtesten Packung umlagern lässt...“ Das Erreichen der vollständigen Füllung des Porenraumes des Kornhaufwerkes wird daran erkannt, dass das Haufwerk bei geringer Verdichtungsarbeit ohne Auflast zusammenfließt: „...sich die Oberfläche beim wiederholten Aufstoßen ebnet und Glanz zeigt.“ Die dafür erforderliche Wassermenge wird durch Rückwägung bestimmt und dem Porenraum des Haufwerkes im Zustand der dichtesten Packung gleichgesetzt.

Seitens des Verfassers dieser Arbeit bestehen grundsätzliche Zweifel daran, dass das Puntke-Verfahren die „dichteste Lagerung“ eines Kornhaufwerkes erfasst. Im Zuge der eigenen Untersuchungen wurden stattdessen Werte für die „charakteristische, dichteste Packung“ der Ausgangsstoffe bei Angebot von reichlich Verdichtungsarbeit bestimmt. In dem abgewandelten Verfahren wurde der Wassergehalt der Probe ebenfalls schrittweise erhöht. Die dabei ermittelten Wassergehalte im Zustand der Wassersättigung sind durchweg geringer, als die nach Puntke erreichten. Sie werden für die meisten der hier untersuchten Korngemische als bessere Näherung an den Zustand der „charakteristischen, dichtesten Packung“ angesehen. Die so abgewandelte Form des Puntke-Verfahrens hat sich als brauchbar erwiesen und ist mit weiteren Überlegungen im *Abschnitt 4.4.2* dargestellt.



3.4 Granulierverfahren und -anlagen

Im Folgenden werden einige grundlegende Begriffe eingeführt, die zum Verständnis dieser Arbeit von zentraler Bedeutung sind. Eine Erläuterung weiterer Begriffe, die durch *Kursivschrift* als Fachwort gekennzeichnet sind, befindet sich im *Kapitel 6.1*.

Unter Agglomerieren versteht man das Zusammenfügen von Partikeln zu größeren Gebilden. Dabei werden je nach Anwendungsbereich oder nach Beschaffenheit der Agglomerate auch die Begriffe Granulieren, Pelletieren, Brikettieren und Tablettieren benutzt. Die Abgrenzung zwischen diesen Begriffen ist in verschiedenen Branchen widersprüchlich. Allgemein erfolgt das Tablettieren und Brikettieren durch Pressvorgänge, zum Beispiel mittels einer Walzenpresse oder einer Stempelpresse. Als Pellets werden sowohl Partikel bezeichnet, die durch Aufbauagglomeration als auch durch eine Lochpresse entstehen. Der Begriff *Granulat* wurde überwiegend im Zusammenhang mit dem schichtenweisen Aufbau von Agglomeraten gefunden. Im Zuge dieser Untersuchung werden jedoch gleichförmig homogen aufgebaute Partikel angestrebt und eine Schichtenbildung soll vermieden werden.

Daher werden im Rahmen dieser Arbeit die hergestellten Partikel mit dem allgemein gültigen Begriff *Agglomerat* angesprochen. Dennoch wird bei der Bezeichnung Granulierteller geblieben, weil dieser Begriff in der Literatur allgemein gebräuchlich und weit verbreitet ist. Je nach Prozesssteuerung und Zugaberegime können also in einem Granulierteller entweder Granulate (mit schalenartigem Aufbau) oder (homogen aufgebaute) Agglomerate hergestellt werden.

Weitere Verfahren zur Herstellung von Agglomeraten sind die Granuliertrommel, der Granuliermischer und die Wirbelschichtgranulation. Hier wurde der Granulierteller ausgewählt, weil sich dabei der Prozess besonders leicht beobachten lässt.

Der Zusammenhalt der frischen Agglomerate erfolgt durch die Kapillarkräfte in den Poren und an den Berührungspunkten der einzelnen Partikel. Je nach Wassergehalt des Haufwerkes – also dem Grad der Porenfüllung – treten zunächst Flüssigkeitsbrücken auf. Bei zunehmender Füllung sind nur noch an der Oberfläche des Agglomerates konkave Flüssigkeitsmenisken vorhanden und bei weiterer Wasserzufuhr werden die Bindekräfte ganz aufgehoben. Die Festigkeitsbildung in den erhärteten Agglomeraten erfolgt durch Festkörperbrücken, die durch das Erhärten der Zementsuspension entstehen, die vorher die Flüssigkeitsmenisken zwischen den Partikeln bildeten.

Um den Zementgehalt als einen der charakteristischen und in der Betontechnologie etablierten Rezepturparameter, unabhängig vom Gehalt an Zusatzstoffen direkt aus den Agglomeratrezepturen ablesbar zu machen, wird er in den Rezepturen der Agglomerate im Verhältnis zu den Mengen an Sand und Flugasche als ganzzahliger prozentualer Massenanteil angegeben. Zum Beispiel wird die Agglomeratrezeptur D01 in folgender Schreibweise dargestellt: Sand D1 : Sand D2 : CEM I : SFA = 30 : 50 : 10 : 10. (siehe auch *Abschnitt 4.3.1*)



3.5 Bisherige agglomerierte Zuschläge für Beton

Die DIN EN 12620 „Gesteinskörnungen für Beton“; (2002) +A1 (2008) legt die Eigenschaften von Gesteinskörnungen und Füllern fest, die durch Aufbereitung natürlicher, industriell hergestellter oder rezyklierter Materialien und Mischungen daraus für die Verwendung als Betonzuschlag gewonnen werden. Damit fallen auch die hier untersuchten Sand-Zement-Agglomerate unter die Regelungen dieser Norm.

Von den in der DIN geforderten Eigenschaften für Gesteinskörnungen sind für Agglomerate nur die folgenden zu prüfen: Korngröße, Frostwiderstand, Wasseraufnahme im Zusammenhang mit der Frostprüfung. Die weiteren in DIN EN 12620 genannten Parameter für natürliche grobe Gesteinskörnung und rezyklierte Gesteinskörnung wie Kornform, Gehalt an Muschelschalen und abschlämmbaren Bestandteilen, chemische Anforderungen (Chloridgehalt und schwefelhaltige Bestandteile), Gehalt an Fremdstoffen wie Tonziegeln, Kalksandsteinziegeln, ungebundenen Gesteinskörnern, schwimmenden Materialien und organischen Stoffen treffen für Sand-Zement Agglomerate nicht zu.

In der zuvor gültigen DIN 4226 Teil 2 wurden Leichtzuschläge, wie zum Beispiel Blähton, Perlite und Blähglas, behandelt, bei deren Herstellung auch Granulierverfahren angewandt werden. Diese Zuschläge werden in einem Agglomerierverfahren geformt. Das zur Festigkeitsbildung erforderliche Sintern ist aber sehr energieaufwendig, da hierbei die gesamte Masse des Zuschlagkornes erhitzt wird.

Eine neuere Entwicklung eines Leichtzuschlages, bestehend überwiegend aus Holzasche und mit einem Granulierverfahren hergestellt, wird unter dem Namen KAND[®]STONE vertrieben. Leichtzuschläge, wie zum Beispiel Blähton oder KAND[®]STONE, sind wegen ihrer geringen Rohdichte nicht für die Herstellung von Normalbeton geeignet.

Für Normalbeton wird zurzeit keine grobe, künstliche Gesteinskörnung mit Granulierverfahren hergestellt.

Sand-Zement-Agglomerate bieten in einer nächsten Untersuchungsstufe die Aussicht auf eine weitere Kostenoptimierung, wenn Zement durch kostengünstigere Bindemittelvarianten (zum Beispiel Filteraschen oder Schlacken) ergänzt oder ersetzt wird.



Kapitel 4

Versuche und Ergebnisse

In diesem Kapitel wird ausgehend von den regionalen Sanden die Herstellung von Sand-Zement-Agglomeraten beschrieben. Dabei wird der Argumentationsbogen von den Eigenschaften der Frischlinge über die Eigenschaften der Festlinge bis zur Güte des Agglomeratbetons gespannt.

Zur Prüfung der Eingangsfrage nach der Möglichkeit des Ersatzes von Kiesbeton durch Agglomeratbeton und um die Vergleichbarkeit der Eigenschaften von Agglomeratbeton und Kiesbeton nachzuweisen, werden Betonproben aus Sand-Zement-Agglomeraten hergestellt, ihre Güte bestimmt und mit denen von Kiesbeton verglichen. Um bereits während der Herstellung der Agglomerate Steuerungsgrößen für den Herstellprozess zur Verfügung zu haben, die mit der Qualität des Agglomeratbetons korrelieren, werden in diesem Kapitel die Eigenschaften der Agglomerate bestimmt und Abhängigkeiten der Eigenschaften von Frischlingen und Agglomeratbeton gesucht.

Die Packungsdichte und die Rohdichte sowohl der frischen als auch der erhärteten Agglomerate werden als maßgebendes Kriterium für die Einschätzung der Güte der Agglomerate angesehen. Da die Rohdichte an den Frischlingen schwierig (nicht praxisgerecht) zu bestimmen ist, wurde das Bruchverhalten der Frischlinge untersucht, da eine Abhängigkeit des Bruchverhaltens von der Packungsdichte zu erwarten ist.

Eine besondere Bedeutung hat dabei der Mindestbindemittelgehalt, da hier technische und ökonomische Grenzen zu erwarten sind.

In *Abbildung 4.1* ist der Auswahlvorgang der bei den Versuchen eingesetzten Sande schematisch dargestellt. Dabei bestand die Aufgabe, aus der Vielfalt der in der Region verfügbaren Sandvorkommen eine Auswahl zu treffen, die trotz begrenzter Versuchsanzahl verallgemeinernde Aussagen zulässt.

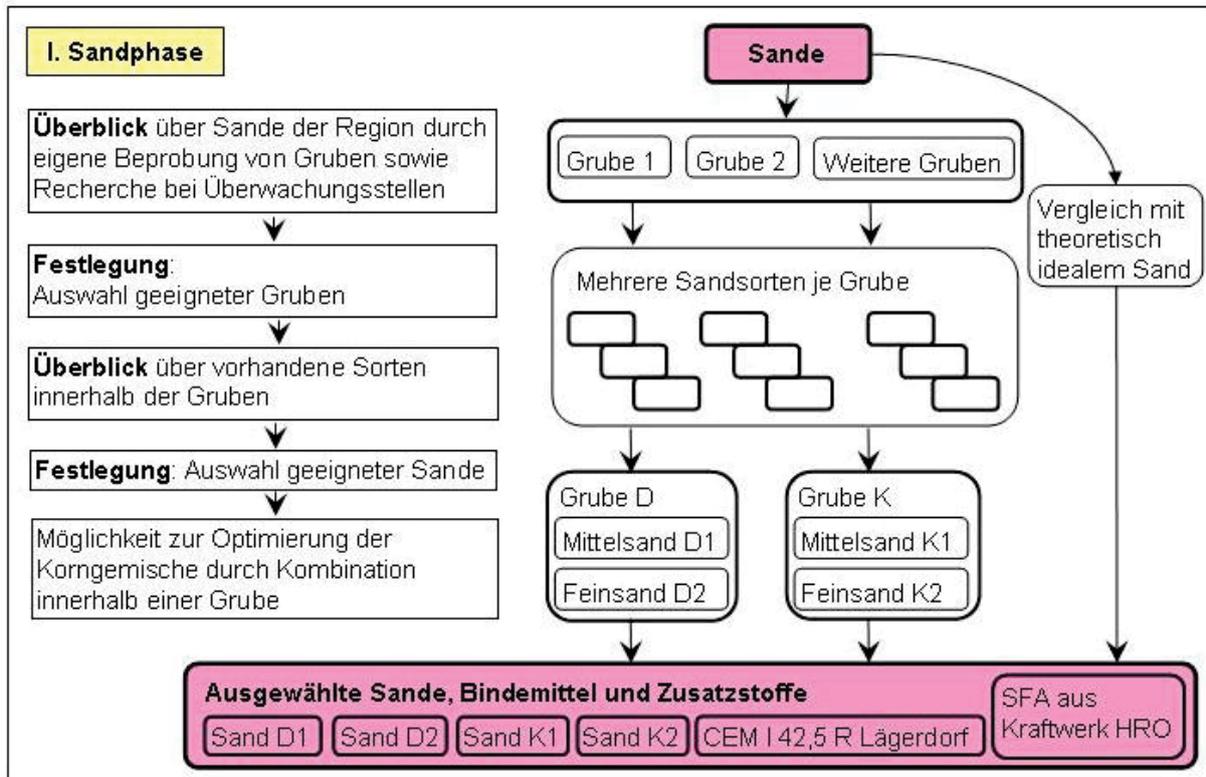


Abbildung 4.1: Übersicht zum Auswahlverfahren der für die Untersuchungen genutzten Sande

Quelle: Eigene

4.1 Verwendete Ausgangsstoffe

4.1.1 Sande der Region und Auswahl der Sande für Versuche

Allgemeiner Überblick über Sande der Region

Der Grobkornmangel bei gleichzeitigem Vorhandensein von Überschusssanden ist ein typisches, norddeutsches Problem, das in Mittel- und Süddeutschland so nicht auftritt. Im nördlichen Niedersachsen wird z.B. aus der Weser Kies (heute: grobe Gesteinskörnung) gewonnen, dennoch besteht in weiten Teilen Grobkornmangel. Auch in Mecklenburg-Vorpommern ist die Problematik des Grobkornmangels und der Überschusssande relevant. Bei den ersten Recherchen zu diesem Thema kamen Kontakte zum BÜV (Baustoffüberwachungsverein Nord), Kieswerken in Schleswig-Holstein und Betonwerken in Hamburg zustande. Dies führte zu der Entscheidung, im Rahmen dieser Untersuchung Sande aus der Region Schleswig-Holstein zu betrachten. Hier werden zu Zeit Kiesvorkommen ausgebeutet, deren Kiesgehalt nur 15 bis 20 % beträgt.

Untersuchung der anstehenden Sande von Kooperationspartnern und Daten vom LBV Kiel

Um einen Überblick über die Bandbreite der Eigenschaften der in der Region vorkommenden Sande zu erhalten, wurden zunächst in Kieswerken bei Plön (Schleswig-Holstein) Proben



ungewaschener Sande entnommen und untersucht. Die bei Damsdorf entnommenen Sande wurden mit D bezeichnet, die Proben aus dem Bereich Kreuzfeld mit K. Dabei wurden die unterschiedlichen Sandsorten, die jeweils in verschiedenen Gruben und Abbauhorizonten eines Werkes auftraten, erfasst. Bei den Proben handelt es sich um Körnungen 0 bis 4 mm und bei D-7 0 bis 32 mm. Die von diesen Proben ermittelten und auf die Kornklasse 0/2 mm eingeeigneten Korngrößenverteilungen sind in *Abbildung 4.2* und in *Anlage 1* detailliert dargestellt.

Als eine Besonderheit wurden mit den Sanden K-2 und D-3 zwei Sorten erfasst, die einen so hohen Feinkorngehalt aufweisen, dass sie nach den geltenden Vorschriften im Straßen- und Wegebau nicht eingesetzt werden dürfen, aber auch für die üblichen Anwendungen als Verfüllung ungeeignet sind.

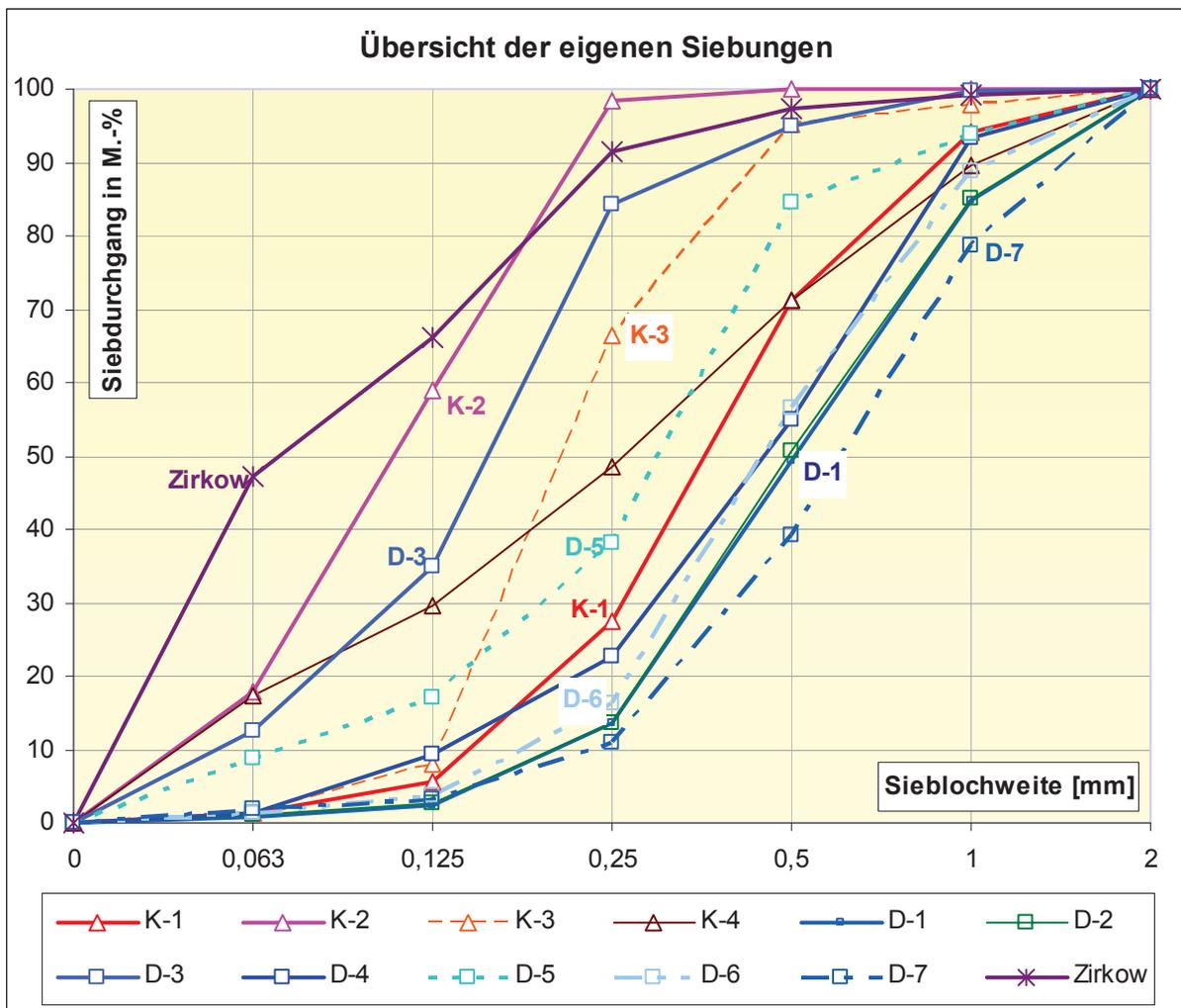


Abbildung 4.2: Korngrößenverteilungen der Sande der Voruntersuchungen gemäß eigener Messungen

Quelle: Eigene

Vom Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein in Kiel wurde für diese Untersuchung eine Übersicht über die Sande zur Verfügung gestellt, die aus der Region



Schleswig-Holstein stammen und 2009 im Verzeichnis der güteüberwachten Gesteinskörnungen und Gemische für zugeordnete Verwendungen gelistet sind.² Die in *Abbildung 4.3* eingetragenen Korngrößenverteilungen stellen einen Auszug aus dieser Liste dar. Dabei wurden die Korngrößenverteilungen der nicht gewaschenen Sande nur bis zu einem Größtkorn von 2 mm aufgetragen. Diese Daten sind in *Anlage 2* als Tabelle dargestellt.

Die Güteüberwachung der gelisteten Sorten erfolgt nach TL SoB-StB (Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau) und den Empfehlungen der FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen).

Zusätzlich ist in *Abbildung 4.2* und *Abbildung 4.3* die Korngrößenverteilung eines Sandes aus Zirkow auf Rügen dargestellt, der einen besonders hohen Feinstkornanteil hat.

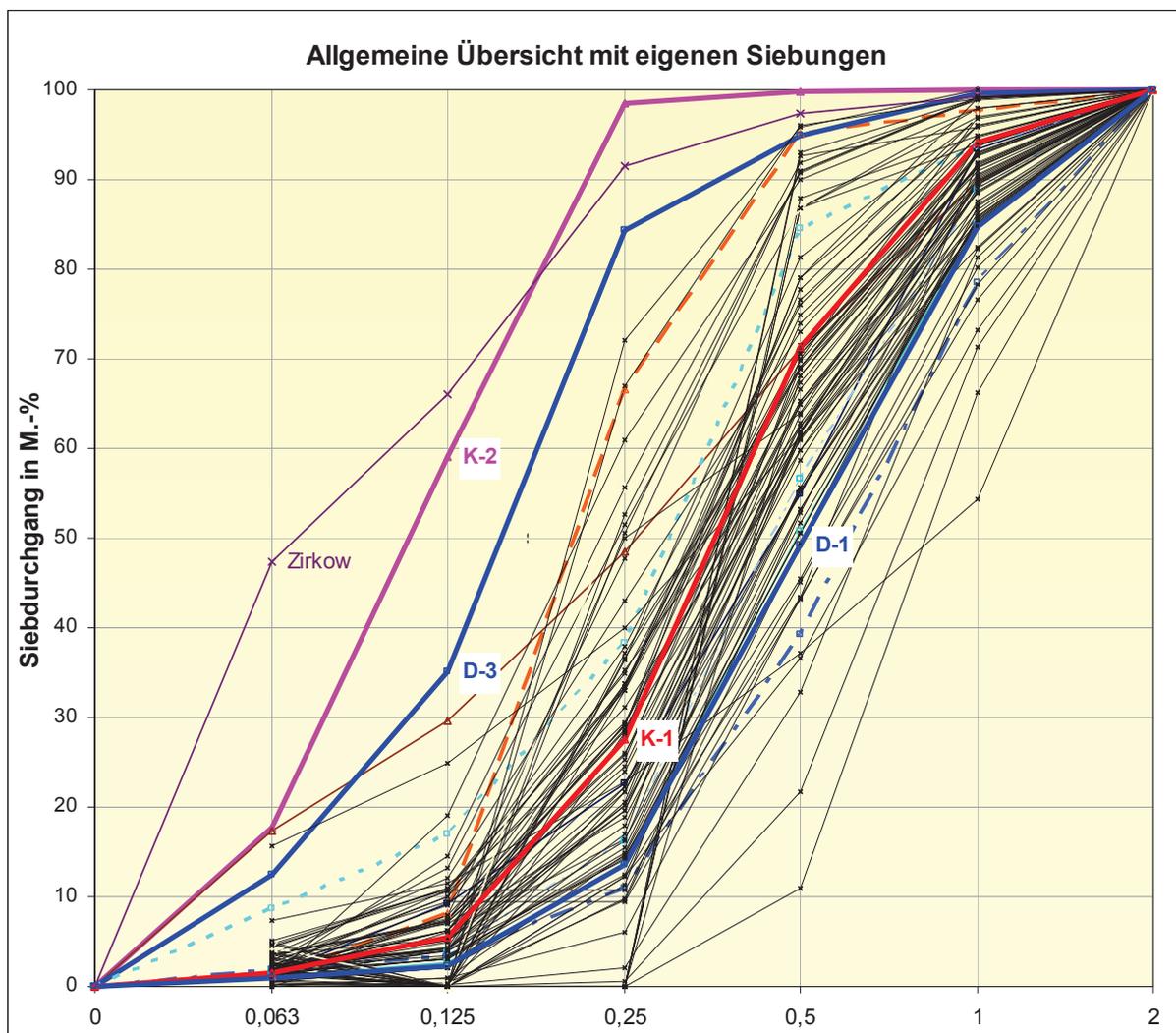


Abbildung 4.3: Sande der Region ergänzt um die Korngrößenverteilungen der eigenen Voruntersuchungen

Quelle: Eigene Darstellung nach Daten des LBV-SH und eigenen Messungen

² Die Daten wurden anonymisiert übergeben.



Aus dem Vergleich der Ergebnisse der bei Plön entnommenen Proben D-1 bis D-7 und K-1 bis K-3 mit den beim LVB SH in Kiel gelisteten Sorten ergibt sich, dass die selbst entnommenen Proben die Bandbreite der in Schleswig-Holstein verwendeten Sandsorten gut abbilden. Darüber hinaus sind mit den Sorten D-3 und K-2 auch Sande erfasst, die einen für die üblichen Anwendungen deutlich zu hohen Feinstkorngelhalt aufweisen.

Auswahl der Sande für die Versuche

Wie in *Kapitel 3.3* dargestellt, hat die Packungsdichte eines Haufwerkes, das durch mineralische Bindungen einen Festkörper bildet, wesentlichen Einfluss auf dessen mechanische Eigenschaften. Dabei ist die Korngrößenverteilung der wesentliche Parameter, der die erreichbare Packungsdichte unter der Annahme reichlich vorhandener Verdichtungsarbeit beeinflusst.

Die Entnahme der Sandproben in den Kieswerken erfolgte auch mit dem Ziel, verschiedene Mischungen von Sanden mit möglichst unterschiedlichen Korngrößenverteilungen innerhalb eines Kieswerkes herzustellen. Unter dem Aspekt der Energieeffizienz ist dies nur sinnvoll, wenn die verschiedenartigen Sande auf dem Gelände des jeweiligen Unternehmens vorliegen.

Nach diesen Vorüberlegungen wurde entschieden, jeweils einen groben und einen sehr feinen Sand der Lieferwerke D und K für die weiteren Versuche zu nutzen. So fiel die Entscheidung, die Sande entsprechend der Bezeichnungen D-1, K-1, D-3 und K-2 aus den Voruntersuchungen für die Hauptversuche zur Herstellung von Agglomeraten einzusetzen. Um die Sandsorten der Voruntersuchungen von den im Hauptteil benutzten zu unterscheiden, erhalten sie für den weiteren Text dieser Arbeit die Bezeichnungen D1 und D2 sowie K1 und K2 für jeweils den groben und den feinen Sand der Lieferwerke D und K.

4.1.2 Mineralogische Eigenschaften

Die Versuchssande sind typische Beispiele für norddeutsche Vorkommen glazialer Herkunft, die üblicherweise aus mehr als 90 % Quarzsand bestehen. Die restlichen mineralogischen Bestandteile setzen sich überwiegend aus Resten von Gneisen, Feldspäten, feste Kalke, Tonschiefer, Kieselkreiden, Opalsandstein und Muschelschalen sowie Tonmineralien zusammen. (Bilder siehe *Anlage 3*, Auszug aus Petrographie siehe *Anlage 4*)

4.1.3 Granulometrische Eigenschaften der Sande

Die Korngrößenverteilungen der Versuchssande wurden durch Trocken- und Nasssiegung ermittelt. Die Ergebnisse aus den Siebungen sind in der folgenden *Abbildung 4.4* zusammengefasst und in *Anlage 5* ausführlich dargestellt.

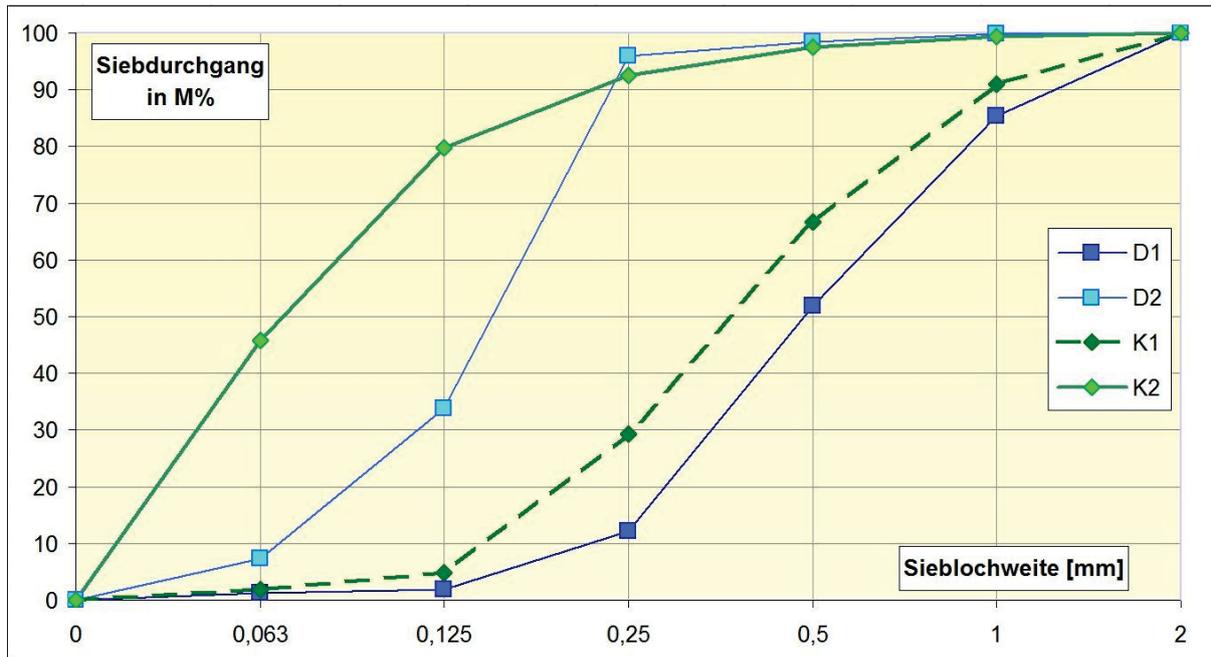


Abbildung 4.4: Kornzusammensetzung der Versuchssande gemäß Standardsiebsatz

Quelle. Eigene

Um die Eigenschaften der Sande im Feinstkornbereich zu erfassen, wurden außerdem Untersuchungen mit einem Lasergranulometer durchgeführt. Dies erfolgte im Zusammenhang mit Berechnungen zur erreichbaren Packungsdichte gemäß *Kapitel 4.4* an der Universität Kassel, Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens. Dazu wurden Proben der Sande auf die Klasse 0 - 250 μm abgesiebt und an der Universität Kassel lasergranulometrisch erfasst. Die Zusammenführung der Ergebnisse der Siebungen für den Bereich 250 μm bis 2000 μm und der Lasergranulometrie im Bereich 0 bis 250 μm erfolgte gemäß der Gewichtsanteile. Die Ergebnisse sind in dem folgenden Diagramm *Abbildung 4.5* sowie als Tabelle in *Anlage 6* dargestellt. Zur Veranschaulichung der Größenverhältnisse sind außerdem die Korngrößenverteilungen von Zement und Steinkohlenflugasche sowie die Fuller-Linien eingetragen.

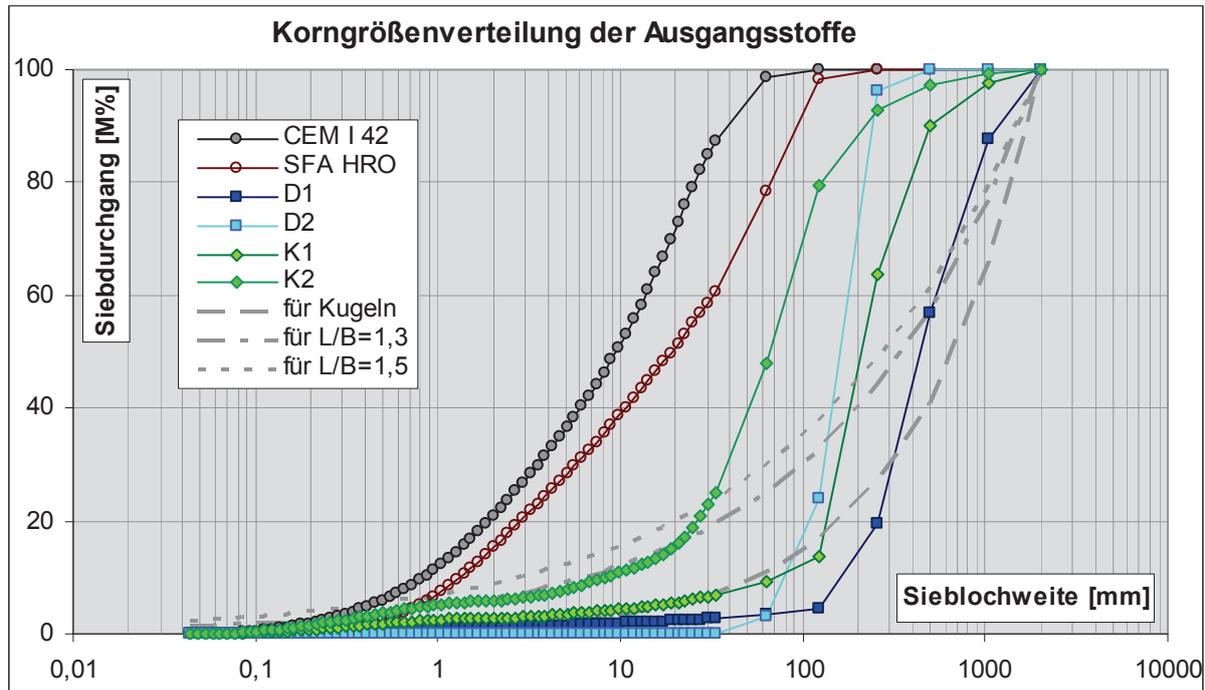


Abbildung 4.5: Überblick der Korngrößenverteilungen der Ausgangssande, Zement, Steinkohlenflugasche und Fuller-Linien für ein Größtkorn 2 mm; F-Werte der Ausgangssande in *Tabelle 4.13*

Quelle: Uni Kassel, eigene Messungen

Bei Betrachtung der Korngrößenverteilungen fällt auf, dass Sand D2 eine sehr schmale Verteilung hat und zu 90 % aus Partikeln in der Größe zwischen 60 bis 250 µm besteht. Die beiden Sande K sind deutlich feiner als die Sande D. Die Ideal-Verteilungen nach Fuller schlagen wesentlich höhere Anteile im grobkörnigen Bereich der betrachteten Sieblinie vor, als es die hier betrachteten Sande außer D1 ermöglichen.

Die Fuller-Linien (auch Fuller-Parabeln) auch für andere Größtkorndurchmesser darzustellen, erzeugt praktisch nur eine Querverschiebung der oben für 2 mm Größtkorn geltenden Linien.

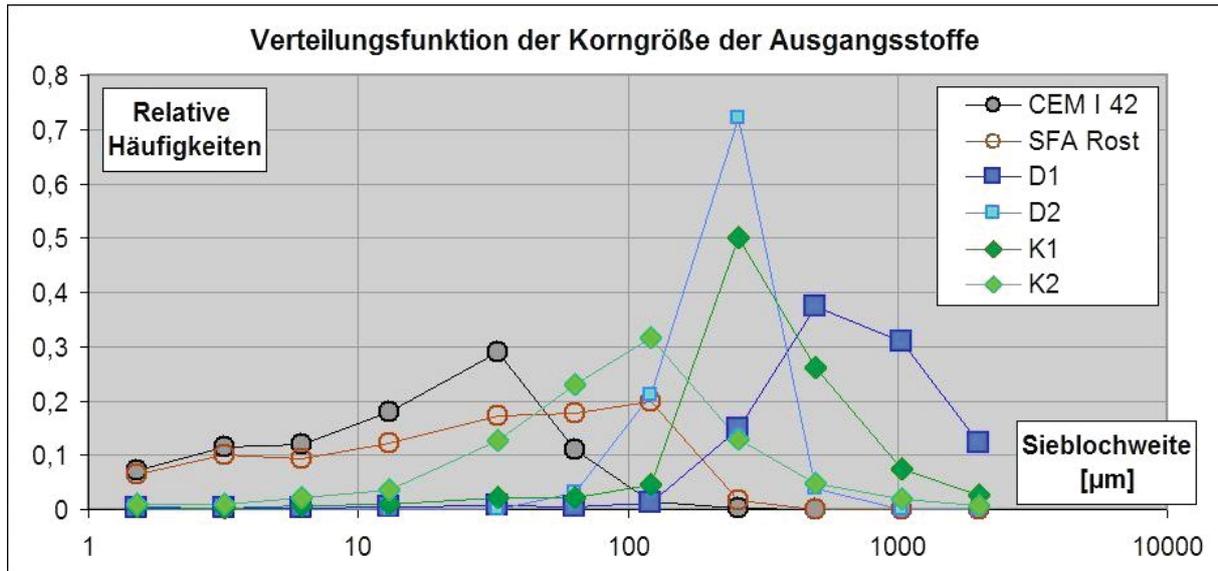


Abbildung 4.6: Relative Häufigkeiten in Bezug auf die obere Kornklassengrenze

Quelle: eigene

Die Verteilung der Sande wird als stetige Verteilung angesehen. Für die Anwendung der Thesen aus [German (1989)] werden die aus den Stichproben durch Siebung gewonnenen Werte der Korngrößenverteilung mit den auf 6 Klassen zusammengefassten Werten der Lasergranulometrie von 0 bis 250 µm ergänzt. Für die in *Abbildung 4.6* dargestellten Stichproben wurden die statistischen Maßzahlen ermittelt und in *Abschnitt 4.4.1* bewertet.

Die in der folgenden *Tabelle 4.1* dargestellten Rohdichten der Sande wurden durch Unterwasserwägung bestimmt (Details siehe *Anlage 7*).

Ausgangssand	Rohdichte ρ_0 [g/cm ³]
D1	2,607
D2	2,635
K1	2,627
K2	2,636

Tabelle 4.1: Rohdichten der Ausgangssande

Quelle: Eigene

Diese Werte stimmen gut mit den üblichen Werten für Rheinkies 2,61 - 2,63 g/cm³ für die Korngröße 0,25/1 mm und 2,60 - 2,62 für die Kornklasse 1/4 mm überein. [Wesche (1993)] Für reinen Quarzsand beträgt der Rechenwert der Rohdichte 2,65 g/cm³.



4.1.4 Verwendetes Bindemittel (Zement)

Für das Granulierverfahren ist ein Bindemittel erforderlich, das schnell ansteift und zügig erhärtet. Ein möglichst reines, unverschnittenes Bindemittel, weitgehend ohne Zumahlstoffe lässt sich in der Rezeptur als eindeutiger Parameter darstellen. Puzzolanische oder latent hydraulische Stoffe können bei Bedarf als Zusatzstoffe zur Agglomeratrezeptur dazugegeben werden.

Die regionale und zeitliche Verfügbarkeit der zu erwarteten Einsatzmenge des Bindemittels wird als Voraussetzung für ein wirtschaftlich konkurrenzfähiges Verfahren angesehen.

Wegen des schnellen Ansteifens wurde für die Versuche der Zement „Holcim-Pur 4“ Portlandzement CEM I 42,5 R nach EN 197-1 ausgewählt. Die chemisch-physikalischen Eigenschaften des eingesetzten Zementes sind in *Anlage 8* dargestellt.

Die Korngrößenverteilung des Zementes ist durch Lasergranulometrie bestimmt worden. Das Ergebnis befindet sich in *Anlage 16* und ist in *Abbildung 4.5* und *Abbildung 4.6* zusammen mit den anderen Ausgangsstoffen dargestellt.

Als Reindichte des Zementes wurde $3,019 \text{ g/cm}^3$ ermittelt. Tabellenwerte geben dafür einen Bereich von $3,01 - 3,21 \text{ g/cm}^3$ an.

4.1.5 Verwendeter Zusatzstoff (SFA)

Wie aus der Betontechnologie bekannt, können puzzolanische oder latent hydraulische Stoffe als Zusatzstoffe in der Matrix zur Optimierung der Korngrößenverteilung beitragen. Da sie sowohl durch chemische Reaktion als auch durch den physikalischen Effekt der Zwickelfüllung einen Beitrag zur Festigkeitsentwicklung des Agglomeratbetons leisten, kommen sie als möglicher Parameter zur Optimierung der Agglomeratrezepturen in Frage. Auf den Einsatz von inerten Zusatzstoffen wurde im Rahmen dieser Untersuchungen verzichtet, da der Anteil von inertem Feinstkorn durch die Feinstkornanteile in den Sanden gesteuert werden kann.

Es wurde entschieden, als zusätzlichen Füller für die Optimierung der Korngrößenverteilung der Agglomeratrezepturen Steinkohlenflugasche einzusetzen. Auf Versuche mit weiteren Füllern oder zum Beispiel Mikrosilica wurde verzichtet, um den begrenzten Ressourcen dieses Forschungsprojektes Rechnung zu tragen.

Als Zusatzstoff wurde die Flugasche aus dem Steinkohlekraftwerk Rostock (Auszug aus Prüfzeugnis siehe *Anlage 9*) ausgewählt. Ihre Korngrößenverteilung wurde wie beim Zement mit dem Lasergranulometer bestimmt. Das Ergebnis dieser Messung ist in *Anlage 16* beigefügt und in *Abbildung 4.5* und *Abbildung 4.6* zusammen mit den anderen Ausgangsstoffen dargestellt.

Die Rohdichte der SFA wurde mit $1,934 \text{ g/cm}^3$ bestimmt. (Details siehe *Anlage 7*).

Einer der grundlegenden Ansätze dieser Untersuchungen war, die Feinstkornanteile der Sande wie einen Füller anzusehen. Daher wurden ungewaschene Sande (D1 und K1)



verwendet. Bei erhöhten Anteilen von Feinstkorn (Schlämmkorn) steht die positive Wirkung der Füllung der Haufwerksporen zwischen den Sandpartikeln dem größeren Wasseranspruch gegenüber.

4.1.6 Verwendetes Wasser

Für die Versuche wurde Hamburger Leitungswasser (Trinkwasser) im Härtebereich „mittel“ benutzt. Eine Wasseranalyse für den Versorgungsbereich der Versuchsanlage für die Agglomerat- und Betonversuche liegt als *Anlage 10* bei.

Das Wasser wurde als Zugabewasser für die Agglomeratrezepturen, zum Anmischen der Betonproben, für die Nachbehandlung der Agglomerate und Betonproben sowie zum Reinigen der Werkzeuge und zum Spülen bei Nasssiebungen eingesetzt.

4.1.7 Verwendetes Betonzusatzmittel

Sowohl für die mit FM bezeichneten Agglomeratrezepturen als auch für die Einstellung der gewünschten Konsistenz bei der Herstellung der Betonprobekörper aus Agglomeratbeton kam das Fließmittel FM 34 von SIKA (Technisches Merkblatt in *Anlage 11*) zum Einsatz. Dieses basiert auf Polycarboxylatether und ist für hochdichten, selbstverdichtenden Beton mit hohem Feinststoffanteil geeignet.

Die Agglomeratrezepturen D06xFM und K04FM wurden mit 1,1 % FM sowie D08FM mit 4,4 % FM bezogen auf die Zementmenge hergestellt. Bei den Agglomeratbetonrezepturen wurden zwischen 0,28 und 1,1 % der Zementmenge Fließmittel zum Einstellen der Konsistenz eingesetzt. Die genauen Zugabemengen sind in den Mischanweisungen angegeben.



4.2 Granulieranlage und Messgeräte

Die Vielfalt der Wechselwirkungen von technischen Parametern der Granuliereinrichtung und der technologischen Randbedingungen des Agglomeriervorgangs erfordern eine Beschränkung der Anzahl der betrachteten Größen. Diese sind im Zusammenhang mit möglichen Qualitätsparametern zur Prozessüberwachung in *Abbildung 4.7* als Übersicht dargestellt.

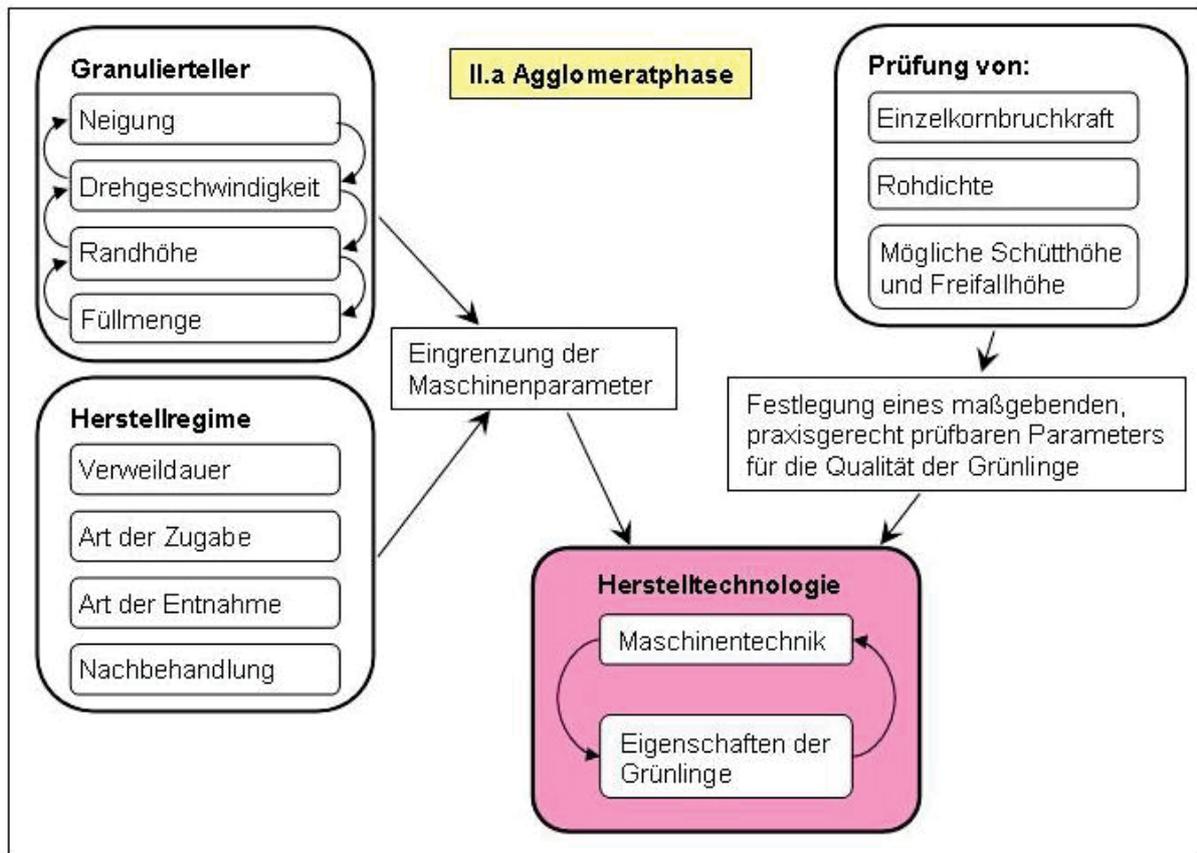


Abbildung 4.7: Übersicht der Einflussgrößen auf die Herstelltechnologie; Dargestellt sind Auszüge aus der Gesamtmenge der möglichen Parameter.

Quelle: Eigene

Der Grundaufbau des bei der Machbarkeitsstudie an der Hochschule Wismar [Holle (2007), (2008)] benutzten Granuliertellers wurde auch für diese Untersuchungen eingesetzt. Aus den Erfahrungen des Autors bei Teilnahme an Versuchen an der Hochschule Wismar und bei den eigenen Vorversuchen ergaben sich Ideen und Anhaltspunkte für notwendige technische Änderungen und Erweiterungen des Versuchsaufbaus.

Der Teller hat einen Innendurchmesser von 904 mm und wird durch einen Drehstrommotor 3x240 V, 0,5 kW mit einem Getriebevorsatz 9:1 angetrieben. Zur Drehzahlsteuerung kam ein Frequenzmodulator OMRON 3GJV zum Einsatz. Der Granulierteller ist um 360° schwenkbar



auf ein Stahlgestell montiert. Im Bereich der üblichen Neigungen des Tellerbodens gegen die Horizontale von 30° bis 60° erfolgt die Einstellung durch eine Gewindestange. Die Oberfläche des Tellerbodens besteht aus Stahlblech, dessen Rauigkeit sich beim Betrieb des Tellers wie die Rauigkeit nach feinem Sandstrahlen einstellt.

Einer der wesentlichen Ansätze, der im Rahmen dieser Untersuchung realisiert werden sollte, war, den Granulierteller in kontinuierlichem Betrieb zu fahren. Dazu sollte die Randhöhe des Granuliertellers so eingestellt werden, dass die fertigen Agglomerate - also die in der gewünschten Korngröße - von selbst über den Rand des Tellers fallen. Dazu kann der Rand des Granuliertellers durch einen verschiebbaren Mantel zwischen einer Minimalhöhe von 100 mm und einer maximalen Randhöhe von 250 mm variiert werden.

Außerdem wurde bei Bedarf eine Gerätebrücke quer über dem Granulierteller montiert, um zum Beispiel Abstreifer und Wassersprüher anzubringen.



Abbildung 4.8: Granulierteller mit kleinem Rand und glattem Boden

Quelle: Eigene



4.2.1 Maschinentechnische Parameter

Aus den vorgenannten Details zu der Granulieranlage ergeben sich die im Folgenden dargestellten veränderlichen maschinentechnischen Parameter. In *Tabelle 4.2* sind die Bereiche dargestellt, innerhalb derer sich die Parameter an der benutzten Granulieranlage einstellen lassen und außerdem die Werte aufgeführt, die empirisch als „günstiger Bereich“ mit hohen Ausbeuten an nach Augenschein gleichmäßigem, dicht gepacktem Agglomerat ermittelt wurden.

Parameter	Einstellbereich	Günstiger Bereich
Drehzahl [U/min]	0 - 160	9 - 12
Neigung [°] (Tellerboden gegen Horizontale)	40 - 60	45 - 52
Randhöhe [mm]	100 - 250	100 - 250
Rauhigkeit der Telleroberfläche	glatt oder profiliert	abhängig von Zugaberegime und oben genannten Parametern

Tabelle 4.2: Maschinenparameter und ihre Einstellbereiche an der Versuchsanlage

Quelle: Eigene

4.2.2 Stoffliche und technologische Parameter und Einflüsse auf das Agglomerierverhalten

Neben den maschinentechnischen gab es weitere Parameter, die das Agglomerierverhalten und die Eigenschaften der Agglomerate beeinflussen. Im Folgenden werden die wesentlichen davon in Gruppen zusammengefasst:

Verfahrenstechnische Parameter:

- Verweilzeit im Granulierteller
- Kontinuierliche Beschickung oder Batch-Betrieb
- Rückführung von Unterkorn und Restsand
- Nachbehandlung und Alter

Rezepturparameter:

- Kornzusammensetzung
- Feinststoffgehalt
- Überschuss an Grobkorn
- Wassergehalt
- Fließmittelzusatz
- w/z-Wert
- Zementgehalt



Stoffliche Parameter:

- Reaktivität von Zement, SFA und weiteren Zusatzstoffen
- Eigenporosität der Sande

Granulometrische Eigenschaften der Ausgangsstoffe:

- Korngrößenverteilung
- Kornform
- Rauigkeit der Kornoberfläche

4.2.3 Einschränkung der maschinentechnischen und technologischen Parameter

Das Granulieren und Agglomerieren mittels des Granuliertellers ist ein in der mechanischen Verfahrenstechnik seit über 100 Jahren bekanntes Verfahren, mit dem bereits in verschiedenen Industrien umfangreiche praktische Erfahrungen vorliegen. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit auf die allgemeinen Abhängigkeiten zwischen den maschinentechnischen und verfahrenstechnischen Parametern und ihren Auswirkungen auf den Agglomeriervorgang nicht detailliert eingegangen. Stattdessen liegt besonderes Augenmerk auf dem Beschreiben der Eigenschaften der Agglomerate und den Eigenschaften des Betons, der aus den Agglomeraten hergestellt wurde. Dabei wird insbesondere die Abhängigkeit zwischen den Eigenschaften der frischen Agglomerate und dem Agglomeratbeton beleuchtet, um ein schon während der Herstellung der Agglomerate prüfbares Qualitätskriterium zu identifizieren. Als variable Größen dienen dabei die verschiedenen Ausgangssande in veränderlichen Zusammensetzungen und Gehalten an Bindemittel und Zusatzstoff. Damit soll die Bandbreite der in Norddeutschland vorkommenden Sande auf ihre grundsätzliche Eignung zur Herstellung von Sand-Zement-Agglomeraten als künstliche Gesteinskörnung erfasst werden.

Ein Ziel dieser Untersuchung ist es zu prüfen, ob Beton, der mit Sand-Zement-Agglomeraten als grobe Gesteinskörnung hergestellt wird, der Definition nach EN 206-1 entspricht und in seinen Eigenschaften mit herkömmlichem Kies- und Splittbeton vergleichbar ist.

Es wird davon ausgegangen, dass es durch verfahrenstechnische Maßnahmen und eine geeignete Steuerung der maschinentechnischen Parameter möglich ist, auch im großtechnischen Maßstab Agglomerate zu erzeugen, deren Eigenschaften sich innerhalb der in dieser Untersuchung gefundenen oder definierten Bereiche befinden. Eine systematische Untersuchung der Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Anlagenparametern und den Eigenschaften der Agglomerate erfolgte nicht.

In den Vorversuchen wurden die maschinentechnischen und verfahrenstechnischen Parameter auf Bereiche eingegrenzt, innerhalb derer ein günstiges Agglomerierverhalten mit den gegebenen Ausgangsstoffen vorliegt. Bei den Hauptversuchen lag der Fokus auf dem Erfassen der Auswirkungen der verschiedenen Rezepturen auf die Eigenschaften der Agglomerate und daraus folgend auf die Eigenschaften des Agglomeratbetons. Die maschinentechnischen und verfahrenstechnischen Parameter wurden dabei innerhalb der in



Abschnitt 4.2.1 genannten Grenzen so variiert, dass sich möglichst hohe Ausbeuten an dem Augenschein nach gleichmäßigem, dicht gepacktem Agglomerat ergaben.

Aus der Vielzahl der in den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 genannten Parameter und deren Einfluss auf das Agglomerierverhalten und die Eigenschaften der Agglomerate (siehe Abschnitte 4.5 und 4.6) folgt die Notwendigkeit der Begrenzung des Umfanges der Untersuchung. Dazu werden die maschinentechnischen und technologischen Freiheitsgrade, die an der Versuchsanlage und Herstellregime variiert werden, eingeschränkt.

Die Hauptversuche erfolgten mit den Maschinenparametern, die in *Tabelle 4.2* als günstiger Bereich genannt werden. Die Oberfläche des Tellerbodens war bis auf die Ausnahme K06 grundsätzlich glatt ohne profilierte Auflage. Der Tellerrand war jeweils bei ca. der Hälfte der Versuche niedrig oder halbhoch eingestellt. Die bei den einzelnen Rezepturen benutzten Parameter sind zusammen mit dem Agglomerierverhalten in *Anlage 21* aufgelistet.

4.2.4 Messgeräte und Verfahren

Die Mehrzahl der baustofflichen Prüfungen erfolgte unter Anwendung der in DIN EN 12620 für die jeweilige Prüfung genannten Normen.

Nachfolgend werden diese normgemäßen Untersuchungsmethoden genannt. Die im Zuge der Arbeit eingesetzten, nicht normierten Messverfahren werden anschließend ausführlicher beschrieben.

Normprüfverfahren:

- Bestimmung der Korngrößenverteilungen der Ausgangssande durch Nass- und Trockensiebung nach DIN EN 933. (Nass: DIN 18123)
- Bestimmung der Rohdichte und Reindichte der Ausgangsstoffe nach dem Prinzip des Thaulow-Topfes gemäß DIN EN 12620 und Prüfverfahren nach DIN EN 13055 für leichte Gesteinskörnungen. Aus praktischen Gründen wurde die Größe des Prüftopfes abweichend vom Normverfahren der Feinheit der Ausgangsstoffe angepasst und ein Gefäß mit 158,0 ml Fassungsvermögen benutzt.
- Bestimmung von Rohdichte und Porengehalt der Festlinge mit Pyknometerverfahren sowie mit Unterwasserwägung gemäß DIN EN 1097-6
- Bestimmung der Schüttdichte der Festlinge mit 10-Liter-Topf gemäß DIN EN 1097-3
- Herstellung der Betonprüfkörper nach DIN EN 12390-2
- Die Prüfung der Würfeldruckfestigkeit erfolgte an einer 3-MN-Würfelpresse von WPM Leipzig nach DIN EN 12390-2 und -3.
- Spalt- und Biegezugfestigkeit nach DIN EN 12390-5 und -6 mit einer 4-Säulen Prüfmaschine 3 MN ermittelt
- Statisches E-Modul wurde nach DIN 1048-5 mit einer 3-Säulen Prüfmaschine 200 kN durchgeführt.



- Kollektive Druckprüfung der Festlinge in Anlehnung an das in DIN EN 13055-1 Anhang A beschriebene Drucktopf-Verfahren für Leichtzuschlag in einer hydraulischen 400 kN Presse mit iLoad-Kraftsensoren
- Bestimmung des Schwindmaßes von Beton in Anlehnung an DIN 52450 mit den in *Anlage 22* abgebildetem Messrahmen

Nicht genormte Prüfverfahren:

Korngrößenverteilungen der Ausgangsstoffe mittels Lasergranulometrie im Korngrößenbereich 0 bis 250 μm im Zusammenhang mit der empirisch-numerischen Berechnung zur maximal erreichbaren Packungsdichte

Verfahren zur Bestimmung der spezifischen, dichtesten Lagerung eines Gemisches nach Puntke und verbessert:

Im Zuge der Versuche zur Ermittlung der spezifischen dichtesten Lagerung eines Gemisches ergab sich der Ansatz zum Bereitstellen von reichlich Verdichtungsenergie in Form von Schwingungen. Dazu wurde das Gefäß mit der Probenmenge mittels einer Halterung in einer Siebmaschine mit regelbarer Schwingungsamplitude eingespannt (Analysesiebmaschine Haver&Boecker EML 200). Die Probe wurde mit soviel Wasser vorbefeuchtet, dass sich ein Wassergehalt (Materialfeuchtigkeit in M%) einstellt, der kurz unterhalb des zu erwartenden Wassersättigungspunktes liegt. Nach sorgfältigem Durchmischen wurde das Probengefäß in die Halterung der Siebmaschine eingespannt. Als Zeit für die Dauer der Verdichtung der Siebmaschine wurden nach einigen Vorversuchen maximal 10 Minuten vorgegeben. Nach dem Einschalten wurden die Schwingungen der Maschine so eingeregelt, dass die Probe ein „intensives Mitschwingen“ aber kein Ablösen von den Wänden des Probenbehälters zeigte. Nach Zugabe eines Tropfens Wasser in die schwingende Probe wurde dieser rasch aufgesogen und verteilte sich dem Augenschein nach in der Probe. Dabei kam es in Teilbereichen bereits zum Bilden von glänzenden Sandklumpen. Durch Verändern der Schwingungsintensität war es nun möglich, diese glänzenden - also wassergesättigten - Bereiche in der übrigen Probenmasse aufgehen zu lassen. Es wurden 2 typische Effekte an den Proben beobachtet, wenn gerade die Wassersättigung erreicht wurde:

- a) Der Glanz als Merkmal der Wassersättigung breitete sich von einem kleinen „Keimbereich“ in Wandnähe über die ganze Probe aus.
- b) Die Probe blieb zunehmend „sitzen“ und immer mehr lose schwingende Klumpen blieben an den unteren Ebenen „kleben“ und gingen darin auf.

Dadurch konnten mit etwas Erfahrung und Geschick des durchführenden Laboranten erdfeuchte Proben zur Wassersättigung gebracht werden, bei denen dies zunächst dem Augenschein nach nicht für möglich gehalten wurde.

Bei Versuchen mit einer anderen Siebmaschine als Schwingungsquelle zeigte sich die Notwendigkeit, durch das Ausprobieren verschiedener Befestigungsarten des Proben-



beckers eine günstige Variante herauszufinden. So ergab sich hier die Befestigung des Bechers, die „ein leichtes Klappern“ in der Halterung erlaubte, als die effektivste Variante.

Weitere Maschinen und Geräte:

Das Mischen der halbtrockenen oder feuchten Vormischung erfolgte sehr intensiv mit einer Handbohrmaschine mit Mörtelquirl bei 1000U/min.

Das trockene Vormischen erfolgte zum Minimieren von Staubentwicklung von Hand mit einer kleinen Rechteckelle.

Die im Zuge der Versuche verwendeten Waagen waren:

- Mechanische Plattenwaage 50 kg / 20 g der ADE Schnellwaagenfabrik Hamburg
- Elektronische Waage Kern EW 4200-2NM
- Elektronische Waage Kern DS 10K0,1S

Die Messbrücken zur Ermittlung des Schwindverhaltens sind für den Messbereich bis 360 mm mit Feinmessuhren für 1/1000 mm und für Messlängen bis zu 650 mm mit 1/100 mm-Feinmessuhren bestückt und in *Anlage 22* abgebildet.

Druckprüfgerät für Frischlinge und Festlinge mit Kraft- und Wegaufnehmer:

Zum Beschreiben der Eigenschaften sowohl der Frischlinge als auch der Festlinge werden die Kraft- und Wegdaten der Agglomerate bei einachsiger Druckbelastung ermittelt. Dafür wird ein mechanisch betriebener Druckstempel (siehe *Abbildung 4.9*) genutzt, bei dem Kraft und Weg durch Sensoren erfasst und als Datei abgespeichert wurden. Um die verschiedenen Messbereiche abzudecken, wurden die folgenden Sensoren verwendet:

Kraftsensoren von Firma Loadstar SENSORS:

- iLoad TR Digital, 2 lb / 10 N, TUF-002-100-A*C01
- iLoad TR Digital, 10 lb / 40 N, TUF-010-025-A*C01
- iLoad Pro Digital, 100 lb / 100 N, PUF-100-015-S*C02
- iLoad Pro Digital, 2.500 lb / 10 kN, PUF-2HK-025-S*C01
- iLoad Pro Digital, 10.000 lb / 40 kN, PUF-10K-050-S*C01

Wegsensoren der Firma Burster:

- Typ: 8712-10, Seriennummer: 10020229 mit USB-Sensor Interface Typ 9205
- Typ: 8712-25, Seriennummer: 87094902112 mit USB-Sensor Interface Typ 9205



Abbildung 4.9: Druckprüfgerät für Frischlinge und Festlinge

Quelle: Eigene

Eine detaillierte Beschreibung der Wirkungsweise der Messeinrichtung und der Bearbeitung der Messwerte erfolgt in *Abschnitt 4.5.4, Seite 99*.

Für Versuchsreihen an Naturkieseln und einigen besonders großen Agglomeratkörnern kam die oben beschriebene hydraulische 400 kN-Pressen mit der 10 kN Kraftmessdose zum Einsatz.

Größenermittlung der Agglomerate

Die Bestimmung der Abmessungen der Agglomerate - sowohl der Frischlinge als auch der Festlinge - erfolgte aus den im Zuge der Druckprüfung der Einzelkörner gewonnenen Daten. Die daraus ermittelten Werte wurden an einigen Serien von Probekörpern mit den Ergebnissen einer Vermessung der Einzelpartikel von Hand in einer Winkelschablone (siehe *Abbildung 4.30, Seite 86*) verglichen. Detaillierte Werte siehe (*Anlage 23, Blatt 1* „Gegenüberstellung von Einzelvermessung und Druckprüfung für K04tr“)

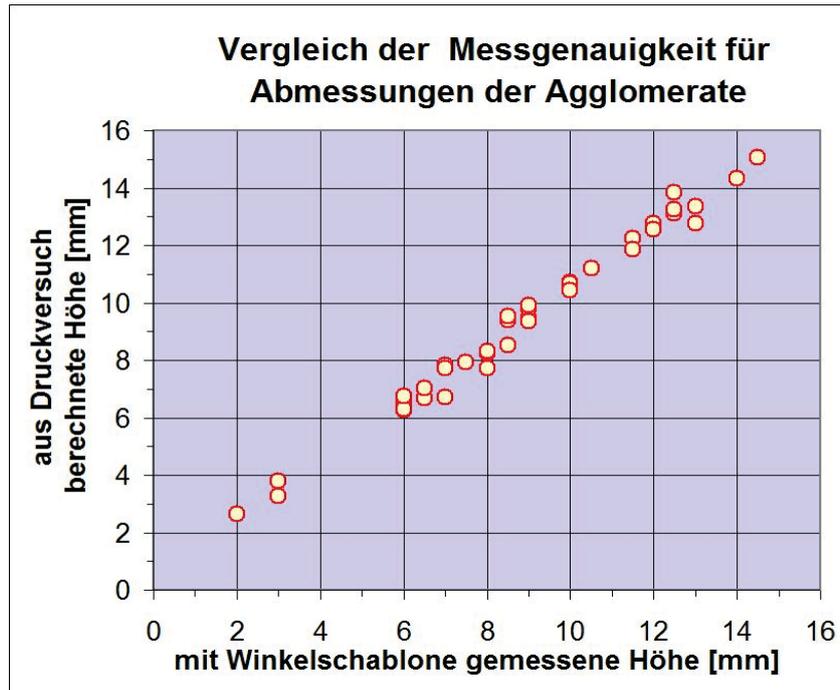


Abbildung 4.10: Vergleich der Genauigkeit der Ermittlung der Höhen von Festlingen K04tr 3d bei Einzelkorndruckprüfung mit der Vermessung von Hand

Quelle: Eigene

Aus der Abbildung geht hervor, dass die Größenbestimmung der Agglomerate aus den Messdaten der Druckprüfung der Einzelkörner mit ausreichender Genauigkeit mit den händisch in der Winkelschablone ermittelten Abmessungen übereinstimmt.

4.3 Rezepturen

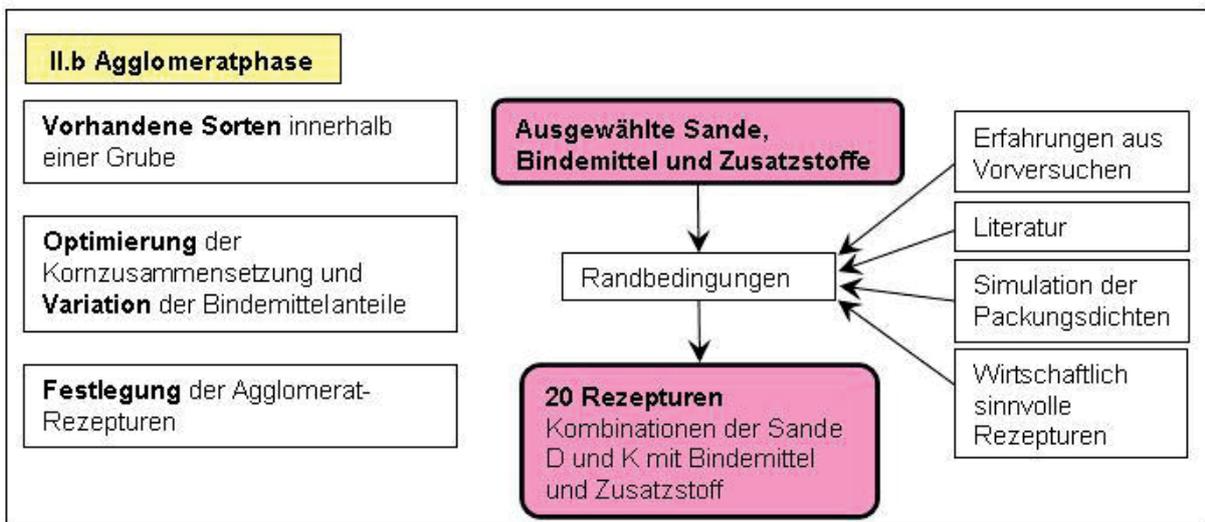


Abbildung 4.11: Übersicht zur Festlegung der Agglomeratrezepturen

Quelle: Eigene



4.3.1 Überlegungen zur Festlegung der Rezepturen

Bei Überlegungen zur Festlegung der Rezepturen für die Berechnungen und Versuche wurden die folgenden Randbedingungen zusammengetragen:

- Möglichst hoher Anteil der Verwertung der feinen Sande D2 und K2, da diese Überschusssande ansonsten nur untergeordneten Verwendungen zugeführt werden
- Möglichst geringer Anteil an Zement als dem kostentreibenden Bestandteil der Agglomerate aus wirtschaftlicher Notwendigkeit
- Einsatz einer Mindestmenge Zement, um die erforderliche Festigkeit und Dauerhaftigkeit der Agglomerate zu erreichen
- Einsatz von ungewaschenen Ausgangssanden sowohl aus wirtschaftlichen Überlegungen als auch als Beitrag für den beim Agglomeriervorgang erforderlichen Feinstkorngelalt
- Einsatz von feinem Zusatzstoff, um den Feinstkorngelalt der Mischung auf ein für einen guten Zusammenhalt der frischen Agglomerate erforderliches Niveau zu bringen
- Teilweiser Ersatz des Bindemittels Zement durch festigkeitsbildende Zusatzstoffe
- Verwendung des in den Gruben D und K vorkommenden Mittelsandes, um mit dessen Anteil die Korngrößenverteilung der Agglomeratrezeptur zu optimieren
- Gleichzeitig aber Begrenzung des Anteils des Mittelsand in den Agglomeraten, da dieser auch in anderen Anwendungen sinnvoll eingesetzt werden kann

Erkenntnisse aus Vorarbeiten an der Hochschule Wismar

Bei den Untersuchungen in Wismar [Holle (2007) und Holle (2008)] wurde die grundsätzliche Machbarkeit der Herstellung von Sand-Zement-Agglomeraten im Granulierteller und deren Verwendung als grobe Gesteinskörnung für Beton gezeigt. Dabei beträgt in der Machbarkeitsstudie [Holle (2007)] der Zementgehalt der verwendeten Rezepturen 25 bis 50 %_{TM} der Trockenmasse der Agglomerate. Bei den Versuchen [Holle (2008)] wurden Rezepturen mit verschiedenen Bindemitteln und deren Kombinationen untersucht. Dies umfasste Rezepturen mit Zementgehalten von 10 bis 33 M%.

Im Zuge einer Abschätzung der Wirtschaftlichkeit in Vorbereitung dieser Arbeit (siehe Anlage 12) wurde eine Rezeptur mit Massenanteilen von Zement und Steinkohlenflugasche von je 5 M% als wirtschaftlich ermittelt. Daher sollen im Rahmen dieser Arbeit auch Agglomeratrezepturen mit nur 5 Massen-% Zementgehalt untersucht werden.

Für den Agglomerierprozess ist eine etwa erdfeuchte Konsistenz des Gemisches im Granulierteller erforderlich. Die Wasserzugabe soll zum Teil während des Vormischens



erfolgen. Der Rest des Zugabewassers soll während des Agglomerierprozesses eingesprüht werden, um dadurch die Agglomeratbildung zu steuern.

Anforderungen aus Expositionsklassen

Aus den folgenden Annahmen zur Verwendung des Agglomeratbetons ergeben sich anhand der Expositionsklassen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 Mindestanforderungen an die Zusammensetzung des Betons:

Expositionsklasse	Beanspruchung	Mindestforderung der Betonzusammensetzung
XC4 (Korrosion durch Karbonatisierung)	Wechselnd nass und trocken (Außenbauteile mit direkter Beregnung)	max. w/z=0,6; C25/30; CEM-Gehalt 280/270 kg/m ³
XD1 (Korrosion durch Chloride ausgenommen Meerwasser)	Mäßige Feuchte (Bauteile im Sprühnebelbereich von Verkehrsflächen, Einzelgaragen)	max. w/z=0,55; C30/37; CEM-Gehalt 300/270 kg/m ³
XS1 ((Korrosion durch Chloride aus Meerwasser)	Salzhaltige Luft, aber kein Kontakt mit Meerwasser (Außenbauteile in Küstennähe)	max. w/z=0,55; C30/37; CEM-Gehalt 300/270 kg/m ³
XF2 (Frostangriff ohne Taumittel)	Mäßige Wassersättigung, mit Taumittel (Bauteile im Sprühnebel- oder Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen, Betonbauteile im Sprühnebelbereich von Meerwasser)	max. w/z=0,55; C25/30; LP-Gehalt; CEM-Gehalt 300 kg/m ³ , Prüfung der Gesteinskörnung mit Magnesiumsulfatverfahren auf MS ₂₅
XF3 (Frostangriff mit Taumittel)	hohe Wassersättigung, ohne Taumittel (offene Wasserbehälter, Bauteile in der Wasserwechselzone von Süßwasser)	max. w/z=0,55; C25/30; CEM-Gehalt 300/270 kg/m ³ , Gesteinskörnung gemäß F ₂
XA1 (Chemischer Angriff)	Chemisch schwach angreifende Umgebung, (z.B. Behälter von Kläranlagen und Güllebehälter)	max. w/z=0,6; C25/30; CEM-Gehalt 280/270 kg/m ³
XM1 (Verschleißbeanspruchung)	Mäßige Verschleißbeanspruchung (Industrieböden mit Beanspruchung durch luftbereifte Fahrzeuge)	max. w/z=0,55; C30/37; CEM-Gehalt 300/270 kg/m ³

Tabelle 4.3: Mindestanforderungen an die Zusammensetzung von Beton gemäß Expositionsklassen für die für Agglomeratbeton vorgesehenen Verwendungen; Die Angabe der geforderten Mindestzementgehalte erfolgte ohne/mit Anrechnung von Zusatzstoffen. (ohne/mit; z.B. 300/270)

Quelle: Auszüge aus DIN EN 206-1



Aus der Forderung dieser Mindestkriterien in den DIN EN 206-1 und DIN 1045-2, damit der Beton dem Einsatz unter den gewählten Expositionsklassen genügt, lässt sich die Folgerung ziehen, dass auch die Agglomerate bei Einhaltung dieser Kriterien den Beanspruchungen dieser Expositionsklassen widerstehen. Diese Annahme erfolgt unter der Einordnung der Sand-Zement-Agglomerate als *Feinkornbeton* und dient als ein weiteres Kriterium zur Eingrenzung der möglichen Agglomeratrezepturen. Daraus ergibt sich ein maximaler w/z-Wert von 0,55 und ein Mindestzementgehalt von 300 kg/m³ ohne und von 270 kg/m³ mit Anrechnung von Zusatzstoffen. (siehe *Tabelle 4.3*)

Weil sich bei den untersuchten Agglomeratrezepturen w/z-Werte zwischen 0,4 und 2,9 ergaben und damit die in DIN EN 206-1 genannten Randbedingungen für FT-beständigen Beton deutlich überschritten werden, erfolgt im Zuge der Untersuchungen der Festlinge und des Agglomeratbetons ihre Prüfung auf Beständigkeit gegen Frost-Tau-Wechselbeanspruchung.

Wassergehalt und w/z-Wert

Bei der Herstellung der Sand-Zement-Agglomerate im Granulierteller ist, abhängig von der zu benetzenden Oberfläche der jeweiligen Rezeptur, ein Mindestwassergehalt erforderlich, um den Granulierteller aufrecht zu erhalten. Diese Mindestwassermenge betrug in den Vorversuchen (VV1 bis VV22) 6 bis 27 M% und brachte die Rezeptur auf etwa erdfeuchte Konsistenz.

Aus einer überschläglichen Stoffraumrechnung unter der Annahme eines Gemisches nur aus Sand, Zement und Wasser ohne Haufwerks- oder Luftporen ergeben sich unter Einhaltung eines w/z-Wertes von 0,55 mit in den Vorversuchen ermittelten Wassergehalten die folgenden erforderlichen theoretischen Zementgehalte für Agglomeratrezepturen:

Wassergehalte aus Vorversuchen in M%	Erforderlicher Zementgehalt
Minimal (bei VV10): 6 %	264 kg / m ³
Häufiger Wert (z.B. bei VV5): 11 %	455 kg / m ³
Maximal (bei VV2): 27 %	937 kg / m ³

Tabelle 4.4: Theoretisch erforderliche Zementmengen bei einem w/z-Wert = 0,55; bestimmt aus den Mengen des Zugabewassers bei verschiedenen Rezepturen aus den Vorversuchen

Quelle: Eigene

Ein bei den eigenen Vorversuchen (VV) häufig erreichter Wassergehalt liegt für die in Frage kommenden Rezepturen zwischen 10 und 15 %TM der Trockenmasse. Damit ergibt sich für eine Rezeptur mit nur 5 % Zement und 10 % Wasser ein w/z-Wert von 2,0. Dieser liegt weit über den in der Betontechnologie üblichen w/z-Werten. Für so hohe w/z-Werte werden nachteilige Eigenschaften wie geringe Festigkeiten und ein verringerter Frost-Tau-Widerstand erwartet.



Diese Überlegungen widerlegen eine der Eingangsthesen in *Kapitel 1.2*, weil die Agglomerate eben nicht grundsätzlich geringe w/z-Werte haben. Um einen w/z-Wert zu erreichen, bei dem ein Beton gemäß Norm als frostbeständig angesehen wird, muss eine Mindestmenge Zement (300 kg/m^3) enthalten sein. Bei der Herstellung von Agglomeraten funktioniert die starke Verringerung der Zementmenge bei Einhaltung des w/z-Wertes nicht, weil sonst der Wassergehalt geringer werden müsste als die Mindestmenge, die der Agglomerierprozess - auch bei Einsatz von Fließmitteln - erfordert. Ein höherer Zementgehalt macht die Rezeptur durch den Zementpreis aber wieder unwirtschaftlich.

Bei diesen Untersuchungen wurden sowohl Rezepturen mit hohem w/z-Wert (größer 1,0) als auch Rezepturen mit möglichst geringem w/z-Wert (0,4) - auch bei eventuell hohen und offensichtlich unwirtschaftlichen Zementgehalten - hergestellt und untersucht.

Eingrenzen der Rezepturen

Ausgehend von den oben beschriebenen Überlegungen wurden die Ober- und Untergrenzen der Anteile der groben und feinen Sande sowie von Zement und Flugasche für die ersten Durchläufe der empirisch-numerischen Berechnung zur erreichbaren Packungsdichte, wie in der folgenden *Tabelle 4.5* zusammengefasst, festgelegt: (Angaben in M%)

Anteile:	Grober Sand (D1 oder K1)	Feiner Sand (D2 oder K2)	CEM I 42,5	SFA
Min.-Wert	40	20	10	0
Max.-Wert	70	50	40	30

Tabelle 4.5: Grenzwerte der ersten Berechnungsläufe der empirisch-numerische Berechnung zur erreichbaren Packungsdichte

Quelle: Eigene

4.3.2 Dreistoffdiagramm zur Rezepturdarstellung, Aufteilung in Feinstkorn, Feinkorn und Mittelkorn

Im Rahmen dieser Arbeit liegt ein Schwerpunkt auf dem Vergleich verschiedener Rezepturen und der Betrachtung ihres Einflusses auf eine Ergebnisgröße. Dazu ist es hilfreich, Agglomerat-Rezepturen mit einem einfachen Kriterium oder einer übersichtlichen Darstellung klar voneinander zu unterscheiden und der jeweiligen Ergebnisgröße zuzuordnen. Die Angabe der Mischungsverhältnisse als Kurzform wie die Verhältnismengen in *Tabelle 4.5* oder die Darstellung als Linie der Korngrößenverteilung wie *Abbildung 4.14* erscheint dafür noch zu unübersichtlich.

Eine in der Betontechnologie etablierte Möglichkeit, verschiedene Rezepturen mit einem einfachen Wert hinsichtlich ihres Beitrages zur Festigkeitsbildung zu beschreiben, ist der F-Wert. Der Ansatz ist hierbei, dass Korngrößenverteilungen der Zuschläge, für die der gleiche F-Wert ausgewiesen wird, auch den gleichen Beitrag zur Festigkeitsbildung des Betons



leisten. Dies gilt, wenn alle anderen festigkeitsbildenden Parameter, wie zum Beispiel Zementgehalt, w/z-Wert und LP-Gehalt, konstant bleiben. Im Zuge der Auswertung der mit den untersuchten Rezepturen erreichten Packungsdichten und der Eigenschaften der Festlinge wird die Aussagefähigkeit des F-Wertes zur Beschreibung der Rezepturen geprüft.

Durch das Zusammenfassen der Korngrößenverteilung auf nur einen Wert erscheint der F-Wert als zu starke Vereinfachung. Stattdessen wird ein Dreistoffdiagramm wie in *Abbildung 4.12* als aussagekräftiger angesehen. Darin wird die Rezeptur eines Gemisches aus drei verschiedenen Anteilen durch die Position eines Punktes auf einer dreieckigen Grundfläche eindeutig beschrieben. Es liefert anhand der Lage des Rezepturpunktes im Dreieck eine grobe Aussage über die Korngrößenverteilung der jeweiligen Rezeptur. Trotzdem hierbei drei Anteile beteiligt sind, bestehen für die Rezepturen lediglich zwei Freiheitsgrade, da sich die Menge des dritten Anteils als die Differenz zwischen der Summe der ersten beiden Anteile und 100 % ergibt. Deshalb lässt sich die jeweilige Rezeptur einem Punkt der zweidimensionalen Grundfläche zuordnen und ermöglicht die Darstellung der abhängigen Variablen in der dritten Dimension oder z.B. als graphisches Merkmal des Rezepturpunktes.

Die Spitzen des Dreieckdiagramms stellen jeweils eine Rezeptur dar, die zu 100 % aus dem der jeweiligen Spitze zugeordneten Anteil besteht. Für Rezepturen, die nur aus zwei Anteilen bestehen, befindet sich der zugehörige Punkt auf der Randlinie des Dreiecks, welche die Eckpunkte der beiden zugehörigen Stoffe verbindet.

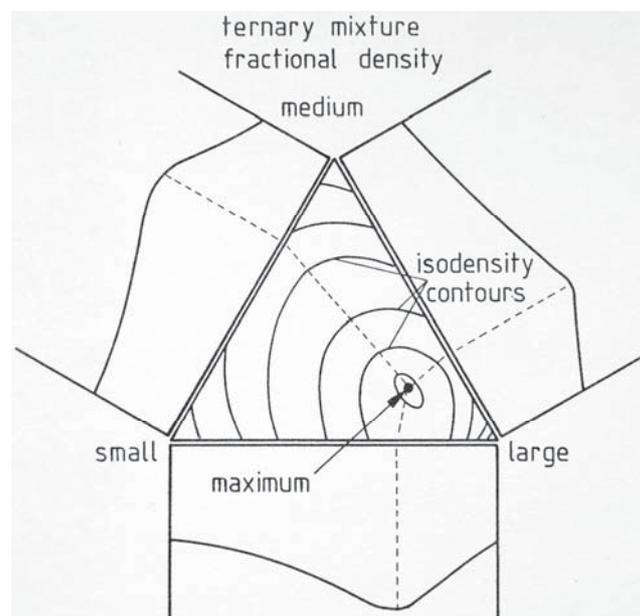


Abbildung 4.12: Darstellung von Gemischen im Dreistoffdiagramm; Hier besteht das Gemisch aus Partikeln mit kleinem, mittlerem und großem Korndurchmesser.

Quelle: [German (1989), S. 184]



Die Rezepturanteile eines Stoffes verhalten sich dabei umgekehrt proportional wie die Entfernung zu seiner Spitze. So lässt sich aus *Abbildung 4.12* ablesen, dass sich in jedem Zweistoffgemisch die höchste Packungsdichte bei einem hohen Anteil von ca. 70% der groben Körnung ergibt.

Ausgehend von den Korngrößenverteilungen der Ausgangsstoffe dieser Untersuchungen war es notwendig, diese Ausgangsstoffe in drei Größenklassen zu unterteilen, um die Korngrößenverteilungen der Rezepturen im Dreistoffdiagramm darzustellen. Die Wahl der Grenzen für diese Unterteilung wird in diesem Kapitel erläutert und begründet. Dazu ist es notwendig, noch einmal Bezug auf Erkenntnisse aus Untersuchungen zur Packungsdichte zu nehmen.

Nach den Angaben in *Tabelle 4.6* wurde in früheren Untersuchungen für eine trimodale Kugelpackung mit einem Größenverhältnis von 1:7:49 eine maximale Packungsdichte von 0,95 erreicht.

An einer Berechnung von Furnas wird gemäß *Abbildung 4.13* gezeigt, dass zweimodale Einkorn-Gemische mit Korngrößenverhältnissen von kleiner als 100 höhere Packungsdichten ergeben als dreimodale Gemische. Erst bei einem Verhältnis von Größtkorn zu Kleinstkorn von größer als 100 werden für ternäre Gemische höhere Packungsdichten erwartet als für binäre Gemische.

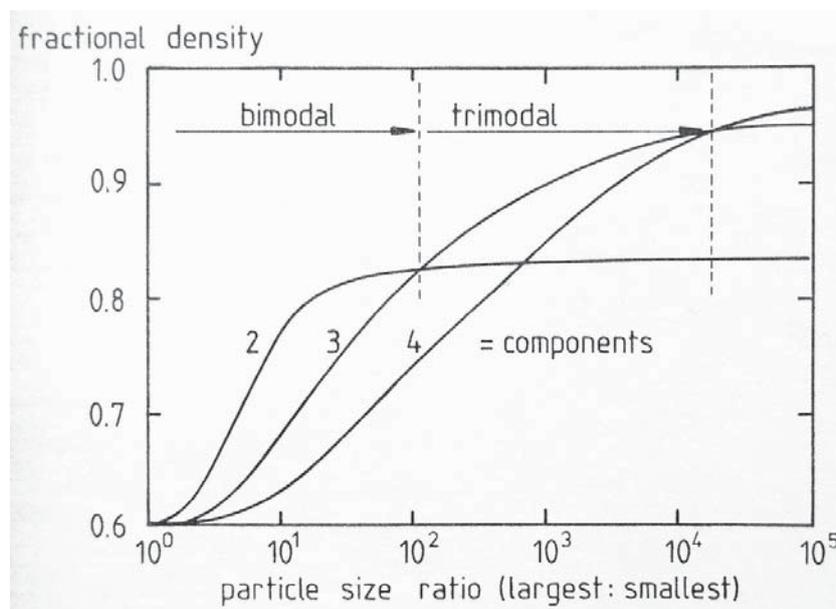


Abbildung 4.13: Darstellung der Abhängigkeit der erreichbaren Packungsdichte von den Partikelgrößen bei 2- und 3-modalen Gemischen

Quelle: [German (1989), S. 185]

Bei den in dieser Untersuchung als Ausgangsstoffe verwendeten Sanden sowie dem Zement und der Flugasche handelt es sich jedoch nicht um Einkornfraktionen mit sehr enger Korngrößenverteilung. Stattdessen zeigen sie ihrerseits kontinuierliche Korngrößenverteilungen.



gen mit sehr unterschiedlichen Verteilungsbreiten. Die Verteilungsparameter der Ausgangsstoffe sind in *Tabelle 4.9, S. 64* aufgeführt.

Größenverhältnis der Kornklassen	Prozentuale Anteile der jeweiligen Größenklassen in M%			Erreichte Packungsdichte
	klein	mittel	groß	
1:5:25	21,6	9,2	69,2	0,850
1:7:49	13,2	20,7	66,1	0,878
1:7:49	11,0	14,0	75,0	0,950
1:7:77	10,0	23,0	67,0	0,900
1:10:100	11,2	22,5	66,3	0,892
1:100:10000	10,0	23,4	66,6	0,916

Tabelle 4.6: Abhängigkeit der erreichbaren Packungsdichte vom Verhältnis der Partikelgrößen bei optimierten 3-modalen Gemischen

Quelle: [German (1989)]

Die in der Betontechnologie üblichen Sieblochgrößen und damit Klassengrenzen der Kornklassen sind (siehe auch DIN EN 12620):

0,063 – 0,125 – 0,25 – 0,5 – 1,0 – 2,0 – 4,0 – 8,0 – 16 – 31,5 – 63 mm

Aufgrund der eher breiten Korngrößenverteilungen der Sande für diese Versuche wird die Unterteilung in Kornklassen mit einem Größenverhältnis von 1:7:49 gemäß *Tabelle 4.6* als nicht zweckmäßig angesehen. Stattdessen werden als Klassengrenzen für die Darstellung der Rezepturen im Dreistoffdiagramm 22 µm und 257 µm gewählt. Daraus ergeben sich die folgenden drei Kornklassen:

0 / 22 µm = Feinstkorn

22 / 257 µm = Feinkorn

257 / 2000 µm = Mittelkorn

$$d_{m,Mittelkorn} = \frac{D_{Mittelkorn} + d_{Mittelkorn}}{2} = \frac{2000 + 257}{2} = 1128,5 \mu\text{m} \quad (4.1)$$

$$d_{m,Feinstkorn} = \frac{D_{Feinstkorn} + d_{Feinstkorn}}{2} = \frac{0 + 22}{2} = 11 \mu\text{m} \quad (4.2)$$

$$\frac{d_{m,Mittelkorn}}{d_{m,Feinstkorn}} = \frac{1128,5}{11} = 102,6 > 100 \quad (4.3)$$



Bei Betrachtung der Mittelwerte der gewählten Korngrößenklassen beträgt das Verhältnis zwischen der Kleinstkornklasse und der Größtkornklasse etwa 1:100. Die Festlegung auf diese Grenzen zwischen den Kornklassen der Ausgangsstoffe wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit beibehalten.

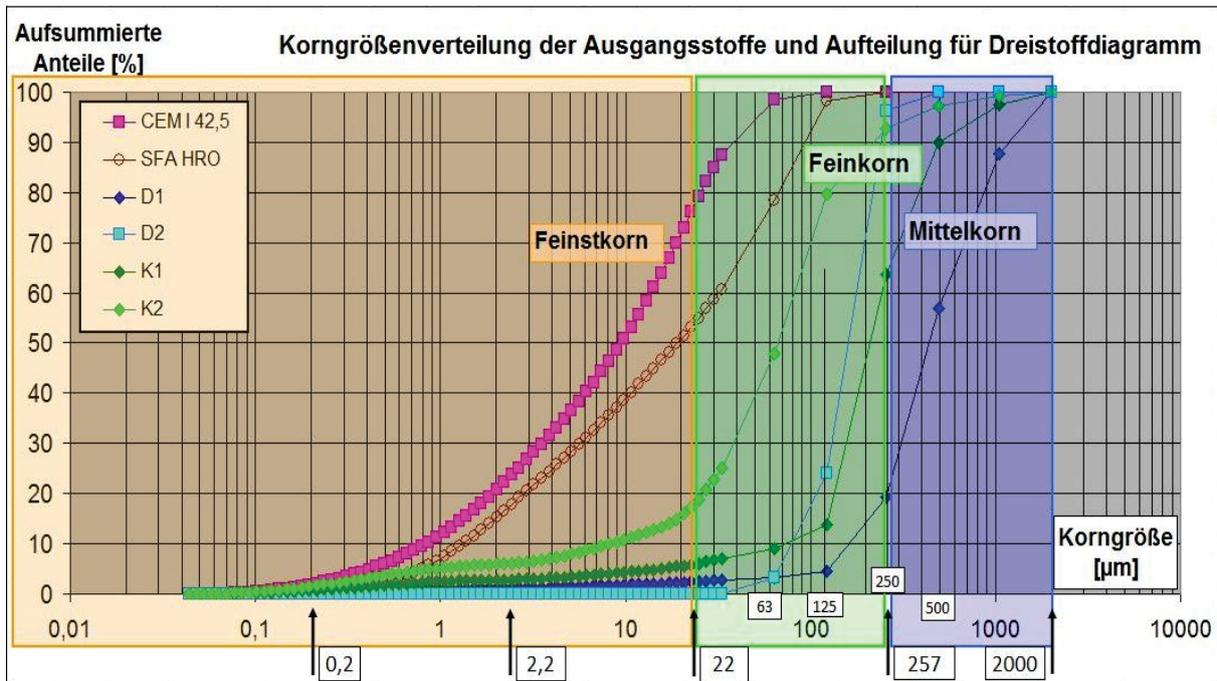


Abbildung 4.14: Festlegung der Klassengrenzen für Darstellung im Dreistoffdiagramm

Quelle: eigene

In *Abbildung 4.14* sind die Korngrößenverteilungen der Ausgangsstoffe dieser Untersuchung dargestellt, wie sie sich aus der Überlagerung der Siebanalyse und der Lasergranulometrie ergeben haben. Zusätzlich sind die Korngrößenbereiche, die durch die Unterteilung in Feinst-, Fein- und Mittelkorn entstehen, farbige unterlegt. Bei der Festlegung der Bereiche wurde auch das Definieren der Grenze zwischen Feinst- und Feinkorn bei der noch kleineren Grenzkorngröße z.B. 2 µm erwogen. Beim Umgang mit Feinststoffen ab der Größenordnung von ca. 1 µm sind jedoch Effekte, wie z.B. das nicht vollständige Dispergieren und die Bildung von Flocken, zu erwarten. Durch die Trennung von Feinst- und Feinkorn bei 22 µm soll sichergestellt werden, dass solche Effekte im Wesentlichen auf die Klasse des Feinstkorns 0 - 22 µm beschränkt werden.

Aus dieser Festlegung ergeben sich für die Ausgangsstoffe die Anteile an Feinst-, Fein- und Mittelkorn wie auch in *Tabelle 4.7* genannt und die folgenden Positionen im Dreistoffdiagramm gemäß *Abbildung 4.15*:

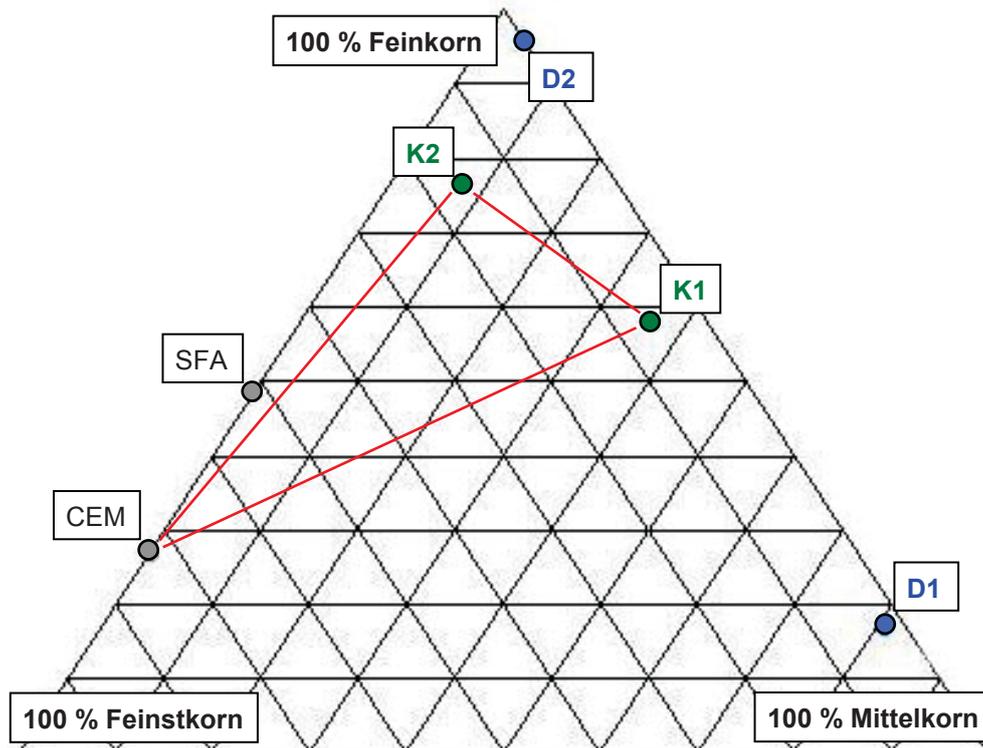


Abbildung 4.15: Positionen der Ausgangsstoffe im Dreistoffdiagramm

Quelle: Eigene

An der Position der Ausgangsstoffe im Dreistoffdiagramm wird deutlich, dass bei den hier gewählten Grenzen für die Darstellung der Kornzusammensetzung die Ausgangsstoffe Zement, Sand D2 und Sand D1 recht genau die Kornklassen Feinstkorn, Feinkorn und Mittelkorn abbilden. Daraus folgt, dass sich mit Gemischen aus diesen drei Ausgangsstoffen fast alle Punkte innerhalb des Dreistoffdiagramms erreichen lassen. Demgegenüber kann ein Gemisch der Sande K1 und K2 nur Punkte der Verbindungslinie zwischen den Rezepturpunkten von K1 und K2 erreichen. Die Rezepturpunkte eines Gemisches aus K1, K2 und Zement können nur innerhalb des beispielhaft eingezeichneten, roten Dreiecks der Rezepturpunkte der drei Ausgangsstoffe liegen.

Allerdings wird es im Rahmen dieser Untersuchung als nicht sinnvoll angesehen, systematisch Rezepturen herzustellen, deren Positionspunkte sich gleichmäßig über die Fläche des Dreistoffdiagramms verteilen. Stattdessen werden die Randbedingungen aus den wirtschaftlichen Vorüberlegungen, der empirisch-numerischen Berechnung an der Universität Kassel (*Abschnitt 4.4.1, S. 63*) sowie aus den Punkte-Versuchen (*Abschnitt 4.4.2, S. 68*) und die Erfahrungen aus dem Agglomerierverhalten während der Vorversuche (Rezepturen VV) berücksichtigt.



4.3.3 Festlegung und Darstellung der Korngrößenverteilung der Agglomerat-Rezepturen

Die Änderungen in der Korngrößenverteilung, die sich durch den Wasserkontakt des Zementes und damit seinen Reaktionsbeginn und Effekte von Lösung, Dispersion und Flockung ergeben, werden hier vernachlässigt.

Die Vorversuche dienten zum Einstellen und Testen der Maschinenparameter, der Erprobung der Geräte und Abläufe des Versuchsstandes und dem allgemeinen Testen des Agglomerierverhaltens der Ausgangsstoffe. Die Punkte der Rezepturen dieser Vorversuche sind zusammen mit den Punkten der Fullerlinien in *Abbildung 4.16* in einem Dreistoffdiagramm dargestellt.

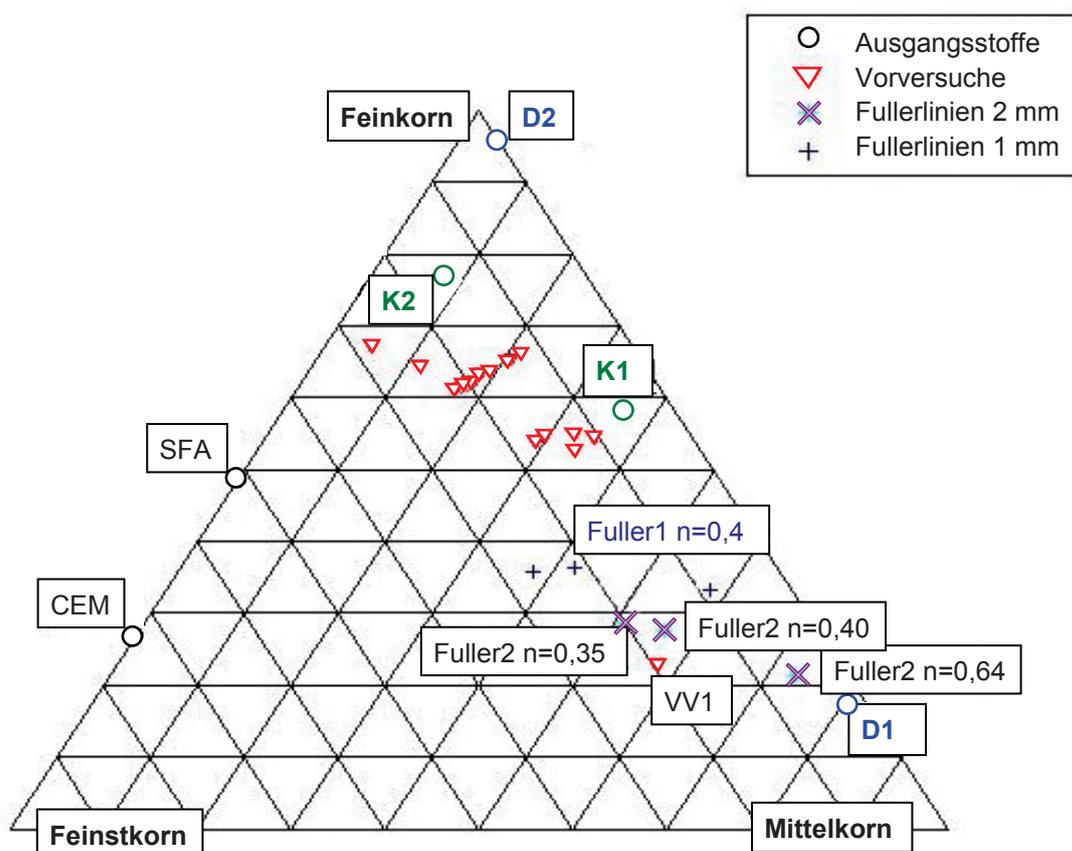


Abbildung 4.16: Darstellung der Rezepturen der Vorversuche (VV), der Ausgangsstoffe und der Fuller-Linien für 1 mm und 2 mm Größtkorn

Quelle: Eigene

Dabei wird anschaulich, dass die Fuller-Linien als Ideallinien einen sehr hohen Anteil an dem Größtkorn des betrachteten Korngemisches vorgeben. Von den Ausgangsstoffen ist lediglich Sand D1 noch gröber als die Fullerlinien für Kugeln ($n = 0,64$). Demgegenüber enthält der Sand K1 mehr Feinkorn als Mittelkorn und sein Rezepturpunkt liegt im Dreistoffdiagramm weit entfernt von dem der Fuller-Linien für ein Größtkorn von 2 mm. Die Rezepturpunkte von Gemischen aus mehreren Stoffen liegen im Dreistoffdiagramm immer innerhalb der



Umhüllenden der Rezepturpunkte der Ausgangsstoffe. Damit wird klar, dass Kombinationen von K1 mit K2 und CEM und SFA nicht in den Bereich der Idealverteilung nach Fuller kommen, während dies für Gemische mit hohem Anteil von Sand D1 wie z.B. VV1 möglich wird.

In *Abbildung 4.16* sind außerdem die Rezepturpunkte der Fuller-Linien mit einem Größtkorn von 1 mm für $n = (0,64; 0,4; 0,35)$ dargestellt. Auch bei Annahme dieses kleineren Größtkorndurchmessers können die Rezepturpunkte dieser Ideallinien der Korngrößenverteilung von Gemischen der Sande K nicht erreicht werden.

In der folgenden *Tabelle 4.7* sind die Rezepturen der Vorversuche und die sich daraus ergebenden Anteile für Feinst-, Fein- und Mittelkorn aufgeführt.

	Feinstkorn s	Feinkorn f	Mittelkorn m(s,f) = 100-s-f	Rezeptur: Sand1:Sand2:CEM:SFA (grob) (fein)
	(0 - 22 μm)	(22 - 257 μm)	(257 - 2000 μm]	
D1	2,33	17,05	80,62	D: 100 : 0 : 0 : 0
D2	0,00	96,16	3,84	D: 0 : 100 : 0 : 0
K1	5,63	58,12	36,26	K: 100 : 0 : 0 : 0
K2	15,95	76,70	7,35	K: 0 : 100 : 0 : 0
SFA	51,49	48,51	0,00	0 : 0 : 0 : 100
CEM	73,04	26,96	0,00	0 : 0 : 100 : 0
VV1	19,45	22,96	57,58	D: 71 : 0 : 14 : 14
VV2	10,45	54,36	35,19	D: 42 : 42 : 4 : 13
VV3	13,75	65,48	20,77	K: 48 : 48 : 5 : 0
VV4-1	27,79	67,30	4,90	K: 0 : 67 : 0 : 33
VV4-2	14,50	65,19	20,31	K: 47 : 43 : 0 : 10
VV4-3	17,99	63,62	18,40	K: 43 : 39 : 0 : 18
VV4-4	21,08	61,47	17,44	K: 40 : 40 : 10 : 10
VV5	13,39	52,83	33,78	D: 40 : 40 : 10 : 10
VV6-5	19,37	62,46	18,17	K: 42 : 42 : 8 : 8
VV6-6	22,01	61,32	16,68	K: 38 : 38 : 8 : 16
VV10	23,92	64,76	11,32	K: 18 : 65 : 17 : 0
VV21	12,37	55,00	32,63	Restsand: 90 : 10 : 0
VV22a	15,92	54,41	29,67	Restsand: 82 : 9 : 9
VV22bc	16,95	54,04	29,01	Restsand: 80 : 10 : 10

Tabelle 4.7: Feinst-, Fein- und Mittelkornanteile der Ausgangsstoffe und der Rezepturen der Vorversuche

Quelle: Eigene



Aus den oben (*Abschnitt 4.3.1*) dargestellten Überlegungen und den ersten Ergebnissen der empirisch-numerischen Berechnung an der Uni Kassel (*Abschnitt 4.4.1, S. 63*) wurden die folgenden Rezepturen als die im Zuge der Hauptversuche herzustellen festgelegt:

Name	Anteile in Massenprozent				Name	Anteile in Massenprozent			
	D1	D2	CEM	SFA		K1	K2	CEM	SFA
D01	30	50	10	10	K01	30	50	10	10
D02	50	30	10	10	K02	50	30	10	10
D03	60	-	20	20	K03	50	20	10	20
D04	-	60	20	20	K04	40	40	10	10
D05	40	40	10	10	K05	35	35	10	20
D06	90	-	10	-	K06	80	-	10	10
D07	-	90	5	5	K07	60	-	20	20
D08	40	50	10	-	K08	60	-	10	30
D09	90	-	5	5	K09	-	60	10	30
D10	-	50	20	30	K10	90	-	5	5
D11	70	-	20	10	K11	-	90	5	5
					K12	-	50	20	30

Tabelle 4.8: Rezepturen der Hauptversuche (K8, K9 und K10 wurden nicht hergestellt.)

Quelle: Eigene

Die Zahlenwerte der Anteile an Feinst-, Fein- und Mittelkorn der Rezepturen D und K sind in *Anlage 13* als Tabelle aufgeführt. Deutlicher wird das Wertefeld dieser Rezepturen, wenn ihre Lage im Dreistoffdiagramm wie in *Abbildung 4.17* dargestellt wird.

Die Festlegung der Rezepturen erfolgte zunächst in dem Bestreben, systematisch wechselnde Anteile der Ausgangsstoffe zu erfassen. Dabei ergab es sich durch die in *Tabelle 4.5* genannte Beschränkung der zu untersuchenden Rezepturen, dass nicht der gesamte Bereich des Dreistoffdiagramms durch die Rezepturpunkte abgedeckt wird. Deutlicher wird dies bei den Rezepturen K, die sich nur in einem kleinen Teil des Dreistoffdiagramms verteilen können.

Der Bereich, in dem die Rezepturen der Hauptversuche im Dreistoffdiagramm liegen (*Abbildung 4.17*) stimmt mit dem Bereich des Dreistoffdiagramms, in dem die Rezepturpunkte der Vorversuche (*Abbildung 4.16*) liegen, weitgehend überein. Daher werden die im Zuge der Vorversuche gewonnen Erkenntnisse und die Eingrenzung der Betriebsparameter des Granuliertellers als auch für die Hauptversuche gültig angesehen.

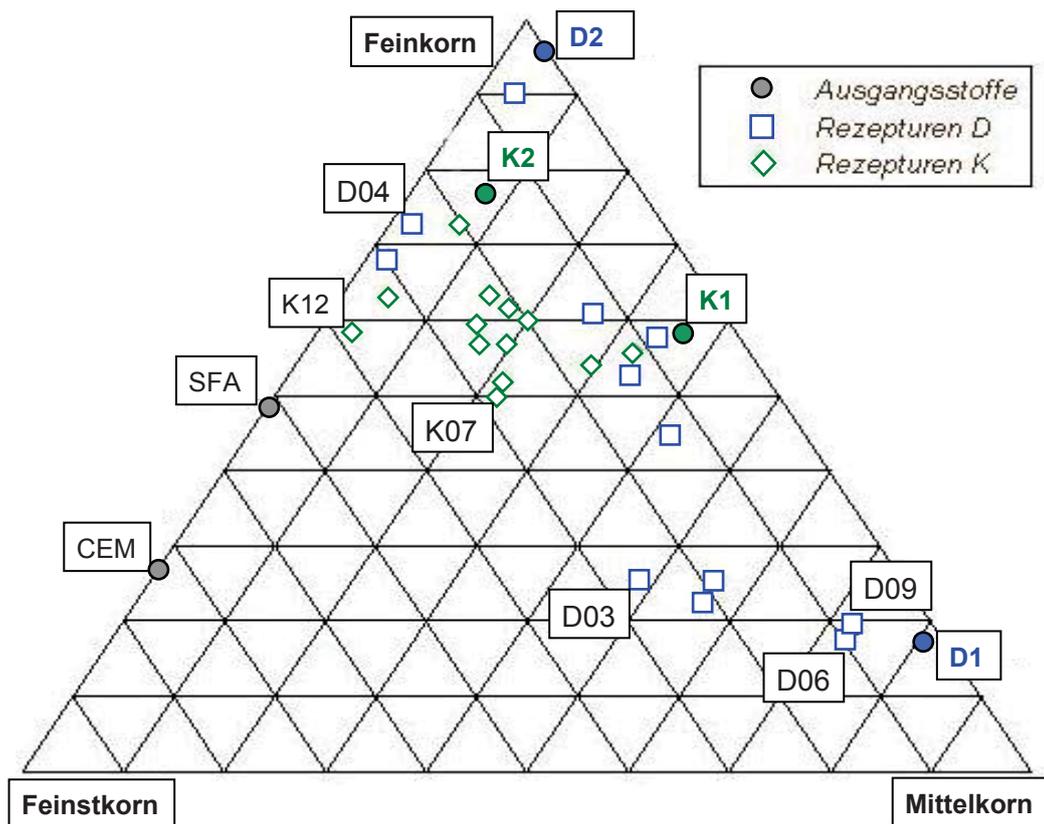


Abbildung 4.17: Rezepturen der Hauptversuche

Quelle: Eigene

Die Rezepturpunkte von Gemischen mehrerer Ausgangsstoffe können im Dreistoffdiagramm nur innerhalb der Umhüllenden der Punkte der Ausgangsstoffe liegen. Daraus ergibt sich, dass die Rezepturen K sich in einem kleineren Bereich des Dreistoffdiagramms gruppieren.

In der folgenden *Abbildung 4.18* sind die Gemische D und K der Hauptversuche als Korngrößenverteilung dargestellt. Zum Vergleich sind auch die theoretisch idealen Fuller-Linien mit einem Größtkorn von 2 mm dargestellt. Fuller-Linien zum Beispiel mit einem Größtkorn von 1 mm würden in dieser Darstellung praktisch nur horizontal verschoben und sind hier nicht extra dargestellt. Darin sind die feinstkörnigste Rezeptur K12 und die grobkörnigsten D06 und D09 beispielhaft bezeichnet. Es wird deutlich, dass die untersuchten Agglomeratrezepturen dem Verlauf der Fuller-Linien sowohl für Kugeln als auch für längliche Partikel sehr nahe kommen. Lediglich im Feinstkornbereich von kleiner als 4 μm werden die Anteile der Ideallinien unterschritten. Dies kommt der Zielsetzung dieser Versuche entgegen, ein möglichst einfaches praxisnahes Verfahren zur Agglomeratherstellung bereitzustellen, bei dem kein zusätzlicher Aufwand zum Dispergieren von Feinststoffen kleiner als 1 μm erforderlich ist.

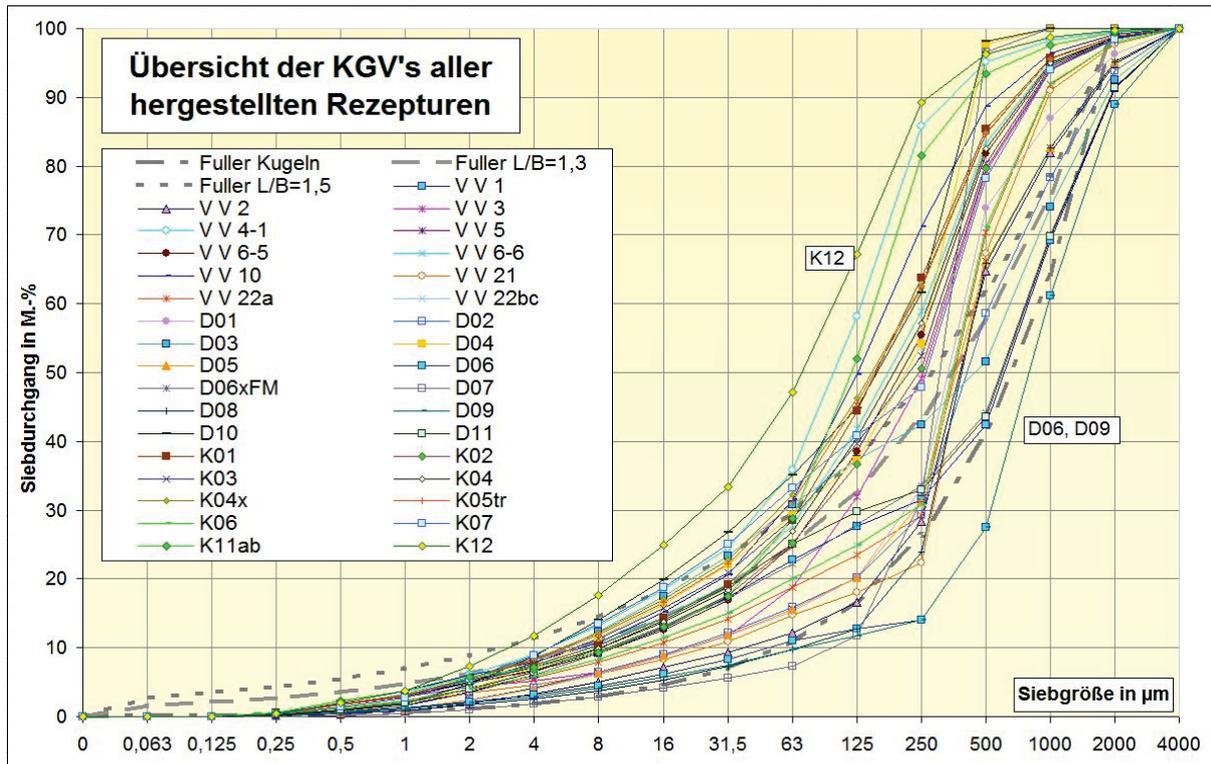


Abbildung 4.18: Korngrößenverteilungen der Rezepturen der Hauptversuche
 Quelle: Eigene

(Darstellung der Korngrößenverteilungen als Tabelle: siehe Anlage 14)

Die Wirkung des Bindemittelgehaltes zur Festigkeitsbildung der Agglomerate kann im Rahmen dieser Arbeit nur am Rande betrachtet werden, da die Zielrichtung dieser Betrachtungen ist, wirtschaftliche also bindemittelarme Rezepturen zu untersuchen. Einige Baustoffeigenschaften von bindemittelreichen Rezepturen wurden im Rahmen der Machbarkeitsstudie [Holle (2007)] und [Holle (2008)] bestimmt.

4.4 Packungsdichte der Sande und Rezepturen

Hier erfolgt eine Bewertung der Kennwerte der Verteilungen der für die Untersuchungen benutzten Sande nach dem Ansatz von [German (1989)], die Auswertung der empirisch-nummerischen Berechnung an der Universität Kassel und eine Darstellung der Ergebnisse der Punkte-Versuche.

4.4.1 Bewertung der Ausgangssande

Die für die Versuche benutzten Sande liegen mit Werten von $VK = 0,078$ bis $0,39$ (Variationskoeffizient der Verteilungsfunktion der Kornzusammensetzung gemäß Abbildung 4.6) in dem Bereich, der von [German (1989)] gemäß (Abbildung 3.4) als ungünstig zum Erreichen einer hohen Packungsdichte bewertet wird. Bei einer Kombination jeweils des



grogen und des feinen Sandes einer Grube erhöht sich der Variationskoeffizient des Gemisches und die maximal erreichbare Packungsdichte steigt.

		SFA HRO	CEM I 42	D1	D2	K1	K2
Mittelwert der Anteile	$\bar{y} = \Sigma(h_i \cdot y_i) =$	1,169	0,879	2,631	2,205	2,275	1,713
Mittelwert der Lagemaße (Mittelwert der Korngröße)	$\bar{x} = \Sigma(h_i \cdot x_i) =$	36	16	594	172	295	112
Varianz	$s^2 =$	0,498	0,339	0,230	0,030	0,334	0,449
Standardabweichung	$s =$	0,706	0,632	0,480	0,173	0,578	0,670
Variationskoeffizient	$VK = s/\bar{y} =$	0,604	0,719	0,182	0,078	0,254	0,391

Tabelle 4.9: Verteilungsparameter der Dichtefunktionen der Ausgangsstoffe dieser Untersuchung

Quelle: Eigene

Für die Kombination Sande D1 und D2 sowie K1 und K1 untereinander ergeben sich die folgenden Verhältnisse der mittleren Durchmesser [Zahlenwerte in μm]:

$$\bar{x}_{D1} / \bar{x}_{D2} = 594 / 172 = 3,4 \quad (4.4)$$

$$\bar{x}_{K1} / \bar{x}_{K2} = 295 / 112 = 2,6 \quad (4.5)$$

Damit liegen gemäß *Abbildung 3.5* die Mittelwerte der Korngrößen dieser Sande auch für die in den Versuchen geplanten Kombinationen von D1 und D2 sowie K1 und K2 in einem Bereich, der Erhöhungen der Packungsdichte erwarten lässt. Diese Erhöhungen dürften nur gering sein, sind aber bei Anteilen der groben Komponente von 20 bis 80 % zu erwarten.

Für eine wesentliche Steigerung der Packungsdichte ist jedoch die Zugabe eines deutlich feineren Stoffes - wie z.B. Zement, SFA oder eines hier nicht geplanten Füllers - erforderlich. Im Vergleich der Sande mit Zement ergeben sich folgende Verhältnisse der mittleren Durchmesser (Zahlenwerte in μm):

$$\bar{x}_{D1} / \bar{x}_{CEM} = 594 / 16 = 37,1 \quad (4.6)$$

$$\bar{x}_{D2} / \bar{x}_{CEM} = 172 / 16 = 10,8 \quad (4.7)$$

$$\bar{x}_{K1} / \bar{x}_{CEM} = 295 / 16 = 18,4 \quad (4.8)$$

$$\bar{x}_{K2} / \bar{x}_{CEM} = 112 / 16 = 7 \quad (4.9)$$

Bei diesen Verhältnissen der groben zur feinen Kornklasse kann eine deutliche Verbesserung der Packungsdichte erwartet werden. Zum Erreichen des optimalen Bereiches sollte die Mischung etwa 60 % des groben Kornes enthalten. (Siehe auch *Abschnitt 3.3.1* und *4.5.2*)

Darstellung der Berechnungen an der Uni Kassel

Mit dem empirisch-numerischen Rechenverfahren der Universität Kassel (Beschreibung siehe *Kapitel 3.3.2*) wurden Optimierungsberechnungen zur erreichbaren Packungsdichte von Gemischen aus den Ausgangsstoffen dieser Untersuchungen durchgeführt.



Zunächst wurden für Sande D1, D2, K1 und K2 sowie die SFA und den Zement CEM I 42,5 die Korngrößenverteilungen auch im Bereich kleiner 1 μm ermittelt. Dafür wurden die Sande zunächst auf 250 μm abgeseibt und die Anteile kleiner als 250 μm mit Lasergranulometrie gemessen. Die für die Berechnung verwendeten Korngrößenverteilungen wurden durch Überlagerung der Ergebnisse von Lasergranulometrie (siehe *Anlage 16*) und Siebanalyse (Siehe *Abbildung 4.14* und *Anlage 5*) bestimmt. Um die von der Software für das empirisch-numerische Rechenverfahren benötigten Einzelklassen bereitzustellen, wurden außerdem erforderliche Zwischenwerte im Bereich der Siebung linear interpoliert. Die überlagerten und damit als Grundlage für diese Berechnung genutzten Korngrößenverteilungslinien der Ausgangssande sind in *Anlage 6* als Tabelle und in *Abbildung 4.5* dargestellt.

Anteile		Berechnungslauf			
		1	2	3	4
Sand D1	Min	40	20		
	Max	70	40		
	Best	40	40		
Sand D2	Min	20	0		
	Max	50	30		
	Best	20	6		
Sand K1	Min			20	40
	Max			40	70
	Best			40	41
Sand K2	Min			0	20
	Max			30	50
	Best			0	20
CEM I 42,5	Min	10	10	10	10
	Max	40	30	30	40
	Best	40	30	30	39
SFA	Min	0	0	0	0
	Max	30	30	30	30
	Best	0	24	30	0
Beste Packungsdichte		0,758	0,733	0,731	0,758

Tabelle 4.10: Übersicht der Berechnungsläufe an der Universität Kassel mit Anteilen der Ausgangsstoffe und Best-Ergebnissen; Darstellung der 4 Berechnungsläufe in Spalten

Quelle: Best-Ergebnisse Universität Kassel, Eigene

Es erfolgten mehrere Berechnungsdurchläufe mit den in der folgenden *Tabelle 4.10* genannten Randbedingungen. Die Randbedingungen wurden, wie auch in *Abschnitt 3.3.2* beschrieben, mit der Zielsetzung festgelegt, aus wirtschaftlichen Gründen den Zementgehalt auf maximal 20 M% (Massenprozent) und den Flugaschegehalt auf 30 M% zu begrenzen



sowie einen Mindestanteil des Überschusssandes der feinen Körnungen D2 und K2 zu verarbeiten.

Die Anteile der einzelnen Ausgangsstoffe wurden innerhalb der vorgegebenen Grenzen in 1-%-Schritten variiert. Durch das Rechenprogramm wurde für jede so mögliche Rezeptur ein Wert für die Packungsdichte ermittelt.

Für diejenige Rezeptur mit dem höchsten Wert der Packungsdichte wird als „Best-Ergebnis“, wie z.B. *Abbildung 4.19*, die Korngrößenverteilung ausgegeben. Zum Vergleich ist in dieser Darstellung auch die Fuller-Linie für einen Exponenten $n = 0,45$ mit eingetragen.

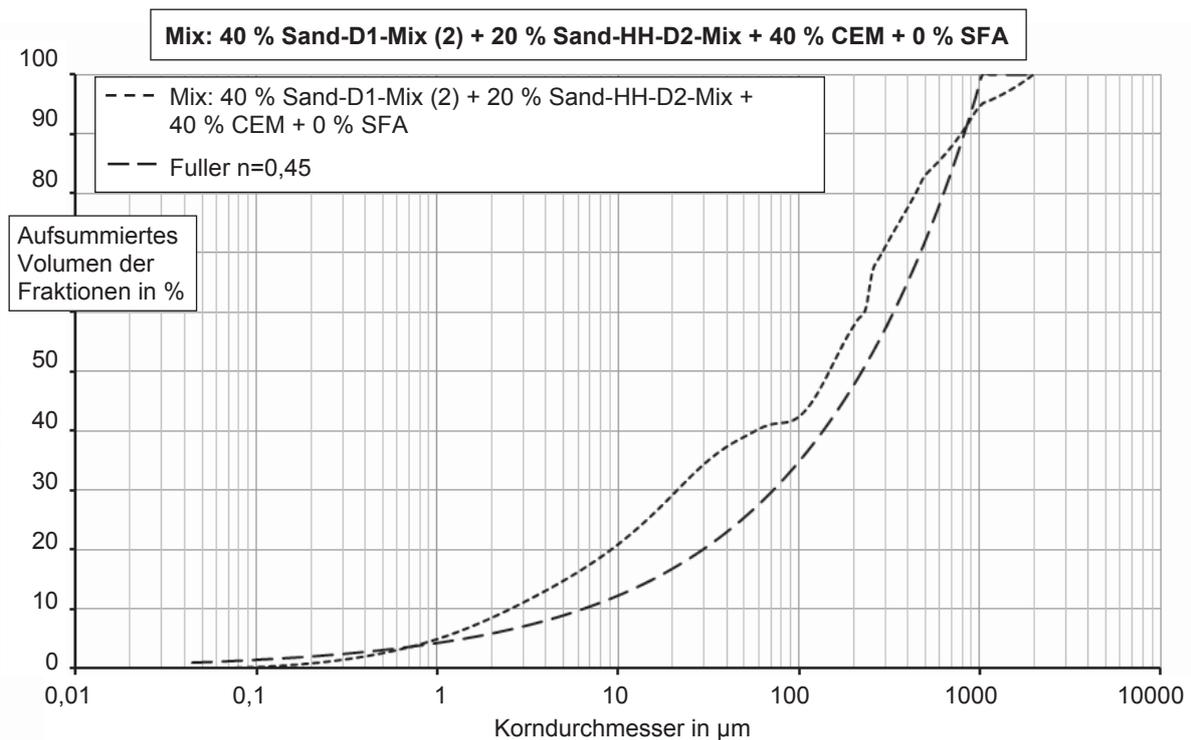


Abbildung 4.19: „Best-Ergebnis“ des Berechnungsdurchlaufes 1 mit Sanden D

Quelle: Universität Kassel

Die Gesamtheit der in Berechnungsdurchlauf 1 ermittelten Werte der Packungsdichte ist in *Abbildung 4.20* und *Abbildung 4.21* dargestellt. Berechnungslauf 1 zeigte die deutlichsten Änderungen der erreichbaren Packungsdichte durch die Variation der Rezepturen. Allen Berechnungsdurchläufen ist jedoch gemeinsam, dass die berechneten Packungsdichten bei den Variationen der Mischungsanteile nur geringe Änderungen aufweisen. Bei Berechnungslauf 1 variiert trotz ca. 5000 getesteten Rezepturen die ermittelte Packungsdichte Φ nur in dem Bereich von 0,635 und 0,757. Die Darstellungen der Ergebnisse der weiteren Berechnungsdurchläufe sind in *Anlage 17* zusammengestellt. Zur Verdeutlichung der für Rezepturen aus den Sanden D berechneten erreichbaren Packungsdichten und der vorgegebenen Rezepturgrenzen erfolgt die Darstellung der Ergebnisfelder 1 und 2 gemeinsam im Dreistoffdiagramm in *Abbildung 4.21*.



Damit werden die in [German (1989)] aufgestellten Vorhersagen bestätigt, nach denen die Korngrößen der verwendeten Ausgangsstoffe weit auseinanderliegen müssen, um eine wesentliche Verbesserung der Packungsdichte zu erzeugen.

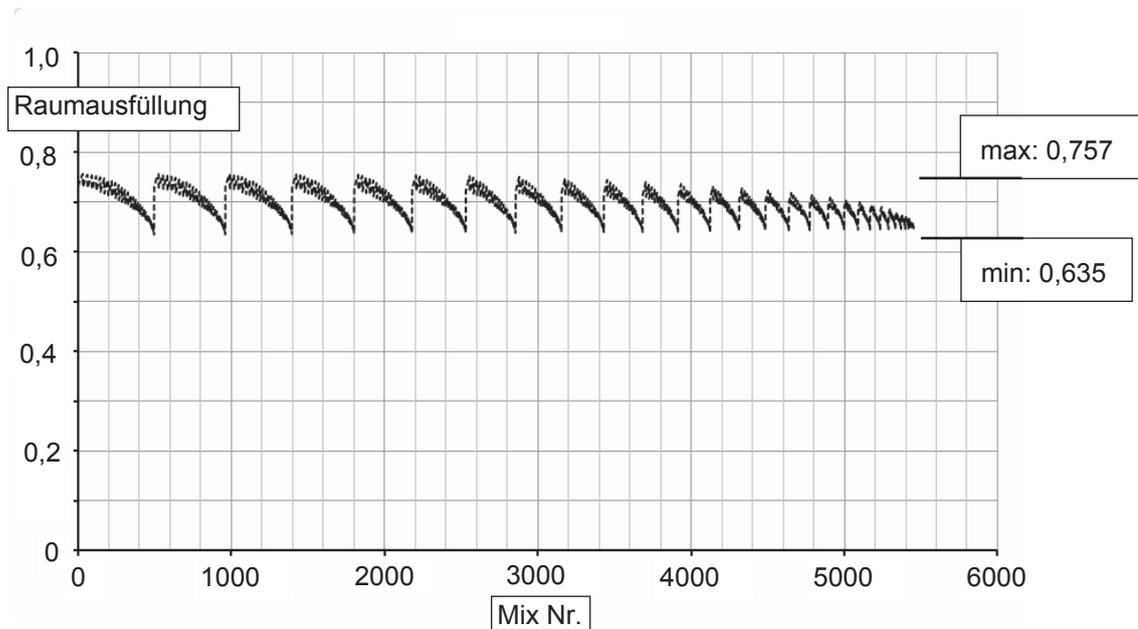


Abbildung 4.20: Übersicht der Ergebnisse des Berechnungsdurchlaufes 1

Quelle: Universität Kassel

Die Rezeptur mit der höchsten Packungsdichte ergibt sich innerhalb der vorgegebenen Grenzen bei dem höchsten Gehalt an größtem Korn (Mittelkorn), wenig Anteilen der mittleren Korngröße (Feinkorn) und hohem Gehalt an Feinstkorn (Zement). (Siehe Rezeptur auch in *Abbildung 4.19*)

Aus der empirisch-numerischen Berechnung an der Universität Kassel ergeben sich nur geringe Unterschiede der Ergebnisse sowohl innerhalb eines Berechnungsdurchlaufes als auch zwischen den Sanden D und K. Die Ergebnisse lassen sich als räumliche Flächenfunktionen über dem Bereich der möglichen Rezepturen darstellen und zeigen dabei nur geringe Anstiege. Die größte Packungsdichte wird für die Best-Rezeptur in Berechnungslauf 1 mit einem Wert von 0,757 erreicht. Die errechneten Packungsdichten der umgebenden Flächenbereiche sind davon nur unwesentlich verschieden. Daraus folgt der Schluß, dass für großtechnische Prozesse die Kornzusammensetzung eine untergeordnete Rolle für das wesentliche Verbessern der Packungsdichte innerhalb der hier gesetzten Rezepturgrenzen spielt.

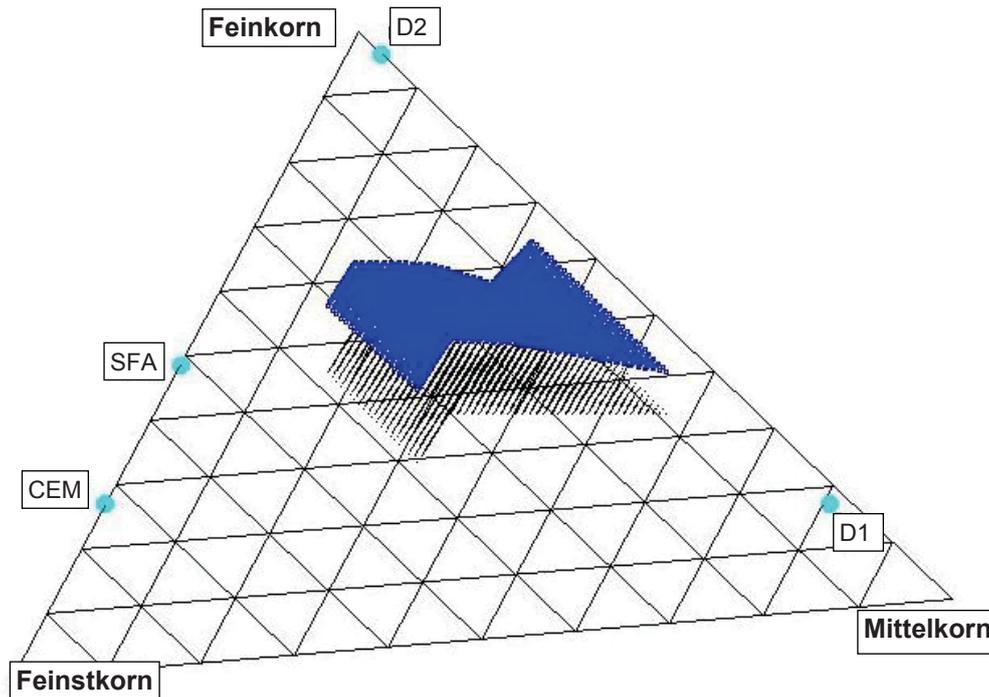


Abbildung 4.21: Überhöhte Darstellung der Ergebnisse der Berechnungsdurchläufe 1 und 2 im Dreistoffdiagramm

Quelle: Daten aus Berechnung an Uni Kassel, Grafik: Eigene

4.4.2 Darstellung der Ergebnisse des Verfahrens nach Puntke und dessen Erweiterung

Ausgehend von dem in *Abschnitt 3.3.5* beschriebenen Verfahren von Puntke und den Beobachtungen beim Durchführen von Versuchen nach dieser Beschreibung wurden folgende Überlegungen angestellt:

Bei der Umlagerung zur charakteristischen dichtesten Packung verringert sich der Porenraum in dem Haufwerk und ein Teil der den Porenraum ausfüllenden Wassermenge wird frei. Durch die zwangsläufig inhomogene Vermischung der Probe und der Wasseranteile sowie der in bestimmten Bereichen der Probe stärker wirkenden Verdichtungsarbeit (z.B. am Boden des Gefäßes) wird dies in Teilbereichen der Probe beginnen. Dadurch kommt es zu so etwas wie „Keimbereichen“ in dem Haufwerk, aus denen das freiwerdende Wasser in die Nachbarbereiche übertritt und dort die nächsten Poren füllt.

Durch die **geringe Verdichtungsenergie nach Puntke** müssen die Hohlräume des Kornhaufwerkes erst vollständig gefüllt sein, bevor das Haufwerk zu „fließen“ beginnt und sich in einer dichteren Packung zusammenfindet. Als Modellvorstellung wird die erste Kornschicht über den gesamten Behälterboden als „Keimbereich“ angesehen. Nach dem Füllen der Porenräume und dem Umlagern in die „*charakteristische, dichteste Packung*“ wird die in der ersten Schicht freiwerdende Wassermenge in die darüberliegende zweite



Partikelebene aufsteigen. Nun werden dort die zwischen den Wasserbrücken an den Kornkontaktpunkten bestehenden Poren aufgefüllt und die zweite Partikelebene kann sich in die dichteste Packung umlagern und überschüssiges Wasser freigeben, das den nächsten Schichten zur Verfügung steht.

Beim Anbieten von **reichlich Verdichtungsenergie** haben die Partikel der ersten Kornschicht am Behälterboden bereits vor der vollständigen Sättigung ihrer Partikelzwischenräume die Möglichkeit, die scheinbare Kohäsion zu überwinden und sich in die „*charakteristische, dichteste Packung*“ umzulagern. Auch hier kommt es durch den im Zustand der dichtesten Packung verringerten Porenraum der ersten Partikelschicht zu einem Freiwerden von Wasser, das zur Erhöhung des Sättigungsgrades in der nächsten Schicht zur Verfügung steht. Durch das anhaltende Rütteln der Probe haben die Partikel in dem „Keimbereich“ viel mehr Möglichkeiten, sich in verschiedenen Positionen zueinander einzufinden und so zum Beispiel diejenige mit der dichtesten Packung zu erreichen. Dabei ist vorstellbar, dass die Partikel, die eine im Verbund mit ihren Nachbarpartikeln optimale Position gefunden haben, in dieser stabiler sind als vorher und deshalb in dieser Position bleiben. Daraufhin erhalten die Partikel der nächsten Ebene mehr Verdichtungsimpulse und werden zum Einnehmen ihrer günstigsten Position angeregt.

Hier wird anschaulich, dass die Wassermenge, die zum Erreichen der „*charakteristischen, dichtesten Packung*“ ohne oder mit geringer Verdichtungsenergie erforderlich ist, größer ist als diejenige, die diesen Packungszustand unter Bereitstellung von ausreichend hoher Verdichtungsenergie ermöglicht.

So lässt sich auch die in diesen Versuchen gefundene hohe Empfindlichkeit des Verfahrens nach Puntke gegen Abweichungen der Verdichtungsarbeit erklären. Es wurde festgestellt, dass die Versuche nach Puntke eben doch nicht unabhängig von der Verdichtungsenergie sind. (*Vergleiche Zitat Puntke: Abschnitt 3.3.5, S. 28f*) Bei nach Puntke noch nicht gesättigten Gemischen ließ sich bei etwas mehr Verdichtungsarbeit ein „Fließen“ oder bei noch etwas mehr Verdichtungsarbeit sogar ein deutlicher Wasserüberschuss erzeugen. Das Zugeben eines weiteren Tropfens Wasser konnte dann ebenfalls „Fließen“ erzeugen und stellt aber nach Ansicht des Verfassers eine weitere Überschätzung des zur vollständigen Sättigung erforderlichen Wassergehaltes dar.

Das Einbringen von zuviel Verdichtungsenergie in die Probe wurde ebenfalls beobachtet. Es erfolgte dann ebenfalls kein „Fließen“ des Gemenges. Proben, die bereits das Erreichen des „Fließzustandes“ durch leichtes Glänzen an der Oberfläche anzeigten, verloren diesen Glanz. Dies wird damit erklärt, dass beim Einbringen eines Übermaßes an Verdichtungsenergie das Schwingen der Behälterwand so intensiv wird, dass die unmittelbar an der Wand befindlichen Partikelschichten umgelagert werden oder sich ganz von der Behälterwand lösen. Dadurch wird dann die Gesamtstruktur der Probe im Behälter sichtbar aufgelockert. Zum Beispiel bilden sich Aufwölbungen, Abbrüche oder schollige Risse in der Probe.

Damit ist das in dieser Arbeit angewandte Verfahren zum Ermitteln der „*charakteristischen, dichtesten Packung*“ mit Verdichtungsarbeit durchaus von den Maschinenparametern der



Verdichtungseinrichtung sowie dem Geschick und der Geduld des Durchführenden abhängig. Die so ermittelten Wassergehalte im Zustand dichtester Packung sind jedoch in der Regel geringer als nach Puntke. Sie werden als bessere Näherung an den Zustand der „charakteristischen, dichtesten Packung“ angesehen.

Die Versuche zur Bestimmung des Wassersättigungspunktes mit reichlichem Angebot an Verdichtungsenergie ergeben in der Regel geringere Hohlraumgehalte - also höhere Packungsdichten - als die Versuche nach der Beschreibung von Puntke. In der folgenden *Tabelle 4.11* sind diejenigen Rezepturen aufgeführt, bei denen die Bestimmung des Wassersättigungspunktes parallel nach beiden Verfahren erfolgte.

Sorte	Hohlraumvolumen [Vol%]	
	nach Beschreibung von Puntke, ca. 12x von Hand aufstoßen	mit reichlich Verdichtungsenergie
CEM I 42,5	86,16	64,86
SFA	43,81	21,44
D1	46,17	41,23
D2	52,70	54,03
K1	47,05	40,40
K2	49,46	50,42
2xK1+8xK2	46,88	42,93
4xK1+6xK2	47,08	36,67
7xK1+3xK2	41,52	32,27
9xK1+1xK2	41,45	31,90

Tabelle 4.11: Vergleich der ermittelten Porengehalte nach Puntke und bei reichlicher Verdichtung

Quelle: Eigene

Dabei ist auffällig, dass mit beiden Verfahren für Zement sehr hohe Hohlraumvolumen ermittelt wurden. Zum Vergleich: Der Wasserbedarf für die Normsteife des Zementes liegt üblicherweise bei Werten um 30 M%. Bei der Flugasche ist der Wert nach Puntke zwar deutlich geringer als beim Zement, aber etwa doppelt so hoch wie beim Verfahren mit reichlich Verdichtungsenergie. Offensichtlich eignen sich beide Verfahren nicht für Feinststoffe mit stark chemisch aktiven Oberflächen.

Weiterhin ist auffällig, dass sich bei den beiden feinen Sanden D2 und K2 bei dem Verfahren mit reichlich Verdichtungsenergie leicht höhere Hohlraumgehalte ergaben als beim Puntke-Verfahren. Demgegenüber liefert das intensivere Verdichten bei den anderen Stoffen in *Tabelle 4.11* deutlich geringere Hohlraumgehalte. Aufgrund ihrer Abweichung von der allgemeinen Tendenz wurden für die Sande D2 und K2 Wiederholungsversuche ausgeführt, die die Ergebnisse bestätigten. Daraus ergab sich die Hypothese, dass Partikelgemische, die eine enge Korngrößenverteilung und außerdem ein kleines Größtkorn haben, durch das Verfahren mit hoher Verdichtungsenergie keine besseren Ergebnisse liefern, weil bei sehr kleinen Korngrößen die Masseunterschiede zwischen den Partikeln nur gering sind und



diese deshalb wenig Neigung haben, sich innerhalb des schwingenden Partikelgemenges in Lücken zu setzen. Dagegen tritt beim Punkte-Verfahren durch das Aufstoßen des Probengefäßes auf den Labortisch kurzzeitig eine hohe Negativbeschleunigung auf, die auch bei Partikeln geringer Eigenmasse deutliche nach unten gerichtete Kräfte erzeugen und somit für die Partikel den Anreiz liefern, sich in passenden Lücken einzufinden.

Dies könnte in weiteren über diese Arbeit hinausgehenden Versuchen zum Beispiel mit Eintrag von unsymmetrischen Vertikalschwingungen geprüft werden.

In der folgenden Darstellung sind die für die verschiedenen Rezepturen ermittelten Hohlraumgehalte nach Punkte (rot) und mit reichlich Verdichtungsenergie (grün) im Dreistoffdiagramm dargestellt. Dabei befinden sich die Versuche nach Punkte jeweils auf einer Linie, die die beiden Ausgangssande D1 und D2 sowie K1 und K2 verbindet, weil die ersten Versuche mit einer stufenweisen Änderung der Mischungsanteile dieser beiden Sande erfolgten. Dabei bestätigt sich die Vorhersage aus [German (1989)], dass die höchsten Packungsdichten bei etwa 70 % Anteil des größeren Sandes erwartet werden. Siehe Pfeile im Dreistoffdiagramm *Abbildung 4.22*. Bei den Sanden D ist diese Abhängigkeit deutlicher zu erkennen, weil ihre Mittelwerte weiter auseinander liegen als bei den Sanden K. Die ausführliche Liste mit allen Messwerten ist als *Anlage 18* angefügt.

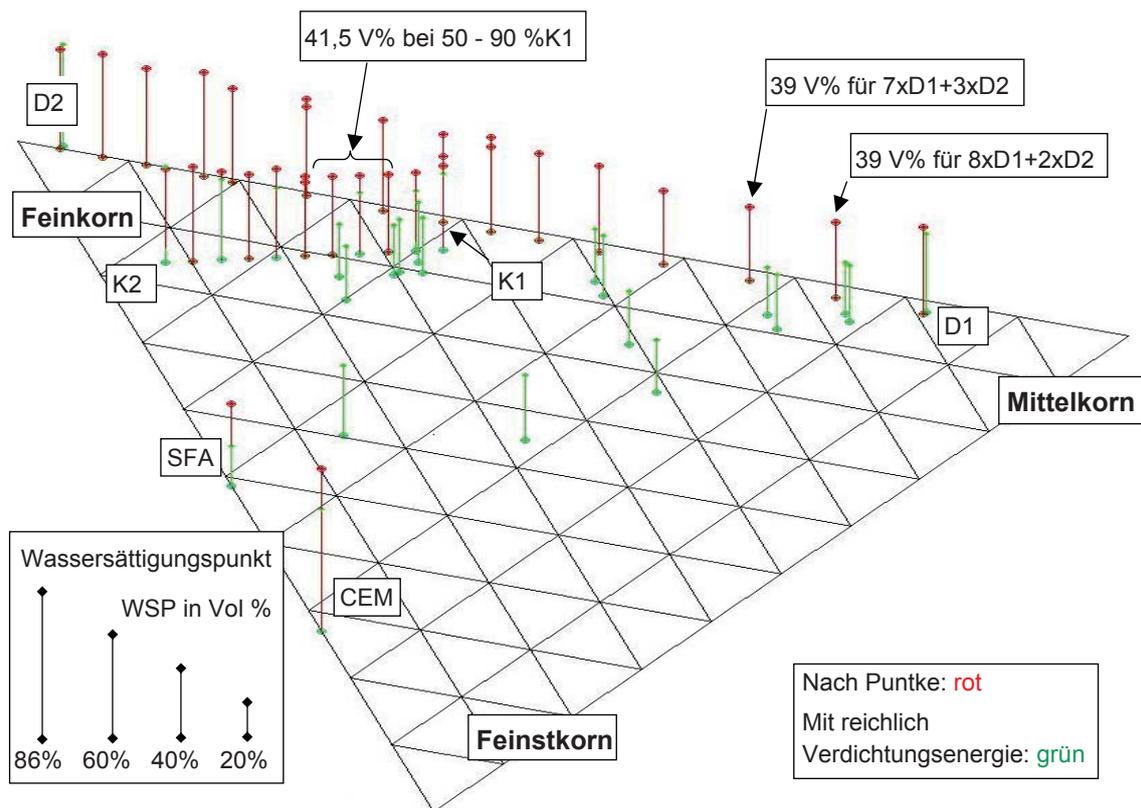


Abbildung 4.22: Darstellung des Wassersättigungspunktes in Vol %; Dies entspricht dem Porenraum der Packung. Rot sind die Ergebnisse der Versuche gemäß Punkte und grün die Versuche mit reichlichem Angebot an Verdichtungsenergie

Quelle: Eigene



Nach dem Erkennen des deutlichen Einflusses der Verdichtungsintensität wurde das in *Abschnitt 4.2.4* beschriebene Verfahren zur Ermittlung des Wassersättigungspunktes abgewandelt und die weiteren Versuche zum Ermitteln der Lagerungsdichte erfolgten mit reichlich Verdichtungsenergie. Dabei wurden vor allem Rezepturen mit Anteilen von Feinststoff wie Zement und Flugasche benutzt. Diese sind direkt mit den Rezepturen vergleichbar, aus denen Agglomerate hergestellt wurden. Eine Gegenüberstellung der Werte des Hohlraumgehaltes der Rezepturen mit dem Druckverhalten der Frischlinge erfolgt in *Abschnitt 4.5.4*. Zum Quervergleich der Ergebnisse des modifizierten Punkte-Verfahrens mit den Ergebnissen der Bestimmung der Porengehalte der Festlinge siehe *Abschnitt 4.6.3*.

4.4.3 Ergebnisse der DEM-Modellierung

Mit der DEM-Modellierung zur höchsten erreichbaren Packungsdichte soll, wie schon in *Abschnitt 3.3.3* eingeführt, ein weiterer Vergleich zwischen den verschiedenen Agglomeratrezepturen erfolgen. Dabei ist die Ausgangsüberlegung, Partikel einer vorgegebenen Korngrößenverteilung in einem Kugelvolumen von zum Beispiel 16 mm Durchmesser so anzuordnen, dass sich eine möglichst hohe Packungsdichte, also ein minimaler Porenraum ergibt. Durch die Betrachtung einer Korngrößenverteilung, deren Partikel sich um mehrere Zehnerpotenzen in der Größe unterscheiden, ergeben sich sehr hohe Partikelanzahlen. Bei der Modellierung werden bis zu 50 Millionen mögliche Positionen jedes einzelnen Partikels rechnerisch getestet. Um den Rechenaufwand zu begrenzen, wurden die folgenden Vereinfachungen getroffen:

- Modellierung von Partikeln mit 2 mm Durchmesser: Um Aussagen zu einem Agglomeratkorn mit 16 mm Durchmesser zu treffen, wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die für ein 2-mm-Korn ermittelten Werte auch für ein Agglomeratkorn mit 16 mm Durchmesser gültig sind.
- Aufteilung der Berechnung in zwei Teile: Die Berechnung erfolgte zunächst für Partikel zwischen 16 bis 1000 μm und in einem zweiten Schritt für Partikel zwischen 0 bis 16 μm Größe. Dabei wird das im ersten Schritt der Berechnung ermittelte Porenvolumen durch die im zweiten Schritt modellierten Agglomerate aufgefüllt. Im Berechnungsschritt 2 steht gemäß der Rezeptur nicht genug Material zur Verfügung um den gesamten Porenraum aus dem ersten Berechnungsschritt aufzufüllen. Daher setzt sich der Gesamtporenraum aus dem Restporenraum aus Schritt 1 und dem Porenraum aus Schritt 2 zusammen. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass der Zwickelraum, der zwischen den Partikeln des ersten Berechnungsschrittes verbleibt (kleinster Partikeldurchmesser 47 μm) durch die Agglomerate, die im zweiten Schritt mit einem Durchmesser von 24 μm modelliert werden oder Teilmengen davon, vollständig ausgefüllt werden kann.
- Zusammenfassen der Kornklassen zu kugeligen Partikeln mit dem mittleren Durchmesser der Klasse: Für Berechnungsschritt 1 wurde der Bereich von 16 bis 1000 μm in Klassen mit den Grenzen 16 / 32 / 63 / 125 / 250 / 500 / 1000 μm aufgeteilt. In der Berechnung wird jede dieser Klassen durch kugelige Partikel der



folgenden Durchmesser repräsentiert: 47, 94, 188, 375, 750 μm ; In Berechnungsschritt 2 werden die Kornklassen mit den Grenzen 0 / 0,125 / 0,25 / 0,5 / 1 / 2 / 4 / 8 / 16 μm durch kugelige Partikel der folgenden Durchmesser repräsentiert: 0,063 / 0,188 / 0,375 / 0,75 / 1,5 / 3 / 6 / 12 μm

- Keine Berücksichtigung von physikalischen Oberflächeneffekten wie mögliche Wasserhüllen der Partikel oder Bildung von Flocken sowie von chemischen Reaktionen und den damit verbundenen Änderungen der Partikelgrößen: Es erfolgt eine rein mathematisch-geometrische Anordnung der Partikel zu einem Agglomerat.
- Die Dichten aller Partikelklassen werden als gleich angenommen. Daher stellen die Anteile sowohl die Massen- als auch die Volumenanteile dar.

Wegen dieser Vereinfachungen erheben die ermittelten Werte keinen Anspruch auf die detailgenaue Beschreibung der Anordnung der Einzelpartikel zu einem Agglomerat. Daher werden die ermittelten Werte vor allem zum Vergleich der Rezepturen untereinander benutzt.

Die DEM-Modellierung erfolgte an 3 Rezepturen, die auch im Zuge der Hauptversuche hergestellt und untersucht wurden.

Ausgangsrezeptur	D04	D11	K04
Zusammensetzung	D1 : D2 : CEM : SFA	D1 : D2 : CEM : SFA	K1 : K2 : CEM : SFA
	0 : 60 : 20 : 20	70 : 0 : 20 : 10	40 : 40 : 10 : 10
maximale Packungsdichte Φ	0,647	0,784	0,688
minimaler Hohlraumgehalt ϵ	0,353	0,216	0,312

Tabelle 4.12: Ergebnisse der DEM-Modellierung

Quelle: Eigene

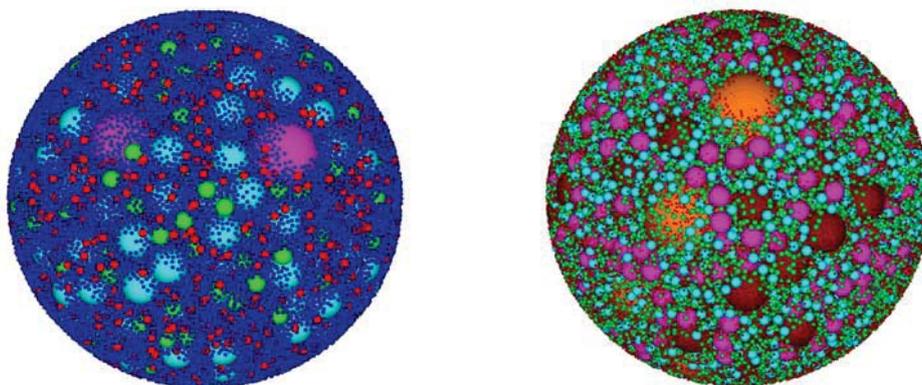


Abbildung 4.23: Ergebnisbilder der DEM-Modellierung für D11; links Berechnungsschritt 1, Agglomeratdurchmesser 2000 μm ; rechts Berechnungsschritt 2, Agglomeratdurchmesser 24 μm ; Die Bilder befinden sich in größerer Auflösung und mit Legende in Anlage 20.

Quelle: Simulationsberechnung durch TUHH, V-3, Institut für Feststoffverfahrenstechnik und Partikeltechnologie



Die mit der DEM-Modellierung ermittelten Werte für Packungsdichte und Hohlraumgehalt liegen zwischen praktisch ermittelten Werten bei zufälliger Anordnung in Stoffgemischen und den theoretisch erreichbaren Maximalwerten. Zwischen den einzelnen Rezepturen sind deutliche Unterschiede zu erkennen, die auf ein Optimierungspotential durch Anpassung der Korngrößenverteilung schließen lassen.

4.4.4 Körnungsziffern zur Beschreibung von Korngrößenverteilungen

Eine weitere Möglichkeit zur Bewertung von Korngrößenverteilungen besteht in der Anwendung von Körnungsziffern. Als solche haben sich in der Baustoffindustrie k-Zahl und D-Summe bewährt. Wegen seiner Unabhängigkeit von den verwendeten Zwischensiebgrößen wird hier der F-Wert nach Hummel betrachtet.

$$F\text{-Wert} = \frac{\sum_i m_i * f_i}{100} \quad (4.10)$$

$$f_i = 100 * \frac{\lg 10 * d_i + \lg 10 * d_{i+1}}{2} \quad (4.11)$$

m_i – Massenanteile der Kornklassen in M%

d_i – untere Sieblochweite der betrachteten Kornklasse in μm

Die so bestimmten F-Werte unterscheiden sich von den in der Betonindustrie verwendeten F-Werten trotz gleichen Rechenweges, weil von einem Größtkorn von 2 mm ausgegangen wird und die Berechnung in μm erfolgt.

SFA	CEM I	Sande				Fullerlinien mit n =		
		K1	K2	D1	D2	0,64 Kugeln	0,4 L/B=1,3	0,35 L/B=1,5
HRO	42,5							
214,4	184,4	324,5	268,3	360,3	317,7	361,3	322,9	309,3

Tabelle 4.13: F-Werte der hier verwendeten Ausgangsstoffe

Quelle: Eigene

In [Reinstorf (1978)] wird ausgeführt, dass verschiedene Kornzusammensetzungen der Zuschläge denselben Beitrag zur Festigkeit eines Betons liefern (Festigkeitsbildungswert), wenn ihre F-Werte gleich sind. Damit wird der Einfluss der Form der Korngrößenverteilung auf die Festigkeit des Betons erfasst. Ausgehend von dieser Annahme ist dies ein sehr übersichtlicher und potentiell geeigneter Wert zur Beschreibung der Korngrößenverteilungen der verschiedenen Rezepturen.

In *Tabelle 4.13* werden die Ausgangsstoffe und die daraus hergestellten Rezepturen anhand der F-Werte bewertet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in dem ursprünglichen Ansatz des F-Wertes nur der Einfluss der durch Siebung ermittelten Kornklassen erfasst wird, ohne dass im Feinstkornbereich auftretende Sondereffekte wie Flockenbildung oder unvollständiges Dispergieren von Feinstkornanteilen erfasst werden.



4.4.5 Zusammenfassung Packungsdichte

Bei dem Ziel der Erzeugung eines porenarmen Haufwerkes ist die Packungsdichte des Systems eine wichtige Größe. Zum Beispiel ist es möglich, ausgehend von der Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe über ein empirisch-numerisches Verfahren, wie an der Uni Kassel durchgeführt, die theoretisch maximal erreichbare Packungsdichte zu berechnen. Die resultierende Aussage dieser Berechnung ist, dass sich innerhalb der hier vorgegebenen Rezepturgrenzen keine deutlichen Extrema der Packungsdichten zeigen.

Dieses Ergebnis ist aufgrund der augenscheinlich sehr verschiedenen Ausgangsstoffe zunächst überraschend. Bei näherer Betrachtung müssen aber die Unterschiede zwischen den hier verwendeten Ausgangsstoffen hinsichtlich der Kornzusammensetzung als gering bezeichnet werden. Vor dem Hintergrund der theoretisch möglichen Korngrößenverteilung sind Gemische aus mehreren Gruppen von Einkornklassen denkbar, die über einen weiten Korngrößenbereich deutlich höheres Potential zur Verbesserung der Packungsdichte bieten.

Mit den Versuchen nach Punkte und insbesondere mit dem abgewandelten Verfahren mit reichlich Verdichtungsenergie wurde versucht, einen labortechnischen Schnelltest für den Nachweis für die Eignung einer Rezeptur zum Erreichen einer maximalen Packungsdichte bereitzustellen. Durch die Abwandlung des Verfahrens nach Punkte ergab sich dabei eine für die Praxis relevante Verbesserung der Ergebnisse bei inerten Stoffsystemen.

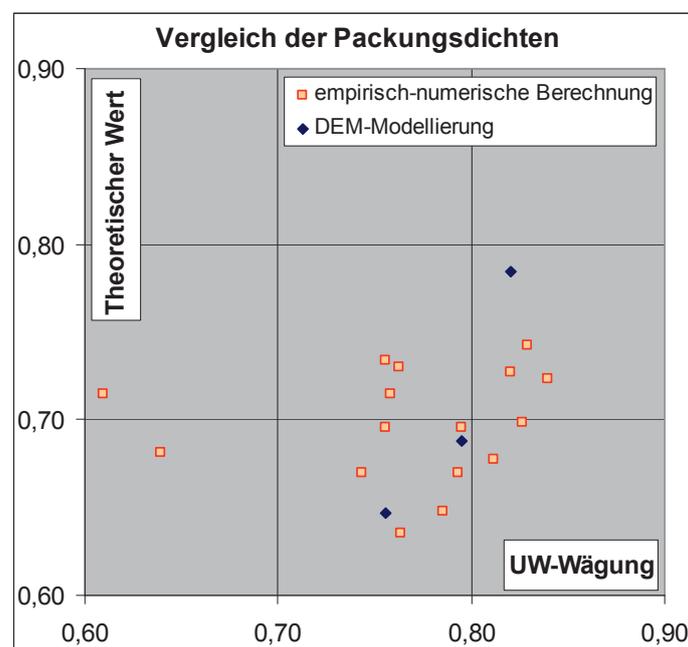


Abbildung 4.24: Gegenüberstellung der Packungsdichten aus Unterwasserwägung mit empirisch-numerischer Berechnung sowie DEM-Modellierung

Quelle: Eigene

In *Abbildung 4.24* (siehe auch *Anlage 24*) sind die Ergebnisse der Bestimmung der Packungsdichte an den hergestellten Agglomeratrezepturen den Ergebnissen des empirisch-



numerischen Rechenverfahrens und der DEM-Modellierung gegenübergestellt. Aus den Versuchen zur Ermittlung der Packungsdichte über den Wassersättigungspunkt nach Punkte und mit reichlich Verdichtungsenergie liegen keine Werte vor, die mit den oben aufgelisteten Rezepturen genau vergleichbar sind.

Die durch DEM-Modellierung bestimmten Werte erfassen die Tendenz der durch Unterwasserwägung bestimmten Werte. Damit ist die DEM-Modellierung grundsätzlich ein geeignetes Verfahren, um die Packungsdichte von Sand-Zement-Gemischen zu optimieren. Bei Berücksichtigung von physikalischen Effekten im Feinstkornbereich und den chemischen Reaktionen wird eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit erwartet.

Das empirisch-numerische Rechenverfahren bildet ebenfalls die Tendenz der Messungen nach und erreicht dabei teilweise gute Übereinstimmungen der Werte. Allerdings gibt es auch Einzelwerte, die von der allgemeinen Tendenz deutlich abweichen. Durch die Gruppierung der Werte in drei Bereiche wird davon ausgegangen, dass dieses Verfahren bei Gemischen mit hohen Feinstkornanteilen und chemisch aktiven Oberflächen größere Abweichungen ergibt.

4.5 Agglomeriervorgang und Eigenschaften der Frischlinge

Generell ist die Aufbaugranulation im Granulierteller ein bekanntes Verfahren, über das bereits umfangreiche Erfahrungen aus der Praxis z.B. mit mineralischen Stäuben, Salzen und organischen Stoffen bestehen. Zum Beschreiben der Besonderheiten im Granuliertellerverhalten der in dieser Untersuchung verwendeten Ausgangsstoffe werden in diesem Kapitel die Herstellung und die Eigenschaften der Frischlinge beschrieben.

Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf den Eigenschaften der hier erzeugten Agglomerate. Aus dem Vergleich mit den Eigenschaften der erhärteten Agglomerate (Festlinge) und dem Agglomeratbeton sollen Sollbereiche der Eigenschaften der Frischlinge festgelegt werden. Ihre Herstellung im großtechnischen Maßstab innerhalb der Bandbreite dieser Eigenschaften wird als möglich vorausgesetzt. Insofern dienen die durchgeführten Variationen der Parameter der Versuchsanlage und des Herstellregimes der Erzeugung der zu erwartenden Bandbreite von Eigenschaften der Frischlinge. Mit den Erfahrungen der Hersteller großtechnischer Granulieranlagen können diese Parameter als Grundlage für die Konzeption einer Großanlage genutzt werden.

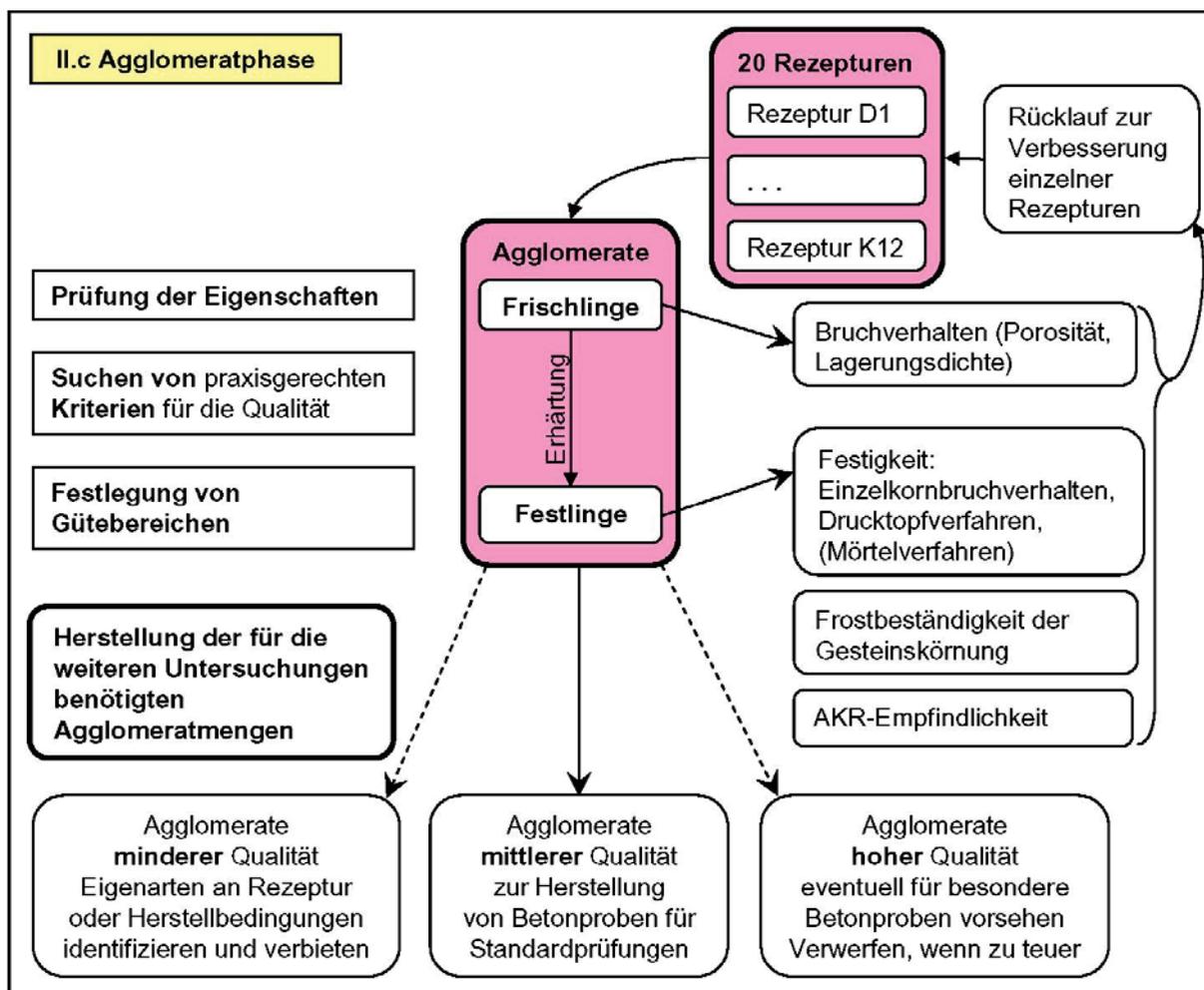


Abbildung 4.25: Übersicht zur Agglomeratphase

Quelle: Eigene

Das Fließbild *Abbildung 4.25* zu „II.c Granulatphase“ stellt die Herstellung der Frischlinge aus den oben festgelegten Rezepturen dar. Dabei werden die Eigenschaften der Frischlinge ermittelt, um diese den Rezepturen zuzuordnen und Abhängigkeiten von den Rezepturen zu ermitteln. Außerdem führen diese Eigenschaften zu den Qualitätsparametern der Festlinge.

4.5.1 Zugaberegime, Granulierverhalten, Ausbeute, Restsand, Nachbehandlung

Geisenhanslücke [Geisenhanslücke (2008)] beschreibt die Rheologie von Feinstoffleimen und betrachtet dabei Frischbeton als eine Suspension von Gesteinskörnung in Zementleim und Zementleim als eine Suspension von Feinstoff- und Zementpartikeln in Wasser. Dabei wird ein „Schwimmen“ der jeweils groben Partikel in dem Dispergiermittel angenommen. Es werden die Konsistenzbereiche plastisch bis fließfähig betrachtet. Im Gegensatz dazu werden hier nicht wassergesättigte Gemenge in erdfeuchter Konsistenz untersucht. Damit entsprechen sie den Teilbildern a und b der *Abbildung 3.9, Seite 27*. Diese sind durch die unvollständige Ausfüllung der Räume zwischen den Partikeln mit einer Flüssigkeit gekennzeichnet. Dadurch kommt es zum Wirken von Adhäsionskräften aus Flüssigkeitsbrücken an



den Berührungspunkten der Körner und somit zu einem Zusammenhalt innerhalb der frischen Agglomeratkörner.

Demgegenüber wird der Zusammenhalt innerhalb der erhärteten Agglomeratkörner durch die erhärteten Flüssigkeitsbrücken zwischen den Einzelpartikeln sowie durch das „Verfilzen“ des Gemenges durch ineinanderwachsende Feststoffphasen gebildet.

4.5.1.1 Zugaberegime

Trockene und feuchte Zugabe

Im Zuge der Planung der Versuchsanlage fiel die Entscheidung, die Agglomeratrezepturen vorzumischen, anstatt die einzelnen Bestandteile getrennt einzustreuen. Beim Zugeben der vorgemischten Ausgangsstoffe sind temporäre Rezepturabweichungen weitgehend ausgeschlossen und der Arbeits- und Überwachungsaufwand während der Zugabe ist wesentlich geringer. Um die Staubentwicklung beim trockenen Vormischen der Sande mit dem Bindemittel zu verringern, wurden auch Versuche mit gleichzeitiger Wasserzugabe durchgeführt. Dabei wurden entweder ca. 50 % („halbtrocken“ gemäß Tabelle in *(Anlage 21, ab Blatt 3: Granuliertverhalten Hauptversuche)*) oder 85 % („feucht“) der für den Agglomerierprozess erwarteten Wassermenge zugegeben. Die restliche Wassermenge wurde dann während des Agglomerierens in den Prozessraum eingesprüht. Das Mischen der halbtrockenen oder feuchten Vormischung erfolgte sehr intensiv mit einer Bohrmaschine mit Mörtelquirl bei recht hoher Drehzahl. Die dabei entstehende erdfeuchte Vormischung neigte ihrerseits schon beim Vormischen oder dem Aufgeben in den Prozessraum zum Bilden von Klumpen. Diese verhielten sich im Granulierteller wie Granulatkeime und wurden umhüllt anstatt zu zerfallen. Solche Agglomerate (definitionsgemäß sind dies wirkliche ‚Granulate‘.) hatten eine deutlich geringere Festigkeit als die durch Aufbaugranulation entstandenen Agglomerate. Solche Agglomerate mit Fehlstellen in ihrem Inneren sind im Rahmen dieser Untersuchung als ‚unerwünscht‘ anzusehen. Das feinverteilte, klumpenfreie Zugeben halbtrockener oder feuchter Vormischung konnte durch das Einstreuen mit einer Siebschaufel erreicht werden, war aber mit erhöhtem manuellem Aufwand verbunden. Da das Agglomerierverhalten der halbtrockenen und feuchten Vormischungen durch die geringere Menge Zugabewasser schwieriger zu steuern war, wurde die trockene Zugabe als die Standardvariante vorgesehen. Dieses trockene Vormischen erfolgte zur Staubunterdrückung durch langsames Rühren mit einer Kelle.

Die verwendeten Ausgangssande neigten beim Trocknen zum Bilden von festen Klumpen (Sandagglomerate). Speziell bei den Vorversuchen zum Agglomerieren mit trockener Zugabe kam es zur Bildung von Agglomeraten, die einen Sandkern hatten. (Siehe *Abbildung 4.26*) Deshalb wurden die Sande vor trockener Zugabe durch ein 2 mm Sieb gesiebt.

Kontinuierliche und diskontinuierliche Beschickung (Batchverfahren)

Ein Ziel dieser Untersuchung war das Erproben der kontinuierlichen Beschickung des Granuliertellers und des selbstständigen Überlaufs der fertigen Agglomerate. Das Vormischen erfolgte grundsätzlich in 10 kg-Chargen. Beim Anfahren des leeren Granuliertellers wurde dessen Oberfläche mit dem Wassersprüher befeuchtet und dann ca. 3 kg



Mischung in den Teller gegeben. Die weitere Zugabe erfolgte dann im Wechsel mit dem Einsprühen von Wasser, dem Abstreifen von am Teller haftenden Anteilen sowie der Anpassung von Neigung und Drehgeschwindigkeit des Tellers. Sobald im Prozessraum eine Menge größerer Partikel in der gewünschten Korngröße von > 16 mm zu erkennen war, wurden diese mit der Siebschaufel entnommen. Dabei wurden durch die Spaltbreite der Siebschaufel von ca. 12 mm auch Agglomerate kleiner 16 mm ausgetragen. Durch leichtes Schütteln der Siebschaufel wurden feinkörnige Bestandteile der Mischung, wie Sand und Agglomeratkeime, im Prozessraum belassen.

Zusätzlich wurde eine Konfiguration der Anlage erprobt, bei der die größten Agglomerate im Prozessraum von selbst über den Tellerrand fallen und somit eine kontinuierliche Entnahme besteht. Vereinzelt wurden Agglomerate größer 20 mm gefunden, die beim selbstständigen Austrag bei einer Freifallhöhe von 50 cm Strukturstörungen zeigten. Da sich beim Auftreten von Restsand im Prozessraum das selbstständige Austragen ausreichend großer Agglomerate deutlich verringerte, erfolgte die Entnahme der fertigen Agglomerate üblicherweise mit der Siebkelle.

Bei kontinuierlicher Beschickung und dem Austrag mit der Siebkelle kam es zur Ansammlung von Restsand im Prozessraum. Dafür wird abgeschätzt, dass bis zu 10 % des Sandes nicht zu Agglomeraten umgesetzt wurde. Anhängig von dem jeweiligen Prozesszustand enthielt der Restsand überwiegend einen geringen Anteil an Feinstkorn (siehe auch *Abbildung 4.35*). Die sich daraus ergebende Veränderung der jeweiligen Rezeptur wird nicht etwa ausgewiesen. Stattdessen wird die Restsandbildung als ein Betriebszustand des Granuliertellers angesehen, der bei einer Großanlage durch die Prozesssteuerung zu vermeiden ist. (Zur Restsandproblematik siehe auch *Abschnitt 4.5.1.4*!)

Bereits bei einer Menge von 30 % Restsand im Prozessraum wurde der Agglomeriervorgang deutlich gestört, weil die großen Agglomerate begannen, in der Restsandmenge zu schwimmen, anstatt darauf zu rollen. Die Menge des Restsand erhöht sich mit der Länge des Aufenthaltes einer Mischung im Granulierteller. Diese Phase wurde als „Heraussammeln der Feinstanteile aus der Mischung durch einzelne große Agglomerate“ beschrieben. Da dieser Effekt bei allen Mischungen auftrat und sich zunächst auch durch Änderung der Maschinenparameter nicht vollständig vermeiden ließ, erfolgte der Betrieb beim Hauptteil der Versuche in einem „Semi-Batch-Verfahren“. Dabei erfolgte die kontinuierliche Beschickung nur für max 4 Mischungen (40 kg), dann das Entleeren und Wiederanfahren des Prozesses. Dieses Wiederanfahren ließ sich vermeiden, indem die Entnahme nicht mit der Siebschaufel erfolgte, sondern mit einer geschlossenen Kelle. Dadurch wurden aber auch kleine Agglomerate und nicht agglomerierte Mischungsanteile entnommen.



Abbildung 4.26. Erhärtete Agglomerate mit Sandbrocken als Kern nach der Einzelkorndruckprüfung; links VV3 mit Sand K2 im Kern; rechts VV4 mit Sand D2 im Kern

Quelle: Eigene

4.5.1.2 Granulierverhalten der Rezepturen

Erste Erfahrungen mit dem Verhalten der Granulieranlage im Rahmen der Vorversuche (VV1 bis VV22) wurden bei den Hauptversuchen zum zielsicheren Agglomerieren bei der Vielzahl der verschiedenen Rezepturen berücksichtigt.

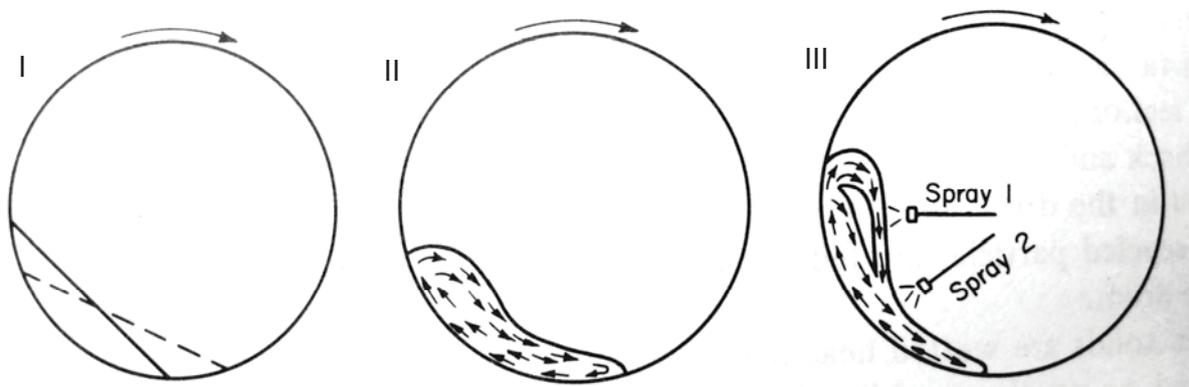


Abbildung 4.27: Prinzipielle Bewegungsmuster im Granulierteller

Quelle: [Sherrington / Oliver (1981), S. 62]

Das Granulierverhalten oder die „Granulierwilligkeit“ ist das Ergebnis des Zusammenwirkens der verschiedenen maschinentechnischen und stofflichen Parameter beim Agglomerieren einer Rezeptur. Die Beschreibung des Granulierverhaltens für die einzelnen Rezepturen sowie die Unterscheidung des Verhaltens an verschiedenen Herstelltage ist als Tabelle ‚Granulierverhalten Vorversuche und Hauptversuche‘ in *Anlage 21* dargestellt und enthält auch die Eintragungen aus den Labortagebüchern.

Dabei werden außerdem zu den Rezepturen die Drehzahl und Neigung des Tellers, die Art seiner Oberfläche und die Randhöhe sowie die Art der Beschickung und der Feuchtezustand



der Zugabemischung aufgelistet. Die Geschwindigkeit der Bildung von Agglomeraten, ihre Größe sowie die Tendenz zur Bildung von Restsand und ein augenscheinlicher Eindruck zur Feuchte der fertigen Agglomerate sind dort bewertet und mit einer Beschreibung der Besonderheiten zusammengefasst.

Im Folgenden wird das Agglomerierverhalten von zwei typischen Rezepturen beschrieben:

Beschreibung der Herstellung von K07 (siehe *Abbildung 4.17, S. 62*):

- Anmischen der beabsichtigten Rezeptur in 10-kg-Chargen, Mischen des trockenen Gemenges von Hand bis zur Homogenität.
- Vorbefeuchten des Granuliertellers und danach Einwiegen des Wassersprühbehälters
- zügige Zugabe von ca. 3 kg Mischung in den rotierenden Teller und Start des Agglomerierprozesses mit einigen kräftigen Sprühstößen Wasser
- weitere alternierende Zugabe von Mischung und Sprühwasser
- schnelles Bilden großer Agglomerate, die nach kurzer Zeit wieder verschwanden, so dass sich dann viele kleine im Prozessraum befanden
- Nach Zugabe etwa der halben Mischung keine sichtbare Neubildung von Agglomeraten mehr, sondern eine Zunahme der kleinen Agglomerate sowie des Überschusses von Grobsand (Restsand)
- Abfischen von "fertigen" Agglomeraten von 8 bis 20 mm Größe mit Siebschaufel im Wechsel mit weiterem Einrieseln von Mischung und einigen Sprühstößen Wasser
- Die Füllmenge zeigte ein ruckartiges Abrutschen der Füllmenge ohne rollenden Anteil auf der Tellerfläche (siehe Teilbild (a) in *Abbildung 4.27*).
- Es erfolgte die Variation mehrerer Parameter, um wieder das Abrollen der Agglomerate über die Tellerfläche zu erzeugen:
 - steile und flache Neigung mit Leitblechen und Abstreifern
 - gleichzeitige Zugabe von trockener Mischung und Wassersprühnebel
 - geringer und hoher Füllstand des Prozessraumes
 - teilweise Entleerung und Neubefüllung zum Entfernen des überschüssigen Grobsandes
 - Beschickung mit vorbefeuchteter Mischung
- Es erfolgte keine wesentliche Verbesserung des Agglomerierverhaltens und es wurde keine weitere Charge von K07 hergestellt.
- Auskippen des Granuliertellers (Agglomerate und Restsand gemeinsam) und Abdecken in Nachbehandlungsgefäß, Nachwiegen des Wassersprühbehälters und Dokumentieren der zugegebenen Menge.



Beschreibung der Herstellung von D03 und D04 (siehe *Abbildung 4.17*, S. 62):

- Anmischen der beabsichtigten Rezeptur in 10-kg-Chargen, Mischen des trockenen Gemenges von Hand bis zur Homogenität.
- Vorbefeuchten des Granuliertellers und danach Einwiegen des Wassersprühbehälters
- zügige Zugabe von ca. 3 kg Mischung in den rotierenden Teller und Start des Agglomerierprozesses mit einigen kräftigen Sprühstößen Wasser
- weitere kontinuierliche oder alternierende Zugabe von Mischung und Sprühwasser
- zügiges Bilden von großen Agglomeraten 16/32 mm mit sehr lockerer Struktur, die dann zügig etwas kleiner und fester werden; Bewegungsmuster der Füllmenge des Tellers gemäß Teilbild (c) in *Abbildung 4.27*
- Abfischen der "fertigen" Agglomerate von 8 bis 20 mm Größe mit Siebschaufel im Wechsel mit weiterem Einrieseln von Mischung und einigen Sprühstößen Wasser
- Nach 25 bis 30 min war jeweils keine weitere Neubildung von Agglomeraten mehr zu verzeichnen. Durch das Abfischen großer (fertiger) Agglomerate befanden sich fast ausschließlich nur noch Agglomeratkeime 2/4 mm und grober Restsand im Teller. (Bewegungsmuster im Teller gemäß Teilbild (b) in *Abbildung 4.27*)
- Auskippen des Granuliertellers (Agglomerate gemeinsam mit Restsand) und Abdecken in Nachbehandlungsgefäß, Nachwiegen des Wassersprühbehälters und Dokumentieren der zugegebenen Menge.

Zustand A: (trocken rollend) trat besonders deutlich beim Herstellen der Sorten K11 und K12 am 10.01.2011 sowie am 07.09.2011 bei den Sorten D04, D11 und K04 für die Schwindversuche auf. Der „Zustand A“ wird erreicht, indem abwechselnd trockene Mischung in den Prozessraum eingestreut wird und zum Nachbefeuchten Wasser sehr fein eingesprüht wird. Durch die kurzen Intervalle von Sprühen und Einstreuen kommt es gelegentlich zu einer Folge von Aufbauzyklen der Agglomerate, die als Schalen an Querschnitten der Partikeln sichtbar werden. (siehe *Abbildung 4.28*)

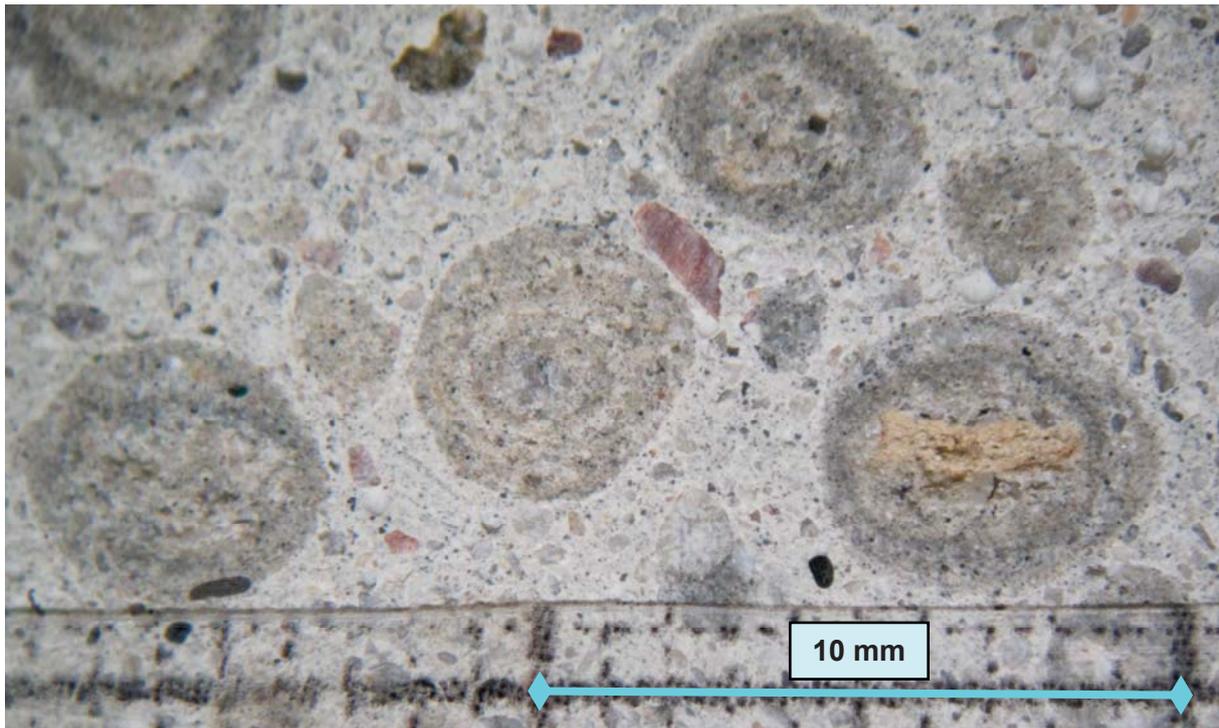


Abbildung 4.28: Schnittfläche Agglomeratbeton mit sichtbarer Schalenbildung der Agglomerate

Quelle. Eigene

„Zustand A“ zu erzeugen, erwies sich als günstig, um nach Unterbrechungen, wie dem vollständigen oder teilweisen Entleeren des Granuliertellers, den Agglomerier-Prozess wieder anzufahren. Dazu wurde zunächst der Tellerboden befeuchtet und dann trockene Mischung in den drehenden Teller eingestreut. Dadurch klebte zunächst ein großer Anteil der Mischung am Tellerboden. Spätestens nach weiterem Sprühen begannen einzelne Partikel zu rollen und auf ihrem Weg über den mit Mischung bedeckten Tellerboden Substanz aufzunehmen. Die Startkörner oder „Agglomeratkeime“ ließen sich durch kurzes kräftiges Sprühen auf die zunächst noch trockene Oberfläche der auf dem Tellerboden klebenden Mischung erzeugen oder auch als externe Agglomeratkörnung 2/4 mm, zum Beispiel als Rest vom Sieben älterer Mischungen zugeben. Durch abwechselndes Einstreuen trockener Mischung und Einsprühen von Wasser konnte nun eine Phase zügigen Aufbaus der Agglomeratkörner erreicht werden. Dabei waren teilweise auch schnelle und deutliche Änderungen der Neigung des Granuliertellers ($\pm 7^\circ$) notwendig, um den gewünschten Prozesszustand zu erhalten. Es bildeten sich Agglomerate von 8 bis 10 mm Größe. → Dabei zeigte sich ein charakteristisches Klappern der Agglomerate beim Anstoßen an den Tellerrand. Im Rahmen dieser Versuche wurden die Agglomerate größer 8 mm mit einer Siebkelle abgeschöpft.

In dieser Phase des Agglomerierprozesses kam es zu einer „Selbstreinigung“ des Tellerbodens von den anhaftenden Teilen der Mischung. Um Kornklassen größer als 10 mm zu erzeugen, war eine verstärkte Wasserzugabe und der Übergang zu „Zustand C“ erforderlich.



Zustand B: (feucht klumpend) trat besonders deutlich beim Herstellen der Sorten K11 und K12 am 10.01.2011 auf. Bei reichlicher, schneller Wasserzugabe - auch mit dem Sprüher - bildeten sich schnell „feuchte Kugeln“. Diese entstanden aus einzelnen, vom starken Sprühen überfeuchteten, mittelgroßen Agglomeraten, die ihre Nachbarn miteinander verklebten und dann „feuchte Kugeln“ mit Durchmessern von 16-25 mm formten. Diese waren nur kurze Zeit stabil und zerfielen durch die Aufnahme weiterer feuchter Agglomerate zu einem Mörtelbrei. Dieser neigt dazu, am Tellerboden anzukleben. Durch größere Neigung des Tellers und konsequentes Abstreifen von am Tellerboden anklebenden Anteilen sowie dem Einsatz von Führungsblechen im Prozessraum ließ sich „Zustand B“ in „Zustand C“ überführen.

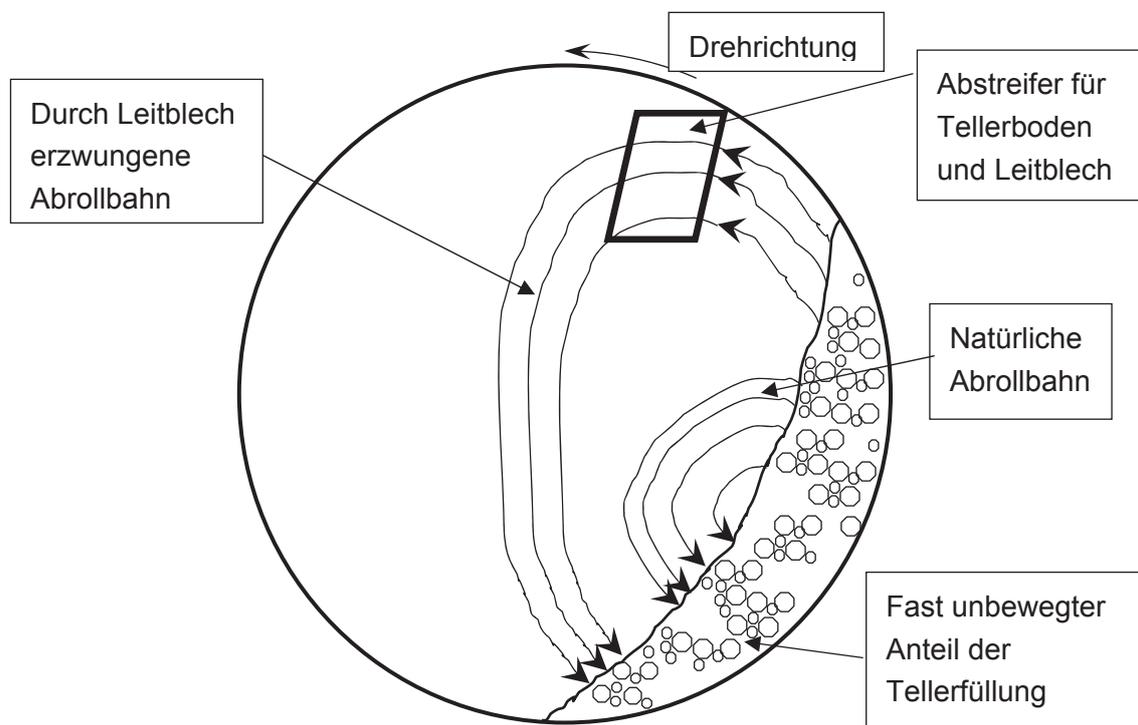


Abbildung 4.29: Schematische Ansicht des Granuliertellers mit Leitblech und erzwungenem Abrollweg

Quelle: Eigene

Zustand C: (feucht rollend) trat besonders deutlich beim Herstellen der Rezeptur K07 am 27.07.2010 sowie am 07.09.2011 beim Herstellen der Sorten D04, D11 und K04 auf. Dabei konnte der direkte Übergang von Zustand A in Zustand C wiederholbar dargestellt werden. „Zustand C“ ist durch zügiges Agglomeratwachstum und eine eher feuchte Mischung im Granulierteller gekennzeichnet. Dies wurde durch das Einstreuen trockener Mischung im Wechsel mit starken Sprühstößen und die zwangsweise Führung des Tellerinhaltes durch Leitbleche auf dem gewünschten Abrollweg der Agglomerate erreicht. Außerdem wurde Zustand B durch dauerhaften Einsatz von Abstreifblechen verhindert. (Siehe *Abbildung 4.29*) Diese lösten am Tellerboden klebende Anteile, lockerten die feuchte Mischung auf und



gaben den Weg der Füllmenge im Prozessraum vor. Unterstützt wurde das Erhalten dieses Zustandes durch schnelle und deutliche Änderungen der Tellerneigung und der Drehgeschwindigkeit, um das Abrollen zunächst in Gang zu setzen und dann die Abrollgeschwindigkeit zu begrenzen.

Das Erhalten vom „Zustand C“ (feucht rollend) trotz der „klebrigen Mischung“ wurde durch einen steilen Winkel des Granuliertellers und Abstreifer und Leitblech im oberen Bereich des Tellers gewährleistet. Teile der Mischung bleiben an Boden und Wänden des Tellers haften und werden kurz vor dem Erreichen des oberen Scheitelpunktes durch einen Abstreifer angehoben und so abgestreift, dass die Partikel auf den gewünschten Rollweg für den Agglomeriervorgang gebracht werden. Durch den recht steilen Tellerboden wird das Abrollen der Partikel zusätzlich unterstützt. So werden auch unmittelbar bei starker Wasserzugabe übermäßig feuchte Klumpen in der Mischung in Bewegung gehalten. Größere, feuchte Brocken werden durch die dabei auftretende Walkbeanspruchung zerteilt. Ihre Bruchstücke nehmen dann Partikel aus trockneren Bereichen der Mischung auf. Bei der Agglomeratherstellung am 25.03.2011, bei der „Zustand C“ der Mischung zuverlässig erreicht wurde, erfolgte die Entnahme der Agglomerate mit ausreichender Größe mit einer Siebschaufel. Bei etwas erhöhter Wasserzugabe war die Tendenz zum Bilden von unerwünscht großen Agglomeraten von über 30 mm zu beobachten.

Allgemein zum Agglomeriervorgang:

Die Bildung von sehr großen Agglomeraten - also größer 30 mm - sollte vermieden werden, da hierbei die Gefahr des Entstehens von Verformungen und Rissen (teilweise nur innere) gesehen wird. Die Beanspruchung der einzelnen Agglomeratkörner aus dem Anprall gegen Behälterwände und gegenseitigem Druck wächst mit ihrer Größe. Daher sind sowohl die Füllmenge der Granuliertellers und damit seine Randhöhe sowie die Schichtdicke der Frischlinge bei der Lagerung zum Erhärten begrenzt.

Um die Eigenschaften der Agglomerate aus verschiedenen Agglomerierzuständen zu ermitteln, wurden in den verschiedenen Zuständen des Agglomerierverhaltens Proben entnommen. In *Abschnitt 4.6.3* wird für diese Proben D04a, D04b, D04c - entsprechend den Prozesszuständen A, B und C - die Rohdichte und die Packungsdichte bestimmt.

Gelegentlich kam es zur Bildung von *Sekundäragglomeraten*. (siehe *Abbildung 4.30*)

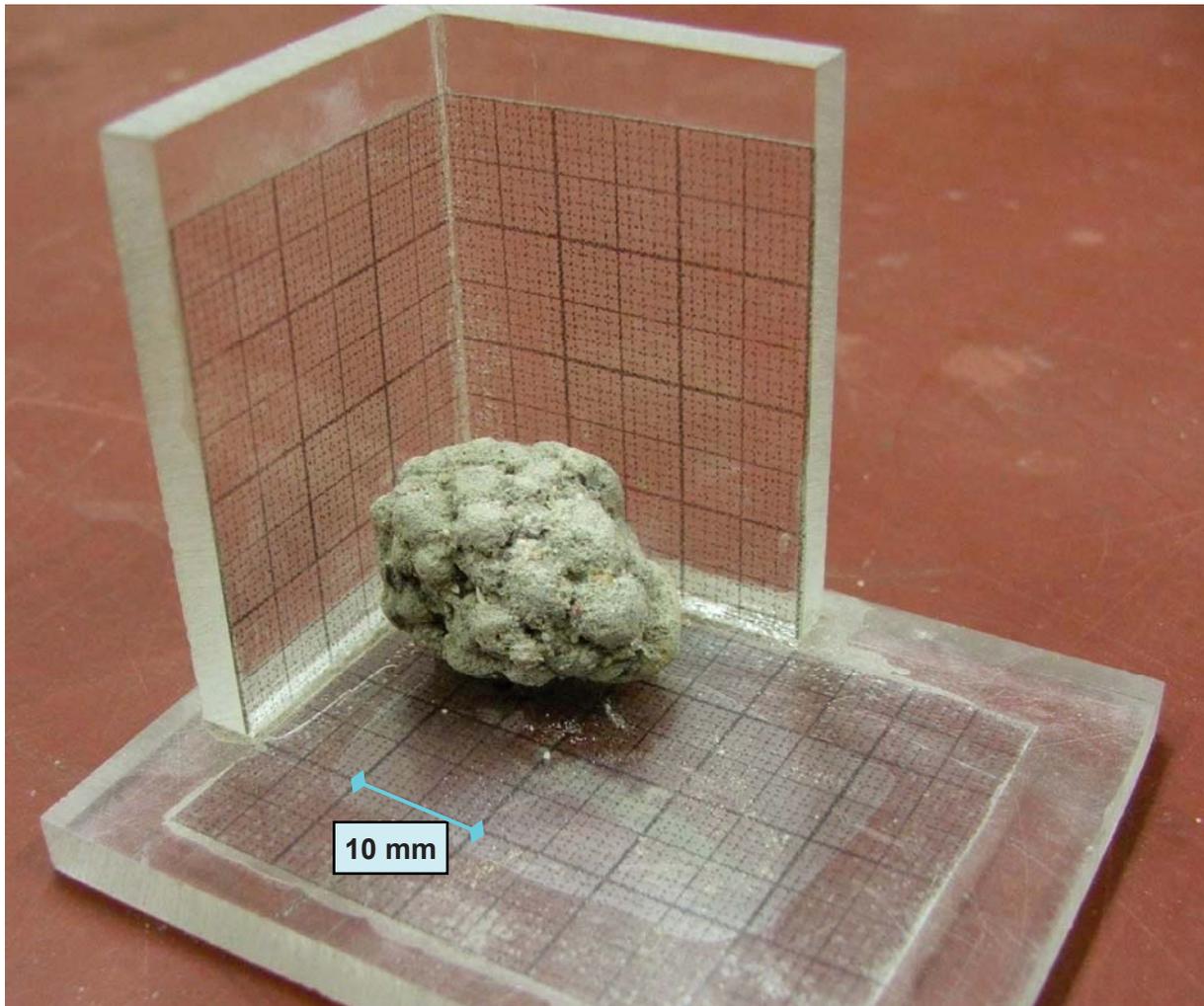


Abbildung 4.30: Ansicht eines Sekundäragglomerates in der Winkelschablone zur Einzelkornvermessung

Quelle: Eigene

Dies trat vor allem dann auf, wenn eine Wasserzugabe zu einer im Prozessraum stagnierenden Mischung erfolgte. Besonders wenn bereits eine große Menge Agglomeratkeime (ca. 2/4 mm) vorlagen, bildeten sich daraus größere Agglomerate mit maulbeerartiger Struktur. Bei diesen sammelte sich in den Zwickeln zwischen den Primäragglomeraten vor allem Mittelsand. Während diese im Prozess-Zustand B bald wieder zerfielen, wurden z.B. in den Mischungen D04 und K07 größere Anteile davon in der erhärteten Agglomeratmenge gefunden. Diese wurden als Sekundäragglomerate mit geprüft. Die Ergebnisse sind in den *Abschnitten 4.6.2* und *4.6.3* mit dargestellt.

Fazit zum Agglomerierverhalten und Ausblick auf großtechnische Granulierttechnologie:

Das favorisierte Verfahren zur Herstellung von Sand-Zement-Agglomeraten auf dem für diese Untersuchungen genutzten Granulierteller basiert auf dem optimalen Betreiben der Anlage innerhalb der „Zustände A und C“. Dies konnte durch die maschinentechnischen Parameter (Neigung, Drehzahl, Abstreifer und Leitbleche sowie Randhöhe) eingestellt werden. Damit kann auf die Erfordernisse aus veränderlichen Mischungsparametern



eingegangen werden, während die Art der Zugabe also „trockenes Vormischen und abwechselndes Wassersprühen und Einstreuen“ bleiben sollte. Als Regelgrößen ergeben sich:

- Zugabe von Wasser und Mischung
- Neigung und Drehgeschwindigkeit
- Abstreifer (Fest montierte Abstreifer wurden nur kurzzeitig eingesetzt. Die überwiegende Zeit erfolgte das Abstreifen des Randes und der Tellerfläche nach Bedarf mittels Kelle. Bei fest oder dauerhaft montierten Abstreifern und Leitbleichen müsste eine Möglichkeit zu deren Reinigung vorgesehen werden, da solche Einbauten durch anhaftende Mischungsteile langsam zuwachsen.)

Die Feuchte der Ergebnismenge ergab sich dem Augenschein nach recht gleichmäßig. Die zugegebenen Wassermengen betragen zwischen 7,5 und 14,9 Massen-% der trockenen Zugabemenge.

Fazit zum Granulierverhalten

In [German (1989), S. 208] wird die Empfehlung gegeben, Rezepturen zu verwenden, die reich an Grobkorn sind, um hohe Packungsdichten zu erreichen. Es wurde festgestellt, dass diese Rezepturen ein schlechtes Agglomerierverhalten (Tendenz zur Bildung kleinerer Agglomerate und zur Ansammlung von Restsand) zeigen. Durch eine konsequente Prozesssteuerung, zum Beispiel das Erzwingen des erwünschten Abrollweges durch Leit- und Abstreifbleche sowie das Zulassen eines zwischen den Zuständen A und C alternierenden Prozesszustandes, können auch mittelsandreiche Rezepturen agglomeriert werden. Ein Mindestgehalt an Feinstkorn ist dabei sicherzustellen. Dieser ist von den Möglichkeiten zur Anlagensteuerung bzw. bei manueller Steuerung der Anlage von der Erfahrung und dem Geschick des Anlagenführers abhängig.

4.5.1.3 Ausbeuten

Zur Beschreibung der Ausbeuten des Agglomeriervorganges werden im Folgenden die Ausbeuten in den einzelnen Korngrößenklassen im Dreistoffdiagramm über ihren jeweiligen Rezepturpunkt dargestellt (siehe *Abbildung 4.31* und *Abbildung 4.33*). Die Ausbeuten wurden ermittelt, nachdem die Ergebnismenge eines Agglomerierdurchganges soweit oberflächlich abgetrocknet war, dass eine Fraktionierung möglich war. Die Siebung erfolgte im Allgemeinen im Alter von 7 Tagen, nachdem am 3. Tag die Ergebnismenge aufgelockert wurde, um die Bildung von größeren, festen Brocken zu vermeiden. Die Ergebnismengen wiesen dann keine Staunässe auf und waren rieselfähig - also siebbar. Die Trennung erfolgte jeweils in die Kornklassen 0/2, 2/4, 4/8, 8/16, 16/32 und größer 32 mm.

Um beim Agglomerieren einen möglichst vollständigen Umsatz der Ausgangsstoffe zu erreichen, sollte sich im Idealfall kein Material der Kornklasse 0/2 mehr im Granulierteller befinden. Aus dem Ziel, die hergestellten Agglomerate als grobe Gesteinskörnung für die Herstellung von Beton einzusetzen, ergibt sich eine „Zielausbeute“ der Ergebnismenge des Agglomerierprozesses. In dieser wurde der Anteil der Kornklasse 0/2 auf Null gesetzt. Die



Anteile der verbleibenden Kornklassen ergeben sich entsprechend ihrer Anteile für Sieblinie B16 zu einer Summe von 100 %.

Da für die Betonherstellung im Rahmen dieser Untersuchung überwiegend die Sieblinie B mit 16 mm Größtkorn nach DIN 1045-2 Anhang L gewählt wurde, ergibt sich die folgende „Zielausbeute“ der Korngrößen für den Agglomerierprozess:

Kornklasse	Anteile in Vol %	
	Sollanteile für Sieblinie B16 gemäß DIN 1045-2	Ziel
8/16	24	41,4
4/8	20	34,5
2/4	14	24,1
0/2	42	0
Summe	100	100

Tabelle 4.14: Kornklassenanteile für Sieblinie B16 und daraus hergeleitete Zielanteile der Kornklassen der Agglomerate bezogen auf den Anteil grober Gesteinskörnung >2 mm der Normsieslinie

Quelle: DIN 1045-2, DIN EN 12620, Eigene

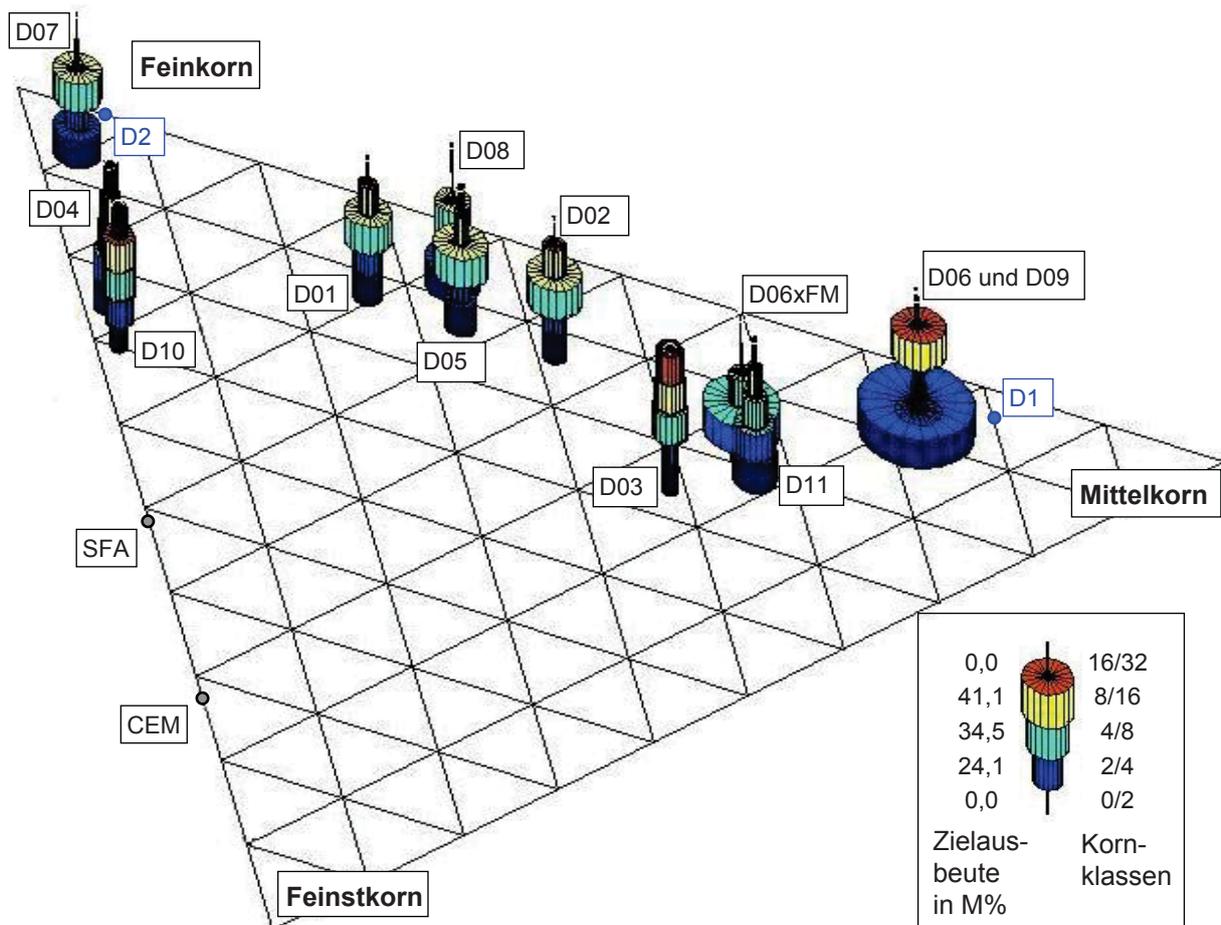


Abbildung 4.31: Ausbeuten der Rezepturen D; Der prozentuale Anteil der einzelnen Fraktion wird durch Durchmesser der Zylinder dargestellt.

Quelle: Eigene



Für die Betonherstellung wird die erforderliche feine Gesteinskörnung wie üblich gesondert dazugegeben. Zur Verdeutlichung ist diese „Zielausbeute“ in *Abbildung 4.31* und *Abbildung 4.33* neben dem Dreistoffdiagramm dargestellt.

In *Abbildung 4.31* gehen die Darstellungen der Rezepturen D06 und D09 wegen der großen Nähe der beiden Rezepturpunkte ineinander über und sind deshalb in *Abbildung 4.32* nebeneinander dargestellt. Zusätzlich sind in *Anlage 25* die Ausbeuten aller Rezepturen nebeneinander als Säulendiagramm zusammengestellt.

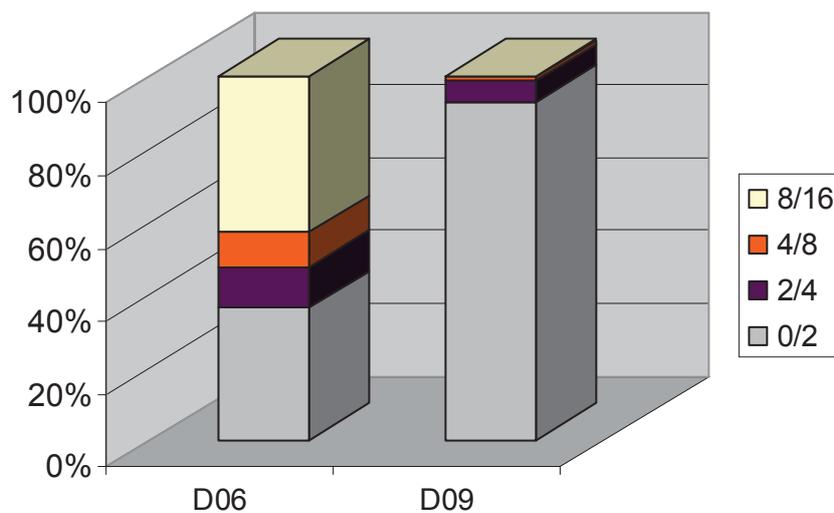


Abbildung 4.32: Ausbeuten von D06 und D09

Quelle: Eigene

Die Darstellung der Ausbeuten zeigt, dass die Schwierigkeiten, ausreichend große Agglomerate herzustellen, bei den meisten Rezepturen und in verschiedenen Bereichen des Dreistoffdiagramms auftreten. Zum Beispiel werden die sehr unterschiedlichen Ausbeuten der beiden Rezepturen D06 und D09, deren Rezepturpunkte sehr eng zusammenliegen, so interpretiert, dass die Ausbeute weniger von der Rezeptur, als vielmehr von den Randbedingungen während des Agglomerierens abhängt.

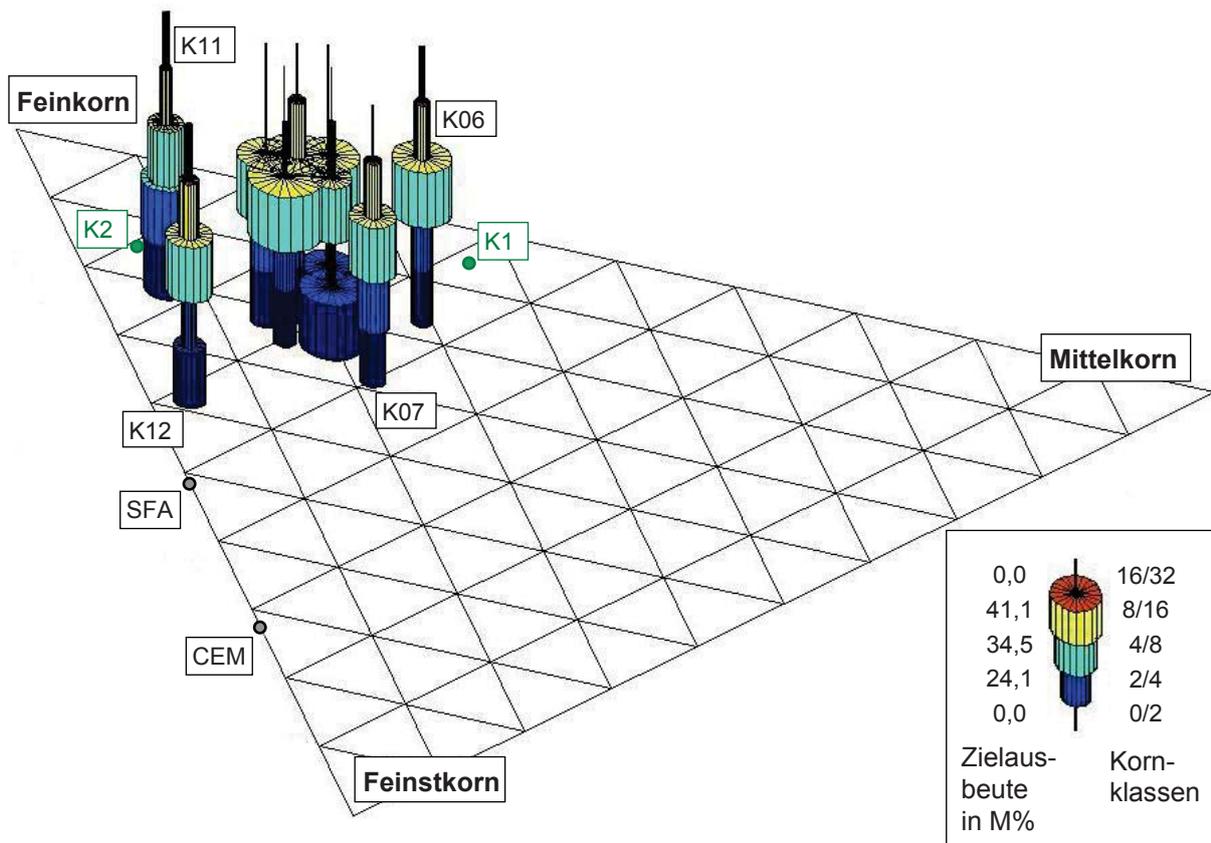


Abbildung 4.33: Ausbeuten der Rezepturen K

Quelle: Eigene

Auch bei den Rezepturen K fiel, wie in *Abbildung 4.33* und *Abbildung 4.34* erkennbar, der Hauptanteil der Ausbeute in der Kornklasse 4/8 an. Der wesentliche Unterschied der Granulierbedingungen gegenüber den Vorversuchen, auf den dies zurückgeführt wird, ist die relativ glatte, metallische Oberfläche des Granuliertellers. Demgegenüber war während der Vorversuche der Boden des Granuliertellers mit einer grob gelochten Gummimatte bedeckt und damit wesentlich rauher. Die Ausbeuten, die im Zuge der Vorversuche erfasst wurden, sind als Säulendiagramm in *Anlage 25, Blatt 2* dargestellt

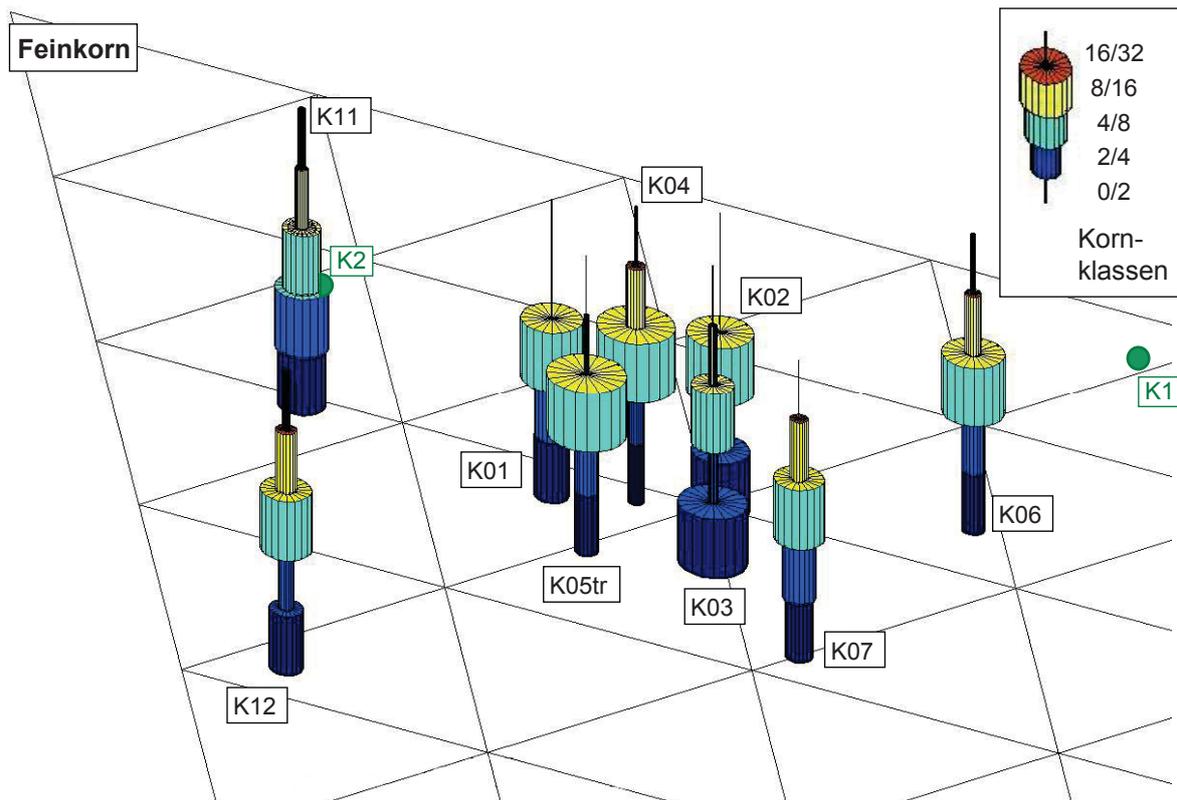


Abbildung 4.34: Vergrößerte Darstellung der Ausbeuten der Rezepturen K

Quelle: Eigene

Fazit zu den Ausbeuten

Die Lage der Rezeptur im Dreistoffdiagramm ist - bei den in dieser Untersuchung gewählten Grenzen - kein geeignetes Kriterium, um die zu erwartenden Ausbeuten einzuschätzen. Die Ausbeuten hängen stärker von den Prozesszuständen im Granulierteller ab als von den aufgegebenen Rezepturen.

4.5.1.4 Restsand

Während des Agglomerierens mit vorgegebenen Rezepturen zeigte sich immer wieder eine Tendenz zur Bildung einer Restsandmenge im Granulierteller. Die Bildung dieser Restsandmengen wird als eine versuchsbedingte Störung angesehen. Dieser Restsand entsprach einem gewaschenen Sand der Kornklasse 1/2 mm (siehe „Restsand grob“ in *Abbildung 4.35*). Darin befanden sich zunächst noch kleine Granulatkeime von 2 bis 4 mm Größe, die jedoch innerhalb weniger Minuten immer kleiner wurden und verschwanden. Da der verbleibende Restsand dann augenscheinlich - wie ein gewaschener Sand - kaum Feinstkornanteile enthielt, entstand der Eindruck, dass die in der Restsandmenge verbliebenen großen Agglomerate die Feinstkornanteile „heraussammeln“.

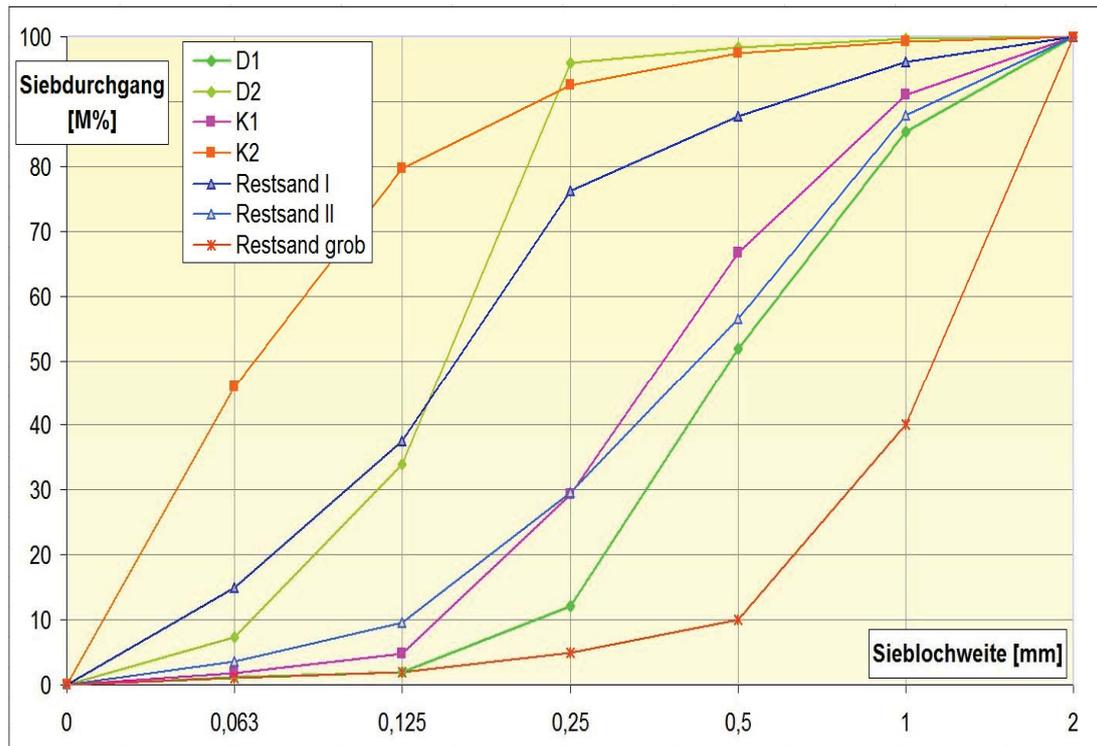


Abbildung 4.35: Darstellung der Restsande I, II und „Restsand grob“ im Vergleich zu Ausgangssanden

Quelle: Eigene

Bei den Versuchen mit quasi-kontinuierlicher Beschickung, wobei „fertige“ Agglomerate - also diejenigen in der gewünschten Größenklasse - entweder von selbst über den Rand des Tellers fielen oder mit einer Siebkelle entnommen wurden, kam es zu einer Akkumulation des Restsandes im Prozessraum auf bis zu 90 % der Füllmenge. Dabei entsprach das Bewegungsmuster der Füllmenge nicht mehr der für die Aufbauagglomeration gewünschten Form des Abrollens der größeren Agglomerate aufeinander, auf dem Tellerboden und auf der Menge der kleineren Partikel. Stattdessen kam es zu einem „Schwimmen“ vereinzelter größerer Agglomerate in der Überschussmenge des Restsandes. Dieser zeigte in seiner Gesamtheit das „für granulare Materie typische Fließverhalten“ im Granulierteller. Damit kann für die einzelnen großen Partikel keine Aufbauagglomeration stattfinden und sie werden durch die sie allseitig umströmenden kleinen Partikel abgeschliffen.

Die Versuche mit quasi-kontinuierlicher Beschickung wurden deshalb bei den meisten Durchgängen (vergleiche Zugaberegime Absatz 4.5.1.1) nach Durchsatz von 30 bis 40 kg unterbrochen, der Granulierteller entleert und der Granulierteller neu angefahren.

Bei dieser Entleerung des Prozessraumes besteht die Füllmenge aus Agglomeraten verschiedener Größen und Restsand. Dabei hat sich der Verbleib des Restsandes in dieser Ergebnismenge bis zum Sieben als günstig erwiesen. Durch die Einbettung der einzelnen Agglomeratkörner in den Restsand konnte eine Dicke der Schüttlage der Frischlinge von bis zu 50 cm erreicht werden, ohne dass Verformungen der einzelnen Agglomerate auftraten.



Die Änderung der Agglomeratrezepturen durch die Fehlmenge des Restsandes wird in der weiteren Untersuchung nicht betrachtet, da andere Einflüsse, wie im Fazit zu *Abschnitt 4.5.1.2* beschrieben, wesentlich größere Effekte haben.

4.5.1.5 Nachbehandlung

Nach den 7 Tagen abgedeckter Lagerung wiesen die Ergebnismengen keine Staunässe mehr auf und waren rieselfähig - also siebbar. Die Siebung erfolgte dann in die Kornklassen 0/2, 2/4, 4/8, 8/16, 16/32 und >32.

Die Nachbehandlung der Sand-Zement-Agglomerate bestand vor allem im Verhindern von frühem Austrocknen. Dazu verblieb die dem Prozessraum entnommene Agglomeratmenge zusammen mit vorhandenem Restsand nach der Herstellung in einem dichten Gefäß und wurden mit Folie abgedeckt. Ein Nachbefeuchten der Agglomerate erfolgte frühestens einen Tag nach Herstellung. Da die frischen Agglomerate durch die Kapillarkräfte zwischen ihren feuchten Bestandteilen zusammengehalten werden, bewirkt eine lokale Wassersättigung des Porenraums der Agglomerate im frischen Zustand einen Abbau dieser Haltekräfte und Zerfall des Agglomerates.

Generell verblieben die Frischlinge für 3 Tage abgedeckt in diesem Gefäß. Dabei wurden sie üblicherweise am 2. Tag etwas nachbefeuchtet und am 3. Tag durchgerührt oder umgeschüttet, um das Bilden von größeren, zusammenhängenden Brocken zu verhindern. Dieses Auflockern konnte bei einigen Rezepturen, wie zum Beispiel Rezeptur D06 vom 13.01.2011, bereits nach einem Tag erfolgen, ohne dass die einzelnen Körner brachen oder zerrieben wurden. Wenn die Agglomerate erhärten konnten, ohne in den ersten Tagen aufgelockert zu werden, neigten sie dazu, an ihren Berührungspunkten zusammenzuhaften.

So erfolgte bei der Rezeptur K06 kein Auflockern nach 3 Tagen mit der Folge, dass sich nach 7 Tagen Erhärtung in der Ergebnismenge des Agglomerierprozesses große fest aneinander klebende Bereiche ausgebildet hatten, die sich nicht mehr von Hand, sondern durch Klopfen mit einem Hammer in die einzelnen Agglomerate zerlegen ließen.

Nach üblicherweise 7 Tagen wurde die Ergebnismenge durch Siebung in die Korngrößenklassen aufgeteilt. Danach erfolgte entweder die weitere Lagerung mit Schutz vor Austrocknung oder die sofortige Verarbeitung zu Agglomeratbeton.

Die Rezeptur D03 wurde ab einem Alter von 1 d bis 7 d zum Erhärten unter Wasser gelagert. Danach dauerte es weitere 7 Tage (Lagerung in einem offenen, flachen Gefäß in einer Laborhalle bei ca. 18°C) bis die Agglomeratmenge soweit oberflächlich abgetrocknet war, dass das Sieben möglich wurde. Nach dem vollständigen Trocknen dieser Agglomerate zeigten sie einen weißen Belag an der Oberfläche, der als Kalziumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mit beginnender Karbonatisierung identifiziert wurde.

Vor dem Ansteifen des Zementes und dann bis zum Ausbilden einer ausreichenden Festigkeit müssen die Agglomerate vor dem direkten Kontakt mit Wasser geschützt werden, da dieses die Adhäsionskräfte aufheben kann, die die frischen Agglomerate zusammenhalten. Es wird der Schutz vor Wasserzutritt innerhalb der ersten 24 h nach



Herstellung der Agglomerate empfohlen. Die Lagerung der erhärtenden Agglomerate unter Wasser sollte grundsätzlich vermieden werden, um die Ablagerung von Calciumhydroxid an ihrer Oberfläche zu vermeiden.

Als zulässige Lagerhöhen der Frischlinge im Alter von 0 bis 1 Tag wurden 30 cm Dicke ermittelt. Bei normaler Festigkeitsentwicklung der Agglomeratrezeptur kann die Dicke der Schüttlage von Tag 1 bis 3 auf 60 cm erhöht werden und nach dem Sieben an Tag 7 bis zu 100 cm betragen, ohne dass bleibende Verformungen der Agglomeratkörner auftreten. Die Schütt- und Freifallhöhen der frischen Agglomerate wurden bei dieser Untersuchung auf 30 cm begrenzt, um bleibende Verformungen einzelner Agglomeratkörner zu vermeiden. In den Machbarkeitsstudien von [Holle (2007) und Holle (2008)] wurden Agglomerate erzeugt, die höhere Freifallhöhen und Auflasten schadlos überstanden.

4.5.2 Rohdichte, Porengehalt

Die Packungsdichte der Agglomerate wird als eine der maßgebenden Einflußgrößen auf die Qualität der Agglomerate angesehen. Bei einer Erhöhung der Packungsdichte wird durch die erhöhte Anzahl von Kornberührungspunkten und das intensivere Verzahnen der Körner beim Erhärten des Zementes sowie die Verringerung des Porenraums eine Verbesserung von Festigkeit, Dauerhaftigkeit und Verformungsverhalten erwartet.

4.5.2.1 Rohdichten der frischen Agglomerate

Als geeigneter Parameter zur Prozesssteuerung bietet sich die Rohdichte der frischen Agglomerate an, da sie mit der Packungsdichte als einem Qualitätsparameter korreliert. Die Packungsdichte ergibt sich bei bekannter Rezeptur³ direkt aus der Rohdichte der frischen Agglomerate (*Frischdichte*). Für die Bestimmung dieser Frischdichte kann das Gewicht einer Probe, bestehend aus einer Anzahl frischer Agglomerate, durch Wiegen einfach bestimmt werden. Damit besteht das Problem in der Ermittlung des Volumens der unregelmäßig geformten Agglomerate, ohne dabei ihre Struktur zu stören - also ihr Volumen zu verändern. Verdrängungsverfahren in Wasser, z.B. ein LP-Topf oder ein Pycnometer, scheiden dafür aus, weil die frischen Agglomerate in Wasser die sie zusammenhaltenden Kapillarkräfte verlieren und zerfallen.

Stattdessen wurden Versuche durchgeführt, die Volumenverdrängung der Frischlinge in Öl in einem Messzylinder zu bestimmen. Die Ergebnisse davon sind in *Tabelle 4.15* und *Abbildung 4.36* dargestellt. Bei den Versuchen Nr. 4 und 6 wurde eine größere Probenmenge in einen Messzylinder mit Wasser gefüllt. Wie erwartet, zerfielen die Agglomerate und die in den Frischlingen enthaltenen Luftporen stiegen auf. Bei der Ablesung des verdrängten Volumens ergaben sich somit für diese beiden Versuche geringere Werte und somit erhöhte Rohdichten. Das Prüfverfahren der Frischrohddichte in Öl

³ Dass die Rezeptur konstant ist und den eingesetzten Ausgangsstoffen entspricht, ist durch die Prozesssteuerung sicherzustellen. Das bedeutet, dass z.B. die Ansammlung von Restsand bei kontinuierlicher Beschickung zu vermeiden ist oder ein Batch-Verfahren zum Einsatz kommt.



wurde nach mehreren Versuchen wegen des erforderlichen Laborantenaufwandes als unter Praxisbedingungen nicht geeignet angesehen.

In der folgenden *Tabelle 4.15* und in *Abbildung 4.36* wurden die theoretischen Werte der Rohdichte und der Frischdichte der Gemische nach folgenden Formeln ermittelt:

$$\rho_{0,rech} = m_{ges,tr} / \left(\frac{m_{K1}}{\rho_{0,K1}} + \frac{m_{K2}}{\rho_{0,K2}} + \frac{m_{D1}}{\rho_{0,D1}} + \frac{m_{D2}}{\rho_{0,D2}} + \frac{m_{CEM}}{\rho_{0,CEM}} + \frac{m_{SFA}}{\rho_{0,SFA}} \right) \quad \text{(Formel 4.12)}$$

und

$$\rho_{0Fr,rech} = m_{ges} / \left(\frac{m_{K1}}{\rho_{0,K1}} + \frac{m_{K2}}{\rho_{0,K2}} + \frac{m_{D1}}{\rho_{0,D1}} + \frac{m_{D2}}{\rho_{0,D2}} + \frac{m_{CEM}}{\rho_{0,CEM}} + \frac{m_{SFA}}{\rho_{0,SFA}} + \frac{m_{Wasser}}{\rho_{0,Wasser}} \right) \quad \text{(Formel 4.13)}$$

mit

m_{Index} - Trockenmasse des durch den Index bezeichneten Anteil der Rezeptur in [g]

$\rho_{0,rechn}$ - theoretische, porenfreie Rohdichte der jeweiligen Rezeptur in [g/cm³]

$\rho_{0Fr,rechn}$ - theoretische, porenfreie Frischdichte der jeweiligen Rezeptur in [g/cm³]

Die Massenzunahme des Zementes bei Beginn der Hydratation ist zum betrachteten Zeitpunkt gering und wird in den obigen Formeln vernachlässigt.

	Anteile der Mischungen in Massenprozent						% TM	Theoretischer Wert des porenfreien Gemisches [g/cm ³]		Bestimmung mit Messzylinder		
	K1	K2	D1	D2	CEM	SFA		Wasser	Rohdichte $\rho_{0, rech}$	Frischdichte $\rho_{0Fr, rech}$	Probe:	Einwaage [g]
Name	2,627	2,636	2,607	2,635	3,019	1,934						
VV3	47,6	47,6			4,8		9,6	2,648	2,314	Frischlinge VV3 in Öl	24	2,087
VV4-1		67				33	48,3	2,352	1,633	Frischlinge VV4-1 in Öl	19	2,568
VV4-2	47	43				10	10,0	2,543	2,230	Frischlinge VV4-2 in Öl	8	1,905
										Frischlinge VV4-2 in Wasser	100	2,381
VV4-3	43	39				18	9,1	2,470	2,200	Frischlinge VV4-3 in Öl	17	1,789
										Frischlinge VV4-3 in Wasser	100	2,222
VV4-4	40	40			10	10	14,6	2,572	2,142	Frischlinge VV4-4	18	2,169
VV5			40	40	10	10	9,9	2,564	2,247	Frischlinge VV5-1 in Öl	15	1,974
										Frischlinge VV5-4 in Öl	15	2,419
K04	40	40			10	10	13,5	2,572	2,166	Frischlinge K04 in Öl	18	2,011

Tabelle 4.15: Ergebnisse der Frischdichtebestimmung der Frischlinge mit Messzylinder

Quelle: Eigene



In Tabelle 4.15 sind diejenigen Rezepturen, für die die Ermittlung der Frischrohddichte im Messzylinder erfolgte, aufgelistet.

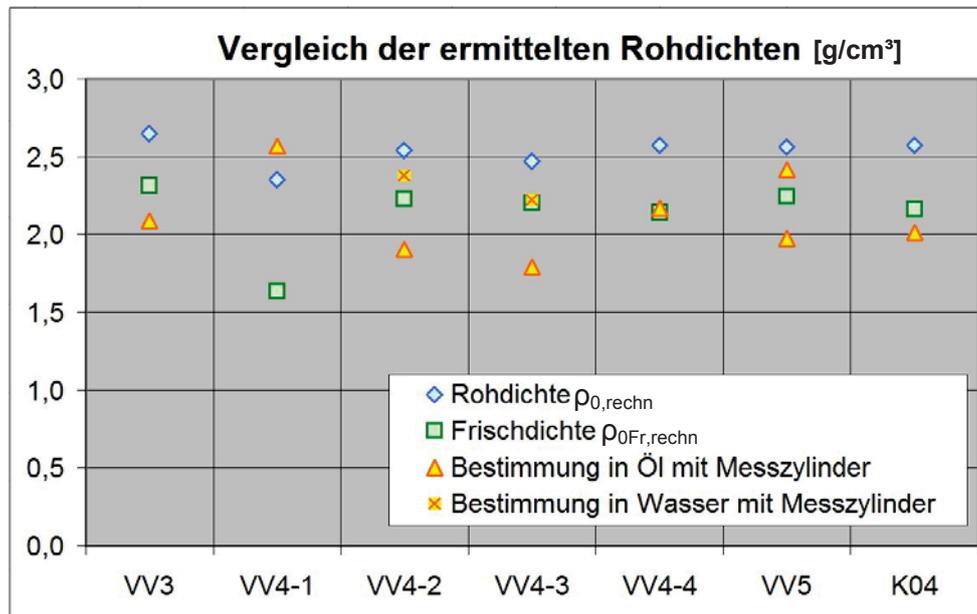


Abbildung 4.36: Darstellung der rechnerisch und mit Messzylinder ermittelten Rohdichten

Quelle: Eigene

Wegen des Arbeitsaufwandes, der bei der Frischdichtebestimmung im Zusammenhang mit der Ermittlung des Probenvolumens auftritt, erscheinen die Frischdichte und die daraus berechneten Größen Packungsdichte und Porengehalt nicht als praxisgeeignetes Überwachungskriterium für die Herstellung der Agglomerate. Daher blieben die bestimmten Werte auf die oben dargestellte Anzahl beschränkt.

4.5.2.2 Porengehalt der frischen Agglomerate

Die Packungsdichte von frischen Agglomeraten lässt sich bei bekannter Rezeptur auch aus ihrem Porengehalt berechnen. Allerdings sind die Haufwerksporen zwischen den Feststoffpartikeln der frischen Agglomerate sowohl mit Wasser als auch mit Luft gefüllt. Eine Bestimmung des Anteils der Luftporen am Gesamtporengehalt wäre z.B. mit einem LP-Topf möglich, wenn dieser mit Öl betrieben würde. Die Bestimmung des durch Wasser gefüllten Porenanteils würde z.B. ein Darr-Trocknen der jeweiligen Probe erfordern. Diese Verfahren sowie die oben beschriebene Volumenbestimmung einer Probe frischer Agglomerate werden als nicht praxisgeeignet angesehen. Daher wird die direkte Ermittlung der Porengehaltes von Frischlingen nicht weiter verfolgt.



4.5.3 Wassergehalt und w/z-Wert

Wie schon in *Abschnitt 4.5.1.2* beschrieben, erfolgte während der Herstellung der Agglomerate bereits eine augenscheinliche Einschätzung des Feuchtezustandes der Füllmenge des Tellers und der als „fertig“ entnommenen Agglomerate. Dabei wurden Kriterien, wie eine glänzende bis matte und sandige bis glatte-geschlossene Oberfläche sowie Farbe und Kugeligkeit der Agglomerate, aber auch das Auftreten von Restsand im Prozessraum als Indizien für die Feuchte und die aktuelle Agglomerierphase bewertet. Die Aufzeichnung dieser Eigenschaften erfolgte im Labortagebuch. Für eine Prozessüberwachung erscheinen diese Kriterien aus jetziger Sicht nicht geeignet, da bei Recherchen keine geeigneten Systeme gefunden wurden, mit denen durch zum Beispiel optische Erfassung und ein Bilderkennungssystem diese Parameter in solcher Genauigkeit bestimmt werden, dass dies für die Steuerung des Agglomerierprozesses ausreicht.

Als weitere Parameter, die sich aus der jeweiligen Agglomeratrezeptur zugegebenen Wassermenge ergeben, werden in den folgenden Bildern der Wassergehalt sowie der w/z-Wert und der äquivalente w/z-Wert für die Rezepturen der Hauptversuche dargestellt:

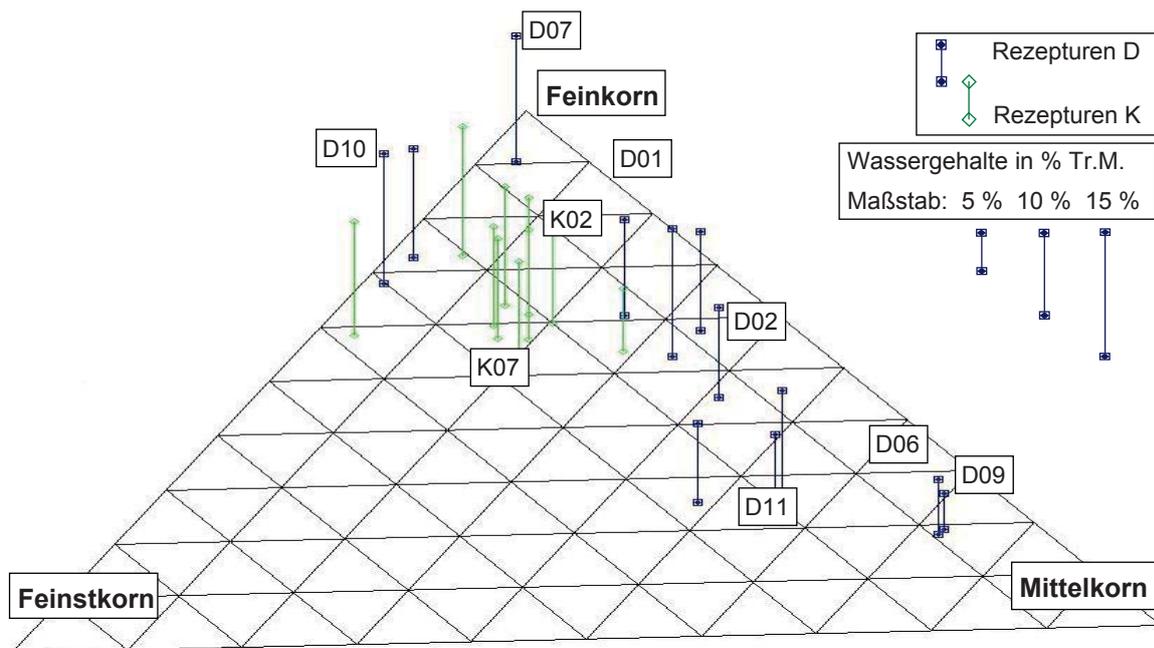


Abbildung 4.37: Wassergehalte der Rezepturen

Quelle: eigene

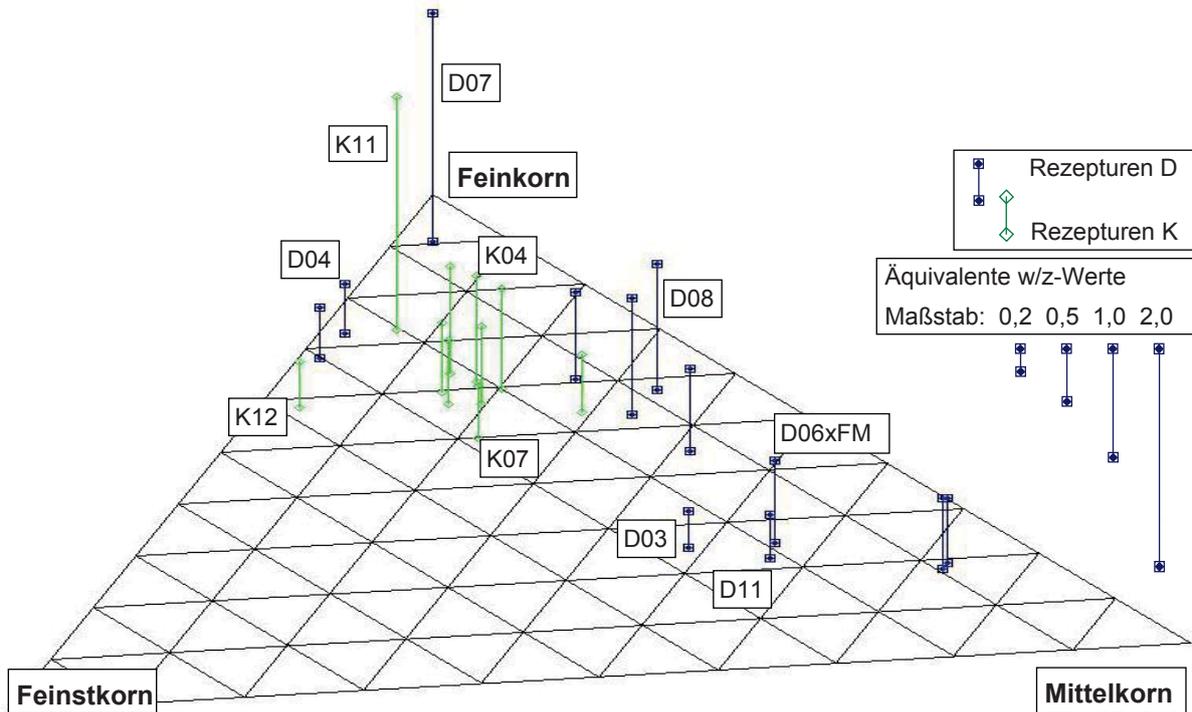


Abbildung 4.38: Äquivalente w/z-Werte der Rezepturen

Quelle: eigene

Der Wassergehalt der Agglomerate ist in erster Näherung kein Qualitätsmerkmal, sondern neben der stofflichen vor allem eine technologische Größe, mit der die Granuliergeschwindigkeit und die Größe der Agglomerate direkt beeinflusst werden können. Die zum Agglomerieren erforderlichen Wassergehalte der augenscheinlich sehr verschiedenartigen Agglomeratrezepturen liegen in einem Bereich von 4,2 bis 14,9 %TM der Trockenmassen der Mischung. Dabei ist sowohl in *Abbildung 4.37* als auch in der Tabelle der *Anlage 19* eine Tendenz zu erkennen, dass feinkornreiche Rezepturen hohe Wassergehalte von größer 12 % erfordern und Rezepturen mit hohem Gehalt an den groben Sanden D1 und K1 geringe Wassergehalte von kleiner als 8 Masse-% benötigen.

Der w/z-Wert, insbesondere der äquivalente w/z-Wert bei Anwesenheit von SFA, sind in der Betontechnologie als wesentliche, qualitätsbeeinflussende Größe bekannt. Damit setzt sich der Wassergehalt der Frischlinge aus dem Wassergehalt, der für die hydraulische Erhärtung der Bindemittel erforderlich ist (ergibt den wirksamen w/z-Wert) und einer Wassermenge, die rein physikalisch für den adhäsiven Zusammenhalt des Gemenges im frischen Zustand wirkt, zusammen. Beide Wassergehalte lassen sich versuchstechnisch kaum unterscheiden.

Es wird angenommen, dass durch die Vorbefeuchtung die Zugabe des Wasseranteils erfolgt, der zur Benetzung der großen Oberfläche der Mischung notwendig ist, während die Sprühzugabe von Wasser während der Agglomeration den zur adhäsiven Bindung der Partikel erforderlichen Anteil an Zwickelwasser liefert.

In der *Abbildung 4.38* sind die äquivalenten w/z-Werte, bezogen auf die reale Zugabewassermenge, dargestellt. (Für tabellarische Aufstellung siehe Rezepturliste in *Anlage 19*)



Bei der Rezeptur K04, die zu mehreren Zeitpunkten und mit verschiedenen Variationen des Zugaberegimes hergestellt wurde, treten w/z-Werte zwischen 1,18 und 1,35 sowie äquivalente w/z-Werte zwischen 0,84 und 0,97 auf.

Auffällig ist, dass die beiden Rezepturen D07 und K11 übermäßig hohe äquivalente w/z-Werte größer 2,0 aufweisen, während zum Beispiel die Rezepturen D04, K07 und K12 niedrige äquivalente w/z-Werte von kleiner 0,5 aufweisen. All diese Rezepturen haben Zugabewassermengen zwischen 12 bis 15 Masse%. Daher resultieren die Unterschiede der äquivalenten w/z-Werte vor allem aus den sehr unterschiedlichen Zement- und Flugaschegehalten.

Fazit zu Wassergehalt und w/z-Wert

Der Hauptanteil der zum Agglomerieren erforderlichen Wassergehalte liegt trotz augenscheinlich sehr verschiedenartiger Agglomeratrezepturen in einem engen Bereich von 10 bis 13 Masse%.

Der w/z-Wert oder der äquivalente w/z-Wert ist kein geeigneter Parameter zum Charakterisieren der Rezeptur, weil er mit dem Zement- und Flugaschegehalt sehr stark schwankt, aber die Einflüsse des Agglomerierprozesses nicht erfasst.

4.5.4 Verhalten der Frischlinge bei Druckprüfung

Der nächstliegende Ansatz, ein Spannungs-Dehnungsdiagramm für die Darstellung der Verformung der Agglomerate zu nutzen sowie eine Bruchspannung anzugeben, ist für die Frischlinge nicht sinnvoll, weil weder die Spannung noch die Dehnung geeignete Größen sind, um die Agglomerate untereinander oder mit anderen Materialien vergleichbar zu machen. Vielmehr eignet sich hierfür ein Kraft-Weg-Diagramm.

Die Form der Agglomerate wird für diese Betrachtungen als triaxiales Ellipsoid angenommen, das bei der Druckprüfung parallel zu seiner kürzesten Achse belastet wird. Damit ergibt sich durch die im Verhältnis zu den seitlichen Ausdehnungen der Prüfkörper geringe Höhe eine „zwiebelförmige“ Ausbreitung der Druckspannung in dem Agglomeratkorn. Durch die kompakte Form der Agglomerate liegen die beiden Lasteinleitungspunkte so nah beieinander, dass sich keine gleichmäßige Spannung über den Querschnitt einstellt. Stattdessen wird im Korn eine nichtlineare Spannungsverteilung erzeugt, bei der hohe Druckspannung in der Mitte zu den Rändern schnell zu Null abfällt. [Leonhardt (1975)]

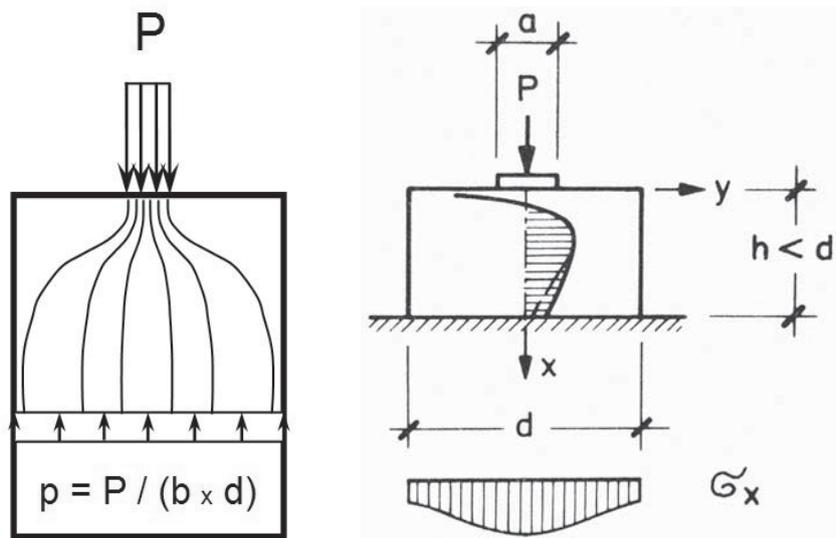


Abbildung 4.39: Lastausbreitung und resultierender Spaltzug an Kräfteinleitungspunkten

Quelle: Eigene; [Leonhardt (1975) S. 61]

Durch die Nichtlinearität der Spannung über den Querschnitt und die Abhängigkeit der Spannungsverteilung von den Abmessungen des Prüfkorns würde die Angabe einer Spannung eine Mittelwertbildung mit im Rahmen dieser Arbeit unerwünschter Verallgemeinerung erfordern. Die Anwendung des Begriffes Dehnung erfolgt im materialkundlichen Zusammenhang, um gleichmäßige Bereiche eines Materials unter definierter, gleichförmiger Belastung zu beschreiben. Auch dies ist durch die veränderlichen Abmessungen und die über Höhe und Querschnitt veränderliche Spannungsverteilung bei den zu prüfenden Agglomeraten nicht gegeben.

Stattdessen wird das Darstellen der Kraft-Verformungs-Linien als sinnvoll erachtet. Um diese für verschiedene Korngrößen der Agglomerate vergleichbar zu machen, wird die Verformung auf die Ausgangshöhe 1,0 des jeweiligen Korns bezogen und kann daher Werte von 1 bis >0 annehmen. Für einige Betrachtungen werden die Kraft-Verformungs-Linien auch auf die Bruchhöhe normiert angegeben.

Außerdem wird im Weiteren ausgehend von den Kraft-Verformungs-Linien auch die Resthöhe des jeweiligen Prüfkorns betrachtet. Zum Beispiel entspricht der Ausdruck „Resthöhe 0,95“ der bei Spannungs-Dehnungs-Linien verwendeten Dehnung von -5 %.

Entwicklung der Druckprüfeinrichtung für Frischlinge

Aus Beobachtungen und Erkenntnissen bei den Machbarkeitsstudien entstand die Idee, das Verhalten der Frischlinge bei Druckbelastung zu untersuchen, um aus ihrem Bruchverhalten Rückschlüsse auf ihre Eigenschaften wie die Packungsdichte und den Zusammenhalt - was eine Funktion des Wasser- und Feinstkorngehalt ist - zu ziehen oder eventuell eine Vorhersage ihrer Endfestigkeit zu ermöglichen.



Aus Vorversuchen zur Bestimmung des Bruchverhaltens und der dabei zu erwartenden Lasten ergab sich die Notwendigkeit der Erfassung einer Kraft-Weg-Kurve bei der Druckbelastung einzelner frischer Agglomeratkörner. Dazu wurde das in *Abschnitt 4.2.4* beschriebene Druckgerät mit Kraft- und Wegsensoren sowie einer von der Forschungswerkstatt E-Technik der TUHH entwickelten Software ausgerüstet, die je einen Messwert für Kraft und Weg jeweils zum gleichen Zeitpunkt bis zu 1000-mal in der Sekunde erfasst. Um mit derselben Prüfeinrichtung auch Festlinge und Agglomerate aller auftretenden Größen prüfen zu können, können darin verschiedene Kraftsensoren im Bereich von 10 - 40000 N sowie Wegsensoren mit 10 und 25 mm Messbereich eingesetzt werden.

Weitere Überlegungen betrafen die Art der Lastspitze der Druckprüfeinrichtung. Die kugelig bis oval geformten Agglomerate würden eine Kugelkalotte als Auflager und Laststempel benötigen, um bei Belastung eine das Ergebnis eventuell störende Vorverformung zu minimieren. Bei genauerer Betrachtung ist die Oberfläche sowohl der frischen als auch der erhärteten Agglomerate durch einzelne anhaftende oder aus der Oberfläche hervorstehende Sandkörner rau.



Abbildung 4.40: Frischlinge und Festlinge vor der Druckprüfung

Quelle: Eigene

Bei der Festigkeitsprüfung der Frischlinge haben sich Druckstempel und Widerlager aus Stahl als am besten geeignet herausgestellt. Für die Einzelkorndruckprüfung der Festlinge wurden, wie in *Abschnitt 4.6.2* beschrieben, Eignungsversuche mit verschiedenen Arten von Lastplatten durchgeführt.

Für das Druckgerät kamen bei allen weiteren Untersuchungen des Bruchverhaltens und der Bruchkräfte von Agglomeraten (Frischlinge und Festlinge) ein Druckstempel und Widerlagerteller aus Edelstahl mit ebenen Druckflächen (25 mm Durchmesser) zum Einsatz. (siehe *Abbildung 4.41*)



Abbildung 4.41: Agglomeratkorn in Druckprüfeinrichtung

Quelle: Eigene

Die Beschreibung im folgenden Absatz gilt sowohl für Frischlinge und auch für Festlinge:

Innerhalb einer Herstellcharge ist eine Gruppe von 15 bis 20 Agglomeraten für eine Prüfsérie auszuwählen. Die Agglomerate werden zur Druckprüfung auf die Mitte des Druckstempels auf ihre flache Seite gelegt. Sollte das zu prüfende Korn rollen, um so eine stabilere Lage einzunehmen, so wird es in dieser Lage wieder in die Mitte des Stempels gerückt und so geprüft. Damit ist sichergestellt, dass alle Prüfkörner in Richtung ihres kleinsten Durchmesser geprüft werden. (siehe auch *Abschnitt 4.5.3*)

Für die Frischlinge ergeben sich, wie in den folgenden Bildern dargestellt, typischerweise Bruchbilder mit 3 oder 4 Bruchebenen und Keilen an den Lasteinleitungspunkten.

Ein typisches Bruchbild von Frischlingen, das dem Versagensbild von erhärteten Betonproben entspricht, zeigt *Abbildung 4.42 rechts*. Hier ein großes Exemplar der Rezeptur K04 mit 48 mm Kornhöhe. Die äußeren Schalen sind abgeplatzt und in der Mitte bleibt ein Hyperboloid stehen.

Dabei entsteht an dem frischen Agglomeratkorn bei Druckbelastung eine Stauchung an beiden Lasteinleitungspunkten. Da diese Verformung gering zu den bei den Frischlingen gemessenen Gesamtverformungen ist, wird sie im Weiteren nicht gesondert betrachtet, sondern bleibt Teil der beobachteten Gesamtverformung.

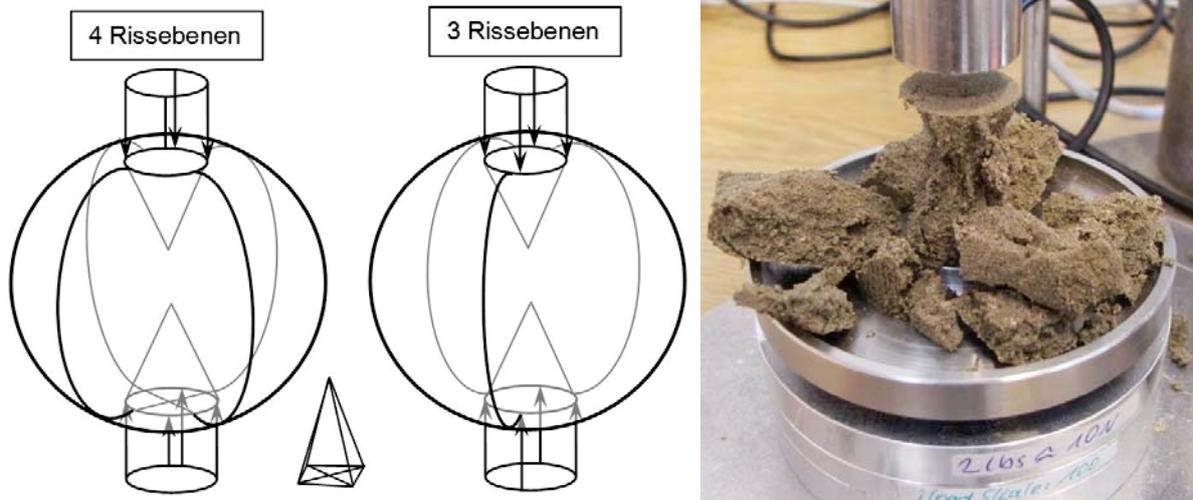


Abbildung 4.42: Schematische Rissbilder im Bruchzustand und Bild nach Einzelkorndruckprüfung eines sehr großen Frischlings

Quelle: Eigene

Es ist auffällig, dass das Bruchbild von frischen Agglomeratkörnern dem von erhärteten Betonprobekörpern sehr ähnlich ist. Das Versagen von Betonprobewürfeln tritt üblicherweise auch durch Querkzugversagen ein, wodurch die Seitenflächen schalenartig abplatzen. Dies wird überlagert mit den Besonderheiten, dass die beiden Lasteinleitungsflächen, also Ober- und Unterseite des Würfels, im Verhältnis zu den Gesamtabmessungen sehr dicht zusammen liegen, dass die Lasteinleitung über die gesamte Querschnittsfläche erfolgt und dass die sehr steifen Lasteinleitungsplatten der Prüfmaschinen eine Dehnungsbehinderung an den Lasteinleitungsflächen des Probewürfels erzeugen. Dadurch bilden sich an Betonprobewürfeln unter den Lasteinleitungsplatten pyramidenförmige Bereiche mit einem mehrachsigen Spannungszustand aus, die in den Spitzen ineinander übergehen. Dieses für Betonprobewürfel typische Versagensbild tritt bei den schlankeren Probezylindern ebenfalls auf, wird dort aber häufig von einseitigem Stabilitätsversagen überlagert.

Ein Vorschlag für die Modellvorstellung des Tragverhaltens der Agglomerate ist, dass diese nach einer lokalen Verformung an den Berührungspunkten von Druckstempel und Widerlager kreisrunde Krafteinleitungsflächen haben. Wenn diese Krafteinleitungsflächen gedanklich durch einen Zylinder verbunden werden, ergibt sich eine dem Betonprobezylinder ähnliche Belastungssituation. Bei der Druckprüfung eines Agglomerates ist die Mitte des Prüfkörpers deutlich dicker und annähernd symmetrisch. Dadurch tritt kaum einseitiges Stabilitätsversagen ein. Außerdem kommt es durch diese Dicke in dem zu prüfenden Agglomerat zu einer zwiebel förmigen Lastausbreitung, die Querkzugspannungen zufolge hat. Die sich unter den Lasteinleitungspunkten durch Dehnungsbehinderung einstellenden Kegel mit mehrachsigem Spannungszustand wirken dabei wie Spitzen oder bei Betrachtung eines Querschnittes wie die Schneidenlagerung im Spaltzugversuch.



Beim Versagen der Frischlinge zeigen sich häufig die mit den Spitzen ineinander geschobenen Kegel wie in *Abbildung 4.42*, während bei Festlingen meist 3 oder 4 Bruchstücke plötzlich zur Seite fallen und die Kegel des mehrachsigen Spannungszustandes an den Stahlflächen der Lasteinleitungspunkte haften.

Für typische Bruchfiguren der Festlinge siehe *Abbildung 4.55*, S. 121.

Verarbeitung der Messdaten

Die fortlaufend gespeicherten Messwerte werden zunächst als Reihen in Diagrammen dargestellt und auf Plausibilität geprüft. Anhand dieser Übersichtdiagramme (*Abbildung 4.43*) erfolgte das Unterteilen des gesamten Messlogs in die zu den einzelnen Prüfkörnern gehörenden Datensätze und deren Darstellung in eigenen Diagrammen für jedes einzelne Prüfkorn (*Abbildung 4.44*).

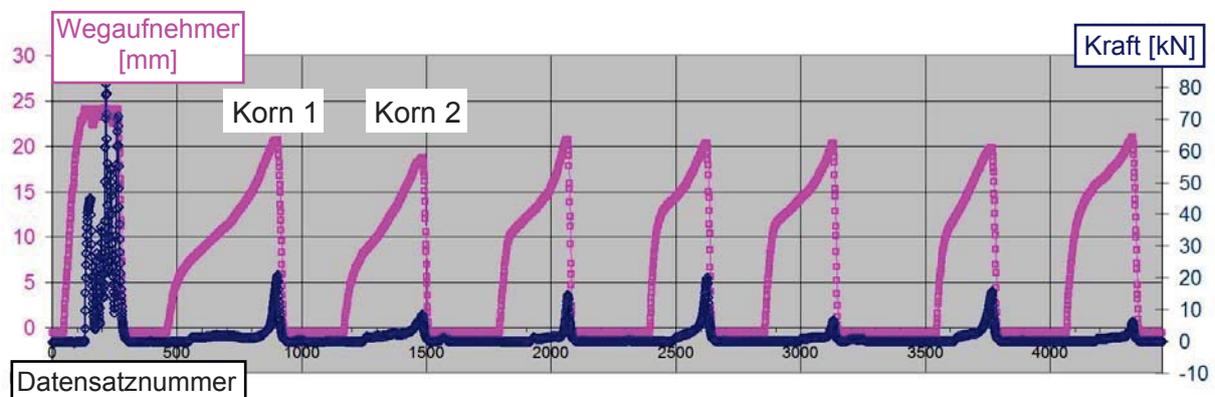


Abbildung 4.43: Beispiel für die Darstellung des Messlogs als Diagramm

Quelle: Eigene

Anschließend werden aus den Messdaten der Kraft- und Wegsensoren zunächst die Höhe des jeweils beprobten Agglomeratkornes ermittelt. Dazu wird der Wert des Wegsensors bei Berühren des zu prüfenden Kornes vom „Nullwert“ des Wegsensors beim Aufeinanderliegen der beiden Lastplatten subtrahiert. Die Differenz ist die Ausgangshöhe des Prüfkornes im unbelasteten Zustand. Nach Vorliegen der Ausgangshöhe des Prüfkornes werden die weiteren Wegdaten in Bezug auf die auf „1“ normierte Ausgangshöhe angegeben (Teilbild a).

An den Kraftmesswerten wird zunächst eine Nullwertkorrektur vorgenommen, indem der Grundwert des Kraftsensors unmittelbar vor Berühren des Prüfkornes von allen Messwerten subtrahiert wird (Diagramm b). Die Nullwertkorrektur wird durchgeführt, um ein Kriechen des Nullwertes des Sensors zu eliminieren, da dieses durch die Software zur gleichzeitigen Messwernerfassung nicht automatisch herausgerechnet wird. Außerdem entstand durch das aktuell zu prüfende Agglomeratkorn, dessen Gewichtskraft auf den Sensor wirkte, eine Vorbelastung.

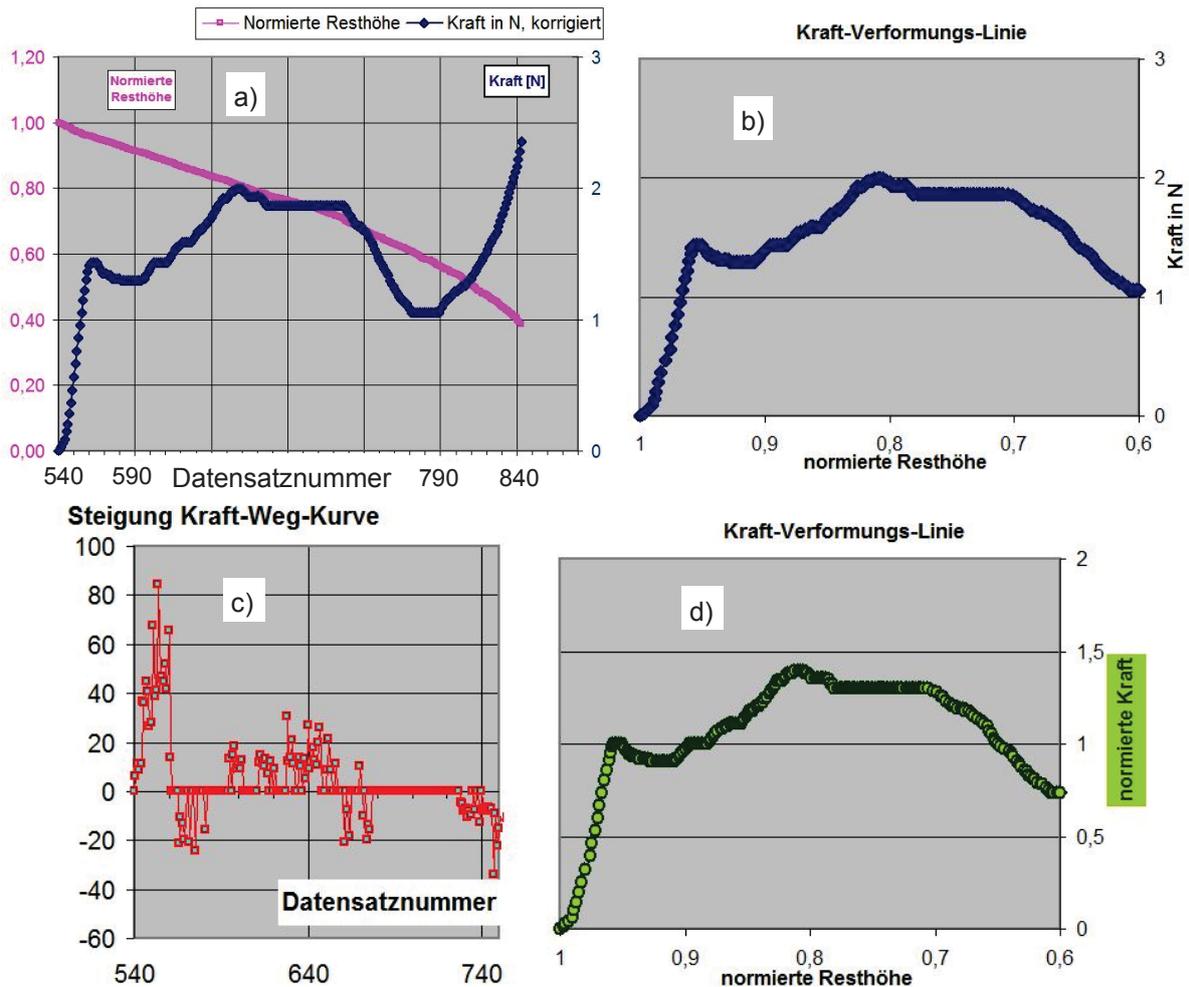


Abbildung 4.44: Darstellung der gemessenen und daraus errechneten Werte in eigenen Diagrammen für ein einzelnes Prüfkorn (Korn 1); hier zur Übersicht, für eine größere Darstellung siehe *Anlage 26*

Quelle: Eigene

Der Bruch des Prüfkorns oder das Auftreten des ersten Risses wird durch eine plötzliche Verringerung der Steigung der Kraft-Verformungs-Linie angezeigt. Um den genauen Punkt dafür zu bestimmen, werden die Anstiege der Kraft-Verformungs-Linie wie in Diagramm c) dargestellt verwendet. In Diagramm d) ist die Kraft-Verformungs-Linie mit auf 1 normierter Kraft dargestellt.

In *Anlage 23* und *Abbildung 4.10* ist die händische Vermessung einer Gruppe von erhärteten Agglomeraten den während der Einzelkorndruckprüfung ermittelten Werten gegenüber gestellt. Es ergibt sich eine gute Korrelation zwischen dem jeweils kleinsten von Hand gemessenen Durchmesser und den im Zuge der Druckprüfung bestimmten Kornhöhen. Daher werden die bei der Druckprüfung bestimmten Kornhöhen als zuverlässig angenommen und in den weiteren Untersuchungen verwendet.



Eigenschaften und Klassifizieren der Kraft-Verformungs-Linien der Frischlinge

Während der Herstellung der Frischlinge der verschiedenen Agglomeratrezepturen und Herstellzustände wurden Proben daraus der Einzelkorndruckprüfung unterzogen. Bei der Druckbelastung der Frischlinge zeigten sich in ihrer Verformungscharakteristik zwei typische Verhaltensmuster a) und b) und ein zusätzlicher Sonderfall c).

- a) sprödes Versagen (gekennzeichnet durch steilen Lastanstieg ohne mit bloßem Auge sichtbare Verformung und dann plötzliches Aufklaffen von 3 – 5 Rissen und steilem Lastabfall bei Resthöhe von 0,98 bis 0,95)
- b) weiches Verformen (deutlich sichtbares Verformen beim Lastanstieg; kein wesentlicher Kraftabfall beim Öffnen von Rissen; allmählicher Übergang der Kraft-Verformungs-Linie in die Form bei Pressung feuchten Sandes)
- c) Harter Kern (z.B. älteres, erhärtetes Agglomeratkorn oder Naturstein als Kern)

Die Prüfkörner wurden nicht nur bis zu ihrem erkennbaren Versagen geprüft, sondern mindestens bis zum Erreichen der 0,6-fachen Ausgangshöhe.

In *Abbildung 4.45*, *Abbildung 4.46* und *Abbildung 4.47* wird am Beispiel der Ergebnisse der Prüfung der Frischlinge D04b und D04c das typische Verhalten gemäß a) und b) gezeigt. Außerdem ist bei Korn 8 der Sorte D04c das Verhalten eines frischen Agglomeratkornes mit hartem Kern zu erkennen.

Ein beispielhaftes Arbeitsblatt der verwendeten Tabellenkalkulation mit der vollständigen Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten der Einzelkörner ist als *Anlage 26* beigelegt. Dabei sind die Übersichtsdiagramme und ihre Zerlegung in die Einzeldiagramme für jedes Korn der Prüfcharge erkennbar.

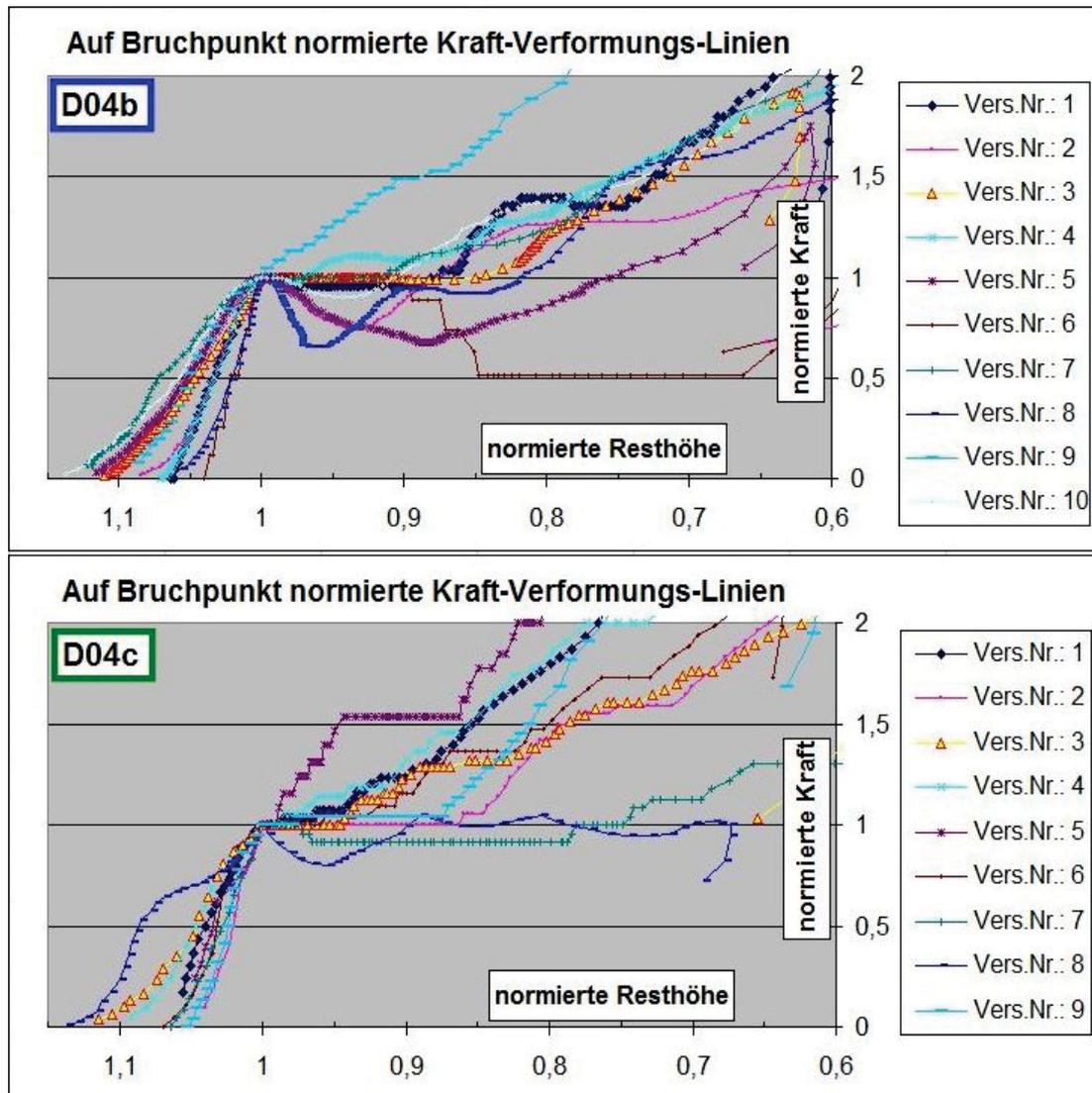


Abbildung 4.45: Typische Verläufe der Kraft-Verformungs-Linien von Frischlingen der Rezeptur D04 bei Druckprüfung

Quelle: Eigene

Für die weitere Auswertung ist es handlicher, anstatt der kompletten Kurvenverläufe von geprüften Frischlingen einen einzelnen Wert pro Prüfkorn als Kriterium zu ihrer Bewertung zur Verfügung zu haben. Als ein solcher Wert bietet sich der *Bruchpunkt* des Prüfkorns an. Als Bruchpunkt wurde in den einzelnen Kraft-Verformungs-Linien der Einzelkörner derjenige Punkt definiert, ab dem sich die Steigung der Kurve wesentlich verringert. Dieser Punkt kann sich, wie in *Abbildung 4.46* dargestellt, sowohl in einem weiteren Anstieg der Kraft-Verformungs-Linie, als auch zu Beginn einer Stagnationsphase ohne Kraftzuwachs oder vor einem raschen Kraftabfall befinden.

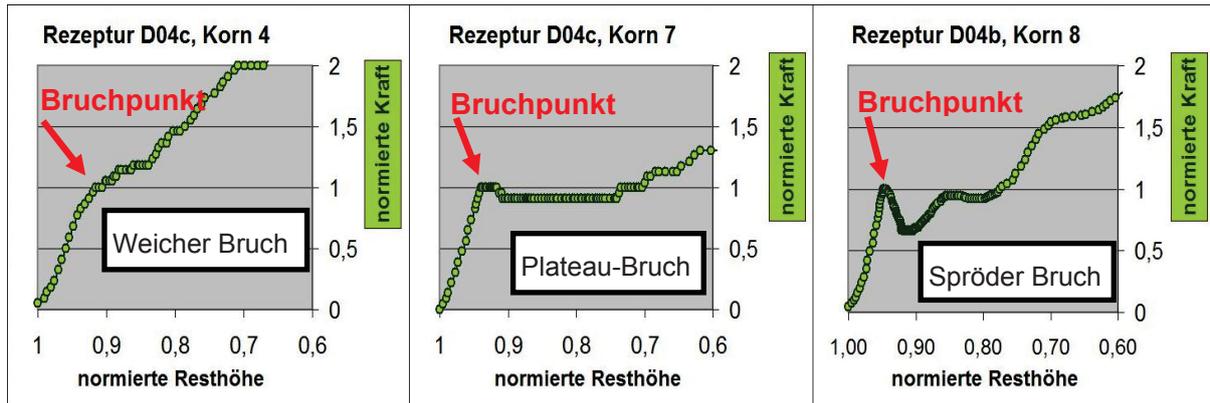


Abbildung 4.46: Typische Verläufe der auf Ausgangshöhe und Bruchkraft normierten Kraft-Verformungs-Linien von Frischlingen bei Einzelkorndruckprüfung

Quelle: Eigene

Durch die Darstellungen der Einzeldiagramme zeigte sich der Bruchpunkt des Prüfkorns als mehr oder weniger auffällige erste Anstiegsänderung im Kraft-Verformungs-Diagramm. Daraus erfolgte die Festlegung des Bruchpunktes für jedes Prüfkorn. Nur bei wenigen Einzelkörnern trat ein so untypisches Verhalten auf, dass dafür kein Bruchpunkt festgelegt wurde.

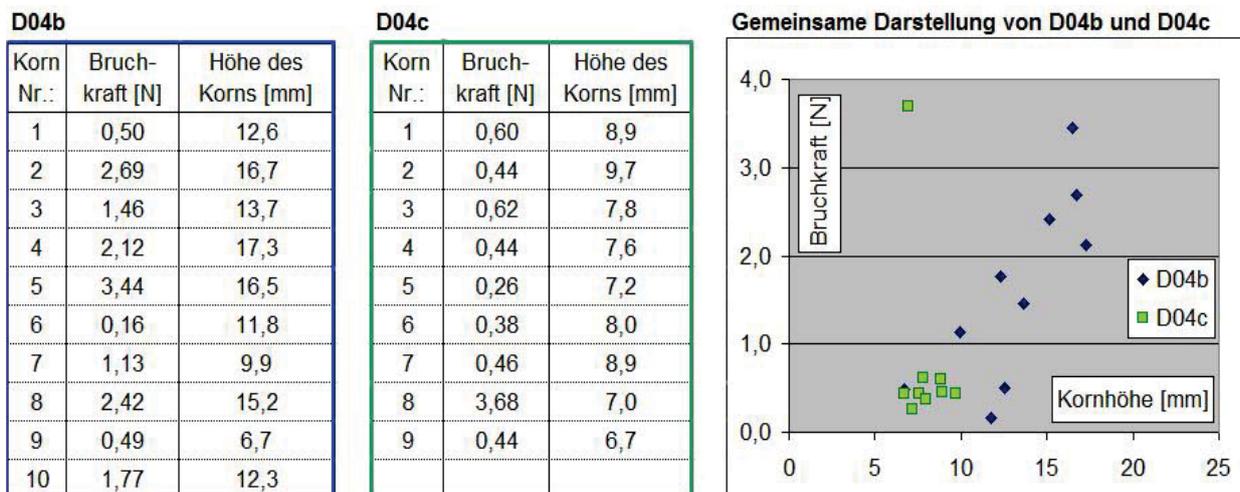


Abbildung 4.47: Darstellung der Bruchkräfte von D04b und D04c

Quelle: eigene

In dem Diagramm rechts in *Abbildung 4.47* ist die deutlich unterschiedliche Verteilung der Punktmengen der Bruchpunkte aus den beiden Prozesszuständen D04b und D04c zu erkennen. Einzelne Ausreißer wie Korn Nr. 8 aus D04c, in dessen Mitte sich ein ca. 4 mm großes Natursteinkorn befand, sind als untypisch für den jeweiligen Prozesszustand zu erkennen.

Die Höhe der Bruchkraft eines Agglomeratkornes ist der Anschauung nach von der Größe dieses Kornes anhängig. Daher wurden Überlegungen angestellt, welcher Größenparameter



der Agglomeratkörner zum Darstellen dieses Zusammenhanges am besten geeignet ist. Aus der „allgemeinen Anschauung“ kommen folgende Parameter in Frage:

- die Querschnittsfläche des Kornes im Grundriss x-y (Prinzip Kraft auf Fläche)
- die Hochschnittfläche des Kornes in der Ansicht x-z, y-z (Prinzip Spaltzug-Versagen)
- das Volumen des Kornes gegebenenfalls mit Begrenzung auf die „wirksamen Abmessungen“ gemäß des Verhältnisses in x-, y- und z-Richtung
- die Höhe des Kornes

Je nach Prozesszustand bilden sich Agglomerate mit kugelig, elliptischer oder unregelmäßiger Form. Diese haben durch den Rollvorgang im Prozessraum grundsätzlich gerundete Kanten und kompakte Abmessungen, also Verhältnisse der Hauptachsendurchmesser von kleiner 1:2. Beim ungestörten Ausbringen auf eine ebene Fläche legen sie sich so hin, dass ihre kleinste Hauptachse nach oben zeigt. Unter Berücksichtigung von *Abbildung 4.48* lassen sich die Abmessungen der einzelnen Körner aus der Ermittlung ihres kleinsten Durchmessers und der folgenden Annahme für die maximalen Abmessungen hinreichend genau eingrenzen:

$$x : y : z \leq 2 : 2 : 1$$

Formel 4.14

- Mit: x - Durchmesser in horizontaler x-Richtung
 y - Durchmesser in horizontaler y-Richtung
 z - Durchmesser in vertikaler z-Richtung

Gemäß der folgenden Abbildung wird das an einer Einzelkorndruckprüfung teilnehmende Volumen länglicher oder plattiger Prüfkörper durch die Dicke (hier Höhe) des Prüfkörpers auf die Werte gemäß obiger Formel begrenzt.

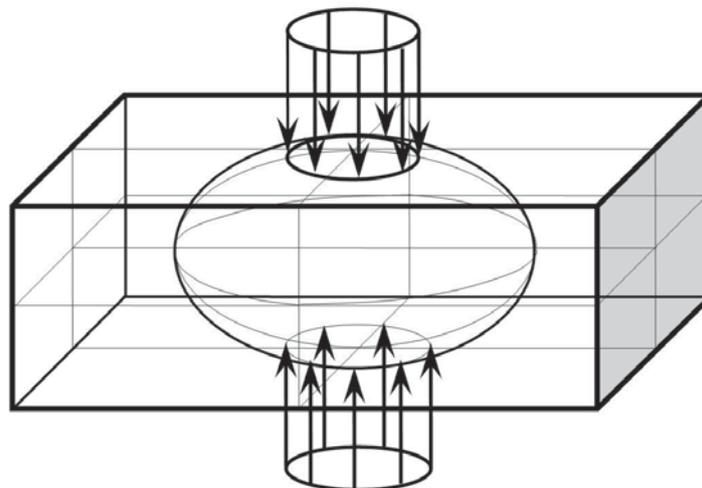


Abbildung 4.48: Wirksame Abmessungen eines wenig kompakten Körpers

Quelle: Eigene



Betrachtung des Bruchverhaltens der Frischlinge unter verschiedenen Aspekten:

1. Feststellungen zur Gleichmäßigkeit:
 - a. bei gleichen Korngrößen innerhalb einer Rezeptur und Charge
 - b. Gleichmäßigkeit verschiedener Chargen einer Rezeptur
 - c. Abweichungen zwischen den Korngrößen innerhalb einer Rezeptur
2. Unterschiede zwischen den Rezepturen
3. Anstieg der Kraft-Verformungs-Linie
4. Bruchpunkt der Frischlinge

Zu 1.) Feststellungen zur Gleichmäßigkeit

Wird das Wertefeld der *Abbildung 4.47* statistisch bewertet, ergeben sich folgende Werte:

Rezeptur	D04b		D04c	
	max Kraft [N]	Höhe des Kornes [mm]	max Kraft [N]	Höhe des Kornes [mm]
Standardabweichung	1,07	3,3	0,115	0,99
Mittelwert	1,62	13,3	0,45	8,09

Tabelle 4.16: Statistische Kenngrößen von zwei Chargen von D04

Quelle: Eigene

Bei der gröberen Fraktion 8/16 der Rezeptur D04b zeigt sich eine durchschnittlich normale Verteilung der Kornhöhe, so dass bei dem Mittelwert von rund 13 mm \pm 3 mm Standardabweichung etwa die Streubreite der Kornklasse 8/16 mm erfasst ist. Der Mittelwert der Bruchkraft wurde mit 1,6 N und \pm 1,1 N Standardabweichung ermittelt.

Dagegen beträgt bei der feineren Fraktion 4/8 mm der Rezeptur D04c der Mittelwert der Kornhöhe rund 8 mm \pm 1 mm Standardabweichung und der Mittelwert der Bruchkraft 0,45 N mit \pm 0,12 N Standardabweichung. Diese Fraktion ist auffällig einkörnig.

Diese Messergebnisse zeigen beispielhaft die Abhängigkeit der ermittelten Bruchkräfte von der Korngröße der Frischlinge. Bei dem Beispiel ist die Bruchkraft der gröberen Fraktion rund 4-mal größer als die der nächstfeineren Fraktion. Auffällig ist auch, dass die Streuung der ermittelten Kräfte bei der gröberen Fraktion, ausgewiesen durch die Standardabweichung, rund 10-mal größer ist als bei der feineren. Dieser Zusammenhang lässt sich bei fast allen Versuchen nachweisen.

Die Ursachen für die auffällig unterschiedlichen Streuungen werden zum einen in der höheren Größenstreuung der groben Fraktion gesehen, da größere Prüfkörper auch größere Prüfkkräfte erfordern. Weiterhin sind bei der Charge D04b prozessbedingt, in diesem Fall durch schnelle Bildung größerer Agglomerate, Partikel entstanden, die mehr Möglichkeiten



zur Bildung von Fehlstellen zulassen und dadurch die Streuung erhöhen. Werden die Prüfergebnisse der Einzelkorndruckprüfung mehrerer Chargen einer Rezeptur wie im folgenden Beispiel für die Rezeptur K04 zusammengefasst, ergeben sich daraus die unten dargestellten Funktionen.

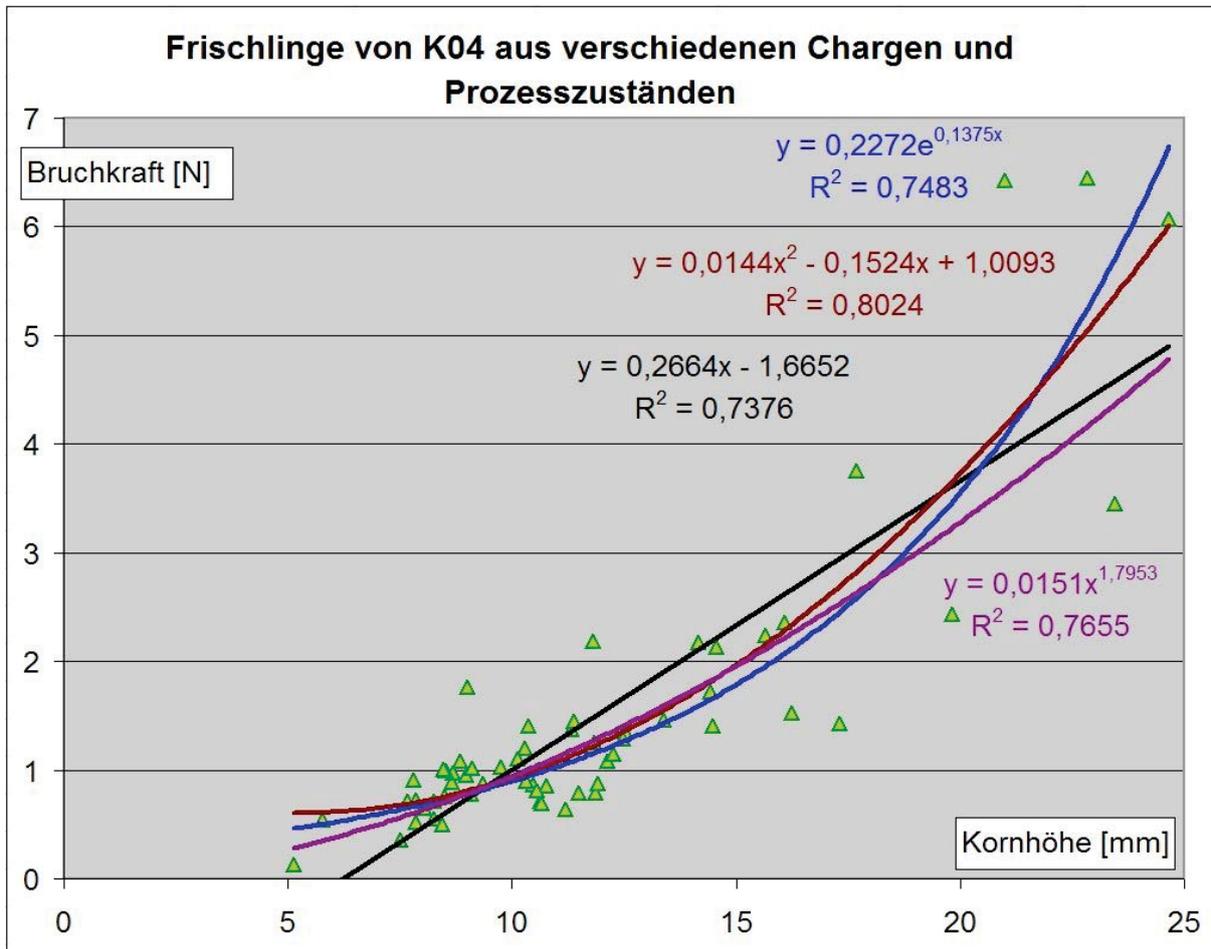


Abbildung 4.49: Regressionsanalyse an Prüfergebnissen von Frischlingen verschiedener Chargen von Rezeptur K04

Quelle: Eigene

Beim Test mehrerer Kurvenformen ergibt sich, dass die quadratische Funktion die Werteschar am besten beschreibt. Demnach kann die zu erwartende Bruchkraft der Frischlinge von der jeweiligen Kornhöhe für die Rezeptur K04 in den Grenzen von 5 bis 25 mm mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,8024 (einer Eintrittswahrscheinlichkeit von ca. 80 %) vorausgesagt werden:

$$B_{\text{frisch}} = 0,0144 * h^2 - 0,1524 * h + 1,0093 \quad \text{(Formel 4.15)}$$

B_{frisch} Bruchkraft des Frischlings in [N] gemäß der oben festgelegten Definition des Bruchpunktes als deutliche Neigungsänderung der Kraft-Verformungs-Linie

h Kornhöhe, geringster Durchmesser eines Agglomeratkornes (z-Achse) in [mm]



Die weiteren in *Abbildung 4.49* dargestellten Regressionsfunktionen, insbesondere die Potenzfunktion und die Exponentialfunktion, erscheinen für eine Beschreibung der Abhängigkeit der Bruchkraft von der Kornhöhe ebenfalls geeignet. Dafür sind zusätzliche Prüfungen nach weiterer Einengung der Eigenschaften der Agglomerate und zum Beispiel der Möglichkeit zur statistischen Auswertung des Bruchverhaltens zu empfehlen.

Zu 2.) Unterschiede zwischen den Rezepturen

Bei der Darstellung der Bruchkräfte mit den zugehörigen Kornhöhen der einzelnen Agglomeratkörner sind Unterschiede zwischen den Wertegruppen der jeweiligen Rezepturen erkennbar. In dem folgenden Diagramm zeigen die Regressionsgeraden der beispielhaft dargestellten Rezepturen D05 und K07 unterschiedliche Anstiege von 0,153 für D05 und 0,358 für K07. Die Rezeptur K07 enthält bei einer Zusammensetzung 60 : 0 : 20 : 20 doppelt soviel Bindemittel wie die Rezeptur D05 mit 40 : 40 : 10 : 10.

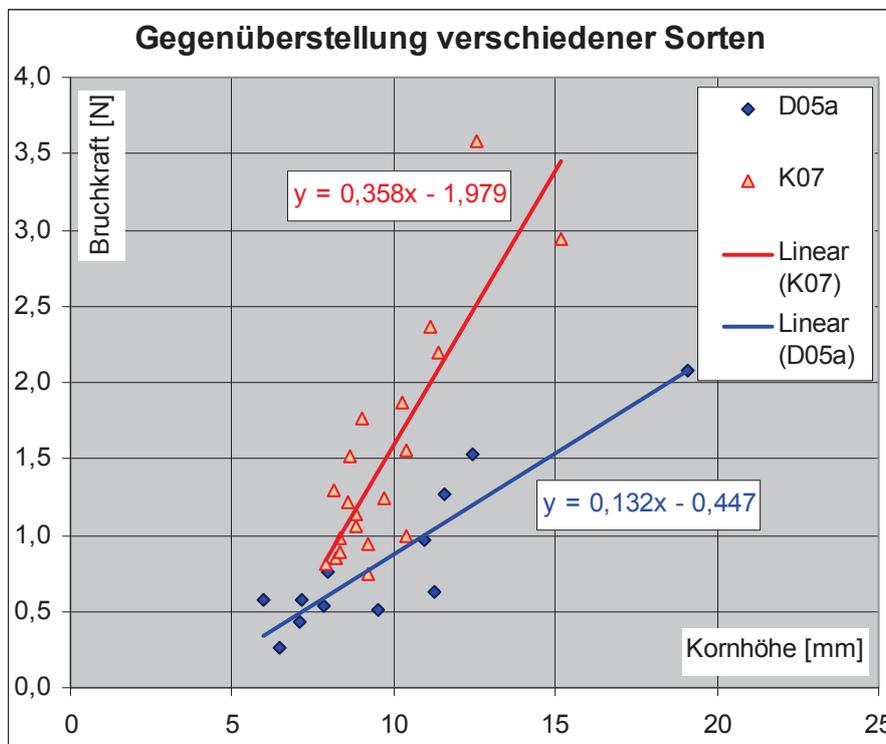


Abbildung 4.50: Gegenüberstellung der Bruchkräfte der Frischlinge der Rezepturen D05a und K07

Quelle: Eigene

Beim Auftragen der Kraft-Verformungs-Linien aus der Druckprüfung der Frischlinge ergeben sich die in der folgenden *Abbildung 4.51* dargestellten Kurvenscharen. In diesen zeigen einige Linien die in *Abbildung 4.46* beschriebenen Bruchfiguren. Auch die Gesamtheit einer Kurvenschar lässt sich den Grundtypen der Bruchfiguren aus *Abbildung 4.46* zuordnen. Die Gesamtheit der Bruchfiguren der Rezeptur K06 entspricht der Form „weicher Bruch“, während bei D05 und K07 überwiegend „Plateau-Bruch“ und „spröder Bruch“ vorkommen.

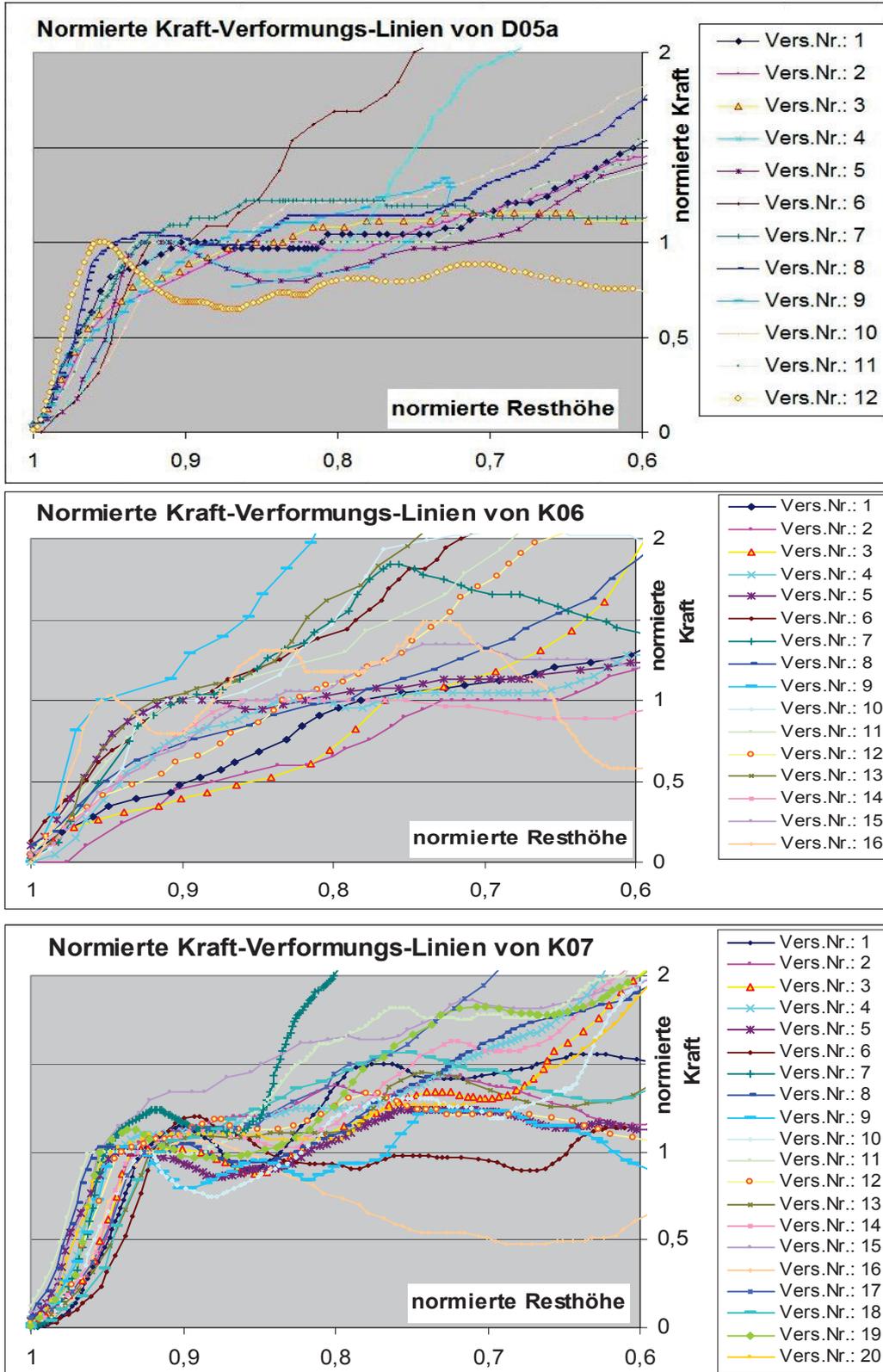


Abbildung 4.51: Gegenüberstellung der Kraft-Verformungs-Linien von Frischlingen der Rezepturen D05a, K06 und K07

Quelle: Eigene



Zu 3.) Anstieg der Kraft-Verformungs-Linie

Es wird davon ausgegangen, dass ein dicht gepacktes Agglomeratkorn einen steileren Anstieg der Kraft-Verformungs-Linie erzeugt, als eines mit hohem Porengehalt. Daher sind Kraft-Verformungslinien wie in dem unteren Teilbild von *Abbildung 4.51* erstrebenswert, während die Kurven im oberen Teilbild ein Indiz für einen ungünstigen Prozesszustand oder eine ungeeignete Rezeptur sind. Siehe auch *Anlagen 26 bis 27!*

Innerhalb des Prozessraumes liegen jeweils Agglomerate aus verschiedenen Prozesszuständen vor. (Siehe Vers.Nr. 9 und 16 im mittleren Teilbild für K06 in *Abbildung 4.51*) Bei einer automatisierten, kontinuierlichen Druckprüfung von Frischlingen während der Herstellung kann mit einer statistischen Auswertung der Prozesszustand anhand der Anteile von Agglomeraten, die das Qualitätskriterium erfüllen, bewertet werden. Damit entsteht ein Kriterium zur Bewertung der Qualität der aktuellen Füllmenge des Granuliertellers.

Für die Bewertung des Anstieges ist seine Auswertung mit den wirklichen Kraft- und Wegwerten durchzuführen. Bei Anwendung auf die normierten Werte von Kraft und Verformung wird der Anstieg von kleinen Agglomeraten zu positiv bewertet. Dieser Effekt ist in *Anlage 27, Blatt 2 und 6* graphisch dargestellt.

Zu 4.) Bruchpunkt der Frischlinge

Die Bruchpunkte der Agglomerate mit den zuvor beschriebenen Unterschieden im Anstieg der Kraft-Verformungs-Linien sind im folgenden Diagramm dargestellt. Erwartungsgemäß sind die Bruchkräfte der Rezeptur K06 geringer als von K07. Außerdem entstehen aus K06 - zumindest in dem hier dokumentierten Prozesszustand - kaum große Agglomerate, weil diese wegen ihrer geringeren Festigkeit bereits im Prozessraum zerbrechen.

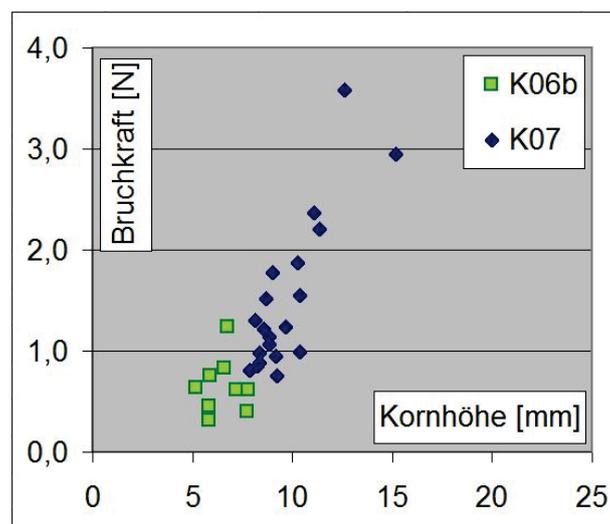


Abbildung 4.52: Zusammenstellung der Bruchpunkte von K06 und K07

Quelle: Eigene

Sowohl die Anstiege der Kraft-Verformungs-Linien als auch die Bruchpunkte aus der Druckprüfung der Frischlinge sind geeignet, den Prozesszustand bei der Agglomeratbildung



zu bewerten. (Siehe Anlage 26 und 27) Für eine Fertigungsüberwachung sind die kontinuierliche, automatische Probennahme, Einzelkorndruckprüfung und statistische Auswertung erforderlich.

Bewertung des Bruchverhaltens der Frischlinge :

Beim Einsatz des Bruchpunktes als Kontrollgröße der Qualität und zur Steuerung der Granulieranlage sollte die Bestimmung des Bruchpunktes nach den in *Anlage 28, Blatt 1* beschriebenen Bedingungen automatisch durch eine Auswertesoftware erfolgen. Das Abbilden der während eines Agglomeriervorganges ermittelten Bruchpunkte in einem Diagramm ähnlich *Abbildung 4.50* ermöglicht den Vergleich mit einem Soll-Bereich des Wertefeldes oder mit den Parametern einer Regressionslinie aus der Punktmenge.

Als zweiter Ansatz können Grenzkriterien, wie die in *Anlage 28, Blatt 2* symbolisch dargestellten umhüllenden Geraden, als Randbedingungen vorgegeben werden. Auch hier kann zeitgleich während des Agglomeriervorganges die Druckprüfung von Frischlingen automatisiert erfolgen und die Kraft-Verformungs-Linien in Diagrammen, wie *Abbildung 4.51* dargestellt, sowie mit den durch Geradenparameter beschriebenen Randbedingungen verglichen werden.

Als ein dritter Ansatz kommt in Frage, die Kraft-Verformungs-Linien der zum Beispiel jeweils letzten 20 geprüften Frischlinge zu einer resultierenden Linie zusammenzufassen und diese mit einer Soll-Kurve zu vergleichen.

Weitere Eigenschaften der Frischlinge :

Weitere besonders für die industrielle Anwendung des Verfahrens wichtige Parameter sind die zulässige Schütthöhe, die erforderlichen Lagerungsbedingungen und mechanische Beanspruchbarkeit der frischen (grünen) Agglomerate.

Es wird empfohlen, für Frischlinge größer 20 mm die Schütthöhe und die Freifallhöhe mit Aufprall auf eine unter 45° geneigte Oberfläche auf 30 cm zu begrenzen. Die Kornklasse 4/8 mm trägt bis zu 50 cm Schütthöhe und Freifallhöhe. Dabei wirken Restsandmengen in der Ergebnismenge als Polster und verringern die Quote von Beschädigungen an Einzelkörnern.

Da für Agglomerate dieselben Ausgangsstoffe verwendet werden wie bei der Herstellung von Zementmörtel und Beton, sind auch dieselben Nachbehandlungszyklen einzuhalten. Im Zuge dieser Versuche wurden die Ergebnismengen der Frischlinge in dichten Mörtelkübeln gelagert und von oben mit einer Polyethylenfolie abgedeckt. Dadurch wurde das Abtrocknen des Zugabewassers verhindert. Bei der Unterwasserlagerung von Agglomeraten ab einem Alter von 1 Tag bis 7 Tage bildete sich an der Oberfläche der Agglomerate eine deutliche, weiße Schicht von $\text{Ca}(\text{OH})_2$, die nach der Verarbeitung zu Agglomeratbeton als Trennschicht an der Oberfläche der Körner erkennbar war. Daher wird auch im großtechnischen Maßstab keine Unterwasserlagerung empfohlen, sondern ein Verdunstungsschutz zum Beispiel durch eine Abdeckung der Frischlinge. Ein eventuell erforderliches Besprühen, um das vorzeitige Austrocknen zu verhindern, sollte erst nach einem Tag Erhärtung erfolgen.



4.5.5 Zusammenfassung von Versuchsergebnissen an Frischlingen

Die „benötigte Wassermenge“ für den Agglomerierprozess liegt meistens im Bereich von 11 bis 13 M% und ist kaum von der eingesetzten Rezeptur abhängig. Die benötigte Wassermenge dient zunächst zum Benetzen der Oberflächen in der Mischung sowie dem Ausbilden von Wasserbrücken an den Kornberührungspunkten. Daher ist der w/z-Wert bei Agglomeratrezepturen mit geringem Zementgehalt unrealistisch hoch und nicht als beschreibende Größe für die Rezeptur geeignet.

Durch Variation des Zugaberegimes und Steuerung des Agglomeriervorganges mit den daraus resultierenden notwendigen Änderungen und Einstellmöglichkeiten an der Versuchsanlage (Drehzahl, Anstellwinkel der Tellers, Füllungsgrad, Zugabeart von Wasser und Vormischung) lässt sich aus feinen Sanden und relativ geringen Bindemittelmengen ein grobkörniges Agglomerat aufbauen, welches als grobe Gesteinskörnung für die Betonherstellung geeignet ist. Damit lassen sich auch die erreichbaren Ausbeuten – also die Korngrößenzusammensetzung der Ergebnismenge – steuern.

Bei anderen Agglomerieranlagen, besonders beim großtechnischen Betrieb, wobei auch andere Agglomerierverfahren, wie z.B. die Agglomeriertrommel in Frage kommen, können andere Zugabevarianten und Prozesszustände erforderlich werden. Diese müssen aber zu Agglomeraten führen, die mindestens die hier beschriebenen Eigenschaften besitzen.

Unter der Voraussetzung, dass die Zusammensetzung des gesamten Korngemenges nicht extrem ungünstig (zum Beispiel eine Einkornpackung) ist und außerdem bestimmte Parameter, wie zum Beispiel die F-Wert-Grenzen einhält, wird davon ausgegangen, dass durch geeignete Anlagenparameter der Prozesszustand so eingestellt werden kann, dass sich Agglomerate der erwarteten Qualität bilden.

Eine zügige Bildung von Agglomeratkeimen mit anschließendem schnellem Wachstum erfolgt dann, wenn bei trockenem Einstreuen der vorgemischten Feststoffe ein intervallartiges, intensives Einsprühen der benötigten Wassermenge erfolgt. Es ist durch die Prozesssteuerung sicherzustellen, dass der Agglomeriervorgang in einem definierten Prozesszustand abläuft. Bei sehr feinstkornarmen Rezepturen oder langem Verbleib der Mischung im Prozessraum besteht eine Neigung zur Ansammlung von losem Mittelkorn, der nach der späteren Siebung als Restsand anfällt.

Neben den in der Betontechnologie generell einzuhaltenden Nachbehandlungsregeln (z.B. kein frühes Austrocknen) sind Zusammenbackungen der frischen Agglomerate durch geeignete Maßnahmen zu verhindern.

Die Rohdichte der Frischlinge als charakterischer Parameter kann, da kein praxisgeeignetes Prüfverfahren zur Verfügung steht, nicht als Kriterium zum Prüfen der Qualität und zur Prozesssteuerung genutzt werden.

Stattdessen wurden aus dem Verhalten der Frischlinge bei Druckprüfung Parameter wie der Bruchpunkt oder der Anstieg der Kraft-Verformungs-Linie als mögliche Kriterien für die Prozessüberwachung identifiziert. Dafür ist während des Herstellungsprozesses eine



laufende Erfassung der Kraft-Verformungs-Linien, deren automatische Auswertung und statistische Bewertung erforderlich.

Soll z.B. das Kriterium des Bruchpunktes in der Prozesssteuerung verwendet werden, ist von einer Notwendigkeit zur Nachregelung des Prozesses auszugehen, wenn eine statistisch relevante Anzahl der online geprüften Frischlinge den Vertrauensbereich der *Gleichung 4.15* (Seite 111) verlässt. Zusätzliche Abhängigkeiten von Steigung und Kurvenform sind hierbei zu erwarten.

Als Fazit der Untersuchungen an den Frischlingen lässt sich zusammenfassen, dass eine klare, eindeutige Zuordnung ihrer Eigenschaften zu den Ausgangsstoffen oder Rezepturen nicht möglich ist. Größer ist stattdessen der Einfluss der Agglomerieranlage und der Prozesssteuerung.

Im Folgenden wird versucht, Eigenschaften der Frischlinge mit Eigenschaften der Festlinge und des Agglomeratbetons zu korrelieren, um Grenzkriterien für eine Mindestqualität der Frischlinge zu definieren.



4.6 Eigenschaften der Festlinge

Im Folgenden werden die Eigenschaften der erhärteten Agglomerate also der „Festlinge“ betrachtet. Dabei werden zunächst die grundlegenden Eigenschaften, wie sie auch bei natürlichen Gesteinskörnungen betrachtet werden, angesprochen und zusätzlich auf Besonderheiten der Agglomerate eingegangen.

4.6.1 Erscheinungsbild

Bei Sicherstellung eines günstigen Prozesszustandes einer gut geeigneten Rezeptur für die Agglomeratherstellung, wie zum Beispiel K07, ergibt sich ein überwiegend homogenes Bild rundlicher Körner. Dabei ist bei genauer Betrachtung feststellbar, dass zwischen den Körnern Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit und -farbe bestehen. Es sind Minderheiten der Körner zu erkennen, die eine besonders glatte Oberfläche und eine sehr rauhe Oberfläche zeigen. Vereinzelt kommen Körner vor, die Klüfte zeigen. Diese entstehen bei zu langem Aufenthalt im Prozessraum oder zu hohe Drucklast nach der Entnahme der Frischlinge.



Abbildung 4.53: Detailaufnahme erhärteter Agglomerate der Rezeptur K07

Quelle: Eigene

Eine weitere Kornform, die gelegentlich auftritt, sind Sekundäragglomerate, die sich aus kleineren Primäragglomeraten zusammensetzen. Weitere Bilder siehe *Anlage 33*

4.6.2 Verhalten bei der Druckprüfung - Einzelkorndruckprüfung und Drucktopffestigkeit

Die Einzelkornfestigkeiten der erhärteten Sand-Zement-Agglomerate sind im Mittel geringer als die von Körnern natürlicher grober Gesteinskörnung mit dichtem Gefüge. Andererseits haben die Sand-Zement-Agglomerate bei entsprechender Zusammensetzung aber höhere



Einzelkornfestigkeiten als übliche Leichtzuschläge, wie zum Beispiel Blähton. In den Vorarbeiten von [Holle (2007) und (2008)] wurden außerdem Druckwerte im Rahmen einer kollektiven Prüfung von Körnern in Anlehnung an DIN 4226-3 ermittelt.

Um die Festigkeits-Eigenschaften der Sand-Zement-Agglomerate im Vergleich mit bereits bekannten Materialien wie Naturkies, Splitt und Blähton, aber auch mit grober Gesteinskörnung aus dem Betonrecycling betrachten zu können, ist zunächst die Ermittlung von geeigneten Werten zur Bewertung der Festigkeit erforderlich.

Bekannt ist die Ermittlung des Druckwertes D in kN mit der Drucktopfmethode nach DIN 4226-3 für einzelne Kornklassen. In Anlehnung an dieses Verfahren wird nach Prof. Vala [Vala (1981)] die sogenannte Deformationskonstante als D_k -Wert für den Beitrag der Tragfähigkeit des Zuschlagstoffes an der Gesamttragfähigkeit verwendet. Dabei wird eine Probe der groben Gesteinskörnung in einen Drucktopf mit Innenmaßen in Anlehnung an DIN 4226-3 eingefüllt und durch einen vollflächigen Druckstempel vorverdichtet. Anschließend wird ein Hohlzylinder mit definierter Kraft in die Oberfläche der vorverdichteten Packung der Gesteinkörnung gedrückt und die dabei erreichte Eindringtiefe bestimmt. Der Quotient aus der Druckspannung in der Packung und der Eindringtiefe des Stempels stellt einen absoluten Kennwert für die Kornklasse der geprüften Gesteinskörnung dar und wurde als *Deformationskonstante* D_k ⁴ bezeichnet. Der D_k -Wert nach Vala erfasst die Tragfähigkeit des Zuschlages als Gesamtheit.

Demgegenüber wird bei der Bestimmung des von [Schulze/Reichel (1973)] beschriebenen Druckzertrümmerungsgrades die Kornfeinheit einer Probe der Kornklasse 5/12,5 mm vor und nach einer Druckbeanspruchung der Probe in einem Drucktopf bestimmt. Die Kornfeinheit wird aus den auf die Einwaage bezogenen Siebrückständen auf Prüfsieben mit Lochweiten von 5 mm, 2 mm und 1 mm ermittelt. Auch hierbei handelt es sich um eine kollektive Prüfmethode, die einen relativen Kennwert ergibt.

In der aktuell geltenden Norm DIN EN 12620 wird die Prüfung der Kornfestigkeit der Gesteinskörnung nicht gefordert. Stattdessen werden die Widerstände der Gesteinskörnung gegen Zertrümmerung, Polieren, Oberflächenabrieb und Spikes in getrennten Prüfungen ermittelt.

Bei Leichtzuschlägen wird nach der aktuellen Norm DIN EN 13055-1 Anhang A eine „Kollektive Druckfestigkeit“ der Gesteinskörnungen bestimmt und in $[N/mm^2]$ ausgewiesen. Dabei wird in Verfahren 1 die Prüfung leichter Gesteinskörnungen in Kornklassen von 4 bis 22 mm mit einer Schüttdichte von über 150 kg/m^3 beschrieben. Für sehr leichte Gesteinskörnungen mit Schüttdichten von 150 kg/m^3 und darunter erfolgt die Ermittlung der kollektiven Druckfestigkeit nach Verfahren 2.

⁴ Das Formelzeichen D_k wurde von Vala für die von ihm definierte Deformationskonstante gewählt und ist nicht mit dem D -Wert nach DIN 4226-3 zu verwechseln.



Bei der vorliegenden Untersuchung wurden die Sand-Zement-Agglomerate im Labormaßstab hergestellt. Von den Agglomeratrezepturen waren jeweils Gesamtmengen zwischen 10 und 150 kg vorhanden, die sich auf die Kornklassen zwischen 2/4, 4/8, 8/16 und 16/32 verteilten.

Bei den Machbarkeitsstudien [Holle (2007) und (2008)] ergab sich eine geringe Standardabweichung der Einzelkornfestigkeiten von Sand-Zement-Agglomeraten im Vergleich mit Naturkies. Dies wurde durch umfangreiche statistisch abgesicherte Einzelkorndruckversuche an den Festlingen verschiedener Agglomeratrezepturen ermittelt.

Für die Versuche der hier vorliegenden Untersuchung wurde zunächst das Verhalten verschiedener Auflagen und Oberflächen der Lastplatten bei der Einzelkornprüfung geprüft. Dies waren unter anderem Hartholz, Weichholz und verschiedene Holzfaserplatten jeweils längs und quer zur Faser. Außerdem wurden Bleiplatten, Kunststoffe verschiedener Festigkeiten sowie eine stark verkleinerte Variante eines Sandtopfes getestet.

Die Zielstellung dabei war, die Prüfergebnisse der Bruchkraft der Agglomerate möglichst wenig durch lokale Besonderheiten der Körner an den Kraffteinleitungspunkten zu beeinflussen sowie eine praxisgeeignete, robuste Verfahrensweise zu entwickeln, die möglichst wenig vom verwendeten Messgerät und dem ausführenden Prüfer abhängig ist.

Durch den Einsatz eines ebenen Druckstempels und des Widerlagertellers aus gehärtetem Stahl mit glatter, fein geschliffener Oberfläche sind die Anforderungen für ein praxisgerechtes Prüfverfahren, wie Einfachheit, Robustheit, geringen Verschleiß und die allgemeine Nachprüfbarkeit erfüllt. Da es hierbei wegen der gehärteten Druckkopfoberfläche praktisch keine Abnutzung und keine bleibenden Abdrücke gibt, sind die Prüfbedingungen für alle Proben konstant. Diese Bestückung des Druckgerätes kam bei allen weiteren Ermittlungen von Bruchverhalten und Bruchkräften von Agglomeraten (Frischlinge und Festlinge) zum Einsatz.

Die so bestückte Prüfeinrichtung erlaubt die Druckprüfung verschiedener Materialien mit hohen Bruchkräften, z.B. Naturkies, mittleren Bruchkräften, z.B. Sand-Zement-Agglomerate und geringen Bruchkräften, z.B. Blähton. Dabei kann der zu erfassende Kraftbereich durch Wechsel des Kraftsensors angepasst werden.

Ergebnisse der Einzelkorndruckprüfungen der Festlinge

Bei der Einzelkorndruckprüfung zeigen die Festlinge ein ähnliches Verhalten wie Normprüfkörper aus Beton. Da sich an den Berührungsflächen von Druckstempel und Auflager ebene Kontaktflächen ausbilden, kommt es hier zu einer Dehnungsbehinderung. Dadurch ist die Belastung, die zum Bruch des Kornes führt, keine reine Spaltzugbelastung, sondern eine Überlagerung von Spaltzug mit einem dreiachsigen Spannungszustand. Die typischen Bruchbilder sind das Aufplatzen des Kornes in 3 oder 4 Teile (siehe *Abbildung 4.55*), bei denen häufig pyramidenförmige Reste oben am Druckstempel und unten am Auflager verbleiben.



Abbildung 4.54: Typische Bruchbilder erhärteter Agglomerate

Quelle: Eigene

Für die Festlinge ergeben sich, wie in der *Abbildung 4.55* dargestellt, typischerweise Bruchbilder mit 3 oder 4 Bruchebenen und Verdrängungskegeln an den Lasteinleitungspunkten.

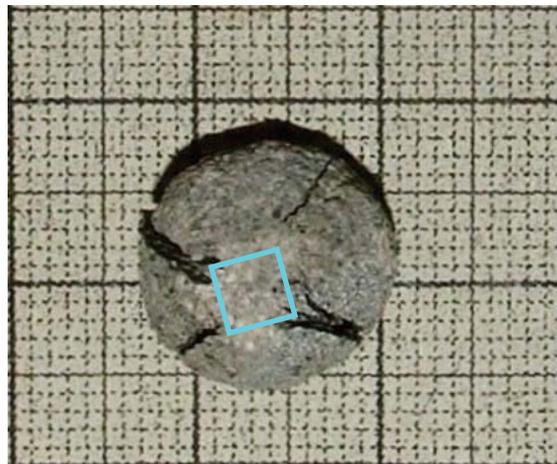


Abbildung 4.55: Bruchbild eines Agglomeratkornes (K07 8/16) nach der Einzelkorn-Druck-Prüfung

Quelle: Eigene

Lokale Unregelmäßigkeiten in der Kontaktfläche der Agglomeratkörner zur Lastplatte, wie hervorstehende Sandkörner, die eine lokal erhöhte Spaltzugbeanspruchung vermuten lassen, versagen deutlich früher als das eigentliche Prüfkorn. Es war bei den Prüfungen jeweils zu beobachten, dass sich solche lokalen Unebenheiten an der Kontaktfläche zwischen Prüfkorn und Lastplatte mit leichtem Knirschen einebnen. Erst danach beginnt der für das Prüfkorn maßgebende Lastanstieg, in dem sich zum Beispiel die Steigung als



charakteristische Größe auswerten lässt. Dieser Effekt, also der „Knirschbereich“, ist auf den Kraft-Verformungs-Linien in *Abbildung 4.56* gekennzeichnet.

Die Auswertung der Messdaten aus den Einzelkornprüfungen erfolgte wie bei den Frischlingen in *Abschnitt 4.5.4* beschrieben. Die Aufteilung eines Messlogs in die Einzelversuche und die vollständige Auswertung mit den zugehörigen Übersichts- und Einzeldiagrammen ist für eine Gruppe Festlinge der Rezeptur K04 beispielhaft als *Anlage 30 und 31* angefügt.

Kornnummer	Max. Kraft [N]	Höhe des Kornes [mm]
1	43,1	7,2
2	102,2	12,9
3	62,5	7,7
4	99,0	8,5
5	43,9	9,1
6	194,5	12,6
7	187,1	10,6
8	190,0	13,1
9	72,3	8,5
10	185,9	9,9
11	182,2	13,0
12	67,1	8,5
13	32,0	8,6
14	103,1	8,8
15	452,6	14,1

Tabelle 4.17: Bruchkraft und Einzelkorngrößen der Festlinge K04 (VT5) aus dem folgendem Kraft-Verformungs-Diagramm

Quelle: Eigene

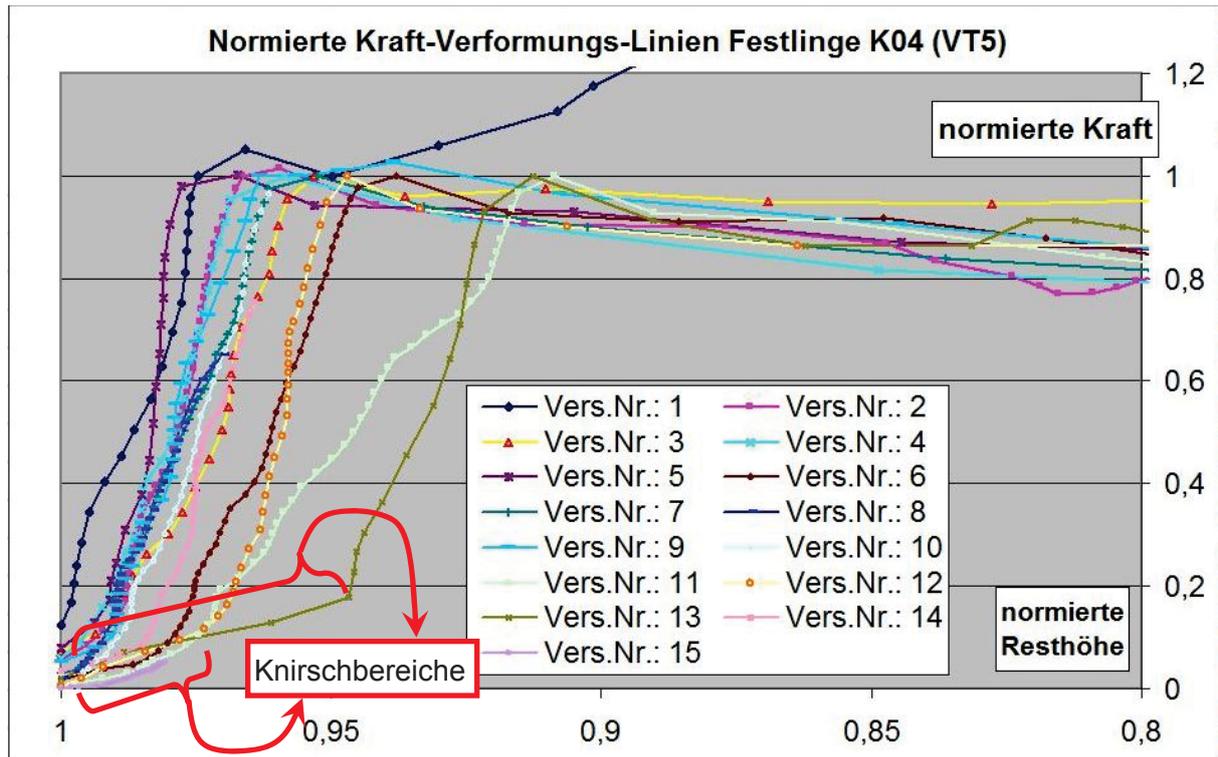


Abbildung 4.56: Schar der Kraft-Verformungs-Linien der Festlinge K04 (VT5) mit deutlich erkennbaren Knirschbereichen

Quelle: Eigene

Wie auch zuvor bei den Frischlingen lassen sich bei der Einzelkorndruckprüfung der Festlinge typische Verhaltensmuster unterscheiden. Dabei wird der Anstieg der Linie erst nach dem „Knirschbereich“ sowie das Verhalten am Versagenspunkt betrachtet.

- a) Spontanversagen (gekennzeichnet durch: kleinen „Knirschbereich“, steilen Lastanstieg und schlagartiges Versagen
- b) „Fortschreitendes Versagen“ ein Versagensvorgang, bei dem während der Belastung eine fortschreitende Rissausbreitung und das Versagen von Teilbereichen erkennbar ist. Der Bruch erfolgt ohne Herausplatzen der Bruchteile des Prüfkorns sondern durch „Zerkrümeln“ unter dem Prüfstempel.
- c) Einige Prüfkörner zeigten ausgeprägte Lastanstiege nach Auftreten des ersten Hauptrisses. Sekundär- und Tertiärrisse sind an dem treppenförmigen Verlauf der Kraft-Verformungs-Linie erkennbar.

Die Effekte weicher Schalen um einen festen Kern wie bei Frischlingen wurden bei den Einzelkorn-Druckprüfungen an Festlingen nicht beobachtet.

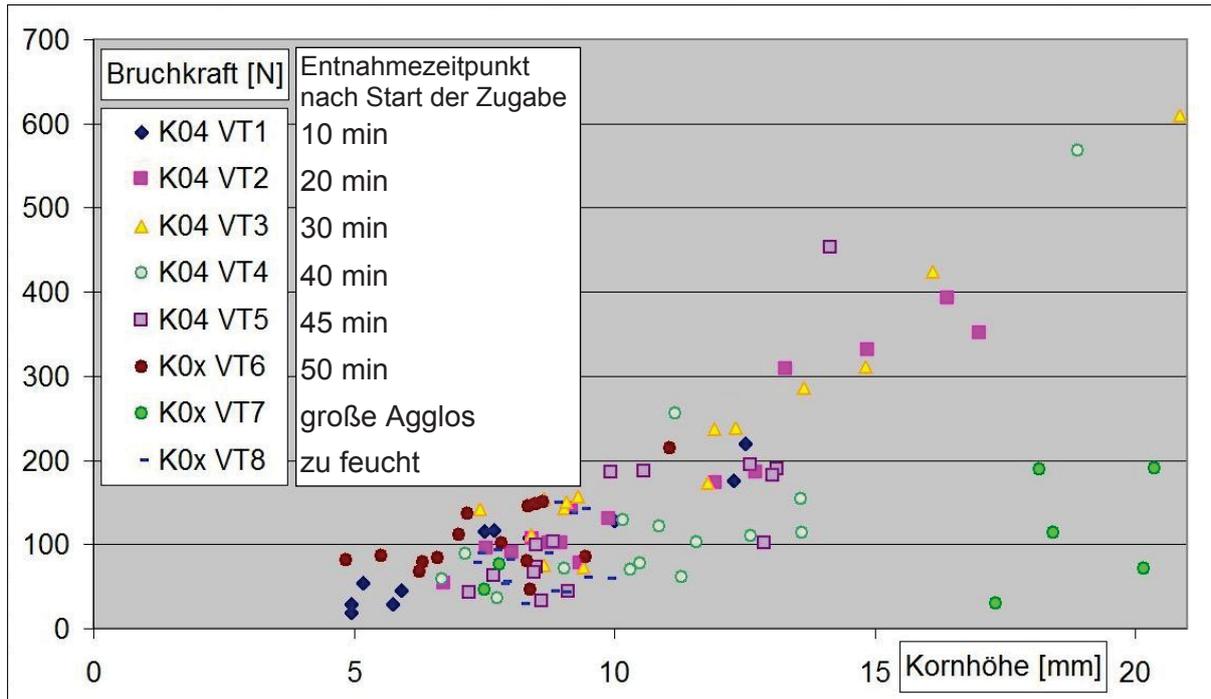


Abbildung 4.57: Darstellung der Bruchkräfte von Festlingen verschiedener Entnahmezeitpunkte von K04

Quelle: Eigene

In *Abbildung 4.57* sind die Bruchkräfte von Festlingen der Rezeptur K04 über die Kornhöhe dargestellt und nach ihren Entnahmezeitpunkten unterschieden. Es zeigt sich, dass die Hauptmenge der Messpunkte in einem gestreckten Bereich liegt. K0x bedeutet eine leichte Abweichung der Rezeptur K04 durch nachträgliches Zugeben von Feinsand und Zement. Die Charge K0x VT7 zeigt entgegen dem allgemeinen Trend trotz relativ großer Agglomerate nur geringe Bruchkräfte.

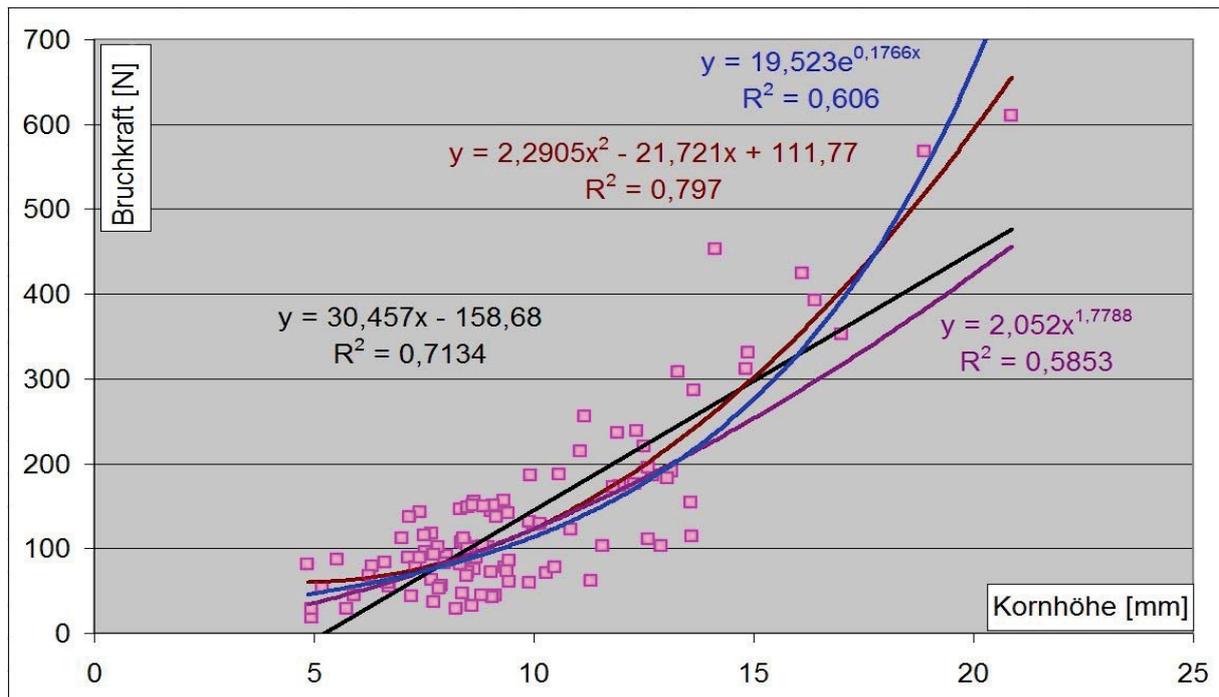


Abbildung 4.58: Regressionen an Festlingen von K04 aus verschiedenen Chargen und Prozesszuständen

Quelle: Eigene

Wie auch schon bei der Prüfung der Frischlinge wurden die Bruchkräfte mehrerer Chargen der Rezeptur K04 in *Abbildung 4.58* zusammengefasst und einer Regressionanalyse unterzogen.

Auch hier beschreibt die quadratische Funktion am besten die Werteschar. Demnach kann die zu erwartende Bruchkraft der Festlinge abhängig von der jeweiligen Kornhöhe für die Rezeptur K04 in den Grenzen von 5 bis 25 mm mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,802 (einer Eintrittswahrscheinlichkeit von ca. 80 %) vorausberechnet werden:

$$B_{\text{frisch}} = 0,0144 * h^2 - 0,1524 * h + 1,0093 \tag{4.16}$$

Mit: B_{fest} Bruchkraft des Festlings in [N] gemäß der oben festgelegten Definition des Bruchpunktes als deutliche Neigungsänderung der Kraft-Verformungs-Linie

h Kornhöhe, geringster Durchmesser eines Agglomeratkornes (z-Achse) in [mm]



Kollektive Druckprüfungen der Festlinge

Die Ermittlung der „kollektiven Druckfestigkeit“ der Agglomerate erfolgte gemäß dem in DIN EN 13055, Teil 1 Anhang A beschriebenen Verfahren 1.

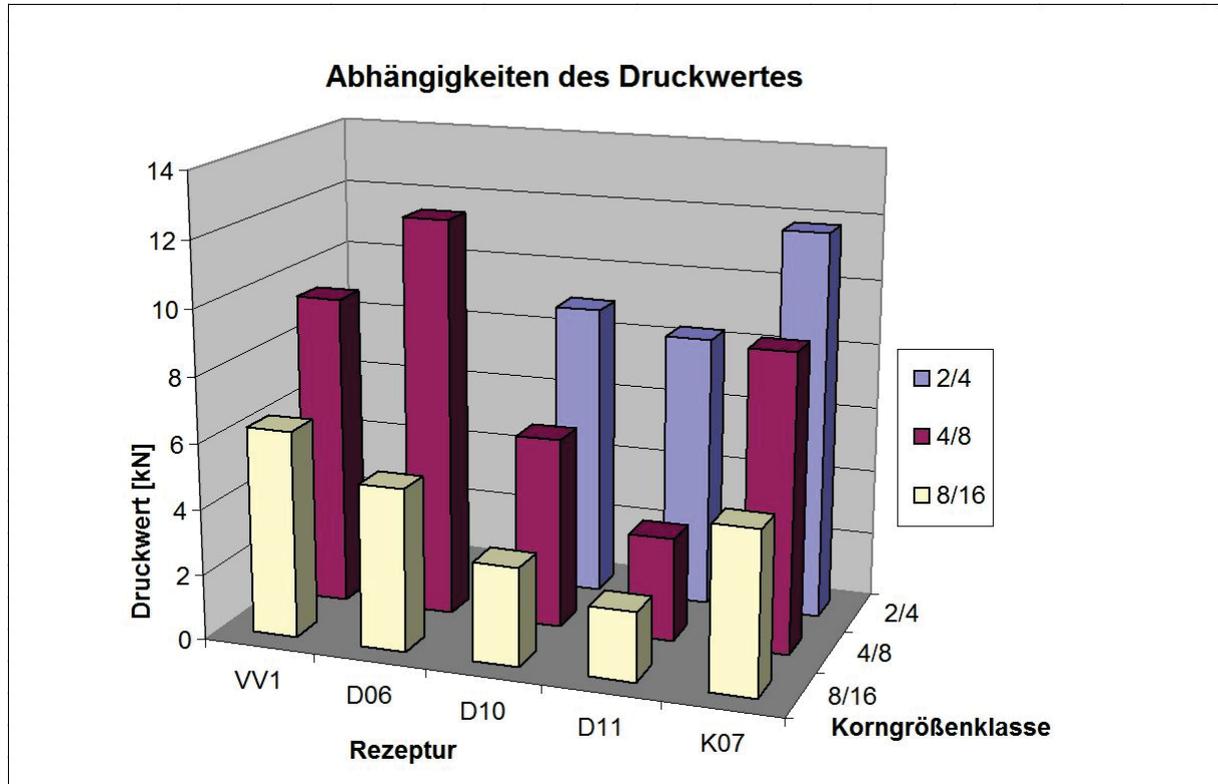


Abbildung 4.59: Abhängigkeit des Druckwertes von der geprüften Korngröße und Rezeptur

Quelle: eigene

Wie in *Abbildung 4.59* zu erkennen, zeigt sich anhand der Prüfergebnisse mit dem Drucktopf eine eindeutige Abhängigkeit von der Korngröße und der Rezeptur. Zunächst ist auffällig, dass die kleineren Korngruppen der einwirkenden Druckbelastung einen größeren Widerstand bieten als die Korngruppen mit Partikeln größeren Durchmessers. Dieses wird durch die größere Anzahl von lastabtragenden Kornberührungspunkten je Volumeneinheit der feinkörnigeren Packung erklärt.

Wegen der in *Abbildung 4.59* erkennbaren deutlichen Abhängigkeit des Druckwertes von der Korngröße werden im Weiteren nur die Druckwerte der Korngrößenklasse 4/8 für die verschiedenen Agglomeratrezepturen miteinander verglichen.

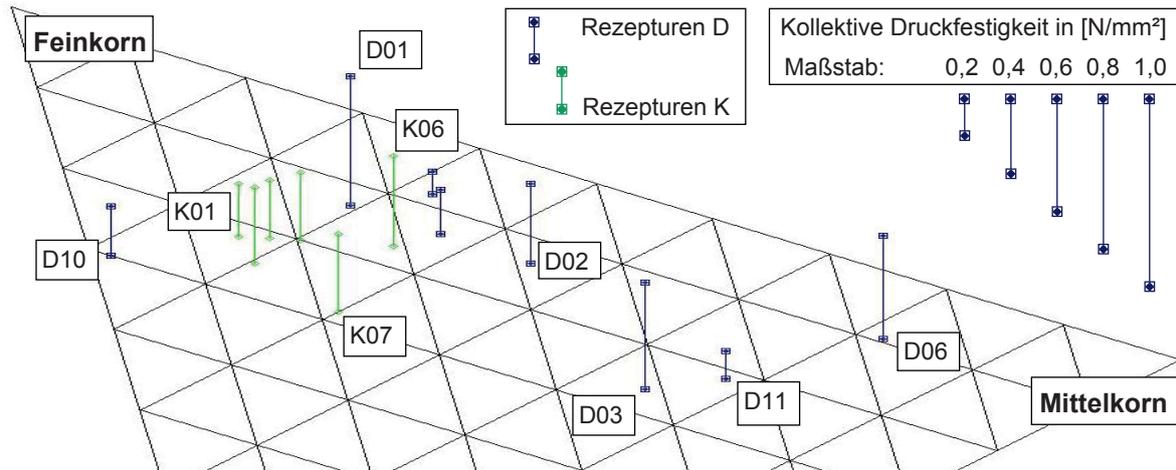


Abbildung 4.60: Ergebnisse der kollektiven Druckprüfungen der Kornklasse 4/8 im Dreistoffdiagramm; Druckfestigkeit der Gesteinskörnung gemäß DIN 13055 Anhang A in $[N/mm^2]$

Quelle: Eigene

Es ist keine Abhängigkeit der Lage der Rezepturpunkte im Dreistoffdiagramm zu den Ergebnissen der kollektiven Druckprüfung zu erkennen. Daher sollte die Abhängigkeit der kollektiven Druckfestigkeit der Agglomerate zur Korngrößenverteilung der Rezeptur unter Ausschluß der Einflüsse der Prozesssteuerung und der Wirkung unterschiedlicher Bindemittelgehalte der Rezepturen untersucht werden.

Fazit zur Druckprüfung der Festlinge

Die Prüfergebnisse der Einzelkornprüfung zeigen aufgrund der Rissverläufe bei der zerstörenden Prüfung der jeweiligen Körner ein sich wiederholendes Bild. Zwar sind die Einzelkörner keine geometrisch exakten Prüfkörper, wie zum Beispiel Probewürfel oder ideale Kugeln, sie zeigen jedoch ein in erster Näherung ähnliches Versagensbild wie Betonprobewürfel bei der Druckprüfung. Die Ursache wird in dem willkürlichen Entstehen einer Druckfläche zwischen Druckplatte und Prüfkörper gesehen. Der regelmäßig bei der Einzelkorndruckprüfung entstehende Verdrängungskegel erzeugt eine sich immer wiederholende Spannungsverteilung in den Prüfkörnern. Dadurch wird eine statistisch abgesicherte Gesamtaussage möglich.

Bei der kollektiven Druckprüfung im Drucktopf nach DIN EN 13055 wird ein makroskopischer Mittelwert erzeugt, der auch wegen der Umständlichkeit des Prüfverfahrens kaum eine statistische Aussage zulässt.

Abhängig vom Ziel einer Untersuchung eignen sich beide Prüfverfahren zur Bewertung der Qualität einer Grundgesamtheit von Festlingen.



4.6.3 Rohdichte, Porengehalt und Packungsdichte

Die Bestimmung der Rohdichte erfolgt nach dem Prinzip der Unterwasserwägung, da es sich in Vorversuchen als am besten reproduzierbares Verfahren zur Volumenbestimmung herausgestellt hat.

Dabei wird der Gehalt an Poren, die sich durch 3 Tage Unterwasserlagerung sättigen lassen, aus der Massedifferenz zwischen der durch die 3 Tage Wasserlagerung gesättigten und der bei 40°C und 15% relativer Luftfeuchte bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Probe ermittelt. Das Ausgangsvolumen der Probe wurde aus dem Gewichtsunterschied bei Wägung der gesättigten Probe an der Luft und unter Auftrieb bestimmt. Dabei lässt sich gleichzeitig der Porenraum durch die aufgenommene Wassermenge ausweisen.

Die Entscheidung für die Trocknung der Proben bei 40°C fiel mit dem Ziel, sicher auszuschließen, dass Gefügeveränderungen - z.B. durch das Austreiben von Kristallwasser aus den Reaktionsprodukten des Zementes - in den Agglomeraten auftreten. Dadurch war es möglich, die Probemengen aus der Rohdichtebestimmung anschließend auch für die Bestimmung der kollektiven Druckfestigkeit im Drucktopf zu benutzen.

Verfahren zur Rohdichtebestimmung erhärteter Agglomerate durch Unterwasserwägung:

Die mindestens 28 Tage alten Agglomerate werden zunächst von anhaftendem Sand und kleinen Partikeln befreit. Dazu werden die oberflächentrocknen Agglomerate in einem Eimer mit einem Holzstab scharf umgerührt und der anfallende Abrieb entfernt. Dann wird das Gefäß mit Leitungswasser aufgefüllt und die Proben um ca. 10 cm überstaut. Nach ca. 70 h in dieser Wasserlagerung bei 20 °C erfolgt ein erneutes scharfes Umrühren der Probe unter Wasser und Waschen auf einem Sieb, um absandende Anteile vollständig zu entfernen. Unmittelbar nach dem Waschen der Probemenge wird diese auf ein Handtuch geschüttet und leicht abgetupft, bis die Körner gerade ihren feuchten Glanz verlieren. Dann wird die Probe in den Tauchkorb gegeben und durch Wägung ihre Gewichtskraft zunächst an der Luft und dann unter Wasser bestimmt. Anschließend wird die Probe in eine Trockenschale gegeben und bei 40 °C und ca. 15 % relativer Luftfeuchte bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Durch das Bestimmen der Trockenmasse der Probe nach der Unterwasserwägung können die Proben unmittelbar vor der Wägung unter Wasser entsandet werden, ohne dass ein weiterer Trocknungsvorgang dazwischengeschaltet werden muss.

Durch die Berechnung nach den folgenden Formeln ergeben sich die Rohdichte der Probemenge sowie ihr Porengehalt (Wasserlagerung und 40°-Trocknung) und daraus auch die Packungsdichte.

$$\rho_0 = \frac{m_{Pr,netto,40^\circ trocken}}{V_{Hüllfläche}} = \left[\frac{m_{Pr,brutto,40^\circ trocken} - m_{tara}}{m_{Pr,nass,anLuft,netto} - (m_{Pr,nass,UW,brutto} - m_{Sieb,UW})} \right] * \rho_{Was} \quad (4.17)$$



$$V_{por} = \frac{(m_{Pr,netto,nass,anLuft} - m_{Pr,netto,40^{\circ}trocken})}{\rho_{Was}} \quad (4.18)$$

$$v_{por} = \frac{V_{por}}{V_{Hüllfläche}} * 100 \quad (4.19)$$

$$\Phi_{Agglo} = \frac{V_{F,Agglo}}{V_{R,Agglo}} = \frac{V_{Hüllfläche,Agglo} - V_{Por,Agglo}}{V_{Hüllfläche,Agglo}} \quad (4.20)$$

Mit: ρ_0	- Rohdichte der erhärteten, 40°-trockenen Agglomerate [g/cm ³]
ρ_{Was}	- Rohdichte des Wassers (Leitungswasser, entgast) in [g/cm ³]
$m_{Pr,netto,40^{\circ}trocken}$	- Masse der bei 40°C getrockneten Probe [g]
$m_{Pr,netto,nass,anLuft}$	- Masse der wassergesättigten Probe [g]
$V_{Hüllfläche}$	- Summe des Volumens der äußeren Hüllflächen der Agglomerate, ermittelt durch Unterwasserwägung (siehe <i>Anlage 32</i>) [cm ³]
V_{Por}	- <i>Volumen des Hohlraumes</i> [cm ³]
v_{por}	- <i>Porengehalt</i> [Vol%]
Φ_{Agglo}	- Packungsdichte der Agglomerate [-]
V_F	- <i>Volumen des Feststoffes</i> [cm ³]
$V_R = V_{Hüllfläche,Agglo}$	- <i>Volumen des betrachteten Raumes</i> [cm ³]

Um subjektive Fehler bei den Rohdichteprüfungen zu minimieren, wurden die hier betrachteten Prüfungen ausschließlich von einem Prüfer durchgeführt.

Es folgt eine Betrachtung der Rohdichten von Festlingen unter verschiedenen Aspekten:

1. Gleichmäßigkeit verschiedener Chargen einer Rezeptur bei gleicher Kornklasse
2. Abweichungen zwischen verschiedenen Kornklassen innerhalb einer Rezeptur
3. Unterschiede zwischen den Rezepturen

Zu 1.) Gleichmäßigkeit verschiedener Chargen einer Rezeptur bei gleicher Kornklasse

In der folgenden *Abbildung 4.61* sind für die vier Rezepturen D04 (0:60:20:20), D05 (40:40:10:10), K04 (40:40:10:10) und K07 (0:60:20:20) die Einzelwerte der für die Kornklasse 4/8 ermittelten Rohdichten dargestellt. Dabei bedeuten gleiche Symbole der Werte, dass sie aus derselben Charge stammen.

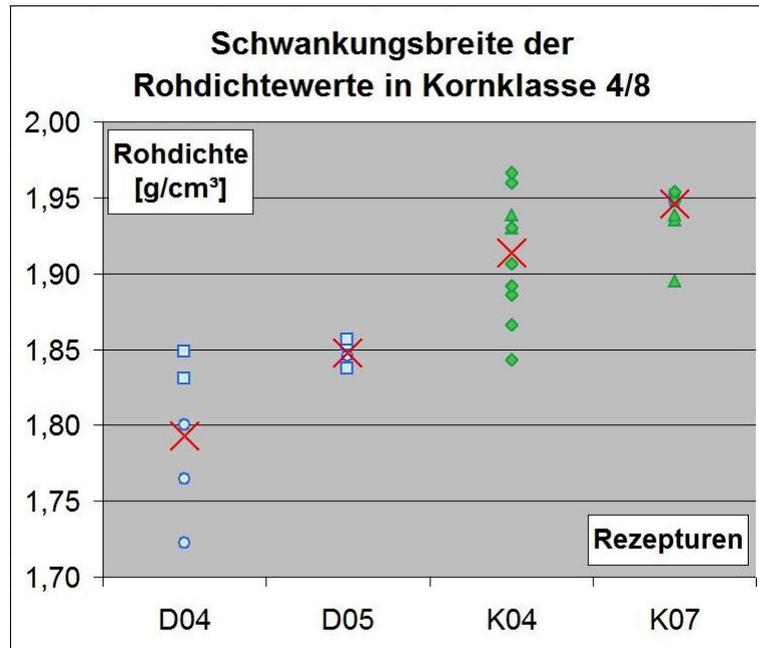


Abbildung 4.61: Bandbreite der Rohdichtewerte innerhalb von Agglomeratrezepturen, Darstellung einer Teilmenge der Tabellenwerte aus *Anlage 32*

Quelle: eigene

Bei den Proben D04 und D04* handelt es sich gemäß *Abbildung 4.49* um zwei Einzelproben aus derselben Grundgesamtheit. Die Proben D04a, b, c wurden in Phasen mit unterschiedlichem Agglomerierverhalten entnommen. D04a und D05b repräsentieren in *Abbildung 4.61* eine typische Phase mit langsamer Neubildung von Agglomeraten bei abwechselndem Einstreuen trockenen Gemisches und Einsprühen von Wasser (Zustand A entsprechend *Abschnitt 4.5.1.2*). D04b stammt aus der Phase des zügigen Aufbaus großer Partikel bis 30 mm Durchmesser nach schneller Wasserzugabe (Zustand B entsprechend *Abschnitt 4.5.1.2*), während D04c aus der anschließenden Stagnationsphase stammt, in der kaum noch Neubildungen von Agglomeraten zu erkennen waren und eine große Menge Agglomeratkeime kleiner 4 mm im Prozessraum vorlag.

Die Proben D05a und D05b stammen aus einer Versuchsreihe am 18.11.2010, in der die Neubildung von Agglomeraten nur sehr langsam ablief. Daraufhin wurde versucht, dieses durch Änderungen des Zugaberegimes zu beschleunigen. Die Herstellung wurde per Video dokumentiert und Frischlinge der Chargen D05a und D05b wurden der Einzelkornprüfung unterzogen. (Siehe *Abschnitt 4.5.4*) Die Probenbezeichnungen a und b bedeuten hier keine Zuordnung zu den Prozesszuständen A und B aus dem *Abschnitt 4.5.1.2*.

Die Proben K04-1, -2 und -3 stammen aus derselben Grundgesamtheit und liefern dicht zusammenliegende Werte um 1,93 g/cm³. Bei der Herstellung der Rezeptur K04FM - mit 1% Fließmittel bezogen auf die Zementmasse - wurden aus allen 4 10-kg-Chargen jeweils eine Probe zu Beginn und eine gegen Ende des Agglomerierzyklus entnommen. Die Rohdichten dieser beiden Proben aus unterschiedlichen Phasen einer Charge liegen jeweils so dicht zusammen, dass sie von den beiden Werten der anderen Chargen unterscheidbar sind.



Bei der Sorte K07 wurden zu 3 verschiedenen Zeitpunkten jeweils 3 Einzelproben aus derselben Grundgesamtheit der erhärteten Agglomerate untersucht. Der deutlich abweichende Wert von K07-3 wird aufgrund der dichten Lage aller anderen Werte als Ausreißer angesehen und nicht in die Ermittlung des Mittelwertes einbezogen.

Fazit zu 1.: Die in verschiedenen Prozesszuständen gewonnenen Agglomerate einer Rezeptur können sehr unterschiedliche (D04) oder sehr ähnliche Rohdichten (D05) aufweisen. Die durch verschiedene Chargen erzeugten Abweichungen der Rohdichte innerhalb einer Rezeptur sind größer als die Unterschiede, die sich aus verschiedenen Entnahmezeitpunkten ergeben.

Zu 2.) Abweichungen zwischen den verschiedenen Kornklassen innerhalb einer Rezeptur

In *Abbildung 4.62* sind diejenigen Rezepturen zusammengefasst, von denen mehrere Rohdichtewerte von drei Kornklassen vorliegen. Hier hat die Rezeptur D11 über die Korngrößenklassen 2/4, 4/8 und 8/16 sehr gleichmäßige Werte der Kornrohddichte, während Rezeptur D04 eine große Bandbreite über die Kornklassen aufweist. Auffällig ist weiterhin, dass bei D04 und K07 die kleineren Agglomerate auch geringere Rohdichten zeigen. Rezeptur D11 zeigt einen entgegengesetzten Effekt.

Der hohe Einzelwert der Sekundäragglomerate von K07 in 16/32 wird dadurch erklärt, dass die Sekundäragglomerate in den Zwickeln zwischen ihren Primäragglomeraten vor allem Mittelsand, aber wenig Fein- und Feinstkorn einlagern. Dadurch bestehen diese Zwickelbereiche nach dem Erhärten zu einem höheren Anteil aus Quarzsand als die normalen (Primär-) Agglomerate. Aus dem anteilig geringeren Feinstkorn- und Bindemittelanteil resultiert die höhere Rohdichte der Sekundäragglomerate.

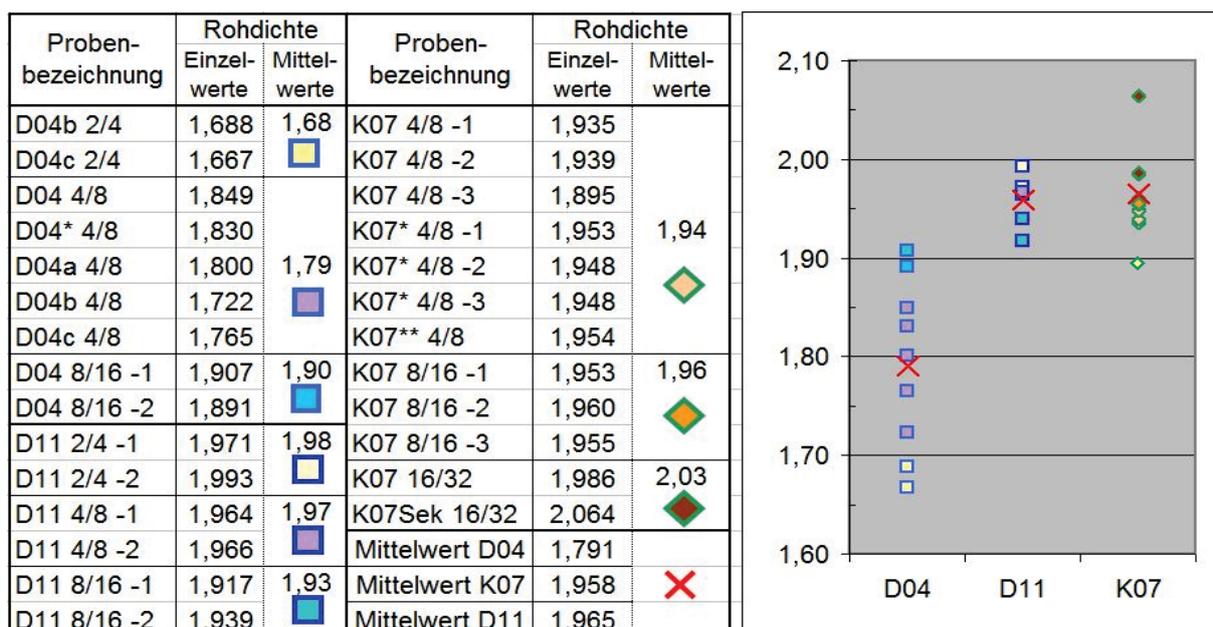


Abbildung 4.62: Schwankungsbreite der Rohdichten über Kornklassen
 Quelle: Eigene



Auffällig ist hier, dass bei den Rezepturen D04 und K07 die kleinen Körner geringere Rohdichten aufweisen, während bei der Rezeptur D11 die Kornklasse 2/4 die höchsten Rohdichten liefert. Ein Vergleich mit den Kraft-Verformungs-Linien der zugehörigen Frischlinge (*Anlage 27*) zeigt, dass diese für die Rezeptur D04 übermäßig häufig ein „weiches Bruchverhalten“ zeigen. Dagegen überwiegt bei den Frischlingen der Rezeptur D11 das „spröde Versagen“ der Frischlinge.

Zu 3.) Unterschiede zwischen den Rezepturen

Die Einzelwerte aus der Rohdichteermittlung sind in *Anlage 32* als Tabelle ausführlich zusammengestellt. In der folgenden *Tabelle 4.18* wurden diese Einzelprüfungen zusammengefasst. Es werden für jede geprüfte Rezeptur - unterteilt nach den Kornklassen - die Maximal-, Minimal- und Mittelwerte dargestellt. Die letzte Spalte enthält die Mittelwerte der Rohdichte, die sich aus allen Einzelprüfungen in den verschiedenen Korngößenklassen der Rezeptur ergeben.

Rezeptur	Kornklassen												MW über alle	
	2/4			4/8			8/16			16/32				
	Max 2/4	Min 2/4	MW 2/4	Max 4/8	Min 4/8	MW 4/8	Max 8/16	Min 8/16	MW 8/16	Max 16/32	Min 16/32	MW 16/32		
D01	-	-	-	-	-	1,95	-	-	-	-	-	-		
D02	-	-	-	2,02	1,96	1,98	2,03	2,02	2,03	-	-	-	2,00	
D03	-	-	-	-	-	2,00	-	-	-	-	-	-	2,00	
D04	1,69	1,67	1,68	1,85	1,72	1,79	1,91	1,89	1,90	-	-	-	1,79	
D04Sek	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,81	-	-	1,81	
D05	1,76	1,69	1,73	1,86	1,84	1,85	-	-	-	-	-	-	1,79	
D08	-	-	-	1,97	1,77	1,87	-	-	-	1,85	-	-	1,92	1,88
D09	-	-	-	-	-	1,79	-	-	-	1,89	-	-	-	1,84
D10	-	-	-	1,73	1,72	1,84	-	-	-	-	-	-	-	1,84
D11	1,99	1,97	1,98	1,97	1,96	1,97	1,94	1,96	1,93	-	-	-	1,96	
K01	-	-	-	1,87	1,84	1,86	-	-	-	-	-	-	1,86	
K04	-	-	-	1,97	1,84	1,91	1,93	1,92	1,93	-	-	-	1,92	
K05	-	-	-	1,87	1,83	1,85	-	-	-	-	-	-	1,85	
K06	-	-	-	2,03	1,96	1,99	-	-	-	-	-	-	1,99	
K07	-	-	-	1,95	1,89	1,94	1,96	1,95	1,96	2,06	1,99	2,03	1,97	
K11	-	-	-	1,67	1,56	1,61	1,59	1,55	1,57	-	-	1,56	1,58	
K12	-	-	-	<u>1,38</u>	<u>1,36</u>	1,37	-	-	-	-	-	-	1,37	
VV1	-	-	-	2,14	2,04	2,09	2,10	2,10	2,10	-	-	-	2,10	
VV2	-	-	-	1,86	1,78	1,82	-	-	-	-	-	-	1,82	
VV3	-	-	-	-	-	-	1,81	1,78	1,79	-	-	-	1,79	
VV6	-	-	-	2,04	1,97	2,00	-	-	-	-	-	-	2,00	
VV21	-	-	-	-	-	-	1,94	1,91	1,93	-	-	-	1,93	
NK	-	-	-	-	-	2,35	-	-	-	-	-	-		

Tabelle 4.18: Zusammenfassung der Maximal-, Minimal- und Mittelwerte der Rohdichten in [g/cm³] über die Agglomeratrezepturen und Kornklassen (bezogen auf Zustand erhärtet, 40°C-getrocknet)

Quelle: Eigene



Dabei ist zunächst auffällig, dass nur 4 Rezepturen eine Rohdichte von 2,0 g/cm³ erreichen. Dieses steht im Widerspruch zu den Ergebnissen von Holle [Holle (2007), (2008)]. Diese Besonderheit wird auf unterschiedliche Prozesszustände während der Versuchserien zurückgeführt, die durch den geänderten Belag des Bodens des Granuliertellers und die andere Art der Zuführung der Ausgangsstoffe entstanden sind.

Deutliche Abhängigkeiten der Rohdichte von der Kornzusammensetzung der Rezepturen sind zumindest in dem untersuchten Bereich der Rezepturen nicht zu erkennen. Die höchste hier erreichte Trockenrohdsichte von 2,1 im Vorversuch VV1 wurde weder mit der sehr ähnlichen Rezeptur D11 noch mit D03 bei noch höherem Feinstkorngehalt erreicht. Dagegen erreicht die ebenfalls zement- und feinststoffreiche Rezeptur D04 einen deutlich geringeren Mittelwert und weist zudem eine große Spannweite der Einzelwerte auf. Dieses ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die Granuliertechologie einen größeren Einfluss als die Rezeptur auf die Eigenschaften der Agglomerate hat.

Die Mittelwerte der experimentell bestimmten Rohdichten der Festlinge werden in der letzten Spalte von *Tabelle 4.18*, für die jeweiligen Agglomeratrezepturen geltend, dargestellt.

Rezeptur K12 stellt eine Besonderheit dar, weil dabei ein extrem hoher Feinststoffgehalt von 20 % Zement und 30 % Flugasche mit dem sehr feinen Sand K2 kombiniert wurde. Innerhalb der bewährten Parameter der Agglomerieranlage und des Zugaberegimes kam diese Mischung nicht in einen angestrebten Prozesszustand mit Bildung von Frischlingen mit erwünschtem Bruchverhalten also „hohe Bruchkraft mit ausgeprägtem Bruchpunkt“. Die Kraft-Verformungs-Linien von Frischlingen der Rezepturen K11 und K12 sind in *Anlage 27, Blätter 4 und 5* als Beispiel für „Agglomerate unzureichender Güte“ dargestellt.

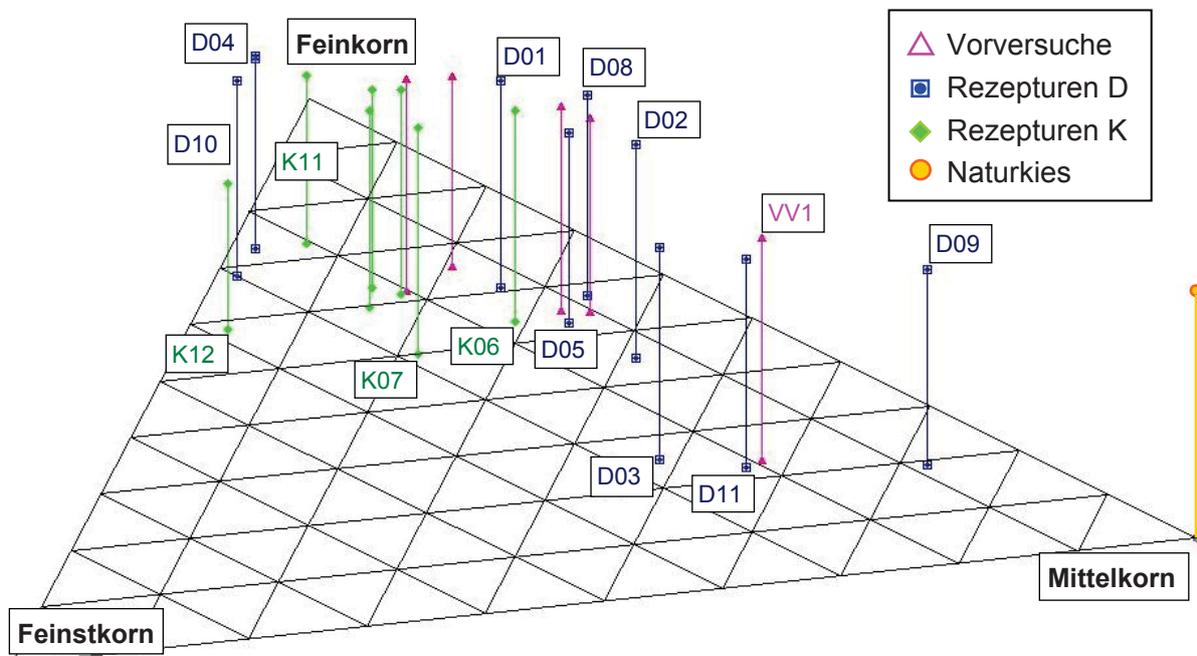


Abbildung 4.63: Darstellung der Mittelwerte der Rohdichten im Dreistoffdiagramm

Quelle: Eigene



Eine Abhängigkeit der Rohdichte der Festlinge von der Rezeptur ist in *Abbildung 4.63* nicht sehr deutlich zu erkennen. Um die funktionale Abhängigkeit zu verdeutlichen, sind in *Abbildung 4.64* die Rohdichten über den Feinststoffgehalt dargestellt.

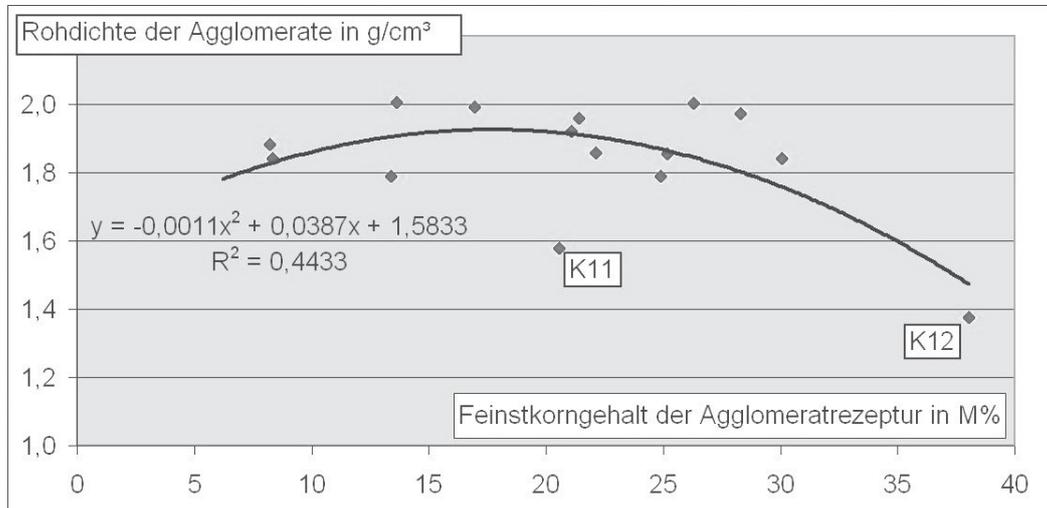


Abbildung 4.64: Abhängigkeit der Rohdichten der Festlinge vom Feinststoffgehalt

Quelle: Eigene

Der Feinststoffgehalt bildet sich gemäß der Definition in dieser Arbeit aus dem Korngrößenbereich von 0 bis 22 µm (Feinstkornanteile von Sand, Zement und Zusatzstoff). *Abbildung 4.64* zeigt hohe Rohdichtewerte bei einem mittleren Feinststoffgehalt von 13 bis 28 M%. Dies stimmt mit den theoretischen Betrachtungen in *Abschnitt 4.3.2* (S. 53f) überein, dass die maximalen Packungsdichten bei Feinstkorngesamten um 20 % zu erwarten sind. Die relativ große Streuung der Rohdichten ist hier eine Folge des starken Einflusses des Prozesszustandes auf die Eigenschaften der Agglomerate.

Sein Einfluss überdeckt den Einfluss des Feinststoffgehaltes auf das Zustandekommen einer vorhersagbaren Agglomeratrohdichte. Sowohl ein sehr hoher als auch ein sehr geringer Feinststoffanteil kann zu einer niedrigen Agglomeratrohdichte führen, wenn die Prozessbedingungen nicht das Optimum für das jeweilige Stoffgemenge erreichen. Dies ist an den beiden Rezepturen K11 und K12 deutlich zu erkennen. Beide bestehen aus dem feinen, sehr einkörnigen Sand K2 mit geringem (K11: 90:5:5) und hohem (K12: 50:20:30) Feinststoffgehalt.

Betrachtung von Porengehalt und Packungsdichte

Die in der folgenden *Tabelle 4.19* aufgelisteten Porengehalte und Packungsdichten der Agglomeratproben berechnen sich aus den während der Rohdichtebestimmung gemessenen Werten nach den in *Abschnitt 4.6.3* eingeführten Formeln. Die Werte von Porengehalt und Packungsdichte verhalten sich zueinander umgekehrt proportional.



Rezeptur	Porengehalt in Vol.-%					Packungsdichte				
	2/4	4/8	8/16	16/32	Mittel ü.a.	2/4	4/8	8/16	16/32	Mittel ü.a.
VV1	-	14,8	12,3	-	13,5	-	0,852	0,877	-	0,86
VV2	-	25,0	-	-	25,0	-	0,750	-	-	0,75
VV3	-	-	27,2	-	27,2	-	-	0,728	-	0,73
VV6	-	20,1	-	-	20,1	-	0,799	-	-	0,80
VV21	-	-	20,5	-	20,5	-	-	0,795	-	0,80
D01	-	20,6	-	-	20,6	-	0,794	-	-	0,79
D02	-	20,1	17,5	-	18,8	-	0,799	0,825	-	0,81
D03	-	17,1	-	-	17,1	-	0,829	-	-	0,83
D04	<u>32,4</u>	<u>22,9</u>	<u>17,9</u>	-	24,4	0,676	0,771	0,821	-	0,76
D04Sek	-	-	22,0	-	22,0	-	-	0,780	-	0,78
D05	27,7	23,7	-	-	25,7	0,723	0,763	-	-	0,74
D08	-	<u>27,3</u>	<u>24,2</u>	<u>19,6</u>	23,7	-	0,727	0,758	0,804	0,76
D09	-	23,8	19,1	-	21,4	-	0,762	0,809	-	0,79
D10	-	23,8	-	-	23,8	-	0,762	-	-	0,76
D11	17,8	18,3	17,8	-	18,0	0,822	0,817	0,822	-	0,82
K01	-	24,4	-	-	24,4	-	0,756	-	-	0,76
K04	-	22,5	18,6	-	20,5	-	0,776	0,814	-	0,79
K05	-	24,2	-	-	24,2	-	0,758	-	-	0,76
K06	-	17,4	-	-	17,4	-	0,826	-	-	0,83
K07	-	<u>19,5</u>	<u>16,2</u>	<u>12,5</u>	16,1	-	0,805	0,838	0,875	0,84
K11	-	36,9	36,7	34,6	36,0	-	0,631	0,633	0,654	0,64
K12	-	39,0	-	-	39,0	-	0,610	-	-	0,61

Tabelle 4.19: Zusammenstellung der aus den Rohdichten ermittelten Porengehalte und Packungsdichten

Quelle: Eigene

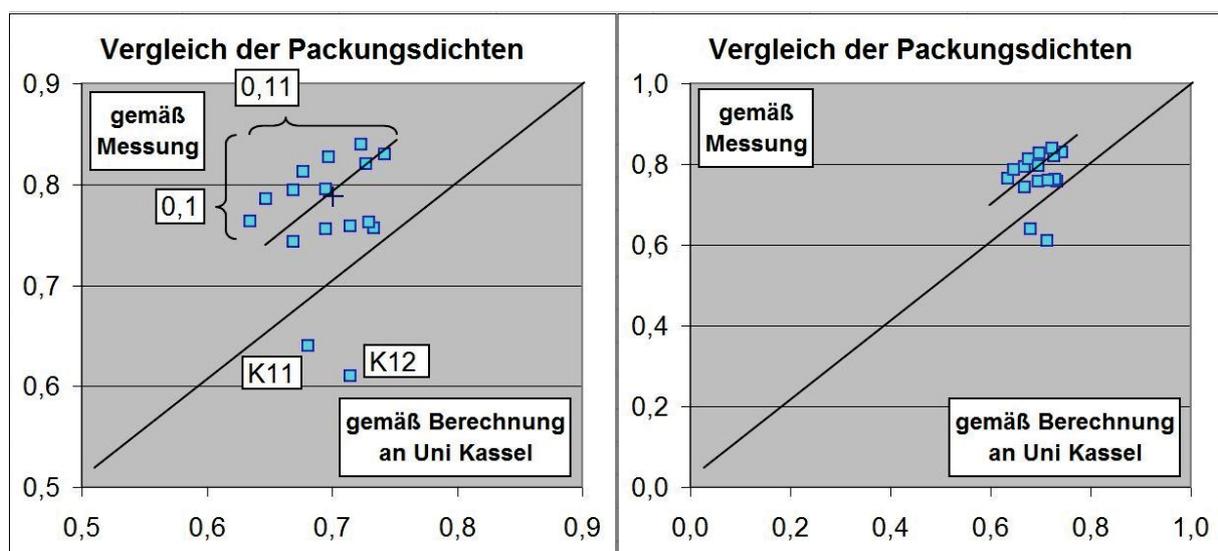


Abbildung 4.65: Vergleich von gemessenen und berechneten Porengehalten, mit Angabe der Schwankungsbreiten

Quelle: Ergebnisse aus empirisch-numerischer Berechnung der Universität Kassel, eigene Messungen



Bei dem Vergleich der Packungsdichte aus der Berechnung Kassel und den Ergebnissen, die aus der Rohdichtemessung berechnet werden, zeigt sich der in *Abbildung 4.65* dargestellte Zusammenhang mit einer erwartungsgemäßen Streuung. Die Wertegruppe ergibt sich aus den in *Tabelle 4.19* aufgeführten Rezepturen. Die aus der Rohdichteermittlung berechneten Packungsdichten streuen ebenfalls. Beachtenswert ist der Umstand, dass bei den über die Rohdichte ermittelten Packungsdichten nicht nur der Rezeptureinfluss Streuungen erzeugt, sondern auch das Granuliersystem selbst sowie die Messungenauigkeiten bei der Rohdichteermittlung. Angesichts dieses Zusammenhangs muss die Streubreite der Messergebnisse als gering angesehen werden. Die Streubreite der berechneten Ergebnisse ist sogar etwas größer. Die experimentell bestimmten Werte der Packungsdichten sind erwartungsgemäß rund 11 % höher, da die fertigen Agglomerate durch die Wasseraufnahme des Zementes den Porenraum verkleinern. Die beiden Punkte der Rezepturen K11 und K12 stellen einen Sonderfall dar, weil bei diesen Versuchen kein optimaler Zustand des Agglomerierprozesses erreicht wurde (wie in *Tabelle 4.18* beschrieben). Ein ausreichend guter Prozesszustand hinsichtlich der Packungsdichte zeigt sich in *Abbildung 4.65* bei den Rezepturpunkten oberhalb der Winkelhalbierenden.

Aus dem Vergleich der beiden Bestimmungsmethoden geht hervor, dass die empirisch-numerische Berechnung der Uni Kassel als Verfahren für eine erste Bewertung der Eignung einzelner Rezepturen unter Vernachlässigung besonderer Prozesszustände geeignet ist.

Fazit zu Rohdichte, Porengehalt und Packungsdichte:

Die Rohdichte liegt bei den hier durchgeführten Versuchen überwiegend unter $2,0 \text{ g/cm}^3$. Damit sind die Sand-Zement-Agglomerate gemäß der in DIN EN 206 vorgenommenen Einteilung nach Rohdichte nicht als Normalzuschlag, sondern als Leichtzuschlag anzusehen.

Die Abhängigkeit der Werte sowohl der Rohdichte als auch des Porengehaltes und der Packungsdichte von den Rezepturen wird von dem stärkeren Einfluss des Agglomerierprozesses überlagert. Daher lässt sich in den Dreistoffdiagrammen mit Darstellung der Rohdichte in z-Richtung ein Bereich mit optimalen Rezepturen nicht eingrenzen. Auch die allgemeinere Eigenschaft des Feinststoffgehaltes der Agglomeratrezeptur wird stark von dem Einfluss des Prozesszustandes überlagert und ist damit kein ausreichendes Merkmal zum Identifizieren einer optimalen Rezeptur.

Bei Messsystemen mit guter Reproduzierbarkeit eignet sich die Rohdichtebestimmung von Festlingen für die Abschätzung der erreichten Packungsdichte und kommt damit als qualitätssicherndes Kriterium in Frage. Dafür könnten Methoden wie die Unterwasserwägung oder Druckausgleichsverfahren wie der LP-Topf näher untersucht werden.

Bei den Porengehalten und den dazu umgekehrt proportionalen Packungsdichten zeigt sich eine Abhängigkeit von der Korngröße der Agglomerate. Die geringere Porosität der größeren Kornklassen erklärt sich durch die längere Verweilzeit der Agglomerate im Prozessraum und die damit verbundene bessere Verdichtung während der Aufbauagglomeration. Außerdem



erfahren größere Agglomerate durch ihr höheres Eigengewicht während des Abrollens im Prozessraum intensivere Stöße und eine größere Verdichtungsarbeit.

Die Ergebnisse der „Bestimmung des WSP mit reichlich Verdichtungsenergie“ einerseits und die Rohdichten und Porengehalte der Festlinge andererseits sind für einen Quervergleich nicht geeignet, da die Rohdichten und damit die Porengehalte der Agglomerate sehr stark von den Prozessbedingungen abhängen und schwanken. Dieser Einfluss überdeckt die Verschiedenheit der WSP der Rezepturen. Die dynamischen Bedingungen des Agglomerierprozesses werden durch den statischen Zustand, der bei der Bestimmung des Wassersättigungspunktes herrscht, nicht erfasst. Der WSP stellt vielmehr einen unteren Grenzwert der erreichbaren Porengehalte für eine Rezeptur dar.

4.6.4 Widerstand von Agglomeraten gegen Frost-Tau-Beanspruchung

Die Prüfung erfolgte nach DIN EN 1367-1. Es wurden die folgenden Rezepturen geprüft:

Probe Nr.	Agglomerat		Verlustmenge	
	Rezeptur	Kornklasse	absolut [g]	relativ [%]
01	D04	4/8	10,62	2,0
02	D04	8/16	17,86	1,7
03	D04	16/32	18,68	1,9
04	K04	4/8	79,17	3,8
05	K07	4/8	29,77	1,5
06	K07	8/16	20,11	1,5
07	D11	4/8	28,88	1,4
08	K05	4/8	52,6	2,4
09	VV22b	4/8	37,4	2,1
10	D10	8/16	52,39	3,2

Tabelle 4.20: Abwitterungswerte von Agglomeratproben beim Frost-Tau-Wechsel-Versuch

Quelle: Eigene

Gemäß DIN 12620 von 07/2008 (Gesteinskörnungen für Beton) sind für Gesteinskörnung der Kategorie $F_2 \leq 2\%$ und für $F_4 \leq 4\%$ Masseverlust beim Frostversuch unter Wasser einzuhalten. Bilder der Agglomerate nach Frost-Tau-Wechselbeanspruchung befinden sich in *Anlage 34*.

4.6.5 Bewertung der AKR-Empfindlichkeit der Agglomerate

Um die AKR-Empfindlichkeit der Agglomerate als „künstliche, grobe Gesteinskörnung“ zu beurteilen, erfolgte zunächst eine petrographische Ansprache der verwendeten Sande (siehe Auszug aus Petrographieprüfbericht in *Anlage 4*). Darin wurden die Anteile an potentiell AKR-gefährdeten Mineralien in den Sanden abgeschätzt. Aus Sand D1, als dem mit dem höchsten AKR-Gefährdungspotential, wurden Agglomerate der Rezeptur D11 (70: 0:20:10) hergestellt und mit dem in Teil 3, Kapitel 5.2 der Alkali-Richtlinie des DAfStb (*DAfStb (2007)*) beschriebenen Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren) untersucht. Der zulässige



Grenzwert von 1 mm/m nach 13 Tagen wurde dabei deutlich unterschritten. (siehe auch Werte in *Anlage 35*) Damit sind die Agglomerate im Sinne der Alkali-Richtlinie (Stand 2007) der Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S zuzuordnen.

Für die langfristige Beobachtung wurden einige Betonprobekörper ausgelagert und werden halbjährlich beurteilt.

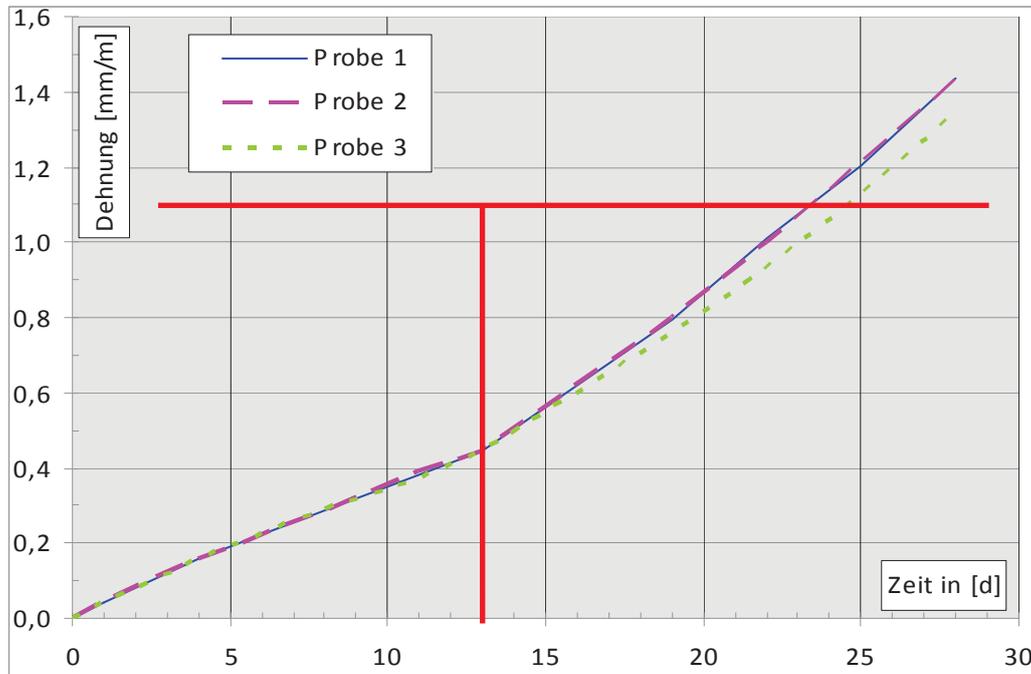


Abbildung 4.66: Verlauf der Prüfkörperdehnungen beim Schnellprüfverfahren nach Teil 3, Kapitel 5.2 der Alkalirichtlinie

Quelle: TUHH, B-3

Aufgrund der besonderen Feinheit der Ausgangssande der Agglomerate sowie ihrer mineralurgischen Zusammensetzung ist das Entstehen von Schäden durch die AKR nahezu ausgeschlossen. Wie in *Abbildung 4.66* dargestellt, wird der zulässige Grenzwert gemäß Schnelltest nicht überschritten, obwohl der verwendete Sand D1 laut der petrografischen Untersuchung derjenige mit dem größten Treibpotential im Rahmen dieser Untersuchung ist.

Die Feinheit des Ausgangssandes verhindert beim Entstehen der AKR die Treibwirkung im Beton, da der Porenraum des Agglomerates mit rund 20 Vol% dem der Betonmatrix mit 10 Vol% hinzuzurechnen ist. Diese Gesamtporenmenge im Agglomeratbeton ist weitaus größer, als die jeweils punktuell am treibenden Korn entstehende Gelmenge.

Auf Grund dieser Überlegungen wird davon ausgegangen, dass sich keine erhöhte AKR-Empfindlichkeit des Betons durch die Agglomerate als künstliche Gesteinskörnung ergibt und sie für alle Feuchtigkeitsklassen des Betons im Sinne der Richtlinie verwendet werden können.



4.6.6 Nachbehandlung

Wie für zementgebundene Materialien üblich, muss ein Austrocknen der jungen Agglomerate für einen Zeitraum von mindestens 3 Tagen vermieden werden. Dabei können vorhandene Erfahrungen, zum Beispiel aus der Herstellung erdfeuchter Betonwaren wie Betonpflaster, genutzt werden.

Eine Randbedingung für die Nachbehandlung ist die mögliche Schütthöhe der jungen Agglomerate. Diese kann je nach hergestellter Qualität und bisherigen Erfahrungen von 30 bis 50 cm variieren. Da eine solche Schüttung nur an der Oberfläche und den Rändern austrocknen kann, ist ein Abdecken oder leichtes Besprühen der Oberfläche ausreichend, um das Austrocknen zu vermeiden.

Bei Mischversuchen wurden die Agglomerate ab einem Mindestalter von 7 Tagen für die Herstellung von Beton verwendet. Eine Zerstörung der Agglomerate beim Mischen konnte nicht festgestellt werden. Bei Agglomeraten mit sehr hoher Festigkeit wie aus der Machbarkeitsstudie [Holle (2007)] konnten diese auch schon im Alter von drei Tagen den Beanspruchungen des Betonmischprozesses widerstehen.

4.6.7 Zusammenfassung zu den Festlingen

Die Untersuchungsergebnisse zeigen zusammenfassend, dass es möglich ist, bei Verwendung verschiedenster Sandzusammensetzungen, mit unterschiedlichen Bindemittelgehalten und bei geeigneter Herstellungstechnologie Agglomerate zu erzeugen, die trotz ihrer weit gefächerten stofflichen Zusammensetzung als grobe Gesteinskörnung für die Betonherstellung geeignet sind.

Aus wirtschaftlichen Erfordernissen ergibt sich die Notwendigkeit, die Rezepturen in bezug auf Korngrößenverteilung und Bindemittelgehalt zu optimieren. Zum Erzeugen von Agglomeraten gleichmäßiger Eigenschaften hat aber vor allem der Prozesszustand bei der Herstellung der Frischlinge großen Einfluß. Daher kommt der Flexibilität der Agglomerieranlage, ihrer Steuerung und dem Zugaberegime zum Gewährleisten eines günstigen Agglomerierzustandes besondere Bedeutung zu. Wenn dies sichergestellt ist, kommt je nach Anspruch an die Wirtschaftlichkeit eine große Bandbreite möglicher Rezepturen zum Herstellen von Agglomeraten in Frage.

Der w/z-Wert der Agglomeratrezepturen ist lediglich eine technologische Kenngröße für das Erzeugen des adhäsiven Zusammenhaltes der frischen Agglomerate. Der w/z-Wert hat für die erhärteten Agglomerate nicht die Bedeutung einer festigkeitsbeschreibenden Kenngröße wie bei Normalbeton über die Walzschen Kurven.

Zur Qualitätssicherung der erhärteten Agglomerate eignen sich sowohl die Einzelkorn-Druckprüfung und die Bestimmung der kollektiven Druckfestigkeit. Die Bestimmung der kollektiven Druckfestigkeit als ein bewährtes Verfahren nach DIN 4226-3 und DIN EN 13055, Teil 1, Anhang A, ist unhandlich und daher für große Prüfserien nicht praxisgerecht. Demgegenüber bietet eine automatisierte Einzelkorndruckprüfung eine homogenere Werteerfassung und erlaubt eine kontinuierliche statistische Bewertung.



Daneben bieten sich die Bestimmung der Rohdichte mit den daraus folgenden Aussagen zu Porengehalt und Packungsdichte als Qualitätsparameter an. Ihre Bestimmung ist jedoch sehr zeitaufwändig und fehleranfällig.

Bei Verwendung optimaler Rezepturen und der Prozesszustände „A“ und „C“ (gemäß Abschnitt 4.5.1.2) entstehen Agglomerate, die als F₂ oder F₄ gemäß DIN EN 206 eingestuft werden können. Obwohl in jedem Zement-Sand-Gemisch eine zumindest geringfügige AKR stattfindet, entsteht im Agglomeratbeton keine schädigende Alkali-reaktion gemäß Alkali-Richtlinie.

4.7 Agglomeratbeton

Im dritten Teil der Versuchsphase wurden die vorhandenen Agglomeratmengen als grobe Gesteinskörnung in Betonrezepturen eingesetzt und daraus Betonprobekörper hergestellt. An diesen Probekörpern erfolgte die Prüfung der wesentlichen Betoneigenschaften und damit die Bestätigung der Verwendbarkeit von Agglomeraten als grobe Gesteinskörnung.

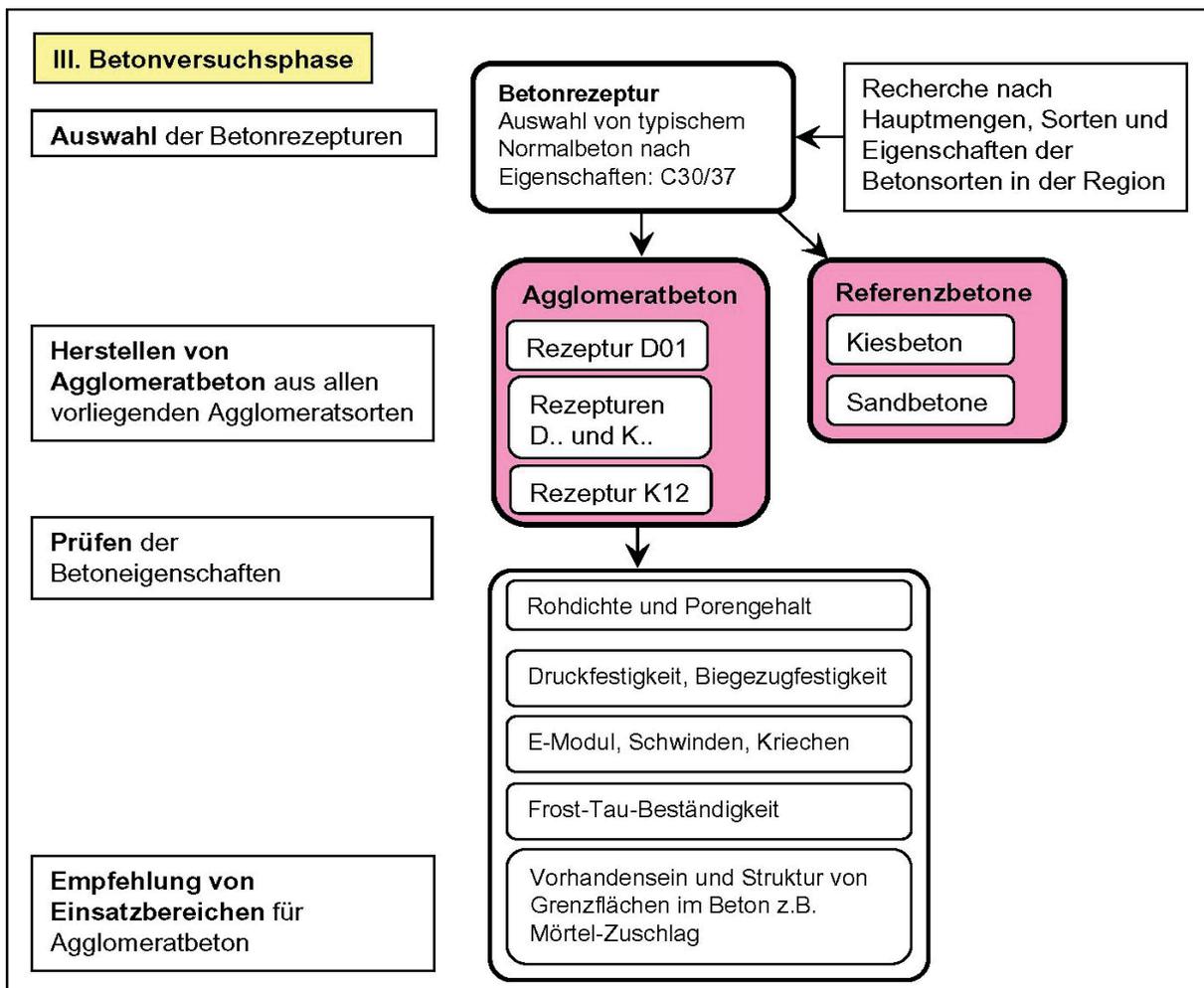


Abbildung 4.67: Übersicht über Betonversuchsphase

Quelle: Eigene



Die Vielzahl der Anforderungen für Leichtzuschlag rühren aus der Vielzahl der möglichen Stoffzusammensetzungen. Ebenso gelten für rezyklierte Gesteinskörnungen in DIN 4226-100 diverse Unterkategorien, in denen zum Beispiel die Anteile an unerwünschten Bestandteilen (siehe auch *Abschnitt 3.5*) begrenzt werden.

Von den in der DIN EN 12620 geforderten Eigenschaften für Gesteinskörnungen sind für Sand-Zement-Agglomerate nur die folgenden regelmäßig zu prüfen: Korngröße, Rohdichte und Wasseraufnahme. Zusätzlich wird die Ermittlung der Druckfestigkeit über die Einzelkornprüfung oder das kollektive Prüfverfahren zur Qualitätsüberwachung empfohlen. Die Prüfungen auf Zertrümmerung, Verschleiß und Abrieb, des Frostwiderstandes sowie der Schüttdichte sind bei speziellen Anwendungen erforderlich.

Nach den im vorherigen Kapitel beschriebenen Ergebnissen dieser Prüfungen werden die Agglomerate als grundsätzlich geeignete grobe Gesteinskörnungen für Beton angesehen.

Vergleich von zu prüfenden Eigenschaften von Gesteinskörnungen (Auszug): x - prüfpflichtig, - nicht prüfpflichtig	Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 für Normalbeton	Rezyklierte Gesteinskörnung nach DIN 4226-100 (2002)	Leichtzuschlag (z.B. Blähton), gemäß DIN EN 13055-1 (2002)	Sand-Zement-Agglomerate
Kornzusammensetzung (Korngrößenverteilung)	x	x	x	x
Kornform	x	x	x	-
Muschelgehalt	x	-	-	-
Gehalt an Feinstanteilen	x	x	x	-
Widerstand gegen Schlagzertrümmerung	x	x	-	x -
Widerstand gegen Verschleiß	x	x	-	x
Widerstand gegen Polieren u. Abrieb	x	x	-	x
Kornrohichte	x	x	x	x
Wasseraufnahme	-	x	x	x
Frost- und Tau-Widerstand	x	x	x	x
Frost- und Tausalz-Widerstand	x	-	-	x
Raumbeständigkeit (Schwinden infolge Austrocknung)	x	x	x	-
AKR-Reaktivität	x	x	x	-
Gehalt an Chloriden	x	x	x	-
Gehalt schwefelhaltiger Bestandteile	x	x	x	-
Gehalt anderer Bestandteile (erstarrungs- und erhärtungsstörende)	x	x	x	-
Plattigkeitskennzahl	x	x	-	-
Kornformkennzahl	x	x	-	-
Schüttdichte	-	-	x	x
Glühverlust	-	-	x	-
Oberflächenbeschaffenheit	-	-	x	-
Kornfestigkeit	-	-	x	x
Raumbeständigkeit	-	-	x	-
Anteil gebrochener Körner	-	-	x	-

Tabelle 4.21: Gegenüberstellung zu prüfender Eigenschaften an verschiedenen Gesteinskörnungen für Beton

Quelle: DIN EN 12620, DIN 4226-100, DIN EN 13055-1, Eigene



4.7.1 Betonrezepturen mit Agglomerat als grobe Gesteinskörnung

Um die zentrale These dieser Arbeit – dass aus Sand-Zement-Agglomerat hergestellter Beton einem Beton mit natürlicher grober Gesteinskörnung gleichwertig ist – zu untersuchen, war es ein wichtiger Teil der Versuche, aus den verschiedenen Agglomeraten Beton herzustellen und seine Eigenschaften zu prüfen.

Im Rahmen von Vorgesprächen mit Fachleuten aus Baustoffprüfstellen und Transportbetonwerken in Hamburg, Schleswig-Holstein und Niedersachsen, wurde die Tendenz sichtbar, dass im Jahr 2011 in Hamburg die Hauptmenge von ca. 60 % des gelieferten Betons der Klasse C 35/45 entsprach, während in den ländlichen Bereichen etwa 70 % der Liefermenge auf die Betonklasse C 25/30 entfiel.

Für in großer Menge hergestellten Beton, wie z.B. für flach gegründete Fundamente von Brücken oder Windkraftwerken ist die Festigkeitsklasse C25/30 im Allgemeinen ausreichend. Um Spielraum für erhöhte Ansprüche an den Beton aus den Expositionsklassen oder durch lokale Belastungen zu haben, wurde für diese Untersuchungen eine Zielfestigkeit der Betonrezepturen gemäß C30/37 gewählt. Außerdem wurden die in *Abschnitt 4.3.1* angestellten Überlegungen zu Expositionsklassen mit in die Entscheidung für die gewählte Rezeptur einbezogen.

Das Größtkorn der hier untersuchten Betonrezepturen ergab sich abhängig von den zur Verfügung stehenden Agglomeratmengen auf 32 mm, 16 mm oder 8 mm. Für alle Rezepturen der Hauptversuche wurden auf Grundlage der obigen Argumente die folgenden Parameter festgelegt:

- Kornzusammensetzung: Sieblinie B
- w/z-Wert = 0,55 mit Bindemittel CEM I 42,5; kein Einsatz von SFA als Füller
- Konsistenzklasse 3 (420 – 480 mm Ausbreitmaß); Einstellen der Konsistenz nach maximal zulässiger Wasserzugabe durch Fließmittel FM 34 (SIKA)
- Sand D1 als feine Gesteinskörnung für die Kornanteile 0/2 mm

Ausgehend von diesen Randbedingungen wurden als grobe Gesteinskörnung jeweils die entsprechenden Mengen der Sand-Zement-Agglomerate zum Erreichen der Sieblinie B zugegeben.

Als Referenzbeton wurde eine Rezeptur mit gleichen Zugabevolumen der Gesteinskörnungen hergestellt, in der die Agglomerate durch Naturkies ersetzt wurden.

Die Problematik, einen mit Kiesbeton oder Agglomeratbeton vergleichbaren Sandbeton herzustellen, besteht darin, dass die aus der zur Benetzung der Oberfläche des Sandes erforderliche größere Wassermenge bei Einhaltung des w/z-Wertes eine größere Zementmenge im Sandbeton ergibt. Ein Ansatz, um eine Vergleichbarkeit zwischen einem Agglomeratbeton und einem Sandbeton herzustellen, ist, den Sandbeton mit in der Summe gleicher Zusammensetzung wie den Agglomeratbeton herzustellen. Dazu werden die Zugabemengen der Sande, von Zement, Flugasche und Wasser bei der Agglomerat-



herstellung sowie die Zugabemengen von Sand D1, Zement und Wasser bei der Verarbeitung dieser Agglomeratmenge als Rezeptur für einen Sandbeton verwendet. Die Soll-Konsistenz wird durch Fließmittelzugabe eingestellt. So ist zum Beispiel die Sandbetonsorte SB K07 in der Summe der Zusammensetzung gleich mit den Betonproben der Rezeptur K07, ohne dass ein Agglomerieren stattgefunden hat.

Rezepturnamen Sandbetone:	Probenbezeichnungen:	ursprüngliche Betonrezeptur:	Probekörper der ursprünglichen Betonrezeptur:
SB K07	S01-1 bis S01-8	B32K07	04-1 bis 04-4
SB K04	S02-1 bis S02-5	B16K04x	02-1 bis 02-4
SB D05b-1	S04-4 bis S04-8	B32D05b	15-1 bis 15-5
SB D04-1 und -2	S03-2 bis S03-4	B32D04a	09-1 bis 09-4
SB D05b-2	S04-1 bis S04-3	B32D05b	08-1
SBD04Schw	65-1 bis 65-5	B16D04Schw	69-1 bis 69-9
SBD11Schw	66-1 bis 66-6	B16D11Schw	70-1 bis 70-4
SBK04Schw	67-1 bis 67-6	B16K04Schw	68-1 bis 68-7

Tabelle 4.22: Zuordnung der Sandbetonrezepturen zu den Agglomeratbetonproben gleicher Summenzusammensetzung

Quelle: Eigene

Die einzelnen Rezepturen und Zugabemengen bei der Probenherstellung sind in *Anlage 36* dargestellt.

Das Anmischen des Agglomeratbetons erfolgte mit einem Laborzwangsmischer. Die Wassermengen wurden mit Messzylindern und die Mengen der Schüttgüter mit üblichen Laborwaagen zugemessen.

4.7.2 Frischbetoneigenschaften des Agglomeratbetons

Wasseraufnahme der Agglomerate

Aufgrund der höheren Porosität und der damit verbundenen kapillaren Saugfähigkeit der Agglomerate im Vergleich zu den natürlichen *groben Gesteinskörnungen* saugen die Agglomerate einen für sie typischen Anteil des Zugabewassers in sich auf. Deshalb ist es notwendig, die *Wasseraufnahme* zu kennen und bei der Betonrezeptur zu berücksichtigen. Bei den Versuchen von Holle [Holle (2007)] wurde nachgewiesen, dass das Aufsaugen nach 6 Minuten beendet ist. Je nach Dichtigkeit der inneren Struktur der Agglomerate kann dieser Wert schwanken und ist deshalb rezepturspezifisch zu berücksichtigen.

Ein kurzzeitiges Vornässen der Agglomerate ist eine ausreichende Maßnahme, um die projektierte Konsistenzklasse des Frischbetons zu erreichen. Das Vornässen erfolgt durch Tauchen der Agglomerate. Die Zeitdauer wurde entsprechend vom Größtkorndurchmesser der jeweiligen Kornklasse in Sekunden festgelegt. Das bedeutet, die Kornklasse 8/16 wird für 16 Sekunden und die Kornklasse 16/32 für 32 Sekunden getaucht. Überschüssiges



Haftwasser wird durch Schocken auf einem Sieb entfernt. In der Mischung dennoch auftretende Konsistenzschwankungen werden durch Zugabe geringer Mengen Fließmittel ausgeglichen.

Mischverhalten und Verarbeitbarkeit

Die Agglomerate zeigen ein rolliges Verhalten beim Mischen mit relativ geringem Mischwiderstand (durch die rundliche Kornform und die geringere Dichte als z.B. Naturkies) und (durch das Vornässen) kein Ansteifen der Mischung nach Zugabe der *groben Gesteinskörnung*.

Die vorgegebene Konsistenzklasse F3 mit dem Ausbreitmaß von 420 bis 480 mm wurde jeweils problemlos erreicht. Bei der Herstellung der Probekörper gab es bei der Verdichtung auf einem Laborrütteltisch keine Auffälligkeiten. Entmischungen während der Verdichtung sowie schollige Abbrüche wurden nicht festgestellt.

4.7.3 Druckfestigkeit, Dauerhaftigkeit, Strukturmerkmale, Verformungskennwerte

Für die Auswertung von Festbetonprüfungen:

Die Druckfestigkeit von Beton wird nach den Regeln des DIN-Fachberichtes 100, in dem die Festlegungen der DIN EN 206-1 Teil 1 und die dazugehörigen nationalen Verweise der DIN 1045-2 zusammengefasst sind, ermittelt. Das heißt, die sogenannten charakteristischen Festigkeiten werden aus Probekörpern, wie Zylindern ($h/d = 300/150$ mm) oder Würfeln (150 mm), gemäß DIN EN 12390-1 und -2 im Alter von 28 Tagen bestimmt.

Die Einzeldruckfestigkeit $f_{ck,cube}$ der Würfel wird Festigkeitsklassen zugeordnet. Diese werden zum Beispiel als „C30/37“ für „Concrete“ und „30“ für $f_{ck,cyl}$ Zylinder und „37“ für $f_{ck,cube}$ der Würfel bezeichnet. Das Erreichen der Klasse kann als Mittelwert von 3 bis 4 Einzelprüfkörpern bei Einhalten eines kleinsten Einzelwertes mit der folgenden Regel für einen C30/37 nachgewiesen werden.

Nach dem Prinzip der Erstprüfung gilt:

$$\text{Mittlere Serienfestigkeit:} \quad f_{cm} \geq f_{ck} + 4 = 41 \text{ N/mm}^2 \quad (4.21)$$

$$\text{Kleinster Einzelwert:} \quad f_{ci} \geq f_{ck} - 4 = 33 \text{ N/mm}^2 \quad (4.22)$$

Bestimmung der Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Größe der Betonprobewürfel:

Aus praktischen Erwägungen und Notwendigkeiten wurden im Rahmen dieser Untersuchungen als Betonprobekörper Würfel mit 200, 150 und 100 mm Kantenlänge hergestellt. Die an 200- und 100-mm-Probewürfeln ermittelten Druckfestigkeiten werden mit einem Korrekturfaktor belegt. Daher werden in den Ergebnistabellen (*Anlage 37*) und den weiteren Kapiteln nur direkt vergleichbare Werte $f_{c,cube,(150mm)}$ für Würfel mit 150 mm Kantenlänge aufgeführt.



Die an 100-mm-Würfeln ermittelten Druckfestigkeiten werden gemäß DIN 1045-2, Abschn. 5.5.1.2, S. 33 mit dem Faktor 0,97 multipliziert:

$$f_{c,cube,(150mm)} = 0,97 * f_{c,cube,(100mm)} \quad (4.23)$$

Gemäß Schulze [Schulze, (1965)] sowie Diagramm in [Wesche (1993), S.242] ist der 100-mm-Würfel um 15 % fester als der Würfel mit 200 mm Kantenlänge. Also ist:

$$f_{c,cube,(100mm)} = 1,15 * f_{c,cube,(200mm)} \quad (4.24)$$

und

$$f_{c,cube,(100mm)} = \frac{f_{c,cube,(150mm)}}{0,97} \quad (4.25)$$

Daher ist

$$f_{c,cube,(150mm)} = (0,97 * 1,15) * f_{c,cube,(200mm)} = 1,035 * f_{c,cube,(200mm)} \quad (4.26)$$

Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Lagerungsart der Betonprobewürfel:

Gemäß DIN EN 12390-2, Abschn. 5.5.2 wird nach dem Ausformen bis zum Prüfbeginn von einer Lagerung im Wasserbad bei 20°C oder in einer Feuchtekammer bei 20°C und 95 % relativer Feuchte ausgegangen. Gemäß Abschnitt 5.5.3 der DIN dürfen die bei abweichenden Lagerungsarten ermittelten Werte über Umrechnungsfaktoren an die als Referenzverfahren geltende Wasserlagerung angepasst werden.

Für die Lagerung nach DIN EN 12390-2, Anhang NA, bei der die Probekörper am 7. Tag der Wasserlagerung oder der Feuchtekammer entnommen werden und bis zur Prüfung in einem Raum bei 65 % relativer Luftfeuchte und ca. 20°C bleiben, liefert DIN 1045-2 (Abschn. 5.5.1.2, S. 33) den Umrechnungsfaktor (gültig für Normalbeton bis C50/60):

$$f_{c,cube} = 0,92 * f_{c,dry} \quad (4.27)$$

Umrechnungsfaktoren für Druckfestigkeiten der Prüfkörper zur Bestimmung des E-Moduls:

Die Probekörper 42-1 und 48-5 (siehe *Anlage 35*), an denen die Bestimmung des E-Modul erfolgte, wurden anschließend bis zum Bruch belastet. Um die dabei erhaltenen Bruchfestigkeiten mit den an Würfeln ermittelten Druckfestigkeiten vergleichen zu können, werden sie nach Wesche [Wesche (1993) T. 2, 3. Aufl., S. 243] mit folgender Formel umgerechnet:

$$\beta_D = \beta_{D1} * \frac{2 + \frac{d}{h}}{3} \quad (4.28)$$

mit β_D - Druckfestigkeit Quader

β_{D1} - Druckfestigkeit Würfel

d - Durchmesser bei Voellmy (hier mittlere Seitenlänge des Quaders)

h - Höhe des Quaders



Auswertung der Druckfestigkeiten:

Die Darstellung der Einzelfestigkeiten und Serienfestigkeiten der Probewürfel für die Betonproben jeder Betonrezeptur erfolgt in *Anlage 37*. Nachfolgend werden die vorhandenen Mittelwerte der Betondruckfestigkeit und der Festbetonrohddichte als Zusammenfassung für alle untersuchten Rezepturen in *Abbildung 4.68* dargestellt. Dabei werden für die einzelnen Betonrezepturen die Größtkorndurchmesser von 8 mm, 16 mm und 32 mm und Agglomeratsorten unterschieden.

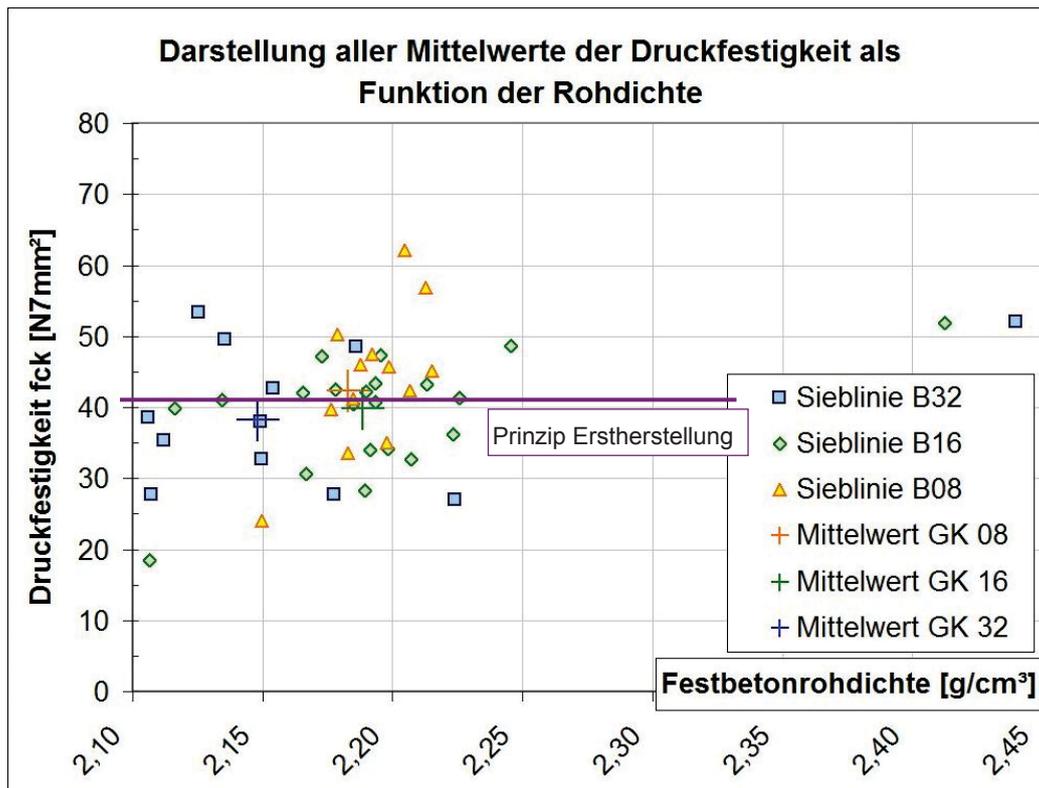


Abbildung 4.68: Druckfestigkeit des Agglomeratbetons in Abhängigkeit von Rohdichte und Kornzusammensetzung

Quelle: Eigene

Bei Betrachtung des gesamten Wertefeldes liegt die Hälfte aller Punkte über 41 N/mm². Damit erfüllen 50 % der Rezepturen die Anforderung nach dem Prinzip der Ersterstellung für die Betonfestigkeitsklasse C30/37.

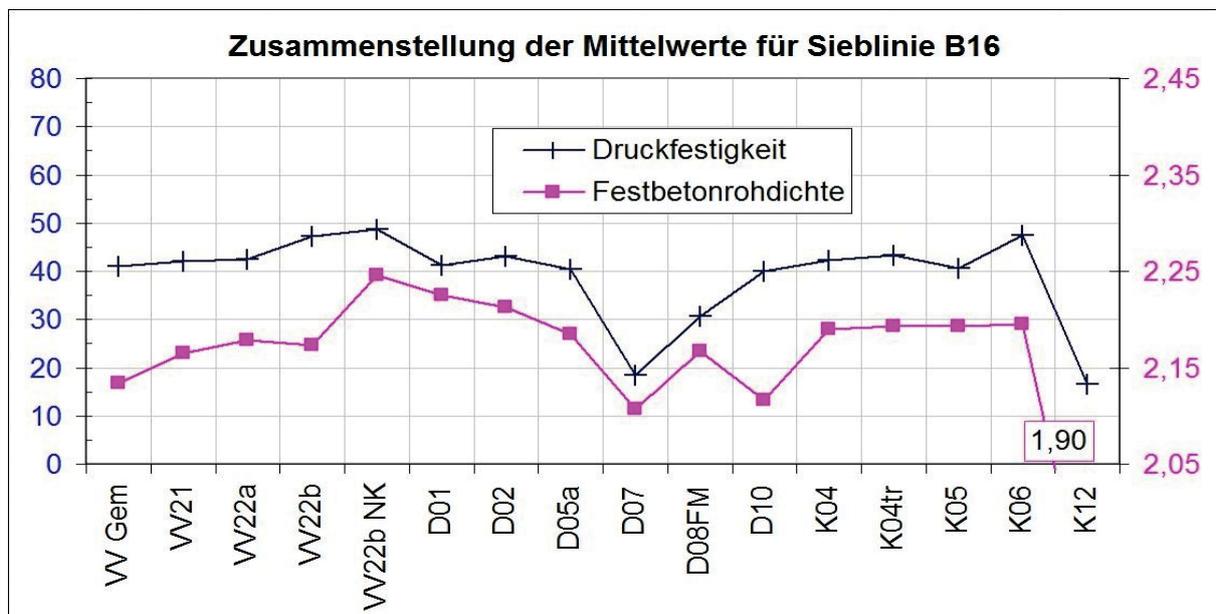
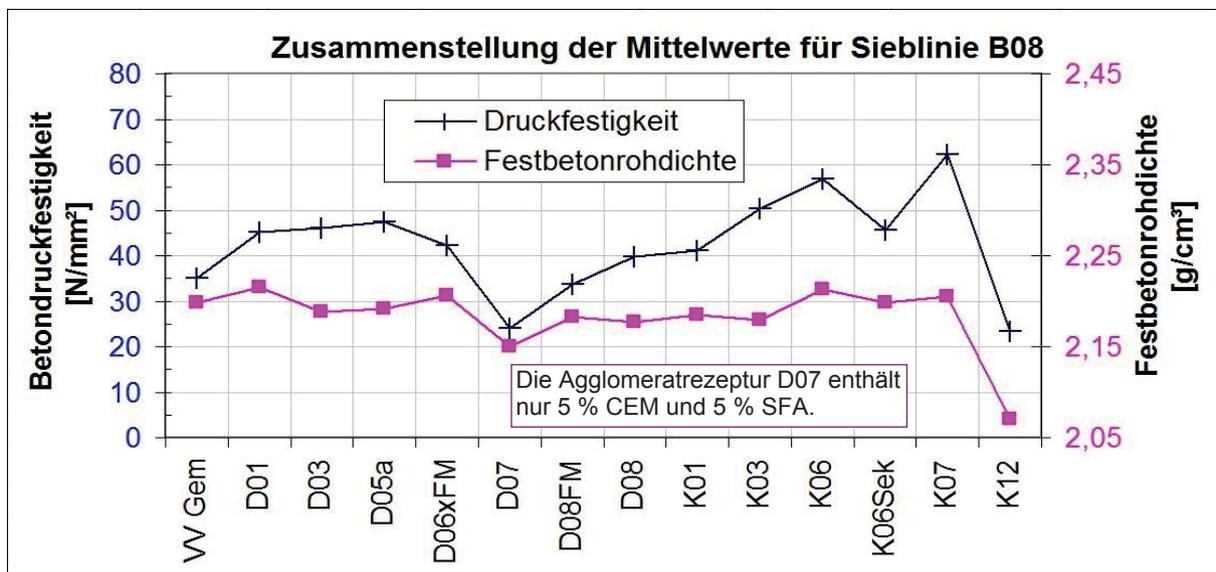
Auffällig ist, dass trotz der breiten Streuung der Mittelwerte der einzelnen Betonsorten die Mittelwerte über die größtkornabhängigen Wertefelder nahezu die gleiche Druckfestigkeit von etwa 40 N/mm² erreichen.

Auffällig ist weiterhin, dass bei den zusammenfassenden Mittelwerten (+) die Betondruckfestigkeit bei der Sieblinie B08 um 2 N/mm² über der des Betons mit Größtkorn 16 mm liegt und die des Betons nach Sieblinie B32 weitere 2 N/mm² geringer ist. Dies ist doch ein Verhalten, dass auch von einigen Kiesen bekannt ist.



Obwohl die Differenz zwischen den Mittelwerten nur 2 N/ mm² beträgt, gilt die Aussage als statistisch abgesichert, da über eine Schar von Mittelwerten erneut gemittelt wurde. Die Ursache für die breite Streuung der Betondruckfestigkeit wird in den Eigenschaften der Agglomerate gesehen - also durch ihre Kornzusammensetzung und die Effekte des Prozesszustandes beim Agglomerieren. Dabei wird, wie auch im *Abschnitt 4.6* beschrieben, der Prozesszustand als der wesentliche Einfluss auf die Qualität der Agglomerate angesehen. Das spiegelt sich auch in den Rohdichten. Dieser streuende Einfluss ist aus den nachfolgenden drei Zusammenstellungen von Druckfestigkeit, Festbetonrohddichte und Agglomeratrezeptur zu erkennen.

Zum Verbessern der Übersichtlichkeit sind in den folgenden Diagrammen in Abbildung 4.69 die Mittelwerte der Druckfestigkeit und der Festbetonrohddichte für jeweils einen Größtkorndurchmesser zusammengefasst.



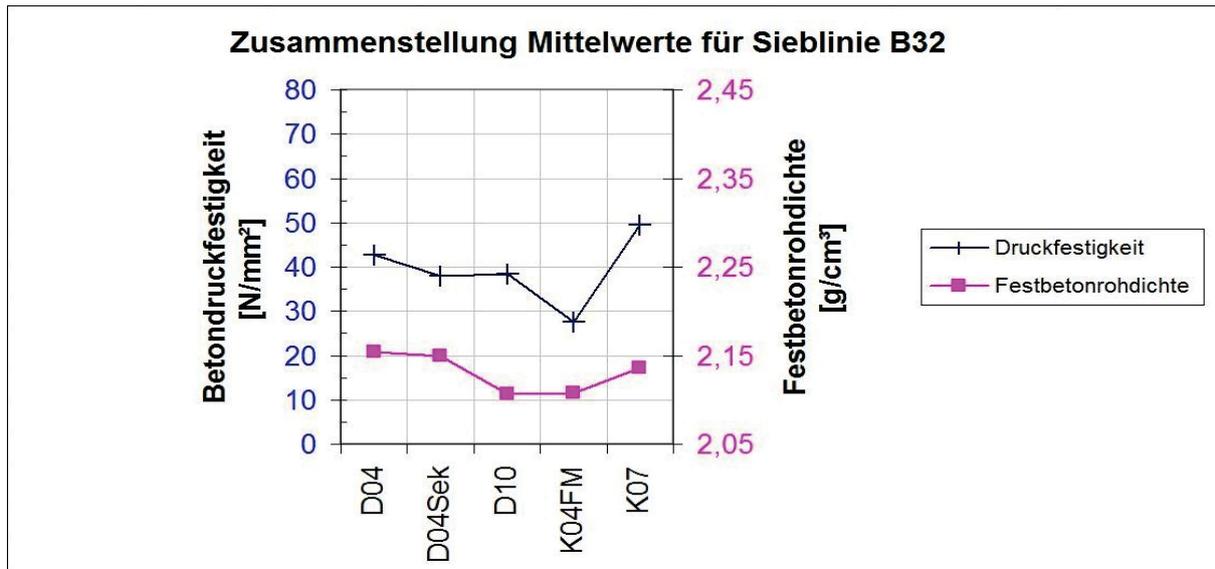


Abbildung 4.69: (incl. vorherige Seite) Gegenüberstellung der Mittelwerte von Betondruckfestigkeit und Festbetonrohddichte für verschiedene Agglomeratrezepturen

Quelle: Eigene

In diesen Diagrammen sind auf der Abzisse die Agglomeratrezepturen nach ihren Bezeichnungen geordnet. Der Einfluss der Festbetonrohddichte auf die dazugehörige Betondruckfestigkeit tritt deutlich hervor. Sie wird von Schwankungen der Eigenschaften der Agglomerate beeinflusst. Die Verbindungslinien zwischen den Punkten dienen hier lediglich der Verbesserung der Anschaulichkeit.

Aus den Linienverläufen ist ablesbar, dass es einzelne Abweichungen von dem globalen Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und Festbetonrohddichte gibt. Da die Rezeptur des Betons für alle Versuche gleich ist, werden die Gründe für diese Abweichungen in den Eigenschaften der Agglomerate gesehen.

Zum Beispiel ist in *Abbildung 4.69* die Betonfestigkeit für die Rezeptur K06sek - einer Rezeptur mit Sekundäragglomeraten als Kornklasse 4/8 - um ca. 10 N/mm² geringer als von K06. Dagegen ist bei der Rezeptur K04 im unteren Teilbild die Festigkeit der Sorte mit Sekundäragglomeraten um ca. 4 N/mm² geringer.

Die geringe Rohddichte des Agglomeratbetons B16D10 erklärt sich aus dem hohen Flugaschegehalt der Agglomeratrezeptur von 30 %. Trotzdem erreicht die Festigkeit dieses Betons einen mittleren Wert von 40 N/mm², da der Zementgehalt der Agglomeratrezeptur D10 mit 20 % ebenfalls recht hoch ist.

An dieser Stelle ist es angebracht, aus den Untersuchungen von Holle [*Holle (2008)*] eine Werteschar der mittleren Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit von mittleren Einzelkornbruchlasten einzufügen. Das primäre Ziel der Untersuchung von Holle war die Erzeugung von Agglomeraten mit hohen Einzelkornfestigkeiten, um die üblichen Betonfestigkeitsklassen sicher zu erreichen. Dafür wurde ein gewaschener Sand 0/2, ein Zement CEM II/B - S 32,5 R



und ebenfalls Steinkohlenflugasche des Kraftwerkes Rostock sowie die gleiche Granulierttechnologie eingesetzt.

Mischungsverhältnis in [Massetteilen]	Mittelwert Korngröße [mm]	Mittelwert Bruchlast [N]	Standardabweichung Bruchlast	Mittelwert Kornrohddichte [Kg/m³]	Mittelwert Betondruckfestigkeit, f_{cm} [N/mm²]
1:4	13,10	570	300	2061	40,74
1:5	12,50	580	301	2073	45,65
1:5:1F	13,51	890	280	1969	42,67
1:6:1F	13,38	460	195	2001	42,81
1:8:1F	12,57	680	186	1997	45,63
1:9:1F	13,78	740	301	1992	44,92
1:9:2,7F	13,36	590	123	1944	39,32
1:10:1F	13,75	670	270	1967	40,22
1:5:1K+WG	13,08	290	113	1875	30,08
1:8:1,5F:1K	14,11	340	124	1896	37,71
1:9:1F:1 K	12,29	550	168	1989	29,48
1:9:1K	12,66	440	162	1943	33,05
Leichtzuschlag	12,00	100	60	652	12,15
Nat. Zuschlag	12,00	2470	1290	2650	48,56

Tabelle 4.23: Ergebnisse der Einzelkornbruchlasten und Betondruckfestigkeiten aus Untersuchung von N. Holle

Quelle: [Holle (2008)]

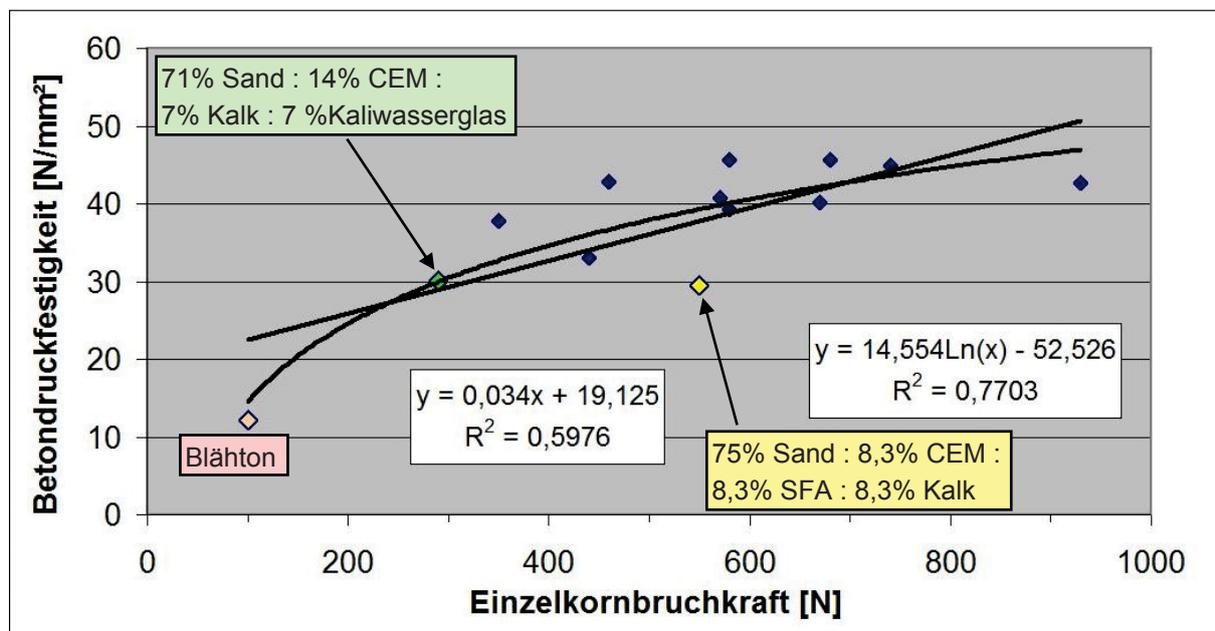


Abbildung 4.70: Betondruckfestigkeiten in Abhängigkeit der Einzelkornbruchkräfte der Agglomerate

Quelle: Daten [Holle (2008)], Darstellung Eigene



Bei den von Holle hergestellten, relativ homogenen Agglomeraten lässt sich die Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit von den Festigkeitseigenschaften der Agglomerate ablesen. Dieser Zusammenhang wird bei den eigenen Untersuchungen wegen der größeren Streuung der mageren, feinstkornreichen Rezepturen nicht so deutlich sichtbar.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der kollektiven Prüfungen im Drucktopf den erreichten Betonfestigkeiten gegenübergestellt.

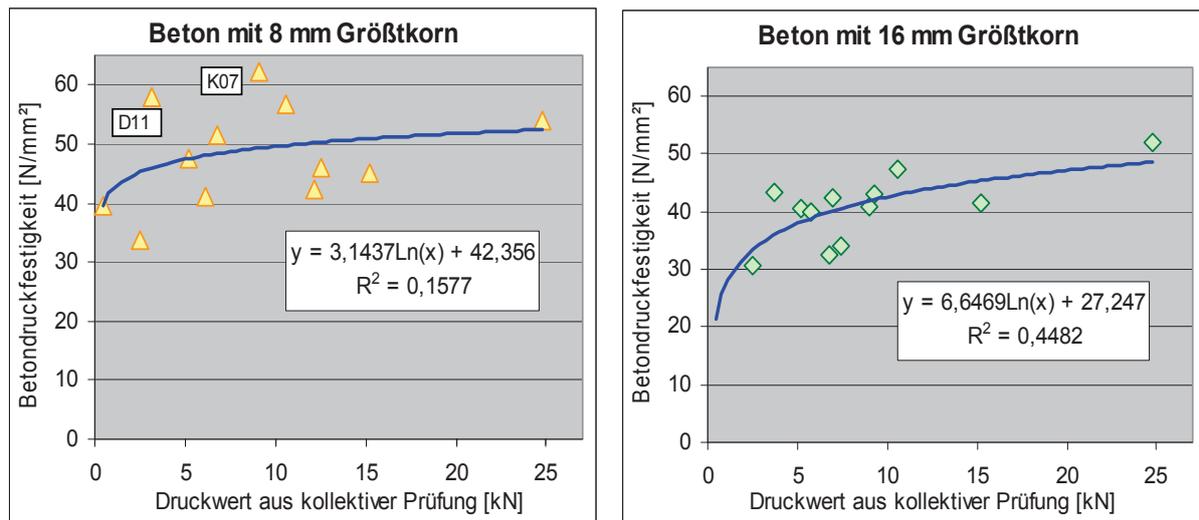


Abbildung 4.71: Gegenüberstellung der Betonfestigkeiten mit den Druckwerten aus kollektiver Prüfung

Quelle: Eigene

Auch diese Werte streuen, wie schon mehrfach erwähnt, recht stark. Trotzdem ist eine Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit vom Druckwert D aus der jeweiligen kollektiven Prüfung erkennbar. (Druckwerte aus kollektiver Prüfung von Körnern in Anlehnung an DIN 4226-3)

Die Abhängigkeit zur Betondruckfestigkeit ergibt für beide Prüfverfahren der Festigkeit der Festlinge eine etwa gleiche Prüfsicherheit. Daher wird an dieser Stelle keinem der beiden Verfahren über eine Empfehlung der Vorzug gegeben.

Spaltzug- und Biegezugfestigkeit:

Es wurden Betonbalken von 4 Rezepturen an der TUHH geprüft. Zunächst erfolgte die Bestimmung der Biegezugfestigkeit und dann an den verbliebenen Endstücken die Spaltzugprüfung.



Rezeptur:	Rohdichte [g/cm ³] bei Druckprüfung	Betonzugfestigkeiten [N/mm ²]			Betondruckfestigkeit [N/mm ²]
		Einzelwerte / MW		Biegezug f _{ct, Bieg}	
		Spaltzug	f _{ct, Spalt}		
B16VV22bNK	2,27	3,48	3,68	4,99	48,61
		3,71			
		3,86			
B16GemischVV	2,15	3,32	3,37	4,76	41,05
		3,42			
B16VVK04v	2,20	4,02	3,94	4,84	28,34
		3,86			
B32K04	2,20	3,72	3,86	4,17	27,67
		4,00			
B16K07	2,14	3,49	3,57	4,95	55,84
		3,64			

Tabelle 4.24: Festigkeitswerte der Spaltzug- und Biegezugprüfung

Quelle: Eigene

Nach Röbert [Röbert (1984)] ist die Druckfestigkeit von Probewürfeln etwa um 8 bis 14 mal höher als die Spaltzugfestigkeit. Außerdem führt er aus, dass die Biegezugfestigkeit um bis zu dem Faktor 1,5 höher ist als die Spaltzugfestigkeit.

Bei den Ergebnissen der eigenen Untersuchungen sind die Werte der Betondruckfestigkeit 7 bis 15 mal so hoch wie die der Spaltzugfestigkeit. Die Biegezugfestigkeiten sind 1,08 bis 1,4-mal so hoch wie die Spaltzugfestigkeiten. Diese Werte liegen in dem für Beton üblichen Bereich.

Prüfung der Frost-Tau- und der Frost-Tausalz-Beständigkeit:

Zum Ermitteln des Verhaltens des Agglomeratbetons bei Frost-Tau-Beanspruchung wurden Versuche in Anlehnung an DIN CEN/TS 12390-9 (Plattenprüfverfahren) durchgeführt. Da bereits von Holle in umfangreichen Frostversuchen gezeigt wurde, dass die in seinen Versuchen hergestellten Agglomerate deutlich beständiger als die Matrix des umgebenden Betons sind, galt das Hauptaugenmerk bei dieser Untersuchung dem Prüfen verschiedener Agglomeratrezepturen auch mit geringen Bindemittelgehalten. Daher wurde die Anzahl der Probekörper je Rezeptur reduziert.

Bei der Prüfung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Beanspruchung in Kontakt mit Wasser wurden Proben aus 4 Rezepturen Agglomeratbeton gemäß DIN CEN/TS 12390-9 hergestellt. Im Verlauf der 56 Frost-Tau-Zyklen wurde die in der Prüfvorschrift geforderte Abkühlgeschwindigkeit und Mindesttemperatur am Mittelpunkt der Prüffläche nicht erreicht. Die gemessenen Temperaturen betragen hier -15 °C anstatt der geforderten -18 bis -22 °C am Tiefstpunkt des Temperaturzyklus. Außerdem betrug das Betonalter der Proben zum Zeitpunkt des Prüfbeginns 58 d für Prüfkörper 31-1a, 56 d für die Prüfkörper 47 und 48 sowie 55 d für den Prüfkörper 54.



Die Ergebnisse der Frost-Tau-Beanspruchung in Kontakt mit Wasser sind daher nicht direkt mit Werten vergleichbar, die unter Einhaltung des Temperaturverlaufes nach DIN CEN/TS 2300-9 bestimmt wurden. Dennoch werden die Ergebnisse der Untersuchung im Folgenden dargestellt, weil sie zumindest einen Vergleich der geprüften Rezepturen untereinander zulassen. Detailaufnahmen der Prüfoberflächen nach der Befrostung befinden sich in *Anlage 38*.

Die Prüfkörper zur Frost-Tau-Prüfung wurden aus den Probewürfeln 31-1, 47-2, 48-3, 48-6, 54-1 und 54-2 hergestellt. Die in diesen Proben benutzten Agglomeratrezepturen sowie die ermittelten Abwitterungen, sind in der folgenden *Tabelle 4.25* und *Abbildung 4.72* dargestellt:

Prüfkörper	Beton-Rezeptur	Zusammensetzung d. Agglomerate [M%]							w/z _{eq} -Wert =w/(z+0,4f)	Abwitterung in [g/m ²]	Mittel- werte
		K1	K2	D1	D2	CEM	SFA	Was			
31-1a	B32D04	-	-	-	60	20	20	100	0,45	31,6	
47-2a	B16K04-2	40	40	-	-	10	10	100	0,91	56,0	
48-3a	B08K07-1	60	-	-	-	20	20	100	0,44	11,9	14,2
48-6a										16,5	
54-1a	B16VV22b	80				10	10	11	8,0	20,8	22,1
54-2a										23,4	

Tabelle 4.25: Frost-Tau-Beanspruchung in Kontakt mit Wasser

Quelle: eigene

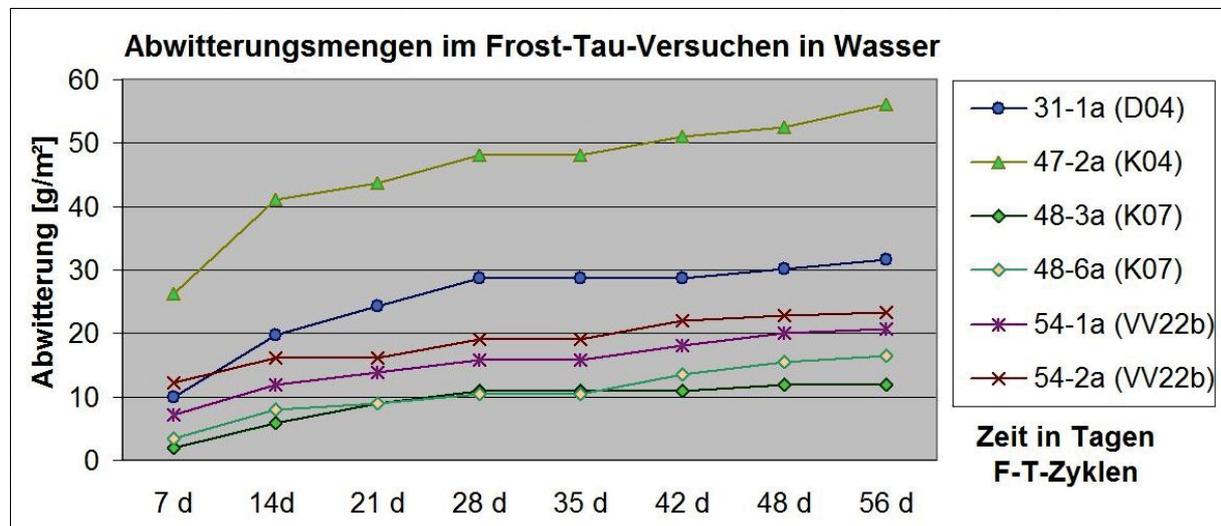


Abbildung 4.72: Abwitterungsmengen im Frost-Tau-Versuch in Wasser (Die Abzissenachse stellt hier sowohl die Prüftage als auch die Anzahl der Frost-Tau-Zyklen dar.)

Quelle: Eigene

Die Absolutbeträge der abgewitterten Mengen sind hierbei sehr gering. Dennoch werden die Ergebnisse als aussagekräftig für den Vergleich der Agglomeratsorten angesehen, da die



Abwitterungsmengen und -verläufe der Probekörperpaare 48-3 und 48-6 sowie 54-1 und 54-2 sehr ähnlich sind.

Der große Unterschied zwischen den Abwitterungen an den Probekörpern 47 und 48 wird durch den bei 48 - also Rezeptur K07 - doppelt so hohen Gehalt an Zement und Flugasche in den Agglomeraten erklärt.

Auffällig ist aber der Unterschied zwischen den Abwitterungen an Probekörper 31 (D04) und 48 (K07). Der Unterschied zwischen diesen Rezepturen besteht lediglich in der Verwendung des feinen Sandes D2 anstatt des Mittelsandes K1 bei gleichem Gehalt an Zement und Flugasche.

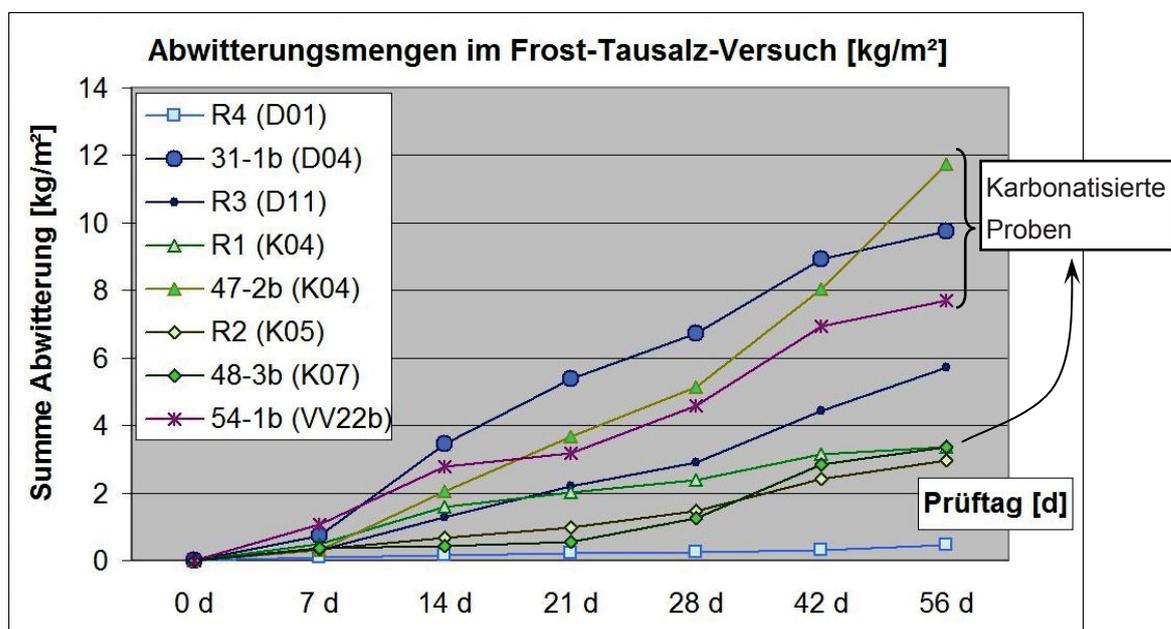


Abbildung 4.73: Ergebnisse der Frost-Tausalz-Prüfungen in 3%iger NaCl-Lösung

Quelle: Daten MPA S-H, Darstellung Eigene

Die Prüfung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Beanspruchung in Kontakt mit Tausalz wurde durch die MPA Schleswig-Holstein in Lübeck durchgeführt. Es erfolgte die Prüfung gemäß DIN CEN/TS 12390-9 nach dem Plattenprüfverfahren an Prüfkörpern aus Agglomeratbeton in 3%-iger Natriumchloridlösung. Die Prüfkörper (R1, R2, R3, R4) wurden an der MPA nach Übergabe der Ausgangsstoffe und Betonrezepte hergestellt. Zusätzlich erfolgte diese Prüfung auch an Prüfkörpern aus denselben 4 Probewürfeln, an denen auch die Prüfung mit Wasser stattfand. Das Betonalter dieser Probekörper (31-1b, 47-2b, 48-3b, 54-1b) betrug bei Prüfbeginn 203, 201 und 200 Tage.

Die folgende *Tabelle 4.26* zeigt die Agglomeratrezepturen der verwendeten Agglomeratproben sowie die ermittelten Abwitterungen der Betonprobekörper:



Prüf- körper	Beton- Rezeptur	Zusammensetzung der Agglomerate [M%]								Abwitterungsgrad		
		K1	K2	D1	D2	CEM	SFA	Was (*)	w/z _{eq} -Wert =w/(z+0,4f)	Menge in [kg/m ²]	Beton- matrix	Agglo- merate
R4	(D01)	-	-	30	50	10	10	11,1	0,80	0,46	1	1
31-1b	(D04)	-	-	-	60	20	20	12,1	0,45	9,76	3	1
R3	(D11)	-	-	70	-	20	10	8,7	0,40	5,72	2	2
R1	(K04)	40	40	-	-	10	10	12,7	0,84 - 0,97	3,36	2	2
47-2b	(K04)	40	40	-	-	10	10	12,7	0,84 - 0,97	11,72	3	3
R2	(K05)	35	35	-	-	10	20	11,4	0,63	2,95	1	2
48-3b	(K07)	60	-	-	-	20	20	11,9	0,44	3,37	2	3
54-1b	(VV22b)	80	-	-	-	10	10	11,0	0,82	7,71	2	2

Tabelle 4.26: Abwitterungsmengen im Frost-Tau-Versuch in 3%-iger NaCl-Lösung *) Bezogen auf trockene Einwaage

Quelle: Abwitterungsmengen MPA S-H, Eigene Darstellung

Die Frost-Tau-Prüfung in Tausalzlösung zeigt ähnliches Verhalten der Proben untereinander wie die Prüfung in Wasser. Allerdings sind die Absolutmengen des abgewitterten Materials etwa um den Faktor 200 größer.

Bei Probe 47-2b ist in dem Foto nach den Frost-Tau-Wechseln (siehe *Anlage 39, Seite 4*) zu erkennen, dass sowohl einzelne Agglomerate wie auch der umgebende Mörtelbereich zerfroren sind. Dagegen ist bei der Probe 31-1b, die zusammen mit 47-2b die größten Abwitterungsmengen zeigt, überwiegend nur der Mörtel zwischen den Agglomeraten zerfroren.

Die Abwitterungsgrade von Agglomeraten und Matrix sind in den letzten beiden Spalten der *Tabelle 4.26* getrennt voneinander bewertet und in drei Stufen eingeschätzt:

- 1 - kein oder minimaler Zerfall
- 2 - leichter bis mittlerer Zerfall
- 3 - starker Zerfall

Daraus lassen sich keine Abhängigkeiten zwischen dem äquivalenten w/z-Wert der Agglomerate und ihrem Abwitterungsgrad erkennen. Zum Beispiel wurde bei Probekörper 31-1b der Abwitterungsgrad zu 1 eingeschätzt und bei Probekörper 48-3b mit 3 bewertet. Beide Agglomeratrezepturen wurden mit einem äquivalenten w/z-Wert von ca. 0,45 hergestellt. Daher wird auch hier davon ausgegangen, dass die Wirkung des Prozesszustandes bei der Herstellung der Agglomerate den Einfluss der Agglomeratrezeptur übersteigt.

Die geprüften Betonrezepturen wurden alle mit einem w/z-Wert von 0,55 projiziert. Dennoch sind starke Unterschiede zwischen den einzelnen Probekörpern in der Beständigkeit der Betonmatrix gegenüber der Frost-Tau-Beanspruchung zu erkennen.

Auffällig ist, dass die älteren Proben die drei größten Abwitterungsmengen aufweisen. Die ebenfalls „alte“ Probe 48-3b zeigt eine Abwitterungsmenge von etwa 1/3 der anderen 3 alten



Proben. Dies entspricht dem Verhalten der Proben beim Frost-Tau-Versuch in Wasser, bei dem die beiden Probekörper der Betonsorte 48 die geringsten Werte lieferten. Die Druckfestigkeit der Betonproben 48 liegt mit einem Mittelwert von $62,2 \text{ N/mm}^2$ im Bereich der höchsten Werte. Es wird davon ausgegangen, dass die bereits weit fortgeschrittene Karbonatisierung der „alten“ Probekörper wesentlich zu ihren sehr hohen Abwitterungswerten beigetragen hat. Diese Abhängigkeit wird zum Beispiel von Auberg [Auberg (1988)] beschrieben.

Zulässige Grenzwerte der Abwitterung sind in den aktuellen Normen nicht eindeutig festgelegt. In der Vornorm CEN/TS 12390-9 von 08/2006 wird für die Ermittlung von Präzisionsdaten eine Abwitterungsmenge von $1,0 \text{ kg/m}^2$ nach dem Plattenprüfverfahren mit $1,5 \text{ kg/m}^2$ nach dem CDF-Verfahren gegenübergestellt.

Ein in der Praxis verwendeter Grenzwert gemäß Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau [BAW (2004)] beträgt 1500 g/m^2 (Mittelwert aus 5 Probekörpern) für den CDF-Versuch in Tausalzlösung. Dieser Grenzwert wird von den Probekörpern in *Tabelle 4.26* nicht eingehalten, ist aber wegen der anderen Randbedingungen des CDF-Verfahrens nur als grober Vergleichswert zu betrachten.

Wegen der geringen Probenanzahl und der fehlenden Vergleichsmöglichkeit, wie zum Beispiel der Befrostung eines Referenzbetons, wird an dieser Stelle keine allgemeingültige Aussage zur Frost-Tausalz-Beständigkeit des Agglomeratbetons getroffen.

Fazit

Aus den vorliegenden Ergebnissen der Frost-Tau-Versuche lassen sich keine allgemeingültigen Grenzbedingungen für das Sicherstellen der Frost-Tau- oder Frost-Tausalz-Beständigkeit von Agglomeraten als grobe Gesteinskörnung in Beton herleiten. Für eine generelle und statistisch abgesicherte Aussage ist die Anzahl der Einzelwerte mit gleichen Randbedingungen zu gering.

Dennoch sind an den Ergebnissen einige Tendenzen zu erkennen. Neben der guten Beständigkeit gegen Frost-Tau-Beanspruchung ist bei hoher Eigenfestigkeit der Agglomerate, einem geringen äquivalenten w/z -Wert und geringen Porengehalten der Agglomerate eine gute Beständigkeit auch gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung zu erwarten.

Am Beispiel der Rezeptur K07 bedeutet dies:

- Einzelkorndruckkräfte der Kornklasse 16/32 mm: größer 500 N
- Druckwert aus kollektiver Prüfung für Kornklasse 8/16 mm: größer 3 kN
- äquivalenter w/z -Wert: kleiner 0,5
- Porengehalte der Agglomerate im Mittel der Kornklassen 4/16 mm: kleiner 20 Vol-%

Beton aus diesen Agglomeraten ist, unter Einhaltung der Vorgaben für die Expositionsklassen XF2 und XF4, ebenfalls als frostbeständig einzustufen.



Schwindverhalten des Agglomeratbetons:

Ein weiteres Kriterium bei der Bewertung der Dauerhaftigkeit von Beton ist das Schwindverhalten. Um das Schwindverhalten des Agglomeratbetons im Vergleich zu Beton aus Naturkies sowie die Auswirkung des Agglomeriervorgangs auf das Schwinden zu erfassen, wurden eigene Probekörper für Schwindversuche hergestellt.

Zunächst wurden die Rezepturen D04, D11 und K04 als diejenigen ausgewählt, an denen die Schwinduntersuchung stattfindet. Die Zusammensetzungen dieser Rezepturen betragen:

D04 (D2:CEM:SFA) = 60:20:20

D11 (D1:CEM:SFA) = 70:20:10

K04 (K1:K2:CEM:SFA) = 40:40:10:10

Mit D04 wurde eine Rezeptur mit hohem Bindemittelgehalt und Feinsand gewählt, während bei D11 ein ebenfalls hoher Zementanteil mit dem ungewaschenen, groben Sand D1 zusammenkommt. Die Rezeptur K04 hat, bei einem Gemisch beider Sande K und unter Ansprache der Summe aus Zement und Flugasche als Bindemittel, ein Verhältnis von Bindemittel zu Gesteinskörnung von 1:4 in Massenanteilen. Die für die Proben 68, 69 und 70 verwendeten Agglomerate der Sorten D04, D11 und K04 waren jeweils 3 Tage alt. Zusätzlich dazu wurden die Proben 62 mit einem bereits 3 Monate alten Agglomerat D11 hergestellt.

Für den Vergleich des Betons aus der künstlichen Gesteinskörnung Sand-Zement-Agglomerate mit Beton aus natürlicher Gesteinskörnung wurde eine Rezeptur mit Naturkies (bis 8 mm) hergestellt.

Außerdem sollte bestimmt werden, wie sich der Agglomerierprozess auf das Schwindverhalten auswirkt. Dazu wurden mit den Proben 65, 66 und 67 Rezepturen hergestellt, die die gleiche Gesamtzusammensetzung haben wie die jeweiligen Agglomeratbetone der Rezepturen 68, 69 und 70, bei denen aber kein Agglomerieren erfolgte. Außerdem wurde mit den Proben 63 eine Rezeptur Mörtelgruppe 3 (MG III) gemäß DIN 1053, T1 in die Untersuchung einbezogen. Ausgehend von deren Zusammensetzung von 1:4 in Raumteilen ergibt sich unter Annahme der Schüttdichten:

$$\rho_{S,Sand} = 1,3 \text{ g/cm}^3 \text{ und } \rho_{S,CEM} = 1,2 \text{ g/cm}^3$$

eine Zusammensetzung der MG III in Masseanteilen von:

$$\text{CEM : Sand} = 1 : 3,7$$

In der in dieser Arbeit üblichen Schreibweise für Agglomeratrezepturen entspricht dies:

$$\text{MG III (Sand D1 : CEM)} = 79 : 21$$

Bei der Ermittlung der Schwindverformung sind sehr genaue Längenmessungen der Probekörper notwendig. Durch den hier gewählten Versuchsablauf war es notwendig, die Messbolzen in die Stirnflächen der erst 3 Tage alten Probekörper einzukleben. Durch das Vernachlässigen der Längendehnungen der Probekörper bis zur ersten Messung an Tag 2, 3 oder 4 ergibt sich eine gewisse Unsicherheit der Startwerte. Die im folgenden Diagramm



sowie der Anlage 40 dargestellten Schwindwerte sind auf die als Nullwert angenommene Länge bei der zweiten Messung im Alter von 3 bis 5 Tagen bezogen.

Der Agglomeratbeton zeigt ein ähnliches, zeitabhängiges Verhalten wie ein Normalbeton. Laut Wesche [Wesche (1993)] wird für einen Normalbeton bei w/z-Wert 0,55 und 370 kg Zement (entspricht Proben Nr. 70) ein Endschwindmaß von 0,65 ‰ (Promille) erwartet. Die Schwindmaße der vorliegenden Agglomeratbeton-Proben haben im Alter von 180 Tagen Werte von 0,65 bis 1,4 ‰ erreicht. (Siehe Anlage 40)

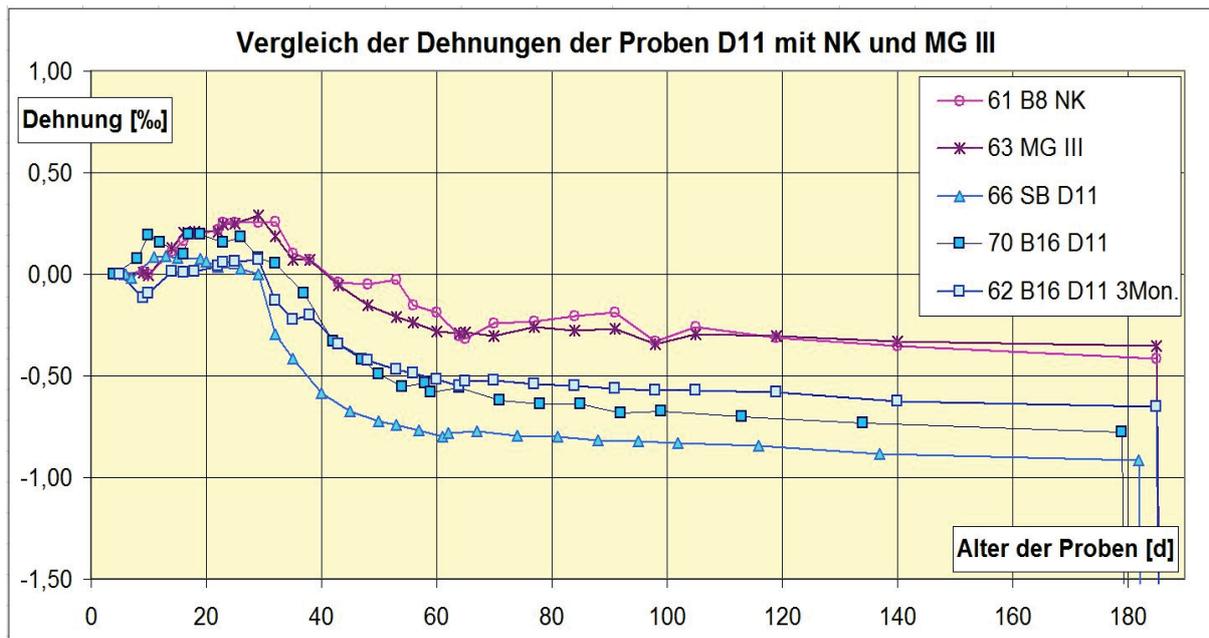


Abbildung 4.74: Schwindverhalten des Agglomeratbetons für Rezeptur D11

Quelle: Eigene

In Abbildung 4.74 sind zum Vergleich auch die Schwindverläufe der Referenzrezepturen 61 (Naturkies) und 63 (Mörtelgruppe III) dargestellt. Diese bewegen sich in der gleichen Größenordnung wie die Agglomeratrezeptur D11. Das Schwindmaß der Vergleichsrezeptur 66 (Sandbeton mit in der Summe gleicher Zusammensetzung aber ohne Agglomerieren) ist deutlich höher als das der Rezepturen 62 (3 Monate alt) und 70 (3 Tage alt) mit Agglomerat D11. Dieses Verhalten wird dadurch erklärt, dass ein Teil des Schwindens in den Agglomeraten abgelaufen ist, bevor diese in den Beton eingebracht wurden.

Auffällig an den Schwindkurven aller Probekörper ist, dass ab dem jeweiligen Startwert bis um den Tag 25 eine Längenausdehnung zu beobachten war. Dies entspricht der Zeit der Feuchtlagerung der Proben bei 20 °C und mindestens 95 % relativer Luftfeuchte. Nach der Auslagerung der Proben in ein Klima 20° / 65 % begann das Trocknungsschwinden.



Fazit zum Schwinden

Die Vermutung, dass durch den Agglomeriervorgang ein Teil des Schwindens der Agglomerate bereits abgeklungen ist, wenn diese in den Agglomeratbeton eingebaut werden, kann bei Berücksichtigung aller vorliegenden Ergebnisse nicht grundsätzlich bestätigt werden (*Anlage 40*). Lediglich die Schwindproben mit der Agglomeratrezeptur D11 zeigen ein geringeres Schwinden als der Sandbeton mit in der Summe gleicher Zusammensetzung. Die Schwindproben mit 3 Monate altem Agglomerat D11 zeigen erwartungsgemäß ein geringeres Schwindmaß als die Proben mit 3 Tage altem Agglomerat. Die Referenzprobe mit Naturkies zeigt etwa ein Drittel des Endschwindmaßes (180 d) des Agglomeratbetons.

E-Modul des Agglomeratbetons

Die Werte des E-Moduls des Agglomeratbetons wurden an den folgenden Proben in Anlehnung an DIN 1048, Teil 5, Abschnitt 3.5 bestimmt. Dabei wurden Agglomerate aus den jeweils groben Sanden mit hohem Bindemittelanteil verwendet:

Probe Nr.	Agglomeratrezeptur	Betonrezeptur
42-1a und 42-1b	D03 (D1:CEM:SFA) = 60:20:20	B08D03
48-5a und 48-5d	K07 (K1:CEM:SFA) = 60:20:20	B08K07

In der o.g. DIN wird die Prüfung von 3 Probekörpern mit Verhältnissen der Höhe h zur Seitenlänge d der quadratischen Grundfläche von $3 \leq h/d \leq 4$ vorgegeben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 2 Rezepturen und je Rezeptur zwei Probekörper im Alter von 47 bzw. 48 d geprüft. Von diesen Probekörpern wies je einer eine Schlankheit von $h/d = 3,1$ und der andere von 2,0 auf. Das E-Modul jedes Probekörpers wurde als Sekantenmodul zwischen den Punkten

$$\sigma_u = 0,5N/mm^2 \quad \text{und} \quad \sigma_o = \frac{1}{3} f_{ck} \approx 15N/mm^2 \quad \text{für Probe 42-1 und}$$

$$\sigma_o = \frac{1}{3} f_{ck} \approx 22N/mm^2 \quad \text{für Probe 48-5 bestimmt.}$$

Für den projektierten Beton C30/37 wird bei Verwendung natürlicher Gesteinskörnung nach DIN 1045, T.1 ein E-Modul von

$$E_{cm} = 28300N/mm^2 \quad (\text{Sekantenmodul})$$

erwartet. Bei Verwendung von „Betonsplitt“ - also RC-Material als Gesteinskörnung - ist nach Wesche S. 280 [Wesche (1993)] ein um 15 - 30 % verringertes E-Modul zu erwarten.

In *Tabelle 4.27* sind die im Versuch ermittelten Werte dargestellt. In *Anlage 41* befindet sich die ausführliche Darstellung der bei der Bestimmung des E-Moduls erfassten Werte.



Probe Nr.	Maße [mm]			h/d Soll: [3 - 4]	ρ kg/m ³	E-Modul E_b	
	b	t	h			N/mm ²	Mittelwert
42-1a	150,4	151,2	299,3	1,98	2.170	24.582	25.000
42-1b	96,3	91,2	291,8	3,11	2.189	25.511	
48-5a	99,4	90,7	298,0	3,14	2.213	28.240	27.500
48-5d	150,5	149,0	295,2	1,97	2.190	26.723	

Tabelle 4.27: Ergebnisse der Bestimmung der E-Moduls

Quelle: eigene

Entgegen den Erwartungen sind die Werte der schlankeren Proben 42-1b und 48-5a höher als die der gedrungenen Probekörper. In DIN 1048, Teil 5 wird von Probekörpern mit Schlankheiten von $h/d = 3$ bis 4 ausgegangen. Aufgrund der begrenzten, für diese Versuche zur Verfügung stehenden Probemengen wurde die Bestimmung des E-Moduls auch an Prüfkörpern mit einer Schlankheit von $2,0$ durchgeführt. An den exemplarisch durchgeführten Prüfungen ist zu erkennen, dass die E-Moduln des Agglomeratbetons etwa 5000 bis 7000 N/mm² geringer sind als die E-Moduln von Normalbeton für die Festigkeitsklassen C35/45 und C30/37. Diese kleineren E-Moduln lassen sich auf die weniger kompakte Struktur der Agglomerate gegenüber einer natürlichen groben Gesteinskörnung zurückführen.

Dies entspricht der erwarteten Abminderung gegenüber einem Rheinkiesbeton. Der Abminderungsfaktor wird in der Anlage 35 ermittelt und beträgt für Agglomeratbeton $0,73 - 0,75$. Nach *Wesche [Wesche (1993)]* werden für Beton mit grober Gesteinskörnung aus Mainkiessand $0,7$, für Ziegelsplitt $0,6$ und für Sandstein $0,5$ genannt.

Gemäß *[Vennemann (2007)]* wurde bei einem Pilotprojekt für einen Leichtbeton, der mit dem Leichtzuschlag „KAND[®]STONE“ hergestellt wurde, ein E-Modul von 15.500 N/mm² ermittelt. Dabei wurde ein Leichtbeton LC 40/44 mit einer Rohdichte von 1800 kg/m³ bei Einsatz von 470 kg/m³ Zement erreicht.

Strukturmerkmale des Agglomeratbetons

Wie in den Bildern der *Anlage 42* zu erkennen, besteht eine vollständige Verwachsung zwischen den Agglomeraten und der umgebenden Betonmatrix. Durch diese innige Verbindung ist der Agglomeratbeton im Gegensatz zu Kiesbeton oder Splittbeton ein homogener Baustoff, in dem die groben Zuschlagkörner mit der Betonmatrix nicht nur optimal verzahnt sind, sondern auch die gleichen Verformungseigenschaften aufweisen. Dies führt zu geringeren Spannungsspitzen, als sie an den großen Körnern einer natürlichen Gesteinskörnung auftreten *[Springenschmid (2007)]*. Die höhere Porosität der Agglomerate gegenüber Kies und Splitt erzeugt eine Saugfähigkeit, die die Verzahnung der Oberflächen zwischen Agglomerat und Betonmatrix verbessert.

Die überwiegend runde oder leicht abgeflachte Kornform der Agglomerate verbessert die Verarbeitbarkeit des Frischbetons.



4.7.4 Stellungnahme zum Betonprojektierungsverfahren

Da die Agglomerate nur einen Bruchteil der Eigenfestigkeit eines natürlichen Zuschlages aufweisen, stellt sich die Frage nach der Eignung und Anwendbarkeit der bekannten Betonprojektierungsverfahren. Der für die oben besprochenen Versuche hergestellte Agglomeratbeton wurde nach dem üblichen Verfahren zur Projektierung von Normalbeton mit dichter Gesteinskörnung zusammengesetzt. Das zielsichere Erreichen der gewünschten Betonfestigkeitsklasse hängt augenscheinlich von Eigenschaften der Agglomerate ab, die nicht nur durch ihre Rohdichte und Eigenfestigkeit beschrieben werden.

Aus der Leichtbetonprojektierung nach Wesche [Wesche (1993)] ergibt sich, dass beim Unterschreiten einer Mindestdruckfestigkeit bzw. des elastischen Verformungsvermögens des Grobkorns diese Schwäche mit einer höheren Mörtelfestigkeit ausgeglichen werden kann. Dieses Denkmodell sollte auch auf die Agglomerate zutreffen, die durch geringe Eigenfestigkeit gekennzeichnet sind.

Bei der Leichtbetonprojektierung wird aus dem dynamischen E-Modul des Grobkorns die sogenannte Grenzfestigkeit errechnet, bei der die Betonfestigkeit den zur Mörtelfestigkeit proportionalen Anstieg verlässt. Das Besondere hierbei ist, dass der E-Modul aus der Schüttdichte des Grobkorns bestimmt wird. Diese von Wesche empirisch ermittelte Abhängigkeit trifft auf die Agglomerate leider nicht zu. Bei ihnen verhalten sich Druckfestigkeit und Rohdichte nicht immer zwingend proportional. Eine hohe Rohdichte kann auch mit sehr bindemittelarmen Rezepturen erreicht werden, die aber nicht die aus der hohen Rohdichte erwartete Steifigkeit und Eigenfestigkeit aufweisen. Demgegenüber erreichen bindemittelreiche Agglomerate hohe Eigenfestigkeit bei gleichzeitig geringerer Rohdichte. Aufgrund dieser Zusammenhänge lassen sich die notwendigen Rechenschritte für die Zwischengrößen bei der Leichtbetonprojektierung (dynamisches E-Modul, Grenzfestigkeit, Tangens Alpha und notwendige Matrixfestigkeit) weder aus der Schüttdichte noch aus der Rohdichte der Agglomerate berechnen.

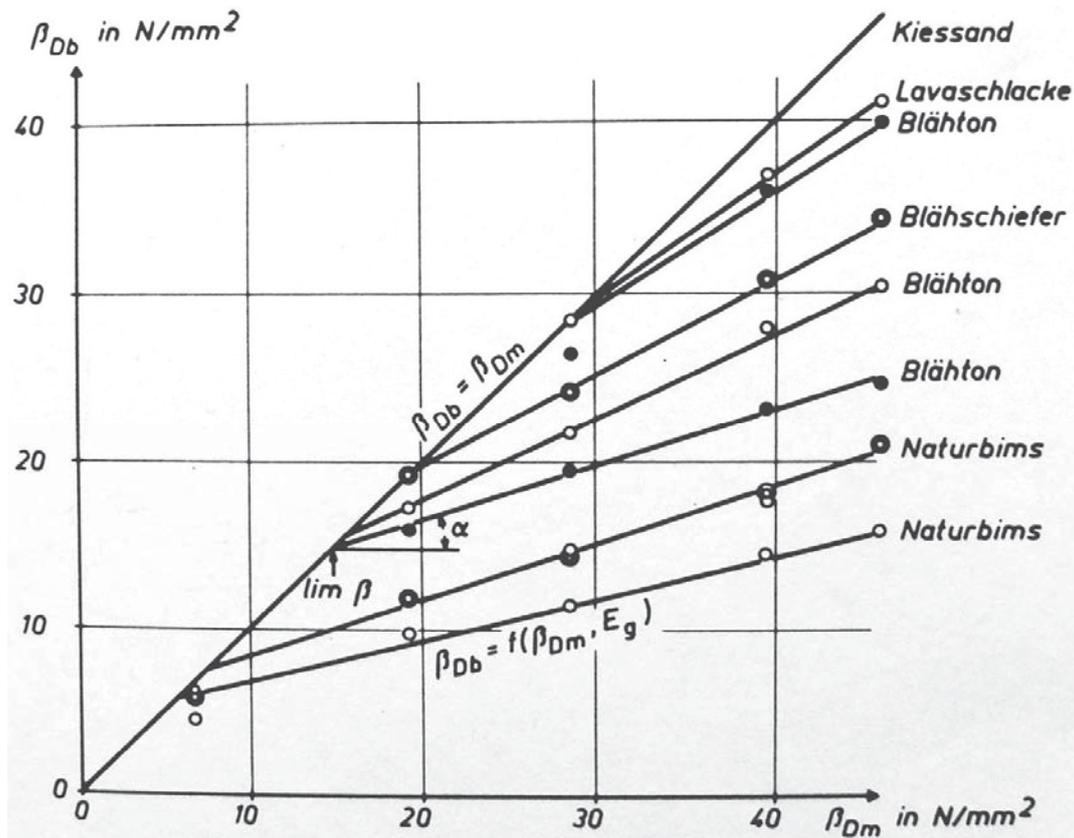


Abbildung 4.75: Abhängigkeit Leichtbetonfestigkeit von Leichtzuschlagfestigkeit
 Quelle: [Wesche (1993)]

Das Verfahren der Leichtbetonprojektierung erscheint für solche Agglomerate anwendbar, die eine so geringe Rohdichte aufweisen, dass ihr dynamisches E-Modul kleiner als 18000 N/mm^2 ist. Die Schüttdichte der Agglomerate ist demnach nicht zum Ermitteln des E_{dyn} geeignet.

Für Agglomerate mit einem E_{dyn} größer 18000 N/mm^2 befindet man sich oberhalb der Grenzlinie des Leichtbetonmodells ($\tan \alpha > 1$) gemäß *Abbildung 4.75*. Sie wirken im Beton wie eine dichte, natürliche Gesteinskörnung. Damit kann im Bereich bis C50/60 die Bemessung nach dem Verfahren für Normalbeton erfolgen. [Holle (2007)]



Kapitel 5

Bewertung / Analyse / Diskussion

In *Kapitel 5* werden Versuchsergebnisse miteinander verglichen und bewertet. Dabei kann die allgemeine Bewertung der Machbarkeit nicht dem Argumentationbogen aus *Abbildung 2.2* folgend vorgenommen werden, da die hierfür relevanten Mess- und Versuchsergebnisse häufig zu stark streuen. Diese große Streuung lässt sich aus unterschiedlichen Gründen nicht eindeutig einzelnen Ursachen, wie zum Beispiel der Rezepturhomogenität innerhalb einer Agglomerierphase, Verweildauer im Prozessraum sowie die Wirkungen des Prozessraumes auf den Agglomerierprozess an sich zurückführen.

Angesichts der Vielzahl von mitwirkenden Einflüssen auf den Agglomeriererfolg müsste für gesicherte Aussagen über einzelne Abhängigkeiten entlang des Argumentationsbogens die Zahl der dafür erfassten Daten und Messwerte erhöht werden, während gleichzeitig möglichst viele Einflussgrößen konstant gehalten werden. Da in der vorliegenden Arbeit ein Hauptziel in der Bestätigung der baustofflichen Realisierbarkeit unter Verwendung ungewaschener Sande lag, wurden funktionale Parameter des Systems variiert, um die Hauptaussage abzusichern. Damit konnten die Nebenziele, wie die Bereitstellung eines Regelkriteriums zur Anlagensteuerung, nicht detailliert verfolgt werden.

Zur Analyse der Ergebnisse werden folgende Quervergleiche angestellt:

- Frischlinge → Festlinge
- Festlinge → Agglomeratbeton
- Frischlinge —————→ Agglomeratbeton

Daraus werden die Überlegungen für Abhängigkeiten entlang des Argumentationbogens entwickelt.



5.1 Generelle Machbarkeit

Mit den Ergebnissen der Arbeit wird nachgewiesen, dass aus Sand-Zement-Agglomeraten normkonforme Normalbetone in den Betonfestigkeitsklassen bis C40/50 aber auch darüber [Holle (2008)] hergestellt werden können. Dabei wurden verschiedenartige Sande, die mit ihren Korngrößenverteilungen den Hauptanteil der in Norddeutschland geförderten oder als Überschusssande zur Verfügung stehenden Menge darstellen, als Ausgangsstoffe verwendet. Es wurden zielgerichtet sehr feinkörnige und ungewaschene Sande für die Versuche ausgewählt.

In DIN EN 12620 werden definiert:

Industriell hergestellte Gesteinskörnung: Gesteinskörnung, die in einem industriellen Prozess unter Einfluß einer thermischen oder sonstigen Veränderung entstanden ist

RC-Gesteinskörnung: Gesteinskörnung aus aufbereitetem anorganischem Material, das zuvor als Baustoff eingesetzt war

Das Agglomerat als grobe Gesteinskörnung ist in Bezug auf seine Eigenschaften mit rezyklierter Gesteinskörnung bis auf die Gemeinsamkeit der künstlichen Herstellung nur bedingt vergleichbar. Beispielsweise enthalten die Agglomerate im Gegensatz zu RC-Gesteinskörnung keine nennenswerten Anteile an betonschädlichen Bestandteilen, sie haben immer rundliche Kornformen mit geschlossener Oberfläche sowie keine Beimengungen anderer Baustoffe. Daher bilden die Sand-Zement-Agglomerate eine eigene Art von grober Gesteinskörnung für die Betonherstellung.

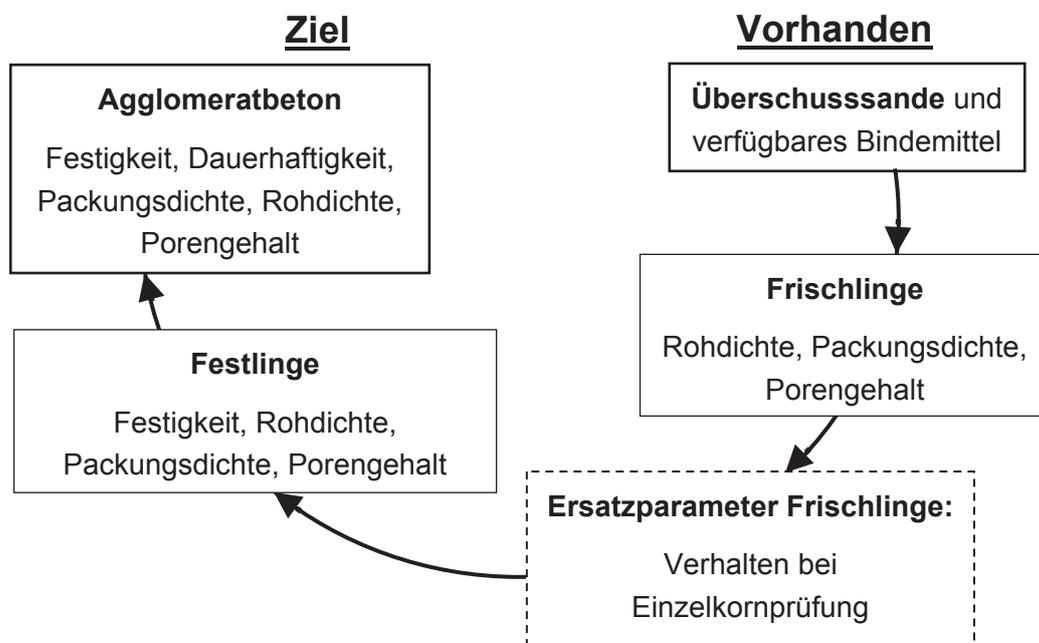


Abbildung 5.1: Argumentationsbogen und Schema zur Suche nach Korrelationen

Quelle: Eigene



5.2 Überprüfung der Thesen aus dem Arbeitsansatz

Agglomerate in frischem Zustand (Frischlinge) sind ihrer stofflichen Struktur nach Feinkornbetone in erdfeuchter Konsistenz. Diese Stoffgemenge sind bei Betonsteinwaren durch den niedrigen w/z-Wert und nach intensiver Verdichtung sehr fest und dauerbeständig gegen Frost-Tau-Wechsel und mechanische Belastung.

Dauerbeständigkeit und w/z-Wert

Bei der Agglomeratherstellung wird ein wesentlicher Teil des den trockenen Ausgangsstoffen zugegebenen Wassers zur Benetzung der großen Oberfläche der feinen Ausgangsstoffe (Sande und Füller) gebunden. Somit steht vom Gesamtzugabewasser nur ein Teil zur Zementhydratation zur Verfügung. Daher ist der für Agglomerate angegebene w/z-Wert nicht mit dem festigkeitsbildenden w/z-Wert gemäß der Walz-Kurven für Normalbeton vergleichbar. Für Beton übliche w/z-Werte um 0,5 lassen sich deshalb für Agglomerat-rezepturen bei Einbeziehung der zur Benetzung erforderlichen Wassermenge nur theoretisch mit unwirtschaftlich hohen Zementgehalten oder extrem trockenen Mischungen erreichen. Aus der für Agglomerate mit mindestens mittlerer Qualität gefundenen Frostbeständigkeit, die auch jeweils höher war als die der umgebenden Betonmatrix, kann der Rückschluss gezogen werden, dass der in diesen Agglomeraten *wirksame w/z-Wert* auch nach zunächst höherer Wasserzugabe kleiner 0,5 ist.

Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die Überprüfung der Alkaliempfindlichkeit der Agglomerate zeigte, die zulässigen Grenzwerte sind unterschritten und die geprüfte Rezeptur aus dem potentiell empfindlichsten Ausgangssand ist als „unbedenklich“ eingestuft. Da kleine AKR-empfindliche Einzelkörner der Ausgangssande, wie zum Beispiel Opalsandstein, auch nur kleine Gelmengen erzeugen können, finden diese ausreichend Ausweichvolumen im Porenraum der Agglomerate.

Betonstruktur

Wie in *Anlage 42* zu erkennen, besteht eine vollständige Verwachsung zwischen den Agglomeraten und der umgebenden Betonmatrix. Durch diese innige Verbindung ist der Agglomeratbeton im Gegensatz zu Kies- oder Splittbeton ein homogener Baustoff, in dem die groben Zuschlagkörner mit der Betonmatrix optimal verzahnt sind und die gleichen Verformungseigenschaften aufweisen.



Verwendung ungewaschener Sande

Im Rahmen der Versuche wurden die ungewaschenen Ausgangssande in Agglomeratrezepturen mit unterschiedlichen Anteilen kombiniert. Dabei entstanden Ausgangsgemische sowohl aus den schlammkornarmen Sanden D1, K1 und Restsand 1 als auch aus den schlammkornreichen D2 und K2 sowie Restsand 2. Eine eindeutige Zuordnung von hohen oder geringen Betonfestigkeiten zu schlammkornarmen oder -reichen Agglomeratrezepturen kann mit dem hier vorgestellten Untersuchungsumfang nicht getroffen werden.

Prüfmethode zur Anlagensteuerung und Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung der Agglomerate und insbesondere zur Prozesssteuerung bei ihrer Herstellung ist es wesentlich, eine Prüfmethode anzuwenden, mit der das frische Agglomerat - also der Frischling - qualitativ bewertet werden kann. Die Versuchsergebnisse der Einzelkornprüfungen zeigen, dass die Methode der Einzelkorndruckprüfung an den Frischlingen durchaus geeignet ist, das Agglomerierergebnis zu bewerten.

Das Ergebnis der weggesteuerten Druckprüfung von einzelnen frischen Agglomeraten lässt sich als Kraft-Verformungs-Linie darstellen, aus der wesentliche Parameter, wie Bruchpunkt, Anstieg der Linie und das Nach-Bruch-Verhalten, ermittelt werden können. Voraussetzung für eine Praxisanwendung ist eine vollautomatisierte Prüfapparatur für kleine Kräfte mit einer statistischen Bewertung der Prüfergebnisse.

Prüfmethode zum Gütenachweis der Agglomerate

Zum Qualitätsnachweis der erhärteten Agglomerate eignen sich sowohl die Einzelkornprüfung wie auch die kollektive Prüfung. Bei der Einzelkornprüfung ist der Bruchpunkt der entscheidende Parameter, erfordert aber eine ausreichende Prüflosgröße. Bei der kollektiven Prüfung im Drucktopf besteht das Problem der Korngrößenabhängigkeit des Prüfergebnisses, was die Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse einschränkt.

Rezeptur und Prozesszustand

Bei der Darstellung der Rezepturen als Punkte im Dreistoffdiagramm und dem Auftragen eines Parameters als Höhe über diesen Punkten sind häufig keine klaren Abhängigkeiten des als Höhe dargestellten Parameters von der Position im Dreistoffdiagramm festzustellen. Die vielfältigen Parameter, die aus dem Agglomerierprozess auf die Eigenschaften der Agglomerate einwirken, überdecken häufig den Einfluss der Rezeptur. Weiterhin ist bei anderer Festlegung der Grenzen zwischen den drei Bestandteilen Feinstkorn, Feinkorn und Mittelkorn mit einer anderen Aussagekraft dieser Parameter zu rechnen.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass es eine ideale Rezeptur hinsichtlich der Zusammensetzung von Sand und Bindemittelanteil nicht gibt. Stattdessen wirkt eine Überlagerung der Einflüsse aus Rezeptur und Prozesszustand, die die Qualität der Agglomerate bestimmt.



5.3 Abhängigkeit Frischlinge - Festlinge

Die Korrelation zwischen Frischlingen und Festlingen wurde anhand der „Bruchkraft der Frischlinge“ und der „Rohdichte der Festlinge“ untersucht.

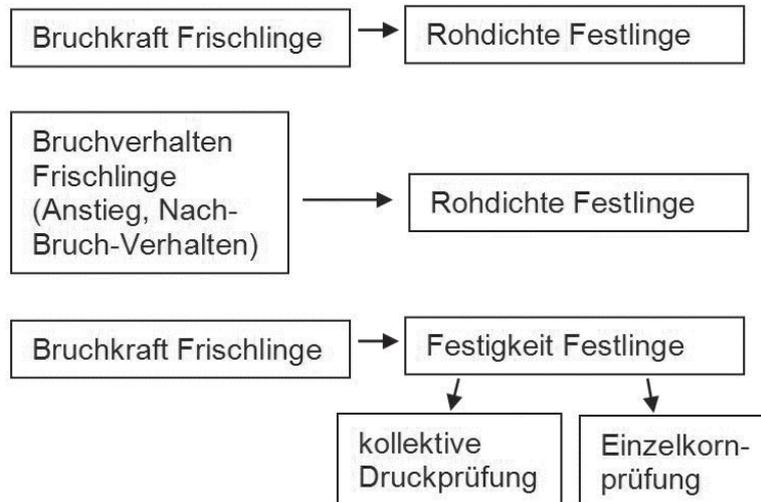


Abbildung 5.2: Schema möglicher Quervergleiche zwischen Frischlingen und Festlingen

Quelle: Eigene

Die Untersuchungen von Korrelationen der „Bruchkraft der Frischlinge“ mit der „Bruchkraft der Festlinge“ und zwischen dem „Anstieg der Kraft-Verformungs-Linie der Frischlinge“ und der „Rohdichte der Festlinge“ erfolgte nicht, weil die dafür erforderliche statistische Auswertung das Erfassen und Aufbereiten so großer Datenmengen aus den Einzelkornprüfungen erfordert hätte, dass es den Rahmen dieser Arbeit überschritten hätte. Zur Erfassung der dafür notwendigen Datenmengen ist ein automatisiertes Prüfsystem einschließlich statistischer Bewertung der Ergebnisse erforderlich.

Für die Rezeptur K04 sind in *Anlage 44* die Bruchkräfte der Frischlinge und Festlinge aus den Entnahmezeitpunkten VT1 bis VT8 gegenübergestellt.

Bruchkraft der Frischlinge – Rohdichte der Festlinge

Es ist anhand der vorliegenden Daten keine eindeutige Abhängigkeit zwischen den Bruchkräften der Frischlinge und den Rohdichten der Festlinge zu erkennen. Obwohl in *Abbildung 5.3* zu erkennen ist, dass ein „gesundes Verhalten“ der Frischlinge – also größere Bruchkräfte für größere Agglomerate – auch mit höheren Rohdichten in den Festlingen übereinstimmt, zeigen die Diagramme der anderen Rezepturen in *Anlage 43* auch gegenläufige Tendenzen.

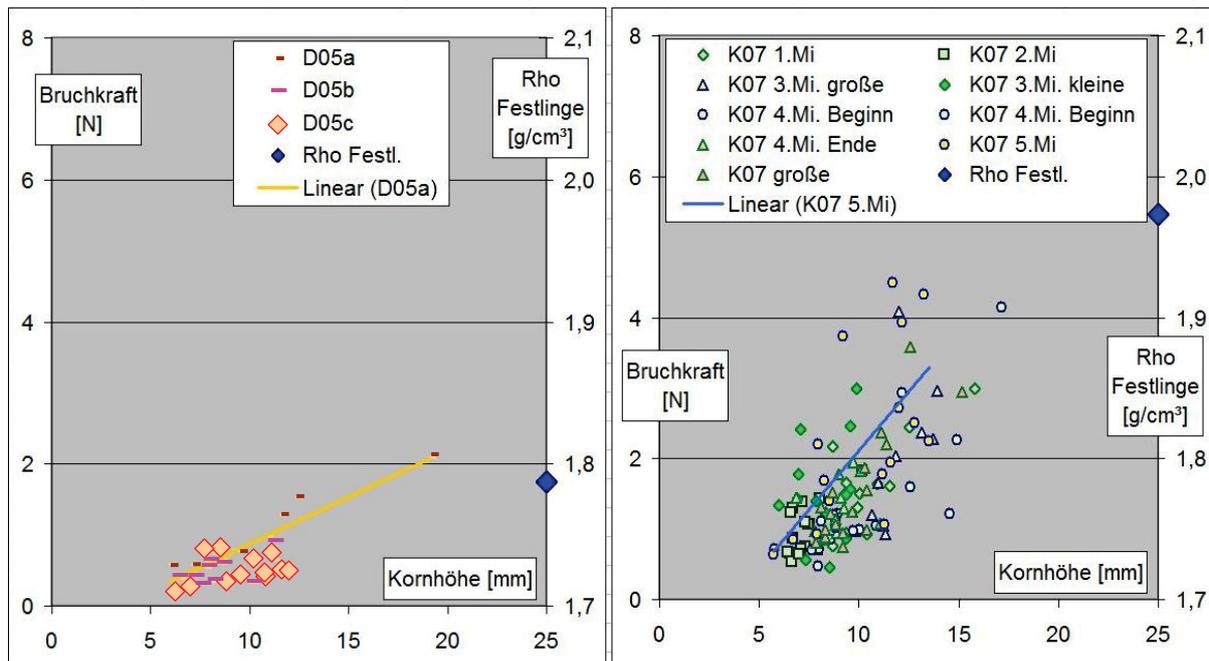


Abbildung 5.3: Quervergleich zwischen Bruchkräften von Frischlingen und Mittelwerten der Rohdichten der Festlinge von D05 und K07; hier zur Übersicht, für größere Darstellung siehe *Anlage 43*

Quelle: Eigene

Es ist davon auszugehen, dass ein funktionaler Zusammenhang zwischen Parametern aus dem Bruchverhalten der Frischlinge und der Festigkeit der Festlinge besteht. Um dieses nachzuweisen, sind bei der zu untersuchenden Grundgesamtheit die Sandart und Sandzusammensetzung, die Zementmenge und –art, der w/z-Wert sowie die Gesamtheit der Anlagenparameter (Drehzahl, Anstellwinkel, Füllmenge, Verweildauer, Zugaberegime) konstant zu halten. Dies war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Daher ist ein direkter Quervergleich von Frischlingen und Festlingen mit Angabe eines funktionalen Zusammenhangs nicht möglich.

Eine Korrelation zwischen der Schwankungsbreite der Rohdichte der Festlinge und der Art und Gleichförmigkeit der Bruchfiguren der Kraft-Verformungs-Linien einer Gruppe von Frischlingen ist beim Vergleich der Rohdichten in *Abschnitt 4.6.3, Seite 131* mit den Kraft-Verformungs-Linien der Frischlinge in *Anlage 27* zu erkennen. Durch die Möglichkeit der Zuordnung der Schwankungsbreite der Rohdichten von Festlingen zu den Kraft-Verformungs-Linien einer Schar von Frischlingen ist die Bewertung der Qualitätsparameter „Höhe und Gleichmäßigkeit der Packungsdichte“ der aktuellen Füllmenge des Granuliertellers möglich.



5.4 Abhängigkeit Festlinge - Agglomeratbeton

Quervergleich Rohdichte der Festlinge – Rohdichte des Agglomeratbetons

Nachdem im *Abschnitt 4.6.3* festgestellt wurde, dass die Rohdichten der Festlinge bei diesen Versuchen im Mittel unter 2,0 lagen, wird hier die Wirkung dieser Rohdichten auf die Rohdichte des Agglomeratbetons untersucht. Dabei beziehen sich die Rohdichteangaben für Beton auf den Zustand „feucht bei Druckprüfung“. Davor befanden sich die Betonprobewürfel bis Tag 7 im Wasserbad und bis Tag 28 im Feuchtraum bei 95 % relativer Luftfeuchte.

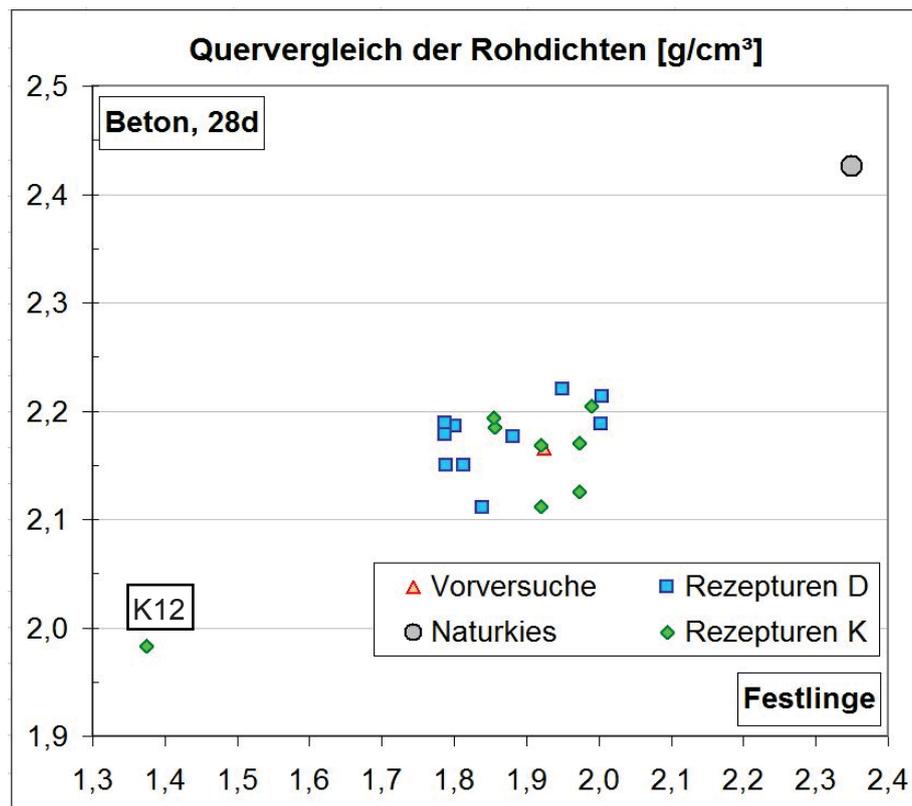


Abbildung 5.4: Quervergleich der Rohdichte der Festlinge (raumlufttrocken) mit den Rohdichten der daraus hergestellten Agglomeratbetone (feucht bei Druckprüfung nach 28d)

Quelle: Eigene

Im Quervergleich der Rohdichten zeigt die Hauptmenge der Punkte, dass mit Rohdichten der erhärteten Agglomerate von 1,8 bis 2,1 g/cm³ Festbetondichten von 2,1 bis 2,22 g/cm³ erzielt werden. Im Vergleich dazu wurde mit dem Referenzmaterial Naturkies eine Festbetondichte von 2,43 g/cm³ erreicht. Die bereits durch besonders geringe Rohdichtewerte auffällige Rezeptur K12 erreicht hingegen nur eine Betonrohddichte von 1,98 g/cm³.

Ein wesentlicher Unterschied im Verhalten der Rezepturen D und K ist nicht zu erkennen.

Damit wird die generelle Abhängigkeit der Rohdichte des Agglomeratbetons von der Rohdichte der Agglomerate bestätigt. Dies ergibt sich auch aus der Stoffraumrechnung. Die



hohe Schwankungsbreite im Hauptwertefeld wird darauf zurückgeführt, dass durch den starken Einfluss des Prozesszustandes und die in *Abschnitt 4.6.3* erläuterten widerstrebenden Einflüsse für die Festlinge keine direkte Abhängigkeit zwischen der Rohdichte und der Kornfestigkeit der Agglomerate besteht.

Quervergleich Rohdichte der Festlinge – Druckfestigkeit des Agglomeratbetons

Abbildung 5.5 zeigt die grundsätzliche Beziehung, dass geringe Rohdichten der als Gesteinskörnung im Beton verwendeten Agglomerate auch geringe Betondruckfestigkeiten erzeugen. Die beiden Extremwerte werden wiederum vom Naturkies mit der höchsten hier betrachteten Dichte von $2,35 \text{ g/cm}^3$ und den Agglomeraten der Rezeptur K12 mit einer Rohdichte von nur $1,37 \text{ g/cm}^3$ gebildet. Dazwischen spannt sich entlang der Verbindungslinie das Wertefeld der anderen Agglomeratrezepturen.

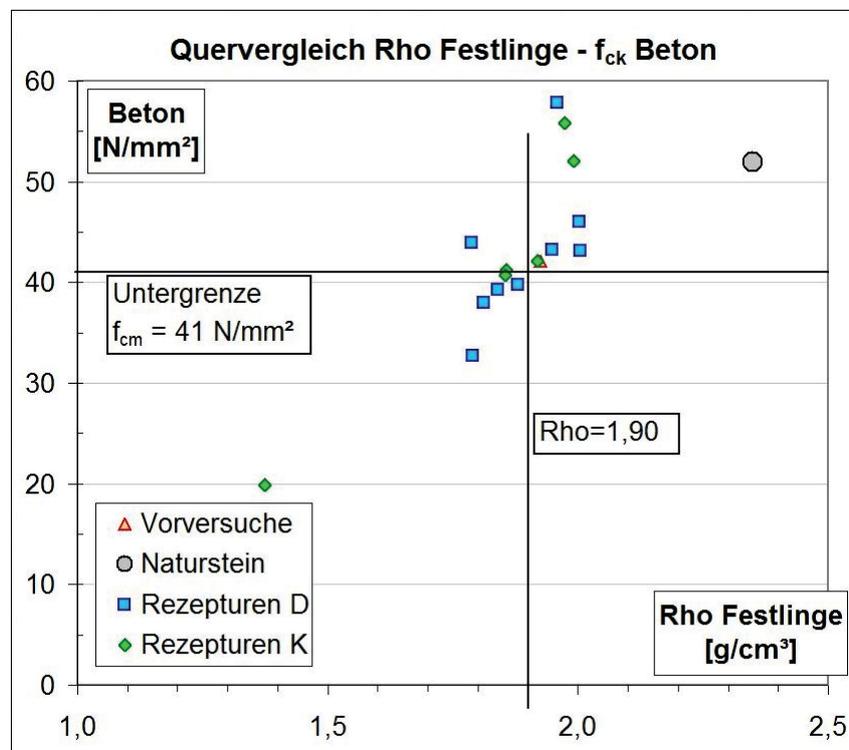


Abbildung 5.5: Quervergleich der Rohdichten der Festlinge mit den Druckfestigkeiten des Agglomeratbetons

Quelle: Eigene

Quervergleich Einzelkornfestigkeit der Festlinge – Druckfestigkeit des Agglomeratbetons

Agglomerate mit ausreichend hoher Druckfestigkeit wirken im Beton wie eine dichte, natürliche Gesteinskörnung und die Betonprojektierung kann nach dem Verfahren für Normalbeton erfolgen. Sie befinden sich oberhalb der Grenzlinie des Leichtbetonmodells gemäß *Abbildung 4.75*. Die Rezeptur K12 fällt in den oben stehenden Diagrammen durch ihre geringe Rohdichte aus dem Hauptwertefeld heraus.



Wesche geht bei der Leichtbetonprojektierung den Weg, aus der Schüttdichte der groben, leichten Gesteinskörnung über empirische Zusammenhänge das dynamische E-Modul und dann die Grenzfestigkeit zu bestimmen.

Für die Agglomerate lässt sich aus der Schüttdichte – zumindest ohne Berücksichtigung des Bindemittelgehaltes – keine Vorhersage ihrer Grenzfestigkeit als grobe Gesteinskörnung in Beton ableiten. Daher wäre für die Verwendung von Agglomeraten geringer Festigkeit zur Betonherstellung ihr dynamisches E-Modul zu messen oder aus einer Beziehung zur kollektiven Druckfestigkeit (oder der Einzelkorndruckfestigkeit mit Berücksichtigung der Wirkung der Korngrößenverteilung) herzuleiten.

Fazit:

Mit abnehmender Festigkeit der Festlinge werden erwartungsgemäß auch die Betonfestigkeiten geringer. Es ist aber auch mit Agglomeraten, deren Rohdichten und Festigkeiten deutlich geringer sind, als die des Naturkieses, möglich, Festigkeiten des Agglomeratbetons zu erzeugen, die über denen des Referenzbetons liegen.

5.5 Abhängigkeit Frischlinge - Agglomeratbeton

Wie im *Abschnitt 4.6.3* dargestellt, erreichen von den 25 in dieser Untersuchung hergestellten Agglomeratrezepturen nur 4 eine Trockenrohddichte von $2,0 \text{ g/cm}^3$ oder darüber. Damit werden gemäß dem in DIN EN 12620 und DIN EN 13055-1 vorgegebenen Grenzwert von $2,0 \text{ g/cm}^3$ die meisten der hier untersuchten Agglomeratrezepturen als leichte Gesteinskörnungen bewertet. Dies ist neben dem Einfluss der Anlagenparameter auch wesentlich durch die stoffliche Zusammensetzung der Versuchssande begründet. Dadurch ließen sich nur bestimmte Prozesszustände erzeugen und zum Beispiel kaum hochwertige Agglomerate herstellen.

Bei der Suche nach einem geeigneten, praxisgerechten Kriterium für Qualität und Eignung der Agglomerate, das bereits während des Agglomerierprozesses geprüft werden kann, konzentrierten sich die Untersuchungen auf die Verformungseigenschaften der Agglomerate. Dabei wurde eine Abhängigkeit des Verformungsverhaltens von dem aktuellen Prozesszustand im Granulierteller gefunden. Zu der eingesetzten Rezeptur oder den Rezepturparametern - wie dem Feinststoffgehalt oder den Eigenschaften des Agglomeratbetons - konnte keine direkte Abhängigkeit nachgewiesen werden.

Es wurde jedoch festgestellt, dass Agglomerate aus den Prozesszuständen A (trocken rollend) und C (feucht rollend) ausreichende Druckfestigkeiten und Dauerhaftigkeit des Agglomeratbetons ermöglichen. Daraus wird abgeleitet, dass aus den Verformungseigenschaften der Frischlinge ein Rückschluss auf den Prozesszustand beim Agglomerieren erfolgen und damit auch eine Vorhersage der Eignung der Festlinge zur Herstellung von Agglomeratbeton getroffen werden kann. Hier ist nur eine mittelbare Abhängigkeit gegeben, die zur weiteren Untersuchung unter verfahrenstechnischen Gesichtspunkten empfohlen wird.



5.6 Ökonomische, ökologische, energetische, finanzielle und weitere Gesichtspunkte

Aus einer Wirtschaftlichkeitsüberlegung ergibt sich, dass der Einsatz von Sand-Zement-Agglomeraten erst bei der Verwendung größerer Betonmengen einen Kostenvorteil ergibt, weil erst dann der Aufwand für die Umstellung der Mischanlage auf diese künstliche Gesteinskörnung von Kostenvorteilen aufgewogen wird. Daher ist im Moment nicht zu erwarten, dass kleinere Bauteile - wie Stützen oder Decken - im üblichen Hochbau aus Agglomeratbeton hergestellt werden. Ist eine Mischanlage mit Agglomerat als Zuschlag ausgerüstet, erweitern sich die Anwendungsmöglichkeiten auf Bauteile mit kleinerem Betonvolumen.

Eine wahrscheinliche Anwendung von Agglomeratbeton liegt zunächst im Bereich von großvolumigen Bauteilen mit normaler bis geringer Beanspruchung. Für solchen, in großer Menge hergestellten Beton, wie z.B. für flach gegründete Fundamente von Brücken oder Windkraftwerken, ist die Festigkeitsklasse C25/30 im Allgemeinen ausreichend. Um Spielraum für erhöhte Ansprüche an den Beton aus den Expositionsklassen oder durch lokale Belastungen zu haben, wurde für diese Untersuchungen eine Zielfestigkeit der Betonrezepturen gemäß C30/37 gewählt.

Technologische Themen:

Das Agglomerieren ist ein in der industriellen Praxis bekannter Prozess, der zum Beispiel in der Erz- und Düngemittelindustrie in Anlagen mit einem Durchsatz von bis zu 90 t/h angewandt wird. Dementsprechend stehen Technologien zur Anlagensteuerung auch bei den für Sand-Zement-Agglomerate erforderlichen Durchsatzmengen bereits zur Verfügung. Zum Beispiel sind in der Lebensmittelindustrie Granuliersysteme im Einsatz, bei denen an einem Nebenstrom der dem Prozessraum entnommenen Agglomerate automatisch eine Einzelkorndruckprüfung durchgeführt wird. Unter Anpassung solcher vorhandener Anlagen lassen sich die aus der Prüfung des Bruchverhaltens der Frischlinge gewonnenen Daten, wie Bruchpunkt und Anstieg der Kraft-Verformungs-Linie, als Parameter für die Regelung des Agglomerierprozesses etablieren.

Unter Berücksichtigung großtechnischer Erfahrungen kann auch die Verwendung eines Granulierrohres, einer Granuliertrommel oder einer kombinierten Misch- und Granuliertrommel untersucht werden. Durch die Verwendung spezieller, nicht verzögerter Zemente ist eine Verkürzung des gesamten Produktionszyklus zu erwarten.

Für die Erhärtung und Nachbehandlung der frischen Agglomerate sind diese vor vorzeitiger Austrocknung zu schützen. DIN 1045-3 gibt Anhalte zur erforderlichen Nachbehandlungsdauer. Abdeckungen oder ein Fertigungs-Tunnel sind geeignet, um Sonneneinstrahlung, Zugluft oder Regen auf die erhärtenden Agglomerate zu vermeiden. Bereits nach einem bis drei Tagen lassen sich die Agglomerate durch Sieben klassieren und auf hohe Halden aufschütten.



5.7 Zusammenfassung

Aus allen Sanden, die als feine Gesteinskörnung gemäß DIN 12620 eingestuft werden können, lassen sich Sand-Zement-Agglomerate herstellen. Dabei sind die norddeutschen Sande in der vorhandenen Bandbreite der Korngrößenverteilungen grundsätzlich geeignet.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Untersuchung ist die Bestätigung, dass aus Sand-Zement-Agglomeraten normkonformer Beton zielsicher hergestellt werden kann. Sowohl die Betonprojektierung für Normalbeton als auch die Betonprojektierung für konstruktiven Leichtbeton sind geeignet, um Rezepturen für Agglomeratbeton zu erzeugen.

Bei vergleichbarem Bindemittelgehalt sind die Eigenschaften der Agglomerate ähnlich, obwohl die Kornzusammensetzungen der Agglomeratrezepturen aus unterschiedlichen Kombinationen der Versuchssande zusammengesetzt wurden. Die Verschiedenartigkeit dieser Korngrößenverteilungen der einzelnen Rezepturen ist unter dem Gesichtspunkt der damit erreichbaren Packungsdichte gering. Dies hat zur Folge, dass nicht in erster Linie die Rezeptur die Qualität der Agglomerate bestimmt, sondern das Einhalten eines bestimmten Prozesszustandes bei der Bildung der Agglomerate. Dies kann durch die Steuerung der Agglomerieranlage und ihre Abstimmung auf den Agglomerierprozess erreicht werden. Im Bereich der mechanischen Verfahrenstechnik liegen umfangreiche Kenntnisse und Erfahrungen zur Auslegung und Steuerung solcher Anlagen und Prozesse im industriellen Einsatz vor. Damit können die während dieser Versuche aufgetretenen Probleme mit der Steuerung des Agglomerierzustandes bei einer großtechnischen Anwendung vermieden werden.

Zur Identifizierung des Prozesszustandes (Zustand der Aufbauagglomeration) und damit zur Anlagensteuerung und zur Qualitätssicherung schon während der Herstellungsprozesses, eignet sich die Bewertung der Kraft-Verformungs-Linie der frischen Agglomerate. Hierfür ist eine zeitgleich arbeitende automatische Mess- und Auswertetechnologie erforderlich, um Parameter, wie den Bruchpunkt oder das Bruchverhalten, während des Prozesses zu bestimmen.

Verfahren wie die DEM-Simulation und die Bestimmung des Wassersättigungspunktes sind Möglichkeiten zur Prüfung der Eignung von Sanden für ein Agglomerierverfahren.

Die Qualitätsüberwachung und Güteprüfung der erhärteten Agglomerate kann sowohl über die Einzelkorndruckprüfung als auch über die kollektive Druckprüfung erfolgen. Die Spaltzug- und Biegezugfestigkeiten des Agglomeratbetons entsprechen den bekannten Gesetzmäßigkeiten in Bezug zur Druckfestigkeit und erreichen sicher die erwarteten Werte. Der aus den Agglomeraten hergestellte Beton stellt sich im Schnitt- und Bruchbild als homogener Baustoff dar und zeigt für Beton typisches Verhalten bei den Festigkeitsprüfungen. Die Standardabweichungen der Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen des Agglomeratbetons entsprechen der des Referenzbetons aus Kiessand. Auffällig ist seine durch die runde Kornform der Gesteinskörnung leichte Verarbeitbarkeit.



5.8 Ausblick

Als weitere notwendige Forschungsthemen in Hinblick auf eine großtechnische Anwendung der Sand-Zement-Agglomerate als Gesteinskörnung in Beton können genannt werden:

- Automatisches System für herstellungsbegleitende Einzelkorndruckprüfungen von frischen Agglomeraten einschließlich der Auswertung der Ergebnisse
- Test der Verwendung von sulfatfreiem Zement wie für Spritzbeton für schnelles Erstarren und Erhärten der Agglomerate
- Optimierung von Mahlfineinheit und Zusammensetzung des Zementes oder der Bindemittelkombination der Agglomerate
- Anwendbarkeit von Recyclingmaterial als Agglomeratkern oder Agglomeratkeim für schnelleren Agglomerierfortschritt
- Welche weiteren Zusatzstoffe sind geeignet? (z.B. Kornzusammensetzung und Kapillarwirkung optimieren)
- Spezielle Zusatzmittel, die bei erdfeuchten Mischungen wirken und das Agglomerieren unterstützen

Weiterführende Untersuchungen:

- Schaffung neuer Gestaltungsmöglichkeiten für Betonwerkstein und Terrazzowaren durch verschiedene Farben und Oberflächeneffekte der Granulate
- Verwertung anstatt Entsorgung diverser Feinststäube durch Binden in Agglomerate
- andere Anwendungsbereiche für künstliche Agglomerate, deren Eigenschaften sich in gewissen Grenzen einstellen lassen



Kapitel 6 Verzeichnisse

6.1 Begriffsdefinitionen und Erläuterung von Fachbegriffen

Agglomerat - Menge von Partikeln die durch Aufbauagglomeration entstanden sind. Hier wird davon ausgegangen, dass Agglomeratkörner eine gleichmäßige homogene Struktur aufweisen, also dass ihre unterschiedlich großen Ursprungspartikel zufällig angeordnet sind.

Agglomeratbeton - Normalbeton, also Beton mit einer Festbetonrohddichte größer $2,0 \text{ g/cm}^3$, der mit Sand-Zement-Agglomerat als grobe Gesteinskörnung hergestellt wurde.

Äquivalenter w/z-Wert - Verhältnis von wirksamem Wassergehalt zum Gehalt an Zement und dem anrechenbaren Anteil von Flugasche im Beton, siehe auch *w/z-Wert* und *wirksamer w/z-Wert*

Batch-Verfahren - „Eimer-Verfahren“, bei dem ein Prozessraum mit einer vorbereiteten Menge befüllt wird und diese Füllmenge nach der Behandlung wieder entfernt wird. Danach erfolgt die Befüllung mit einer neuen Menge und der Prozess startet erneut. Im Gegensatz dazu das → Im Gegensatz dazu siehe auch *kontinuierliches Verfahren*

Bruchpunkt - Wird als der charakteristische Punkt des maßgebenden Versagens von Agglomeraten - sowohl Frischlinge als auch Festlinge - bei der Einzelkorndruckprüfung definiert. Im Verlauf der gemessenen Kraft-Verformungs-Linien der Prüfkörner ist dieser Punkt durch eine deutliche Verringerung der Steigung der Linie nach einer anfänglichen Phase des steilen Anstieges zu erkennen. Dabei kann es nach dem als Bruchpunkt definierten Punkt sowohl zu einem weiteren Anstieg der Kraft-Verformungs-Linie, als auch zu einem Stagnieren ohne Kraftzuwachs sowie zum raschen Kraftabfall kommen. Danach erfolgt nach einem mehr oder weniger stark ausgeprägten Abfall der Kraft-Verformungs-Linie zu einem weiteren Anstieg der Linie. Dieser Kraftanstieg entsteht bei den Frischlingen durch den Druck des Stempels auf die unter dem Stempel verbliebene Restmenge der erdfeuchten Mischung. Bei Festlingen zeigen sich in diesem Bereich Sekundär- und Tertiärbrüche von Reststücken, die unter dem Stempel verblieben sind. (Siehe auch *Abschnitt 4.5.4 für Frischlinge und 4.6.2 für Festlinge*)



Brückenbildung - Zufällig gebildete, gewölbeartige Strukturen in losen Haufwerken, die die Last der darüberliegenden Partikel aufnehmen und so das Nachrutschen zum Beispiel zu Ausflussöffnungen von Silos verhindern können.

charakteristische, dichteste Packung - maximale Packungsdichte die für ein gegebenes Gemenge von Partikeln erreichbar ist, Dieser für jedes Gemenge spezifische Wert ist eine charakteristische, beschreibende Größe.

Dichte - Verhältnis von Masse zu Volumen eines Stoffes, siehe auch *Reindichte, Rohdichte*

Deformationszahl - absoluter Kennwert für die Kornklasse der geprüften Gesteinskörnung; Kennwert der den Beitrag einer Gesteinskörnung zur Festigkeitsbildung eines Betons beschreibt. nach [Vala (1885)]

Einkornpackung - Verdichtete Packung von Körnern nahezu gleicher Korngröße also $d/D \leq 2$, Der Restporenraum für solche Packungen beträgt etwa 35 Vol%.

Feinkorn - Für diese Arbeit erfolgte in *Abschnitt 4.3.2* die Festlegung, dass der Korngrößenbereich zwischen 22 und 257 μm als Feinkorn bezeichnet wird.

Feinstkorn - Für diese Arbeit erfolgte in *Abschnitt 4.3.2* die Festlegung, dass der Korngrößenbereich zwischen 0 und 22 μm als Feinstkorn bezeichnet wird. Ansonsten wird der Begriff häufig für den Kornbereich $\leq 250 \mu\text{m}$ gebraucht.

Feinanteil - DIN EN 933-9: Kornklasse einer Gesteinskörnung die durch das 0,063 μm -Sieb hindurchgeht, Wird gelegentlich auch als *Schlammkorn* bezeichnet.

Feine Gesteinskörnung - Gesteinskörnung für Beton gemäß DIN EN 12620 im Korngrößenbereich von 0 bis 4 mm

Feinkornbeton - Beton mit einem Größtkorn von 8 oder 4 mm

Feinsand - Begriff aus der Geologie, beschreibt Sande mit Korngrößen von 63 bis 200 μm

Festbetoneigenschaften - Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Dichten und Porengehalt, Festigkeitsentwicklung, Verbundeigenschaften (speziell an Grenzflächen der groben Gesteinskörnung und Bewehrungsstahl), Formänderungen (Schwinden, Wärmedehnzahl, E-Modul, Kriechen), Dauerhaftigkeit (Wassereindringtiefe, Frost-Tau-Widerstand und Frost-Tausalz-Widerstand, Karbonatisierungstiefe, AKR-Empfindlichkeit)

Festlinge - vollständig oder teilweise erhärtete Agglomerate aus Sand und gegebenenfalls Bindemittel (üblicherweise Zement)

Frischbetoneigenschaften - Die für den Zeitraum des Transportes und der Verarbeitung des Betons wesentlichen Eigenschaften, wie Ausbreitmaß, Verdichtbarkeit, Wirkung von Zusatzmitteln, Luftporengehalt, Ansteifzeitpunkt, Erhärtungsverlauf, Neigung zum Bluten

Frischlinge - frische Agglomerate aus Sand und gegebenenfalls Bindemittel

Frischdichte - Dichte der frischen Agglomerate, entspricht dem Begriff der Frischbetonroh-dichte gemäß DIN EN 12350 oder Frischmörteldichte gemäß DIN EN 413-2 mit dem



Unterschied, dass die Agglomerate bei der Messung in ihrer Form erhalten bleiben und ihre Struktur nicht gestört wird.

Füller - Zusatzstoffe zu Beton oder Mörtel, die durch das Füllen von Zwickelräumen im Korngerüst zur höheren Packungsdichte beitragen. Dadurch werden Dichtigkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit erhöht. Neben inaktiven gibt es auch puzzolanische und latent hydraulische Stoffe, wie zum Beispiel Steinkohlenflugasche oder Mikrosilica, die über den füllenden Effekt hinaus auch an der Festigkeitsbildung teilnehmen.

Füllkorn - Korngröße, die gerade in den Zwickel-Raum zwischen den nächstgrößeren Körnern passt, wenn sie nacheinander eingebracht werden. Theoretisch ist die Füllkorngröße das 0,155-fache des nächstgrößeren Kornes. Aus praktischen Erwägungen wird üblicherweise mit dem Wert 0,14 gerechnet. (siehe auch *Schlüpfkorn*)

Gesteinskörnung - siehe EN 206-1, Abschnitt 5.1.3

Gesteismehl - inerter Betonzusatzstoff, der als Füller vor allem die Dichtigkeit des Gefüges von Beton verbessert; weit verbreitet ist Kalksteinmehl

Granulat - Menge von Partikeln, die durch Aufbauagglomeration entstanden sind. Hier wird davon ausgegangen, dass Granulatkörner durch das schichtenweise Anlagern ihrer Ausgangspartikel entstanden sind und eine deutliche Schalenstruktur aufweisen.

Grobe Gesteinskörnung - Gesteinskörnung für Beton gemäß DIN EN 12620 in Kornklassen mit einem Kleinstkorn von ≥ 2 mm

Grobsand - Begriff aus der Geologie, beschreibt Sande mit Korngrößen von 630 - 2000 μm

Grünlinge - siehe „*Frischlinge*“

Hydraulisches Bindemittel – Bindemittel, das durch Reaktion mit Wasser an der Luft oder unter Wasser erhärtet und im erhärteten Zustand wasserbeständig ist

Kontinuierliches Verfahren - Art der Beschickung eines Prozessraumes, bei der eine kontinuierliche Zugabe der Ausgangsstoffe und ein ebensolcher Austrag der Reaktionsprodukte erfolgt; z.B. durch Einrieseln von Sand und Bindemittel in einen Granulierteller und selbstständiges Austragen der größeren Agglomerate durch Fallen über den Tellerrand → siehe auch Batch-Verfahren

Kornklasse - DIN 933-9: Bezeichnung einer Gesteinskörnung, die durch das größere von zwei gewählten Sieben hindurchgeht und vom kleineren Sieb zurückgehalten wird.

Kornklasse - *eigene Definition*: Gruppe von Partikeln mit Eigenschaften innerhalb vorgegebener Grenzen; In dieser Arbeit erfolgt die Klasseneinteilung üblicherweise anhand der Korngröße, z.B. Kornklasse 2/4: diejenigen Partikel, die das 4 mm-Sieb passieren aber auf dem 2 mm-Sieb liegen bleiben.

Lagerungsdichte - Der Begriff wird eher der Geotechnik zugeordnet und hier nicht verwendet. Siehe auch *Packungsdichte*.



Leichtbeton - gefügedichter Beton mit mindestens 800 kg/m^3 bis maximal 2000 kg/m^3 mit grober, leichter Gesteinskörnung gemäß DIN 1045-1, Abschn. 3.1.5

Mittelkorn - Für diese Arbeit erfolgte in *Abschnitt 4.3.2* die Festlegung, dass der Korngrößenbereich von 257 bis $2000 \mu\text{m}$ als Mittelkorn bezeichnet wird.

Mittelsand - Begriff aus der Geologie, beschreibt Sande mit Korngrößen von 200 bis $630 \mu\text{m}$

monomodal - Die Dichtefunktion $q_r(x)$ zeigt sehr häufig die Form einer Gaußschen Glocke. Bei einem Maximum ist dies eine monomodale Verteilung. Bei zwei Maxima der Glockenkurve heißt die Verteilung bimodal und bei drei Maxima trimodal. Bei der Darstellung der Summenfunktion zum Beispiel in einer Korngrößenverteilung bilden monomodale Verteilungen eine sehr steile Linie mit nur geringen Anteilen von Überkorn und Unterkorn.

Mörtel - Strukturbegriff zur Beschreibung eines Konglomerates aus mit Bindemittel verkitteten, groben und feinen Stoffen und einem Größtkorn von 4 mm; Bei größeren Zuschlagkörnern spricht man von Beton. [Wesche (1993) S. 23]

multimodale Packungen - Bei einer Dichtefunktion der Partikelgrößen mit mehreren Maxima oder einer Summenfunktion mit flachem Anstieg, die in Korngrößenbereichen über mehrere Zehnerpotenzen wesentliche Anteile enthält, heisst ein Gemenge multimodal.

Normalbeton - Beton gemäß DIN 1045-1, Abschnitt 3.1.4 mit einer Rohdichte größer als 2000 kg/m^3 bis maximal 2600 kg/m^3

Packungsdichte - Anteil des Feststoffs in einem Gemenge, angegeben als Wert von 0 bis 1

Porengehalt - hier definiert als Menge aller Poren in einem losen Gemenge oder einem erhärteten Beton oder Mörtel

Reindichte - Die Masse eines Stoffes bezogen auf sein porenfreies Volumen in $[\text{g/cm}^3]$; wird gelegentlich auch als Feststoffdichte bezeichnet

Resthöhe - Die Höhe, die ein zu prüfendes Korn bei einem bestimmten Belastungszustand hat, wird durch die unbelastete Ausgangshöhe geteilt. Daraus ergibt sich der relative Wert der Resthöhe. Diese wird üblicherweise bis zu einem Wert von 0,6 betrachtet, da das Prüfkorn dann meist in kleine Fragmente zerfallen ist.

Restsand a) Sandmenge, die sich beim kontinuierlichen Betrieb des Granuliertellers im Prozessraum ansammelte;

b) Sandmenge, die beim Sieben der teilweise oder vollständig erhärteten Agglomerate mit Korngrößen kleiner 2 mm anfiel (In diesem Restsand befanden sich auch „Agglomeratkeime“.)

Rohdichte - Die Masse eines Stoffes bezogen auf sein Ausgangsvolumen mit eingeschlossenen Poren (auch Eigenporen) in $[\text{g/cm}^3]$. Bei Agglomeraten wird dieses maßgebende Ausgangsvolumen von der äußeren Hüllfläche eingeschlossen.

scheinbare Kohäsion - der durch Feuchtigkeit entstehende Zusammenhalt zwischen den losen Partikeln eines Stoffes



Schlämmkorn - siehe Feinstkorn

Schlüpfkorn - Korn das klein genug ist, um die zwischen größeren Körnern verbleibenden Spalten und Zwickel zu passieren, um innenliegende Zwickelräume zu füllen. Dabei wird bereits von einer dichten Lagerung der Ausgangskörnung ausgegangen (siehe auch *Füllkorn*)

Schwinden - Zusammenziehen bei Feuchtigkeitsabgabe, (Wesche T.1, S. 98)

Schrumpfen - Volumenabnahme durch chemische Vorgänge, (Wesche T.1, S. 98)

Sekundäragglomerate - Agglomerate, die durch Zusammenklumpen kleinerer Primär-agglomerate entstehen. Sie sind durch ihre maulbeerartige Struktur optisch auffällig und haben durch Sandpartikel, die die Zwickel zwischen den Primäragglomeraten füllen, einen erhöhten Porengehalt.

Spezifische Packungsdichte - Maximale erreichbare Packungsdichte einer Kornklasse; der im praktischen Versuch ermittelte Wert stellt damit eine physikalische Eigenschaft der jeweiligen Kornklasse dar.

Sphärizität - beschreibt, wie sehr ein Körper der Kugelform entspricht. Sie ist definiert als das Verhältnis der Oberfläche einer Kugel gleichen Volumens zu der Oberfläche des Körpers selbst.

Suspension - ist als eine Sonderform der *Dispersion* ein heterogenes Stoffgemisch aus einer Flüssigkeit und darin fein verteilten Feststoffen, die in der Flüssigkeit aufgeschlämmt und in der Schwebe gehalten werden. Eine Suspension ist eine grobdisperse Dispersion und tendiert zur Sedimentation und Phasentrennung. Suspensionen in Wasser werden unterteilt in „grobe“ Suspensionen (Teilchengröße 0,1 bis 1 mm, z. B. Kreideschlamm) und „feine“ Suspensionen (Teilchengröße 1 bis 100 μm , z. B. Kalkmilch). Bei noch feineren dispergierten Teilchen (kleiner 1 μm) wird von *Dispersionen*, bei Teilchengrößen kleiner 1 nm von Molekulardispersionen gesprochen. [Wikipedia, (20.05.2011) gekürzt]

w/z-Wert - Verhältnis von wirksamem Wassergehalt zu Zementgehalt im Beton, siehe auch *wirksamer w/z-Wert* und *äquivalenter w/z-Wert*

Wandeffekt - (Wandeffekt an Behälterwänden) Verringerung der Packungsdichte von Haufwerken an den Behälterwänden oder den Kontaktflächen von Partikeln sehr unterschiedlicher Größe

Wasseraufnahme - Die Wassermenge, die von den Agglomeraten in ihren Porenraum aufgenommen wird. Die Angabe erfolgt in Massenprozent mit Bezug auf die Trockenmasse der Agglomerate.

wirksamer w/z-Wert - Verhältnis von wirksamem Wassergehalt zum Gehalt an Bindemittel (Zement und wirksamer Anteil von Flugasche), siehe auch *w/z-Wert* und *äquivalenter w/z-Wert*. Dabei umfasst der wirksame Wassergehalt die für das Bindemittel zur Verfügung stehende Wassermenge. Die Kernfeuchte und an der Oberfläche der Partikel fest gebundene Wasserhüllen werden nicht dazugerechnet.



6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Übersicht zur Struktur der Arbeit	11
Abbildung 2.2:	Argumentationsbogen von Eigenschaften der Frischlinge über die der Festlinge zum Agglomeratbeton.....	12
Abbildung 3.1:	Packung aus Partikeln einer Kornklasse, z.B. Kies 8/16 mm.....	20
Abbildung 3.2:	Bimodale Packung.....	20
Abbildung 3.3:	Kleine Körner sind gegenüber Abbildung 3.2 vergrößert	21
Abbildung 3.4:	Packungsdichte als Funktion des Variationskoeffizienten von zwei gaußverteilten Sanden verschiedener Sphärizität (Höhere erreichbare Packungsdichte bei großem Variationskoeffizient).....	22
Abbildung 3.5:	Abhängigkeit der erreichbaren Packungsdichte v. Größenverhältnis der Mittelw. der beteiligten Kornklassen und ihren Volumenanteilen ..	23
Abbildung 3.6:	Optimierte Korngrößenverteilungen aus drei Komponenten für UHPC (Ultrahochfester Beton)	24
Abbildung 3.7:	Skizze des Wandeffektes in Kornhaufwerken	25
Abbildung 3.8:	Prinzipskizze zum Erreichen maximaler Packungsdichte abhängig von den Anteilen zweier Kornfraktionen	26
Abbildung 3.9:	Kornhaufwerke bei verschiedenen Wassergehalten	27
Abbildung 4.1:	Übersicht zum Auswahlverfahren der für die Untersuchungen genutzten Sande	32
Abbildung 4.2:	Korngrößenverteilungen der Sande der Voruntersuchungen gemäß eigener Messungen	33
Abbildung 4.3:	Sande der Region ergänzt um die Korngrößenverteilungen der eigenen Voruntersuchungen	34
Abbildung 4.4:	Kornzusammensetzung der Versuchssande gem. Standardsiebsatz ..	36
Abbildung 4.5:	Überblick der Korngrößenverteilungen der Ausgangssande, Zement, Steinkohlenflugasche und Fuller-Linien für ein Größtkorn 2 mm;	37
Abbildung 4.6:	Relative Häufigkeiten in Bezug auf die obere Kornklassengrenze	38
Abbildung 4.7:	Übersicht der Einflussgrößen auf die Herstelltechnologie; Dargestellt sind Auszüge aus der Gesamtmenge der möglichen Parameter.	41
Abbildung 4.8:	Granulierteller mit kleinem Rand und glattem Boden	42
Abbildung 4.9:	Druckprüfgerät für Frischlinge und Festlinge.....	48
Abbildung 4.10:	Vergleich der Genauigkeit der Ermittlung der Höhen von Festlingen bei Einzelkorndruckprüfung mit der Vermessung von Hand	49



Abbildung 4.11:	Übersicht zur Festlegung der Agglomeratrezepturen	49
Abbildung 4.12:	Darstellung von Gemischen im Dreistoffdiagramm.	54
Abbildung 4.13:	Darstellung der Abhängigkeit der erreichbaren Packungsdichte von den Partikelgrößen bei 2- und 3-modalen Gemischen	55
Abbildung 4.14:	Festlegung der Klassengrenzen für Darstell. im Dreistoffdiagramm ...	57
Abbildung 4.15:	Positionen der Ausgangsstoffe im Dreistoffdiagramm.....	58
Abbildung 4.16:	Darstellung der Rezepturen der Vorversuche (VV), der Ausgangsstoffe und der Fuller-Linien für 1 und 2 mm Größtkorn.....	59
Abbildung 4.17:	Rezepturen der Hauptversuche.....	62
Abbildung 4.18:	Korngrößenverteilungen der Rezepturen der Hauptversuche	63
Abbildung 4.19:	„Best-Ergebnis“ des Berechnungsdurchlaufes 1 mit Sanden D	66
Abbildung 4.20:	Übersicht der Ergebnisse des Berechnungsdurchlaufes 1	67
Abbildung 4.21:	Überhöhte Darstellung der Ergebnisse der Berechnungsdurchläufe 1 und 2 im Dreistoffdiagramm	68
Abbildung 4.22:	Darstellung des Wassersättigungspunktes in Vol %; Dies entspricht dem Porenraum der Packung.....	71
Abbildung 4.23:	Ergebnisbilder der DEM-Modellierung für D11; links Berechnungsschritt 1, Agglomeratdurchmesser 2000 µm; rechts Berechnungsschritt 2, Agglomeratdurchmesser 24 µm.....	73
Abbildung 4.24:	Gegenüberstellung der Packungsdichten aus Unterwasserwägung mit empirisch-numerischer Berechnung sowie DEM-Modellierung	75
Abbildung 4.25:	Übersicht zur Agglomeratphase	77
Abbildung 4.26:	Erhärtete Agglomerate mit Sandbrocken als Kern nach der Einzelkorndruckprüfung	80
Abbildung 4.27:	Prinzipielle Bewegungsmuster im Granulierteller	80
Abbildung 4.28:	Schnittfläche Agglomeratbeton mit sichtbarer Schalenbildung der Agglomerate	83
Abbildung 4.29:	Schematische Ansicht des Granuliertellers mit Leitblech und erzwungenem Abrollweg	84
Abbildung 4.30:	Ansicht eines Sekundäragglomerates in der Winkelschablone zur Einzelkornvermessung	86
Abbildung 4.31:	Ausbeuten der Rezepturen D	88
Abbildung 4.32:	Ausbeuten von D06 und D09	89
Abbildung 4.33:	Ausbeuten der Rezepturen K	90



Abbildung 4.34:	Vergrößerte Darstellung der Ausbeuten der Rezepturen K.....	91
Abbildung 4.35:	Darstellung der Restsande I, II und „Restsand grob“ im Vergleich zu Ausgangssanden.....	92
Abbildung 4.36:	Darstellung der rechnerisch und mit Messzylinder ermittelten Rohdichten	96
Abbildung 4.37:	Wassergehalte der Rezepturen.....	97
Abbildung 4.38:	Äquivalente w/z-Werte der Rezepturen.....	98
Abbildung 4.39:	Lastausbreitung und resultierender Spaltzug an Krafteinleitungspunkten	100
Abbildung 4.40:	Frischlinge und Festlinge vor der Druckprüfung.....	101
Abbildung 4.41:	Agglomeratkorn in Druckprüfeinrichtung	102
Abbildung 4.42:	Schematische Rissbilder im Bruchzustand und Bild nach Einzelkorndruckprüfung eines sehr großen Frischlings.....	103
Abbildung 4.43:	Beispiel für die Darstellung des Messlogs als Diagramm.....	104
Abbildung 4.44:	Darstellung der gemessenen und daraus errechneten Werte in eigenen Diagrammen für ein einzelnes Prüfkorn (Korn 1); hier zur Übersicht, für eine größere Darstellung siehe <i>Anlage 26</i>	105
Abbildung 4.45:	Typische Verläufe der Kraft-Verformungs-Linien von Frischlingen der Rezeptur D04 bei Druckprüfung.....	107
Abbildung 4.46:	Typische Verläufe der auf Ausgangshöhe und Bruchkraft normierten Kraft-Verformungs-Linien von Frischlingen bei Einzelkorndruckprüfung	108
Abbildung 4.47:	Darstellung der Bruchkräfte von D04b und D04c.....	108
Abbildung 4.48:	Wirksame Abmessungen eines wenig kompakten Körpers	109
Abbildung 4.49:	Regressionsanalyse an Prüfergebnissen von Frischlingen verschiedener Chargen von Rezeptur K04	111
Abbildung 4.50:	Gegenüberstellung der Bruchkräfte der Frischlinge der Rezepturen D05a und K07	112
Abbildung 4.51:	Gegenüberstellung der Kraft-Verformungs-Linien von Frischlingen der Rezepturen D05a, K06 und K07	113
Abbildung 4.52:	Zusammenstellung der Bruchpunkte von K06 und K07	114
Abbildung 4.53:	Detailaufnahme erhärteter Agglomerate der Rezeptur K07	118
Abbildung 4.54:	Typische Bruchbilder erhärteter Agglomerate	121



Abbildung 4.55:	Bruchbild eines Agglomeratkornes (K07 8/16) nach der Einzelkorn-Druck-Prüfung	121
Abbildung 4.56:	Schar der Kraft-Verformungs-Linien der Festlinge K04 (VT5) mit deutlich erkennbaren Knirschbereichen	123
Abbildung 4.57:	Darstellung der Bruchkräfte von Festlingen verschiedener Entnahmezeitpunkte von K04.....	124
Abbildung 4.58:	Regressionen an Festlingen von K04 aus verschiedenen Chargen und Prozesszuständen	125
Abbildung 4.59:	Abhängigkeit des Druckwertes von der geprüften Korngröße und Rezeptur	126
Abbildung 4.60:	Ergebnisse der kollektiven Druckprüfungen der Kornklasse 4/8 im Dreistoffdiagramm; Druckfestigkeit der Gesteinskörnung gemäß DIN 13055 Anhang A in [N/mm ²]	127
Abbildung 4.61:	Bandbreite der Rohdichtewerte innerhalb von Agglomeratrezepturen, Darstellung einer Teilmenge der Tabellenwerte aus <i>Anlage 32</i>	130
Abbildung 4.62:	Schwankungsbreite der Rohdichten über Kornklassen	131
Abbildung 4.63:	Darstellung der Mittelwerte der Rohdichten im Dreistoffdiagramm ...	133
Abbildung 4.64:	Abhängigkeit der Rohdichten der Festlinge vom Feinststoffgehalt ...	134
Abbildung 4.65:	Vergleich von gemessenen und berechneten Porengehalten, mit Angabe der Schwankungsbreiten.....	135
Abbildung 4.66:	Verlauf der Prüfkörperdehnungen beim Schnellprüfverfahren nach Teil 3, Kapitel 5.2 der Alkalirichtlinie	138
Abbildung 4.67:	Übersicht über Betonversuchsphase.....	140
Abbildung 4.68:	Druckfestigkeit des Agglomeratbetons in Abhängigkeit von Rohdichte und Kornzusammensetzung.....	146
Abbildung 4.69:	(incl. vorherige Seite) Gegenüberstellung der Mittelwerte von Betondruckfestigkeit und Festbetonrohichte für verschiedene Agglomeratrezepturen	148
Abbildung 4.70:	Betondruckfestigkeiten in Abhängigkeit der Einzelkornbruchkräfte der Agglomerate	149
Abbildung 4.71:	Gegenüberstellung der Betonfestigkeiten mit den Druckwerten aus kollektiver Prüfung	150
Abbildung 4.72:	Abwitterungsmengen im Frost-Tau-Versuch in Wasser	152
Abbildung 4.73:	Ergebnisse der Frost-Tausalz-Prüfungen in 3%iger NaCl-Lösung....	153
Abbildung 4.74:	Schwindverhalten des Agglomeratbetons für Rezeptur D11.....	157



Abbildung 4.75:	Abhängigkeit Leichtbetonfestigkeit von Leichtzuschlagfestigkeit	161
Abbildung 5.1:	Argumentationsbogen und Schema zur Suche nach Korrelationen ..	163
Abbildung 5.2:	Schema möglicher Quervergleiche zwischen Frischlingen und Festlingen	166
Abbildung 5.3:	Quervergleich zwischen Bruchkräften von Frischlingen und Mittelwerten der Rohdichten der Festlinge von D05 und K07; hier zur Übersicht, für größere Darstellung siehe <i>Anlage 43</i>	167
Abbildung 5.4:	Quervergleich der Rohdichte der Festlinge (raumlufttrocken) mit den Rohdichten der daraus hergestellten Agglomeratbetone (feucht bei Druckprüfung nach 28d)	168
Abbildung 5.5:	Quervergleich der Rohdichten der Festlinge mit den Druckfestigkeiten des Agglomeratbetons	169



6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1:	Rohdichten der Ausgangssande	38
Tabelle 4.2:	Maschinenparameter und ihre Einstellbereiche an der Versuchsanlage	43
Tabelle 4.3:	Mindestanforderungen an die Zusammensetzung von Beton gemäß Expositionsklassen für die für Agglomeratbeton vorgesehenen Verwendungen; Die Angabe der geforderten Mindestzementgehalte erfolgte ohne/mit Anrechnung von Zusatzstoffen.....	51
Tabelle 4.4:	Theoretisch erforderliche Zementmengen bei einem w/z-Wert = 0,55; bestimmt aus den Mengen des Zugabewassers bei verschiedenen Rezepturen aus den Vorversuchen.....	52
Tabelle 4.5:	Grenzwerte der ersten Berechnungsläufe der empirisch-numerische Berechnung zur erreichbaren Packungsdichte	53
Tabelle 4.6:	Abhängigkeit der erreichbaren Packungsdichte vom Verhältnis der Partikelgrößen bei optimierten 3-modalen Gemischen	56
Tabelle 4.7:	Feinst-, Fein- und Mittelkornanteile der Ausgangsstoffe und der Rezepturen der Vorversuche	60
Tabelle 4.8:	Rezepturen der Hauptversuche	61
Tabelle 4.9:	Verteilungsparameter der Dichtefunktionen der Ausgangsstoffe dieser Untersuchung.....	64
Tabelle 4.10:	Übersicht der Berechnungsläufe an der Universität Kassel mit Anteilen der Ausgangsstoffe und Best-Ergebnissen; Darstellung der 4 Berechnungsläufe in Spalten	65
Tabelle 4.11:	Vergleich der ermittelten Porengehalte nach Punkte und bei reichlicher Verdichtung	70
Tabelle 4.12:	Ergebnisse der DEM-Modellierung	73
Tabelle 4.13:	F-Werte der hier verwendeten Ausgangsstoffe.....	74
Tabelle 4.14:	Kornklassenanteile für Sieblinie B16 und daraus hergeleitete Zielanteile der Kornklassen der Agglomerate bezogen auf den Anteil grober Gesteinskörnung >2 mm der Normsieslinie	88
Tabelle 4.15:	Ergebnisse der Frischdichtebestimmung der Frischlinge mit Messzylinder....	95
Tabelle 4.16:	Statistische Kenngrößen von zwei Chargen von D04	110
Tabelle 4.17:	Bruchkraft und Einzelkorngrößen der Festlinge K04 (VT5) aus dem folgendem Kraft-Verformungs-Diagramm	122



Tabelle 4.18: Zusammenfassung der Maximal-, Minimal- und Mittelwerte der Rohdichten in [g/cm ³] über die Agglomeratrezepturen und Kornklassen (bezogen auf Zustand erhärtet, 40°C-getrocknet).....	132
Tabelle 4.19: Zusammenstellung der aus den Rohdichten ermittelten Porengehalte und Packungsdichten.....	135
Tabelle 4.20: Mengen der Abwitterung von Agglomeratproben beim Frost-Tau-Wechsel-Versuch	137
Tabelle 4.21: Gegenüberstellung zu prüfender Eigenschaften an verschiedenen Gesteinskörnungen für Beton	141
Tabelle 4.22: Zuordnung der Sandbetonrezepturen zu den Agglomeratbetonproben gleicher Summenzusammensetzung	143
Tabelle 4.23: Ergebnisse der Einzelkornbruchlasten und Betondruckfestigkeiten aus Untersuchung von N. Holle	149
Tabelle 4.24: Festigkeitswerte der Spaltzug- und Biegezugprüfung.....	151
Tabelle 4.25: Frost-Tau-Beanspruchung in Kontakt mit Wasser	152
Tabelle 4.26: Abwitterungsmengen im Frost-Tau-Versuch in 3%-iger NaCl-Lösung Bezogen auf trockene Einwaage	154
Tabelle 4.27: Ergebnisse der Bestimmung der E-Moduls.....	159



6.4 Literaturverzeichnis

Antonyuk, S. (2006)

Deformations- und Bruchverhalten von kugelförmigen Granulaten bei Druck- und Stoßbeanspruchung, Dissertation an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2006

Antonyuk, S. / Tomas, J. / Heinrich, S. et al. (2004)

Bruchprozesse bei der Druckbeanspruchung von Granulaten, in „Chemie Ingenieur Technik“, No. 3/2004, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, 2004

Arbenz, K. / Wohlhauser, A. (1983):

Höhere Mathematik für Ingenieure, Oldenbourg Verlag, München, 1983

Atkins, P. (1999)

Physikalische Chemie, korrigierter Nachdruck der 2. Auflage, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, ⁽²⁾1999

Auberg, R. (1998)

Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem CDF- und CIF-Test, Dissertation an der Universität Gesamthochschule Essen, Aachen, 1999

Aziz, J.A. (1979)

Zerkleinerung von Zementklinker in Einzelkorn-Situation, Kornschichten und im Gutbett, Dissertation Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1979

BAW (2004)

Frostprüfung von Beton (MFB), Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2004

Berninger, A. M. (2004)

Mikrostrukturelle Eigenschaften von Quarz als Bestandteil spät reagierender, alkaliempfindlicher Zuschläge, Dissertation an der Bauhaus-Universität Weimar, 2004

Bornemann, R. (2005)

Untersuchungen zur Modellierung des Frisch- und Festbetonverhaltens erdfechter Betone, Dissertation an der Universität Kassel, 2005



Erfurt, W. (2002)

Erfassung von Gefügeänderungen in Beton durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Einschätzung der Dauerhaftigkeit, Dissertation an der Bauhaus-Universität Weimar, 2002

Finck, F. (2005)

Untersuchung von Bruchprozessen in Beton mit Hilfe der Schallanalyse, Dissertation an der Universität Stuttgart, 2005

Franke, L. / Opeldus, S. (2009)

Einfluss der eingesetzten Sande auf die Einstufung von Gesteinskörnung hinsichtlich der Alkalireaktivität mit Verfahren der Alkali-Richtlinie, Schlussbericht DAfStb – Forschungsvorhaben V 457, 2009, TUHH

Geisenhanslüke, C. (2008)

Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen, Dissertation an der Universität Kassel, 2008

German, R. M. (1989)

Particle Packing Characteristics, Metal Powder Industries Federation, Princeton, 1989

Glässer, E. / Otremba, E / Voppel, G. (1984)

Die Kiessandwirtschaft Nordwesteuropas unter Berücksichtigung der Rohstoffsicherung und deren Anwendung in Raumordnungsplänen, Selbstverlag im Wirtschafts- und Sozialgeografischen Institut der Universität Köln, 1984

Harcenko, I. / Pantschenko, A. / Stark, J. et al. (2006)

Sandbeton für monolithischen Häuserbau am Polarkreis, Tagungsband Teil 1 der IBAUSIL, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, 2006

Härig, S. / Klausen, D. / Hoscheid, R. (2003)

Technologie der Baustoffe, Handbuch für Studium und Praxis, C.F. Müller Verlag Heidelberg, ⁽¹⁴⁾2003

HeidelbergCement (2008):

Betontechnische Daten, HeidelbergCement AG, Heidelberg, 2008

Heyn, S. / Mettke, A. (2009)

Untersuchungen zu den Eigenschaften der entwickelten RC-Betonrezepturen, Forschungsbericht zum Projekt „Einsatz von RC-Material aus mineralischen



Baustoffen als Zuschlag in der Betonherstellung“, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2009

Hoffmann, C. / Huth, O. (2006)

Konstruktionsbeton aus rezyklierter Gesteinskörnung, Dissertation Abschlussbericht zu Forschungsprojekt an der EMPA, Zürich, 2006

Holle, N. (2007)

Untersuchungen zu Herstellungsmöglichkeiten von künstlichem Grobkorn, Diplomarbeit (FH) an der Hochschule Wismar, 2007

Holle, N. (2008)

Technologische und stoffliche Optimierungsversuche eines künstlichen Zuschlaggranulates, Masterthesis an der Hochschule Wismar, 2008

Höveling, H. (2006)

Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB), Dissertation an der Universität Hannover

Hund, A. S. (2007)

Hierarchische Mehrskalenmodellierung des Versagens von Werkstoffen mit Mikrostruktur, Dissertation an der Universität Stuttgart

Iken, Lackner, Zimmer, Wöhnl (J)

Handbuch der Betonprüfung, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, ⁽⁵⁾2003

Jeschke, H. / Poppy, W. / Schubert, W., (2006)

Betonzerkleinerung im Prallbrecher - Experiment und Simulation, in „Aufbereitungs Technik 47“, 2006, Nr. 6

Kittel, Ch. (1993)

Einführung in die Festkörperphysik, Oldenbourg Verlag, München (10)1993

Könke, C. (2009)

Multiscale models für damage prediction in ductile and brittle materials, in „Tagungsband des 1. Darmstädter Ingenieurkongresses – Bau und Umwelt“, Technischer Universität Darmstadt, 2009

Krass, K. / Trogisch, H. (2003)

Gezielte Herstellung von Brechsand zur Verwendung im Asphalt- und Betonbau, Teil 1+2, in „Die Natursteinindustrie“, 07/2003 und 01/2004



Kudrolli, A. (2008)

Sticky Sand, in "nature materials", Vol 7, 2008, S. 174 - 175, Nature Publishing Group Basingstoke

Leonhardt, F. (1975)

Vorlesungen über Massivbau, Zweiter Teil, Sonderfälle der Bemessung im Stahlbetonbau, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New-York ⁽²⁾1975

Löffler, F. / Raasch, J. (1992)

Grundlagen der mechanischen Verfahrenstechnik, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbh, Braunschweig / Wiesbaden, 1992

Macht, J. / Nischer, P. (2006)

Weiche Betone – kostengünstige Herstellung durch gute Mehlkornabstufung und gute Mischwirkung, in „Zement+Beton“ 02/2006, VÖZ, Zement+Beton Handels- u. Werbeges. m.b.H., Wien, 2006

Merziger, G. / Wirth, T. (1991)

Repititorium der höheren Mathematik, Feldmann Verlag, Springe, 1991

Meyer, L. (2007)

Zum Einfluss der Kontaktzone bei der Modellierung des Elastizitätsmoduls von Beton, Dissertation an der Technischen Hochschule Aachen, 2007

Nold, P. / Löbe, R. / Müller, M. (2003)

Granulieren – einfach und kostengünstig, Sonderdruck aus „Keramische Zeitschrift“ 8/9 2003 für Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG

Precht, M. / Kraft, R. / Bachmaier, M. (2005)

Angewandte Statistik 1, Oldenbourg Verlag München, 2005

Punkte, W. (2002)

Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken, in „beton“, 05/2002, S. 242 – 248, Verlag Bau+Technik

Reinstorf, S. (1978)

Betontaschenbuch, Band 1 Betontechnologie, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1978

Reschke, T. (2000)

Der Einfluß der Granulometrie der Feinststoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Dissertation an der Bauhaus-Universität Weimar, 2000



Reschke, T. / Siebel, E. / Thielen, G. (2005)

Einfluß der Granulometrie und Reaktivität von Zement und Zusatzstoffen auf die Festigkeits- und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton, http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Betontechnische_Berichte/025-038_Einfl.s_Granulometr.pdf

Reznichenko, O. (2003)

Herstellung von Brennstoffagglomeraten aus Kohlen mit unterschiedlichem Inkohlungsgrad für Kleinfeuerungsanlagen, Dissertation an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2003

Roos, F. (2007):

Ein Beitrag zur Bemessung von Beton mit Zuschlag aus rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN 1045-1, Dissertation an der Technischen Universität München, 2007

Röbert, Siegfried (1984):

Systematische Baustofflehre, Band 2: Baustoffanwendung, VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1987

Schachinger, A. I. (2007)

Maßnahmen zur Herstellung von rissefreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität, Dissertation an der Technischen Universität München, 2007

Scheel, M. / Seemann, R. / Brinkmann, M. et al. (2008)

Morphological clues to weat granular pile stability, nature materials, Vol 7, 2008, S. 189 - 193, Nature Publishing Group Basingstoke

Schneider, K.-J. (2001)

Bautabellen für Ingenieure, Werner Verlag Düsseldorf, ⁽¹⁴⁾2001

Schulze, W. (1966)

Einführung in die Baustoffprüfung, Verlag für Bauwesen, Berlin, ⁽²⁾1966

Schubert, H. (1977)

Mechanische Verfahrenstechnik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, ⁽³⁾1990

Schulze, W. (1973)

Der Baustoff Beton, Band 1, Verlag für Bauwesen, Berlin, ⁽⁹⁾1988



Schulze, W. (1965)

Einführung in die Baustoffprüfung, Verlag für Bauwesen, Berlin, ⁽²⁾1965

Schulze, W. / Reichel, W. (1973)

Der Baustoff Beton, Band 3, Verlag für Bauwesen, Berlin, ⁽²⁾1972

Schwanda, F. (1956):

Der Bestwert der Kornzusammensetzung von Betonzuschlagstoffen, Der Bauingenieur, 1956.31, S.41 - 46

Sherrington, P. J. / Oliver, R. (1981)

Granulation, Heyden & Son Ltd, 1981

Sievers, H. (1997)

Sandreiche Betonzusammensetzungen, in „beton“, 01/1997, Verlag Bau+Technik, (1997)

Sommer, K. / Herrmann, W. (1978)

Auslegung von Granulierteller und Granuliertrommel, in „Chem.-Ing.-Techn.“ 50/1978, Nr. 7, S. 518 - 524, Verlag Chemie GmbH, Weinheim, 1978

Springenschmid, R. (2007)

Betontechnologie für die Praxis, Bauwerk Verlag Berlin, 2007

Spengler, A. (2006)

Technologie sandreicher Betone, Dissertation an der Technischen Universität München, 2006

Stieß, M. (2008)

Mechanische Verfahrenstechnik 1, Springer, Berlin, 2008

Teichmann, T. (2007)

Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit die Gefügedichtigkeit von Zementstein, Dissertation an der Universität Kassel, 2007

Vala, J. (1981)

Wirtschaftspatent: Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung der Festigkeitscharakteristik von Zuschlagstoffen, Patentschrift 148827 des Amtes für Erfindungs- und Patentwesen der DDR, 1981

Vala, J. (1985)

Einige Aspekte zur Zusammensetzung, den Eigenschaften und der Verdichtung von Normalbeton, in „Betontechnik“ Juni/1985, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1985



Vennemann, K. (2007)

Brückenbau einmal anders (Einsatz von Leichtbeton für ein Brückentragwerk), in „Zement+Betton“ 2/2007, VÖZ, Zement+Betton Handels- u. Werbeges.m.b.H., Wien, 2007

Walker, J. W. (2003)

Persistence of Granulare Structure during Compaction Processes, in „KONA - Powder and Particle Journal“, no.21/2003, Hosokawa, Japan, 2003

Weißer, D. / Holschemacher, K. (2004)

Sandreiche selbstverdichtende Betone, in „beton“ 3/2004, Verlag Bau+Technik, 2004

Wendehorst, R. (2004)

Baustoffkunde, Verlag Curt R. Vincentz, ⁽²⁶⁾2004

Wesche, K. (1996)

Baustoffe für tragende Bauteile 1, Grundlagen, Bauverlag Wiesbaden und Berlin, ⁽³⁾1999

Wesche, K. (1993)

Baustoffe für tragende Bauteile 2, Beton und Mauerwerk, Bauverlag Wiesbaden und Berlin, ⁽³⁾1993

Wolf, G. (2004)

Untersuchungen über das Temperaturverhalten eines Tunnelbetons mit spezieller Gesteinskörnung, Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, 2004

Online-Quellen

www.bauglossar.com/definition_fuellkorn-beton-fuellkorn-fuellkorngroesse_1432_De.htm

www.betontechnik.at Broschüre „KAND®STONE“

www.ecotransit.org

www.wikipedia.de



Anlagen 1 bis 44

Liste der Anlagen: Externe Quellen der jeweiligen Anlage werden in der Überschrift von Blatt 1 der Anlage genannt.

<u>Anlage Nr.</u>	<u>Blätter</u>	<u>Inhalt</u>
Anlage 1	1 Blatt	Korngrößenverteilungen der Sande der Voruntersuchungen gemäß eigener Messungen als Tabelle und Diagramm
Anlage 2	4 Blatt	Übersicht über Korngrößenverteilungen der Sande der Region
Anlage 3	10 Blatt	Detailaufnahmen der Ausgangssande D1, D2, K1 und K2
Anlage 4	9 Blatt	Auszug aus Petrographischem Bericht zu Sanden D1, D2, K1 und K2
Anlage 5	3 Blatt	Tabelle der durch Siebung ermittelten Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe
Anlage 6	2 Blatt	Tabelle der Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe als zusammengeführte Werte aus Siebung und Lasergranulometrie
Anlage 7	2 Blatt	Tabelle zur Ermittlung der Rohdichten der Ausgangsstoffe
Anlage 8	1 Blatt	Produktdatenblatt des Zementes CEM I 42,5 R Pur 4 aus Lägerdorf
Anlage 9	1 Blatt	Auszug aus Überwachungszeugnis der Steinkohlenflugasche des Kohlekraftwerkes Rostock
Anlage 10	1 Blatt	Wasseranalyse der für die Versuche verwendeten Wassers
Anlage 11	2 Blatt	Technisches Merkblatt des verwendeten Fließmittels
Anlage 12	2 Blatt	Abschätzung der Wirtschaftlichkeit
Anlage 13	2 Blatt	Tabelle zur Aufteilung der Ausgangsstoffe, der Rezepturen der Vor- und Hauptversuche sowie der Idealverteilungen nach Fuller auf die 3 Kornklassen Feinstkorn, Feinkorn und Mittelkorn



Anlage 14	6 Blatt	Darstellung der KGV's der Rezepturen der Hauptversuche als Tabelle
Anlage 15	1 Blatt	Darstellung der KGV's der Rezepturen der Hauptversuche als Diagramm
Anlage 16	8 Blatt	Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe 0 – 250 µm mittels Lasergranulometrie
Anlage 17	4 Blatt	Ergebnisse der empirisch-numerischen Berechnung
Anlage 18	5 Blatt	Ergebnisse der Bestimmung des Wassersättigungspunkte nach Punkte und „verbessert“ für die Ausgangsstoffe und verschiedene Rezepturen
Anlage 19	2 Blatt	Rezepturen der Vor- und Hauptversuche
Anlage 20	3 Blatt	Ergebnisbilder der DEM-Modellierung
Anlage 21	8 Blatt	Granulierverhalten der Vor- und Hauptversuche
Anlage 22	2 Blatt	Messrahmen mit Feinmessuhren für Schwindmessungen
Anlage 23	2 Blatt	Tabelle der Einzelvermessung von 14 Körnern von K04tr im Vergleich mit Kornhöhe aus Druckprüfung
Anlage 24	1 Blatt	Gegenüberstellung der Ergebnisse für Packungsdichte und Porengehalt in [Vol%] aus Unterwasserwägung und empirisch-numerischer Berechnung sowie DEM-Modellierung
Anlage 25	1 Blatt	Ausbeuten der Vorversuche und der Rezepturen D und K als Säulendiagramme
Anlage 26	16 Blatt	Tabellenarbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten 14 einzelner Frischlinge der Rezeptur K05tr, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte
Anlage 27	6 Blatt	Kurvenscharen der Kraft-Verformungs-Linien von Frischlingen der Rezepturen D04, D11, K07, K11 und K12
Anlage 28	1 Blatt	Mögliche Kriterien zum Bestimmen des „Bruchpunktes“ an Frischlingen
Anlage 29	2 Blatt	„Umhüllende“ als Kriterium für Frischlinge „ausreichender Qualität“
Anlage 30	13 Blatt	Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung eines Messlogs der Rezeptur K04 (VT1) in die Daten 11 einzelner Festlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte
Anlage 31	7 Blatt	Festlinge der Rezepturen K1, K04 (VT5) und K06 Übersicht der Kraft-Verformungs-Linien, Kornhöhen und Bruchkräfte
Anlage 32	3 Blatt	Rohdichtebestimmung durch Unterwasserwägung
Anlage 33	4 Blatt	Erscheinungsbild der Agglomerate; Proben vor Frost-Tau-Prüfung



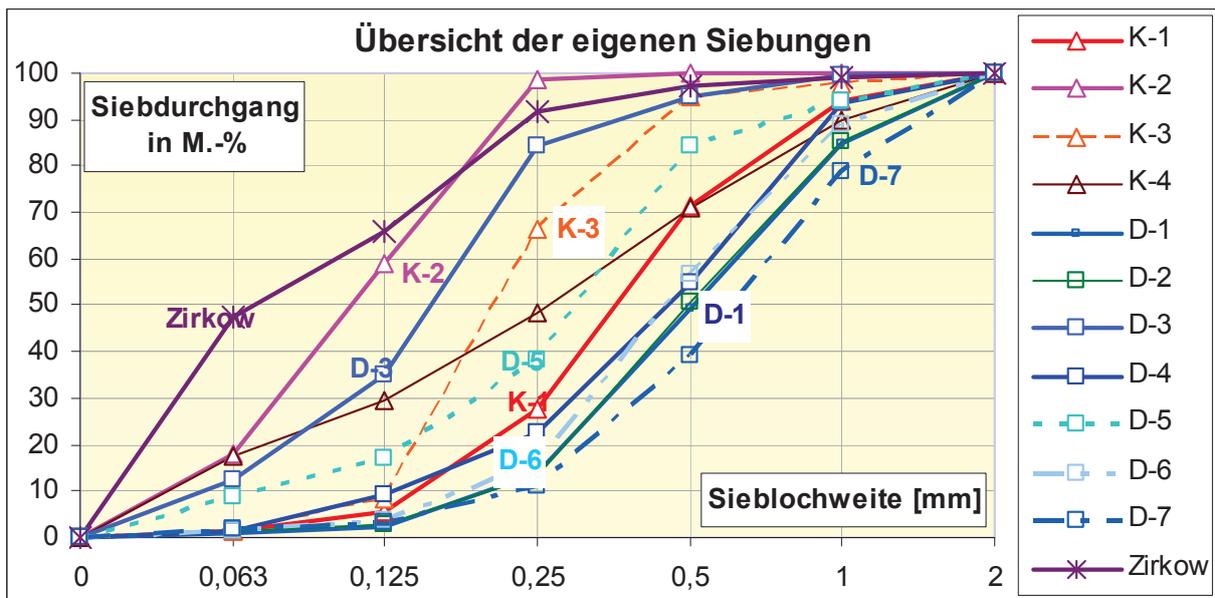
Anlage 34	3 Blatt	Bilder der Agglomerate nach Frost-Tau-Prüfung
Anlage 35	1 Blatt	AKR-Schnellprüfverfahren an Festlingen
Anlage 36	6 Blatt	Betonprojektierung und Mischanweisung
Anlage 37	6 Blatt	Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen
Anlage 38	6 Blatt	Betonproben nach Frost-Tau-Prüfung in Wasser
Anlage 39	5 Blatt	Ergebnisse und Bilder der Proben nach FT-Prüfung in Tausalzlösung
Anlage 40	2 Blatt	Schwindverläufe Agglomeratbeton-Proben im Alter von 180 Tagen
Anlage 41	3 Blatt	Bestimmung des E-Moduls an Agglomeratbeton
Anlage 42	2 Blatt	Mikroskopieaufnahmen an Agglomeratbetonschnitten (vollständige Verwachsung zwischen Agglomeraten und umgebender Betonmatrix)
Anlage 43	3 Blatt	Quervergleich Bruchkraft Frischlinge - Rohdichte Festlinge
Anlage 44	2 Blatt	Quervergleich Bruchkraft Frischlinge - Bruchkraft Festlinge



Anlage 1

Zu Absatz 4.1.1: Korngrößenverteilungen der Sande der Voruntersuchungen gemäß eigener Messungen als Tabelle und Diagramm

Angaben in M.-%	Sieblochweite [mm]							Erläuterung
	Bezeichnung	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	
K-1	0	1,4	5,5	27	71	94	100	Vorabsiebung
K-2	0	17,8	59,0	98	100	100	100	Pappsand
K-3	0	1,2	8,1	67	95	98	100	Betonsand 0/1
K-4	0	17,4	29,5	48	71	90	100	bindiger Sand
D-1	0	0,9	2,3	14	49	85	100	Probe Da1, F1 0/4
D-2	0	1,2	2,6	14	51	85	100	Probe Da2, F1 0/4
D-3	0	12,5	35,0	84	95	100	100	Probe Da3
D-4	0	1,4	9,3	23	55	93	100	Probe Da4
D-5	0	8,7	17,0	38	85	94	100	Probe Da5, nass gesiebt
D-6	0	1,4	3,7	16	57	89	100	Probe Da6
D-7	0	1,9	3,3	11	39	79	100	Probe Da7, Fi
Zirkow	0	47,3	66,0	92	97	99	100	Zirkow-Rügen, Verfüllung





Anlage 2, Blatt 1

Zu Absatz 4.1.1: Übersicht über Korngrößenverteilungen der Sande der Region
[Eigene Darstellung nach Daten des LBV-SH und eigenen Messungen]

Übersicht der Korngrößenverteilungen natürlich vorkommender Sand in Norddeutschland

Ifd. Nr. in Liste	Sieblochweite [mm]						Siebdurchgang in M-%		
	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	Bezeichnung	Verwendung Korngröße
9-1		1,6	6,3	29	67	92	100	Gemisch	FSS 0/5
9-2		1,7	7,4	34	71	93	100	Gemisch	FSS 0/5
9-3		1,8	9,1	35	63	85	100	Gemisch	FSS 0/4
9-4		2,2	10,0	31	61	87	100	Gemisch	FSS 0/4
9-5		0,9	3,2	15	55	86	100	Gemisch	FSS 0/4
9-6		2,8	13,1	52	87	98	100	Gemisch	FSS 0/4
16		4,9		37	69	90	100	Sand	FSM 0/4
23-1		2,4	4,1	20	60	89	100	Sand SE	FSS u.L.
38-1		2,2	5,1	22	62	90	100	Sand SE	FSS u.L.
38-2		1,6	5,0	50	64	94	100		FSS u.L. 0/2
38-3		3,5	12,0	43	73	95	100		0
38-4		1,2	8,0	29	79	96	100		0
38-6		1,6	4,0	16	62	93	100	Sand	0/2
46		2,2	4,2	18	61	89	100		FSS u.L. 0/4
52		3,5	7,1	19	55	85	100	Sand SE	FSS u.L.
60-2		1,1	4,0	28	79	99	100	Sand SE	
60-3		0,1	1,0	6	43	92	100		Sand 0/2
60-5		0,5	2,0	17	70	97	100		FSS u.L. 0/1
60-8		2,2	5,2	24	63	90	100	Sand und Kies	0/2
61		2,1	3,3	14	46	82	100		FSS u.L. 0/2
64			6,1	16	53	85	100	Sand SE	FSS u.L.
79-1		1,6	4,3	34	71	91	100	Sand SE	FSS u.L.
101		0,7		12	43	77	100	Sand	FSM 0/4, R3
102		2,0		22	59	89	100	Sand	FSM 0/4, R3
111-1		2,1	4,3	20	64	90	100	Sand SE	FSS u.L.
112		1,8	3,1	15	56	88	100	Sand SE	FSS u.L.
122		3,7	7,1	24	65	90	100	Sand SE	FSS u.L.
128		5,2	10,8	33	70	91	100	Sand SE	FSS u.L.
130		3,5	5,3	20	55	85	100	Sand	0/2
132		1,5	7,2	26	68	92	100	Sand	0/2
140		7,4	11,4	23	37	54	100	Körnung für Aspaltmischgut	Gemisch 0/5
150		1,5		12	37	73	100		FSS 0/4



Anlage 2, Blatt 2

Zu Absatz 4.1.1: Übersicht über Korngrößenverteilungen der Sande der Region

lfd. Nr. in Liste	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	Bezeichnung	Verwendung Korngröße
154-1		3,2		33	77	95	100	Sand 0/4	FSS 0/4
154-2		2,3	6,3	25	72	93	100	Sand 0/4	FSS 0/4
154-3		1,8	6,3	29	74	94	100	Sand 0/4	FSS 0/4
154-4		1,7	6,3	33	75	94	100	Sand 0/4	FSS 0/4
154-5		1,4	3,1	21	69	94	100	Sand 0/4	FSS 0/4
157-1		0,9	2,1	13	53	85	100	Natursand 0/2	
157-2		4,3	11,0	33	69	93	100	grobkörniger Boden	
157-4		1,1	4,0	33	78	97		Natursand 0/2	
157-5		4,8	11,0	35	71	91	100	Sand SE	FSS 0/2
158		3,6	7,4	29	65	89	100		FSS u.L.
159		3,3		28	60	85	100		FSS 0/4
163		3,0	7,6	26	61	86	100	Sand SE	FSS u.L.
164		2,0	5,2	20	62	89	100		FSS u.L. 0/2
167		2,5	7,4	28	65	88	100	Sand SE	FSS Lage I
168-1		4,3		56	87	97	100	Sand	FSS 0/4
179-1		3,5		37	69	91	100	Sand	FSS 0/4
190		0,5	2,1	22	65	87	100	Sand 0/2	
191-1		3,7		67	96	99	100	Sand	
191-2		1,5		51	91	99	100	Sand	
191-3		3,1		53	91	99	100	Sand	
191-4		4,7		72	96	100		Sand	
191-5		0,3		10	53	90	100	Sand	
191-6		2,0		36	81	97	100	Sand	
191-7		2,4		11	62	93	100	Sand	
191-8		0,5			11	66	100	Sand	
191-11		2,0			68	93	100	Natursand 0/2	
191-12		2,4			87	94	100	Natursand 0/2	
191-13		1,7			88	95	100	Natursand 0/2	
191-14		1,4			87	97	100	Natursand 0/2	
191-15		1,7			93	96	100	Natursand 0/2	
191-16		2,7			93	99	100	Natursand 0/2	
Ü-1		2,7	10,0	38	76	96	100		FSS u.L. 0/2
Ü-2		2,0	4,1	22	63	90	100		FSS u.L. 0/2
Ü-3		2,2	4,0	14	51	86	100	Gemisch	
Ü-4		4,5	10,5	29	67	91	100	FSS u.L.	0/2
Ü-5		1,4	3,1	14	51	86	100	Gemisch	
Ü-6		0,4	7,8	48	91	99	100		Mauersand 0/2



Anlage 2, Blatt 3

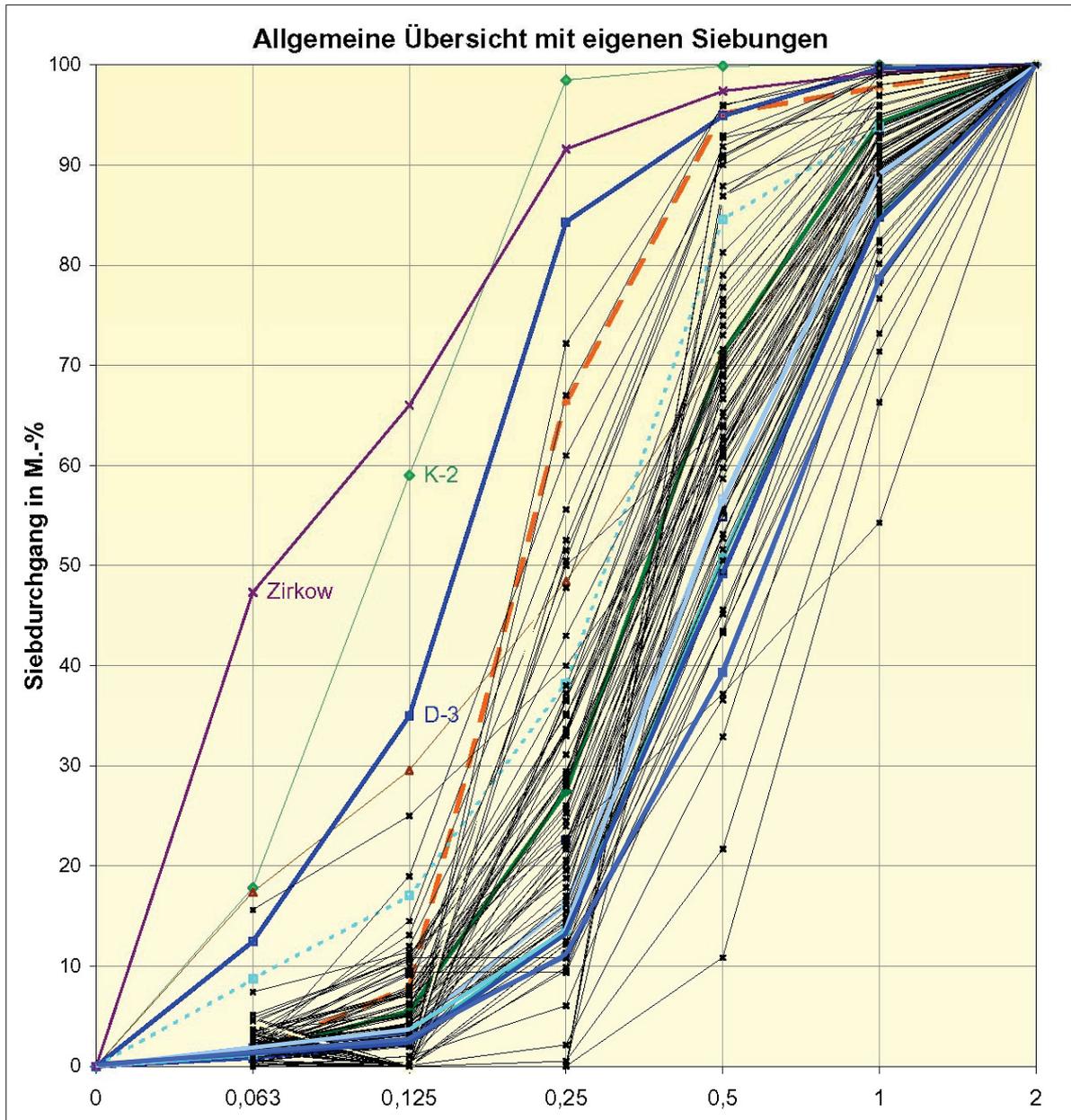
Zu Absatz 4.1.1: Übersicht über Korngrößenverteilungen der Sande der Region

lfd. Nr. in Liste	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	Bezeichnung	Verwendung Korngröße
Ü-7		1,7	14,5	56	92	99	100	Grubensand	
Ü-8			1,0	15	52	85	100	Sand	0/2
Ü-9			0,1	2	33	81	100	Sand	0/2
Ü-10				1	22	71	100	Sand	0/2
Ü-11		0,1	0,4	10	49	87	100	Sand	0/2
Ü-12a		1,8	10,8	11	45	80	100		FSS 0/4
Ü-13		3,3	9,4	9	43	78	100	F1-Sand	FSS u.L. 0/4
Ü-14		0,9	19,0	61	90	98	100	gewaschener Sand	0/1
Ü-15		15,6	25,0	40	61	83	100	bindiger Sand 0/5	
K-1	0	1,4	5,5	27	71	94	100	Vorabsiebung	
K-2	0	17,8	59,0	98	100	100	100	Pappsand	
K-3	0	1,2	8,1	67	95	98	100		Betonsand 0/1
K-4	0	17,4	29,5	48	71	90	100	bindiger Sand	
D-1	0	0,9	2,3	14	49	85	100	Probe Da1	F1 0/4
D-2	0	1,2	2,6	14	51	85	100	Probe Da2	F1 0/4
D-3	0	12,5	35,0	84	95	100	100	Probe Da3	
D-4	0	1,4	9,3	23	55	93	100	Probe Da4	
D-5	0	8,7	17,0	38	85	94	100	Probe Da5	nass gesiebt
D-6	0	1,4	3,7	16	57	89	100	Probe Da6	
D-7	0	1,9	3,3	11	39	79	100	Probe Da7, Fi	
Zirkow	0	47,3	66,0	92	97	99	100	Zirkow-Rügen Pr.8	



Anlage 2, Blatt 4

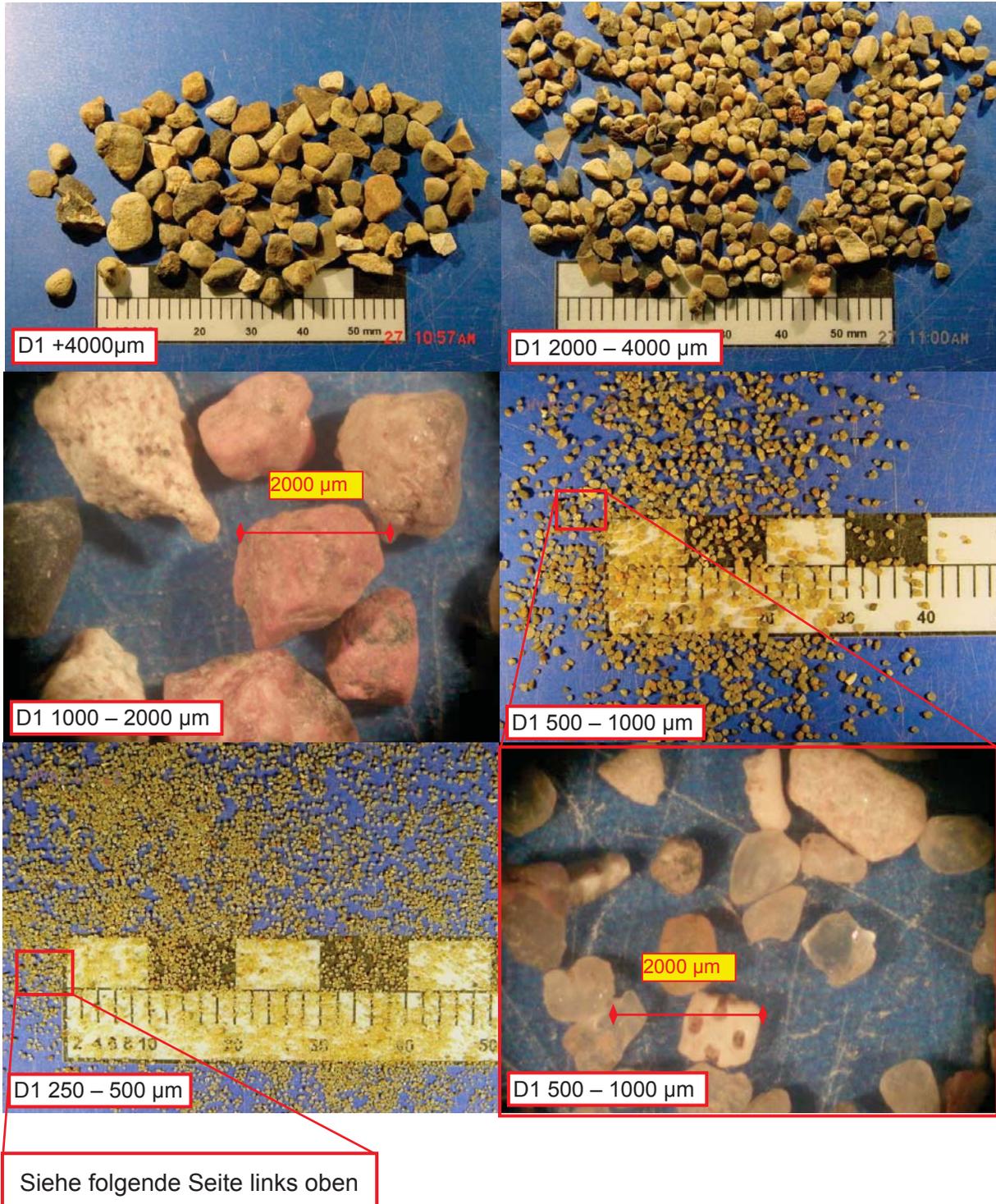
Zu Absatz 4.1.1: Übersicht über Korngrößenverteilungen der Sande der Region





Anlage 3, Blatt 1

Zu Absatz 4.1.2: Detailaufnahmen von Sand D1



Anlage 3, Blatt 2

Zu Absatz 4.1.2: Detailaufnahmen von Sand D1





Anlage 3, Blatt 3

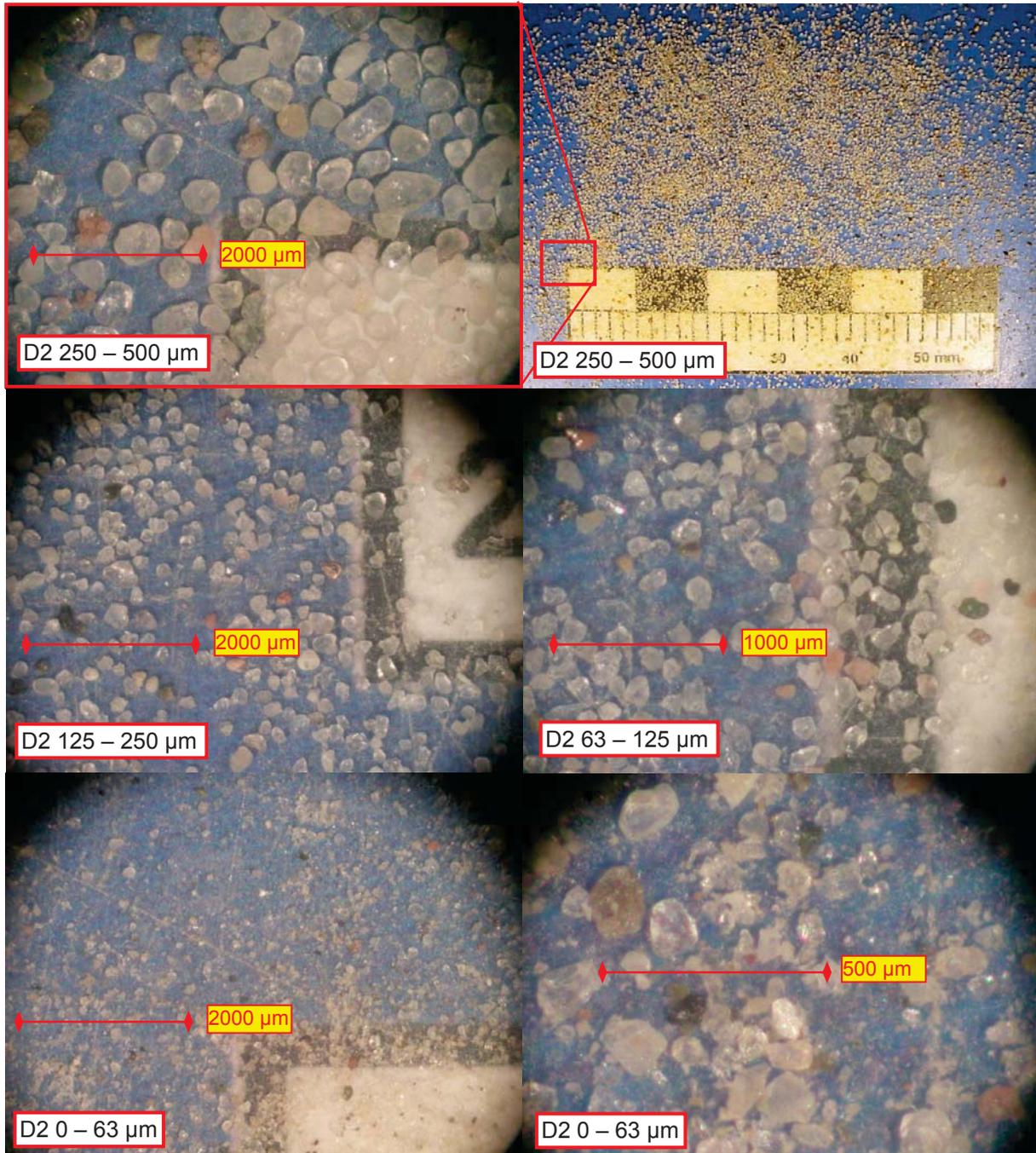
Zu Absatz 4.1.2: Detailaufnahmen von Sand D2





Anlage 3, Blatt 4

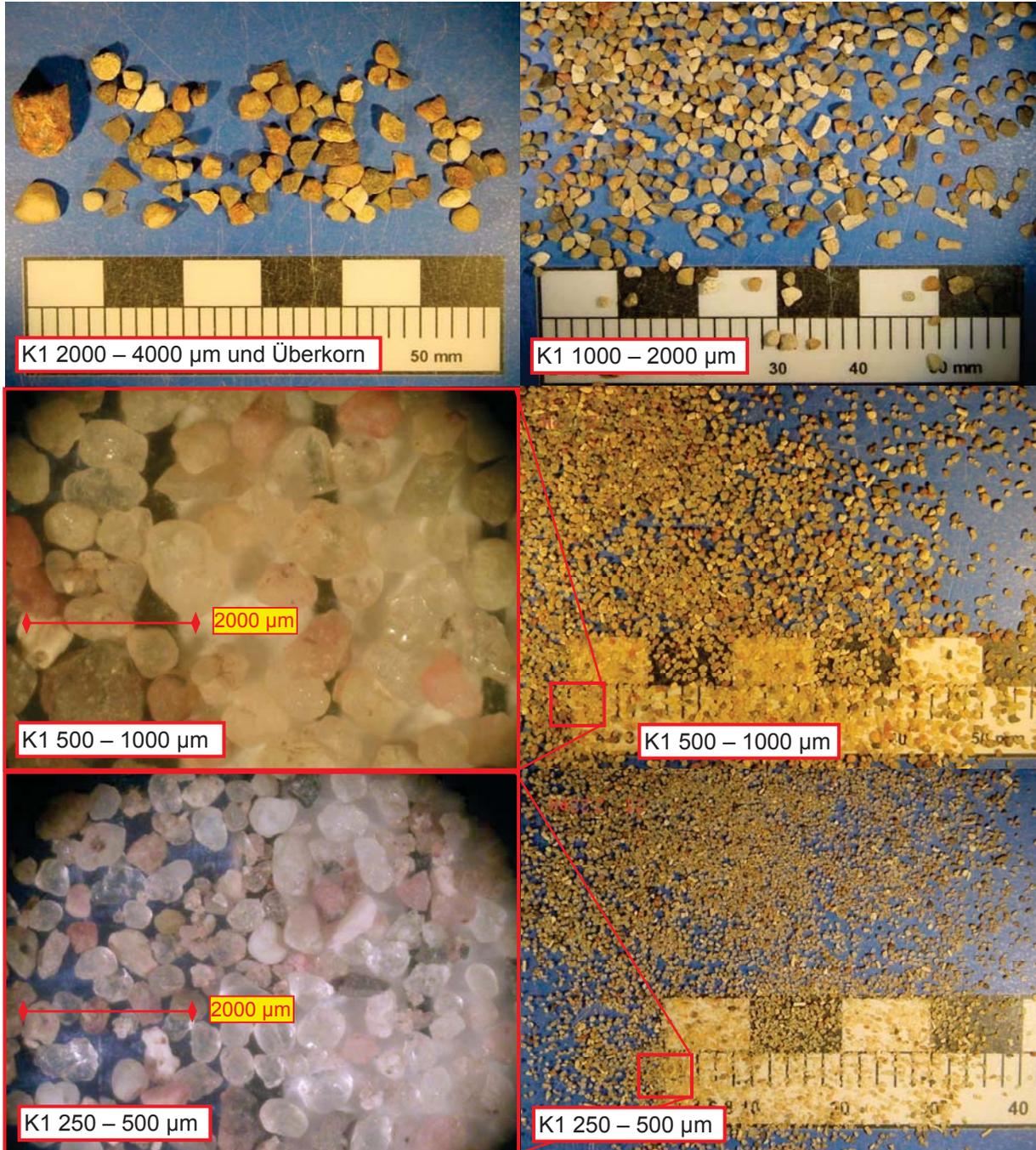
Zu Absatz 4.1.2: Detailaufnahmen von Sand D2





Anlage 3, Blatt 5

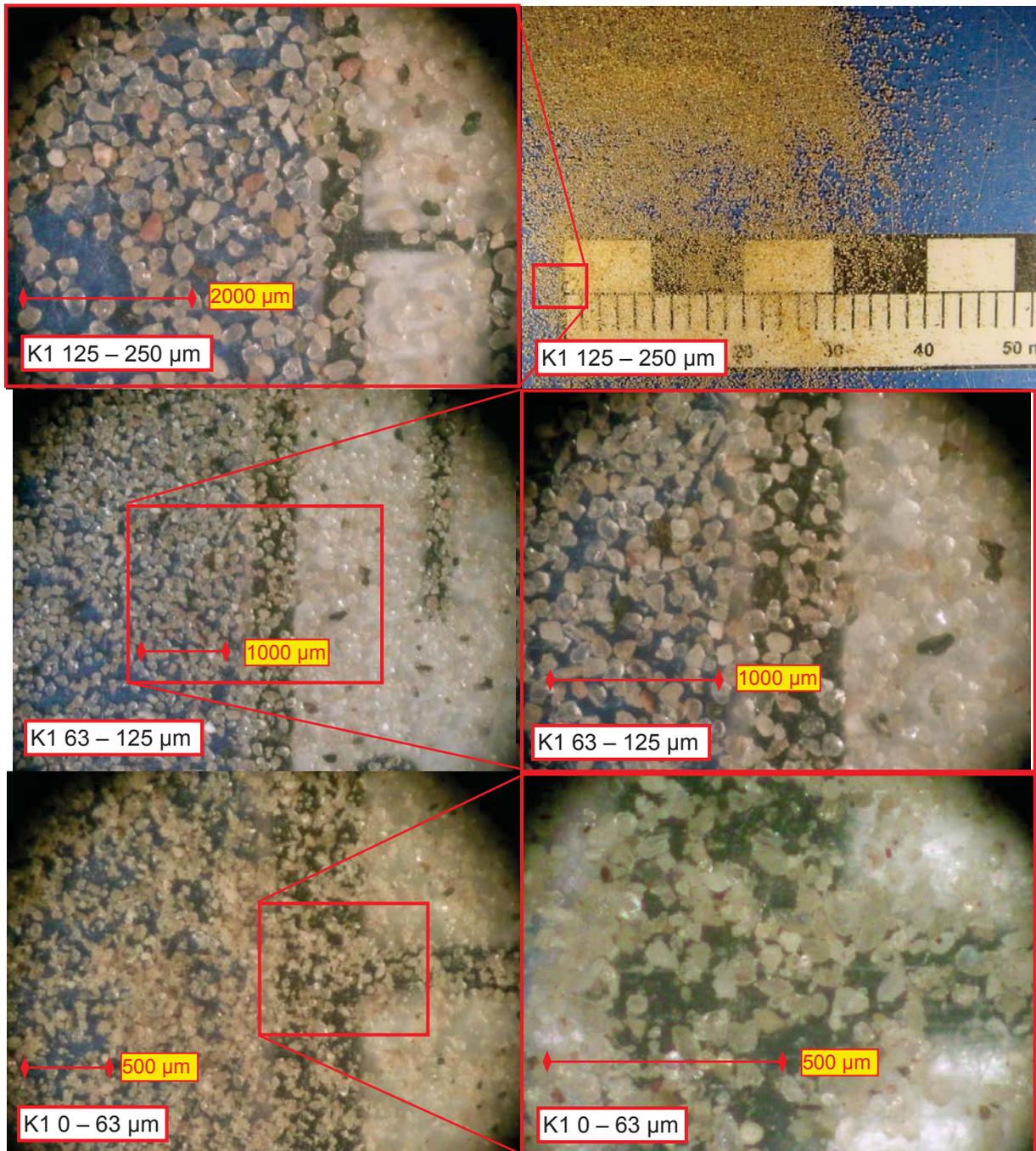
Zu Absatz 4.1.2: Detailaufnahmen von Sand K1





Anlage 3, Blatt 6

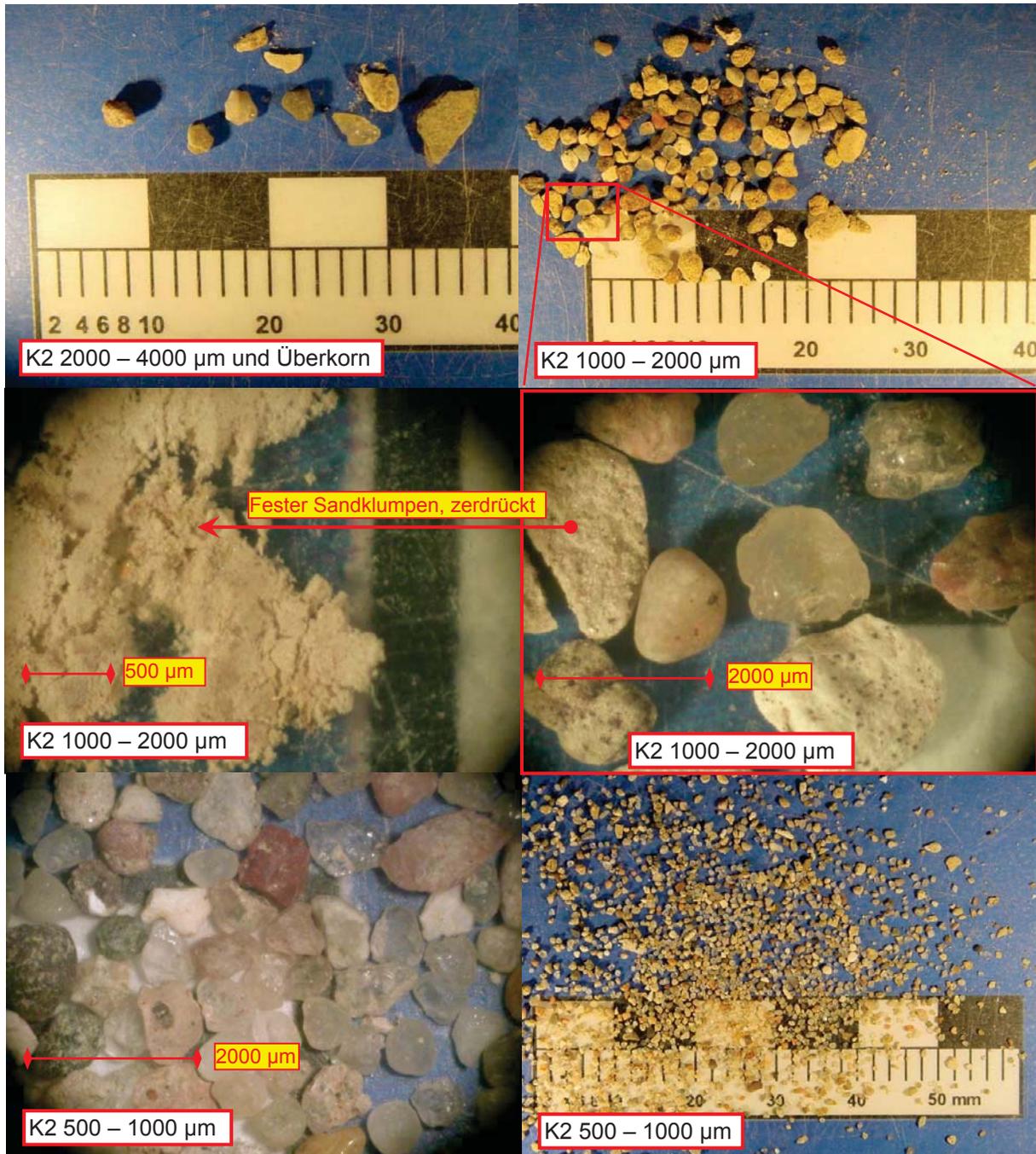
Zu Absatz 4.1.2: Detailaufnahmen von Sand K1





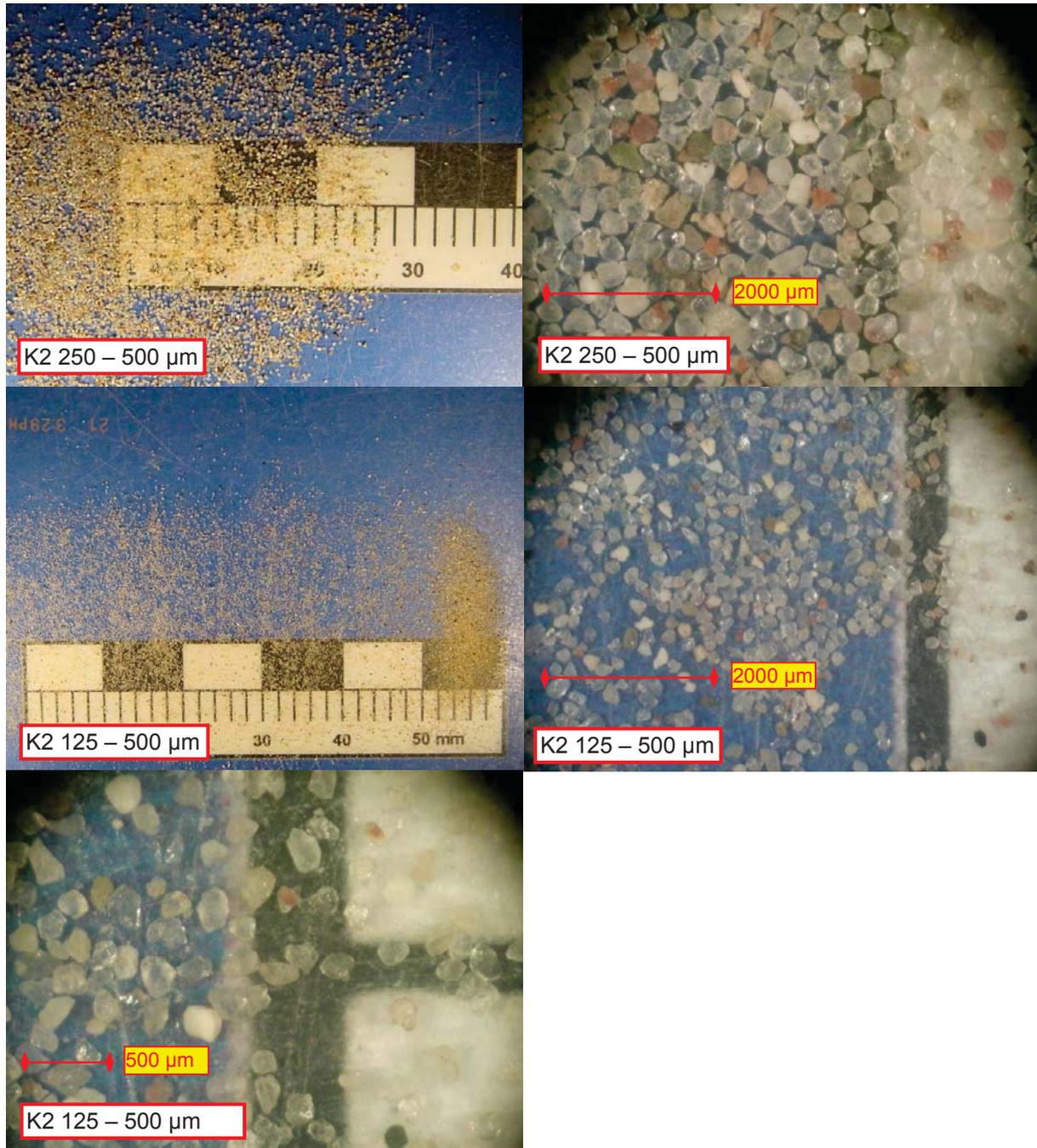
Anlage 3, Blatt 7

Zu Absatz 4.1.2: Detailaufnahmen von Sand K2



Anlage 3, Blatt 8

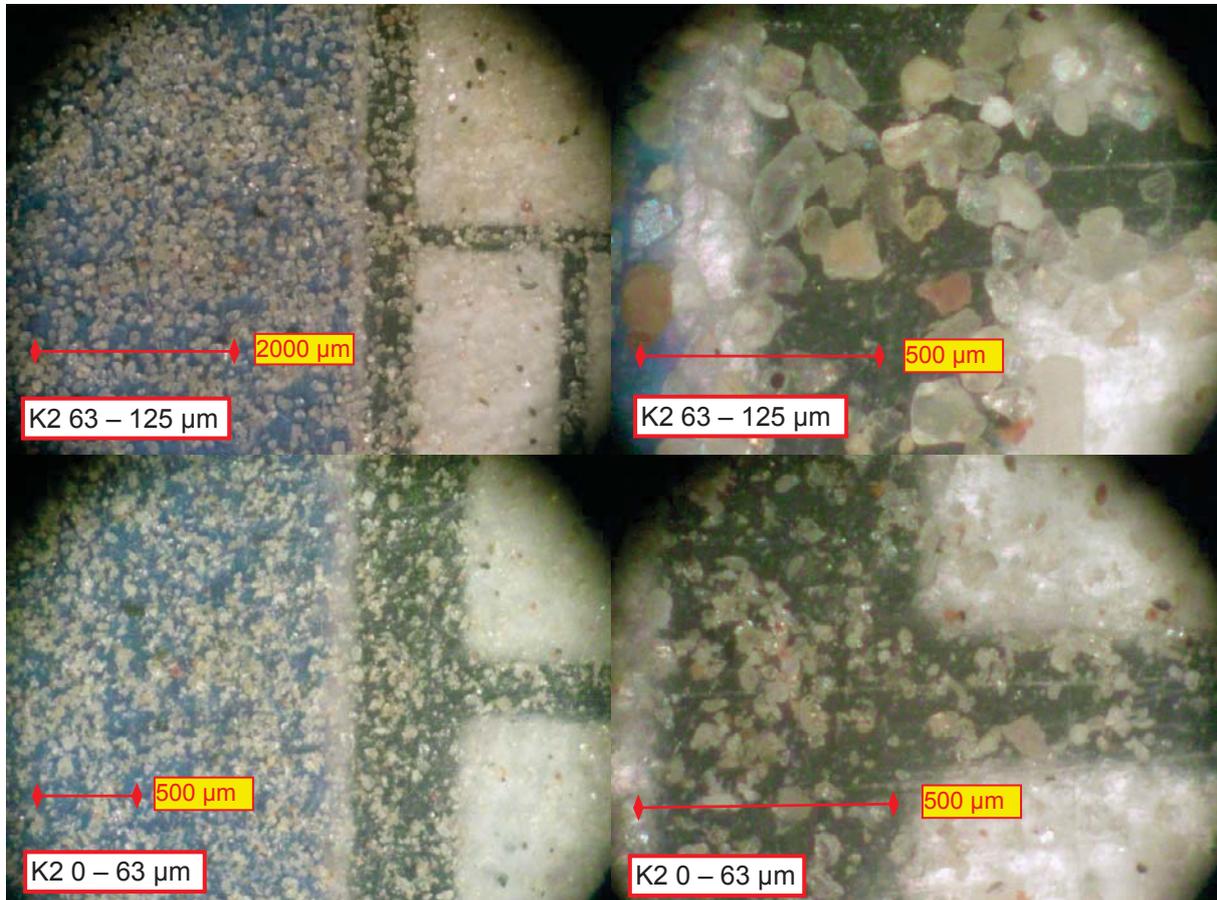
Zu Absatz 4.1.2: Detailaufnahmen von Sand K2





Anlage 3, Blatt 9

Zu Absatz 4.1.2: Detailaufnahmen von Sand K2





Anlage 4, Blatt 1

Zu Absatz 4.1.2: Auszug aus Petrographischem Bericht zu den Sanden D1, D2, K1, K2;
 [Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie der TUHH (2009)]

Petrographie der Sande „D1, D2, K1 und K2“

Von allen vier Sanden wurde ein Dünnschliff erstellt und unter einem Polarisationsmikroskop (Leica DM 2500P) nach AKR anfälligen Mineralen untersucht. Ein besonderes Augenmerk wurde auf kryptokristallinen sowie gestressten Quarz, Schwammnadeln und Cristobalit/Tridymit gelegt. Die Mengenanteile der enthaltenen Minerale wurden abgeschätzt.

Sand „D1“

Mineralgehalt:

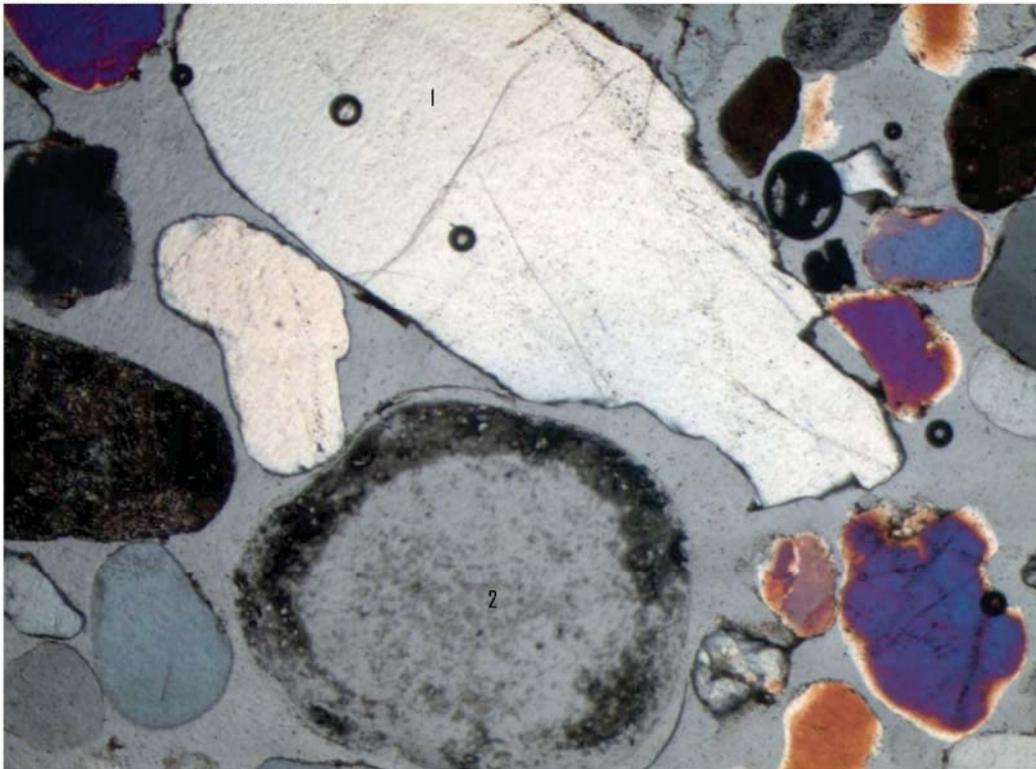
Quarz 75%
 Plagioklas 10%
 Mikroklin 5%
 Glimmer 5%
 Opake Minerale 5%

Petrographie

Die Quarzkörner sind mittel bis gut gerundet und zeigen oft eine undulöse Auslöschung. 30% der Quarzkörner sind stark gestresst und zeigen z.T. Mikrokristallbildung. Kryptokristalliner Quarz ist selten (< 2%).

Der Plagioklas zeigt deutliche polysynthetische Zwillinge. Die Feldspäte allgemein sind selten, schwach alteriert.

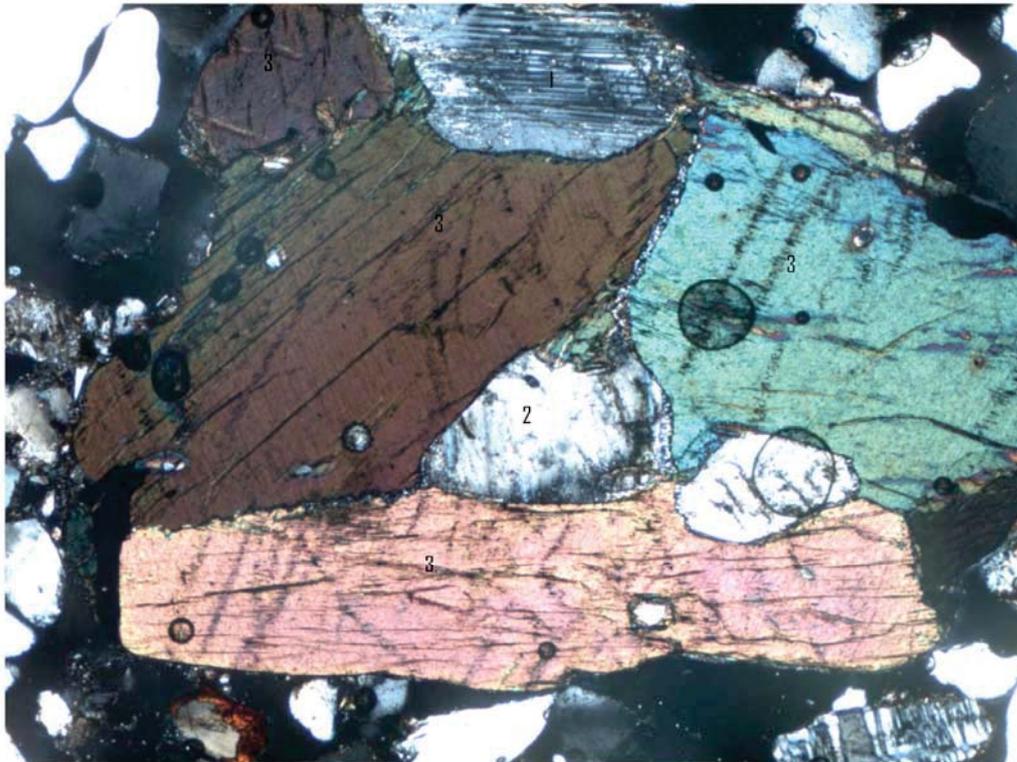
Die Glimmer, meist Biotit, bilden meist große Kristalle aus. Des Weiteren sind sie häufig mit anderen Kristallen verwachsen.



*Quarz, ungestresst, oben (1), Feldspat, randlich alteriert, unten (2)
 gekreuzte Polarisatoren, 40x Vergrößerung, BB 2 mm*



Anlage 4, Blatt 2



*Plagioklas (1), alteriert, Quarz (2) umwachsen von Glimmer (3, Biotit)
gekreuzte Polarisatoren, 40x Vergrößerung, BB 2 mm*



*Kryptokristalliner Quarz (1, oben) mit rötlichen Reaktionsrand(?), Pfeil
gekreuzte Polarisatoren, 40x Vergrößerung, BB 2 mm*

Anlage 4, Blatt 3**Sand „D2“****Mineralgehalt:**

Quarz 80%

Sandstein 10%

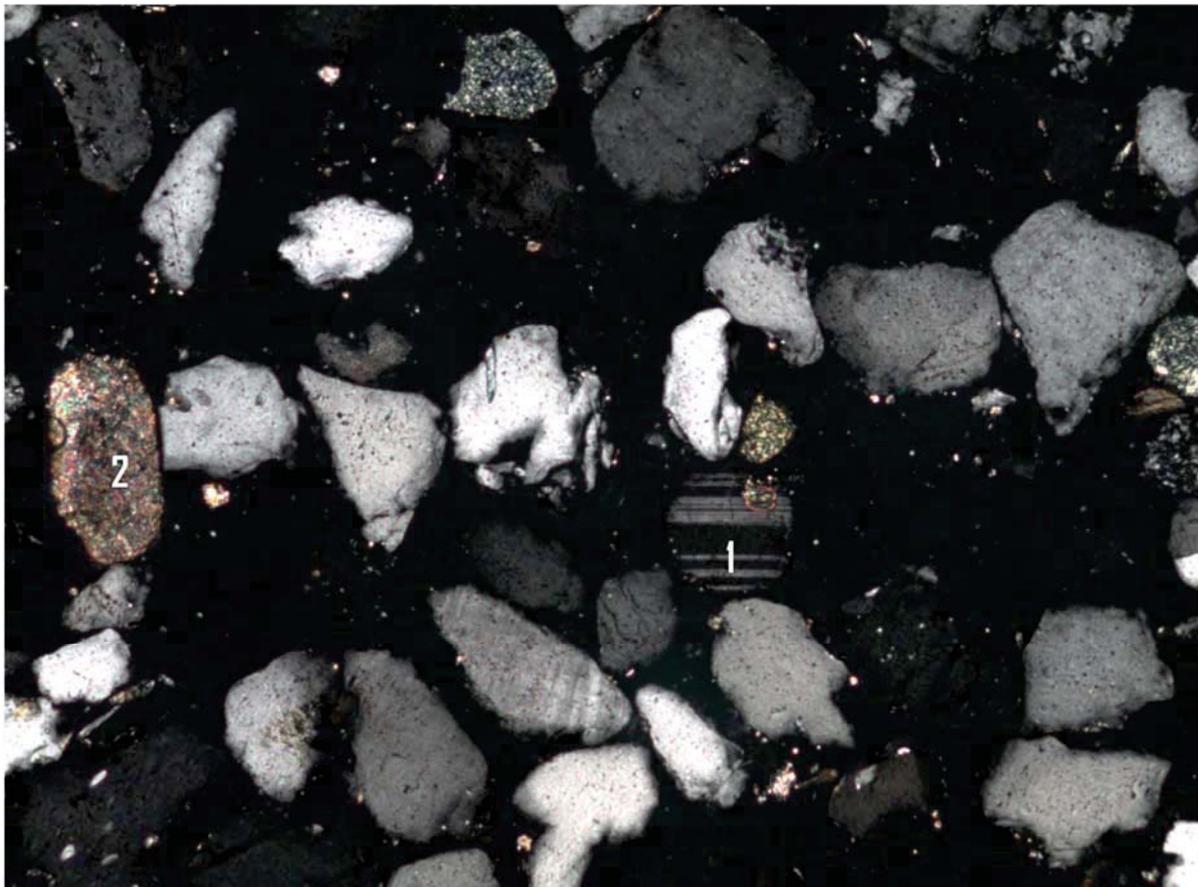
Plagioklas < 2%

Glimmer < 5%

Chlorit < 2%

Petrographie

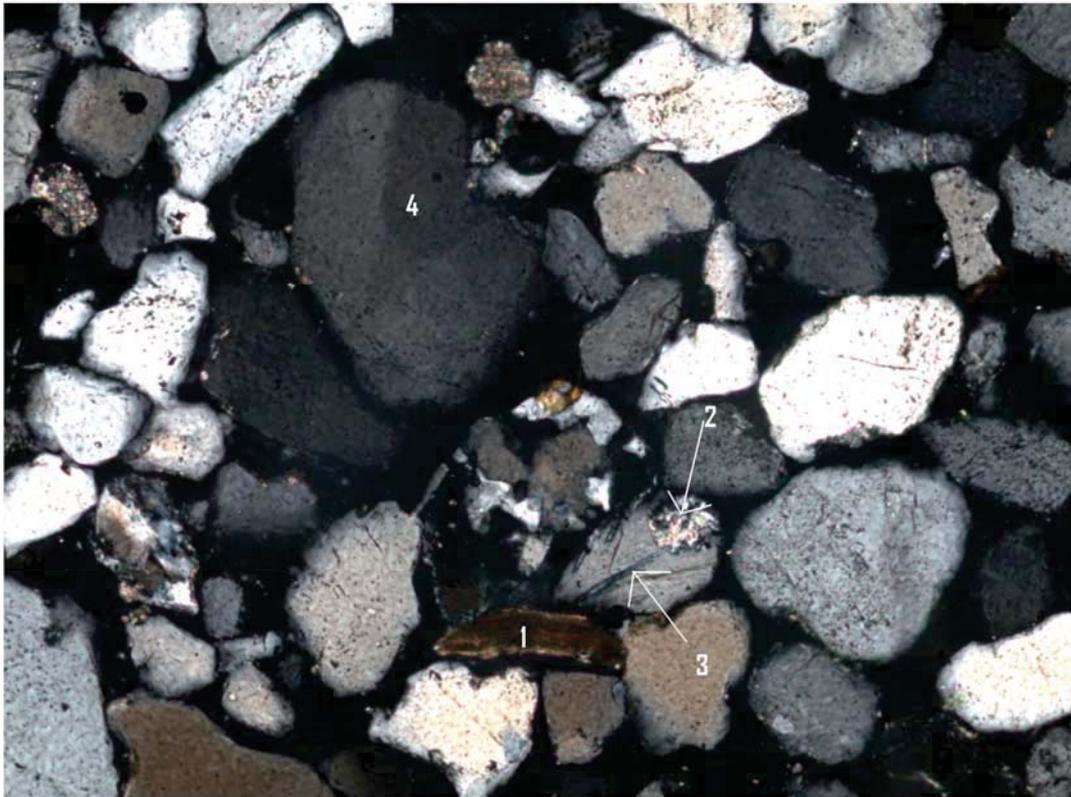
Der Quarz löscht häufig undulös aus, ist gut gerundet, wenig gestresst und zeigt einmalig eine Verwachsung mit Glimmern und Sandsteinen. Die Glimmer sind hauptsächlich Biotit und nur selten Muscovit. Sehr selten auch Chlorit. Die Plagioklase zeigen polysynthetische Zwillingslamellen.



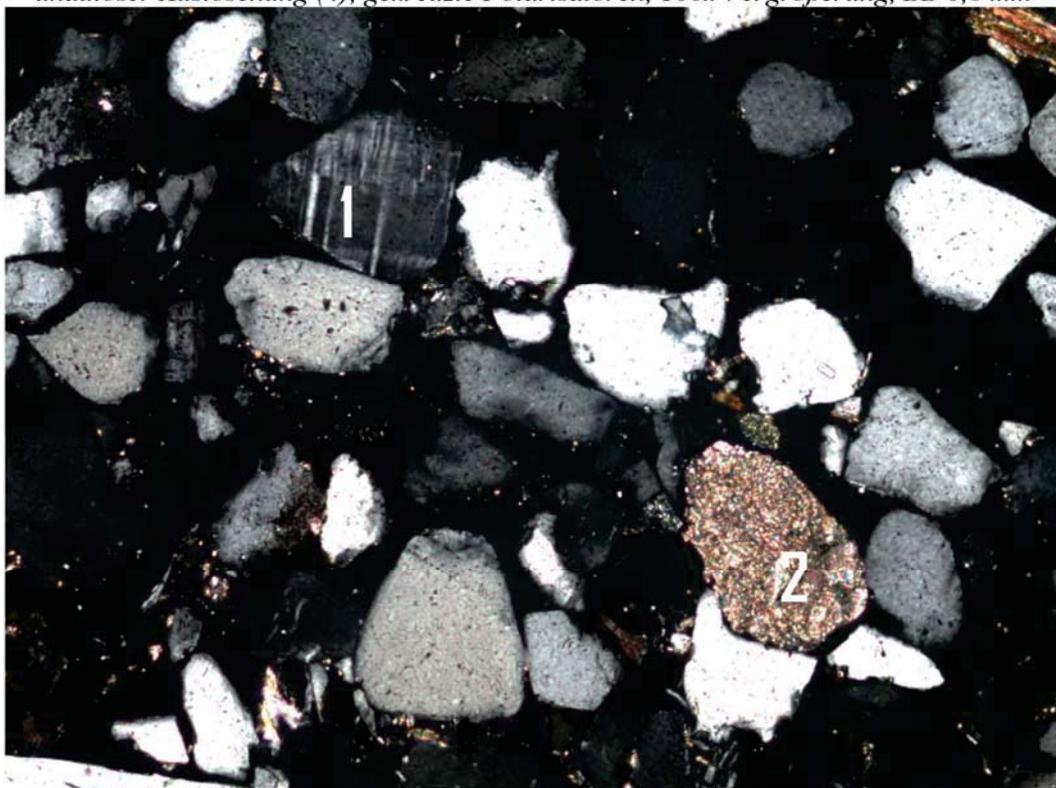
Plagioklas (1) mit polysynthetischer Verzwilligung. Sandsteinkorn (2), gekreuzte Polarisatoren, 100x Vergrößerung, BB 0,8 mm



Anlage 4, Blatt 4



Biotit (1), Quarzkorn verwachsen mit Sandstein (2) und Glimmer (3), Quarzkorn mit undulöser Auslöschung (4), gekreuzte Polarisatoren, 100x Vergrößerung, BB 0,8 mm



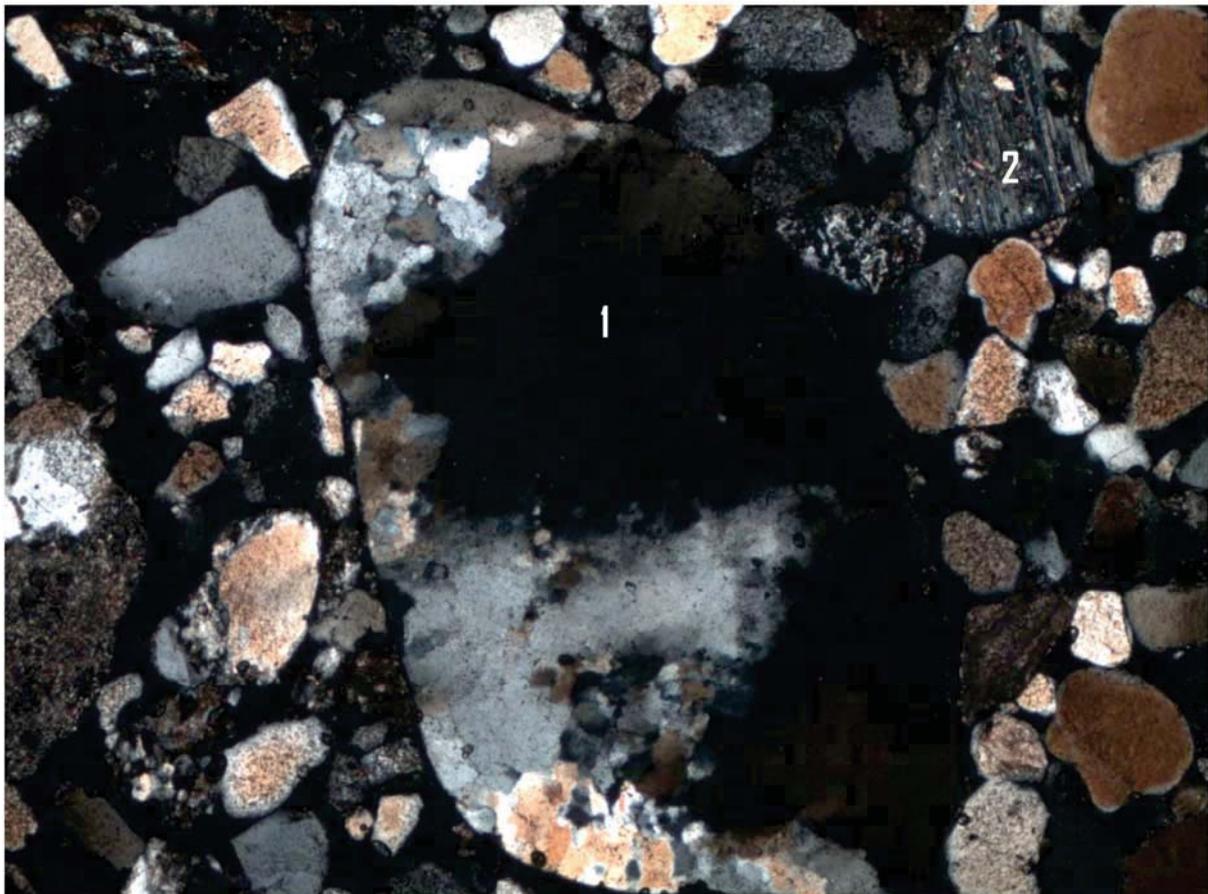
Gestresster Quarz (1) und Sandsteinrest (2), gekreuzte Polarisatoren, 100x Vergrößerung, BB 0,8 mm

Anlage 4, Blatt 5**Sand „K1“****Mineralgehalt:**

Quarz 65%
Sandstein 10%
Plagioklas < 5%
Glimmer < 5%
Mikroclin < 5%
Biogene Reste 10%

Petrographie

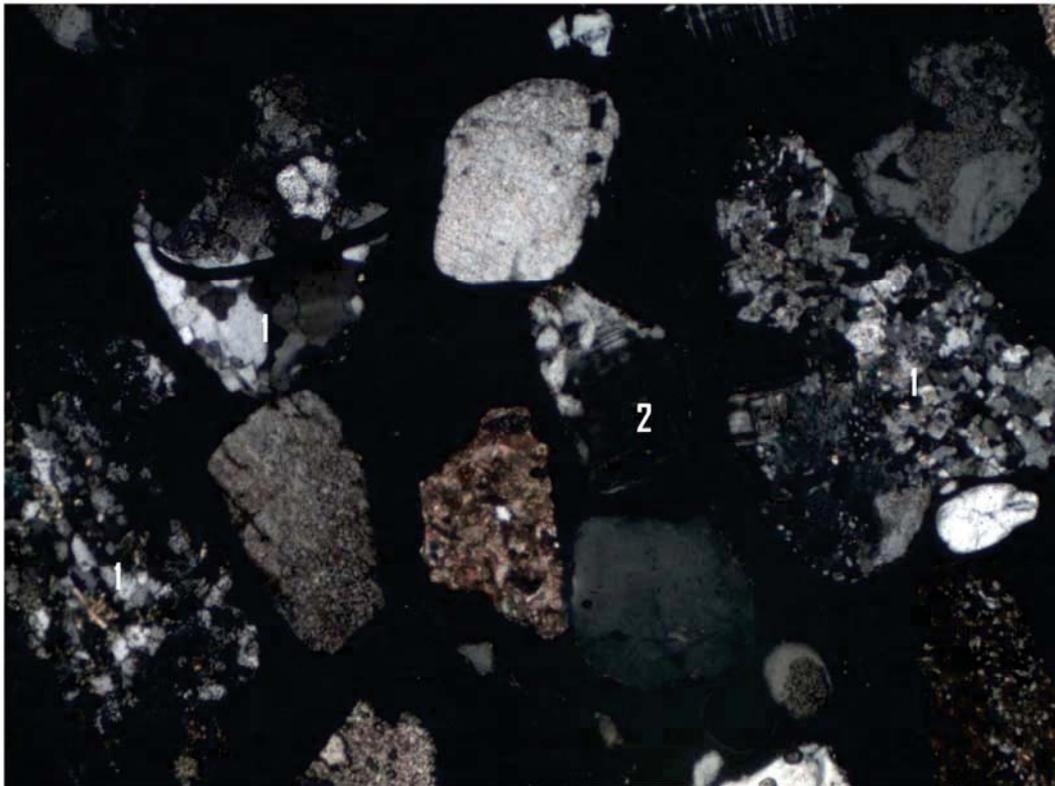
Der Quarz löscht meist undulös aus und weist eine leicht bis mittlere Rundung auf. Des Weiteren zeigt er selten eine interne Verzahnung. Er ist z.T. leicht gestört, zeigt aber nur sehr selten starke Alteration. Die Plagioklase sind nur selten stark gestört und Entmischungen treten nur sporadisch auf.



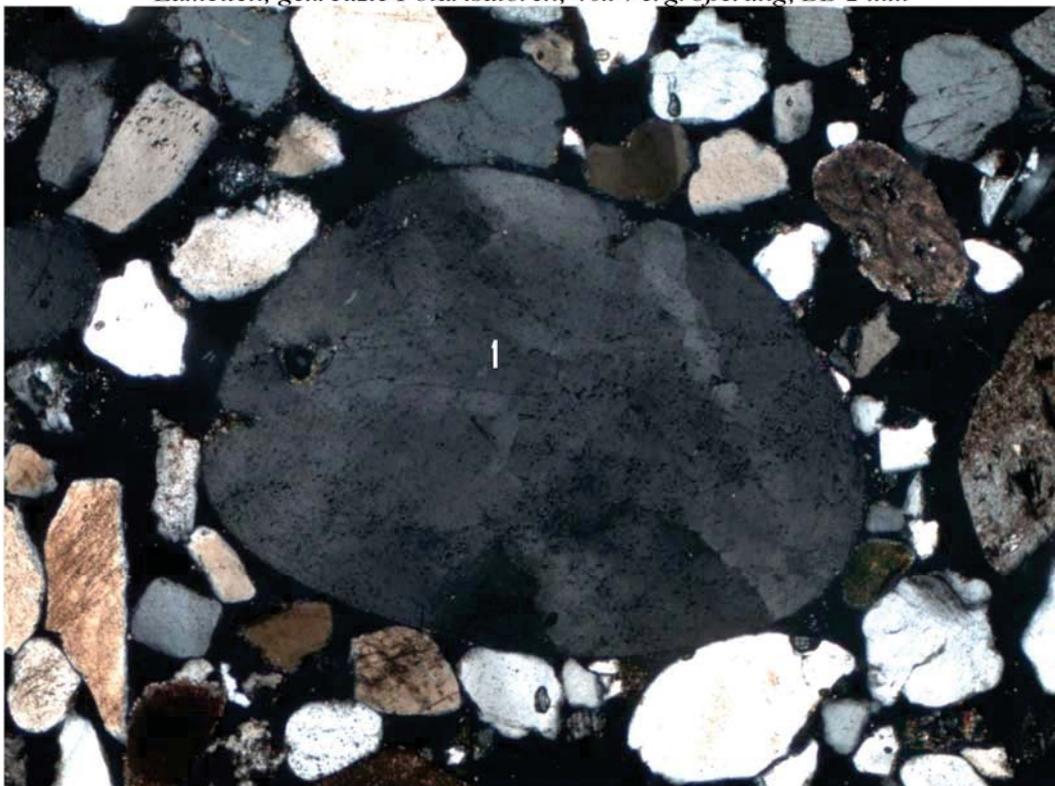
*Quarzkorn mit Mikrokristallbildung und undulöser Auslöschung (1), stark alterierter Plagioklas (2) mit polysynthetischen Zwillingen und Glimmer Verwachsungen.
gekreuzte Polarisatoren, 40x Vergrößerung, BB 2 mm*



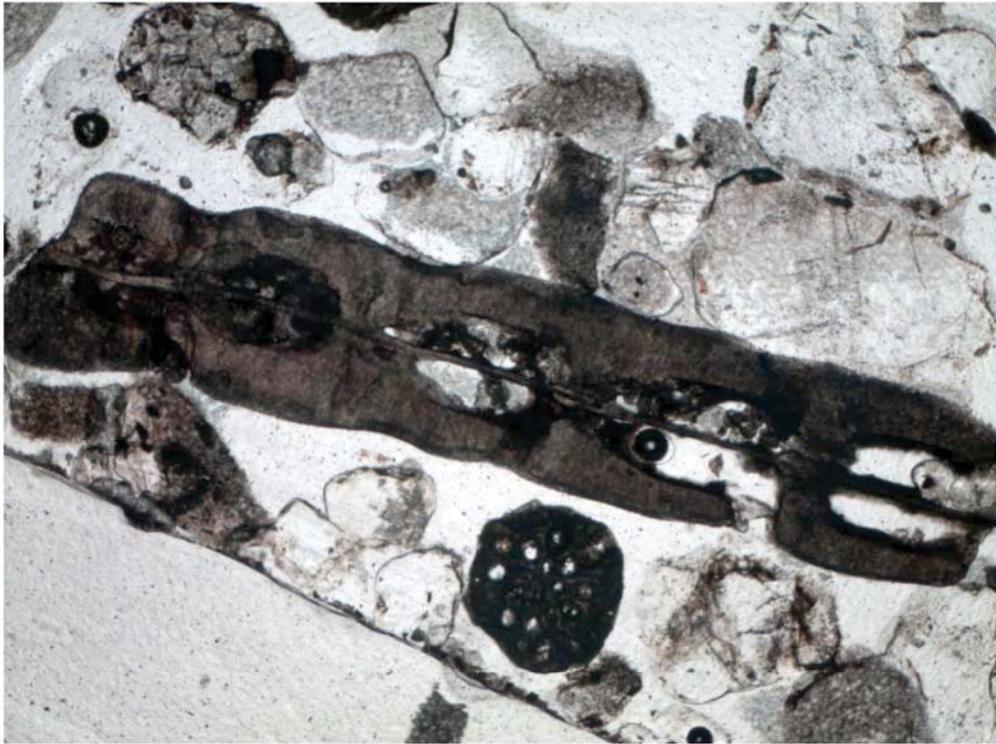
Anlage 4, Blatt 6



Stark gestörter Quarz (1) mit Mikrokristallbildung, Quarzkorn (2) mit Mikroclin-artigen Lamellen, gekreuzte Polarisatoren, 40x Vergrößerung, BB 2 mm



Gut gerundetes Quarzkorn (1) mit undulöser Auslöschung, gekreuzte Polarisatoren, 40x Vergrößerung, BB 2 mm

Anlage 4, Blatt 7

*Biogene Bestandteile, evtl. Pflanzenreste,
linear polarisiertes Licht, 40x Vergrößerung, BB 2 mm*



*Evtl. magmatisches Korn, Quarzkristalle eingebettet,
gekreuzte Polarisatoren(links) linear polarisiertes Licht(rechts), 40x Vergrößerung, BB 2 mm*

Anlage 4, Blatt 8**Sand „K2“****Mineralgehalt:**

Quarz 60%

Sandstein 20%

Plagioklas < 2%

Glimmer (Muscovit) < 5%

Chlorit 5%

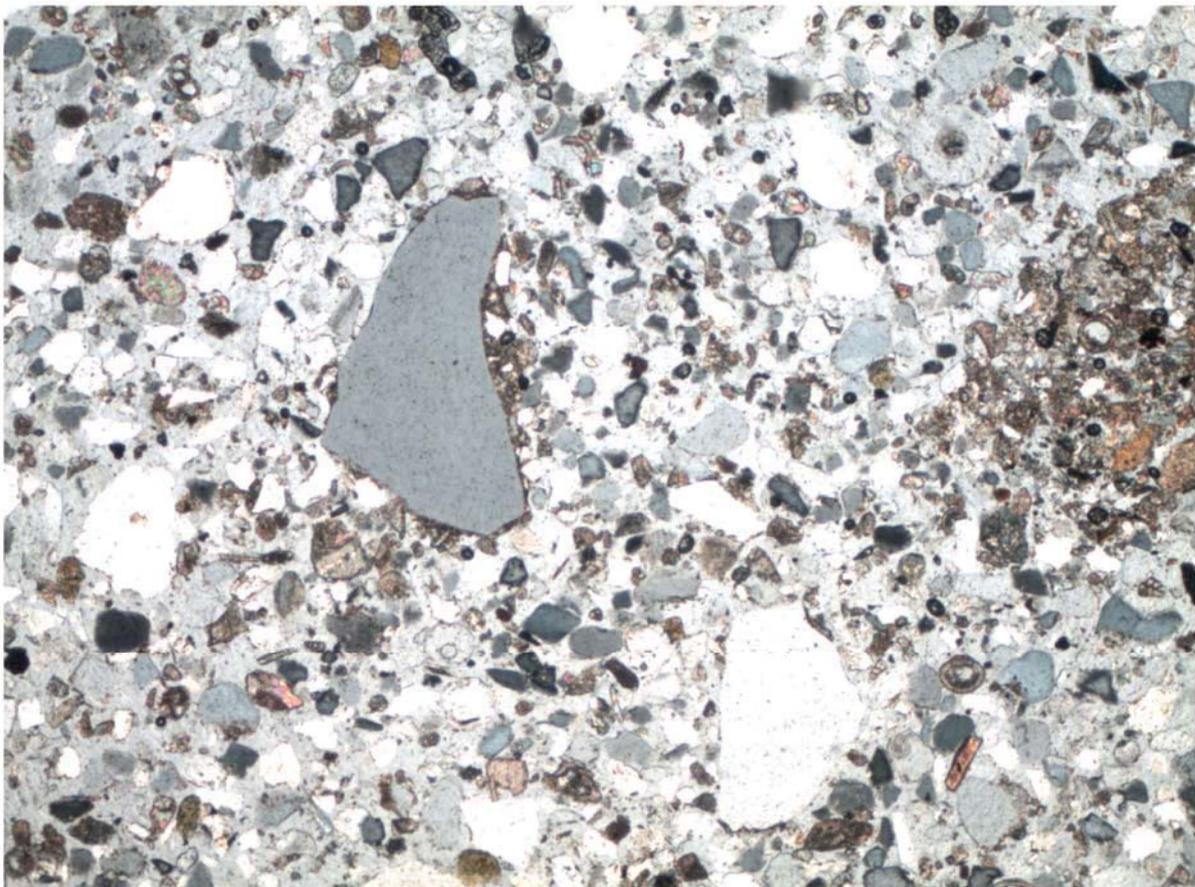
Mikroclin < 5%

Schwammnadeln < 2%

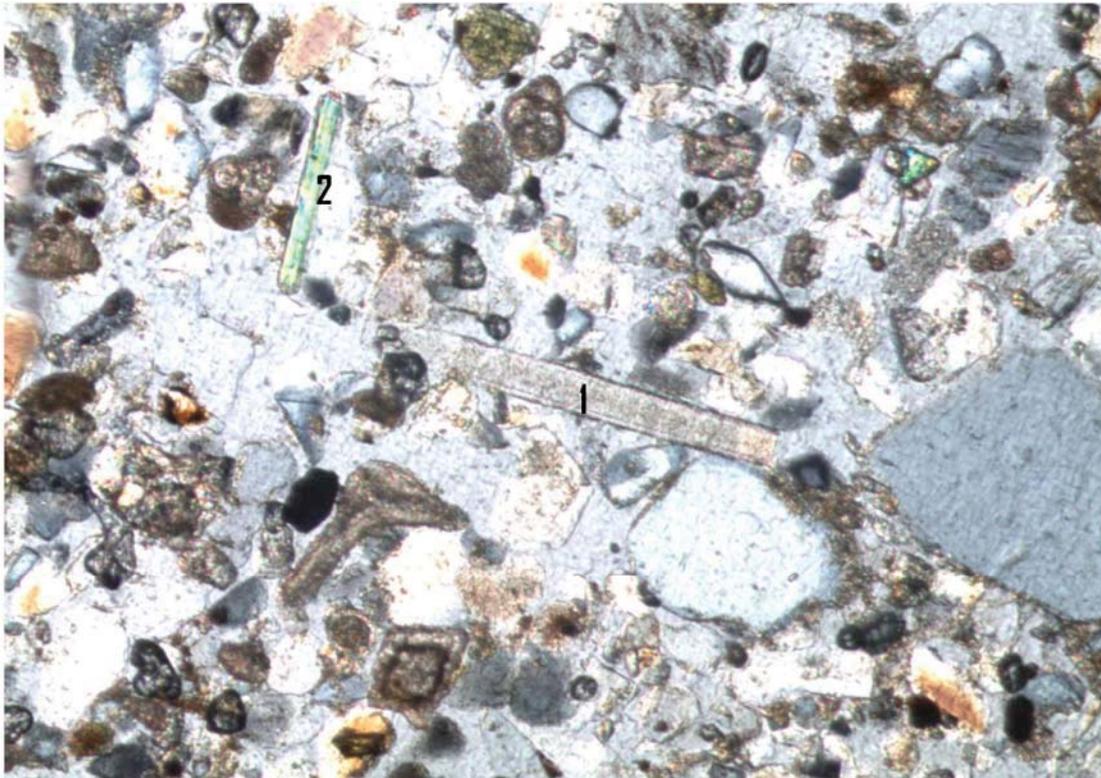
Schalenreste < 5%

Petrographie

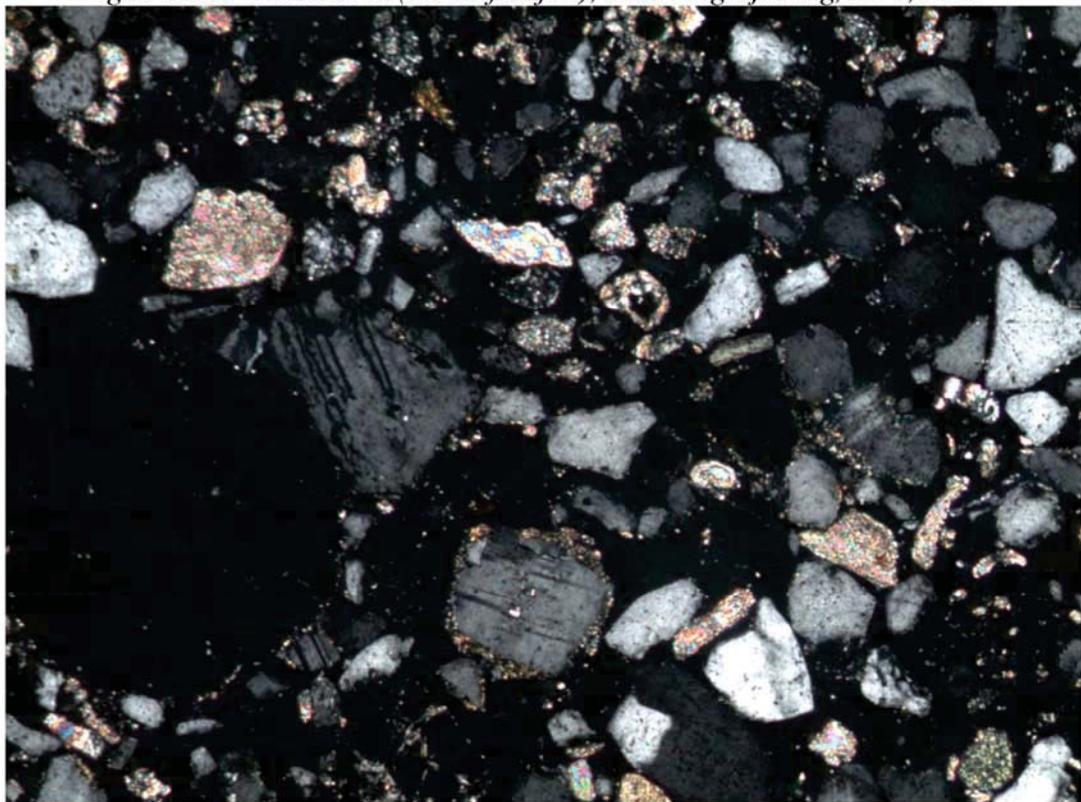
Die Quarzkörner sind leicht bis mittel gerundet und zeigen z.T. undulöse Auslöschung. Fast ausschließlich kleine Körner sind vorhanden. Der Glimmer, meist Muscovit, tritt nur in sehr kleinen nadelförmigen Kristallen auf. Die wenigen vorhandenen Plagioklase sind sehr klein. Sandsteine kommen fast ausschließlich in sehr großen Körnern vor.



*Übersicht,
linear polarisiertes Licht, 40x Vergrößerung, BB 2 mm*

Anlage 4, Blatt 9

*Schwammnadel (1) und nadelförmiger Biotit (2),
gekreuzte Polarisatoren (mit Hilfsobjekt), 100x Vergrößerung, BB 0,8 mm*



*Evtl. entmischter Feldspat,
gekreuzte Polarisatoren, 100x Vergrößerung, BB 0,8 mm*



Anlage 5, Blatt 1

Zu Absatz 4.1.3: Tabelle der durch Siebung ermittelten Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe

Auswertung der eigenen Siebungen der Sande aus Damsdorf, korrigiert auf 2 mm

Bezeichnung	Einwaage [g]										Angaben in M.-%	
	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	Summe [g]	Kennwerte			
	0	63	125	250	500	1000	2000	Abweichung [%]	0	0		
D1, 1	100	99,1	98,1	88,0	47,3	14,8	0	300	k-Wert = 3,47	0,0		
	2,5	2,6	27,7	110,8	88,7	40,2	0,0	272,5	0,0	0,0		
	0	0,92	1,87	12,0	52,7	85,2	100	9,17	D-Summe = 1,53			
D1, 2	100	98,7	98,1	87,7	47,8	14,5	0,00	300	k-Wert = 3,47	0,0		
	3,7	1,7	28,9	110,9	92,9	40,3	0,0	278,4	0,0	0,0		
	0	1,33	1,94	12,3	52,2	85,5	100	7,20	D-Summe = 1,53			
D1, 3, 400g	100	98,6	98,1	88,1	49,0	14,6	0	400	k-Wert = 3,48	0,0		
	5,3	1,9	37,2	145,4	127,9	54,4	0,0	372,1	0,0	0,0		
	0	1,42	1,93	11,9	51,0	85,4	100	6,97	D-Summe = 1,52			
D1	100	98,8	98,1	87,9	48,1	14,6	0	923,0	k-Wert = 3,48	0,0		
	1,2	0,67	10,2	39,8	33,5	14,6	8,3	0,0	0,0	0,0		
	0	1,25	1,92	12,1	51,9	85,4	100	0	D-Summe = 1,52			
D2, 1	100	89,9	65,7	4,1	1,8	0,3	0	300	k-Wert = 1,62	0,0		
	29,9	71,3	181,6	6,9	4,4	0,8	0,0	294,9	0,0	0,0		
	0	10,14	34,32	95,9	98,2	99,7	100	1,70	D-Summe = 3,38			
D2, 2	100	89,7	66,3	3,7	1,6	0,2	0,00	300	k-Wert = 1,61	0,0		
	30,0	67,8	181,3	6,3	3,9	0,6	0,0	289,9	0,0	0,0		
	0	10,35	33,74	96,3	98,4	99,8	100	3,37	D-Summe = 3,39			
D2, 3, 400g	100	89,7	66,3	3,7	1,6	0,2	0	300	k-Wert = 1,61	0,0		
	30,0	67,8	181,3	6,3	3,9	0,6	0,0	289,9	0,0	0,0		
	0	10,35	33,74	96,3	98,4	99,8	100	3,37	D-Summe = 3,39			
D2, 4b, Summe, Naßsiebung	100	94,9	66,2	4,1	1,6	0,2	0	1200	k-Wert = 1,67	0,0		
	61,2	343,9	743,8	30,0	16,7	2,8	0,0	1198,4	0,0	0,0		
	0	5,11	33,80	95,9	98,4	99,8	100	0,13	D-Summe = 3,33			
D2	100	92,7	66,1	4,0	1,6	0,2	0	2073,1	k-Wert = 1,65	0,0		
	7,3	26,6	62,1	2,4	1,4	0,2	-13,2	0,0	0,0	0,0		
	0	7,29	33,86	95,99	98,37	99,77	100,00	0	D-Summe = 3,35			



Anlage 5, Blatt 2

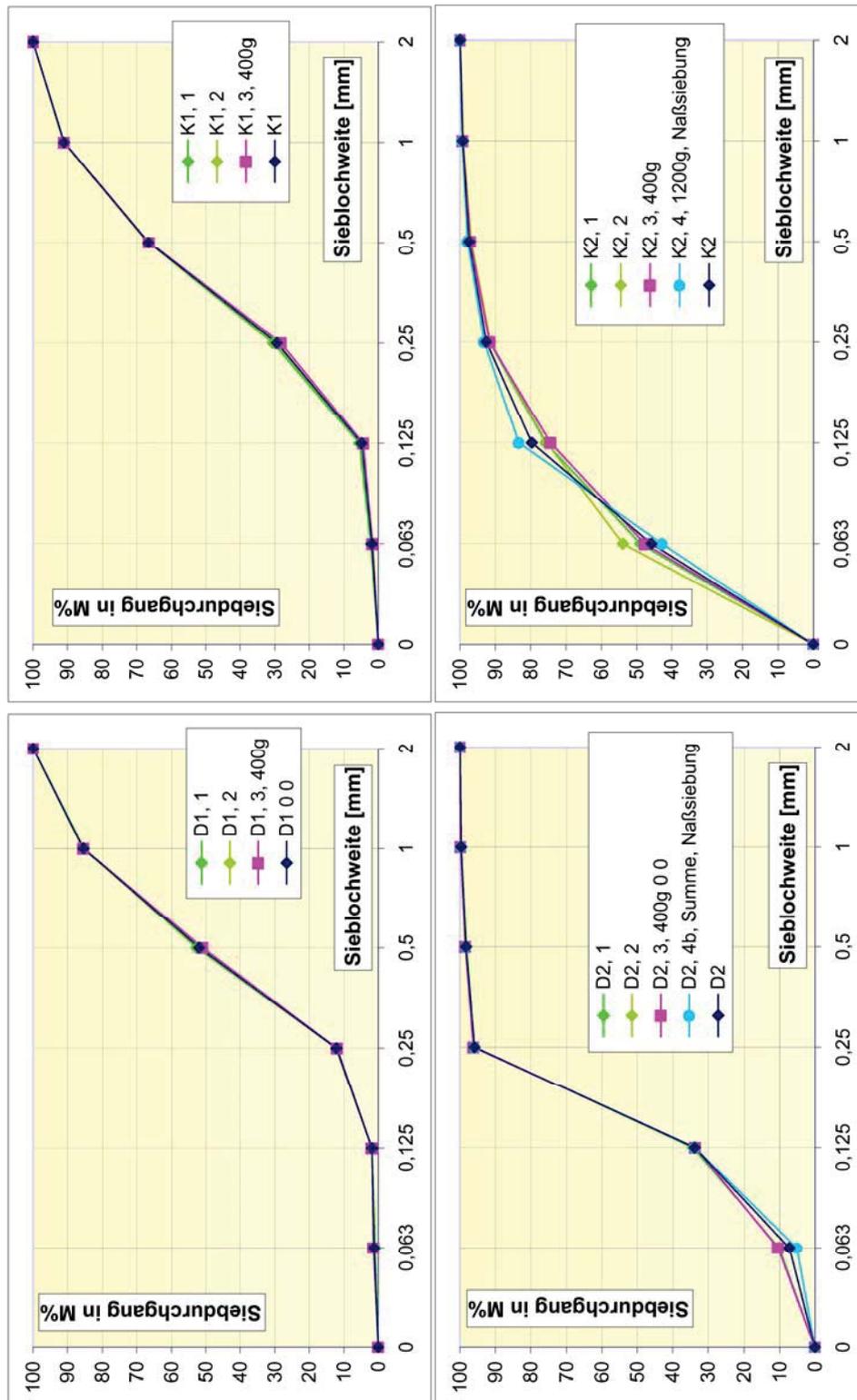
Zu Absatz 4.1.3: Tabelle der durch Siebung ermittelten Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe

Bezeichnung	Siebweite [mm]	Korngrößenverteilung [%]											Summe [g]	Abweichung [%]	Kennwerte			
		0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	3	4	5	6			7	8	9	10
K1, 1	Klassengrenzen in [µm]	0	63	125	250	500	1000	2000										0
	Siebrückstand [%]	100	97,8	94,6	69,6	33,2	9,0	0										k-Wert = 3,04
	* Masse [g]	6,2	9,2	71,7	104,4	69,3	25,9	0,0										0,0
	Siebdurchgang [%]	0	2,16	5,37	30,4	66,8	91,0	100										D-Summe = 1,96
	Siebrückstand [%]	100	98,4	95,1	70,4	33,2	8,8	0,00										k-Wert = 3,06
K1, 2	* Masse [g]	4,6	9,5	71,7	107,7	70,5	25,6	0,0										0,0
	Siebdurchgang [%]	0	1,59	4,87	29,6	66,8	91,2	100										D-Summe = 1,94
	Siebrückstand [%]	100	98,3	95,7	71,7	33,5	9,0	0										k-Wert = 3,08
	* Masse [g]	6,8	10,0	93,3	148,8	95,2	35,1	0,0										0,0
	Siebdurchgang [%]	0	1,75	4,32	28,3	66,5	91,0	100										D-Summe = 1,92
K1	Siebrückstand [%]	100	98,2	95,2	70,7	33,3	9,0	0										k-Wert = 3,06
	Anteil der Korngruppe [M%]	1,8	3,0	24,5	37,4	24,3	9,0	3,6										0,0
	Siebdurchgang [%]	0	1,82	4,80	29,3	66,7	91,0	100										D-Summe = 1,94
	Siebrückstand [%]	100	51,1	24,2	8,4	3,0	0,8	0										k-Wert = 0,88
	* Masse [g]	136,6	75,2	44,4	15,1	6,0	2,3	0,0										0,0
K2, 1	Siebdurchgang [%]	0	48,86	75,75	91,6	97,0	99,2	100										D-Summe = 4,12
	Siebrückstand [%]	100	46,2	24,6	8,6	3,1	0,9	0,00										k-Wert = 0,83
	* Masse [g]	144,2	57,9	42,8	14,6	6,1	2,3	0,0										0,0
	Siebdurchgang [%]	0	53,83	75,44	91,4	96,9	99,1	100										D-Summe = 4,17
	Siebrückstand [%]	100	52,4	25,7	8,3	2,9	0,8	0,00										k-Wert = 0,90
K2, 3, 400g	* Masse [g]	176,8	99,1	64,6	20,2	7,7	2,9	0,0										0,0
	Siebdurchgang [%]	0	47,62	74,31	91,7	97,1	99,2	100										D-Summe = 4,10
	Siebrückstand [%]	100	57,2	16,7	6,8	2,1	0,6	0										k-Wert = 0,83
	* Masse [g]	510,5	483,3	118,1	55,4	18,4	7,2	0,0										0,0
	Siebdurchgang [%]	0	42,79	83,31	93,2	97,9	99,4	100										D-Summe = 4,17
K2	Siebrückstand [%]	100	54,2	20,3	7,49	2,5	0,7	0										k-Wert = 0,85
	Anteil der Korngruppe [M%]	45,8	33,9	12,8	5,0	1,8	0,7	-14,8										0,0
	Siebdurchgang [%]	0	45,84	79,73	92,51	97,49	99,30	100,00										D-Summe = 4,15



Anlage 5, Blatt 3

Zu Absatz 4.1.3: Diagramm der durch Siebung ermittelten Korngrößenverteilungen der Ausgangsstoffe





Anlage 6, Blatt 1

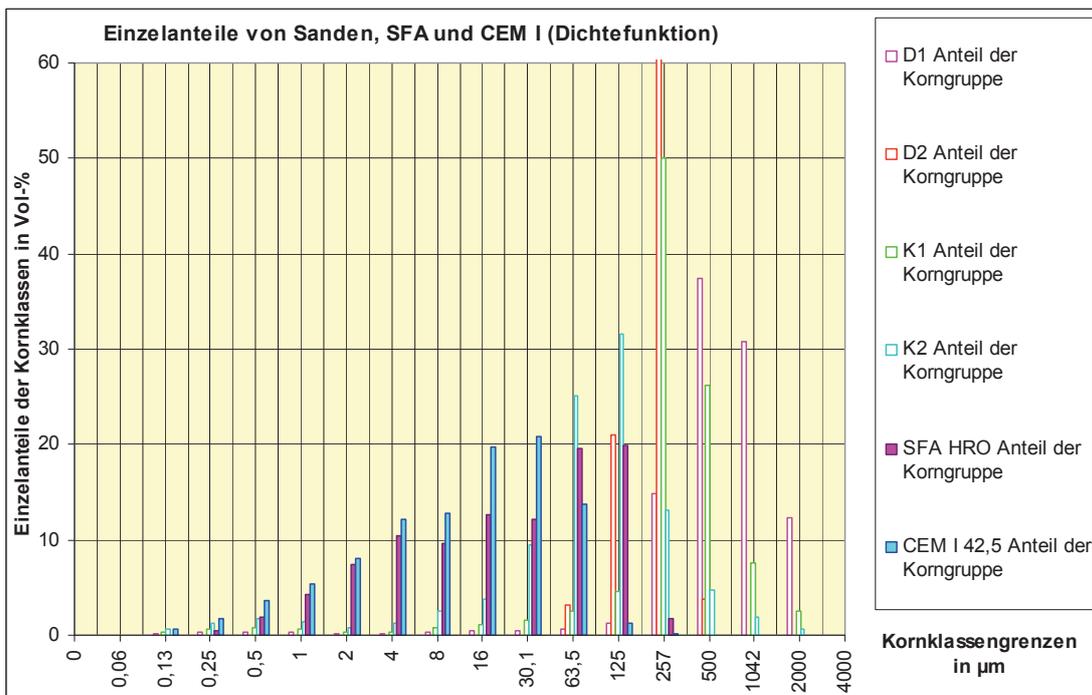
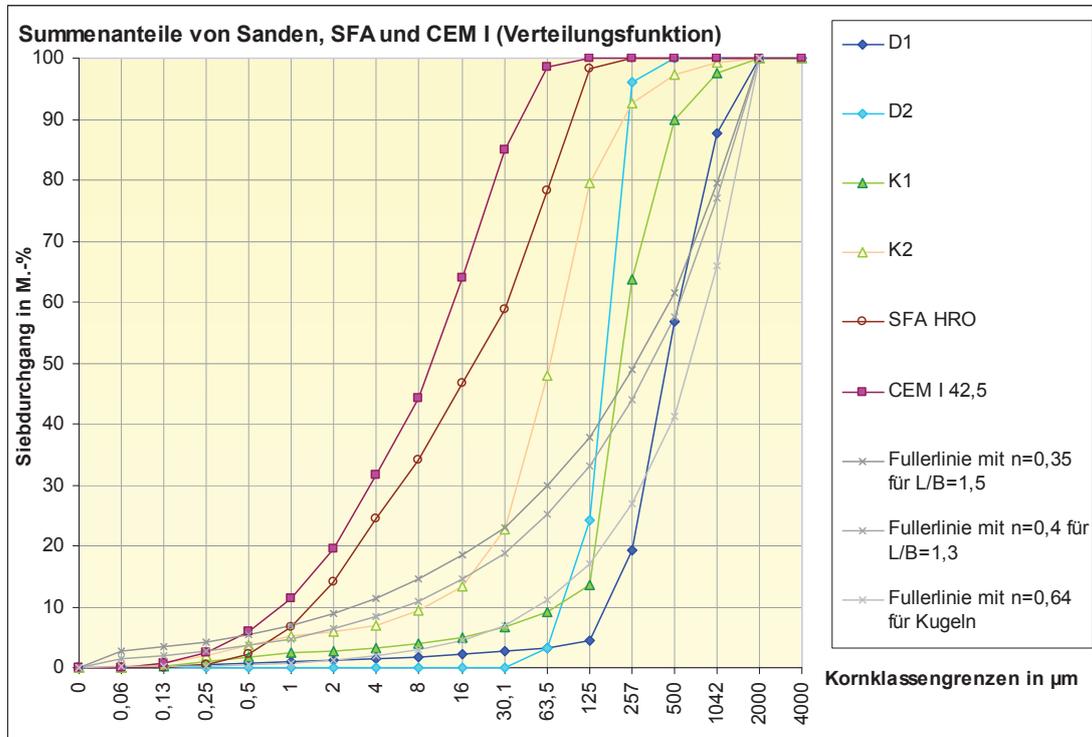
Zu Absatz 4.1.3: Tabelle der Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe als zusammengeführte Werte aus Siebung und Lasergranulometrie [Uni Kassel (2010)], eigene Messungen

Größtkorn der betrachteten Proben:		2 mm																Siebdurchgang in [Vol-%]			
		0	0,000063	0,000125	0,00025	0,0005	0,001	0,002	0,004	0,008	0,016	0,03	0,064	0,125	0,257	0,5	1,04	2	4	Summen	
Annahme der Verteilungen	untere Sieblochweite d ₅₀ und in [µm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	30,1	63,5	125	257	500	1042	2000	4000	166,0	
Fullerlinie mit n=0,64 für Kugeln	Siebrückstand [%]	100	99,9	99,8	99,7	99,5	99,2	98,8	98,1	97,1	95,5	93,2	89,0	83,0	73,1	58,8	34,1	0,0	0	334,0	
Fullerlinie mit n=0,4 für L/B=1,3	Siebdurchgang [%]	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2	1,9	2,9	4,5	6,8	11,0	17,0	26,9	41,2	65,9	100	100	121,5	
Fullerlinie mit n=0,35 für L/B=1,5	Siebrückstand [%]	100	98,4	97,9	97,3	96,4	95,2	93,7	91,7	89,0	85,5	81,3	74,8	67,0	56,0	42,6	23,0	0	0	378,5	
	Siebdurchgang [%]	0	1,6	2,1	2,7	3,6	4,8	6,3	8,3	11,0	14,5	18,7	25,2	33,0	44,0	57,4	77,0	100	100	110,1	
D1	Siebrückstand [%]	100	97,3	96,6	95,7	94,5	93,0	91,1	88,6	85,5	81,5	77,0	70,1	62,1	51,2	38,4	20,4	0	0	389,9	
	Siebdurchgang [%]	0	2,7	3,4	4,3	5,5	7,0	8,9	11,4	14,5	18,5	23,0	29,9	37,9	48,8	61,6	79,6	100	100	100,0	
	Anteil der Korngruppe	0,00	0,01	0,14	0,25	0,36	0,27	0,14	0,20	0,36	0,41	0,51	0,63	1,27	14,85	37,45	30,87	12,31	0,00	100,0	
	Summenlinie	0	0,01	0,15	0,40	0,76	1,03	1,16	1,36	1,72	2,13	2,63	3,26	4,53	19,38	56,83	87,69	100,0	100,0	100,0	
D2	Anteil der Korngruppe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	100,0	
	Summenlinie	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	100,0	
K1	Anteil der Korngruppe	0,00	0,02	0,33	0,60	0,86	0,66	0,32	0,39	0,80	1,06	1,64	2,46	4,56	50,05	26,22	7,51	2,53	0,00	100,0	
	Summenlinie	0	0,02	0,35	0,95	1,80	2,46	2,78	3,18	3,97	5,03	6,67	9,14	13,69	63,74	89,96	97,47	100,0	100,0	100,0	
K2	Anteil der Korngruppe	0,00	0,02	0,63	1,24	1,80	1,38	0,74	1,19	2,49	3,36	9,48	25,14	31,63	13,05	4,71	1,97	0,67	0,00	100,0	
	Summenlinie	0	0,02	0,65	1,89	3,69	5,08	5,82	7,00	9,50	13,35	22,83	47,97	79,60	92,65	97,36	99,33	100,0	100,0	100,0	
SFA HRO	Anteil der Korngruppe	0,00	0,00	0,04	0,40	1,89	4,25	7,46	10,36	9,58	12,59	12,13	19,65	19,96	1,69	0,00	0,00	0,00	0,00	100,0	
	Summenlinie	0	0,00	0,04	0,44	2,33	6,58	14,04	24,40	33,99	46,57	58,70	78,35	98,31	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
CEM I 42,5	Anteil der Korngruppe	0,00	0,02	0,71	1,67	3,56	5,34	8,12	12,08	12,74	19,73	20,92	13,67	1,32	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	100,0	
	Summenlinie	0	0,02	0,73	2,40	5,96	11,30	19,42	31,50	44,24	63,97	84,89	98,56	99,88	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	



Anlage 6, Blatt 2

Zu Absatz 4.1.3: Summenfunktion und Verteilungsfunktion der Korngrößenverteilung der zusammengeführten Werte der Ausgangsstoffe





Anlage 7, Blatt 1

Zu Absatz 4.1.3: Tabelle zur Ermittlung der Rohdichten der Ausgangsstoffe aus Datei 'Rohdichtebestimmung.xls' Ausgangsstoffe'

Wert erscheint zu gering und wird nicht berücksichtigt	Rohdichtebestimmung an Sandproben K				
	K1-1	K1-2	K1-3	K1-4	K1-5
Wer, wann und Besonderheiten					
leeres Gefäß [g]	Dose, 09.02. 75,55	Dose, 09.02. =	Dose, 09.02. =	Dose, 09.02. =	Dose, 09.02. 15.02. 75,55
Glasplatte [g]	144,79	=	=	=	=
Gefäß und Glasplatte [g]	220,34	220,34	220,34	220,34	220,34
mit Wasser blasenfrei gefülltes Gefäß mit Glasplatte [g]	378,12	378,12	378,12	378,12	378,17
daher Wassermenge [g]	157,78	157,78	157,78	157,78	157,83
Leitungswasser hat bei einer Temperatur von [°C]	19,1	=	=	=	16,9
ein Dichte von [g/cm³]	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9988
Sand, Einwage raumlufttrocken [g]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gefäß, gefüllt mit Sand und Wasser mit Glasdeckel [g]	440,10	440,20	440,12	440,06	439,59
Korrekturvolumen für erkennbare Luftblasen [mm³]	6,0	0,5			
Rohdichte der Sandprobe [g/cm³]	2,626	2,633	2,627	2,623	2,589
Mittelwert:	K1	2,627			

Mittelwert: **K2** **2,636** Wegen Schwankigkeiten beim Umrühren sind sicherlich Luftblasen in der Probe verblieben und die Werte werden nicht berücksichtigt.

Wert erscheint zu gering und wird nicht berücksichtigt	Rohdichtebestimmung an Sandproben D				
	D1-1	D1-2	D1-3	D1-4	D1-5
Wer, wann und Besonderheiten					
leeres Gefäß [g]	Dose, 09.02. 75,55	Dose, 09.02. =	Dose, 09.02. =	Dose, 09.02. =	Dose, 09.02. 15.02. 75,55
Glasplatte [g]	144,79	=	=	=	=
Gefäß und Glasplatte [g]	220,34	220,34	220,34	220,34	220,34
mit Wasser blasenfrei gefülltes Gefäß mit Glasplatte [g]	378,11	378,12	378,13	378,12	378,09
daher Wassermenge [g]	157,77	157,78	157,79	157,78	157,75
Leitungswasser hat bei einer Temperatur von [°C]	18,5	18,6	17,5	17,6	19
ein Dichte von [g/cm³]	0,9985	0,9985	0,9987	0,9987	0,9984
Sand, Einwage raumlufttrocken [g]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gefäß, gefüllt mit Sand und Wasser mit Glasdeckel [g]	439,84	439,66	439,54	439,77	440,22
Korrekturvolumen für erkennbare Luftblasen [mm³]					
Rohdichte der Sandprobe [g/cm³]	2,609	2,596	2,588	2,604	2,636
Mittelwert:	D1	2,607			

Mittelwert: **D2** **2,635**



Anlage 7, Blatt 2

Zu Absatz 4.1.3:

Tabelle zur Ermittlung der Rohdichten der Ausgangsstoffe aus Datei Rohdichtebestimmung.xls' Ausgangsstoffe'

Rohdichtebestimmung an Steinkohlenflugasche

SFA-1					
Stegem.	Stegem.	Stegem.	Stegem.	Dose,	
28.04.'0	26.07.11	02.08.11	02.08.11	04.08.201	
	75,52	75,51	75,51	75,51	75,51
	45,28	45,27	45,27	45,27	45,27
	120,8	120,78	120,78	120,78	120,78
	278,66	278,45	278,44	278,45	278,45
	157,95	157,86	157,67	157,67	157,67
	18,4	20,3	20,6	20,8	21,6
	0,99902	0,99866	0,99858	0,99853	0,99836
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	206,90	204,46	205,56	205,54	328,85
	1,957	1,870	1,916	1,916	2,013

Mittelwert: SFA 1,934 Rho aus Punkte-Versuch: 1,957

Rohdichtebestimmung an CEM I 42,5

CEM I					
Stegem.	Stegem.	Stegem.	Stegem.		
28.04.'0	02.08.11	02.08.11	02.08.11		
	75,51	75,51	75,52		
	45,27	45,27	45,27		
	120,78	120,78	120,79		
	278,45	278,43	278,46		
	157,98	157,67	157,65		
	18,6	21	21,2		
	0,99898	0,99849	0,99845		
	100,00	100,00	100,00		
	223,96	223,96	225,05		
	2,936	2,962	3,063		

Mittelwert:

CEM I 42,5: 3,019



Anlage 8

Zu Absatz 4.1.4: Produktdatenblatt des Zementes CEM I 42,5 R Pur 4 aus Lägerdorf
[Firma HOLCIM [2010]]

		Holcim (Deutschland) AG Technical Marketing Hannoversche Str. 28 31319 Sehnde	
Produktdaten		Telefon (05132) 927-432 Fax (05132) 927-430	
Bindemittel:	Holcim-Pur 4		
	Portlandzement		
	EN 197-1 - CEM I 42,5 R		
Herstellwerk:	Lägerdorf		
Monat:	Dezember 2009		
Chemische Analyse (Normgrenzen)			
Glühverlust	:	2.60	[M.-%] ≤ 5.0
Unlös. Rückstand	:	0.52	[M.-%] ≤ 5.0
SiO ₂	:	20.77	[M.-%]
Al ₂ O ₃	:	4.98	[M.-%]
Fe ₂ O ₃	:	2.83	[M.-%]
CaO	:	65.82	[M.-%]
MgO	:	0.80	[M.-%]
SO ₃	:	2.97	[M.-%] ≤ 4.0
Na ₂ O	:	0.26	[M.-%]
K ₂ O	:	0.43	[M.-%]
Na ₂ O (äquiv.)	:	0.54	[M.-%]
Chlorid	:	0.06	[M.-%] ≤ 0.10
Kalkstandard	:	96.7	
C ₃ S	:	64.4	[M.-%]
C ₂ S	:	11.0	[M.-%]
C ₃ A	:	8.4	[M.-%]
C ₄ AF	:	8.6	[M.-%]
Mechanische Daten			
Spez. Oberfläche	:	3488	[cm ² /g]
Wasseranspruch	:	25.2	[M.-%]
Erstarren - Anfang	:	145	[Min.] ≥ 60
Raumbeständigkeit	:	0.6	[mm] ≤ 10
Normdruckfestigkeit EN 196			
2 Tage	:	29.0	[MPa] ≥ 20.0
28 Tage	:	60.8	[MPa] ≥ 42.5–≤ 62.5
Bemerkungen:			
Der Zement erfüllt die Anforderungen der EN 197-1			
Höver,	5. FEB. 2010		
(Ort)	(Datum)	(Unterschrift)	Holcim (Deutschland) AG Technical Marketing Hannoversche Straße 28 31319 Sehnde-Höver
Holcim (Deutschland) AG • Willy-Brandt-Straße 69 • 20457 Hamburg • Telefon: (0 40) 3 00 02-0 • Telefax: (0 40) 36 24 50 • Internet: www.holcim.de Bankverbindung: Deutsche Bank AG Hamburg • BLZ 200 700 00 • Konto-Nr. 0113911 • Aufsichtsratsvorsitzender: Dr. Peter von Foerster Vorstand: Leo Mittelholzer (Vorsitzender) • Amtsgericht: Hamburg HRB 66 680 • Sitz: Hamburg St.-Nr. 27/201/00730 USt-ID-Nr. DE 171 615 142			



Anlage 9

Zu Absatz 4.1.5: Auszug aus Überwachungszeugnis der Steinkohlenflugasche des Kraftwerkes Rostock, [Sekundärquelle: [Holle (2008)]]

Überwachungsbericht Nr. 220000209 07-06 vom 10.06.2008

Ergebnis der Flugaschenanalyse	
Herstellwerk:	Kraftwerk Rostock, Block 1
Probedatum:	24.11.2007
Kennzeichnung:	Warnowfüller
Untersuchung auf:	Anteile in Massen-%
Kieselsäure (SiO ₂)	62,0
Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃)	22,1
Gesamteisen (Fe ₂ O ₃)	5,2
Calciumoxid (CaO)	4,3
Magnesiumoxid (MgO)	2,0
CaO _{frei}	0,45
Sulfatschwefel (SO ₃)	0,46
Natriumoxid (Na ₂ O)	0,90
Kaliumoxid (K ₂ O)	2,3
Na ₂ O –Äquivalent	2,41
Chlorid (Cl)	<0,01
Glühverlust	1,80



Anlage 10

Zu Absatz 4.1.6: Wasseranalyse des verwendeten Wassers, [HWW (2011)]

Versorgungsgebiet Walddörfer (RH71 VG-WD) und Versorgungsgebiet Rothenburgsort (RH71 VG-ROH)

Entnahmeort: Entnahmedatum:	RH71 VG-WD		RH71 VG-ROH		Einheit PAR
	18.04.2011 13:00	28.06.2011 10:00	18.04.2011 12:10	28.06.2011 09:00	
Parameter	Messwert	Messwert	Messwert	Messwert	
Ammonium (NH4)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	mg/l
Anionenäquivalente (Anion)	3,996	4,081	4,025	4,249	mmol/l
Antimon (Sb)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	mg/l
Arsen (As)	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	mg/l
Basekapazität bis pH 8,2 (KB8,2)	0,2	0,21	0,17	0,22	mmol/l
Blei (Pb)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/l
Bromdichlormethan (THM02)			< 0,0001	< 0,0001	mg/l
Cadmium (Cd)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	mg/l
Calcium (Ca)	56	55	57	56	mg/l
Chlorid (Cl)	14	15	14	17	mg/l
Chrom, gesamt (Cr)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/l
gelöstes Kohlendioxid (freie Kohlensäure) (CO2)	8,8	9,4	7,5	9,6	mg/l
Coliforme Bakterien MPN (Coli2)	0	0	0	0	MPN/100 ml
Dibromchlormethan (THM03)			< 0,0001	< 0,0001	mg/l
Eisen, gesamt (Fe)	0,02	0,01	0,02	0,02	mg/l
Elektrische Leitfähigkeit bei 20 °C (im Labor) (LF20L)	332	332	332	349	µS/cm
(ECol2)	0	0	0	0	MPN/100 ml
Färbung, spektraler Absorptionskoeffizient bei 436 nm (SA436)	0,2	0,2	0,2	0,2	1/m
Geruch, qualitativ (GerQI)	ohne	ohne	ohne	ohne	
Gesamthärte (GH)	9,2	9	9,3	9,2	°dH
Geschmack, qualitativ (GesQI)	ohne	ohne	ohne	ohne	
Kalium (K)	2,2	2,3	2,1	2,3	mg/l
Karbonathärte (KH)	3,998	4,124	9,6	10,1	°dH
Kationenäquivalente (Katio)	3	0	4,002	4,278	mmol/l
Koloniezahl, 20°C (TrinkwV 1990) (KZ20°)	1	0	1	6	KBE/ml
Koloniezahl, 36°C (TrinkwV 1990) (KZ36°)	0,058	0,007	3	1	KBE/ml
Kupfer, gesamt (Cu)	9,6	9,9	0,041	0,089	mg/l
Magnesium (Mg)	6	6	6	6	mg/l
Mangan, gesamt (Mn)	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	mg/l
Natrium (Na)	15	19	14	21	mg/l
Nickel (Ni)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/l
Nitrat (NO3)	1,6	1,4	1,4	1,5	mg/l
Nitrit (NO2)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	mg/l
pH-Wert (pH)	7,57	7,57	7,63	7,57	
Sauerstoff (O2)	9,1	9,2	9,3	9,2	mg/l
Säurekapazität bis pH 4,3 (KS4,3)	3,43	3,51	3,42	3,6	mmol/l
Sulfat (SO4)	7	6	9	7	mg/l
S)			< 0	< 0	mg/l
Temperatur (Temp)	11	13,5	11,7	14,7	°C
(THM04)			< 0,0001	< 0,0001	mg/l
(THM01)			< 0,0001	< 0,0001	mg/l
Trübung, quantitativ (TrüQn)	0,16	0,04	0,15	0,06	NTU
Wassertemperatur (Labor) (TLab)	12,5	13,7	13	13,9	°C
Zink (Zn)	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,54	mg/l



Anlage 11, Blatt 1

Zu Absatz 4.1.7: Technisches Merkblatt des verwendeten Fließmittels, [SIKA (2010)]

Construction

Produktdatenblatt
Ausgabe 01/2009
Sika® Fließmittel FM 34

Sika® Fließmittel FM 34

Hochwirksames Fließmittel für Hochleistungsbeton

Produkt Beschreibung	Sika Fließmittel FM 34 wird als stark wirkendes Fließmittel für Hochleistungsbeton in Fertigteilwerken und auf Baustellen verwendet.
Anwendungsgebiete	<ul style="list-style-type: none"> ■ Beton mit hoher Frühfestigkeit ■ Beton mit geringem Ansteifen ■ hochfesten Beton ■ hochdichten Beton ■ selbstverdichtenden Beton ■ Beton mit sehr hohem Feinstoffanteil
Eigenschaften / Vorteile	<p>Sika Fließmittel FM 34 bewirkt</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ bessere Dispergierung und Benetzung des Zements ■ geringere Reibungskräfte zwischen Zement und Zuschlag ■ geringeren Wasseranspruch <p>Dies ergibt bei Mörtel und Beton</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Verbesserung der Verarbeitbarkeit bei gleichem Wasserzementwert ■ Reduzierung des Wasserzementwertes bei gleicher Verarbeitbarkeit ■ langsames Ansteifen ■ homogenen Beton ■ höhere Früh- und Endfestigkeit ■ höhere Dauerhaftigkeit ■ geringeres Schwinden und Kriechen ■ bessere Sichtbetonoberflächen
Zulassungen / Prüfungen	<p>Entspricht EN 934-2 Tabelle 2 (Betonverflüssiger) und Tabellen 3.1/3.2 (Fließmittel)</p> <p>Entspricht DIN V 18998</p> <p>In Beton mit Spanngliedern im sofortigen Verbund anwendbar (DIN V 20000-100 Abs. 4.4)</p> <p>In Beton mit alkaliempfindlicher Gesteinkörnung nach Alkali-Richtlinie Teil 1, 4.3.2, Abs. (2) oder (3) anwendbar</p> <p>Entspricht den Anforderungen der ZTV-ING</p> <p>Wirksamkeitsprüfung mit Sika Luftporenbildner LPS A-94</p> <p>In allen EU-Ländern anwendbar</p>

Sika® Fließmittel FM 34
1/3



Anlage 11, Blatt 2

Produktdaten	
Form / Farbe	braune Flüssigkeit
Wirkstoffbasis	Polycarboxylatether
Dichte (20°%)	1,10 g/cm ³
pH-Wert	7
Chloridgehalt	≤ 0,10 %
Alkaligehalt (Na ₂ O-Äquiv)	≤ 0,2 %
Lieferform	Fässer: 220 kg netto Tauschcontainer: 1000 kg netto lose Lieferung: ab 6 t
Lagerbedingungen / Haltbarkeit	Vor Frost, starker Sonneneinstrahlung und Verunreinigungen schützen Bei loser Lieferung saubere Tanks und Behälter verwenden In geschlossenen Behältern mindestens 1 Jahr haltbar Nach längerer Lagerung vor Gebrauch aufrühren
Verarbeitung	
Empfohlener Dosierbereich	0,2 – 2,2 % vom Zementgewicht
Zugabe	Bei sofortiger Zugabe im Werk empfehlen wir, Sika Fließmittel FM 34 gleichzeitig mit dem Wasser der Betonmischung zuzugeben und vor anderen Betonzusatzmitteln einzumischen Die erforderliche Mischzeit nach Zugabe ist vom Mischer abhängig und muss ausreichend bemessen sein Bei Nachdosierung auf der Baustelle empfehlen wir die Verwendung des gleichen Fließmittels wie im Werk Bei nachträglicher Zugabe und Nachdosierung im Transportbetonfahrzeug muss eine gleichmäßige Verteilung des Fließmittels im Beton sicher gestellt werden. Hierzu empfehlen wir, das Fließmittel auf den Beton zu geben. Die Mischzeit sollte 1 min pro m ² , mindestens jedoch 5 min. betragen
Verarbeitungshinweise	Vor Verwendung ist eine Erstprüfung nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 erforderlich
Wichtige Hinweise	
Gefahrenhinweise	Produkt-Code: BZM 1 Für den Umgang mit unseren Produkten sind die wesentlichen physikalischen, sicherheitstechnischen, toxikologischen und ökologischen Daten den stoffspezifischen Sicherheitsdatenblättern zu entnehmen. Die einschlägigen Vorschriften, wie z. B. die Gefahrstoffverordnung, sind zu beachten. Auf Wunsch stellen wir Ihnen unser System-Merkblatt TM 7510 "Hinweise zum Arbeitsschutz" beim Umgang mit Produkten der Sika Deutschland GmbH zur Verfügung.
Datenbasis	Alle technischen Daten, Maße und Angaben in diesem Datenblatt beruhen auf Labortests. Tatsächlich gemessene Daten können in der Praxis aufgrund von Umständen außerhalb unseres Einflussbereiches abweichen.



Anlage 12, Blatt 1

Zu Absatz 4.3.1: Abschätzung der Wirtschaftlichkeit

1. Abschätzung der Wirtschaftlichkeit anhand der Herstellkosten der Granulate:

Von Vertretern der Norddeutschen Kieswerke wurde auf der Vorstellung des Projektes am 06.05.2008 der Zielpreis von 9 €/t als Wunsch definiert. Gleichzeitig wurde ein Preis von 14 €/t als marktüblich für Kies verschiedener Fraktionen bestätigt. Im Folgenden werden die Herstellungskosten eines künstlichen Grobzuschlages als Summe aus Material- und Betriebskosten abgeschätzt und diesen Werten gegenübergestellt.

Eingangsdaten zur Abschätzung des Kostenvergleichs der Transportwege und der Auswirkungen auf den regionalen Markt liegen zu Zeit noch nicht vor.

Materialkosten:

Auf der Grundlage der beim Treffen mit den Vertretern der norddeutschen Kieswerke am 06.05.2008 abgestimmten Mengen und Preise wird die folgende Abschätzung der Wirtschaftlichkeit vorgenommen.

Rechenwerte der Preise in HH für Sand, ab Werk: 2,50 €/t

Flugasche: 26,00 €/t

Zement: 72,00 €/t

Mengenschätzung gemäß der Randwerte aus der Niederschrift zur Besprechung vom 06.05.2008: → Ziel ist in HH ca. 12 Anlagen mit einer Leistung von jeweils von 25 – 30 t/h

Bei aktuellen Versuche an der FH Wismar zur Herstellung von Granulaten wurde das Mischungsverhältnis bis auf 1 : 9 = (Zement : Sand) ausgedünnt. Die Granulatbildung funktioniert auch bei diesem Mischungsverhältnis, die Untersuchung der Eigenschaften der erhärteten Granulate wird in den nächsten Wochen durchgeführt. In dieser Abschätzung wird, unter Vernachlässigung des Wassers, folgende Zusammensetzung der Granulate angenommen:

(Sand : Zement : Flugasche) = 90 : 5 : 5 (Gewichtsanteile)

Damit ergibt sich der Materialanteil im Preis je Tonne des Endproduktes zu:

$90/100 * 2,5 \text{ €} + 5/100 * 72 \text{ €} + 5/100 * 26 \text{ €} = 2,25 + 3,60 + 1,30 \text{ €} = \underline{7,15 \text{ €}}$

Sand Zement Flugasche



Anlage 12, Blatt 2

Zu Absatz 4.3.1: Abschätzung der Wirtschaftlichkeit

Betriebskosten:

Zum Abschätzen von Eingangsdaten für die Betriebsparameter und Betriebskosten für Granulieranlagen wurden von der Firma Eirich Schätzwerte eingeholt. Zusammen mit weiteren eigenen Annahmen ergibt sich:

Granulierteller \varnothing 4 m; Stundenleistung 10 t; elektrische Leistung 75 kW plus 25 kW Hilfsaggregate;

Anschaffungspreis ca. 300.000 €; Unterhaltskosten für jährliche Instandhaltung 10.000 €; Überwachung der Anlage (elektrisch, Wasserzugabe sowie Zu- und Abfuhr von Rohstoffen und Granulaten) mit 1 Mannstunde (a 30 €/h) je Betriebsstunde

Investitionskosten: Anschaffung 300.000 €, abzuschreiben über 10 Jahre

$$B_i = 300.000 \text{ €} / 10 \text{ a} = 30.000 \text{ €/a}$$

$$\text{Jährliche Betriebsstunden: } 10 \text{ h/d} * 21 \text{ d/Mon} * 12 \text{ Mon/a} = 2520 \text{ h/a}$$

Unterhaltskosten: jährliche Instandhaltung: 10.000 €/a

Stromverbrauch: 75 kW + 25 kW = 100 kW Annahme Preis Industriestrom: 10 ct/kWh

Überwachung: Betriebsüberwachung durch 1 Arbeitskraft
→ 1 Mannstunde je Betriebsstunde

$$\begin{aligned} \text{Betriebskosten} &= \text{Investition} + \text{Unterhalt} + \text{Strom} + \text{Überwachung} \\ &= (30.000 + 10.000) \text{ €/a} / 2520 \text{ h/a} + 100 \text{ kWh} * 0,1 \text{ €/kWh} + 30 \text{ €} \\ &= 55,87 \text{ € je Betriebsstunde} \end{aligned}$$

Bei einer mittelgroßen Anlage mit einem Output von 10 t/h ergibt sich ein Anteil der Betriebskosten am Preis je Tonne von: 5,59 €.

$$\text{Gesamtpreis: } 7,15 \text{ €/t} + 5,59 \text{ €/t} = 12,74 \text{ €/t} \quad 9 \text{ €/t} < 12,74 \text{ €/t} < 14 \text{ €/t}$$

Dieser Preis liegt zwar über dem Wunschwert der Vertreter der Kieswerke, aber unterhalb des Preises für Kies und wird damit als konkurrenzfähig angesehen. Es besteht Optimierungspotential vor allem bei den angesetzten Betriebsdaten und den Lohnkosten des Anlagenführers sowie dem Eingangspreis für Sand.

Im Rahmen dieser Abschätzung wurden die Kosten für Nachbehandlung, Umsetzen und Lagerung vernachlässigt.



Anlage 13, Blatt 1

Zu Absatz 4.3.3: Tabelle zur Aufteilung der Ausgangsstoffe, der Rezepturen der Vor- und Hauptversuche sowie der Idealverteilungen nach Fuller auf die 3 Kornklassen Feinstkorn [0 – 22 µm], Feinkorn (22 – 257 µm] und Mittelkorn (257 – 2000 µm]

	Anteile in Massenprozent							Feinstkorn / Staubkorn s (0 - 22 µm)	Feinkorn f (22 - 257 µm)	Mittelkorn m(s,f) = 100-s-f (257 - 2000 µm]
	D1	D2	K1	K2	CEM	SFA				
D1	100							2,33	17,05	80,62
D2		100						0,00	96,16	3,84
K1			100					5,63	58,12	36,26
K2				100				15,95	76,70	7,35
SFA						100		51,49	48,51	0,00
CEM					100			73,04	26,96	0,00
V V 1	71				14	14		19,45	22,96	57,58
V V 2	42	42			4	13		10,45	54,36	35,19
V V 3			47,6	47,6	4,8			13,75	65,48	20,77
V V 4-1				67		33		27,79	67,30	4,90
V V 4-2			47	43		10		14,50	65,19	20,31
V V 4-3			43	39		18		17,99	63,62	18,40
V V 4-4			40	40	10	10		21,08	61,47	17,44
V V 5	40	40			10	10		13,39	52,83	33,78
V V 6-5			42	42	8	8		19,37	62,46	18,17
V V 6-6			38	38	8	16		22,01	61,32	16,68
V V 10			18	65	17	0		23,92	64,76	11,32
V V 21			90		10	0		12,37	55,00	32,63
V V 22a			82		9	9		15,92	54,41	29,67
V V 22bc			80		10	10		16,95	54,04	29,01
D01	30	50			10	10		13,15	60,74	26,10
D02	50	30			10	10		13,62	44,92	41,46
D03	60				20	20		26,30	25,32	48,37
D04		60			20	20		24,91	72,79	2,30
D05	40	40			10	10		13,39	52,83	33,78
D06	90				10			9,40	18,04	72,56



Anlage 13, Blatt 2

Zu Absatz 4.3.3: Tabelle zur Aufteilung der Ausgangsstoffe, der Rezepturen der Vor- und Hauptversuche sowie der Idealverteilungen nach Fuller auf die 3 Kornklassen Feinstkorn [0 – 22 µm], Feinkorn (22 – 257 µm) und Mittelkorn (257 – 2000 µm)

	Anteile in Massenprozent						Feinstkorn / Staubkorn s (0 - 22 µm)	Feinkorn f (22 - 257 µm)	Mittelkorn m(s,f) = 100-s-f (257 - 2000 µm)
	D1	D2	K1	K2	CEM	SFA			
D06xFM	69				8	23	19,11	25,07	55,81
D07		90			5	5	6,23	90,32	3,45
D08	40	50			10		8,24	57,60	34,17
D09	90				5	5	8,32	19,12	72,56
D10		50			20	30	30,06	68,03	1,92
D11	70				20	10	21,39	22,18	56,43
K01			30	50	10	10	22,11	63,33	14,55
K02			50	30	10	10	20,05	59,62	20,33
K03			50	20	10	20	23,60	56,80	19,60
K04			40	40	10	10	21,08	61,47	17,44
K04+K0x			35	35	13	17	26,15	57,15	16,71
K05tr			35	35	10	20	25,15	59,58	15,26
K06			80		10	10	16,95	54,04	29,01
K07			60		20	20	28,28	49,96	21,75
K08			60		10	30	26,13	52,12	21,75
K09				60	10	30	32,32	63,27	4,41
K10			90		5	5	11,29	56,08	32,63
K11				90	5	5	20,58	72,81	6,62
K12				50	20	30	38,03	58,30	3,68
Fuller 2mm für Kugeln, n=0,64							5,58	21,32	73,10
Fuller 2mm für L/B=1,3, n=0,4							16,46	27,55	55,99
Fuller 2mm für L/B=1,5, n=0,35							20,63	28,14	51,23



Anlage 14, Blatt 1

Zu Absatz 4.3.3: Darstellung der KGV's der Rezepturen der Hauptversuche als Tabelle

Korngrößenverteilungen der Ausgangsstoffe, der Rezepturen der Vor- und Hauptversuche aus der Überlagerung der Ausgangsstoffe gemäß der Zusammensetzungen der Rezepturen

Größtkorn der Fullерlinien: 2 mm Es wird eine für alle Korngrößen eines Materials die gleiche Dichte angenommen. Angaben in [M%]

	obere Sieblochweiten der Kornklasse																				
	Angaben in [M%]																				
	in [mm]	0,0	6,30E-06	0,063	0,125	1,25E-04	2,50E-04	5,00E-04	0,001	0,002	0,004	0,008	0,016	0,032	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
Fuller Kugeln	in [µm]	0,0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000		
mit n=0,64	Anteil [%]	0,0	0,13	0,07	0,11	0,18	0,28	0,43	0,67	1,05	1,63	2,47	3,92	6,02	9,47	14,75	22,99	35,83	0,0		
	Summe [%]	0,0	0,13	0,20	0,32	0,50	0,77	1,20	1,87	2,92	4,55	7,02	10,94	16,96	26,43	41,18	64,17	100,0	100		
Fuller L/B=1,3	Anteil [%]	0,0	1,58	0,50	0,67	0,88	1,16	1,53	2,02	2,66	3,51	4,51	6,07	7,91	10,54	13,91	18,35	24,21	0,0		
mit n=0,4	Summe [%]	0,0	1,58	2,08	2,75	3,62	4,78	6,31	8,33	10,99	14,50	19,01	25,08	32,99	43,53	57,43	75,79	100,0	100		
Fuller L/B=1,5	Anteil [%]	0,0	2,66	0,72	0,93	1,18	1,51	1,92	2,45	3,12	3,98	4,94	6,42	8,08	10,40	13,26	16,90	21,54	0,0		
mit n=0,35	Summe [%]	0,0	2,66	3,38	4,30	5,49	6,99	8,91	11,36	14,48	18,45	23,39	29,81	37,89	48,30	61,56	78,46	100,0	100		
D1	Anteil [%]	0,0	0,02	0,13	0,34	0,27	0,30	0,12	0,21	0,38	0,36	0,54	0,59	1,27	14,85	37,45	30,87	12,31	0,00		
Damsdorf 1	Summe [%]	0,0	0,02	0,15	0,48	0,76	1,06	1,18	1,39	1,77	2,13	2,67	3,26	4,53	19,38	56,83	87,69	100,0	0,00		
D2	Anteil [%]	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,97	72,03	3,77	0,06	0,00								
Damsdorf 2	Summe [%]	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,13	96,16	99,93	100,00	0,00		
K1	Anteil [%]	0,0	0,04	0,32	0,80	0,65	0,72	0,28	0,42	0,86	0,94	1,77	2,33	4,56	50,05	26,22	7,51	2,53	0,00		
Kreuzfeld 1	Summe [%]	0,0	0,04	0,35	1,15	1,80	2,53	2,81	3,23	4,09	5,03	6,80	9,14	13,69	63,74	89,96	97,47	100,0	0,00		
K2	Anteil [%]	0,0	0,04	0,61	1,67	1,37	1,53	0,68	1,25	2,77	3,44	10,54	24,07	31,63	13,05	4,71	1,97	0,67	0,00		
Kreuzfeld 2	Summe [%]	0,0	0,04	0,65	2,32	3,69	5,22	5,90	7,15	9,92	13,35	23,90	47,97	79,60	92,65	97,36	99,33	100,0	0,00		
CEM I 32,5 R	Anteil [%]	0,0	0,05	0,69	2,36	2,87	6,32	8,52	11,53	14,00	17,64	22,20	12,38	1,32	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00		
Zement	Summe [%]	0,0	0,05	0,73	3,10	5,96	12,28	20,80	32,33	46,33	63,97	86,17	98,56	99,88	100,0	100,0	100,0	100,0	0,00		
SFA	Anteil [%]	0,0	0,00	0,04	0,67	1,62	5,13	7,84	9,75	10,43	11,09	13,10	18,68	19,96	1,69	0,00	0,00	0,00	0,00		
Steinkohlen- flugasche	Summe [%]	0,0	0,00	0,04	0,71	2,33	7,46	15,30	25,06	35,48	46,57	59,67	78,35	98,31	100,0	100,0	100,0	100,0	0,00		



Anlage 14, Blatt 2

Zu Absatz 4.3.3: Darstellung der KGV's der Rezepturen der Hauptversuche als Tabelle

	in [mm]	0,0	6,30E-05	1,25E-04	2,50E-04	5,00E-04	0,001	0,002	0,004	0,008	0,016	0,032	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	
	in [µm]	0,0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	
Vorversuche				Sand D1	Sand D2	Sand K1	Sand K2	CEM I	SFA											
V V 1	Rezeptur:			71,4	0,0	0,0	0,0	14,3	14,3		100,0									
	Anteil [%]		0,02	0,20	0,67	0,84	1,85	2,42	3,19	3,76	4,36	5,43	4,86	3,94	10,87	26,75	22,05	8,79	0,00	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,02	0,22	0,89	1,73	3,58	6,00	9,19	12,95	17,31	22,74	27,60	31,55	42,42	69,16	91,21	100	100
V V 2				41,7	0,0	0,0	0,0	4,2	12,5		100,0									
	Anteil [%]		0,01	0,09	0,32	0,44	1,03	1,39	1,79	2,05	2,27	2,79	4,42	11,82	36,42	17,17	12,89	5,13	0,00	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,01	0,10	0,42	0,86	1,88	3,27	5,06	7,10	9,37	12,16	16,58	28,39	64,81	81,98	94,87	100	100
V V 3				0,0	0,0	47,6	47,6	4,8	0,0		100,0									
	Anteil [%]		0,04	0,47	1,29	1,10	1,37	0,86	1,34	2,40	2,92	6,92	13,17	17,29	30,05	14,73	4,51	1,52	0,00	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,04	0,51	1,80	2,90	4,27	5,14	6,48	8,87	11,80	18,72	31,89	49,18	79,23	93,96	98,48	100	100
V V 4-1				0,0	0,0	0,0	66,7	0,0	33,3		100,0									
	Anteil [%]		0,03	0,42	1,34	1,45	2,73	3,06	4,08	5,32	5,99	11,39	22,28	27,74	9,26	3,14	1,31	0,45	0,00	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,03	0,45	1,78	3,24	5,97	9,03	13,12	18,44	24,43	35,82	58,10	85,84	95,1	98,24	99,55	100	100
V V 5				40,0	40,0	0,0	0,0	10,0	10,0		100,0									
	Anteil [%]		0,01	0,13	0,44	0,56	1,26	1,68	2,21	2,60	3,02	3,75	4,61	11,02	34,93	16,49	12,37	4,93	0,00	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,01	0,14	0,57	1,13	2,40	4,08	6,29	8,89	11,91	15,65	20,26	31,28	66,22	82,7	95,07	100	100
V V 6-5				0,0	0,0	41,7	41,7	8,3	8,3		100,0									
	Anteil [%]		0,04	0,44	1,28	1,22	1,89	1,76	2,47	3,55	4,22	8,07	13,59	16,85	26,44	12,89	3,95	1,33	0,00	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,04	0,48	1,76	2,98	4,87	6,64	9,10	12,65	16,87	24,94	38,54	55,39	81,63	94,72	98,67	100	100



Anlage 14, Blatt 3

Zu Absatz 4.3.3: Darstellung der KGV's der Rezepturen der Hauptversuche als Tabelle

	in [mm]	6,30E-05	1,25E-04	2,50E-04	5,00E-04	0,001	0,002	0,004	0,008	0,016	0,032	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
		0,0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000
Vorversuche			Sand D1	Sand D2	Sand K1	Sand K2	CEM I	SFA										
V V 6-6	Anteil [%]		0,0	0,0	38,2	38,2	7,6	15,9		100,0								
	Summe [%]	0,0	0,03	0,41	1,23	2,16	2,26	3,07	4,11	4,78	8,49	14,01	17,11	24,41	11,83	3,62	1,22	0,00
V V 10	Anteil [%]		0,0	0,0	18,1	64,7	17,2	0,0		100,0								
	Summe [%]	0,0	0,00	0,03	0,45	1,68	2,93	5,09	7,35	10,42	14,53	27,80	41,81	58,92	83,32	95,15	98,78	100
V V 21	Anteil [%]		0,0	0,0	90,0	0,0	10,0	0,0		100,0								
	Summe [%]	0,0	0,00	0,04	0,61	2,24	3,74	5,95	7,91	10,78	15,14	20,57	31,54	49,66	71,17	88,68	96,48	99,11
V V 22a	Anteil [%]		0,04	0,35	0,96	1,28	1,11	1,53	2,18	2,61	3,82	3,34	4,23	45,06	23,60	6,76	2,28	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,04	0,39	1,35	2,22	3,50	4,61	6,14	8,32	10,93	14,74	18,08	22,32	67,37	90,97	97,72
V V 22bc	Anteil [%]		0,03	0,32	0,93	1,63	1,72	2,28	2,93	3,38	4,66	4,73	5,66	41,12	21,45	6,14	2,07	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,03	0,36	1,29	2,23	3,86	5,58	7,86	10,78	14,16	18,82	23,56	29,22	70,33	91,79	97,93
	Anteil [%]		0,03	0,32	0,94	1,72	1,86	2,46	3,13	3,62	4,95	4,97	5,77	40,22	20,98	6,01	2,02	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,03	0,36	1,30	2,27	4,00	5,86	8,32	11,45	15,08	20,03	25,00	30,77	70,99	91,97	97,98



Anlage 14, Blatt 4

Zu Absatz 4.3.3: Darstellung der KGV's der Rezepturen der Hauptversuche als Tabelle

	in [mm]	0,0	6,30E-05	1,25E-04	2,50E-04	5,00E-04	0,001	0,002	0,004	0,008	0,016	0,032	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
		in [µm]	0,0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000
Hauptversuche																			
				Sand D1	Sand D2	Sand K1	Sand K2	CEM I	SFA										
D01				30,0	50,0	0,0	0,0	10,0	10,0	100,0									
	Anteil [%]		0,01	0,40	0,53	1,23	1,67	2,19	2,56	2,98	3,69	4,87	12,99	40,65	13,12	9,29	3,70	0,00	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,01	0,12	0,53	1,06	2,29	3,96	6,15	8,71	11,69	15,39	20,25	33,25	73,9	87,01	96,3	100
D02				50,0	30,0	0,0	0,0	10,0	10,0	100,0									
	Anteil [%]		0,01	0,14	0,47	0,58	1,29	1,70	2,23	2,63	3,05	3,80	4,35	9,05	29,22	19,85	15,45	6,16	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,01	0,15	0,62	1,21	2,50	4,20	6,43	9,06	12,12	15,92	20,27	29,32	58,54	78,39	93,84	100
D03				60,0	0,0	0,0	0,0	20,0	20,0	100,0									
	Anteil [%]		0,02	0,22	0,81	1,06	2,47	3,34	4,38	5,11	5,96	7,39	6,57	5,02	9,27	22,47	18,52	7,38	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,02	0,24	1,05	2,11	4,58	7,93	12,31	17,42	23,39	30,77	37,34	42,36	51,63	74,1	92,62	100
D04				0,0	60,0	0,0	0,0	20,0	20,0	100,0									
	Anteil [%]		0,01	0,14	0,61	0,90	2,29	3,27	4,26	4,89	5,75	7,06	8,11	16,84	43,58	2,26	0,04	0,01	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,01	0,15	0,76	1,66	3,95	7,22	11,48	16,36	22,11	29,17	37,28	54,12	97,7	99,96	99,99	100
D05				40,0	40,0	0,0	0,0	10,0	10,0	100,0									
	Anteil [%]		0,01	0,13	0,44	0,56	1,26	1,68	2,21	2,60	3,02	3,75	4,61	11,02	34,93	16,49	12,37	4,93	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,01	0,14	0,57	1,13	2,40	4,08	6,29	8,89	11,91	15,65	20,26	31,28	66,22	82,7	95,07	100
D06				90,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	100,0									
	Anteil [%]		0,02	0,19	0,54	0,53	0,90	0,96	1,34	1,74	2,09	2,71	1,77	1,27	13,38	33,70	27,78	11,08	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,02	0,21	0,75	1,28	2,18	3,14	4,48	6,22	8,31	11,02	12,79	14,07	27,44	61,14	88,92	100
D06xFM				69,2	0,0	0,0	0,0	7,7	23,1	100,0									
	Anteil [%]		0,01	0,15	0,57	0,78	1,88	2,55	3,28	3,75	4,17	5,11	5,67	5,58	10,68	25,92	21,37	8,52	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,01	0,17	0,74	1,52	3,40	5,95	9,23	12,98	17,14	22,25	27,92	33,51	44,19	70,11	91,48	100



Anlage 14, Blatt 5

Zu Absatz 4.3.3: Darstellung der KGV's der Rezepturen der Hauptversuche als Tabelle

	in [mm]	0,0	6,30E-05	1,25E-04	2,50E-04	5,00E-04	0,001	0,002	0,004	0,008	0,016	0,032	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
		in [µm]	0,0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000
Hauptversuche				Sand D1	Sand D2	Sand K1	Sand K2	CEM I	SFA										
D07				0,0	90,0	0,0	0,0	5,0	5,0	100,0									
	Anteil [%]		0,00	0,04	0,15	0,22	0,57	0,82	1,06	1,22	1,44	1,77	4,40	19,94	64,92	3,39	0,05	0,01	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,00	0,04	0,19	0,41	0,99	1,81	2,87	4,09	5,53	7,29	11,69	31,63	96,55	99,94	99,99	100
D08				40,0	50,0	0,0	0,0	10,0	0,0	100,0									
	Anteil [%]		0,01	0,12	0,37	0,40	0,75	0,90	1,24	1,55	1,91	2,44	3,06	11,12	41,97	16,86	12,38	4,93	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,01	0,13	0,50	0,90	1,65	2,55	3,79	5,34	7,25	9,69	12,74	23,87	65,83	82,7	95,07	100
D09				90,0	0,0	0,0	0,0	5,0	5,0	100,0									
	Anteil [%]		0,02	0,16	0,45	0,47	0,84	0,93	1,25	1,56	1,76	2,25	2,09	2,20	13,46	33,70	27,78	11,08	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,02	0,17	0,63	1,10	1,94	2,86	4,12	5,68	7,44	9,70	11,78	13,99	27,44	61,14	88,92	100
D10				0,0	50,0	0,0	0,0	20,0	30,0	100,0									
	Anteil [%]		0,01	0,15	0,68	1,06	2,80	4,06	5,23	5,93	6,85	8,37	9,66	16,74	36,55	1,88	0,03	0,00	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,01	0,16	0,83	1,89	4,69	8,75	13,98	19,91	26,77	35,14	44,80	61,54	98,08	99,97	100	100
D11				70,0	0,0	0,0	0,0	20,0	10,0	100,0									
	Anteil [%]		0,02	0,23	0,78	0,93	1,99	2,57	3,43	4,11	4,89	6,13	4,76	3,15	10,59	26,21	21,61	8,61	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,02	0,25	1,03	1,96	3,94	6,51	9,94	14,05	18,94	25,07	29,83	32,98	43,57	69,78	91,39	100
K01				0,0	0,0	30,0	50,0	10,0	10,0	100,0									
	Anteil [%]		0,04	0,47	1,38	1,33	2,13	2,06	2,88	4,09	4,87	9,33	15,84	19,31	21,72	10,22	3,24	1,09	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,04	0,51	1,89	3,22	5,34	7,40	10,28	14,37	19,24	28,57	44,42	63,73	85,45	95,67	98,91	100
K02				0,0	0,0	50,0	30,0	10,0	10,0	100,0									
	Anteil [%]		0,04	0,41	1,20	1,19	1,97	1,98	2,71	3,71	4,37	7,58	11,50	13,90	29,12	14,52	4,34	1,47	0,00
	Summe [%]	0,0	0,00	0,04	0,45	1,65	2,84	4,80	6,78	9,49	13,20	17,57	25,15	36,65	50,55	79,67	94,19	98,53	100



Anlage 14, Blatt 6

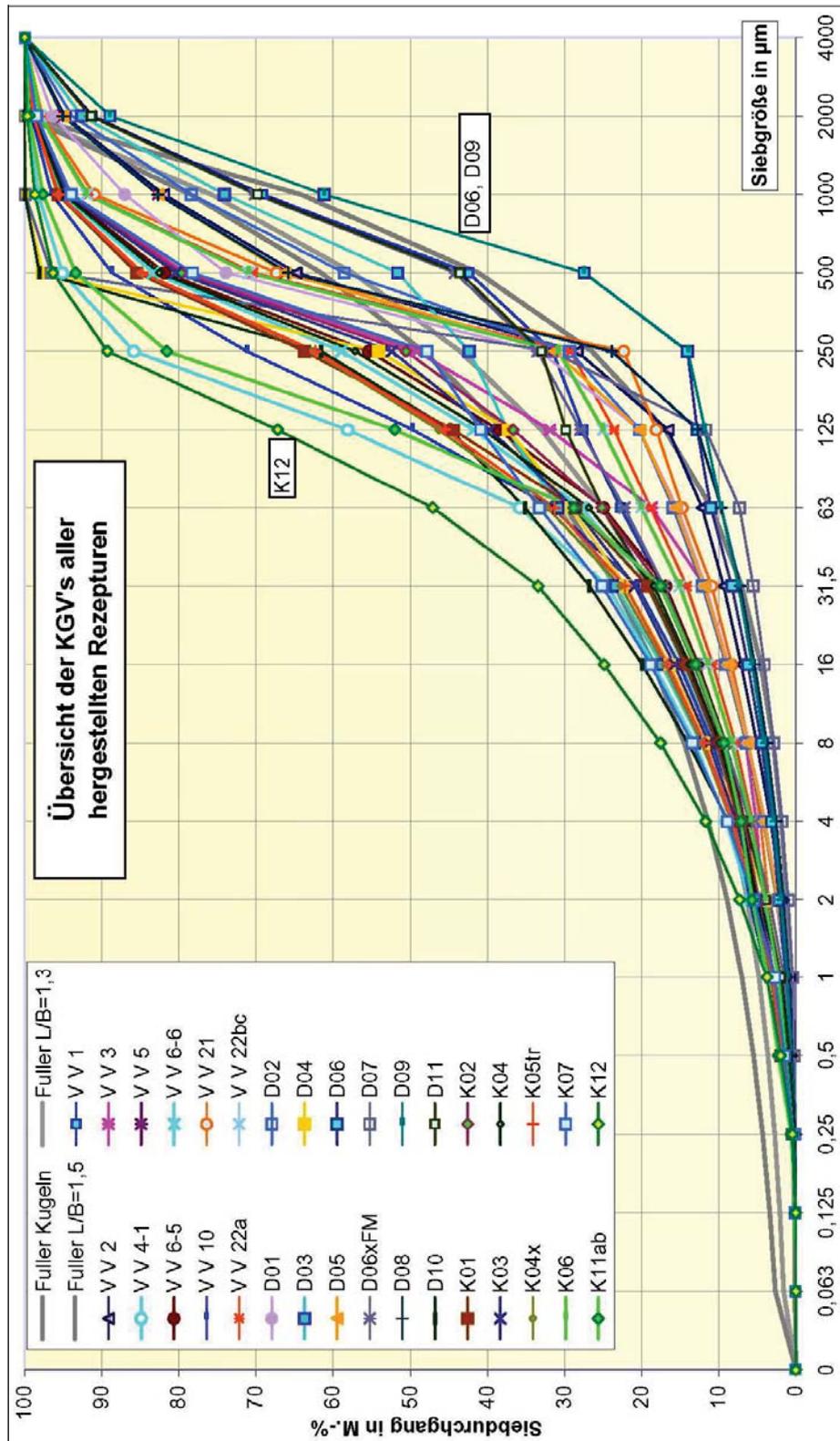
Zu Absatz 4.3.3: Darstellung der KGV's der Rezepturen der Hauptversuche als Tabelle

	in [mm]	0,0	6,30E-05	1,25E-04	2,50E-04	5,00E-04	0,001	0,002	0,004	0,008	0,016	0,032	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
	in [µm]	0,0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000
Hauptversuche		Sand D1	Sand D2	Sand K1	Sand K2	CEM I	SFA												
K03	Anteil [%]		0,0	0,0	50,0	20,0	20,0	10,0	20,0	100,0									
	Summe [%]	0,0	0,00	0,03	0,39	1,49	2,70	5,03	7,72	11,29	15,76	20,90	28,73	39,69	52,42	80,4	94,45	98,6	100
K04	Anteil [%]		0,0	0,0	40,0	40,0	10,0	10,0	10,0	100,0									
	Summe [%]	0,0	0,04	0,04	0,48	1,77	3,03	5,07	7,09	9,89	13,78	18,41	26,86	40,53	57,14	82,56	94,93	98,72	100
K04x	Anteil [%]		0,0	0,0	34,7	35,2	12,9	17,2	17,2	100,0									
	Summe [%]	0,0	0,00	0,03	0,45	1,74	3,10	5,59	8,38	12,13	17,01	22,74	32,19	46,29	62,61	84,85	95,59	98,89	100
K05tr	Anteil [%]		0,0	0,0	35,0	35,0	10,0	20,0	20,0	100,0									
	Summe [%]	0,0	0,03	0,03	0,43	1,67	2,99	5,43	8,19	11,87	16,63	22,15	31,30	45,51	62,30	84,74	95,56	98,88	100
K06	Anteil [%]		0,0	0,0	80,0	0,0	10,0	10,0	10,0	100,0									
	Summe [%]	0,0	0,00	0,03	0,36	1,30	2,27	4,00	5,86	8,32	11,45	15,08	20,03	25,00	30,77	40,22	50,98	62,02	75,00
K07	Anteil [%]		0,0	0,0	60,0	0,0	20,0	20,0	20,0	100,0									
	Summe [%]	0,0	0,00	0,03	0,37	1,45	2,74	5,46	8,91	13,41	18,82	25,13	33,25	40,86	47,85	55,73	64,50	74,48	84,48
K11ab	Anteil [%]		0,0	0,0	0,0	90,0	5,0	5,0	5,0	100,0									
	Summe [%]	0,0	0,00	0,04	0,63	2,28	3,74	5,69	7,11	9,30	13,01	17,55	23,22	29,53	36,42	43,81	51,63	59,86	68,63
K12	Anteil [%]		0,0	0,0	0,0	50,0	20,0	30,0	30,0	100,0									
	Summe [%]	0,0	0,00	0,03	0,48	1,99	3,74	7,31	11,70	17,56	24,87	33,44	42,08	50,72	59,37	68,02	76,67	85,32	93,97



Anlage 15

Zu Absatz 4.3.3: Darstellung der Korngrößenverteilungen der Rezepturen der Hauptversuche als Diagramm





Anlage 16, Blatt 1

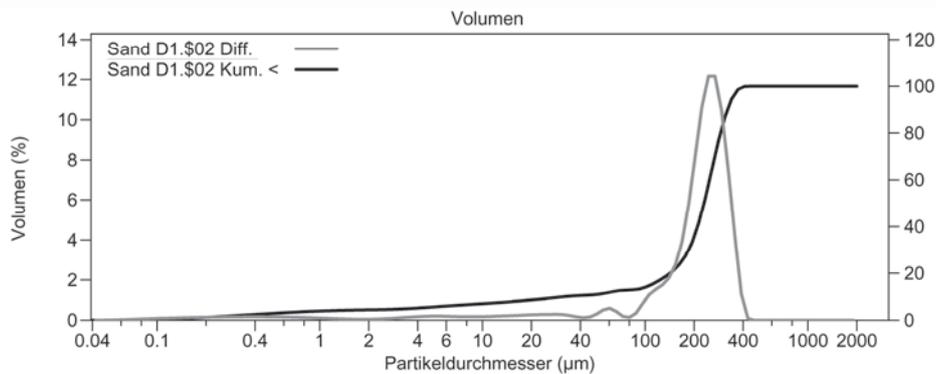
Zu Absatz 4.4.1: Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe 0 – 250 µm mittels Lasergranulometrie [Universität Kassel (2010)]



LS Partikelgrößenmessgerät

30 Mär 2010

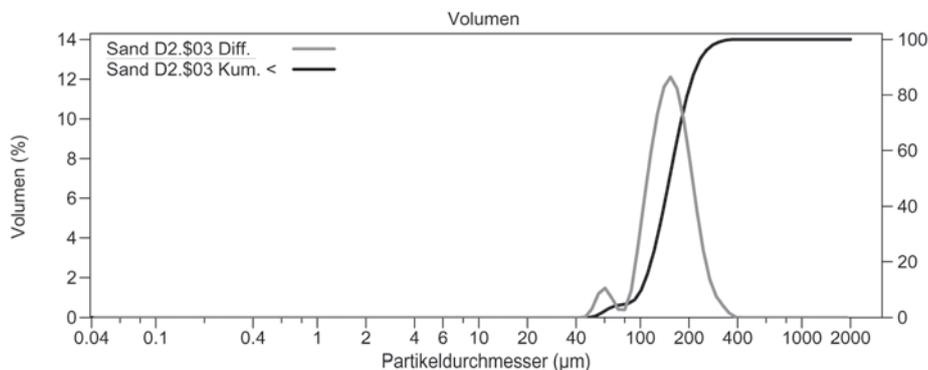
Dateiname:	Sand D1.\$02	Gruppen ID:	Sand D1
Proben ID:	Sand D1 0 - 250		
Messung Nr.:	2		
Kommentar:	0,125 g auf 15ml 4min Disp 4 / 40		
Optisches Modell:	SiO2 - Spehr.rfd Mit PIDS		
LS 230	Small Volume Module+		
Startzeit:	11:45 23 Mär 2010	Messzeit:	91 Sekunden
Messkonzentration:	6%	PIDS Konz.:	49%
Flüssigk.:	Water		
Software:	3.01	Firmware:	2.02 0



LS Partikelgrößenmessgerät

30 Mär 2010

Dateiname:	Sand D2.\$03	Gruppen ID:	Sand D2
Proben ID:	Sand D2 0 - 250		
Messung Nr.:	3		
Kommentar:	0,125 g auf 15ml 3min Disp 4 / 40		
Optisches Modell:	SiO2 - Spehr.rfd Mit PIDS		
LS 230	Small Volume Module+		
Startzeit:	12:28 23 Mär 2010	Messzeit:	91 Sekunden
Messkonzentration:	7%	PIDS Konz.:	50%
Flüssigk.:	Water		
Software:	3.01	Firmware:	2.02 0





Anlage 16, Blatt 2

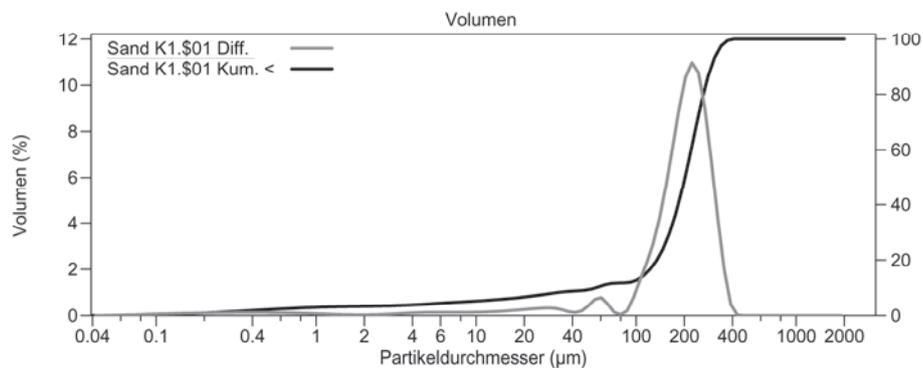
Zu Absatz 4.4.1: Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe 0 – 250 µm mittels Lasergranulometrie an Universität Kassel



LS Partikelgrößenmessgerät

30 Mär 2010

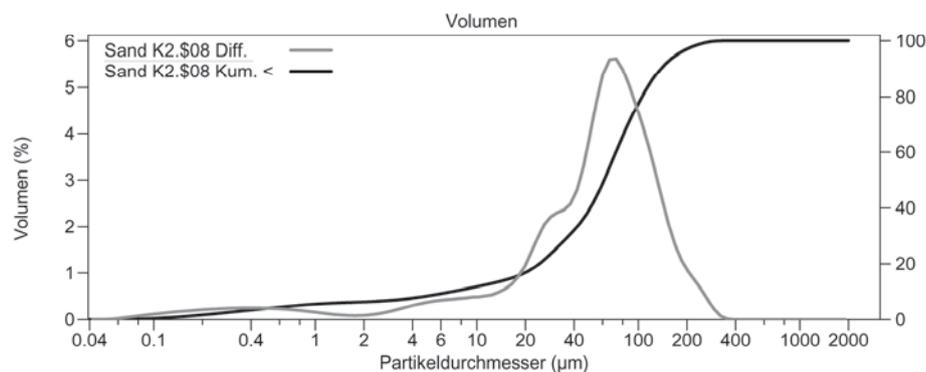
Dateiname:	Sand K1.\$01	Gruppen ID:	Sand K1
Proben ID:	Sand K1 0 - 250		
Messung Nr.:	1		
Kommentar:	0,1 g auf 15ml 4min Disp 4 / 40		
Optisches Modell:	SiO2 - Spehr.rfd Mit PIDS		
LS 230	Small Volume Module+		
Startzeit:	10:52 23 Mär 2010	Messzeit:	90 Sekunden
Messkonzentration:	6%	PIDS Konz.:	46%
Flüssigk.:	Water		
Software:	3.01	Firmware:	2.02 0



LS Partikelgrößenmessgerät

30 Mär 2010

Dateiname:	Sand K2.\$08	Gruppen ID:	Sand K2
Proben ID:	Sand K2 tr. 0-250		
Messung Nr.:	8		
Kommentar:	0,1 g auf 15ml 4min Disp. 4 / 40		
Optisches Modell:	SiO2 - Spehr.rfd Mit PIDS		
LS 230	Small Volume Module+		
Startzeit:	12:54 22 Mär 2010	Messzeit:	91 Sekunden
Messkonzentration:	7%	PIDS Konz.:	49%
Flüssigk.:	Water		
Software:	3.01	Firmware:	2.02 0





Anlage 16, Blatt 3

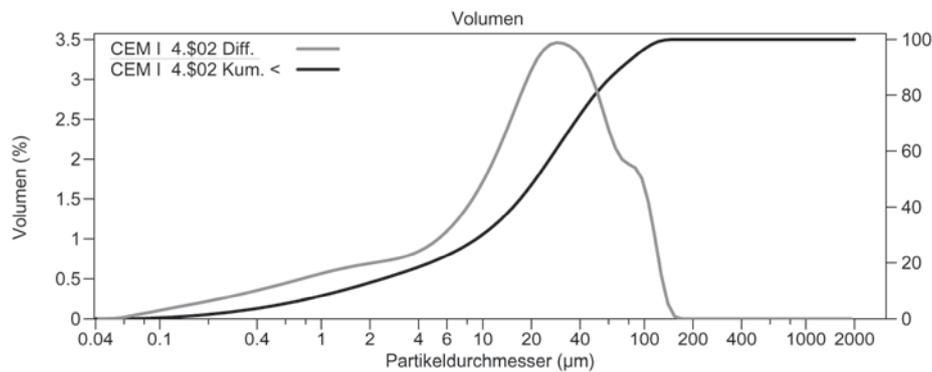
Zu Absatz 4.4.1: Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe 0 – 250 µm mittels Lasergranulometrie an Universität Kassel



LS Partikelgrößenmessgerät

30 Mär 2010

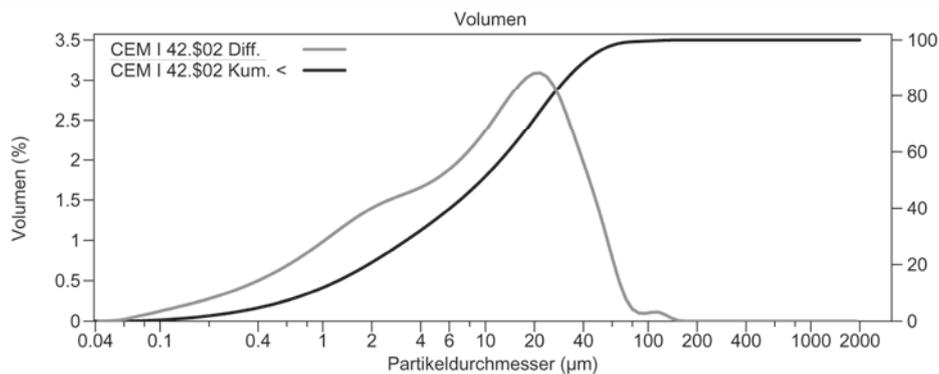
Dateiname:	CEM I 4.\$02	Gruppen ID:	CEM I 42,5 Lagerdorf
Proben ID:	CEM I 42,5 Lagerdorf		
Messung Nr.:	2		
Kommentar:	0,1g auf 15 ml 30s Disp. 4/40		
Optisches Modell:	Fraunhofer.rfd Mit PIDS		
LS 230	Small Volume Module+		
Startzeit:	11:52 24 Mär 2010	Messzeit:	90 Sekunden
Messkonzentration:	6%	PIDS Konz.:	47%
Flüssigk.:	Water		
Software:	3.01	Firmware:	2.02 0



LS Partikelgrößenmessgerät

30 Mär 2010

Dateiname:	CEM I 42.\$02	Gruppen ID:	CEM I 42,5 Iso
Proben ID:	CEM I 42,5 Iso		
Messung Nr.:	2		
Kommentar:	0,125 g auf 15ml 1min 4/40 Disp		
Optisches Modell:	Fraunhofer.rfd Mit PIDS		
LS 230	Small Volume Module+		
Startzeit:	13:31 30 Mär 2010	Messzeit:	91 Sekunden
Messkonzentration:	8%	PIDS Konz.:	48%
Flüssigk.:	2-Propanol		
Software:	3.01	Firmware:	2.02 0





Anlage 16, Blatt 4

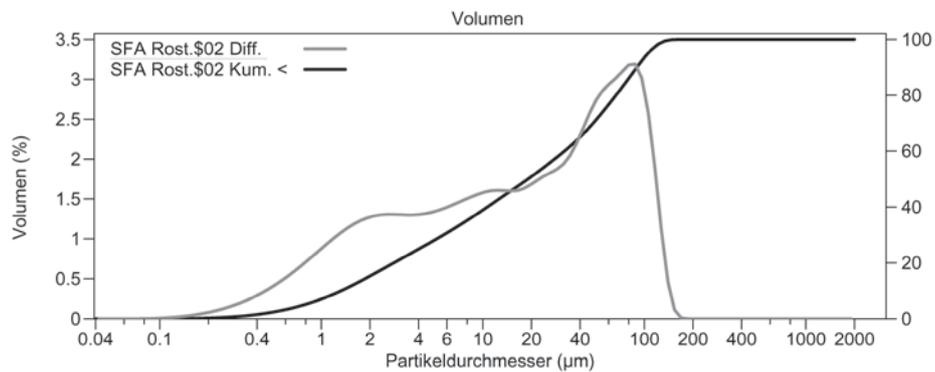
Zu Absatz 4.4.1: Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe 0 – 250 µm mittels Lasergranulometrie an Universität Kassel



LS Partikelgrößenmessgerät

30 Mär 2010

Dateiname:	SFA Rost.\$02	Gruppen ID:	SFA Rostock
Proben ID:	SFA Rostock		
Messung Nr.:	2		
Kommentar:	0,25 g auf 15ml 2min Disp 4 / 40		
Optisches Modell:	Fraunhofer.rfd Mit PIDS		
LS 230	Small Volume Module+		
Startzeit:	12:53 23 Mär 2010	Messzeit:	91 Sekunden
Messkonzentration:	18%	PIDS Konz.:	77%
Flüssigk.:	Water		
Software:	3.01	Firmware:	2.02 0





Anlage 16, Blatt 5

Zu Absatz 4.4.1: Angenommene Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe für Berechnung [Universität Kassel (2010)]

x ₀ [µm]	Korngrößenverteilungen für Berechnung an Uni Kassel													
	Summenlinie (Verteilungsfunktion)					Einzelwerte (Dichtefunktion)								
	SFA	HRO	CEMI 42,5	K1	K2	D1	D2	SFA	HRO	CEMI 42,5	K1	K2	D1	D2
0,0439	0	0,0023	0,0008	0,0023	0,0003	0,0003	0	0	0,0023	0,0008	0,0023	0,0023	0,0003	0
0,048191	0	0,0056	0,0023	0,0054	0,0009	0,0009	0	0	0,0032	0,0014	0,0032	0,0031	0,0006	0
0,052903	0	0,0109	0,0069	0,0106	0,0029	0,0029	0	0	0,0055	0,0047	0,0055	0,0052	0,0020	0
0,058075	0	0,0226	0,0183	0,0216	0,0076	0,0076	0	0	0,0116	0,0113	0,0116	0,0110	0,0047	0
0,063753	0,0000	0,0466	0,0364	0,0448	0,0152	0,0152	0	0,0000	0,0241	0,0181	0,0241	0,0232	0,0076	0
0,069985	0,0000	0,0892	0,0607	0,0856	0,0254	0,0254	0	0,0000	0,0426	0,0244	0,0426	0,0409	0,0102	0
0,076827	0,0004	0,1503	0,0915	0,1430	0,0383	0,0383	0	0,0003	0,0611	0,0308	0,0611	0,0574	0,0129	0
0,084338	0,0017	0,2288	0,1293	0,2153	0,0542	0,0542	0	0,0014	0,0785	0,0378	0,0785	0,0723	0,0158	0
0,092584	0,0051	0,3251	0,1744	0,3023	0,0731	0,0731	0	0,0034	0,0963	0,0451	0,0963	0,0871	0,0189	0
0,10164	0,0117	0,4413	0,2268	0,4048	0,0950	0,0950	0	0,0066	0,1162	0,0524	0,1162	0,1025	0,0220	0
0,11157	0,0225	0,5774	0,2863	0,5217	0,1200	0,1200	0	0,0108	0,1361	0,0595	0,1361	0,1169	0,0250	0
0,12248	0,0388	0,7325	0,3516	0,6522	0,1474	0,1474	0	0,0163	0,1551	0,0653	0,1551	0,1306	0,0274	0
0,13445	0,0617	0,9074	0,4223	0,7979	0,1771	0,1771	0	0,0229	0,1749	0,0707	0,1749	0,1457	0,0297	0
0,1476	0,0927	1,1022	0,4982	0,9552	0,2090	0,2090	0	0,0310	0,1947	0,0759	0,1947	0,1572	0,0319	0
0,16203	0,1334	1,3171	0,5791	1,1221	0,2430	0,2430	0	0,0407	0,2150	0,0809	0,2150	0,1670	0,0340	0
0,17787	0,1863	1,5528	0,6648	1,2986	0,2790	0,2790	0	0,0529	0,2356	0,0857	0,2356	0,1764	0,0360	0
0,19526	0,2533	1,8111	0,7549	1,4872	0,3169	0,3169	0	0,0670	0,2583	0,0901	0,2583	0,1886	0,0379	0
0,21435	0,3367	2,0934	0,8490	1,6848	0,3565	0,3565	0	0,0835	0,2823	0,0942	0,2823	0,1976	0,0396	0
0,2353	0,4392	2,4008	0,9469	1,8894	0,3977	0,3977	0	0,1025	0,3074	0,0979	0,3074	0,2046	0,0412	0
0,25831	0,5638	2,7346	1,0481	2,1006	0,4403	0,4403	0	0,1246	0,3337	0,1012	0,3337	0,2111	0,0426	0
0,28356	0,7135	3,0962	1,1520	2,3198	0,4840	0,4840	0	0,1497	0,3616	0,1040	0,3616	0,2192	0,0437	0
0,31128	0,8914	3,4879	1,2584	2,5441	0,5287	0,5287	0	0,1780	0,3917	0,1063	0,3917	0,2243	0,0447	0
0,34172	1,1011	3,9114	1,3664	2,7714	0,5740	0,5740	0	0,2096	0,4236	0,1080	0,4236	0,2273	0,0454	0
0,37512	1,3461	4,3688	1,4756	3,0006	0,6199	0,6199	0	0,2450	0,4573	0,1092	0,4573	0,2292	0,0458	0
0,4118	1,6303	4,8614	1,5852	3,2322	0,6658	0,6658	0	0,2842	0,4927	0,1096	0,4927	0,2316	0,0459	0
0,45206	1,9576	5,3922	1,6946	3,4633	0,7115	0,7115	0	0,3273	0,5308	0,1094	0,5308	0,2311	0,0457	0
0,49625	2,3319	5,9636	1,8030	3,6917	0,7568	0,7568	0	0,3743	0,5713	0,1083	0,5713	0,2284	0,0452	0
0,54477	2,7571	6,5779	1,9094	3,9155	0,8011	0,8011	0	0,4252	0,6143	0,1065	0,6143	0,2239	0,0444	0
0,59803	3,2374	7,2371	2,0131	4,1345	0,8442	0,8442	0	0,4802	0,6592	0,1037	0,6592	0,2190	0,0431	0
0,65649	3,7765	7,9441	2,1132	4,3456	0,8857	0,8857	0	0,5391	0,7070	0,1001	0,7070	0,2110	0,0415	0
0,72068	4,3779	8,7016	2,2087	4,5472	0,9252	0,9252	0	0,6015	0,7575	0,0955	0,7575	0,2016	0,0395	0
0,79113	5,0448	9,5122	2,2986	4,7366	0,9624	0,9624	0	0,6668	0,8106	0,0900	0,8106	0,1894	0,0372	0
0,86848	5,7797	10,3777	2,3822	4,9134	0,9969	0,9969	0	0,7349	0,8655	0,0836	0,8655	0,1768	0,0345	0



Anlage 16, Blatt 6

Zu Absatz 4.4.1: Angenommene Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe für
Berechnung an Universität Kassel

upper bin	SFA HRO	CEM I 42,5	K1	K2	D1	D2	SFA HRO	CEM I 42,5	K1	K2	D1	D2
0,95338	6,5845	11,3004	2,4586	5,0750	1,0284	0	0,8048	0,9227	0,0764	0,1616	0,0315	0
1,0466	7,4600	12,2822	2,5271	5,2220	1,0568	0	0,8755	0,9818	0,0686	0,1470	0,0283	0
1,1489	8,4053	13,3245	2,5875	5,3518	1,0818	0	0,9453	1,0422	0,0604	0,1298	0,0250	0
1,2612	9,4181	14,4274	2,6397	5,4667	1,1035	0	1,0128	1,1029	0,0522	0,1149	0,0217	0
1,3845	10,4944	15,5903	2,6841	5,5668	1,1221	0	1,0763	1,1629	0,0444	0,1001	0,0186	0
1,5199	11,6288	16,8119	2,7215	5,6571	1,1381	0	1,1344	1,2216	0,0374	0,0902	0,0160	0
1,6685	12,8141	18,0897	2,7533	5,7386	1,1521	0	1,1853	1,2778	0,0319	0,0816	0,0140	0
1,8316	14,0420	19,4206	2,7815	5,8172	1,1649	0	1,2279	1,3309	0,0281	0,0786	0,0128	0
2,0107	15,3033	20,8004	2,8082	5,8971	1,1775	0	1,2612	1,3798	0,0267	0,0798	0,0127	0
2,2072	16,5882	22,2246	2,8361	5,9855	1,1912	0	1,2849	1,4242	0,0279	0,0884	0,0137	0
2,423	17,8876	23,6885	2,8681	6,0881	1,2073	0	1,2994	1,4639	0,0320	0,1026	0,0161	0
2,6599	19,1935	25,1879	2,9071	6,2109	1,2271	0	1,3059	1,4994	0,0390	0,1228	0,0198	0
2,92	20,5000	26,7349	2,9556	6,3603	1,2518	0	1,3065	1,5470	0,0486	0,1494	0,0247	0
3,2054	21,8036	28,2818	3,0160	6,5394	1,2823	0	1,3036	1,5470	0,0603	0,1792	0,0305	0
3,5188	23,1042	29,8745	3,0893	6,7540	1,3190	0	1,3006	1,5927	0,0733	0,2146	0,0367	0
3,8628	24,4045	31,4997	3,1758	7,0029	1,3617	0	1,3003	1,6252	0,0865	0,2489	0,0427	0
4,2405	25,7097	33,1612	3,2743	7,2881	1,4096	0	1,3052	1,6615	0,0985	0,2852	0,0479	0
4,6551	27,0263	34,8642	3,3827	7,6024	1,4612	0	1,3166	1,7030	0,1084	0,3143	0,0517	0
5,1102	28,3609	36,6149	3,4981	7,9457	1,5149	0	1,3346	1,7508	0,1154	0,3433	0,0537	0
5,6098	29,7198	38,4204	3,6171	8,3110	1,5687	0	1,3589	1,8055	0,1190	0,3653	0,0538	0
6,1582	31,1083	40,2877	3,7368	8,6942	1,6211	0	1,3886	1,8673	0,1197	0,3832	0,0524	0
6,7603	32,5305	42,2240	3,8552	9,0902	1,6713	0	1,4222	1,9364	0,1185	0,3960	0,0502	0
7,4212	33,9885	44,2370	3,9721	9,4952	1,7194	0	1,4579	2,0130	0,1169	0,4050	0,0481	0
8,1467	35,4825	46,3345	4,0885	9,9155	1,7662	0	1,4940	2,0974	0,1163	0,4203	0,0468	0
8,9432	37,0111	48,5247	4,2057	10,3449	1,8127	0	1,5286	2,1902	0,1172	0,4294	0,0465	0
9,8175	38,5714	50,8161	4,3251	10,7932	1,8596	0	1,5603	2,2915	0,1194	0,4483	0,0469	0
10,777	40,1579	53,2167	4,4483	11,2443	1,9078	0	1,5865	2,4005	0,1232	0,4511	0,0482	0
11,831	41,7615	55,7320	4,5776	11,7161	1,9584	0	1,6036	2,5153	0,1294	0,4718	0,0505	0
12,988	43,3705	58,3646	4,7157	12,2061	2,0119	0	1,6090	2,6326	0,1380	0,4900	0,0535	0
14,257	44,9749	61,1126	4,8648	12,7479	2,0685	0	1,6045	2,7480	0,1491	0,5417	0,0567	0
15,651	46,5745	63,9698	5,0273	13,3536	2,1284	0	1,5995	2,8572	0,1625	0,6058	0,0598	0
17,181	48,1803	66,9247	5,2065	14,0525	2,1918	0	1,6058	2,9549	0,1792	0,6989	0,0634	0
18,861	49,8127	69,9587	5,4059	14,8999	2,2593	0	1,6324	3,0340	0,1994	0,8474	0,0675	0
20,705	51,4910	73,0425	5,6261	15,9463	2,3303	0	1,6783	3,0838	0,2201	1,0464	0,0711	0
22,729	53,2237	76,1339	5,8658	17,2816	2,4040	0	1,7327	3,0914	0,2398	1,3353	0,0736	0
24,951	55,0077	79,1785	6,1226	18,9005	2,4791	0	1,7840	3,0445	0,2567	1,6189	0,0752	0



Anlage 16, Blatt 7

Zu Absatz 4.4.1: Angenommene Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe für Berechnung an Universität Kassel

upper bin	SFA HRO	CEMI 42,5	K1	K2	D1	D2	SFA HRO	CEMI 42,5	K1	K2	D1	D2
27,391	56,8342	82,1155	6,3939	20,7888	2,5558	0	1,8265	2,9371	0,2714	1,8883	0,0766	0
30,068	58,7046	84,8888	6,6720	22,8334	2,6336	0	1,8704	2,7733	0,2781	2,0447	0,0778	0
33,008	60,6398	87,4562	6,9321	24,9596	2,7072	0	1,9352	2,5673	0,2601	2,1262	0,0737	0
36,235	62,6796	89,7943	7,1396	27,1377	2,7682	0	2,0398	2,3382	0,2076	2,1781	0,0610	0
39,778	64,8719	91,8956	7,2795	29,4348	2,8122	0	2,1923	2,1013	0,1399	2,2971	0,0440	0
43,667	67,2510	93,7580	7,3916	32,0056	2,8461	0	2,3791	1,8624	0,1120	2,5708	0,0339	0
47,936	69,8219	95,3739	7,5625	35,0451	2,8889	0,0338	2,5709	1,6159	0,1709	3,0395	0,0428	0,0338
52,622	72,5582	96,7257	7,9110	38,7225	2,9694	0,4740	2,7364	1,3518	0,3485	3,6774	0,0805	0,4403
57,767	75,4148	97,7906	8,4910	43,0701	3,1048	1,6862	2,8566	1,0649	0,5800	4,3476	0,1354	1,2121
63,414	78,3537	98,5565	9,1355	47,9712	3,2632	3,1636	2,9389	0,7659	0,6445	4,9011	0,1584	1,4774
69,614	81,3663	99,0441	9,5527	53,1539	3,3788	4,1649	3,0126	0,4875	0,4173	5,1828	0,1156	1,0013
76,42	84,4618	99,3162	9,6712	58,3536	3,4308	4,5713	3,0956	0,2722	0,1184	5,1997	0,0520	0,4065
83,891	87,6402	99,4633	9,7072	63,3397	3,4676	4,9594	3,1783	0,1471	0,0360	4,9860	0,0368	0,3881
92,092	90,8301	99,5617	9,8812	68,0015	3,5610	6,3243	3,1899	0,0984	0,1740	4,6618	0,0934	1,3648
101,1	93,8435	99,6577	10,5404	72,2899	3,7808	9,8363	3,0134	0,0960	0,6592	4,2884	0,2198	3,5121
110,98	96,4174	99,7679	11,8158	76,1679	4,1189	15,8144	2,5739	0,1103	1,2754	3,8780	0,3381	5,9780
121,83	98,3094	99,8786	13,6913	79,6023	4,5305	24,1347	1,8919	0,1107	1,8755	3,4344	0,4116	8,3204
133,74	99,4122	99,9567	16,2514	82,5313	5,0004	34,4143	1,1028	0,0781	2,5602	2,9290	0,4700	10,2795
146,81	99,8736	99,9919	19,7322	84,9347	5,5649	46,0557	0,4614	0,0352	3,4808	2,4034	0,5645	11,6414
161,17	99,9864	99,9994	24,3956	86,8364	6,3084	58,2009	0,1128	0,0075	4,6633	1,9017	0,7435	12,1452
176,92	99,99699	100	30,4181	88,3201	7,3678	69,7676	0,0133	0,0006	6,0225	1,4837	1,0594	11,5667
194,22	100	100	37,8270	89,4972	8,9253	79,7799	0,0003	0	7,4089	1,1771	1,5575	10,0124
213,21	100	100	46,3812	90,4524	11,1363	87,6099	0	0	8,5542	0,9551	2,2109	7,8299
234,05	100	100	55,4602	91,2305	13,9928	93,0694	0	0	9,0790	0,7781	2,8566	5,4595
256,94	100	100	63,7427	92,6482	19,3813	96,1634	0	0	8,2825	1,4178	5,3884	3,0941
282,06	100	100	71,2174	93,1486	24,3676	98,0198	0	0	7,4748	0,5004	4,9863	1,8563
309,63	100	100	77,1794	93,6978	29,4896	99,0562	0	0	5,9620	0,5492	5,1220	1,0365
339,9	100	100	81,4738	94,3008	34,6375	99,6464	0	0	4,2944	0,6030	5,1479	0,5902
373,13	100	100	84,3161	94,9627	39,7998	99,8686	0	0	2,8422	0,6619	5,1623	0,2222
409,61	100	100	86,2601	95,6894	45,0602	99,9001	0	0	1,9441	0,7267	5,2604	0,0315
449,66	100	100	88,0364	96,4872	50,6751	99,9154	0	0	1,7763	0,7978	5,6149	0,0153
493,62	100	100	89,9633	97,3629	56,8268	99,9322	0	0	1,9269	0,8757	6,1517	0,0168
541,88	100	100	90,8394	97,6416	60,1862	99,9393	0	0	0,8761	0,2787	3,3594	0,0071
594,85	100	100	91,5938	97,8334	63,3062	99,9453	0	0	0,7544	0,1918	3,1199	0,0059
653,01	100	100	92,4219	98,0439	66,7311	99,9518	0	0	0,8281	0,2105	3,4249	0,0065
716,85	100	100	93,3310	98,2750	70,4909	99,9590	0	0	0,9091	0,2311	3,7598	0,0072

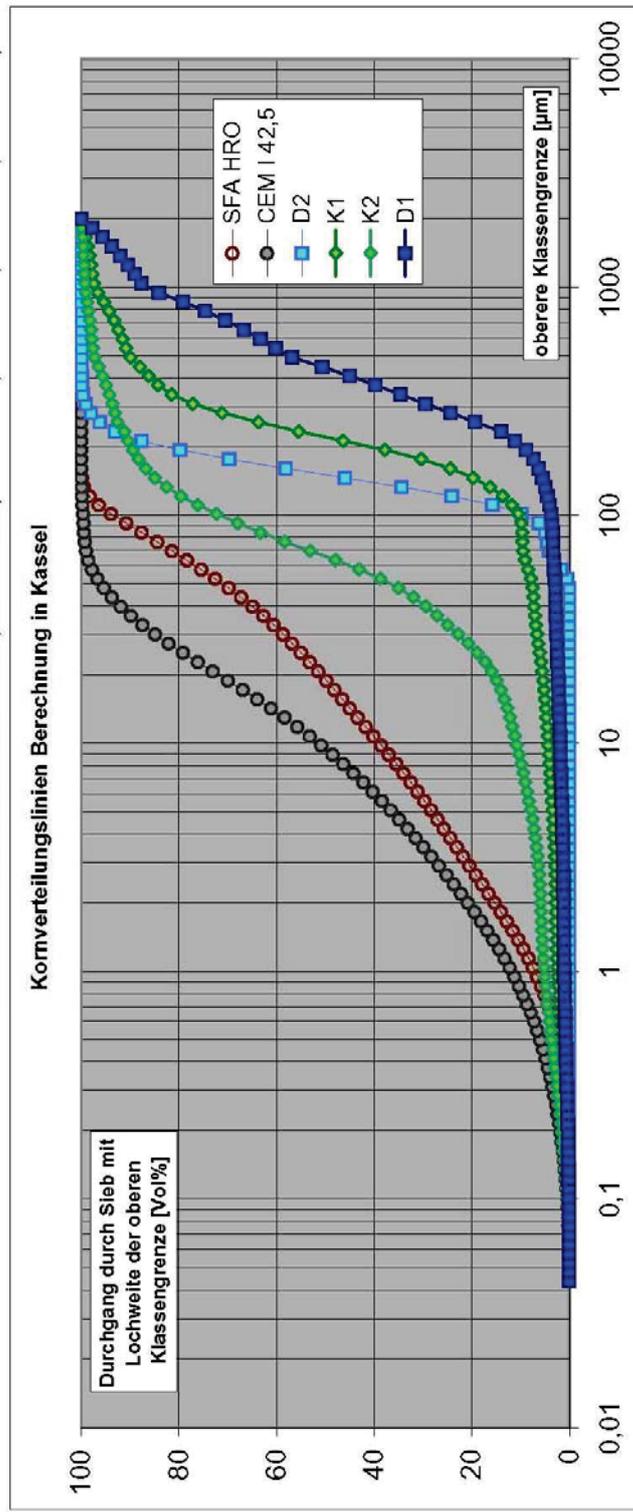


Anlage 16, Blatt 8

Zu Absatz 4.4.1: Angenommene Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe für Berechnung an Universität Kassel

upper bin	SFA HRO	CEM I 42,5	K1	K2	D1	D2	SFA HRO	CEM I 42,5	K1	K2	D1	D2
786,93	100	100	94,3289	98,5287	74,6183	99,9669	0	0	0,9980	0,2537	4,1274	0,0079
863,87	100	100	95,4244	98,8072	79,1491	99,9755	0	0	1,0965	0,2785	4,5309	0,0086
948,32	100	100	96,6271	99,1129	84,1230	99,9850	0	0	1,2026	0,3057	4,9738	0,0095
1041	100	100	97,4713	99,3287	87,6937	99,9912	0	0	0,8442	0,2158	3,5707	0,0062
1142,8	100	100	97,7400	99,4000	89,0011	99,9921	0	0	0,2687	0,0713	1,3074	0,0009
1254,5	100	100	98,0349	99,4782	90,4364	99,9931	0	0	0,2949	0,0782	1,4353	0,0010
1377,2	100	100	98,3586	99,5640	92,0120	99,9943	0	0	0,3237	0,0859	1,5756	0,0011
1511,8	100	100	98,7140	99,6583	93,7416	99,9955	0	0	0,3564	0,0942	1,7296	0,0012
1659,6	100	100	99,1042	99,7617	95,6403	99,9969	0	0	0,3901	0,1035	1,8987	0,0014
1821,9	100	100	99,5325	99,8753	97,7246	99,9984	0	0	0,4283	0,1136	2,0843	0,0015
2000	100	100	100	100	100	100	0	0	0,4675	0,1247	2,2754	0,0016

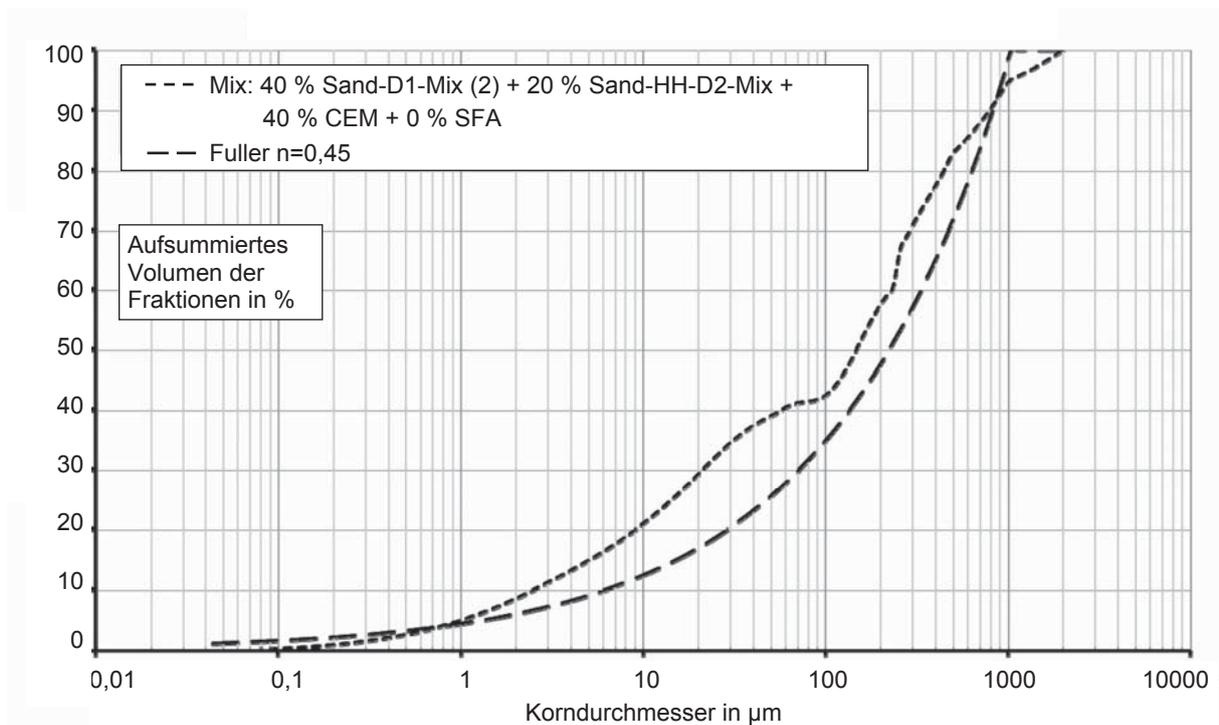
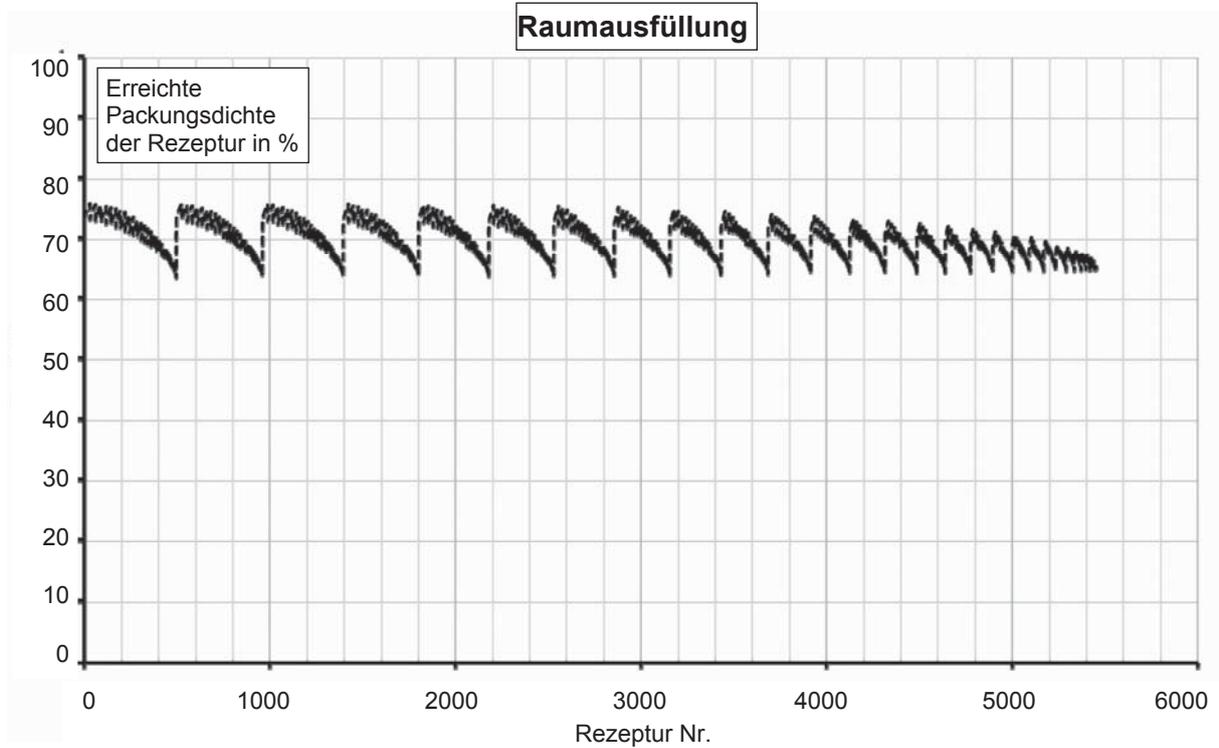
Kontrollsummen: 100,00 100,00 100,00 100,00 100,00





Anlage 17, Blatt 1

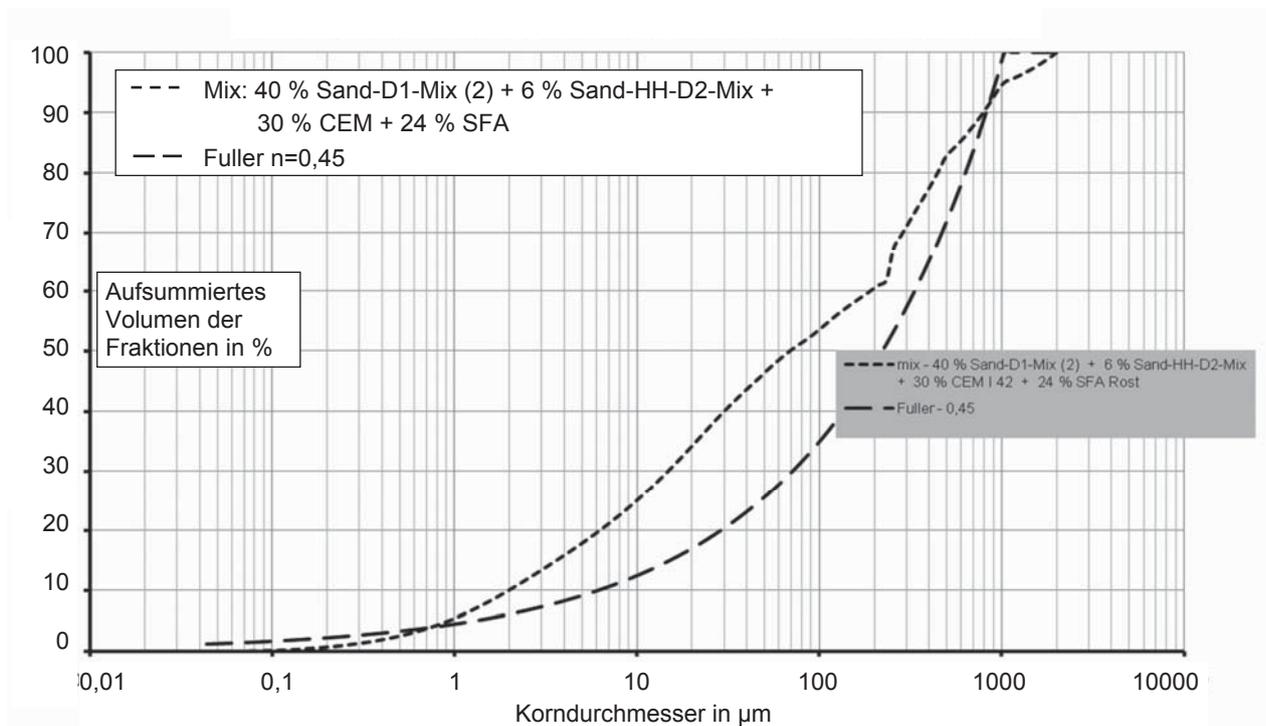
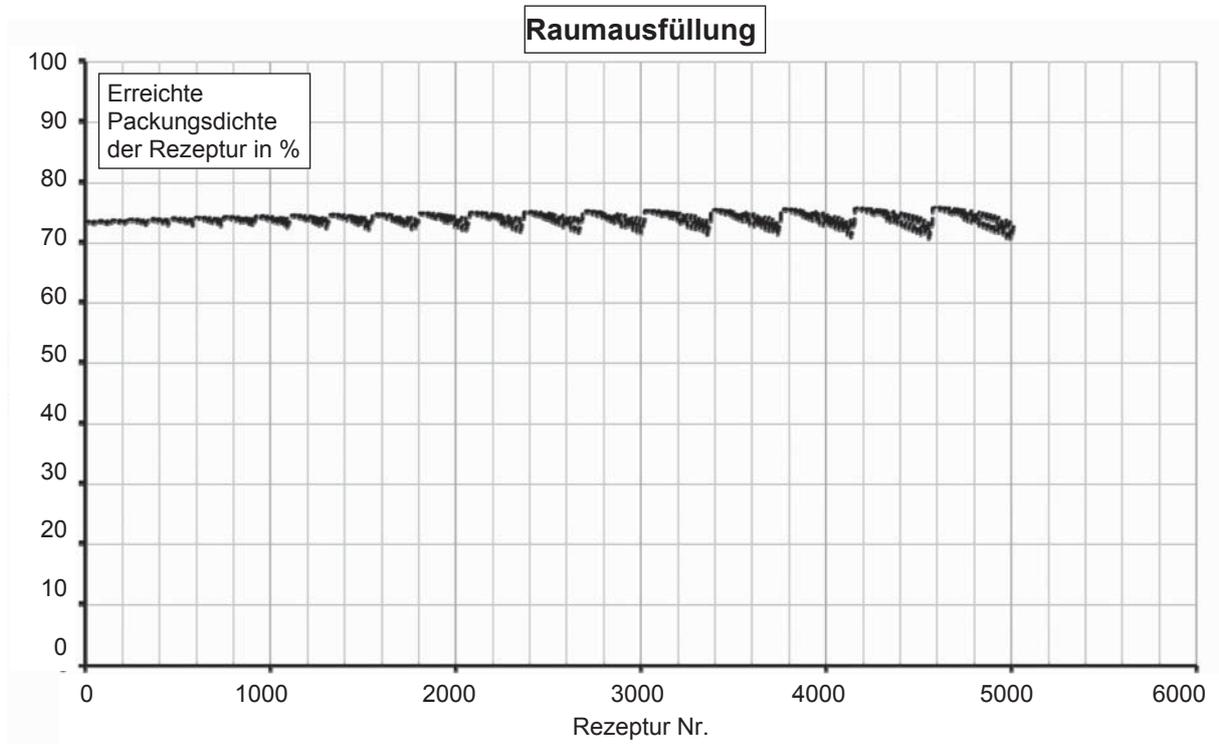
Zu Absatz 4.4.1: Ergebnisse des Berechnungsdurchlaufes 1 der empirisch-numerischen Berechnung der erreichbaren Packungsdichte und Korngrößenzusammensetzung des dichtesten Gemisches [Universität Kassel (2010)]





Anlage 17, Blatt 2

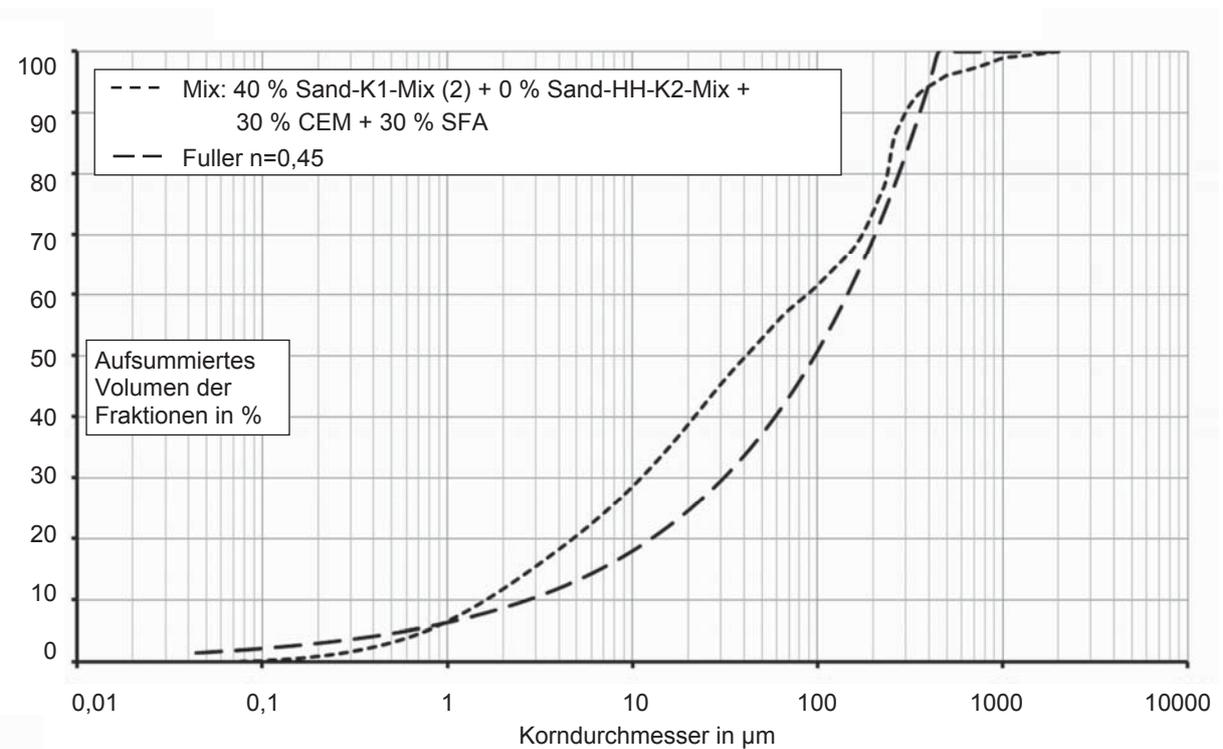
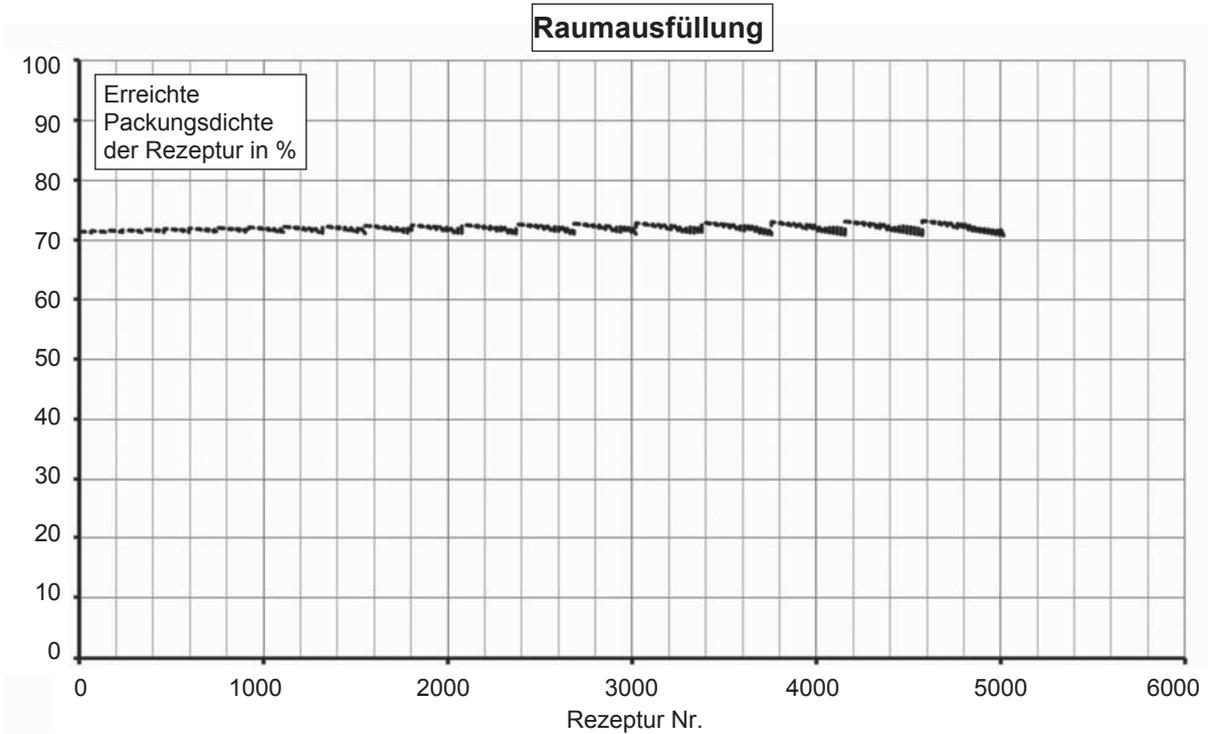
Zu Absatz 4.4.1: Ergebnisse des Berechnungsdurchlaufes 2 der empirisch-numerischen Berechnung der erreichbaren Packungsdichte an der Universität Kassel und Korngrößenzusammensetzung des dichtesten Gemisches





Anlage 17, Blatt 3

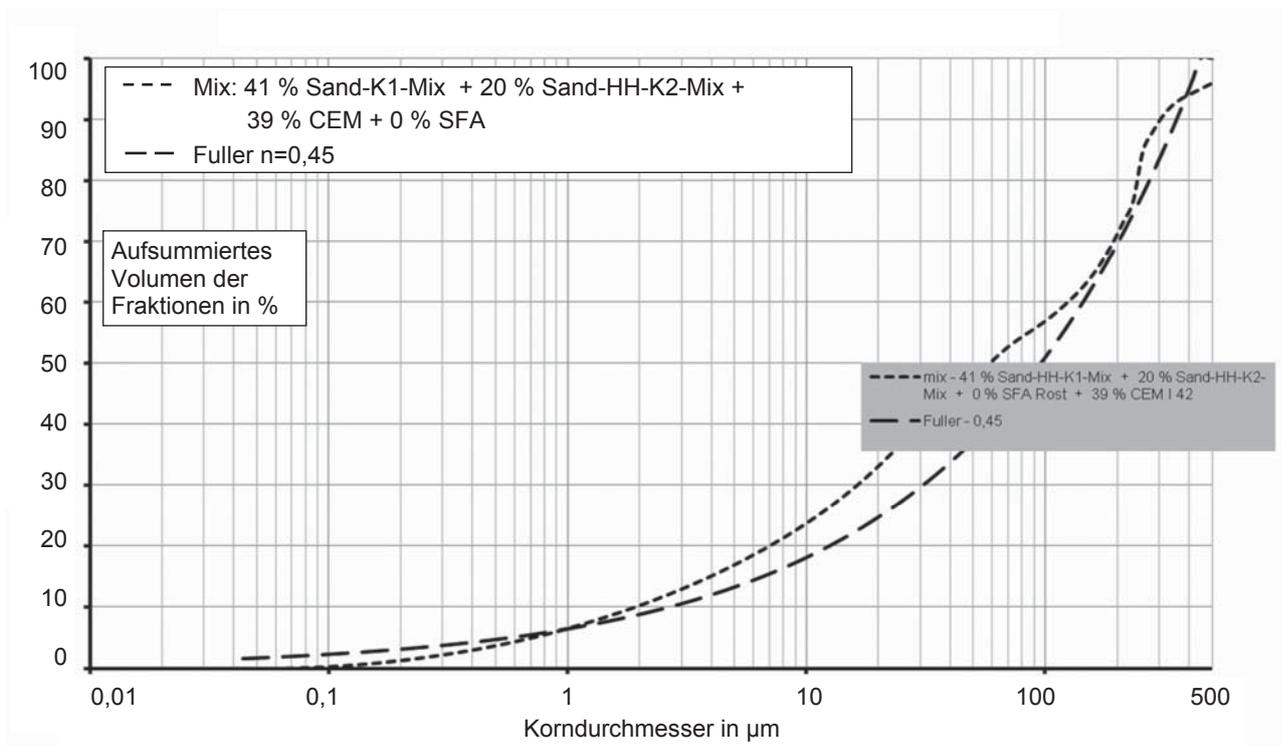
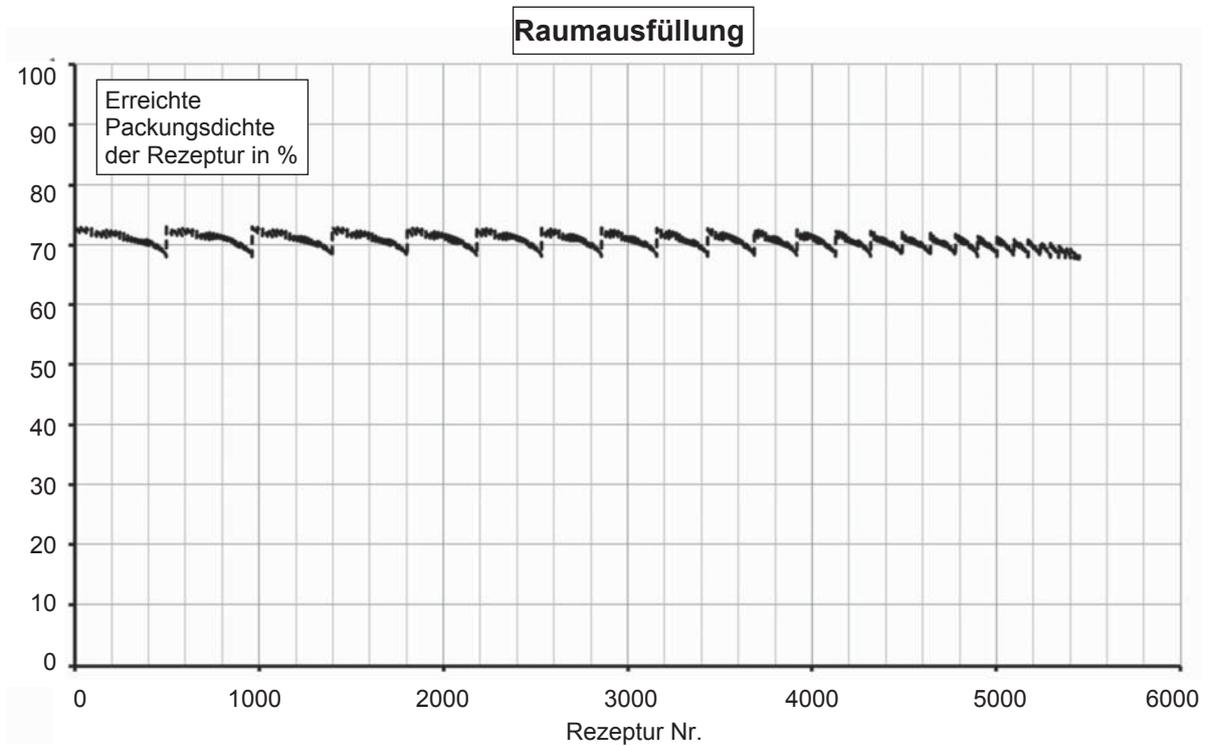
Zu Absatz 4.4.1: Ergebnisse des Berechnungsdurchlaufes 3 der empirisch-numerischen Berechnung der erreichbaren Packungsdichte an der Universität Kassel und Korngrößenzusammensetzung des dichtesten Gemisches





Anlage 17, Blatt 4

Zu Absatz 4.4.1: Ergebnisse des Berechnungsdurchlaufes 4 der empirisch-numerischen Berechnung der erreichbaren Packungsdichte an der Universität Kassel und Korngrößenzusammensetzung des dichtesten Gemisches





Anlage 18, Blatt 1

Zu Absatz 4.4.2: Ergebnisse der Bestimmung des Wassersättigungspunkte nach Punkte und „verbessert“ für Ausgangsstoffe für verschiedene Rezepturen

Punkte-Versuche

Die Kennwerte der Korgemische beziehen sich alle auf ein Größtkorn von 2 mm.
Einwaagemenge Sand oder Gemisch = 100,00 g

(Gemäß S. 106 liegen die Rohdichten ihrer Sande zwischen 2,62 und 2,663.)

Sand oder Rezeptur	Anteile der Ausgangsstoffe			Rohdichte Gemisch [g/cm ³]	WSP gemäß Punkte-Versuch		Datum und Durchführender des Versuchs	Darstellung des Hohlraumvolumens in Volumen-%						Bemerkungen	
	D1	D2	K1 K2 CEM I SFA		[M%]	[Vol%] Mittelwert		100%	80%	60%	40%	20%	0%		
CEMI 42,5			10	3,019	28,48	85,98	02.08.11 Steg.								nach Punkte, 12 x von Hand aufgestoßen
CEMI 42,5			10	3,019	28,55	86,19	02.08.11 Steg.								nach Punkte, 12 x von Hand aufgestoßen
CEMI 42,5			10	3,019	28,59	86,31	02.08.11 Steg.								nach Punkte, 12 x von Hand aufgestoßen
SFA			10	1,984	23,05	44,59	21.07.11 Steg.								n.P. 12 x Ausstoßen von Hand
SFA			10	1,984	22,24	43,02	21.07.11 Steg.								n.P. 12 x Ausstoßen von Hand
SFA			10	1,934	22,65	43,81	21.07.11 Steg.								n.P. 12 x Ausstoßen von Hand
D1	10			2,607	16,74	43,64	02.02.10 Steg.								n.P.
D1	10			2,607	18,63	48,56	21.07.11 Steg.								n.P. 12 x Ausstoßen von Hand, zu feucht
D1	10			2,607	17,79	46,37	21.07.11 Steg.								n.P. 12 x Ausstoßen von Hand
D1	10			2,607	17,68	46,09	21.07.11 Steg.								n.P. 12 x Ausstoßen von Hand
D2	10			2,635	20,00	52,70	06.04.10 Dose								n.P., kleiner Edelstahlbecher
D1+D2	5	5		2,621	19,09	50,03	15.02.10 Steg.								n.P.
D1+D2, 2	5	5		2,621	19,10	50,06	15.02.10 Steg.								n.P.
D1+D2, 3	5	5		2,621	18,88	49,48	15.02.10 Steg.								n.P.
D1+D2, 4	5	5		2,621	18,76	49,17	15.02.10 Steg.								n.P.
D1+D2	5	5		2,621	17,22	45,13	13.04.10 Steg.								n.P., kleiner Edelstahlbecher
D1+D2, 2	5	5		2,621	17,20	45,08	13.04.10 Steg.								n.P., kleiner Edelstahlbecher
D1+D2, 3	5	5		2,621	17,14	44,92	13.04.10 Steg.								n.P., kleiner Edelstahlbecher
10xD1+6xD2	6,3	3,8		2,617	17,51	45,83	17.03.10 Steg.								n.P.
10xD1+6xD2, 2	6,3	3,8		2,617	17,42	45,59	17.03.10 Steg.								n.P.
10xD1+6xD2, 3	6,3	3,8		2,617	17,48	45,75	17.03.10 Steg.								n.P.
10xD1+8xD2	5,6	4,4		2,619	17,62	46,15	17.03.10 Steg.								n.P.
10xD1+8xD2, 2	5,6	4,4		2,619	17,61	46,13	17.03.10 Steg.								n.P.
10xD1+8xD2, 3	5,6	4,4		2,619	17,59	46,07	17.03.10 Steg.								n.P.
8xD1+10xD2	4,4	5,6		2,622	17,74	46,52	17.03.10 Steg.								n.P.
8xD1+10xD2, 2	4,4	5,6		2,622	17,73	46,63	17.03.10 Steg.								n.P.
8xD1+10xD2, 3	4,4	5,6		2,622	17,92	46,99	17.03.10 Steg.								n.P.
6xD1+10xD2	3,8	6,3		2,536	18,99	48,15	17.03.10 Steg.								n.P.
6xD1+10xD2, 2	3,8	6,3		2,536	18,82	47,72	17.03.10 Steg.								n.P.
6xD1+10xD2, 3	3,8	6,3		2,536	18,84	47,77	17.03.10 Steg.								n.P.
4xD1+10xD2	2,9	7,1		2,528	20,83	52,66	17.03.10 Steg.								n.P.
4xD1+10xD2, 2	2,9	7,1		2,528	20,21	51,09	17.03.10 Steg.								n.P.
4xD1+10xD2, 3	2,9	7,1		2,528	19,85	50,18	17.03.10 Steg.								n.P.



Anlage 18, Blatt 2

Zu Absatz 4.4.2: Ergebnisse der Bestimmung des Wassersättigungspunktes nach Punkte und „verbessert“ für Ausgangsstoffe für verschiedene Rezepturen

Sand oder Rezeptur	Anteile der Ausgangsstoffe			Rohdichte Gemisch [g/cm ³]	WSP gemäß Punkte-Versuch		Datum und Durchführender des Versuchs	Darstellung des Hohlraumvolumens in Volumen-%						Bemerkungen	
	D1	D2	K1		[M%]	[Vol%]		Mittelwert	10%	20%	30%	40%	50%		60%
4xD1+10xD2	2,9	7,1		2,528	18,78	47,48	13.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
	2,9	7,1		2,528	18,83	47,60	13.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
	2,9	7,1		2,528	18,81	47,55	13.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
2xD1+10xD2	1,7	8,3		2,518	21,52	54,19	17.03.10 Steg.							n.P.	
	2,01+10xD2, 2	1,7	8,3	2,518	22,05	55,52	17.03.10 Steg.							n.P.	
	2xD1+10xD2, 3	1,7	8,3	2,518	22,34	56,25	17.03.10 Steg.							n.P.	
	2xD1+10xD2, 4	1,7	8,3	2,518	21,98	55,35	17.03.10 Steg.							n.P.	
9xD1+1xD2	9	1		2,580	15,34	39,57	13.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
	9xD1+1xD2, 2	9	1	2,580	15,41	39,75	13.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
	9xD1+1xD2, 3	9	1	2,580	15,42	39,78	13.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
8xD1+2xD2	8	2		2,571	15,14	38,93	13.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
	8xD1+2xD2, 2	8	2	2,571	15,26	39,24	13.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
	8xD1+2xD2, 3	8	2	2,571	15,07	38,75	13.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
7xD1+3xD2	7	3		2,563	15,25	39,08	13.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
	7xD1+3xD2, 2	7	3	2,563	15,18	38,90	13.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
	7xD1+3xD2, 3	7	3	2,563	15,23	39,03	13.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
2xD1+8xD2	2	8		2,521	19,62	49,46	14.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
	2xD1+8xD2, 2	2	8	2,521	19,60	49,41	14.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
	2xD1+8xD2, 3	2	8	2,521	19,58	49,36	14.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
1xD1+9xD2	1	9		2,513	20,63	51,83	14.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
	1xD1+9xD2, 2	1	9	2,513	20,60	51,76	14.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
	1xD1+9xD2, 3	1	9	2,513	20,60	51,76	14.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
0,5xD1+9,5xD2	0,5	9,5		2,508	21,53	54,00	14.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
	0,5xD1+9,5xD2, 2	0,5	9,5	2,508	21,57	54,10	14.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
	0,5xD1+9,5xD2, 3	0,5	9,5	2,508	21,79	54,66	14.04.10 Steg.							n.P., Kleiner Eeolstahlbecher	
K1	10			2,627	16,80	44,14	20.01.10 Steg.							nach Punkte	
	K1, 2	10		2,627	17,00	44,87	20.01.10 Steg.							nach Punkte	
	K1, 3	10		2,627	16,99	44,64	02.02.10 Steg.							nach Punkte	
K1	10			2,627	18,98	49,87	26.07.11 Steg.							nach Punkte, 12 x von Hand aufstoßen	
	K1, 2	10		2,627	18,87	49,58	26.07.11 Steg.							nach Punkte, 12 x von Hand aufstoßen	
	K1, 3	10		2,627	18,81	49,42	26.07.11 Steg.							nach Punkte, 12 x von Hand aufstoßen	
K2	10			2,636	18,50	48,76	20.01.10 Steg.							nach Punkte	
	K2, 2	10		2,636	19,00	50,08	20.01.10 Steg.							nach Punkte	
	K2, 3	10		2,636	18,80	49,55	20.01.10 Steg.							nach Punkte	
	K2, 4	10		2,636	18,77	49,47	20.01.10 Steg.							nach Punkte	
K1+K2	5	5		2,632	16,25	42,76	02.02.10 Steg.							nach Punkte	
	K1+K2, 2	5	5	2,632	15,90	41,84	02.02.10 Steg.							nach Punkte	
	K1+K2, 3	5	5	2,632	15,90	41,84	02.02.10 Steg.							n.P.	



Anlage 18, Blatt 3

Zu Absatz 4.4.2: Ergebnisse der Bestimmung des Wassersättigungspunkte nach Punkte und „verbessert“ für Ausgangsstoffe für verschiedene Rezepturen

Sand oder Rezeptur	Anteile der Ausgangsstoffe						Rohdichte Gemisch [g/cm ³]	WSP gemäß Punkte-Versuch [Vol%] Mittelwert	Datum und Durchführender des Versuchs	Bemerkungen
	D1	D2	K1	K2	CEM	SFA				
K1+K2, 4			5	5			2,632	16,07	02.02.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
K1+K2			5	5			2,632	14,94	13.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
K1+K2, 2			5	5			2,632	15,01	13.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
K1+K2, 3			5	5			2,632	14,94	13.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
9xK1+1xK2			9	1			2,628	15,82	14.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
9xK1+1xK2, 2			9	1			2,628	15,75	14.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
9xK1+1xK2, 3			9	1			2,628	15,85	14.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
8xK1+2xK2			8	2			2,628	15,83	14.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
8xK1+2xK2, 2			8	2			2,628	15,68	14.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
8xK1+2xK2, 3			8	2			2,628	15,72	14.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
7xK1+3xK2			7	3			2,630	15,77	14.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
7xK1+3xK2, 2			7	3			2,630	15,83	14.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
7xK1+3xK2, 3			7	3			2,630	15,76	14.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
6xK1+4xK2			6	4			2,631	15,95	14.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
6xK1+4xK2, 2			6	4			2,631	15,89	14.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
6xK1+4xK2, 3			6	4			2,631	15,72	14.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
3xK1+7xK2			3	7			2,630	17,10	23.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
3xK1+7xK2, 2			3	7			2,630	16,99	23.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
3xK1+7xK2, 3			3	7			2,630	17,03	23.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
2xK1+8xK2			2	8			2,628	17,71	23.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
2xK1+8xK2, 2			2	8			2,628	17,83	23.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
2xK1+8xK2, 3			2	8			2,628	17,95	23.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
1xK1+9xK2			1	9			2,628	18,85	23.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
1xK1+9xK2, 2			1	9			2,628	19,33	23.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
1xK1+9xK2, 3			1	9			2,628	19,08	23.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
4xK1+6xK2			4	6			2,632	17,90	28.04.10 Steg.	nach Punkte
4xK1+6xK2, 2			4	6			2,632	17,85	28.04.10 Steg.	n.P. Wasserüberschuss bei 18,02 M% intensives Rütteln durch viele kleine Schläge von Hand, eher noch zu hoher 2 min leichtes Schlagen von Hand
4xK1+6xK2, 3			4	6			2,632	17,90	28.04.10 Steg.	nach Punkte
4xK1+6xK2, 4			4	6			2,632	15,00	28.04.10 Dose	nach Punkte
4xK1+6xK2, 5			4	6			2,632	14,54	28.04.10 Steg.	n.P., kleiner Edelsatzbecher
CEM I 42,5					10		3,018	21,64	05.05.10 Steg.	Erschient leucht an der Oberfläche, aber es herrscht kein Wasserüberschub.
CEM I 42,5					10		3,018	21,60	05.05.10 Steg.	kein Wasserüberschub
CEM I 42,5					10		3,018	21,21	08.08.11 Steg.	mit Siebmachine gerüttelt, ≤ 10 min
SFA						10	1,934	11,56	09.06.10 Steg.	mit Siebmachine gerüttelt, ≤ 10 min
SFA						10	1,934	10,44	09.06.10 Steg.	mit Siebmachine gerüttelt, ≤ 10 min
SFA						10	1,934	10,87	09.06.10 Steg.	mit Siebmachine gerüttelt, ≤ 10 min



Anlage 18, Blatt 4

Zu Absatz 4.4.2: Ergebnisse der Bestimmung des Wassersättigungspunkte nach Punkte und „verbessert“ für Ausgangsstoffe für verschiedene Rezepturen

Sand oder Rezeptur	Anteile der Ausgangsstoffe			Rohdichte Gemisch [g/cm ³]	WSP gemäß Punkte-Versuch		Datum und Durchführender des Versuchs	Darstellung des Hohraumvolumens in Volumen-%										Bemerkungen
	D1	D2	K1 K2 CEM SFA		[M%]	[Vo%]		Mittelwert	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	
D1	10			2,607	15,90	41,45	08.08.11 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
D1	10			2,607	15,79	41,16	08.08.11 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
D1	10			2,607	15,76	41,08	08.08.11 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
D2	10			2,635	20,71	54,57	09.06.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
D2	10			2,635	20,47	53,94	09.06.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
D2	10			2,635	20,34	53,60	09.06.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
K1		10		2,627	15,41	40,49	08.08.11 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
K1		10		2,627	15,35	40,33	08.08.11 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
K1		10		2,627	15,37	40,38	08.08.11 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
K2			10	2,638	19,46	51,29	09.06.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
K2			10	2,636	19,48	51,34	09.06.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
K2			10	2,636	18,45	48,63	09.06.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
4xK1+6xK2, 6		4	6	2,632	13,79	36,30	28.04.10 Dose										mit Siebmachne gerüttelt >10 min	
4xK1+6xK2, 7		4	6	2,632	13,88	36,54	28.04.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt >10 min	
4xK1+6xK2, 8		4	6	2,632	14,12	37,17	28.04.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt	
9xK1+1xK2		9	1	2,626	11,94	31,36	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt	
9xK1+1xK2, 2		9	1	2,628	12,05	31,67	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt	
9xK1+1xK2, 3		9	1	2,628	12,42	32,64	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt	
7xK1+3xK2		7	3	2,630	12,38	32,56	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt	
7xK1+3xK2, 2		7	3	2,630	12,20	32,08	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt	
7xK1+3xK2, 3		7	3	2,630	12,23	32,16	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt	
9xK1+1xFA		9		2,365	11,82	27,95	28.04.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt	
9xK1+1xFA		9		2,365	11,43	27,03	28.04.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt	
9xK1+1xFA		9		2,365	11,40	26,96	28.04.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt	
9/11xK1+1/11xK2+1/11xFA		8,2	0,9	2,389	11,11	26,55	28.04.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt	
9/11xK1+1/11xK2+1/11xFA		8,2	0,9	2,389	10,75	25,69	28.04.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt	
9xK1+0,5xK2+0,5xFA		9	0,5	2,496	12,27	30,63	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
8xK1+1xK2+1xFA		8	1	2,366	10,11	23,92	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
8xK1+1xK2+1xFA		8	1	2,366	10,21	24,15	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
8xK1+1xK2+1xFA		8	1	2,366	10,12	23,94	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
6xK1+3xK2+1xFA		6	3	2,367	10,69	25,30	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
6xK1+3xK2+1xFA		6	3	2,367	10,82	25,61	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
6xK1+3xK2+1xFA		6	3	2,367	11,43	27,06	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
6xK1+2xK2+2xFA		6	2	2,104	11,78	24,78	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
6xK1+2xK2+2xFA		6	2	2,104	11,42	24,02	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	
6xK1+2xK2+2xFA		6	2	2,104	11,10	23,35	05.05.10 Steg.										mit Siebmachne gerüttelt, ≤ 10 min	



Anlage 18, Blatt 5

Zu Absatz 4.4.2: Ergebnisse der Bestimmung des Wassersättigungspunkte nach Punkte und „verbessert“ für Ausgangsstoffe und verschiedene Rezepturen

Sand oder Rezeptur	Anteile der Ausgangsstoffe			Rohdichte Gemisch [g/cm ³]	WSP gemäß Punkte-Versuch [M%] [Vol%] Mittelwert	Datum und Durchführender des Versuchs	Darstellung des Hohlraumvolumens in Volumen-%										Bemerkungen
	D1	D2	K1 K2 CEM SFA				10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
4xK1+3xCEMI+3xFA	4	3	3	1,957	14,67	26,70	09.06.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
4xK1+3xCEMI+3xFA	4	3	3	1,957	14,02	27,43	09.06.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
4xK1+3xCEMI+3xFA	4	3	3	1,957	15,17	29,68	09.06.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
2xK1+8xK2	2	8		2,634	16,38	43,15	09.06.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
2xK1+8xK2	2	8		2,634	16,26	42,83	09.06.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
2xK1+8xK2	2	8		2,634	16,25	42,80	09.06.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
9xD1+0,5xD2+0,5xFA	9	0,5	0,5	2,478	11,04	27,36	12.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
9xD1+0,5xD2+0,5xFA	9	0,5	0,5	2,478	10,07	24,95	12.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
9xD1+0,5xD2+0,5xFA	9	0,5	0,5	2,478	11,10	27,50	12.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
8xD1+1xD2+1xFA	8	1	1	2,349	9,82	23,07	12.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
8xD1+1xD2+1xFA	8	1	1	2,349	10,07	23,65	12.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
8xD1+1xD2+1xFA	8	1	1	2,349	9,71	22,81	12.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
6xD1+3xD2+1xFA	6	3	1	2,355	11,24	26,47	12.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
6xD1+3xD2+1xFA	6	3	1	2,355	10,87	25,59	12.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
6xD1+3xD2+1xFA	6	3	1	2,355	10,95	25,78	12.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
9xD1+0,5xD2+0,5xCEMI	9	0,5	0,5	2,629	11,47	30,15	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
9xD1+0,5xD2+0,5xCEMI	9	0,5	0,5	2,629	11,58	30,44	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
9xD1+0,5xD2+0,5xCEMI	9	0,5	0,5	2,629	11,11	29,21	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
8xD1+1xD2+1xCEMI	8	1	1	2,651	11,14	29,53	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
8xD1+1xD2+1xCEMI	8	1	1	2,651	10,91	28,92	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
8xD1+1xD2+1xCEMI	8	1	1	2,651	10,63	28,18	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
6xD1+3xD2+1xCEMI	6	3	1	2,666	12,30	32,67	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
6xD1+3xD2+1xCEMI	6	3	1	2,666	12,22	32,46	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
6xD1+3xD2+1xCEMI	6	3	1	2,666	11,75	31,21	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
6xD1+2xD2+2xCEMI	6	2	2	2,695	10,96	29,54	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
6xD1+2xD2+2xCEMI	6	2	2	2,695	10,15	27,35	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
6xD1+2xD2+2xCEMI	6	2	2	2,695	10,52	28,35	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
6xD1+1xD2+3xCEMI	6	1	3	2,733	10,58	28,92	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
6xD1+1xD2+3xCEMI	6	1	3	2,733	10,30	28,15	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
6xD1+1xD2+3xCEMI	6	1	3	2,733	10,28	28,10	19.05.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
4xD1+0,6xD2+3xCEMI+2,4xFA	4	0,6	3	2,107	12,36	28,04	09.06.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
4xD1+0,6xD2+3xCEMI+2,4xFA	4	0,6	3	2,107	13,59	28,63	09.06.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min
4xD1+0,6xD2+3xCEMI+2,4xFA	4	0,6	3	2,107	14,57	30,69	09.06.10 Steg.										mit Siebmasschine gerüteilt, ≤ 10 min



Anlage 19, Blatt 1

Zu Kapitel 4.5.3:

Rezepturen der Vor- und Hauptversuche

Rezepturen der Vorversuche

Herstelldatum	Name	Anteile in Massenprozent						Summe incl. Wasser	wz _{eq} -Wert = w/(z+0,4f)	wz-Wert	Rezepturbezeichnung als		Gesamtmenge [kg]
		K1	K2	D1	D2	CEM	SFA				Sand1: Sand2: CEM: SFA	Sand: CEM: SFA	
14.10.2009	V V 1			71		14	14	7	0,3	0,5	Sand D1: 71 : 0 : 14: 14	D: 71:14:14	14
14.10.2009	V V 2			42	42	4	13	13	1,4	3,0	Sande D: 42 : 42 : 4 : 13	D: 84: 4: 13	12
23.10.2009	V V 3	47,6	47,6			4,8		10	2,0	2,0	Sande K: 48 : 48 : 5 : 0	K: 96: 5 : 0	10
23.10.2009	V V 4-1		67				33	48	3,6		Sand K2: 0 : 67 : 0 : 33	K: 67: 0 : 33	2,2
04.11.2009	V V 4-2	47	43				10	10	2,6		Sande K: 47 : 43 : 0 : 10	K: 90: 0 : 10	12
04.11.2009	V V 4-3	43	39				18	9	1,3		Sande K: 43 : 39 : 0 : 18	K: 82: 0 : 18	11,5
13.11.2009	V V 4-4	40	40			10	10	15	1,0	1,5	Sande K: 40 : 40 : 10 : 10	K: 80:10:10	28
18.11.2009	V V 5			40	40	10	10	10	0,7	1,0	Sande D: 40 : 40 : 10 : 10	D: 80:10:10	100
09.12.2009	V V 6-5	42	42			8	8	10	0,8	1,2	Sande K: 42 : 42 : 8 : 8	K: 84 : 8 : 8	26
09.12.2009	V V 6-6	38	38			8	16	5	0,4	0,7	Sande K: 38 : 38 : 8 : 16	K: 84 : 8 : 8	26
19.01.2010	V V 10	18	65			17	0	7	0,4	0,4	Sande K: 18 : 65 : 17 : 0	K: 84 : 8 : 8	26
18.05.2010	V V 21			90			0	15	1,5	1,5	Sand: 90 : 10 : 0 : 0	S: 90:10: 0	18
18.05.2010	V V 22a			82			9	12	0,9	1,3	Sand: 82 : 9 : 9 : 0	S: 80:10:10	12
+20.05.+08.06.2010	V V 22bc			80			10	11	0,8	1,1	Sand: 80 : 10 : 10 : 0	S: 80:10:10	78

Rezepturen der Hauptversuche

Herstelldatum	Name	Anteile in Massenprozent						%TM Wasser	wz _{eq} -Wert = w/(z+0,4f)	wz-Wert	Rezepturbezeichnung als		Gesamtmenge [kg]
		K1	K2	D1	D2	CEM	SFA				Sand1: Sand2: CEM: SFA	Sand: CEM: SFA	
11.06.2010	D01			30	50	10	10	11,1	0,80	1,11	Sande D: 30 : 50 : 10 : 10	D: 80:10:10	10
11.06.2010	D02			50	30	10	10	10,4	0,75	1,04	Sande D: 50 : 30 : 10 : 10	D: 80:10:10	30
04.11.2010	D03			60		20	20	9,0	0,32	0,45	Sande D: 60 : : 20 : 20	D: 60:20:20	30
04.11.10+07.09.11	D04			60	60	20	20	12,5	0,45	0,63	Sande D: : 60 : 20 : 20	D: 60:20:20	50
11.11.2010	D04b			-	60	20	20	12,1			Sande D: : 60 : 20 : 20	D: 60:20:20	10
11.11.2010	D04c			-	60	20	20				Sande D: : 60 : 20 : 20	D: 60:20:20	



Anlage 19, Blatt 2

Zu Kapitel 4.5.3:

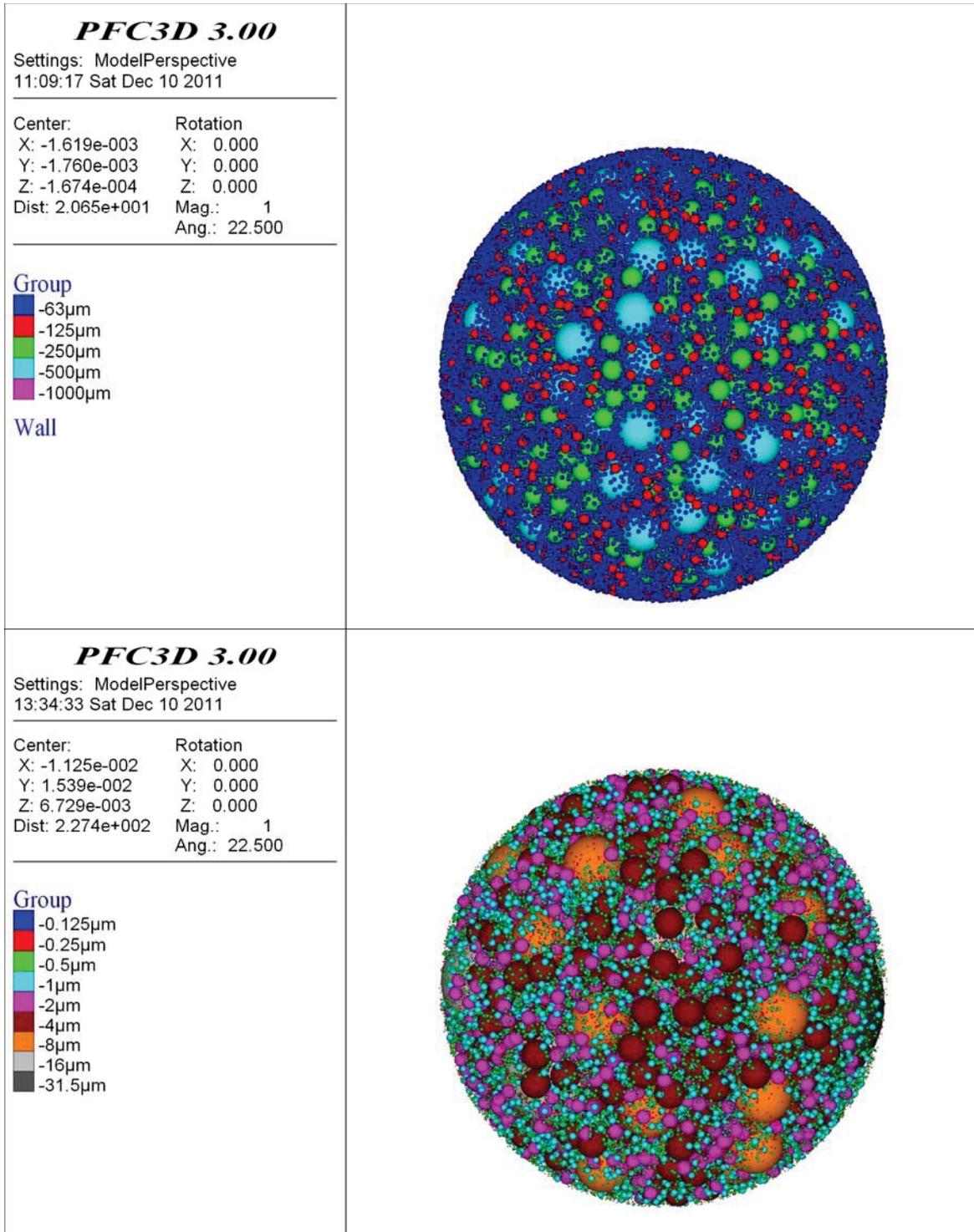
Rezepturen der Vor- und Hauptversuche

Herstellungsdatum	Name	Anteile in Massenprozent						%TM Wasser	wz _{eq} -Wert =w/(z+0,4f)	wz-Wert	Rezepturbezeichnung als		Gesamtmenge [kg]
		K1	K2	D1	D2	CEM	SFA				Sand1 : Sand2 : CEM : SFA	Sand : CEM : SFA	
11.11.2010	D05			40	40	10	10	14,8	1,06	1,48	Sande D: 40 : 40 : 10 : 10	D: 80:10:10	6
18.11.2010	D05ab			40	40	10	10	9,4	0,67	0,94	Sande D: 40 : 40 : 10 : 10	D: 80:10:10	24
13.01.2011	D06			90		10		6,4	0,64	0,64	Sande D: 90 : : 10:	D: 90:10:0	10
13.01.2011	D06xFM			69		8	23	12,8	0,76	1,66	Sande D: 69 : : 8: 23	D: 69:08:23	13
20.01.2011	D07				90	5	5	14,6	2,09	2,92	Sande D: : 90 : 5: 5	D: 90:05:05	20
14.01.2011	D08			40	50	10		11,5	1,15	1,15	Sande D: 40 : 50 : 10:	D: 90:10:0	20
17.01.2011	D08FM			40	50	10		11,9	1,19	1,19	Sande D: 40 : 50 : 10:	D: 90:10:0	20
20.01.2011	D09			90		5	5	4,2	0,59	0,83	Sande D: 90 : : 5: 5	D: 90:05:05	20
20.01.2011	D10				50	20	30	14,9	0,47	0,75	Sande D: : 50 : 20: 30	D: 80:10:10	20
25.03.2011	D11			70		20	10	9,6	0,40	0,48	Sande D: 70 : : 20: 10	D: 80:10:10	40
07.09.2011	D11			70		20	10	7,9	0,33	0,40	Sande D: 70 : : 20: 10	D: 80:10:10	20
17.06.2010	K01	30	50			10	10	13,7	0,98	1,37	Sande K: 30 : 50 : 10: 10	K: 80:10:10	10
17.06.2010	K02	50	30			10	10	12,8	0,91	1,28	Sande K: 50 : 30 : 10: 10	K: 80:10:10	10
17.06.2010	K03	50	20			10	20	12,7	0,71	1,27	Sande K: 50 : 20 : 10: 20	K: 70:10:20	10
24.06.2010	K04	40	40			10	10	13,5	0,97	1,35	Sande K: 40 : 40 : 10: 10	K: 80:10:10	30
25.06.2010	K04	40	40			10	10	11,8	0,84	1,18	Sande K: 40 : 40 : 10: 10	K: 80:10:10	40
29.06.+10.09.2010	K04tr	40	40			10	10	13,7	0,98	1,37	Sande K: 40 : 40 : 10: 10	K: 80:10:10	10
09.12.2010	K04FM	40	40			10	10	12,2	0,87	1,22	Sande K FM: 40 : 40 : 10: 10	K: 80:10:10	40
28.07.2010	K04	40	40			10	10	12,6	0,90	1,26	Sande K: 40 : 40 : 10: 10	K: 80:10:10	60
07.09.2011	K04	40	40			10	10	12,3	0,88	1,23	Sande K: 40 : 40 : 10: 10	K: 80:10:10	20
10.09.2010	K04x	35	35			13	17	11,5	0,58	0,89	Sande K: 35 : 35 : 13: 17	K: 70:13:17	10
08.07.2010	K05tr	35	35			10	20	11,4	0,63	1,14	Sande K: 35 : 35 : 10: 20	K: 70:10:20	30
08.+16.07.2010	K06	80				10	10	7,3	0,52	0,73	Sande K: 80 : : 10: 10	K: 80:10:10	6
08.+16.07.2010	K07	60				20	20	13,2	0,47	0,66	Sande K: 60 : : 20: 20	K: 60:20:20	20
27.07.2010	K07	60				20	20	11,6	0,42	0,58	Sande K: 60 : : 20: 20	K: 60:20:20	90
10.01.2011	K11ab		90			5	5	14,9	2,13	2,98	Sande K: : 90 : 5: 5	K: 90:5:5	20
10.01.2011	K12		50			20	30	13,1	0,41	0,66	Sande K: : 50 : 20: 30	K: 50:20:30	7



Anlage 20, Blatt 1

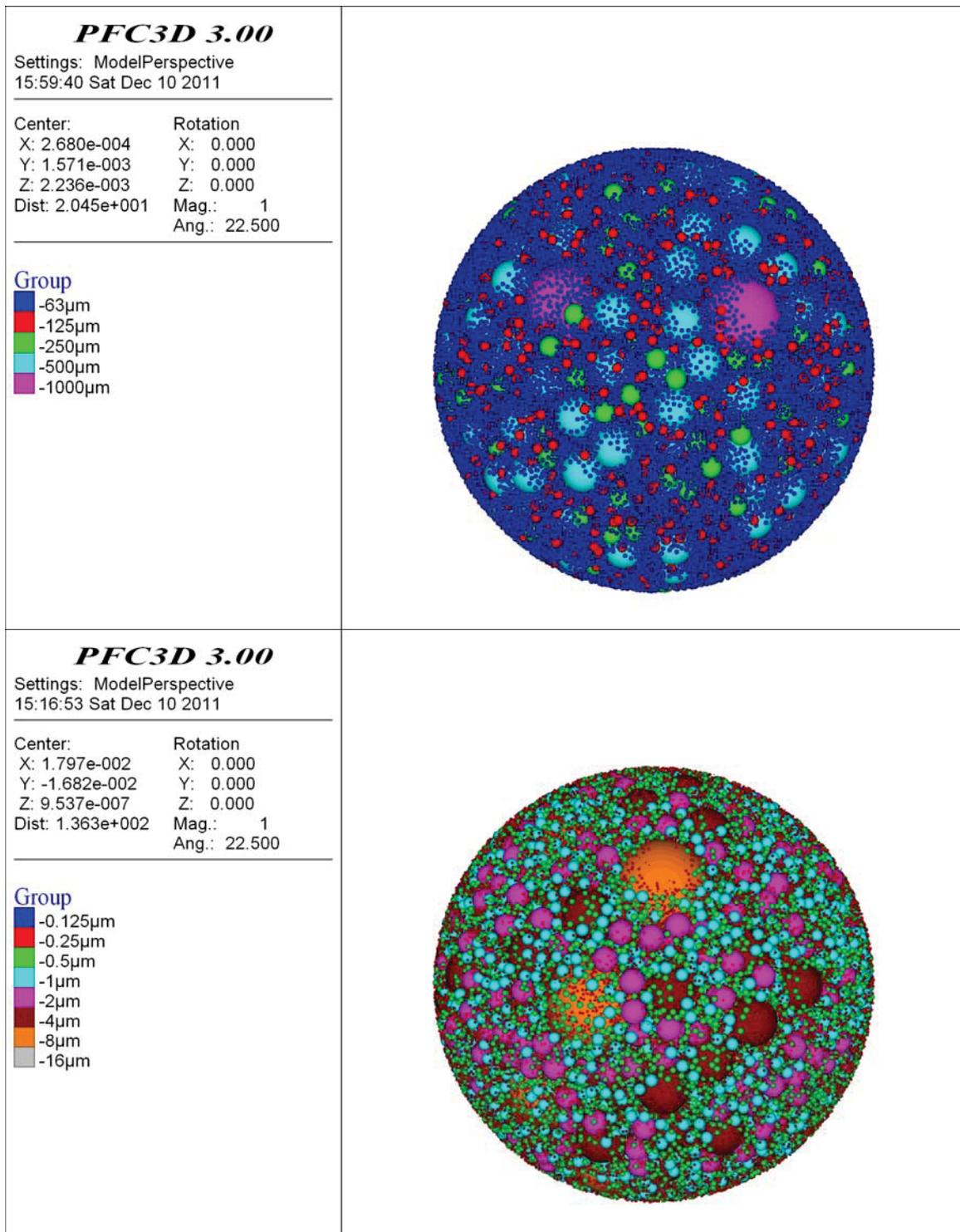
Zu Kapitel 4.4.3: Ergebnisbilder der DEM-Modellierung, Rezeptur D04 [TUHH, V-3 (2011)]





Anlage 20, Blatt 2

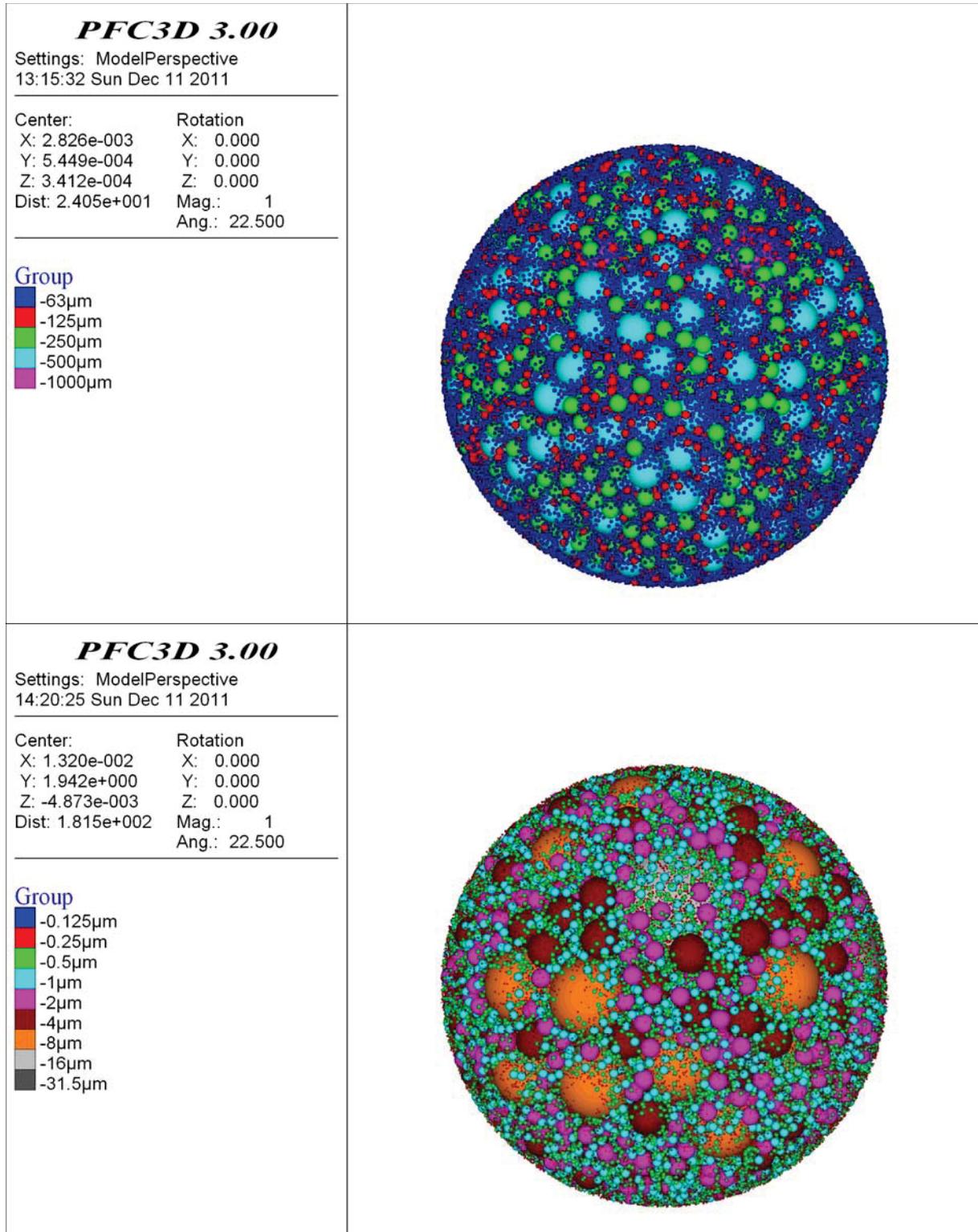
Zu Kapitel 4.4.3: Ergebnisbilder der DEM-Modellierung, Rezeptur D11 [TUHH, v-3 (2011)]





Anlage 20, Blatt 3

Zu Kapitel 4.4.3: Ergebnisbilder der DEM-Modellierung, Rezeptur K07 [TUHH, v-3 (2011)]





Anlage 21, Blatt 1

Zu Kapitel 4.5.1:

Granulierverhalten der Vor- und Hauptversuche

Granulierverhalten Die Rezepturen werden als prozentuale Anteile der Trockenmassen in ganzen Prozenten angegeben.

Hersteldatum	Rezepturen Name Sand1: Sand2: CEM: SFA	Herstellparameter						wz-Werte $\leq 0,5$			wz-Werte $\geq 1,0$			Bemerkungen
		Drehzahl [U/min]	Neigung Tellerboden geg. Horizontale	Randhöhe, Gummimatte	Beschickungsart, Feuchte	Granulier- geschwindigkeit	Verhalten + große, - kleine	Restsand	Feuchte der Mischung	wz-Wert	wz ^{eq} -Wert	wz-Wert	Hergestellte Menge ca. [kg]	
14.10.09	VV1 D: 71: 0:14:14	9-12	45-50	hoch, mit		-	+	+	5,3	7,5	14	Bildung einzelner Granalien bis 40 mm, Hauptmenge bei 4-8 mm und 0/4		
14.10.09	VV2 D: 42: 42: 4:13	5-14	45-50	hoch, mit		--	+	+	12,3	27,0	12	sehr langsames Granulieren und dann verschiedene Neigungen und langsamere Drehzahl		
23.10.09	VV3 K: 48: 48: 5: 0	8	45-50	hoch, mit		+	+	+	23,0	23,0	10	zu feucht, nach 15 min großer Anteil um 16 mm, (Zustand C) --> Abbruch und Erhärten lassen		
04.+ 23.11.09	VV4-1, 2, 3 K: 0: 67: 0:33	10,7-12	45-50	hoch, mit			+	+	11,1 - 28,5	11,1 - 28,5	2,2	Sand K2 ohne Bindemittel, nur adhesives Zusammenkleben, Bildung von Agglomerate bis 35 mm, aber auch starkes Kleben an Wänden und Tellerboden --> Spielen mit Neigung und Drehzahl, Nach Zugabe von grobem Sand Verringerung der Neigung zum Kleben		
13.11.09	VV4-4 K: 40: 40: 10: 10	9-12	50	hoch, mit			+	+	8,2	11,5	28	trocken vorgemischt, Sprühzugabe, (4-4b zu feucht & zu groß) --> (Zustand C), fertige Agglomerate 4-4c trotz Nachdosierung von 2 Schaufeln K2 zu feucht		
18.11.09	VV5 D: 40: 40: 10: 10	8,9-9,5	45-48	hoch, mit		+ -	+	OK	7,8	11,0	100	quasi-kontinuierliche Zugabe, zunächst Bildung großer Agglomerate, dann Ansammlung von Grobsand		



Anlage 21, Blatt 2

Zu Kapitel 4.5.1:

Granulierverhalten der Vor- und Hauptversuche

Herstell- datum	Name	Rezepturen Sand1: Sand2: CEM: SFA	Herstellparameter				Verhalten		Ergebniss		Wz ^{gr} -Wert	Wz-Wert	Hergestellte Menge ca. [kg]	Bemerkungen
			Drehzahl [U/min]	Nägun- Tellerboden geg. Horizontale	Randhöhe, Gummimatte	Beschickungsart, Feuchte	Granulier- geschwindigkeit	+ große, - kleine	Restsand	Feuchte der Mischung				
09.12.09	VV6-5	K: 42:42: 8: 8	12-10	50	hoch, mit						9,4	13,2	26	in erster Hälfte auch größere Agglomerate, in 2. Hälfte Feinkormmangel und keine großen mehr
09.12.09	VV6-6	K: 38:38: 8:16	9-12	48-50	hoch, mit						7,5	13,7	26	
19.01.10	VV10	K: 18:65:17: 0	9-12	42-52	niedrig, mit						6,1	6,1	26	erster Versuch nach Abscheiden des Randes des G-Tellers, Wurde wegen schlechtem Aufbauverhalten und geringen Festigkeiten abgebrochen
18.05.10	VV21	Sand: 90:10: 0	13	40-55	niedrig, ohne						11,5	11,5	18	aus Restsand I (0-1) der von erhärteten Agglomeraten absandet, detaillierte Beschreibung des Verhaltens
18.05.10	VV22a	Sand: 82: 9: 9	9-12	42-50	niedrig, ohne						8,8	12,3	12	aus Restsand II
18.05.+ 20.05.+ 08.06.10	VV22bc	Sand: 80:10:10	12	45	niedrig, ohne	K					8,0	11,1	78	18.05.10: guter Aufbau aber noch recht hoher Zementanteil im Restsand; 20.05.10: zunächst nur kleine mit geringer Festigkeit also Abbruch nach 15 min, Wiederzugabe des bisherigen Überlaufes, Bildung von Agglomerate aber Grobkornüberschuß; 08.06.10: Restsand 0-4 aus dem Überschussand mit Granulatkeimen von bis zu 4 mm Durchmesser, erst Bildung unregelmäßiger Agglomerate 20-28 mm, dann kugelige mit auffällig geringen Druckkräften

Beschickungsart: B - Batch oder k - kontinuierlich
+ großer Anteil oder starke Ausprägung des Merkmals; - geringer Anteil oder geringe Ausprägung des Merkmals



Anlage 21, Blatt 3

Zu Kapitel 4.5.1:

Granulierverhalten der Vor- und Hauptversuche

Rezepturen der Hauptversuche		WZ _{eq} -Wert = w/(z+0,4f)															
		Herstell- datum	Name	Rezepturen			Drehzahl [U/min]	Herstellparameter			Verhalten		Ergebniss		Bemerkungen		
				sand1 : sand2 : CEM : SFA		Neigung [°] Tellerboden geg. Horizontale	Randhöhe, Gummimatte	Beschickungsart, Feuchte	Granulier- geschwindigkeit	+ große, - kleine	Restsand	Feuchte der Mischung	wzeg-Wert = w/(z+ 0,4f)	wz-Wert	Hergestellte Menge ca. [kg]		
11.06.10	D01		D: 30:50:10:10		45-52	niedrig, ohne	B, halb- trocken	-	-	-			0,80	1,1	10	geföhlt geringe Festigkeit der Agglomerate, dann etwas bessere aber noch ohne Druckpunkt --> Abbruch der Sorte	
11.06.10	D02		D: 50:30:10:10		45-52	niedrig, ohne	B, halb- trocken	-	-	+	+	ok	0,75	1,04	30	etwas weniger schlechtes Agglomerieren als D01, "Herausammeln der Feinststoffe durch die Agglomerate und dann Grobsandüberschuß"	
04.11.10	D03		D: 60: 0:20:20		45-52	halb- hoch, ohne	B, trocken	+	+	-	ok	ok	0,32	0,45	30	sehr detaillierte Beschreibung des Agglomerierprozesses; wurde in Kapitel Granulierverhalten eingeföhgt	
04.11.10	D04		D: 0:60:20:20		45-52	halb- hoch, ohne	B, trocken	+	+	-	ok	ok			30	identisch mit D03	
11.11.10	D04bc		D: 0:60:20:20		45-52	halb- hoch, ohne	B, trocken	+	+	-	ok	ok	0,44	0,62	10	Trockene Zugabe, Bildung von großen Agglomerate 10-30 mm zu Beginn --> Druckprobe Frischlinge D04b; Trockene Zugabe, dann wenig Neubildung, danach Zustand mit vielen Granulakernen und einigen 8-12 mm --> Druckprobe Frischlinge D04c	



Anlage 21, Blatt 4

Zu Kapitel 4.5.1: Granulierverhalten der Vor- und Hauptversuche

Herstell- datum	Name	Rezepturen Sand1: Sand2: CEM: SFA	Herstellparameter				Verhalten		Ergebniss		wz-Vert wz-Vert = w/(z+0,4f)	Wz-Wert	Hergestellte Menge ca. [kg]	Bemerkungen
			Drehzahl [U/min]	Neigung [°] Tellerboden geg. Horizontale	Randhöhe, Gummimatte	Beschickungsart, Feuchte	Granulier- geschwindigkeit	+ große, - kleine	Reststand	Feuchte der Mischung				
07.09.11	D04	D: 0:60:20:20	12	51	niedrig, ohne	k, trocken	+	+	ok	0,45	0,63	20	Am 07.09.2011 trocken vorgemischt und recht gute Steuerbarkeit des Agglomerierens durch Zugaberegime und Abstreifen der anklebenden Teile der Mischung, sowie durch die Wasserzugabe. Zustände A und C treten sehr deutlich auf! Kein Restsand!	
11.11.10	D05	D: 40:40:10:10	9-12	45-52	halb- hoch, ohne	B, trocken	--	--	Abb. ok	1,06	1,5	6	schlechtes Granulieren, Einfüllen der Restmischung in Würfelform und Verdichten durch Rütteln, siehe Foto vom 07.01.2011	
18.11.10	D05ab	D: 40:40:10:10	9-12	45-52	halb- hoch, ohne	B, halb- trocken	--	--	++ ok	0,67	0,94	24	hierbei Verbesserung des Agglomerierens durch Änderung von Zugaberegime und Maschinenparametern sowie teilweise erhöhter Wasserzugabe --> (Zustand C), Videoaufzeichnung	
13.01.11	D06	D: 90: 0:10: 0	9-12	45-52	halb- hoch, ohne	B, trocken	-	--	Abb. +	0,64	0,64	10	max. 4 mm Agglomerate, deutlicher Feinkommangel und schon fast zu feucht	
13.01.11	D06x FM	D: 69: 0: 8:23	9-12	45-52	halb- hoch, ohne	halbtrocken	+	-	ok	0,76	1,7	13	Restmenge aus Abbruch von D06 mit trockener Einstreu von SFA und Wasser mit FM, deutlich besserer Bildung, aber kaum Agglomerate über 10 mm	
20.01.11	D07	D: 0:90: 5: 5	9-12	45-52	halb- hoch, ohne	B, trocken	-	-	ok	2,1	2,9	20	Video von Zugabe und EKP	
14.01.11	D08	D: 40:50:10: 0	9-12	45-52	halb- hoch, ohne	B, trocken	-	-	ok	1,2	1,2	20		



Anlage 21, Blatt 5

Zu Kapitel 4.5.1: Granulierverhalten der Vor- und Hauptversuche

Herstellungsdatum	Name	Rezepturen Sand1: Sand2: CEM: SFA	Herstellparameter				Verhalten			Ergebniss		Bemerkungen		
			Drehzahl [U/min]	Neigung [°] Tellerboden geg. Horizontale	Randhöhe, Gummimatte	Beschickungsart, Feuchte	Granulier- geschwindigkeit	+ große, - kleine	Restsand	Feuchte der Mischung	wzeg-Wert = w/(z+ 0,4f)		wz-Wert	Hergestellte Menge ca. [kg]
17.01.11	D08FM	D: 40:50:10:0	9-12	45-52	halb- hoch, ohne	B, trocken	-	+	+	ok	1,2	1,2	20	Zugabe von 40 ml FM je 10 kg also 40ml FM je kg CEM, Sekundäragglomerate lassen sich von Hand leicht zerreiben, zerfallen aber eher nicht beim Sieben
20.01.11	D09	D: 90:0:5:5	9-12	45-52	halb- hoch, ohne	B, trocken	--	-	++	-	0,59	0,83	20	
20.01.11	D10	D: 0:50:20:30	9-12	45-52	halb- hoch, ohne	B, trocken	+	+	-	ok	0,47	0,75	20	gutes Granulieren, nach kurzer Wartezeit am Beginn, Video von EKP und Zugabe
07.09.11	D11	D: 70:0:20:10	9-12	45-52	niedrig, ohne	B, trocken	++	+	--	ok	0,33	0,40	20	Am 07.09.2011 trocken vorgemischt, gutes Agglomerierverhalten, viele große Agglos in beiden Zuständen A (trocken kullern) und C (feucht kullern)
17.06.10	K01	K: 30:50:10:10	9-12	45-52	niedrig, ohne	B, feucht	--	-	+	+	0,98	1,4	10	Vorbefeuchtung mit ca. 70 % der Gesamtwassermenge; Abbruch, weil nur Bildung kleiner Agglomerate 3-6 mm trotz recht hoher Wasserzugabe
17.06.10	K02	K: 50:30:10:10	9-12	42-45	niedrig, ohne	B, feucht	-	-	+	ok	0,91	1,3	10	Vorbefeuchtung mit ca. 70 % der Gesamtwassermenge; zögerliches Granulieren und gefühlt geringe Festigkeiten, Verbesserung durch Variieren der Neigung erreicht
17.06.10	K03	K: 50:20:10:20	9-12	45-52	niedrig, ohne	B, feucht	--	-	++	ok	0,71	1,3	10	Vorbefeuchtung mit ca. 70 % der Gesamtwassermenge; nur Bildung kleiner Agglomerate 3-6 mm



Anlage 21, Blatt 6

Zu Kapitel 4.5.1:

Granulierverhalten der Vor- und Hauptversuche

Herstell- datum	Name	Rezepturen <small>Sand1: Sand2: CEM: SFA</small>	Herstellparameter				Verhalten		Ergebniss		Wz-Vert	Hergestellte Menge ca. [kg]	Bemerkungen
			Drehzahl [U/min]	Néigung [°] Tellerboden geg. Horizontale	Randhöhe, Gummimatte	Beschickungsart, Feuchte	Granulier- geschwindigkeit	+ große, - kleine	Restsand	Feuchte der Mischung			
24.+ 25.06.10	K04	K: 40:40:10:10	9-12	45-52	niedrig, ohne	B, halb- trocken	+	+	-	0,84 - 0,97	1,18 - 1,35	30 + 40	24.: Zunächst Bildung von einigen sehr großen Agglomerate, alle weiteren bei <10mm eher kugelig, bei >10mm eher elliptisch; 25.: 3. Mi: Versuch die Mischung eher trocken zu halten, damit die Agglomerate größer werden; 4. Mi: schlechter Beginn --> Neustart und dabei Bildung großer Agglomerate
29.06.10	K04tr	K: 40:40:10:10	9-12	45-52	niedrig, ohne	B, trocken	+	-	ok	0,98	1,4	10	schneller Beginn mit schönen, runden Agglomerate, dann Stagnieren, nach zusätzlicher Zugabe von SFA und CEM kurze Neubildung, dann wieder Stagnieren --> Zustand A aber kein Zustand C
09.12.10	K04FM	K: 40:40:10:10	9-12	45-52	halb- hoch, ohne	k, trocken	-	+	ok	0,87	1,2	40	mit 1 % FM bezogen auf Zementmasse
28.07.10	K04	K: 40:40:10:10	9-12	45-52	halb- hoch, ohne	B, mit teilw. Verbleib von Rest- sand	+	+++	+	0,90	1,3	60	erst durch größere Wasserzugabe besseres Verhalten, Auffällig war das Bilden von Sekundär-Agglomeraten aus den vorhandenen kleinen 4/8 bei allen Mischungen --> (Zustand C); jeweils Zugabe von ca. 40 % der Mischung zum Anfahren und danach kontinuierliches Einstreuen, Entleeren soweit, dass noch Restsand und auch die viele Agglomerate im Teller blieben.
10.09.10	K04+ K0x	K: 35:35:13:17	9-12	45-52	halb- hoch, ohne	k, trocken	-	-	ok	0,58	0,89	10	
07.09.11	K04	K: 40:40:10:10	12	51	niedrig, ohne	K, trocken	+	+	+	0,88	1,23	20	Klar kontrollierbare Zustände A+C



Anlage 21, Blatt 7

Zu Kapitel 4.5.1: Granulierverhalten der Vor- und Hauptversuche

Herstell- datum	Name	Rezepturen <small>Sand1 : sand2 : cEM : sFA</small>	Herstellparameter				Verhalten			Ergebniss		Bemerkungen	
			Drehzahl [U/min]	Neigung [°] Tellerboden geg. Horizontale	Randhöhe, Gummimatte	Beschickungsart, Feuchte	Granulier- geschwindigkeit	+ große, - kleine	Restsand	Feuchte der Mischung	wzeg-Wert = w/(z+ 0,4f)		wz-Wert
08.07.10	K05tr	K: 35 : 35 : 10 : 20	9-12	45-52	niedrig, ohne	k, trocken	+	+	ok	0,63	1,1	30	2 Handvoll Agglomerate zum Anfahren, Sorge vor zuviel Verlust und Rezepturabweichung durch starkes Stauben aber auch Wassemebel beim Strühen; Zugabe nach festem Regime: 400g + 44ml dabei mehrere Messungen; zum Ende nur noch Bildung bis 8 mm
08.+ 16.07.10	K06	K: 80 : 0 : 10 : 10	9-12	45-52	niedrig, ohne, mit		--	--	ok	0,52	0,73	6	08.07.: Abbruch, weil keine Granulatbildung; 16.07.: Neversuch mit lose eingelegerter Gummimatte, geringe Bildung und Abbruch nach einer Mischung
08.+ 16.07.10	K07	K: 60 : 0 : 20 : 20	9-12	45-55	niedrig, ohne	k, trocken, feucht	+	+-	+	0,47	0,66	20	08.07.2010: Schnelles Bilden großer Agglomerate, danach nur noch kleine; Nach Zugabe etwa der halben Mischung keine Neubildung mehr, sondern viele kleine Agglomerate und Überschuss von Grobsand sowie ruckartiges Abrutschender Gesamtmenge weitgehend ohne Rollbewegung; --> Entleeren und neu Anfahren; 16.07.: Verhalten wie am 08.07. und Versuche mit Neigung, Leibblechen und Zugaberegime eine ordentliche Neubildung zu erzeugen, Abbruch nach einer Mischung; detaillierte Beschreibung im Diss.-text
27.07.10	K07	K: 60 : 0 : 20 : 20	11-9	45-50	halb- hoch (19 cm), ohne	B	+	+++	ok	0,42	0,58	90	Gute Bildung von 8/16 mm bei 55°, feucht vorgemischt mit ca. Hälfte des Wassers. Variation auf 50° und 9 U/min und zum Ende verstärkte Wasserzugabe, um Grobsand zu binden und da bildeten sich wirklich große Sekundär-Agglomerate; viele Zwischenmessungen, Agglomerate klebten beim Anfahren am 28.07. erstaunlich fest zusammen!



Anlage 21, Blatt 8

Zu Kapitel 4.5.1: Granulierverhalten der Vor- und Hauptversuche

Herstell-datum	Name	Rezepturen Sand1 : sand2 : CEM : SFA	Drehzahl [U/min]	Herstellparameter			Verhalten			Ergebniss		wzq-Wert = w/(z+0,4t)	wz-Wert	Hergestellte Menge ca. [kg]	Bemerkungen	
				Drehzahl [U/min]	Neigung [°]	Tellerboden geg. Horizontale	Randhöhe Gummimatte	Beschickungsart, Feuchte	Granulier-geschwindigkeit	+ große, - kleine	Restsand	Feuchte der Mischung				
	K08, K09 und K10 wurden nicht hergestellt.															
10.01.11	K11ab	K: 0 : 90 : 5 : 5	9-12	45-52	hoch, ohne	halb-	hoch, trocken	+	-	+	-	+	2,1	3,0	20	Es treten 2 deutlich unterscheidbare Granulierzustände auf. Zustand A: Aufbauagglomeration bei Zugabe trockenen Feinst- und Feinkornes erzeugt Agglomerate bis ca. 8 mm Durchmesser die dann rasch wieder zerfallen zu einer Agglomeratmenge von 2-6 mm und dann noch weiter zu 1-6 mm. Diese klappern am Tellerand. Zustand C: Bei reichlicher Wasserzugabe nach Zustand A bilden sich "feuchte Kugeln" die sich selbst eindrehen und aus kleineren nun hinreichend befeuchteten Partikeln Sekundär-Agglomerate bilden. Diese sind nur für kurze Zeit stabil und gehen dann in Mörtel plastischer Konsistenz auf. (Zustand B)
10.01.11	K12	K: 0 : 50 : 20 : 30	9-12	45-52	hoch, ohne	halb-	hoch, trocken	+	-	+	-	0,41	0,66	7	Schwieriges Agglomerieren wie bei K11, entweder Zustand A (trocken kullerm) oder B (feucht klumpend). Der Rest (3,495 kg) wurde in Würfelform gefüllt.	

Entfernen der Gummimatte vom Tellerboden am 14.05.2010

Beschickungsart: B - Batch oder k - kontinuierlich

+ großer Anteil oder starke Ausprägung des Merkmals; - geringer Anteil oder geringe Ausprägung des Merkmals

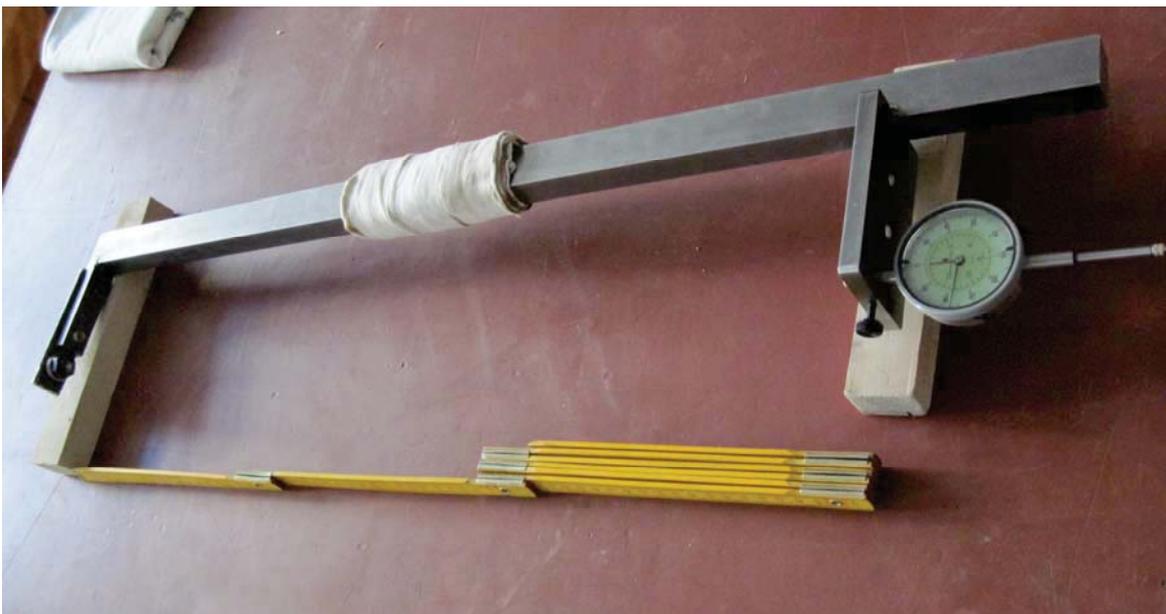
Anlage 22, Blatt 1

Zu Absatz 4.2.4: Schwindmessrahmen 160 - 330 mm mit Feinmessuhr



Anlage 22, Blatt 2

Zu Absatz 4.2.4: links: Detail Schwindmessrahmen 160 - 330 mm, rechts und unten: Schwindmessrahmen 650 mm mit Detail der Feinmessuhr





Anlage 23, Blatt 1

Zu Absatz 4.5.4: Gegenüberstellung von Einzelvermessung und Druckprüfung für K04tr als Ergänzung zu *Abbildung 4.10*

Rezeptur: K04tr

Prüfdatum: 02.07.2010 also Prüfalter: 3 d

	B [mm]	T [mm]	H [mm]	beim Prüfen gemessene Höhe des Kornes [mm]	Bruchkraft [N]	Bemerkungen
1	3,5	4	3	3,8	24,2	kugelig
2	3,5	4	3	3,3	30,8	kugelig
3	3,5	2,5	2	2,6	37,0	kugelig
4	7	6,5	6	6,4	52,8	kugelig
5	6,5	6	6	6,5	62,2	kugelig
6	6,5	7,5	6	6,3	46,4	kugelig
7	6	6,5	6	6,3	46,4	unregelmäßig
8	7	6	6	6,3	21,9	unregelmäßig
9	11,5	8	6,5	6,7	63,9	unregelmäßig
10	8,8	8,5	8	8,2	73,5	unregelmäßig mit Kanten nach Abplatzungen
11	9	8	7	6,7	61,4	unregelmäßig
12	7	6,5	6,5	7,0	113,5	kugelig
13	7,5	7	6	6,8	59,3	kugelig
14	8,5	8	8	7,7	143,5	kugelig
15	9	8	7	7,8	142,3	kugelig
16	8	8	7	7,7	100,7	kugelig
17	10	8	8,5	8,5	62,2	oval
18	11	9,5	9	9,5	49,4	oval
19	10,5	10	8	8,3	87,3	unregelmäßig
20	11	10,5	7,5	7,9	39,7	unregelmäßig mit Kanten nach Abplatzungen
21	12	10	10	10,7	103,1	oval
22	10	9,5	8,5	9,4	166,1	oval
23	10,5	10	8,5	9,5	98,4	oval
24	11	10	9	9,8	167,7	kugelig
25	11	10	10	10,7	127,4	kugelig
26	12	11	10	10,4	120,7	dunkel
27	12	10	9	9,9	123,3	oval
28	12	12	10,5	11,2	125,4	oval
29	13	10,5	9	9,4	94,7	unregelmäßig mit Kanten nach Abplatzungen
30	15	13,5	12	12,8	155,8	unregelmäßig mit Kanten nach Abplatzungen
31	16	14	13	12,7	99,4	unregelmäßig mit Kanten nach Abplatzungen
32	16	14	11,5	12,3	122,1	unregelmäßig mit Kanten nach Abplatzungen
33	13	11,5	11,5	11,9	140,8	
34	13	12	12	12,6	149,1	dunkel
35	14	13,5	12,5	13,1	222,9	oval
36	15,5	14	12,5	13,2	120,6	oval
37	17,5	14,5	14,5	15,1	204,7	oval
38	16	13	12,5	13,9	171,7	unregelmäßig mit Kanten nach Abplatzungen
39	16,5	14,4	14	14,3	160,3	unregelmäßig mit Kanten nach Abplatzungen
40	18	15,3	13	13,4	193,6	oval



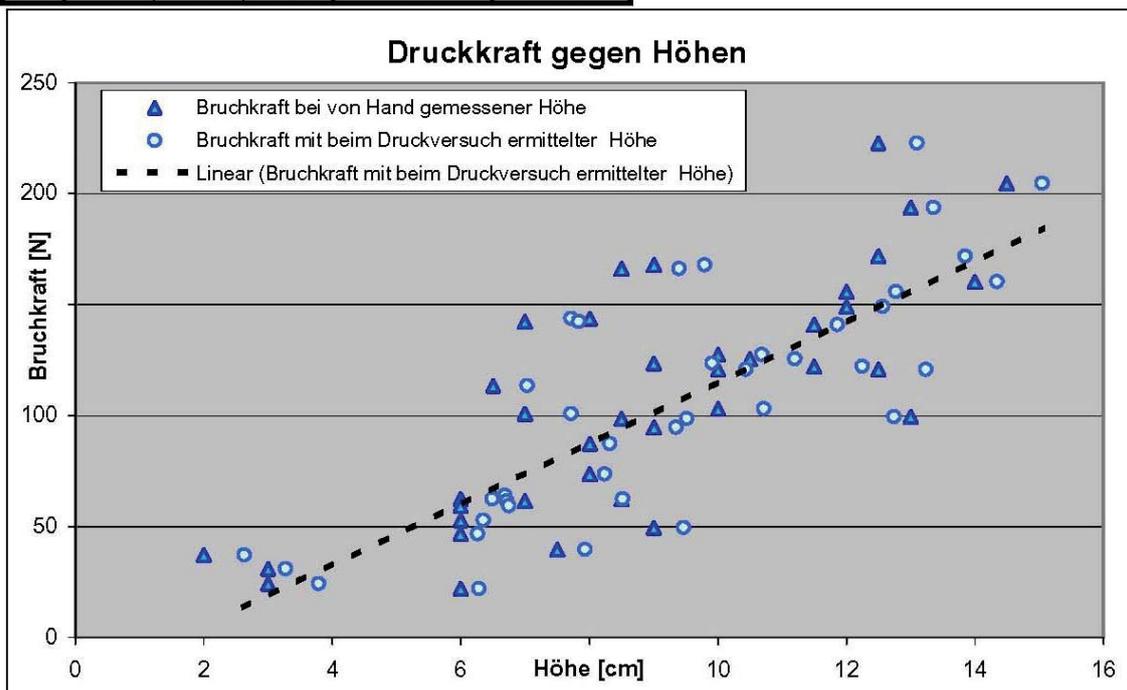
Anlage 23, Blatt 2

Zu Anlage 4.5.4: Gegenüberstellung von Einzelvermessung und Druckprüfung für K04tr

Rezeptur: K04tr

Prüfdatum: **08.07.2010** also Prüfalter: 9 d

	B [mm]	T [mm]	H [mm]	beim Prüfen gemessene Höhe des Korns [mm]	Bruchkraft [N]
1	17	15	14	14,43	239,79
2	17	15	12,5	13,16	213,35
3	14,5	13,5	11,5	12,17	174,44
4	13	12,5	10	10,91	235,24
5	12	12	10	11,06	136,10
6	12	11	9	9,44	131,86
7	11	10	8,5	9,26	181,85
8	10,5	9,5	7,5	8,11	109,33
9	11	10,5	9	9,24	102,24
10	9	9	8	8,52	146,70
11	11	9	8	8,70	125,57
12	12	10	8	8,49	127,79
13	10	8	7	8,09	166,45
14	9,5	9,5	7	7,12	132,27
15	8,5	8	7	7,69	205,80
16	8,5	8	8	7,54	178,34
17	9	8,5	7	7,13	83,57
18	7	7	7	6,57	113,19
19	7,5	7,5	6,5	6,42	56,49
20	7	6,5	6	5,99	60,59
21	5,5	5,3	4,7	4,40	112,88
22	5,3	5,3	5	4,55	74,43
23	5,5	5,5	4,7	4,35	164,64
24	5	4,7	4,5	4,26	56,56
25	5	4,5	4,5	4,22	64,87

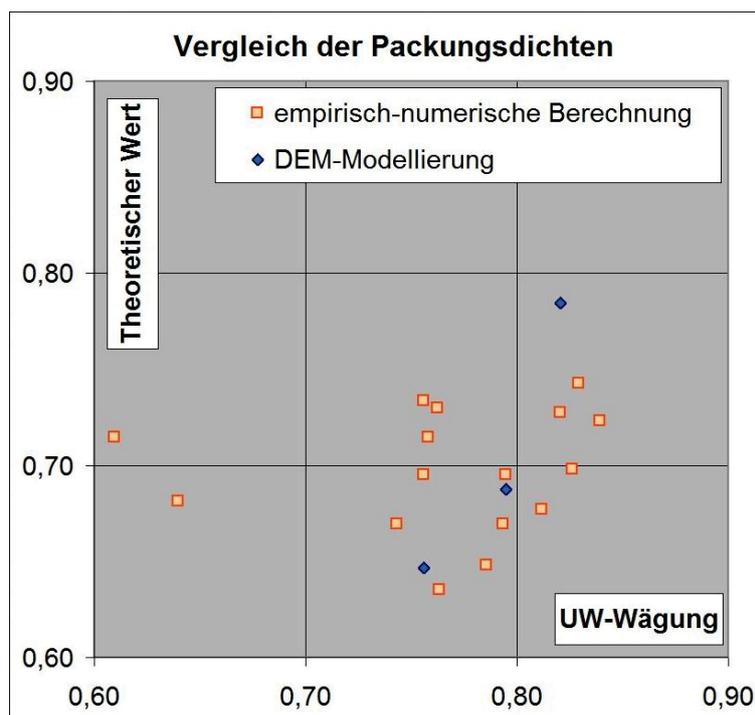




Anlage 24

Zu Anlage 4.4.5: Gegenüberstellung der Ergebnisse für Packungsdichte und Porengehalt in [Vol%] aus Unterwasserwägung und empirisch-numerischer Berechnung sowie DEM-Modellierung

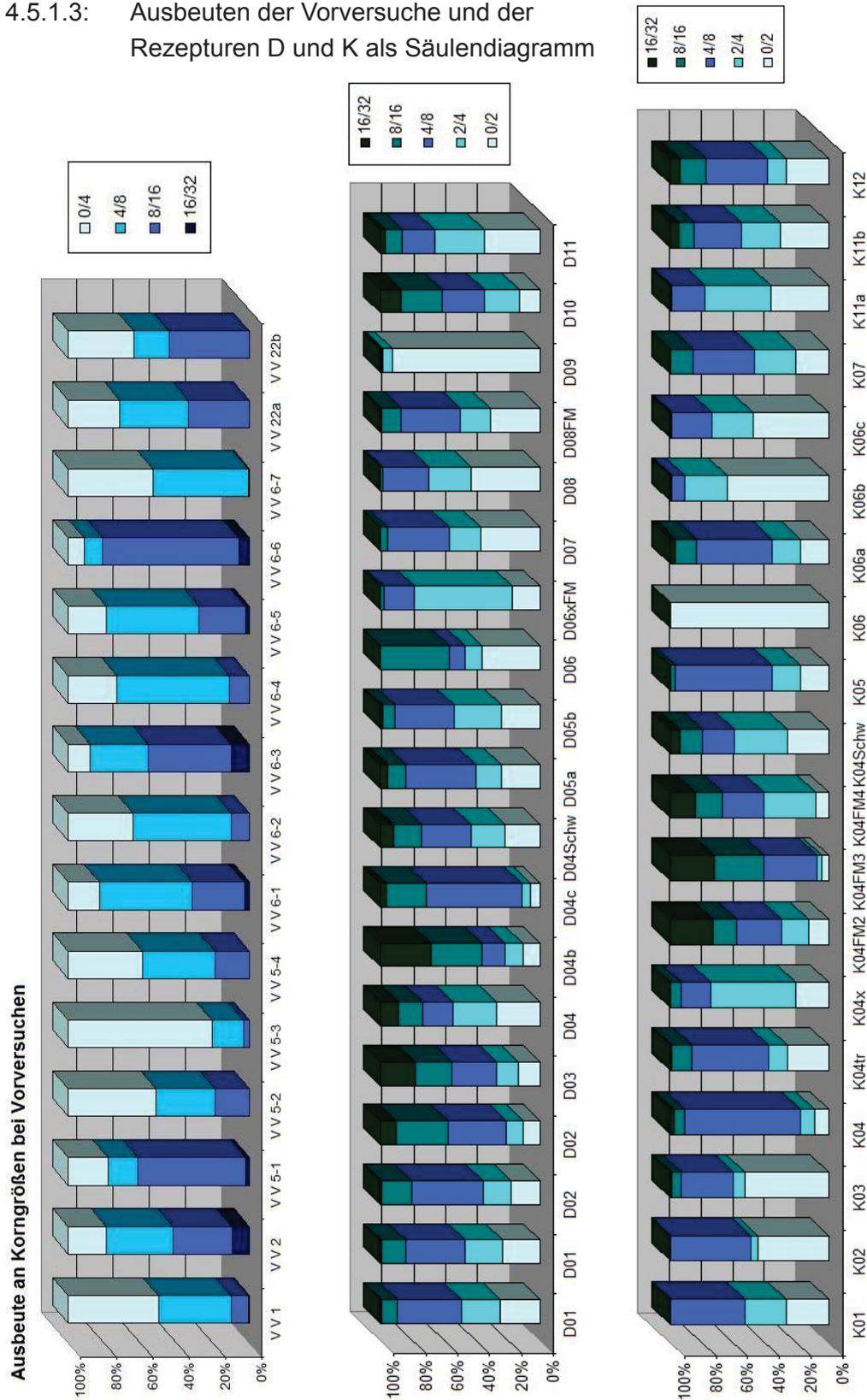
Rezeptur	Unterwasserwägung		empirisch-numerische Berechnung		DEM-Modellierung			
	Packungsdichte	Porengehalt	Packungsdichte	Porengehalt	maximale Packungsdichte Φ	minimaler Hohlraumgehalt [Vol%]		
D01	0,794	20,6	0,669	49,4	0,647	35,3		
D02	0,812	18,8	0,677	47,7				
D03	0,829	17,1	0,743	34,7				
D04	0,756	24,4	0,734	36,3				
D05	0,743	25,7	0,669	49,4				
D08	0,763	23,7	0,635	57,4				
D09	0,786	21,4	0,648	54,4				
D10	0,762	23,8	0,730	37,0				
D11	0,820	18,0	0,727	37,5			0,784	21,6
K01	0,756	24,4	0,695	43,8			0,688	31,2
K04	0,795	20,5	0,695	43,8				
K05	0,758	24,2	0,715	39,9				
K06	0,826	17,4	0,698	43,3				
K07	0,839	16,1	0,723	38,3				
K11	0,640	36,0	0,681	46,8				
K12	0,610	39,0	0,715	39,9				





Anlage 25, Blatt 1

Zu Absatz 4.5.1.3: Ausbeuten der Vorversuche und der Rezepturen D und K als Säulendiagramm





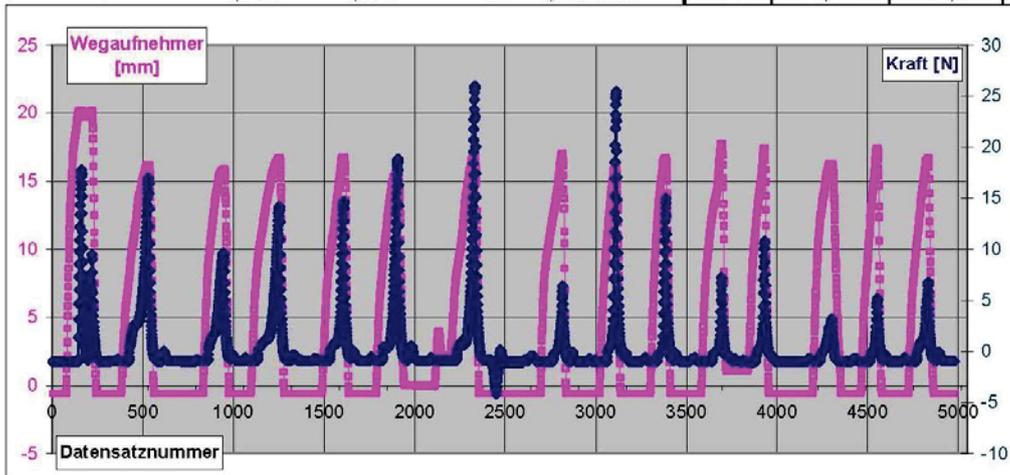
Anlage 26, Blatt 1

Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten 14 einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte

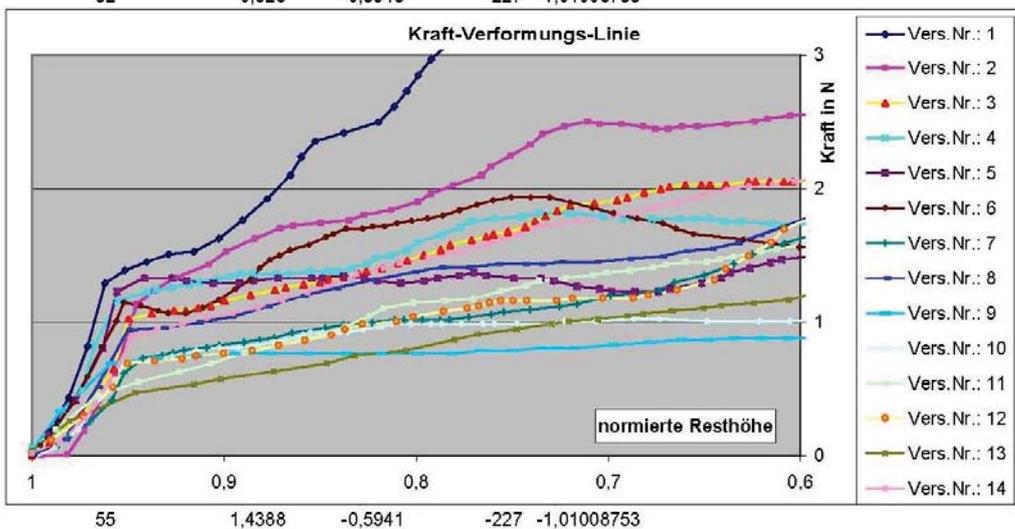
Name der Messlogdatei: 20100708100634 .txt und094644.1 **Tabelle der max. Kräfte**
 Datum: 2010-07-08 **Eingabefelder** Dateiname: 20100708100 .txt und094644.
 Speicherzeit gem. Dateiname: 10:06:34
 letzter Datensatz in Zeile Nr.: 4994
 verwendeter Sensor: 2 lbs
 Rezeptur: K05tr (Frischlinge) 1xNullmessung + 2. und 3. flach, letzte 3. Messung 6 kugelig, alle anderen oval
 Nullmessung des Wegsensors: 20,13 mm
 Kommentar: 1xNullmessung + 2. und 3. flach,

Korn Nr.:	max Kraft [N]	Höhe des Korns [mm]
1	1,29	12,6
2	1,13	11,9
3	1,02	11,6
4	1,16	11,1
5	1,23	11,6
6	1,15	12,3
7	0,73	8,1
8	0,94	9,9
9	0,69	8,4
10	0,69	7,9
11	0,45	9,0
12	0,69	8,1
13	0,47	8,7
14	0,89	10,2

lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Kraft in mlbs	Kraft in N
1	0	-0,5939	-227	-1,01008753
2	0,0266	-0,5939	-227	-1,01008753
3	0,0533	-0,5939	-227	-1,01008753
4	0,0799	-0,5939	-227	-1,01008753
5	0,1066	-0,5939	-227	-1,01008753
6	0,1332	-0,5939	-227	-1,01008753
7	0,1599	-0,5939	-227	-1,01008753
8	0,1865	-0,5939	-227	-1,01008753
9	0,2131	-0,5941	-227	-1,01008753



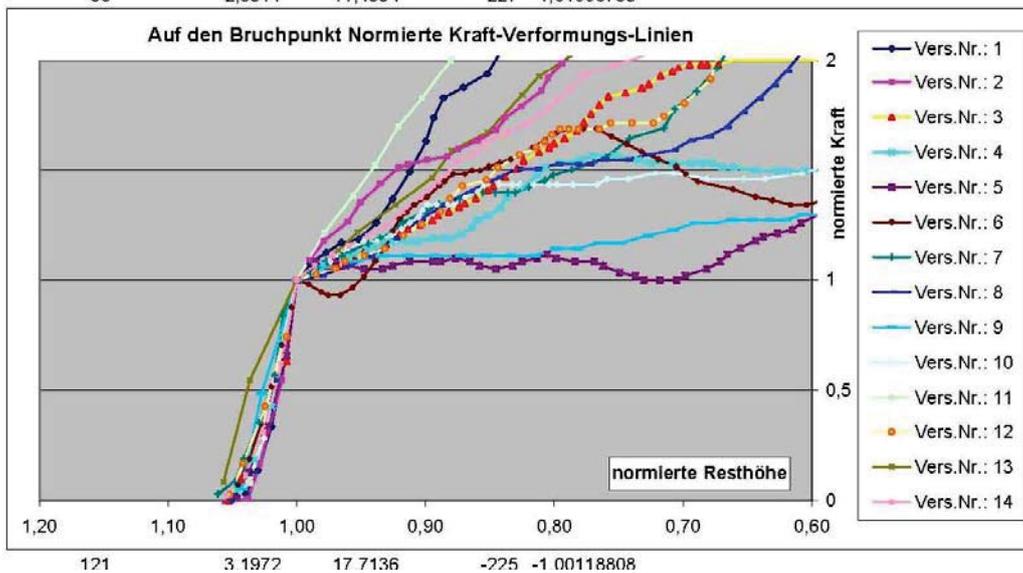
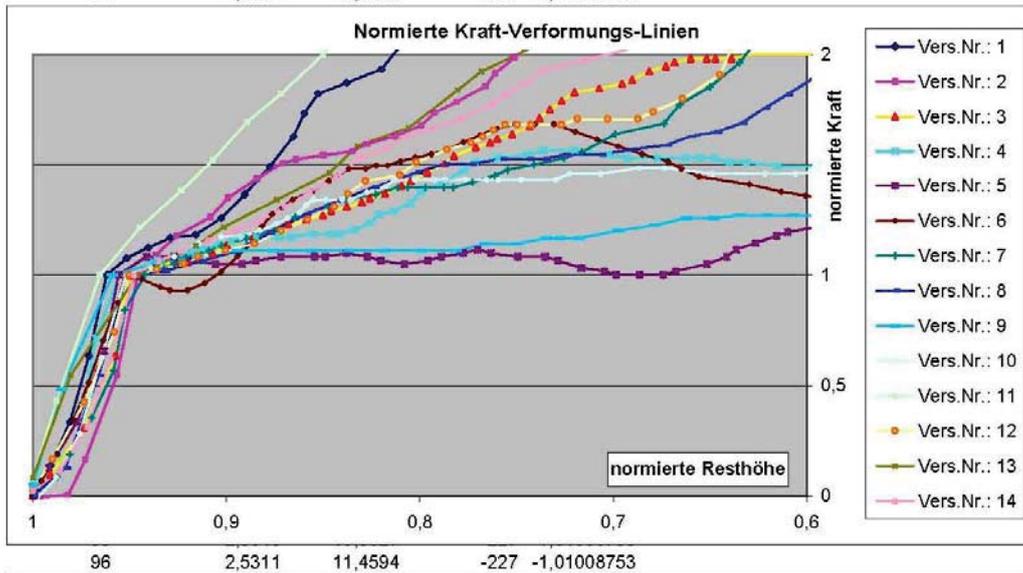
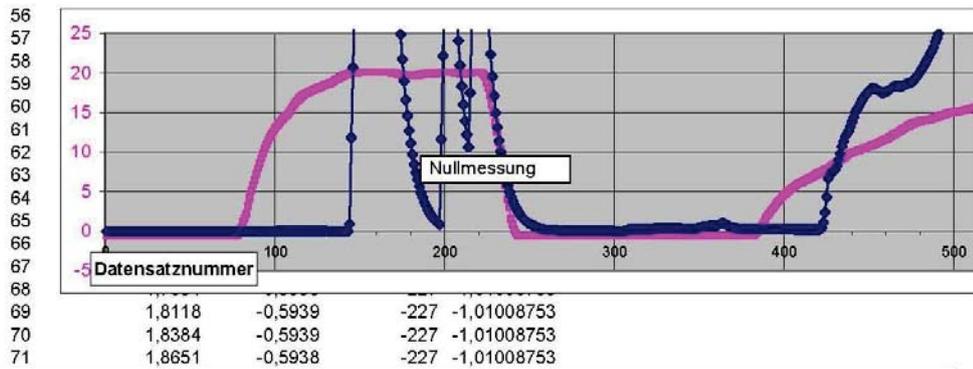
31	0,7993	-0,5943	-227	-1,01008753
32	0,826	-0,5945	-227	-1,01008753





Anlage 26, Blatt 2

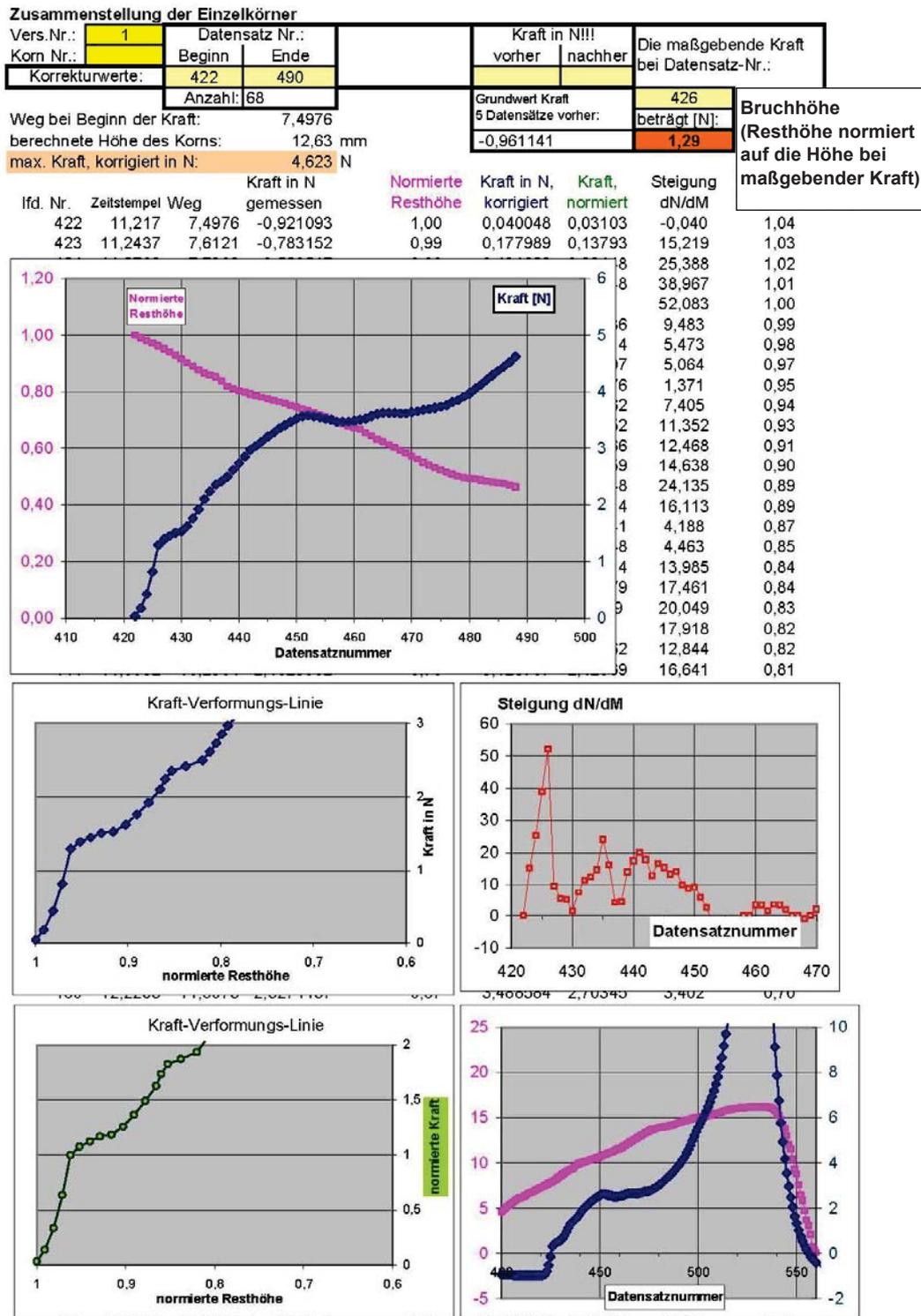
Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten 14 einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte





Anlage 26, Blatt 3

Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 1





Anlage 26, Blatt 4

Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 2

Zusammenstellung der Einzelkörner

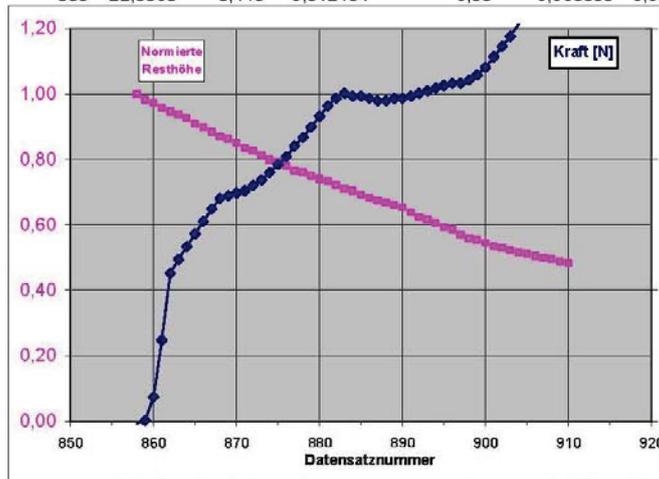
Vers.Nr.:	2	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!		Die maßgebende Kraft bei Datensatz-Nr.:
Korn Nr.:		Beginn	Ende	vorher	nachher	
Korrekturwerte:		858	910			
		Anzahl: 52				

Weg bei Beginn der Kraft: 8,1993
 berechnete Höhe des Kornes: 11,93 mm
 max. Kraft, korrigiert in N: 3,747 N

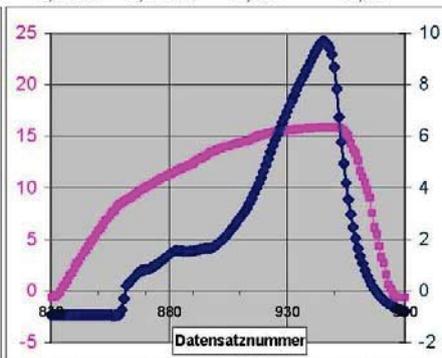
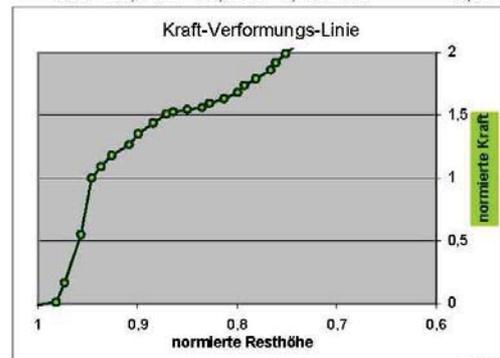
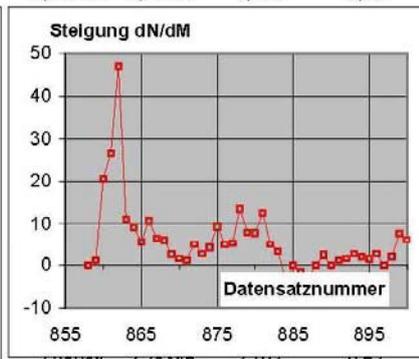
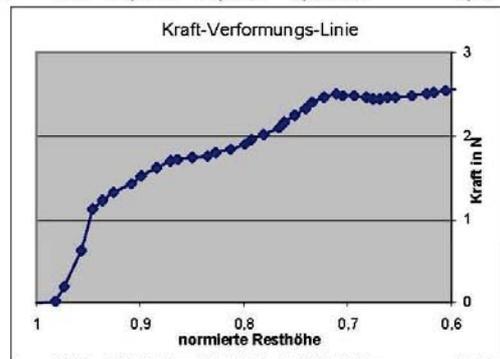
Grundwert Kraft	862
5 Datensätze vorher:	beträgt [N]:
-0,921093	1,13

Bruchhöhe
 (Resthöhe normiert auf die Höhe bei maßgebender Kraft)

lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Kraft in N gemessen	Normierte Resthöhe	Kraft in N, korrigiert	Kraft, normiert	Steigung dN/dM	Bruchhöhe
858	22,8337	8,1993	-0,934442	1,00	-0,013349	-0,0118	0,013	1,06
859	22,8603	8,419	-0,912194	0,98	0,008899	0,00787	1,208	1,04



3	5	20,517	1,03	
4	4	26,435	1,01	
5	3	46,927	1,00	
6	2	11,030	0,99	
7	1	9,146	0,98	
8	0	5,578	0,96	
9	0	10,715	0,95	
1	0	6,543	0,93	
2	0	5,995	0,92	
3	0	2,618	0,91	
4	0	1,570	0,90	
5	0	1,201	0,88	
6	0	5,171	0,87	
7	0	2,783	0,86	
8	0	4,224	0,84	
9	0	9,349	0,84	
1	0	5,016	0,83	
2	0	7	5,347	0,81
3	0	13,520	0,80	
4	0	9	7,904	0,79
5	0	6	7,756	0,78





Anlage 26, Blatt 5

Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 3

Zusammenstellung der Einzelkörner

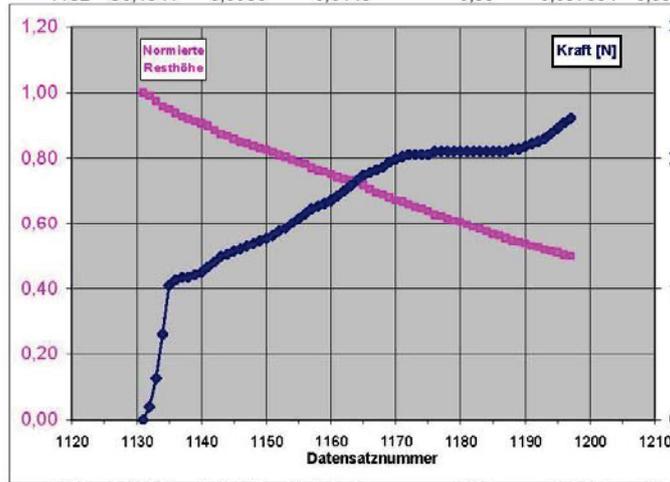
Vers.Nr.:	3	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!		Die maßgebende Kraft bei Datensatz-Nr.:
Korn Nr.:		Beginn	Ende	vorher	nachher	
Korrekturwerte:		1131	1200			
		Anzahl: 69				

Weg bei Beginn der Kraft: 8,5008
 berechnete Höhe des Kornes: 11,63 mm
 max. Kraft, korrigiert in N: 2,305 N

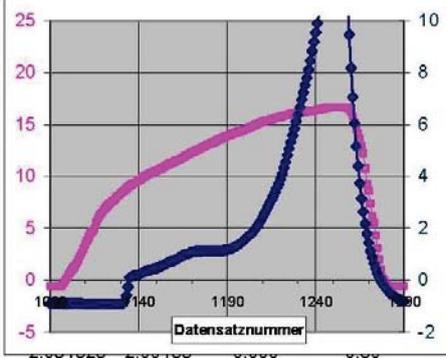
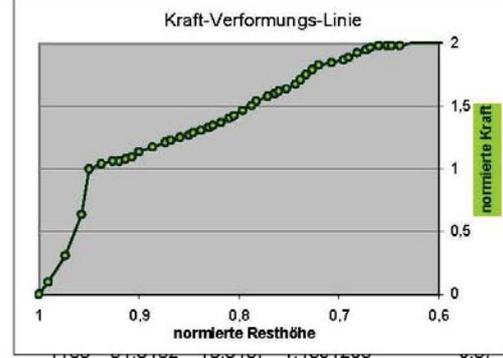
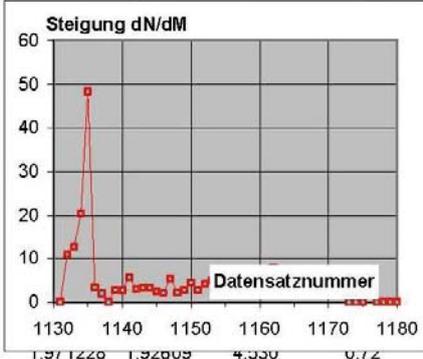
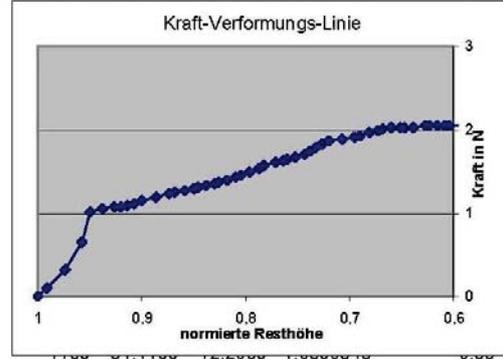
Grundwert Kraft	1135
5 Datensätze vorher:	beträgt [N]:
	1,02

Bruchhöhe
 (Resthöhe normiert auf die Höhe bei maßgebender Kraft)

lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Kraft in N gemessen	Normierte Resthöhe	Kraft in N, korrigiert	Kraft, normiert	Steigung dN/dM	Bruchhöhe
1131	30,1074	8,5008	-0,912194	1,00	0	0	0,000	1,05
1132	30,1341	8,6058	-0,8143	0,99	0,097894	0,09565	10,842	1,04



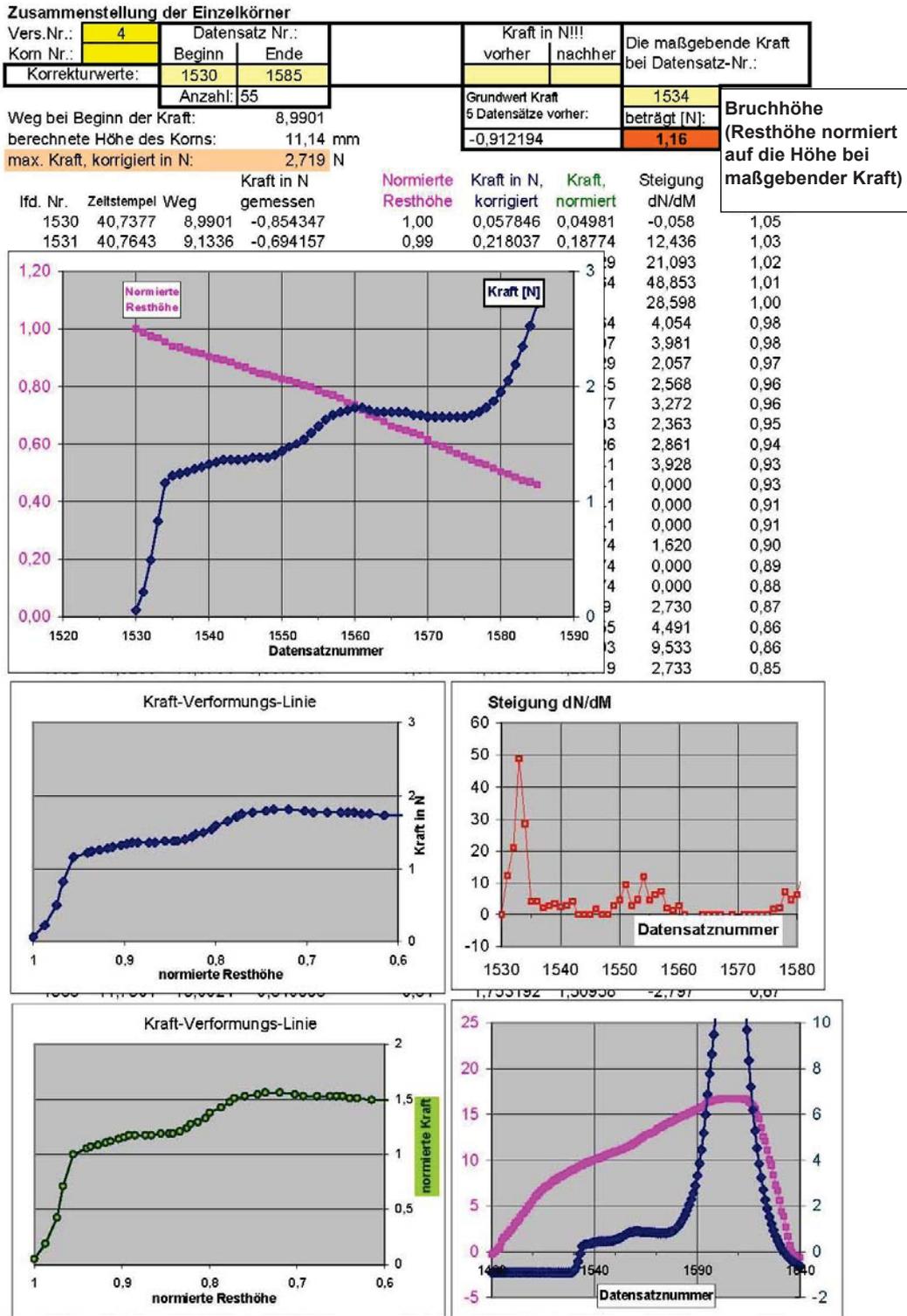
7	12,577	1,03
8	20,567	1,01
3	48,351	1,00
7	3,338	0,99
7	1,924	0,98
7	0,000	0,97
6	2,855	0,96
5	2,671	0,96
8	5,564	0,95
1	2,949	0,93
4	3,157	0,92
3	3,239	0,91
7	2,398	0,90
7	2,041	0,90
3	5,248	0,89
7	2,226	0,88
3	2,856	0,87
3	4,294	0,87
7	2,800	0,86
5	4,199	0,85
9	4,791	0,85





Anlage 26, Blatt 6

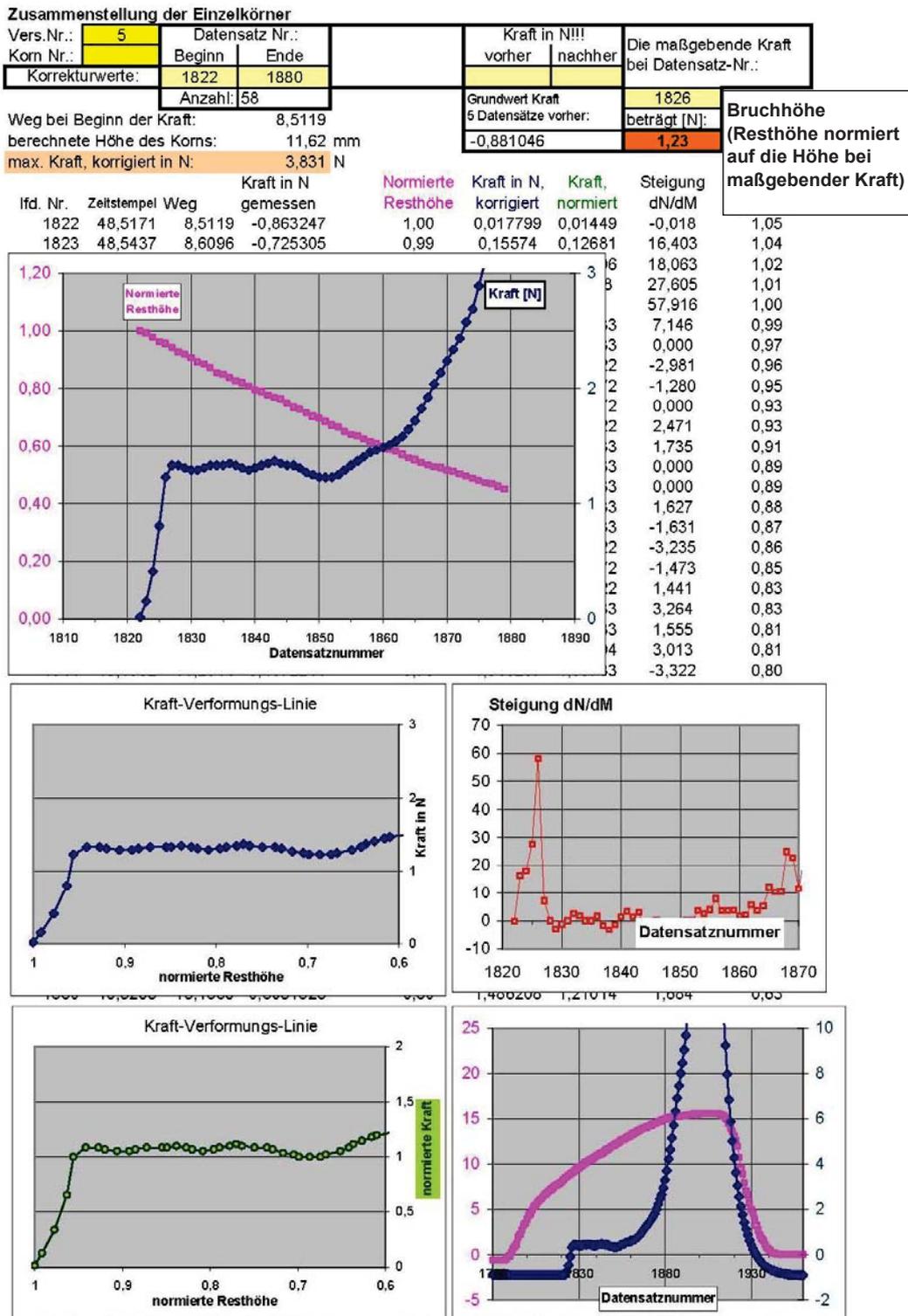
Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 4





Anlage 26, Blatt 7

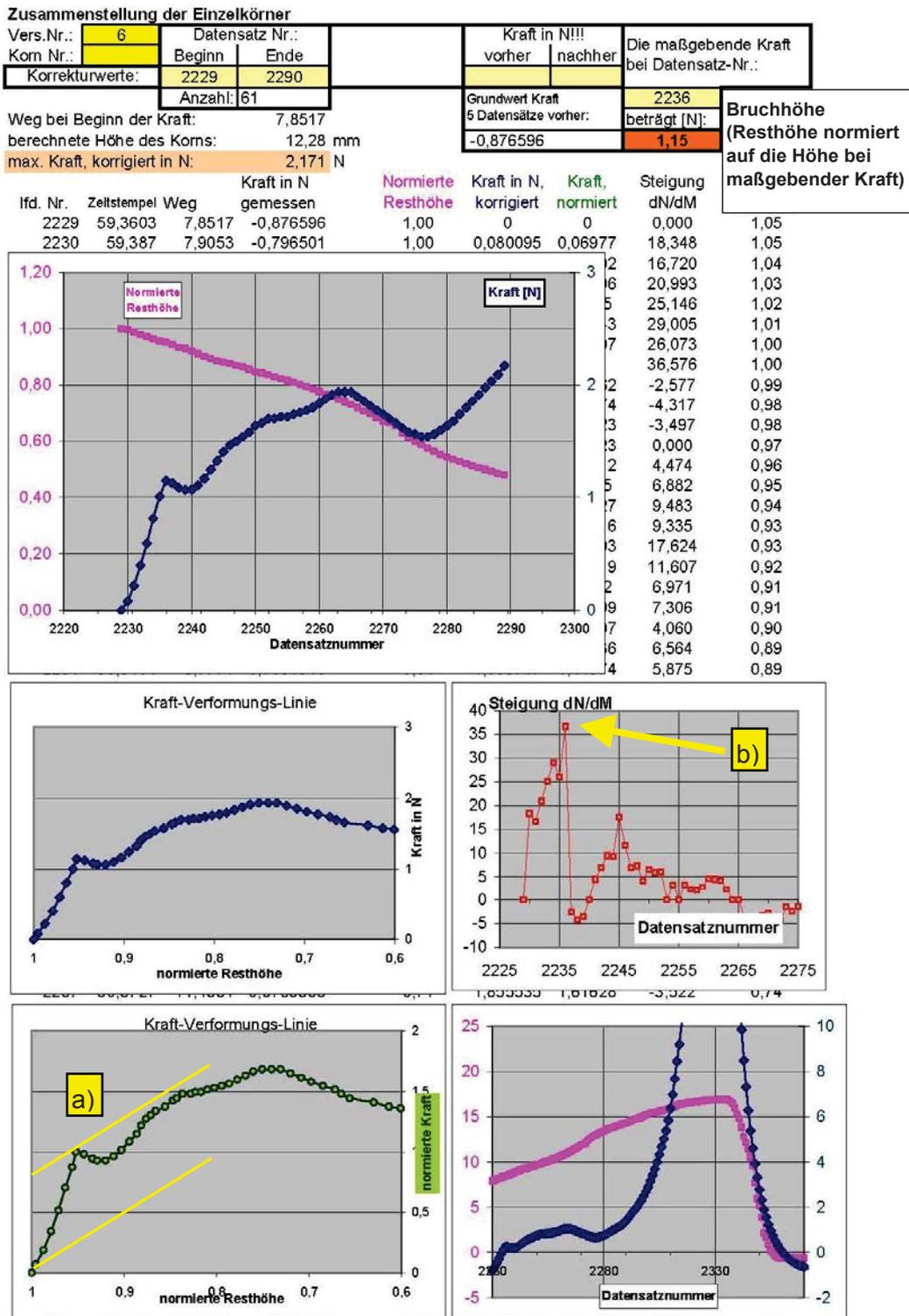
Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 5





Anlage 26, Blatt 8

Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 6





Anlage 26, Blatt 9

Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 7

Zusammenstellung der Einzelkörner

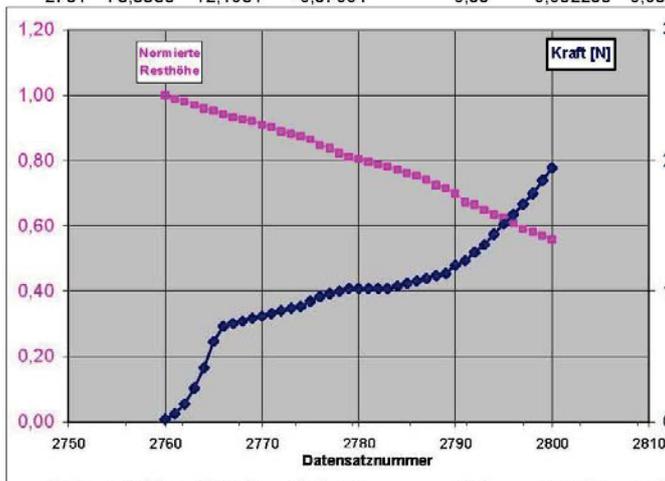
Vers.Nr.:	7	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!		Die maßgebende Kraft bei Datensatz-Nr.:
Korn Nr.:		Beginn	Ende	vorher	nachher	
Korrekturwerte:		2760	2800			
		Anzahl: 40				

Weg bei Beginn der Kraft: 12,0033
 berechnete Höhe des Kornes: 8,13 mm
 max. Kraft, korrigiert in N: 1,945 N

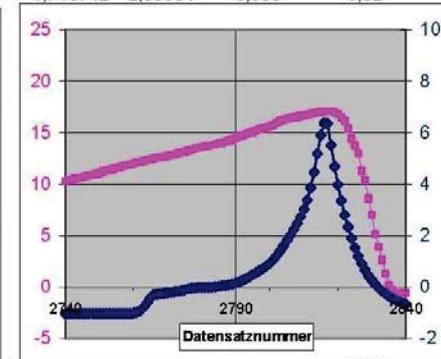
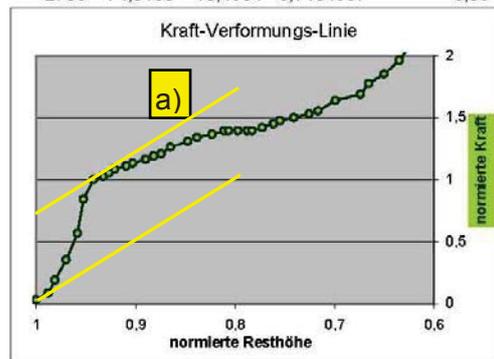
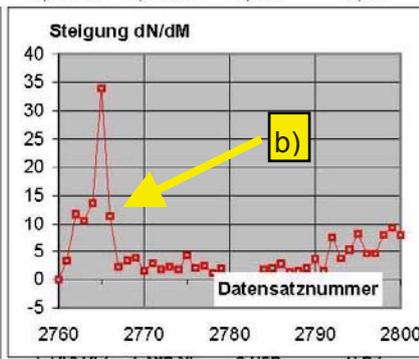
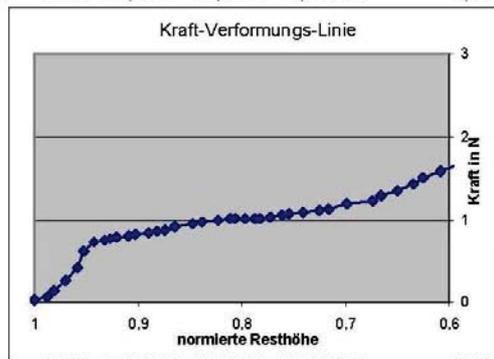
Grundwert Kraft 5 Datensätze vorher:	2766
	beträgt [N]:
	0,73

Bruchhöhe (Resthöhe normiert auf die Höhe bei maßgebender Kraft)

lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Kraft in N gemessen	Normierte Resthöhe	Kraft in N, korrigiert	Kraft, normiert	Steigung dN/dM	
2760	73,5071	12,0033	-1,010088	1,00	0,022249	0,03049	-0,022	1,06
2761	73,5338	12,1051	-0,97004	0,99	0,062296	0,08537	3,197	1,05



12	11,754	1,04
16	10,613	1,03
17	13,668	1,02
6	33,901	1,01
	11,369	1,00
9	2,200	0,99
18	3,302	0,98
7	3,839	0,98
6	1,502	0,96
5	2,792	0,96
3	1,709	0,94
12	2,208	0,94
12	1,744	0,93
2	4,254	0,92
18	2,062	0,90
6	2,385	0,89
5	1,176	0,87
4	1,911	0,86
4	0,000	0,86
4	0,000	0,85
4	0,000	0,84





Anlage 26, Blatt 10

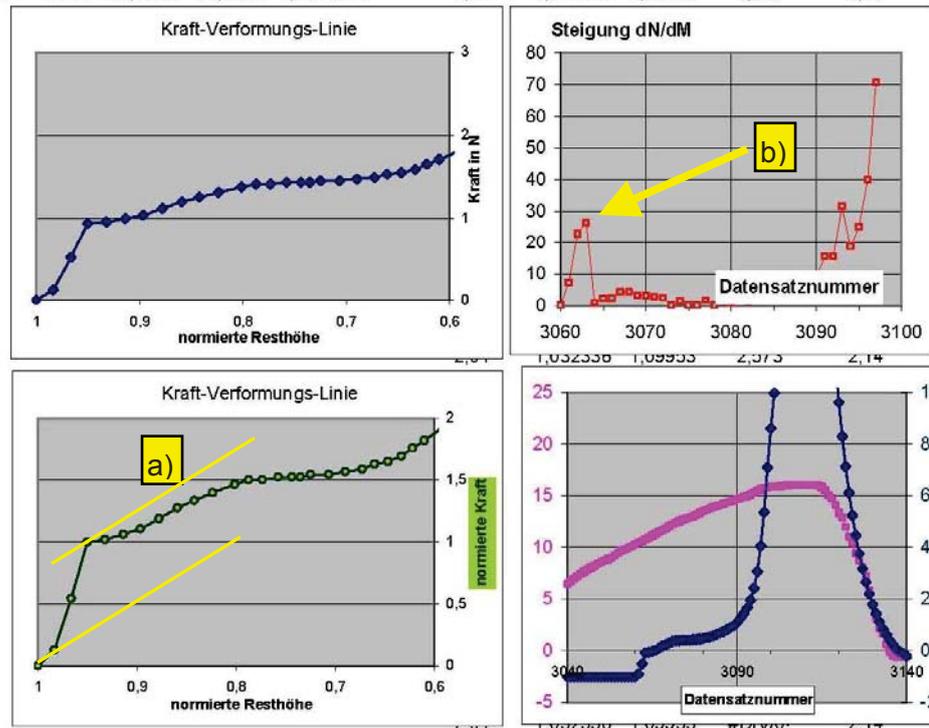
Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 8

Zusammenstellung der Einzelkörner

Vers.Nr.:	8	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!		Die maßgebende Kraft bei Datensatz-Nr.:
Korn Nr.:		Beginn	Ende	vorher	nachher	
Korrekturwerte:		3060	3097			
		Anzahl: 37				

Weg bei Beginn der Kraft:	10,2511	Grundwert Kraft	3063	Bruchhöhe (Resthöhe normiert auf die Höhe bei maßgebender Kraft)
berechnete Höhe des Kornes:	9,88 mm	5 Datensätze vorher:	beträgt [N]:	
max. Kraft, korrigiert in N:	5,090 N		0,94	

lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Kraft in N gemessen	Normierte Resthöhe	Kraft in N, korrigiert	Kraft, normiert	Steigung dN/dM
3060	81,4997	10,2511	-1,032336	1,00	0	0	0,000
3061	81,5263	10,4164	-0,912194	0,98	0,120143	0,12796	7,180
							22,930
							26,541
							0,989
							2,163
							2,335
							4,291
							4,282
							3,377
							3,143
							2,795
							2,525
							0,000
							1,411
							0,000
							0,000
							1,707
							2,000
							1,325
							1,049
							3,198
							1,326





Anlage 26, Blatt 11

Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 9

Zusammenstellung der Einzelkörner

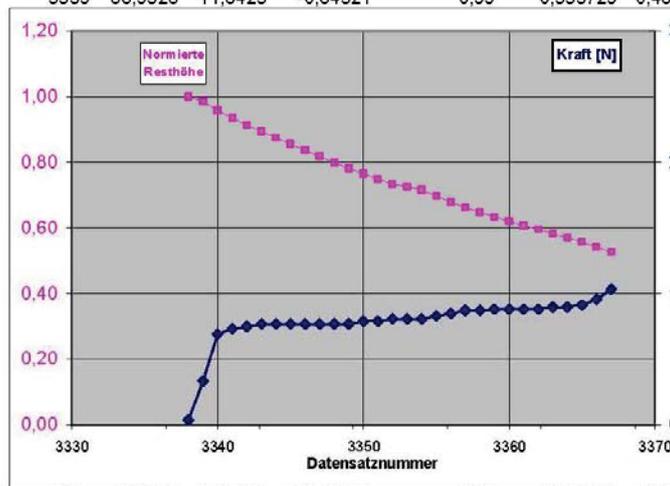
Vers.Nr.:	9	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!		Die maßgebende Kraft bei Datensatz-Nr.:
Korn Nr.:		Beginn	Ende	vorher	nachher	
Korrekturwerte:		3338	3370			
		Anzahl: 32				

Weg bei Beginn der Kraft: 11,7176
 berechnete Höhe des Kornes: 8,41 mm
 max. Kraft, korrigiert in N: 1,032 N

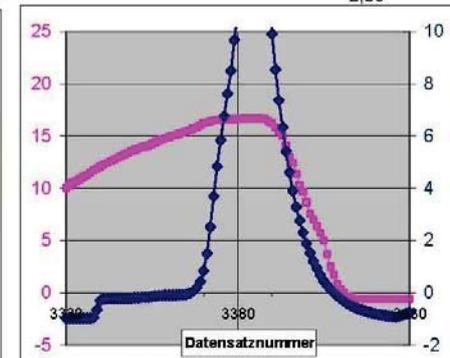
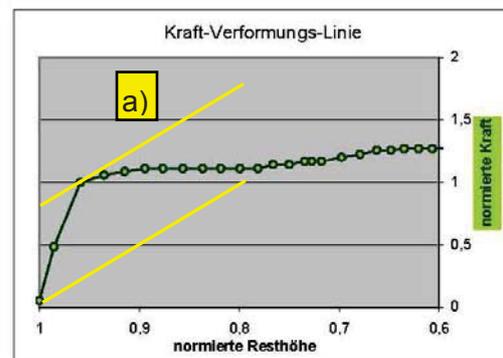
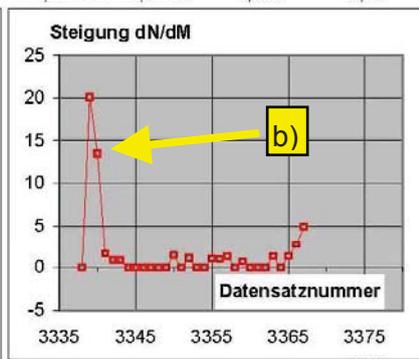
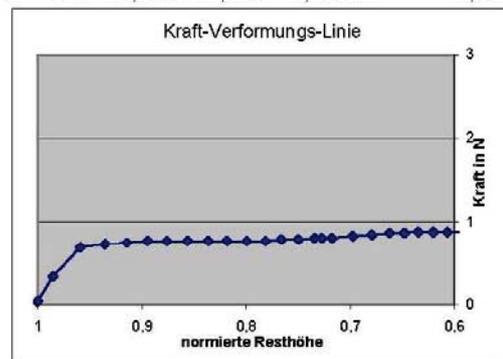
Grundwert Kraft 5 Datensätze vorher: -0,978939
 beträgt [N]: 0,69

Bruchhöhe (Resthöhe normiert auf die Höhe bei maßgebender Kraft)

lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Kraft in N gemessen	Normierte Resthöhe	Kraft in N, korrigiert	Kraft, normiert	Steigung dN/dM
3338	88,9061	11,7176	-0,943342	1,00	0,035598	0,05161	-0,036
3339	88,9328	11,8423	-0,64521	0,99	0,333729	0,48387	20,112



13,501	1,00
16	1,694
7	0,857
8	0,887
8	0,000
8	0,000
8	0,000
8	0,000
8	0,000
8	0,000
8	0,000
4	1,460
4	0,000
4	1,146
4	0,000
4	0,000
1	1,106
1	0,960
6	1,333
6	0,000
7	0,667
7	0,000
7	0,66
7	0,65





Anlage 26, Blatt 12

Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 10

Zusammenstellung der Einzelkörner

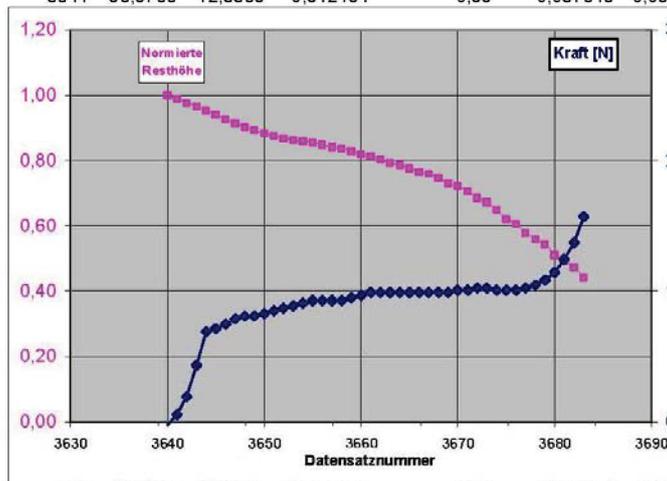
Vers.Nr.:	10	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!		Die maßgebende Kraft bei Datensatz-Nr.:
Korn Nr.:		Beginn	Ende	vorher	nachher	
Korrekturwerte:		3640	3683			
		Anzahl: 43				

Weg bei Beginn der Kraft: 12,2426
 berechnete Höhe des Kornes: 7,89 mm
 max. Kraft, korrigiert in N: 1,571 N

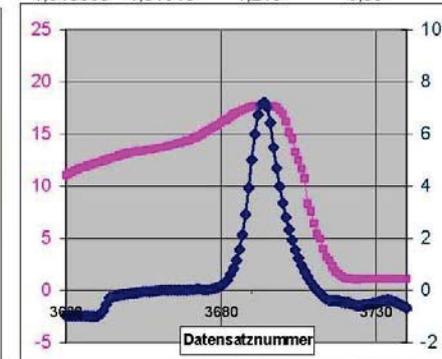
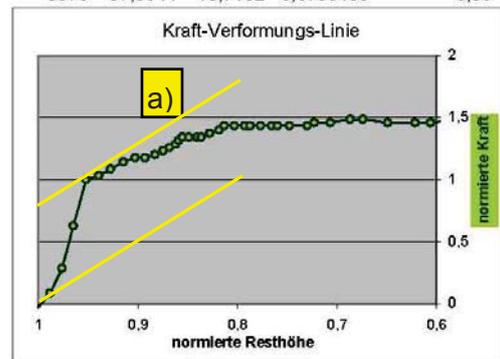
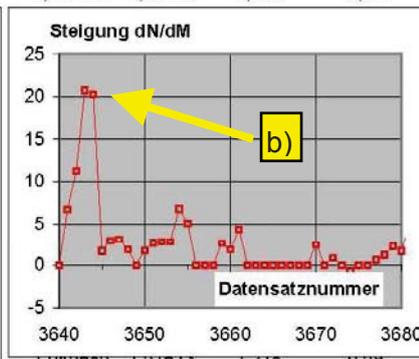
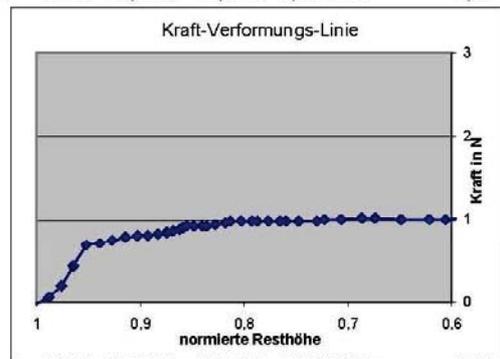
Grundwert Kraft 5 Datensätze vorher:	3644
	beträgt [N]:
	0,69

Bruchhöhe
 (Resthöhe normiert auf die Höhe bei maßgebender Kraft)

lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Kraft in N gemessen	Normierte Resthöhe	Kraft in N, korrigiert	Kraft, normiert	Steigung dN/dM	Bruchhöhe
3640	96,952	12,2426	-0,992289	1,00	-0,022249	-0,0323	0,022	1,05
3641	96,9786	12,3369	-0,912194	0,99	0,057846	0,08387	6,699	1,04



7	11,298	1,03
1	20,714	1,01
	20,295	1,00
6	1,737	0,99
7	2,990	0,97
4	3,178	0,96
2	1,865	0,95
9	0,000	0,94
	1,807	0,93
16	2,700	0,92
16	2,871	0,91
7	2,871	0,91
3	6,775	0,90
4	5,014	0,90
4	0,000	0,89
4	0,000	0,88
4	0,000	0,88
9	2,639	0,87
	1,897	0,86
16	4,376	0,85
16	0,000	0,84





Anlage 26, Blatt 13

Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 11

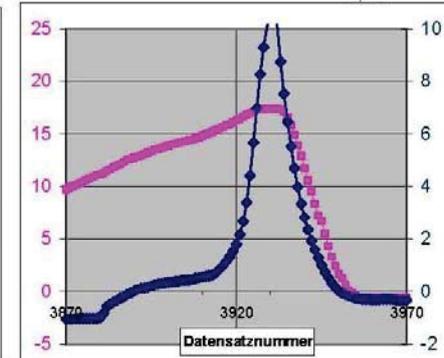
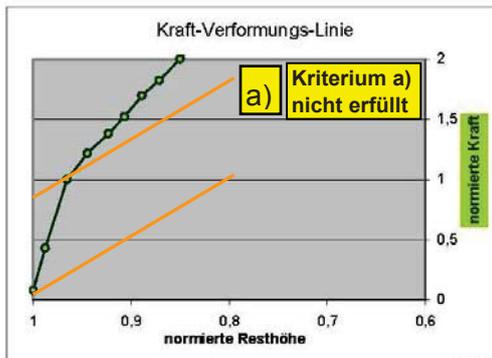
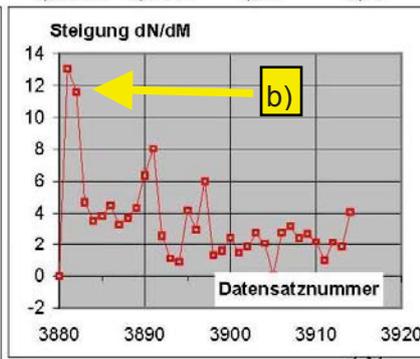
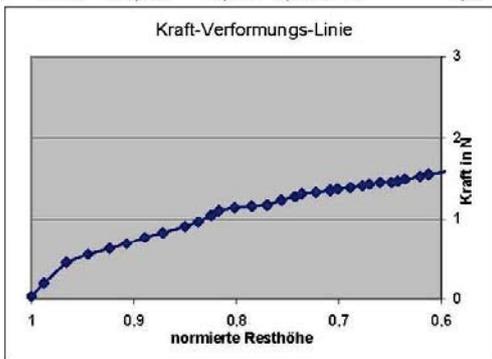
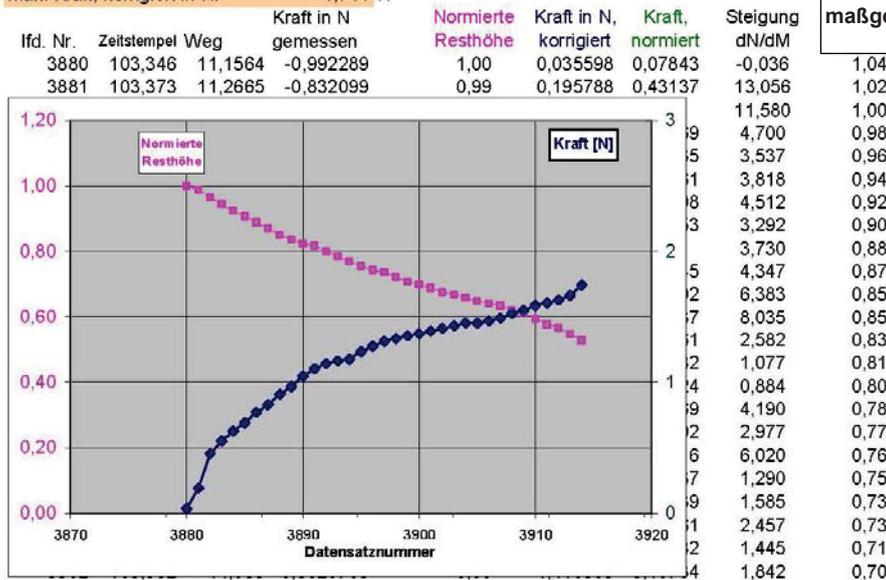
Zusammenstellung der Einzelkörner

Vers.Nr.:	11	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!		Die maßgebende Kraft bei Datensatz-Nr.:
Korn Nr.:		Beginn	Ende	vorher	nachher	
Korrekturwerte:		3880	3915			
		Anzahl: 35				

Weg bei Beginn der Kraft: 11,1564
 berechnete Höhe des Kornes: 8,97 mm
 max. Kraft, korrigiert in N: 1,744 N

Grundwert Kraft 5 Datensätze vorher:	3882
	beträgt [N]:
	0,45

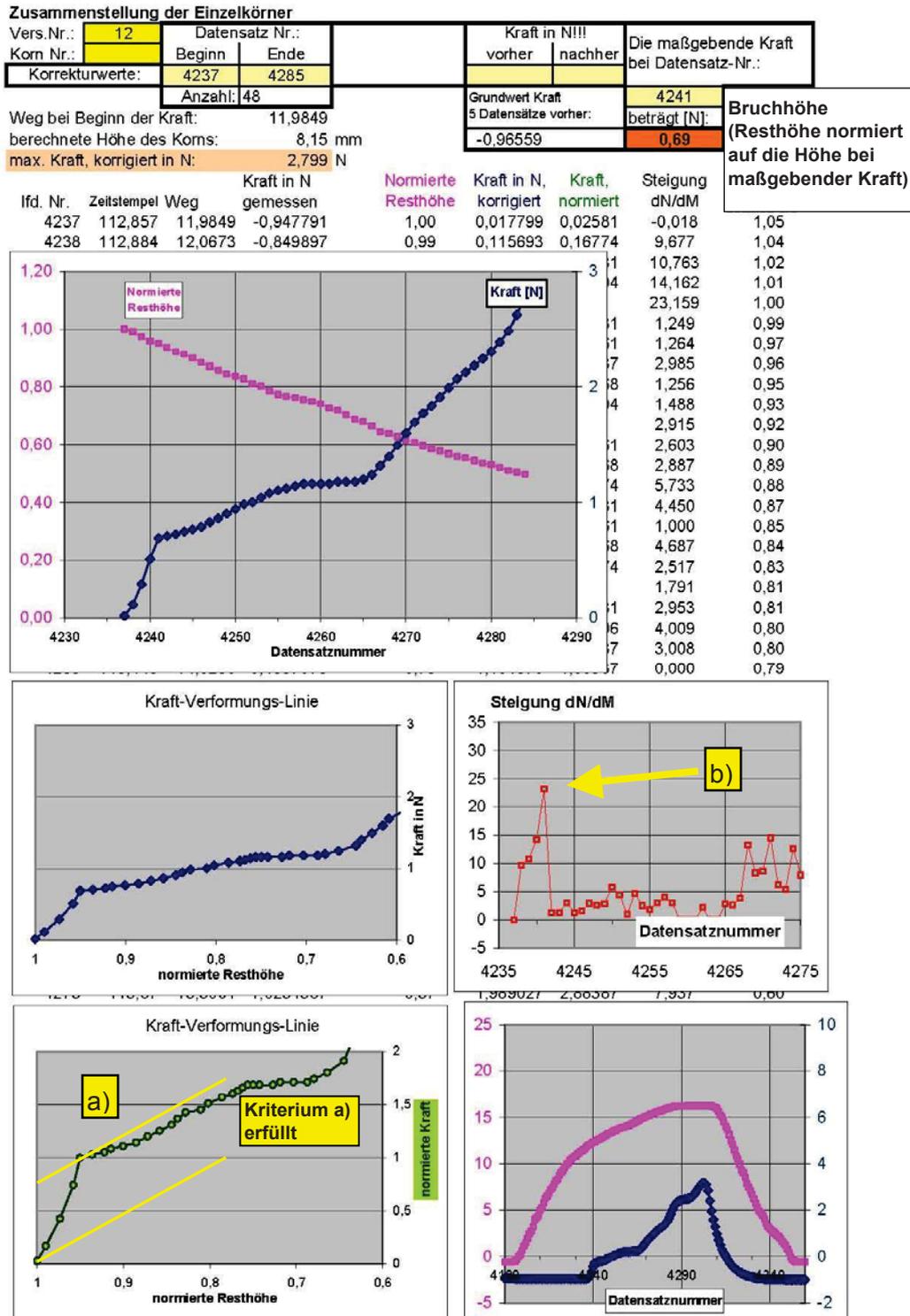
Bruchhöhe (Resthöhe normiert auf die Höhe bei maßgebender Kraft)





Anlage 26, Blatt 14

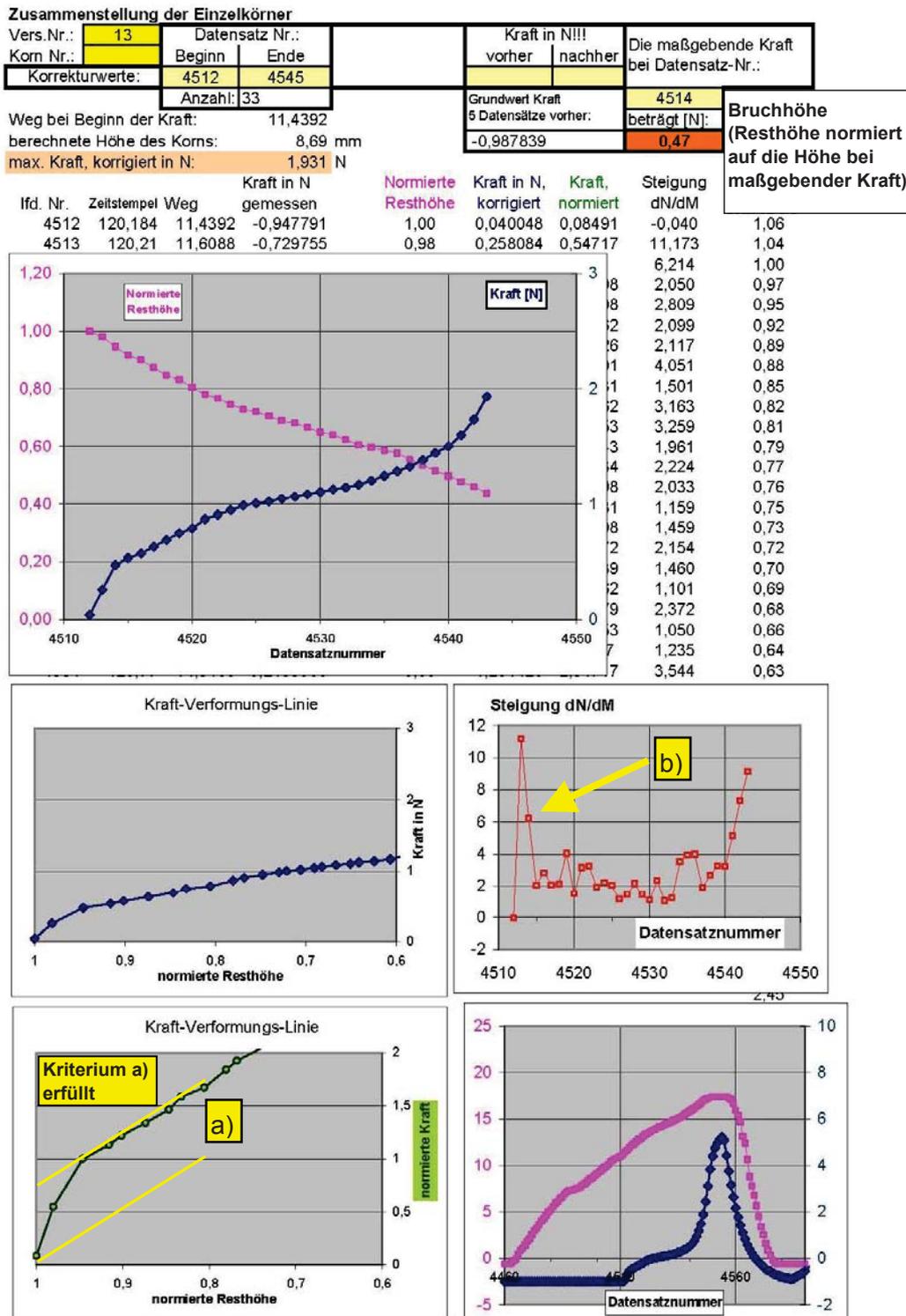
Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 12





Anlage 26, Blatt 15

Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 13





Anlage 26, Blatt 16

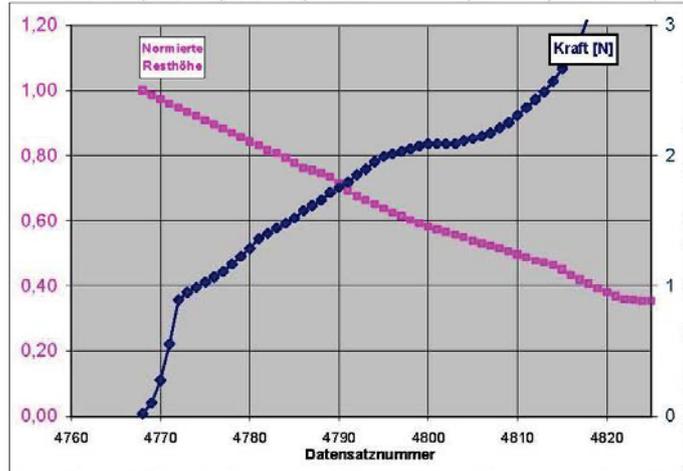
Zu Absatz 4.5.4: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten einzelner Frischlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 14

Zusammenstellung der Einzelkörner

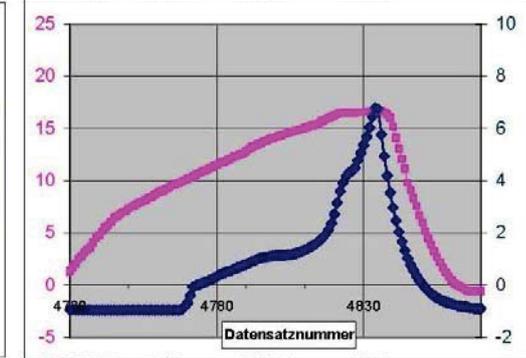
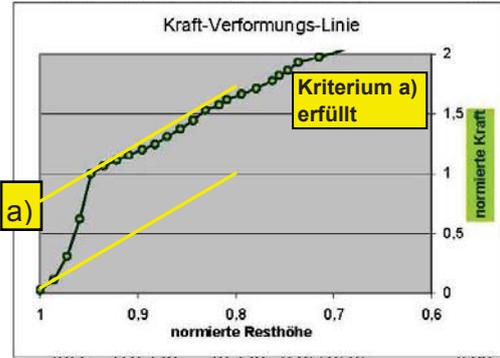
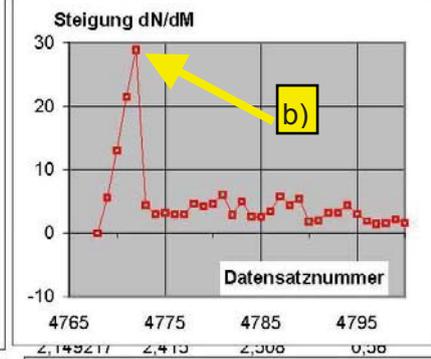
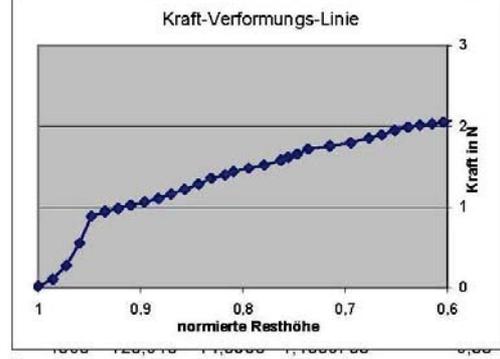
Vers.Nr.:	14	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!		Die maßgebende Kraft bei Datensatz-Nr.:
Korn Nr.:		Beginn	Ende	vorher	nachher	
Korrekturwerte:		4768	4825			
		Anzahl: 57				

Weg bei Beginn der Kraft:	9,8867	Grundwert Kraft	4772	Bruchhöhe (Resthöhe normiert auf die Höhe bei maßgebender Kraft)
berechnete Höhe des Kornes:	10,24 mm	5 Datensätze vorher:	0,89	
max. Kraft, korrigiert in N:	5,246 N			

lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Kraft in N gemessen	Normierte Resthöhe	Kraft in N, korrigiert	Kraft, normiert	Steigung dN/dM	Bruchhöhe
4768	127,004	9,8867	-0,938892	1,00	0,022249	0,025	-0,022	1,06
4769	127,031	10,0327	-0,858797	0,99	0,102344	0,115	5,619	1,04



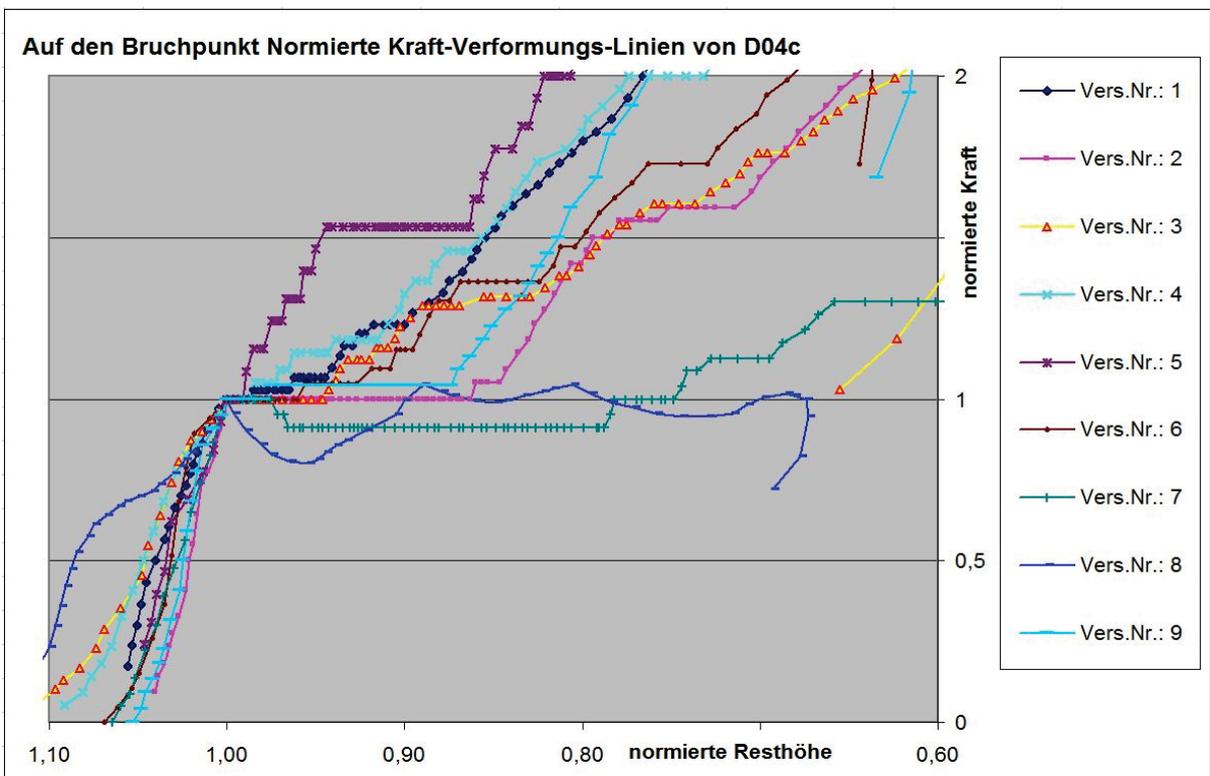
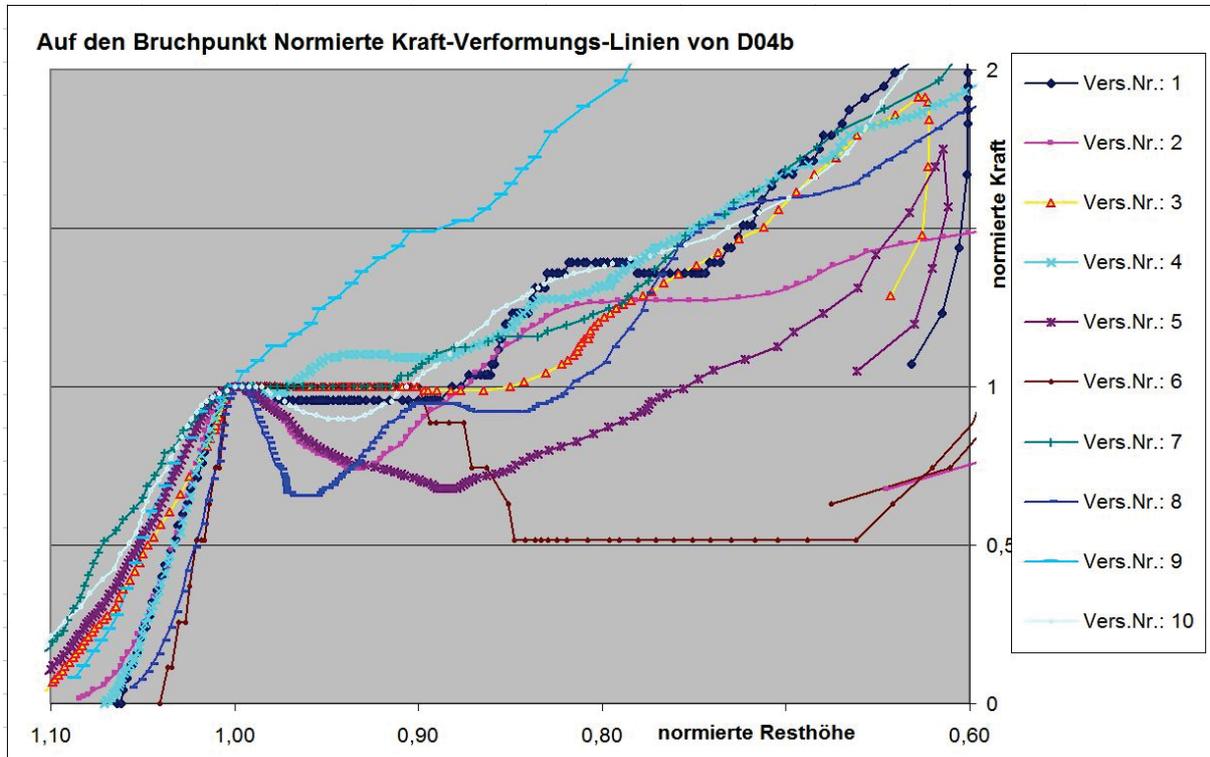
12,994	1,03
21,409	1,01
28,915	1,00
4,432	0,99
3,045	0,97
3,240	0,96
2,958	0,95
2,996	0,93
4,666	0,92
4,344	0,90
4,641	0,89
6,101	0,88
2,928	0,86
4,931	0,85
2,672	0,84
2,635	0,82
3,552	0,80
5,786	0,80
4,478	0,79
5,426	0,78
1,867	0,75





Anlage 27, Blatt 1

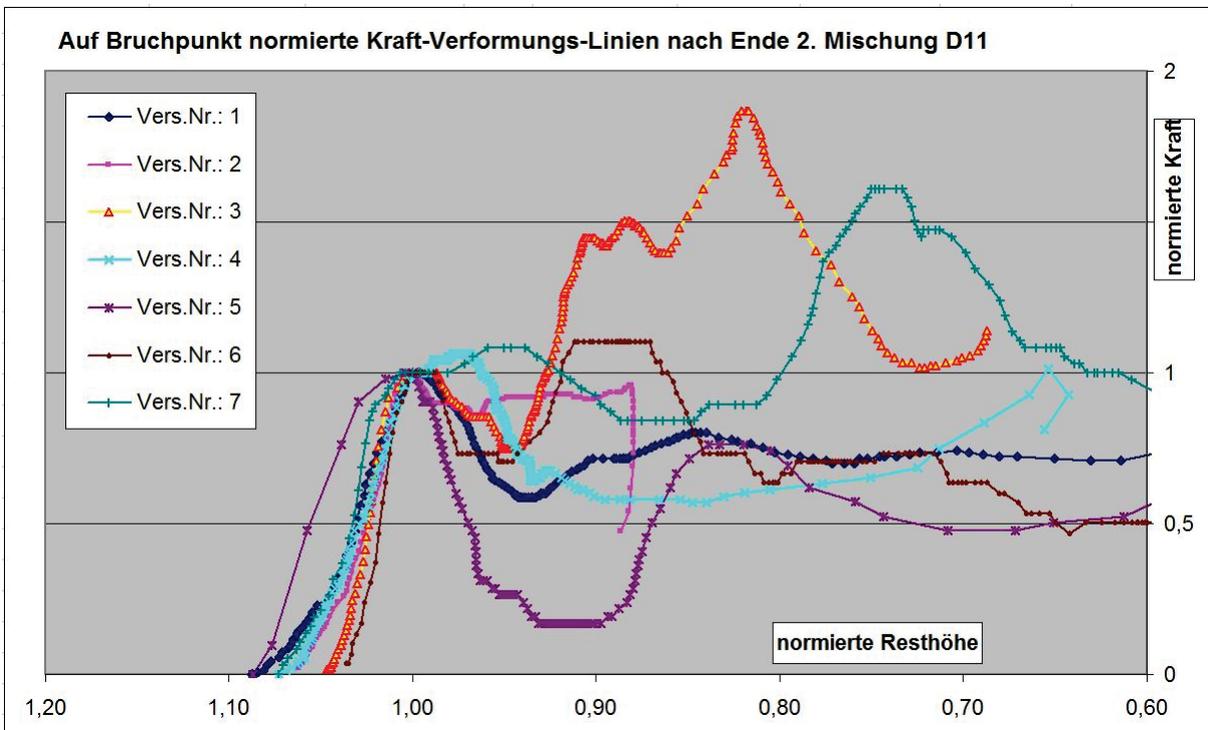
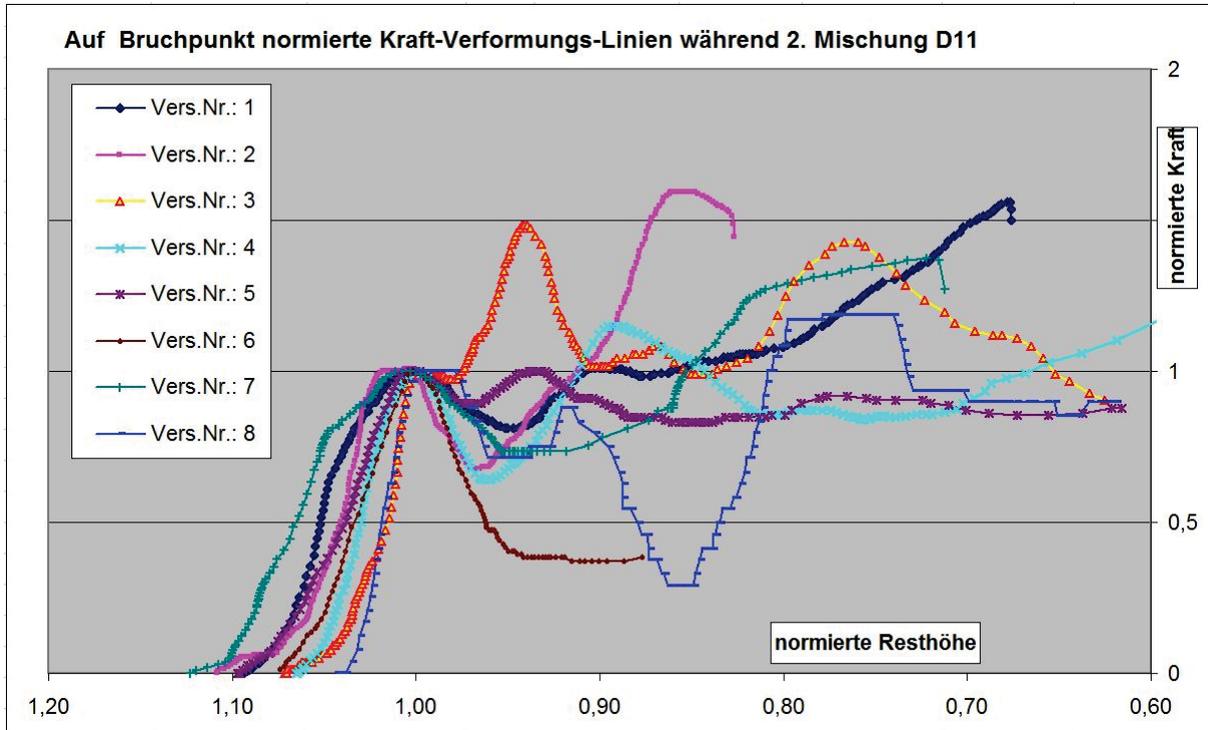
Zu Absatz 4.5.4: Kraft-Verformungs-Linien von Frischlingen der Rezeptur D04





Anlage 27, Blatt 2

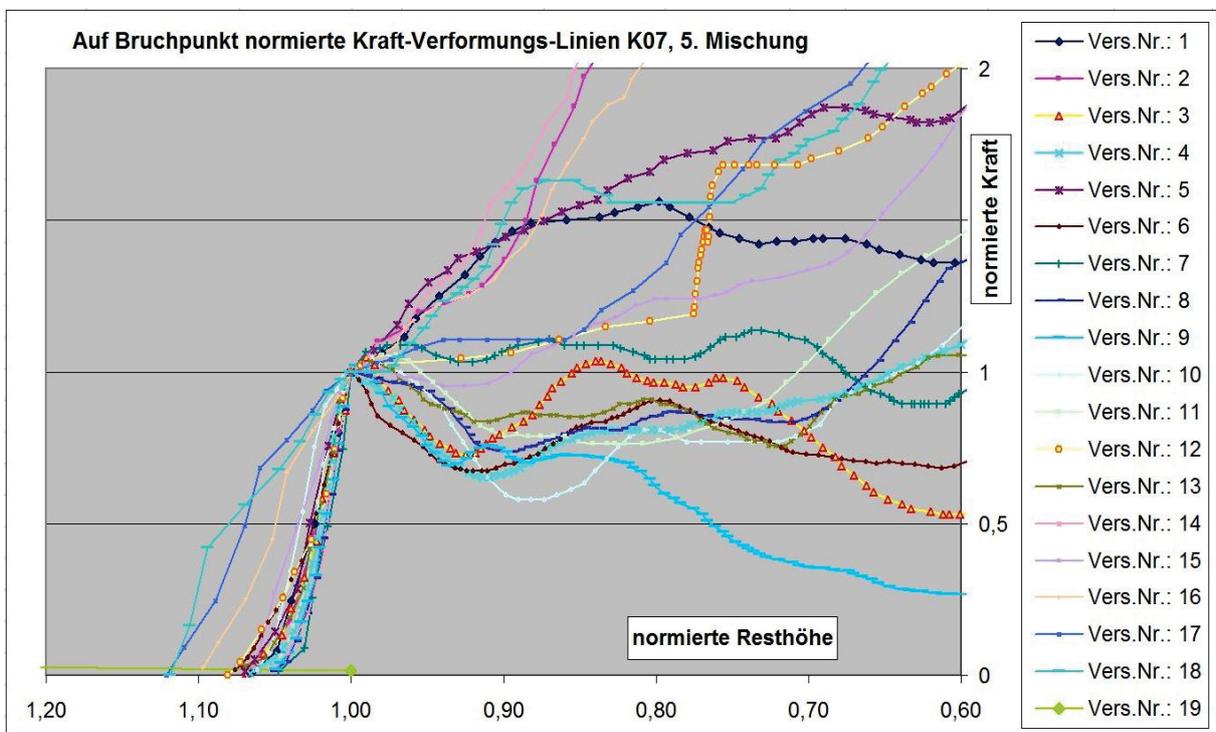
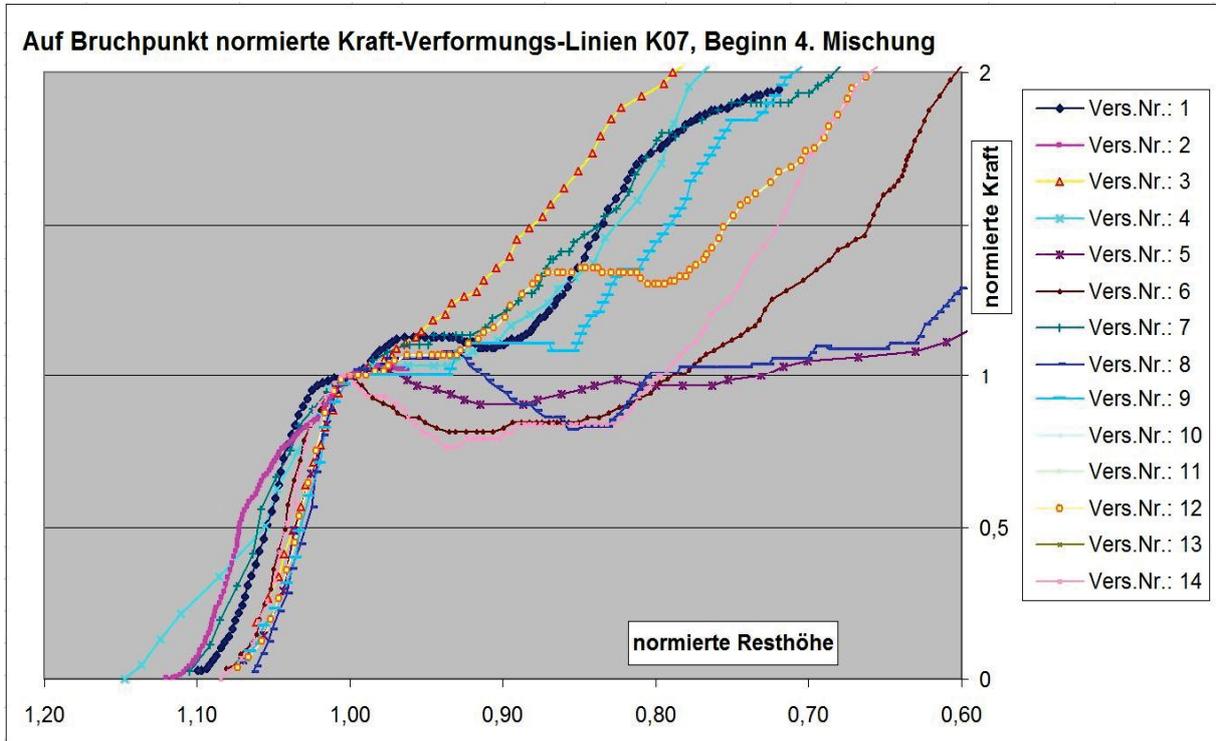
Zu Absatz 4.5.4: Kraft-Verformungs-Linien von Frischlingen der Rezeptur D11





Anlage 27, Blatt 3

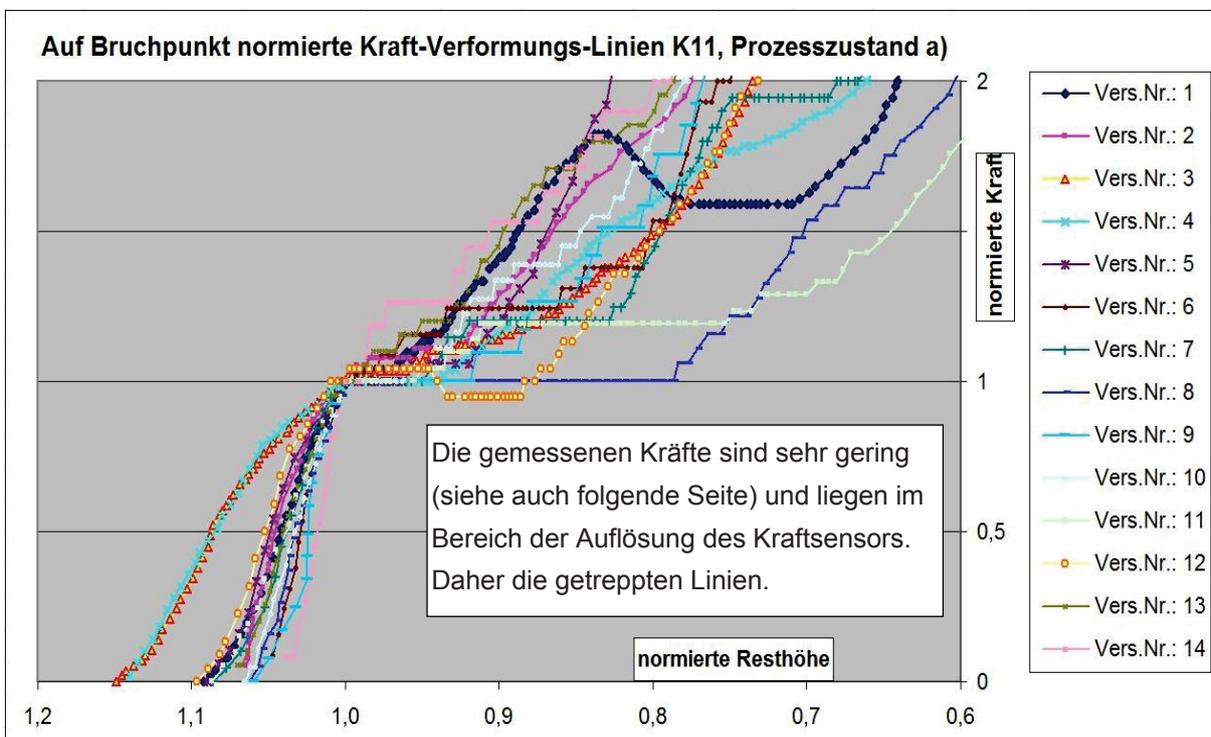
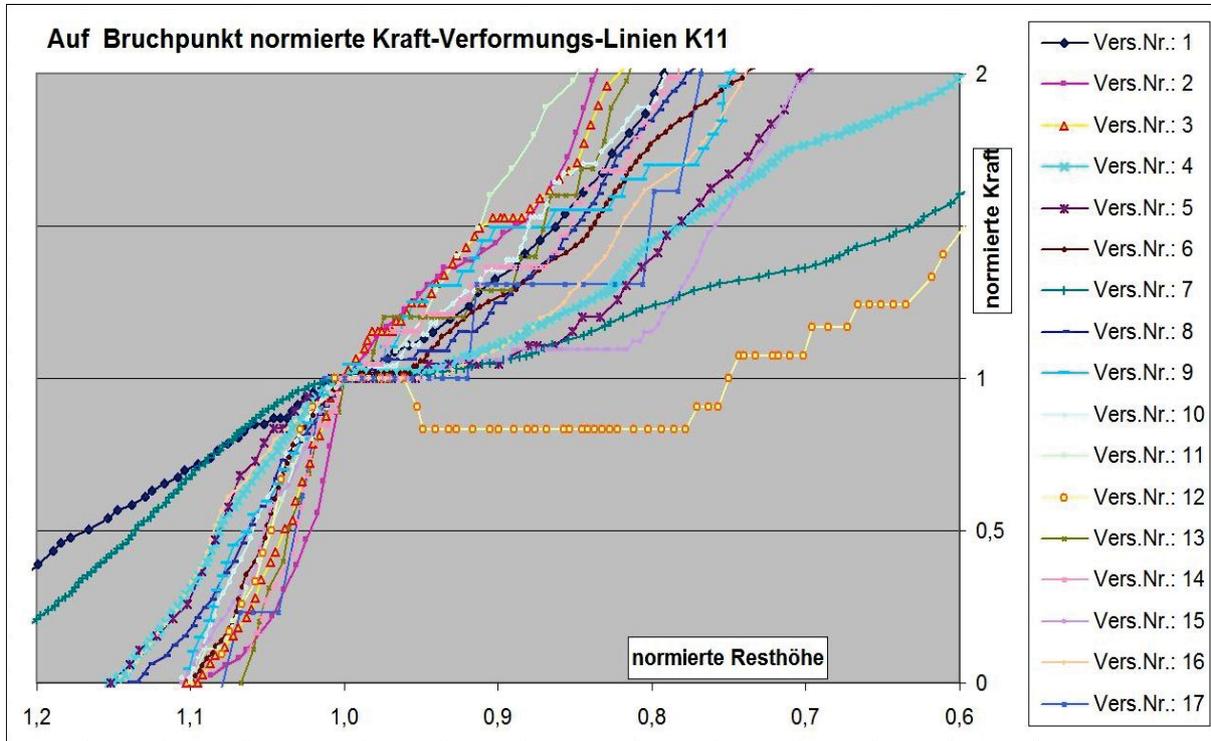
Zu Absatz 4.5.4: Kraft-Verformungs-Linien von Frischlingen der Rezeptur K07





Anlage 27, Blatt 4

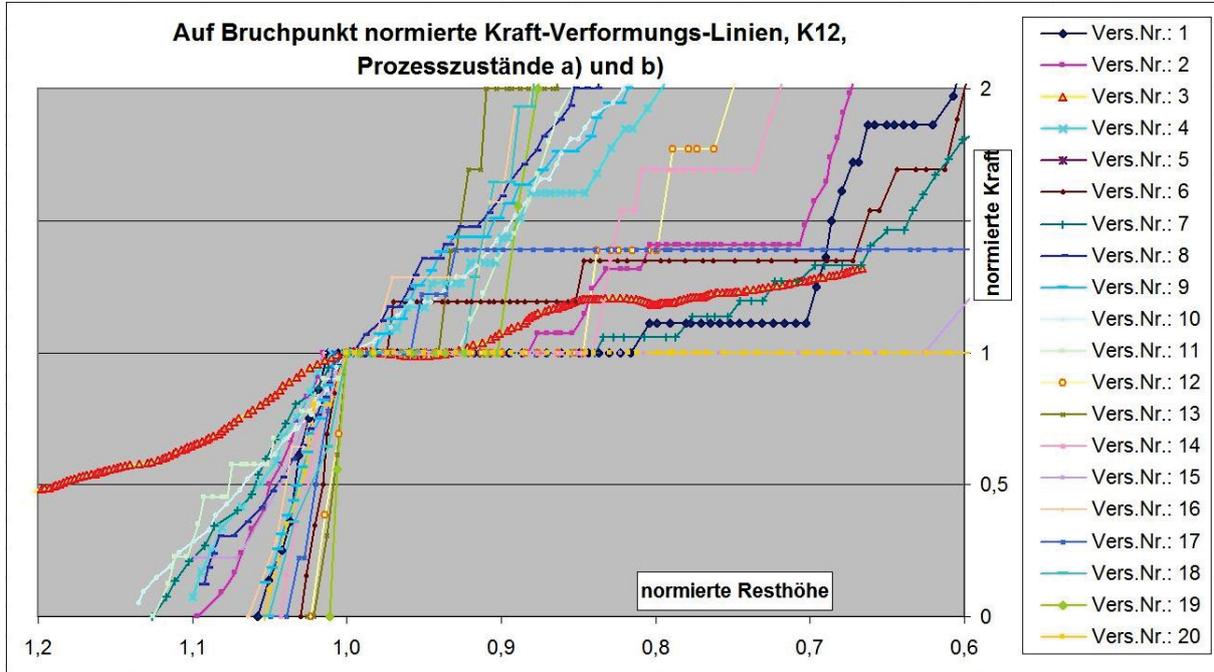
Zu Absatz 4.5.4: Kraft-Verformungs-Linien von Frischlingen der Rezeptur K11





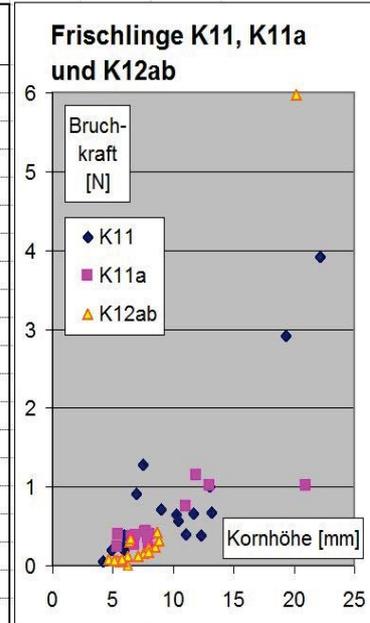
Anlage 27, Blatt 5

Zu Absatz 4.5.4: Kraft-Verformungs-Linien von Frischlingen der Rezeptur K12 und Bruchkräfte



Dateiname: 20110110103417	Dateiname: 20110110105109	Dateiname: 20110110125337
Rezeptur: K11	Rezeptur: K11a	Rezeptur: K12ab
Kleine und große, Letztes war ein großes Sekundäragglomerat	Herstellzustand "a" (trocken kullend) erste 3 länglich mit 1:1,2:3	bis zum Auskippen Prozesszustand "b" (feuchte Kugeln) danach Prozesszustand "a"

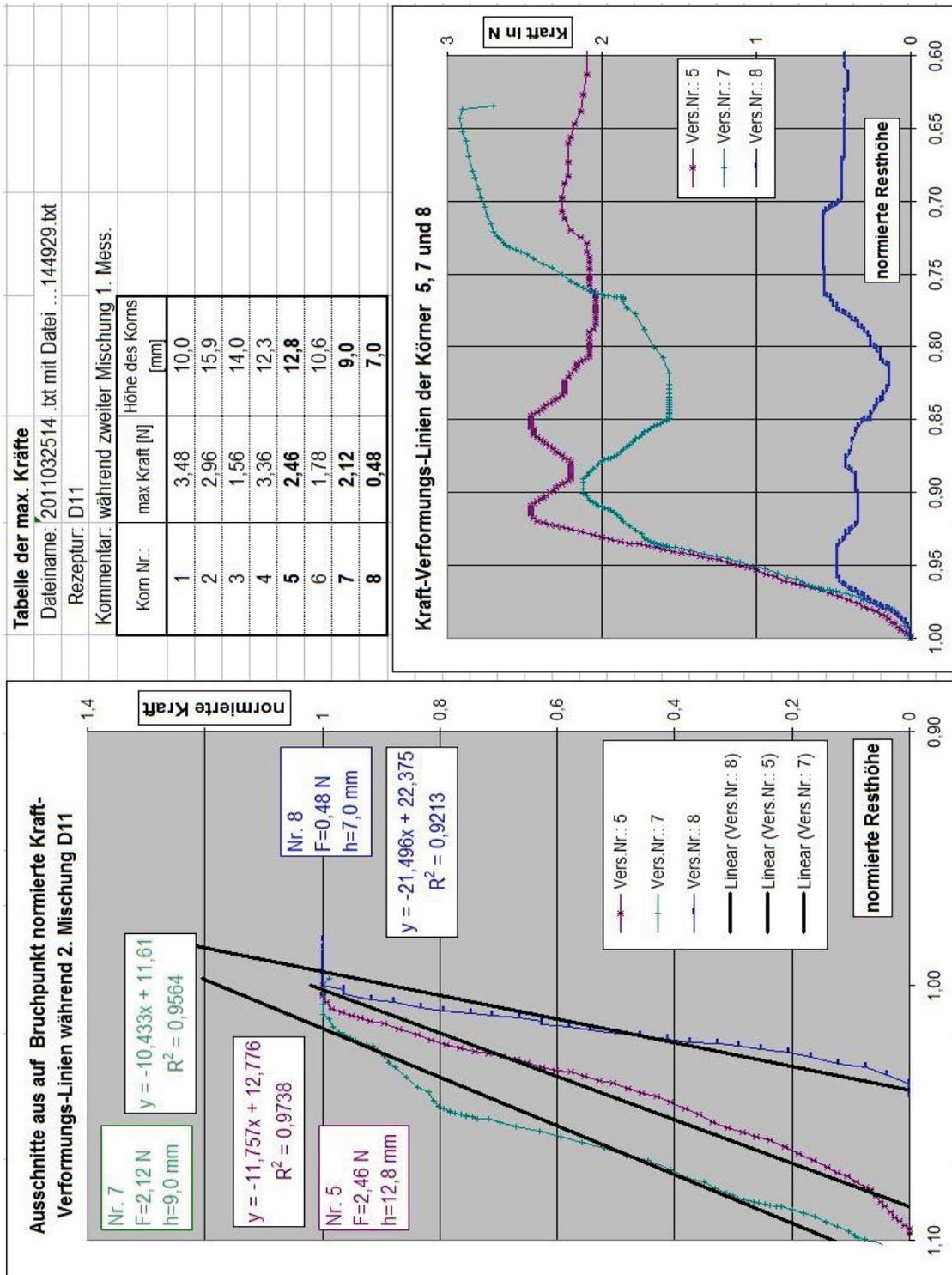
Korn Nr.:	max Kraft [N]	Höhe des Korns [mm]	Korn Nr.:	max Kraft [N]	Höhe des Korns [mm]	Korn Nr.:	max Kraft [N]	Höhe des Korns [mm]
1	0,91	7,0	1	1,01	20,9	1	0,16	7,6
2	0,71	9,0	2	0,75	11,1	2	0,24	8,5
3	0,64	10,3	3	1,15	11,9	3	5,97	20,2
4	2,91	19,3	4	1,01	13,0	4	0,24	8,0
5	0,38	5,9	5	0,39	6,9	5	-	6,3
6	1,00	13,0	6	0,26	6,8	6	0,12	7,1
7	3,92	22,1	7	0,40	8,1	7	0,30	6,4
8	0,65	11,7	8	0,37	6,5	8	0,34	6,5
9	0,40	11,0	9	0,24	5,4	9	0,32	8,9
10	0,56	10,4	10	0,36	7,9	10	0,42	8,6
11	0,20	4,9	11	0,42	7,6	11	0,18	8,0
12	0,24	5,9	12	0,44	7,7	12	0,06	5,6
13	0,20	5,9	13	0,40	5,5	13	0,06	5,8
14	0,38	12,3	14	0,22	8,0	14	0,12	6,3
15	0,67	13,2				15	0,08	4,7
16	1,28	7,5				16	0,06	5,4
17	0,06	4,1				17	0,08	5,8
						18	0,06	5,1
						19	0,04	4,8
						20	0,09	7,0





Anlage 27, Blatt 6

Zu Absatz 4.5.4: Kraft-Verformungs-Linien von Frischlingen der Rezeptur D11 mit Betrachtung der Anstiege und Bruchkräfte



Anlage 28, Blatt 1

Zu Abschnitt 4.5.4: Mögliche Kriterien zum Bestimmen des „Bruchpunktes“ an Frischlingen

Mögliche Kriterien zur Definition des „Bruchpunktes von Frischlingen:Neigung unterschreitet Mindestwert:

Nach Abklingen des „Vergleichmäßigen“ des Auflagerbereiches des Agglomeratkorns oder des „Kriechbereiches“ wird eine Gerade durch die Punkte der Kraft-Verformungs-Linie gezogen. Der Bruchpunkt gilt als erreicht, wenn deren Anstieg m in dem Diagramm mit der Darstellung „Normierte Resthöhe / Normierte Kraft“ $m < 5$ wird. Siehe (gelbe Linie mit a) in den letzten Blättern der *Anlage 26*).

$$m = \Delta F_{\text{normiert}} / \Delta h_{\text{normiert}} < 5$$

oder

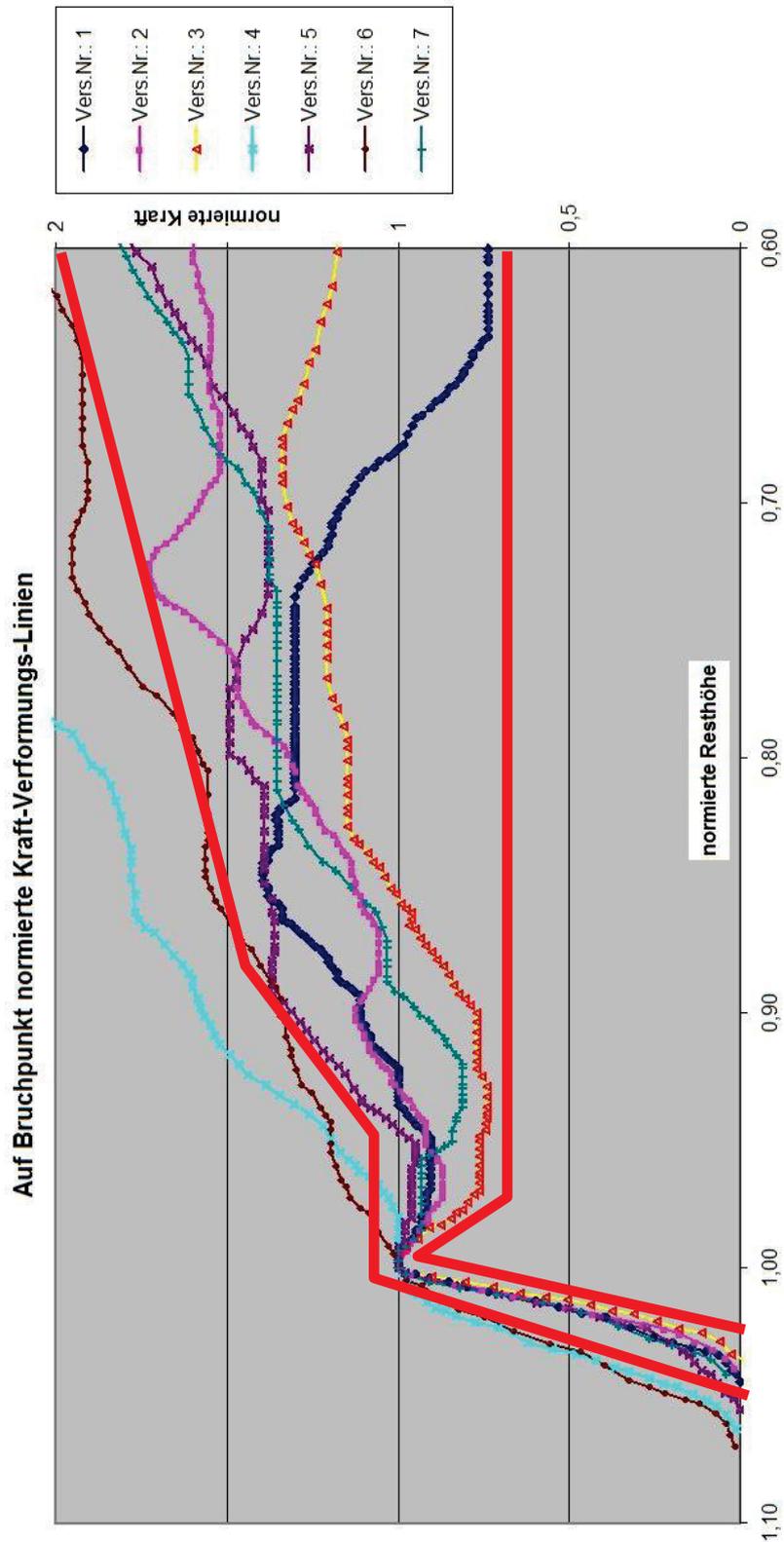
Plötzliche Änderung der Neigung:

Nach der Phase des Anstieges im Diagramm Steigung dN/dM / Datensatznummer findet ein plötzlicher Abfall auf Werte kleiner 5 statt. Als Bruchpunkt gilt der letzte „hohe Wert“. Siehe (gelber Pfeil mit b) in den letzten Blättern der *Anlage 26*).



Anlage 29, Blatt 1

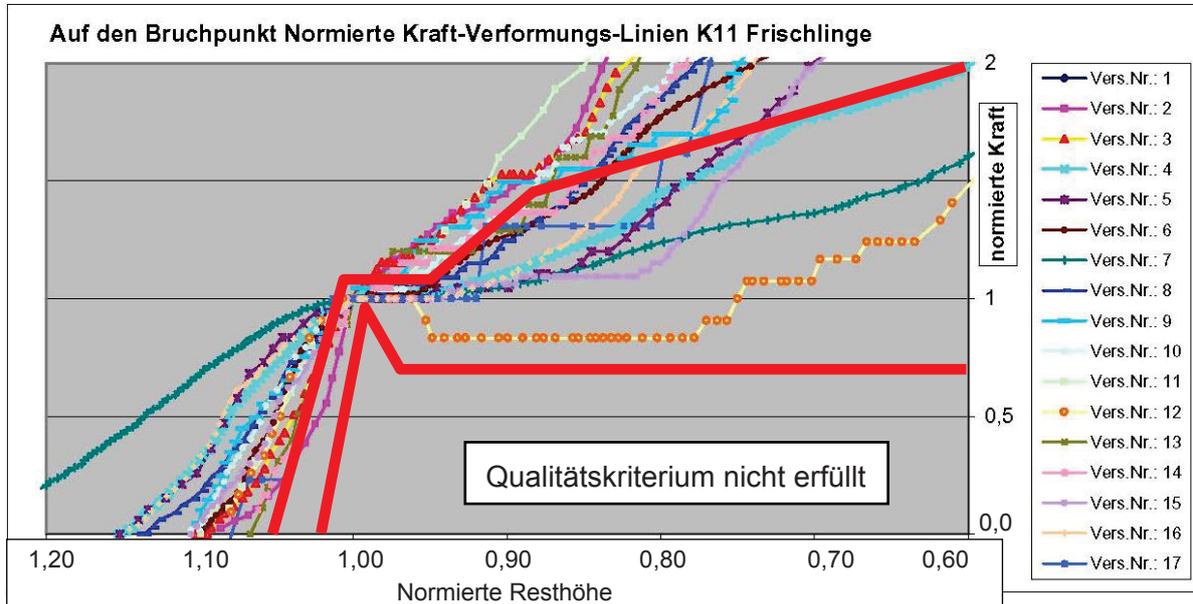
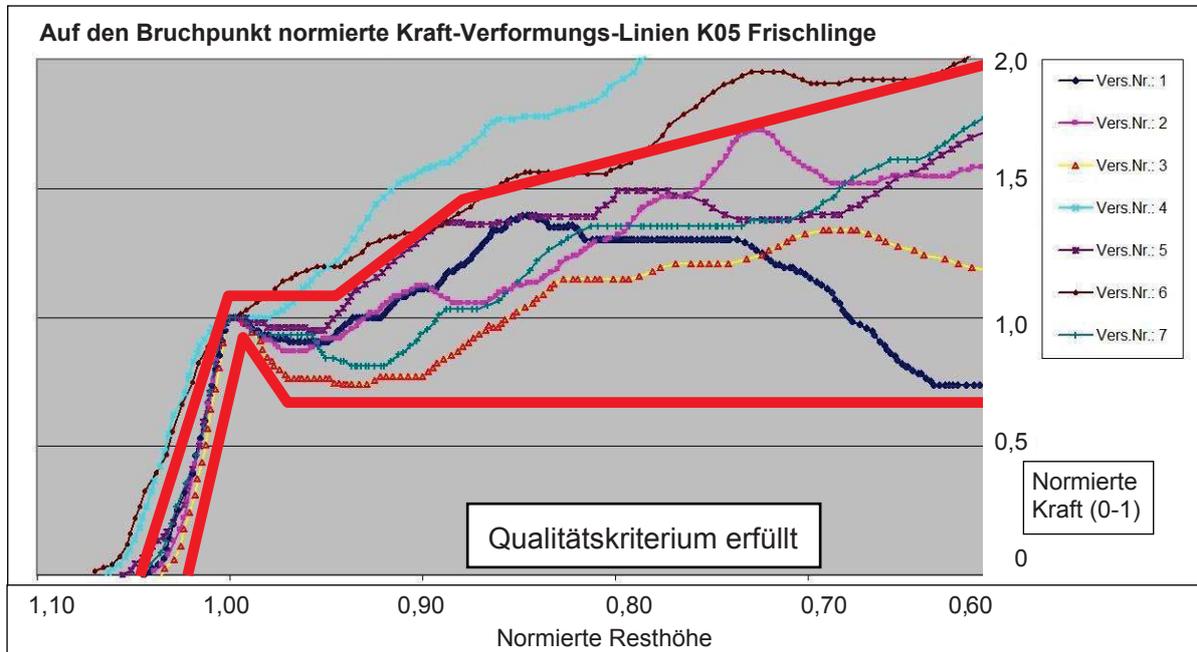
Zu Anlage 4.5.4: „Umhüllende“ als Kriterium für Frischlinge „ausreichender Qualität“





Anlage 29, Blatt 2

Zu Anlage 4.5.4: Anwendung der Umhüllenden als Kriterium für Frischlinge
„ausreichender Qualität“





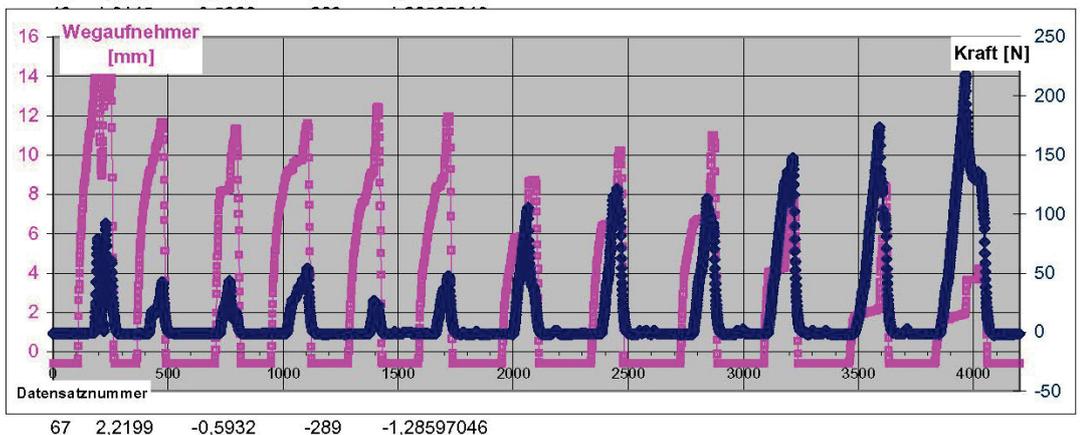
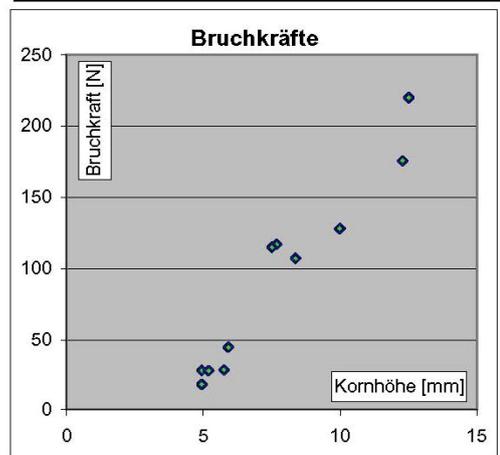
Anlage 30, Blatt 1

Zu Absatz 4.6-2: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten 11 einzelner Festlinge, Tabellenkopf und Zusammenstellung Bruchkräfte

1	t	-0,5926	-289	-1,28597046
2	0,0336	-0,593	-289	-1,28597046
3	0,0673	-0,593	-289	-1,28597046
4	0,1009	-0,5932	-289	-1,28597046
5	0,1345	-0,5932	-289	-1,28597046
6	0,1682	-0,5934	-289	-1,28597046
7	0,2018	-0,5932	-289	-1,28597046
8	0,2354	-0,593	-289	-1,28597046
9	0,2691	-0,5932	-289	-1,28597046
10	0,3027	-0,593	-289	-1,28597046
11	0,3363	-0,5928	-289	-1,28597046
12	0,37	-0,5926	-289	-1,28597046
13	0,4036	-0,5928	-289	-1,28597046
14	0,4373	-0,5928	-289	-1,28597046
15	0,4709	-0,5924	-289	-1,28597046
16	0,5045	-0,5928	-289	-1,28597046
17	0,5382	-0,593	-289	-1,28597046
18	0,5718	-0,593	-289	-1,28597046
19	0,6054	-0,593	-289	-1,28597046
20	0,6391	-0,5928	-289	-1,28597046
21	0,6727	-0,5928	-289	-1,28597046
22	0,7063	-0,5926	-289	-1,28597046
23	0,74	-0,5926	-289	-1,28597046
24	0,7736	-0,5924	-289	-1,28597046
25	0,8072	-0,5926	-289	-1,28597046
26	0,8409	-0,5926	-289	-1,28597046
27	0,8745	-0,5926	-289	-1,28597046
28	0,9081	-0,5926	-289	-1,28597046
29	0,9418	-0,5924	-289	-1,28597046
30	0,9754	-0,5924	-289	-1,28597046
31	1,009	-0,5924	-289	-1,28597046
32	1,0427	-0,5924	-289	-1,28597046
33	1,0763	-0,5926	-289	-1,28597046
34	1,1099	-0,5926	-289	-1,28597046
35	1,1436	-0,5926	-289	-1,28597046
36	1,1772	-0,5926	-289	-1,28597046
37	1,2108	-0,5928	-289	-1,28597046
38	1,2445	-0,5932	-289	-1,28597046
39	1,2781	-0,593	-289	-1,28597046
40	1,3118	-0,5932	-289	-1,28597046
41	1,3454	-0,593	-289	-1,28597046
42	1,379	-0,5932	-289	-1,28597046
43	1,4127	-0,5928	-289	-1,28597046
44	1,4463	-0,5926	-289	-1,28597046
45	1,4799	-0,5926	-289	-1,28597046
46	1,5136	-0,5928	-289	-1,28597046
47	1,5472	-0,593	-289	-1,28597046
48	1,5808	-0,5928	-289	-1,28597046

Name Messlogdatei: 20101008101805 .txt
 Datum: 2010-10-08
 Speicherzeit gem. Dateinar 10:18:05 Eingabefehler
 letzter Datensatz in Zeile N 4235
 verwendeter Sensor: 2500 lbs
 Rezeptur: K04 VT1 letztes Korn mit Foto
 . Messung 11 Stück
 Nullmessung Wegsensor: 14,00 mm
 Spalte 1: Spalte 2: Spalte 3: Spalte 4: Spalte 5:
 lfd. Nr. Zeitstempel Weg [mm] Kraft [mlbs] Kraft [N]
Tabelle der max. Kräfte
 Dateiname: 201010081018 .txt 224,733
 Rezeptur: K04
 Kommentar: VT1

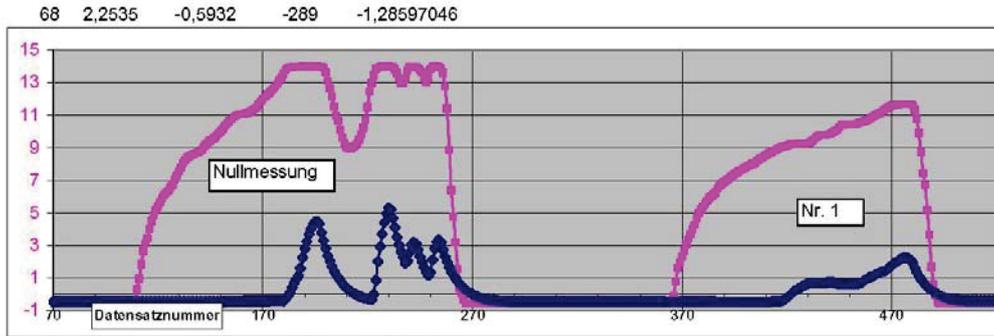
Korn Nummer	max Kraft [N]	Höhe des Korns [mm]	Kraft am 1. Knick [N]:
1	18,6	4,9	0
2	44,7	5,9	0
3	28,4	4,9	0
4	28,3	5,2	0
5	28,8	5,8	0
6	107,3	8,4	0
7	116,9	7,7	0
8	115,0	7,5	0
9	128,1	10,0	0
10	175,5	12,3	0
11	220,1	12,5	0



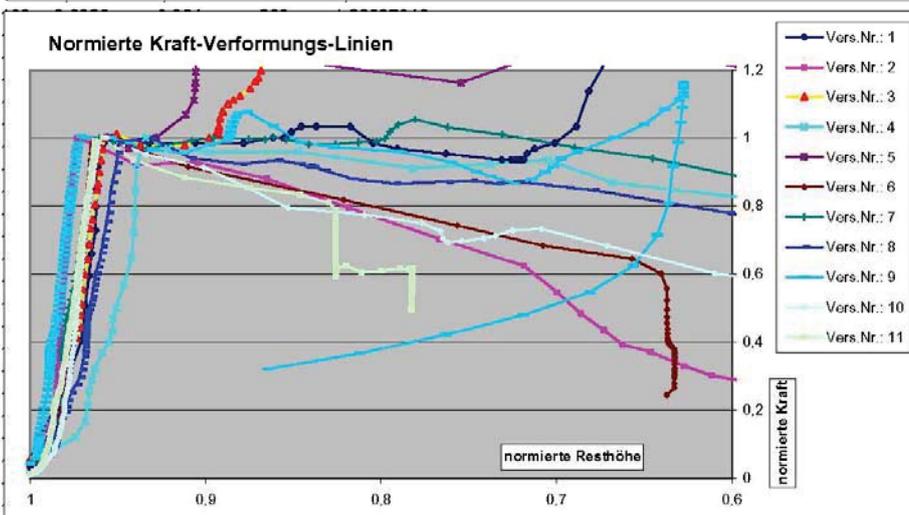
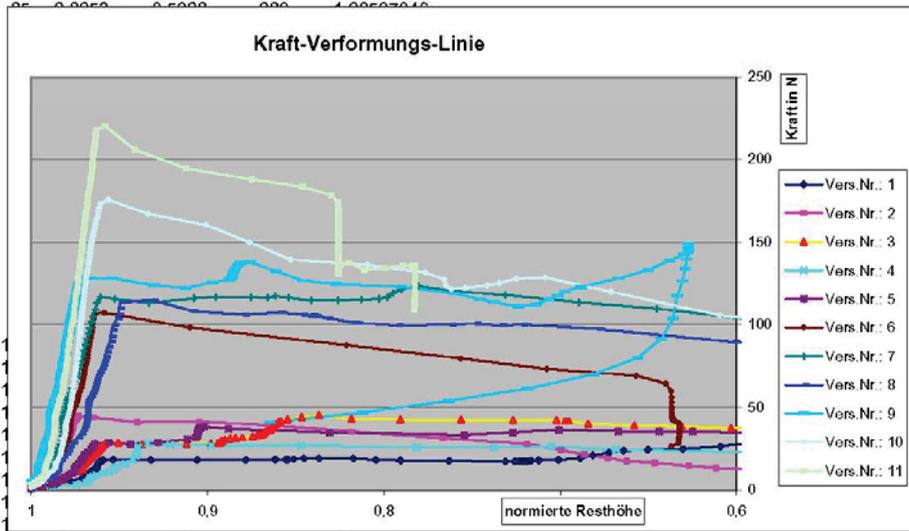


Anlage 30, Blatt 2

Zu Absatz 4.6.2: Arbeitsblatt mit der Darstellung der Aufteilung des Messlogs in die Daten 11 einzelner Festlinge, Zusammenstellung der Kraft-Verformungs-Linien



83	2,758	-0,593	-289	-1,28597046
84	2,7917	-0,593	-289	-1,28597046



132	4,4061	8,0336	-289	-1,28597046
133	4,4398	8,2601	-289	-1,28597046
134	4,4734	8,3772	-289	-1,28597046

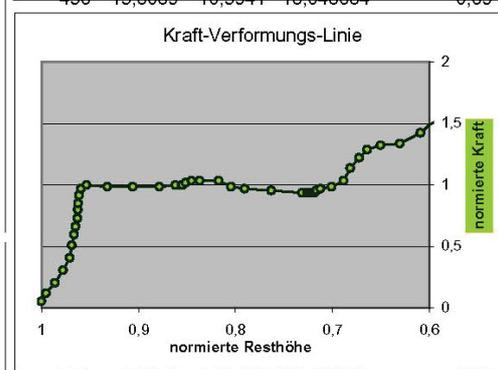
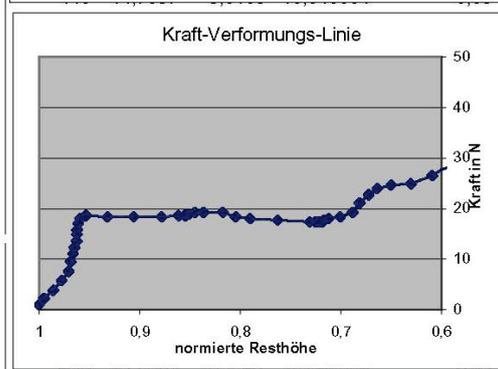
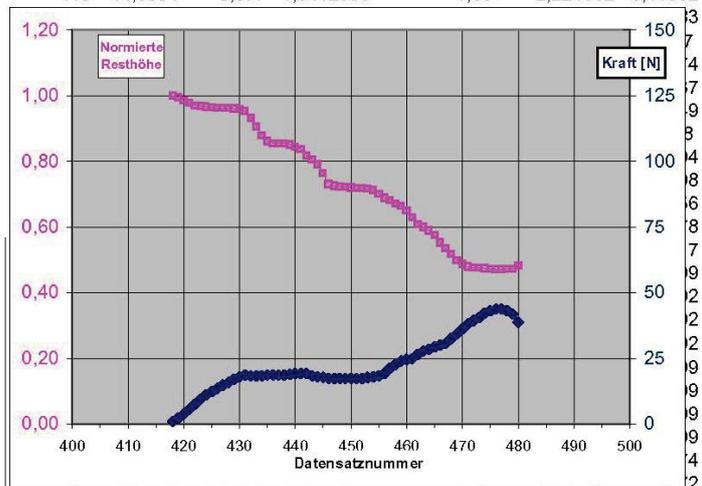


Anlage 30, Blatt 3

Zu Absatz 4.6.2: Rezeptur K04 (VT1), Aufteilung des Messlogs in die Daten 11 einzelner Festlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 1

Zusammenstellung der Einzelkörner

Vers.Nr.:	1	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!	
Korn Nr.:	1	Beginn	Ende	vorher	nachher
Korrekturwerte:	418	418	490		
		Anzahl:	72		
Weg bei Beginn der Kraft:	9,0535			Grundwert Kraft	
berechnete Höhe des Kornes:	4,95 mm			5 Datensätze vorher:	
max. Kraft, korrigiert in N:	43,701 N			Maßgebende Kraft: 18,6	
Kraft am 1. Knick [N]:		Kraft in N		Normierte Resthöhe	Kraft, korrigiert
lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	gemessen	Resthöhe	Kraft, normiert
418	14,0257	9,0535	-0,244735	1,00	0,938892
419	14,0594	9,077	1,0412356	1,00	2,224862



19,22726	1,03372
19,22726	1,03372
18,31952	0,98492
18,00804	0,96817
17,73215	0,95334
17,38507	0,93468
17,38507	0,93468
17,38507	0,93468
17,38507	0,93468
17,38507	0,93468
17,38507	0,93468
17,38507	0,93468
17,38507	0,93468
17,73215	0,95334
18,00804	0,96817
18,31952	0,98492
19,22726	1,03372
21,13619	1,13635
22,7025	1,22056
23,95287	1,28779
24,61588	1,32343
24,89176	1,33827
26,48921	1,42415
27,77518	1,49329
28,40259	1,52702
29,34149	1,5775
29,9689	1,61123
30,62746	1,64664
32,46964	1,74568
34,24508	1,84113
36,15401	1,94376
38,0318	2,04472
39,31777	2,11386
40,56814	2,18108
42,13444	2,26529

473	15,8757	11,6477	39,384514	0,48
474	15,9093	11,6523	40,950817	0,47

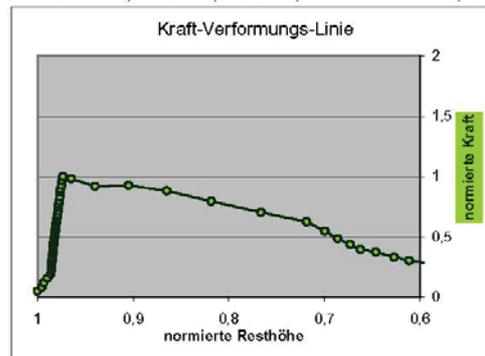
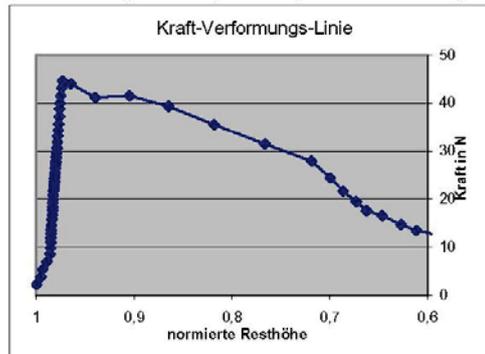
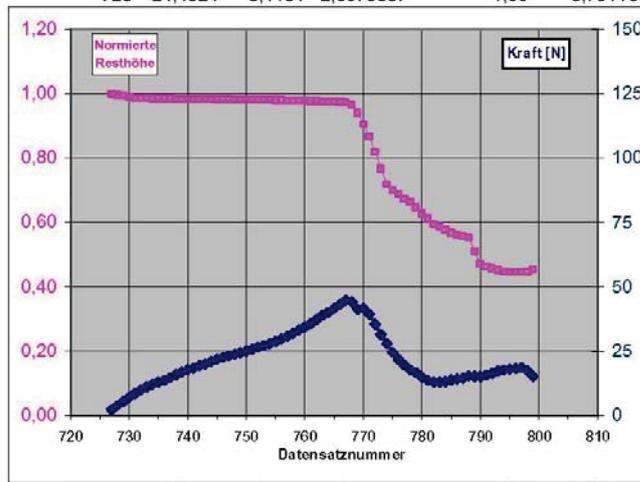


Anlage 30, Blatt 4

Zu Absatz 4.6.2: Rezeptur K04 (VT1), Aufteilung des Messlogs in die Daten 11 einzelner Festlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 2

Zusammenstellung der Einzelkörner

Vers.Nr.:	2	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!		
Korn Nr.:	2	Beginn	Ende	vorher	nachher	
Korrekturwerte:	727	800				
	Anzahl: 73					
Weg bei Beginn der Kraft:		8,0855		Grundwert Kraft		
berechnete Höhe des Kornes:		5,91 mm		5 Datensätze vorher:		
max. Kraft, korrigiert in N:		44,671 N		Maßgebende Kraft: 44,7		
Kraft am 1. Knick [N]:		Kraft in N		Normierte	Kraft in N,	
lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	gemessen	Resthöhe	korrigiert	normiert
727	24,4188	8,0855	1,0412356	1,00	2,224862	0,04977
728	24,4524	8,1131	2,6075387	1,00	3,791166	0,08481



782	26,2686	10,4778	11,680528	0,60	12,86415	0,28779
783	26,3023	10,5316	11,680528	0,59	12,86415	0,28779

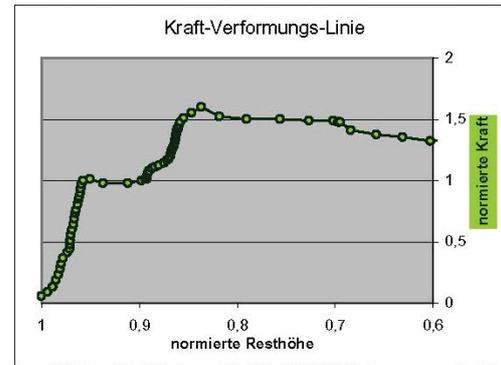
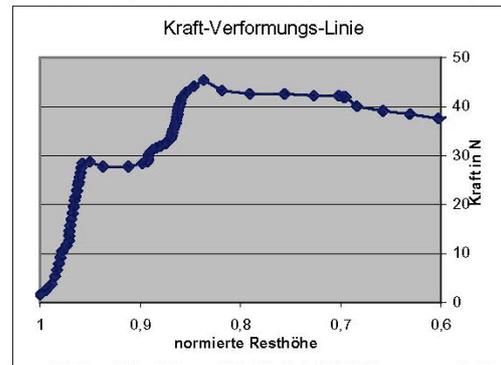
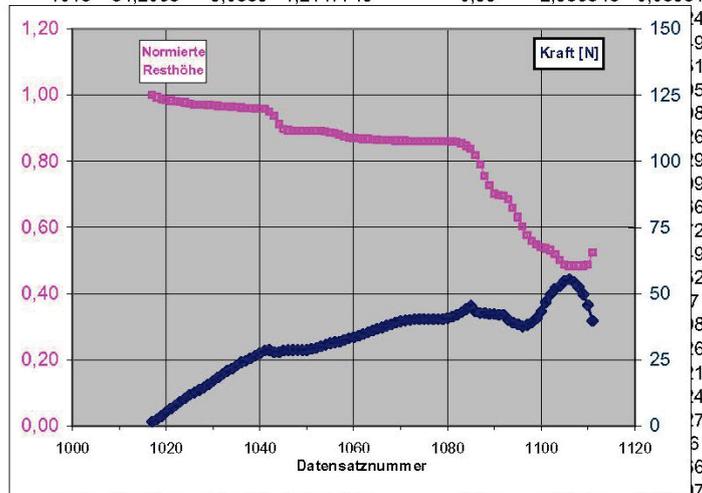


Anlage 30, Blatt 5

Zu Absatz 4.6.2: Rezeptur K04 (VT1), Aufteilung des Messlogs in die Daten 11 einzelner Festlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 3

Zusammenstellung der Einzelkörner

Vers.Nr.:	3	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!	
Korn Nr.:	3	Beginn	Ende	vorher	nachher
Korrekturwerte:	1017	1017	1120		
	Anzahl: 103			Grundwert Kraft 5 Datensätze vorher: -1,321568	
Weg bei Beginn der Kraft:	9,0583				
berechnete Höhe des Kornes:	4,94 mm				
max. Kraft, korrigiert in N:	55,377 N		Maßgebende Kraft:	28,4	
Kraft am 1. Knick [N]:			Normierte Resthöhe	Kraft in N, korrigiert	Kraft, normiert
lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Kraft in N gemessen		
1017	34,1727	9,0583	0,2758829	1,00	1,597451
1018	34,2063	9,0889	1,2147749	0,99	2,536343



27,4993	0,96829
28,40259	1,00009
28,71407	1,01106
27,77518	0,978
27,77518	0,978
28,40259	1,00009
28,71407	1,01106
28,71407	1,01106
28,71407	1,01106
28,71407	1,01106
28,71407	1,01106
28,71407	1,01106
29,06115	1,02328
29,37708	1,0344
30,03564	1,05759
30,62746	1,07843
31,25042	1,10037
31,56635	1,11149
31,87783	1,12246
32,50524	1,14455
33,1638	1,16774
33,44413	1,17761
34,06709	1,19955
34,7301	1,22289
35,35306	1,24483
35,98047	1,26692
36,60789	1,28901
37,23085	1,31095
37,89386	1,33429
38,45007	1,35388
39,10863	1,37706
39,45571	1,38929
39,77164	1,40041
40,08312	1,41138
40,3946	1,42235

1071	36,0000	9,7110	38,40000	0,86	40,08312
1072	36,0226	9,7425	38,761553	0,86	40,08312
1073	36,0562	9,7438	39,073033	0,86	40,3946

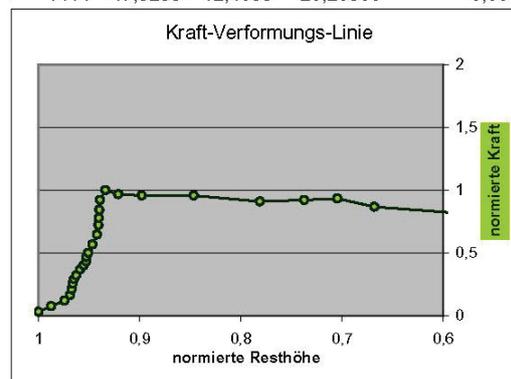
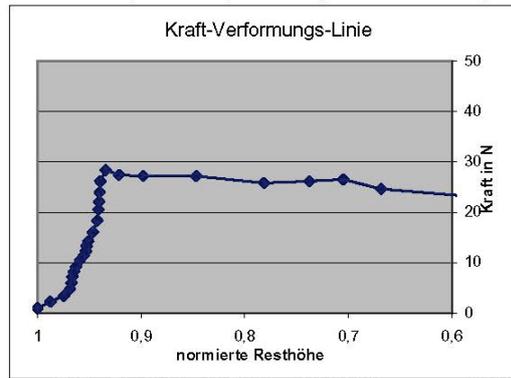
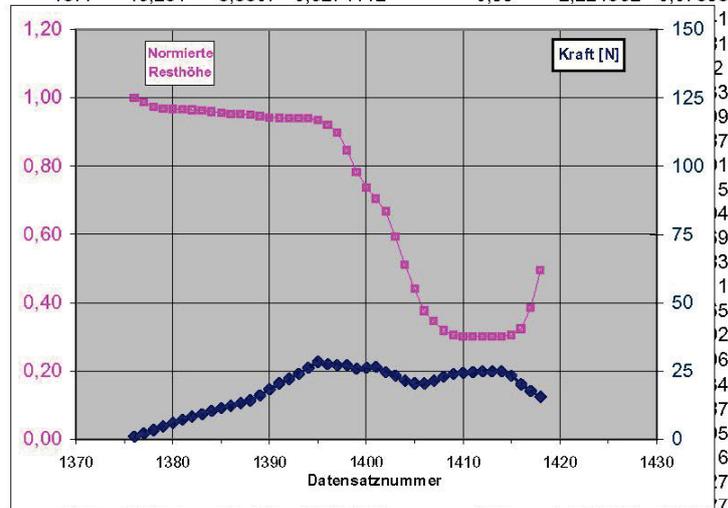


Anlage 30, Blatt 6

Zu Absatz 4.6.2: Rezeptur K04 (VT1), Aufteilung des Messlogs in die Daten 11 einzelner Festlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 4

Zusammenstellung der Einzelkörner

Vers.Nr.:	4	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!		
Korn Nr.:	4	Beginn	Ende	vorher	nachher	
Korrekturwerte:	1376	1425				
	Anzahl: 49		Grundwert Kraft 5 Datensätze vorher:			
Weg bei Beginn der Kraft:	8,8166		-1,597451			
berechnete Höhe des Kornes:	5,18 mm		Maßgebende Kraft: 28,33			
max. Kraft, korrigiert in N:	28,331		Normierte Kraft in N, Kraft,			
Kraft am 1. Knick [N]:	Kraft in N		Resthöhe korrigiert normiert			
lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Kraft in N gemessen	Normierte Resthöhe	Kraft in N, korrigiert	Kraft, normiert
1376	46,2474	8,8166	-0,663009	1,00	0,934442	0,03298
1377	46,281	8,8807	0,6274112	0,99	2,224862	0,07853



25,8262	0,91162
26,17328	0,92387
26,48921	0,93502
24,61143	0,86874
23,32546	0,82335
21,48327	0,75832
20,50878	0,72392
20,50878	0,72392
21,48327	0,75832
23,00953	0,8122
23,94842	0,84534
24,3311	0,85885
24,61143	0,86874
24,88731	0,87848
24,88731	0,87848
24,88731	0,87848
23,32546	0,82335
20,1617	0,71167
17,65651	0,62324
15,50284	0,54722

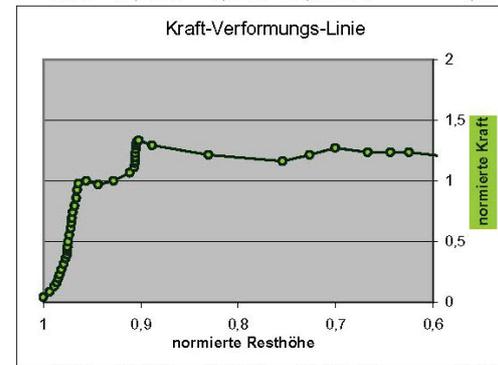
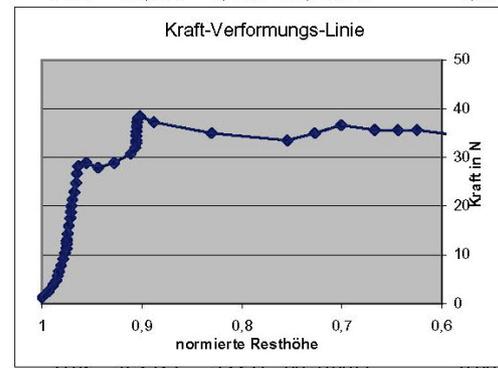
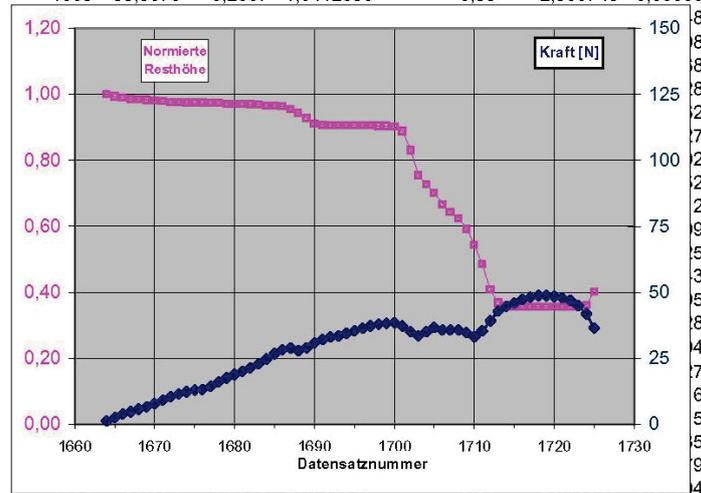


Anlage 30, Blatt 7

Zu Absatz 4.6.2: Rezeptur K04 (VT1), Aufteilung des Messlogs in die Daten 11 einzelner Festlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 5

Zusammenstellung der Einzelkörner

Vers.Nr.:	5	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!	
Korn Nr.:	5	Beginn	Ende	vorher	nachher
Korrekturwerte:	1664	1735			
	Anzahl: 71				
Weg bei Beginn der Kraft:	8,2463		Grundwert Kraft 5 Datensätze vorher:		
berechnete Höhe des Kornes:	5,75 mm		-1,45951		
max. Kraft, korrigiert in N:	48,667 N		Maßgebende Kraft: 28,8		
Kraft am 1. Knick [N]:	Kraft in N		Normierte	Kraft in N,	Kraft,
lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Resthöhe	korrigiert	normiert
1664	55,934	8,2463	-0,244735	1,00	1,214775
1665	55,9676	8,2837	1,0412356	0,99	2,500745



1719	57,7839	11,9507	47,20713	0,36	48,66664
1720	57,8175	11,9507	46,860052	0,36	48,31956

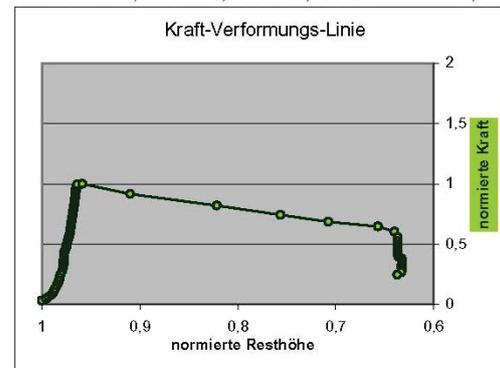
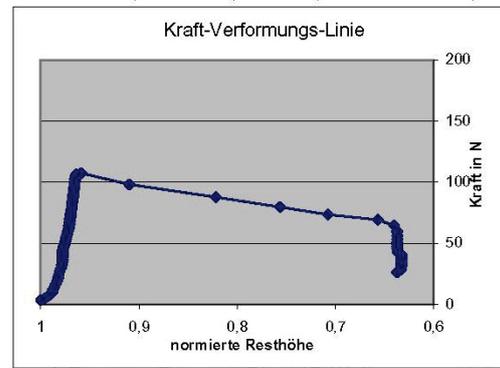
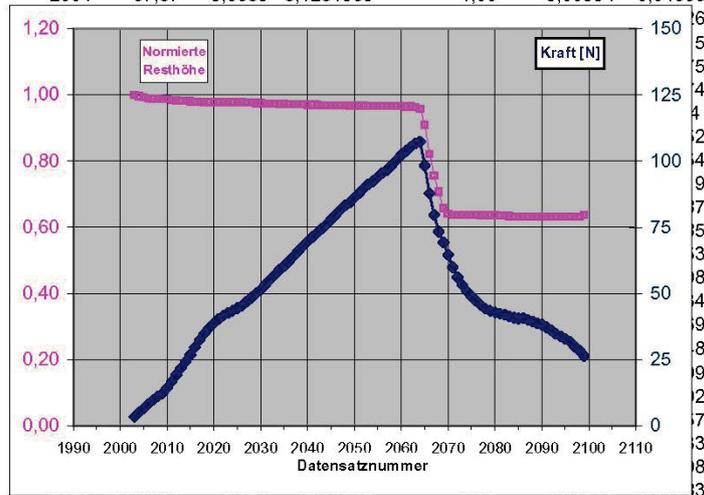


Anlage 30, Blatt 8

Zu Absatz 4.6.2: Rezeptur K04 (VT1), Aufteilung des Messlogs in die Daten 11 einzelner Festlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 6

Zusammenstellung der Einzelkörner

Vers.Nr.:	6	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!		
Korn Nr.:	6	Beginn	Ende	vorher	nachher	
Korrekturwerte:	2003	2100				
	Anzahl: 97					
Weg bei Beginn der Kraft:	5,6323			Grundwert Kraft		
berechnete Höhe des Kornes:	8,37 mm			5 Datensätze vorher:		
max. Kraft, korrigiert in N:	107,278 N				-1,877784	
Kraft am 1. Knick [N]:		Kraft in N		Maßgebende Kraft:		
		gemessen		Normierte Resthöhe	Kraft in N, korrigiert	
Ifd. Nr.	Zeitstempel	Weg			Kraft, normiert	
2003	67,3364	5,6323	1,5618534	1,00	3,439637	0,03206
2004	67,37	5,6689	3,1281565	1,00	5,00594	0,04666



2057	69,1828	5,9217	96,643573	0,97	98,52136	0,91837
2058	69,1865	5,9217	96,643573	0,97	98,52136	0,91837
2059	69,2201	5,9234	98,485759	0,97	100,3635	0,93554

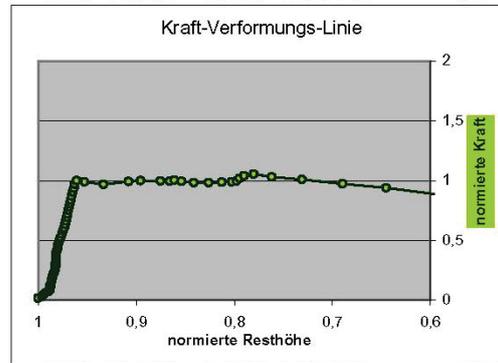
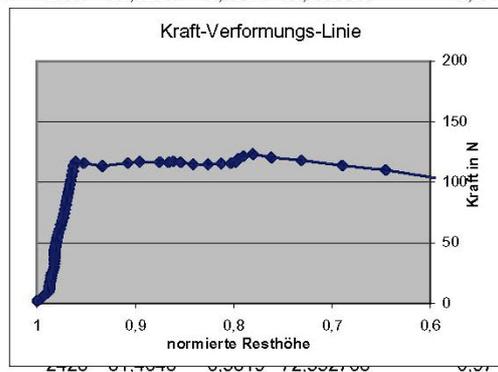
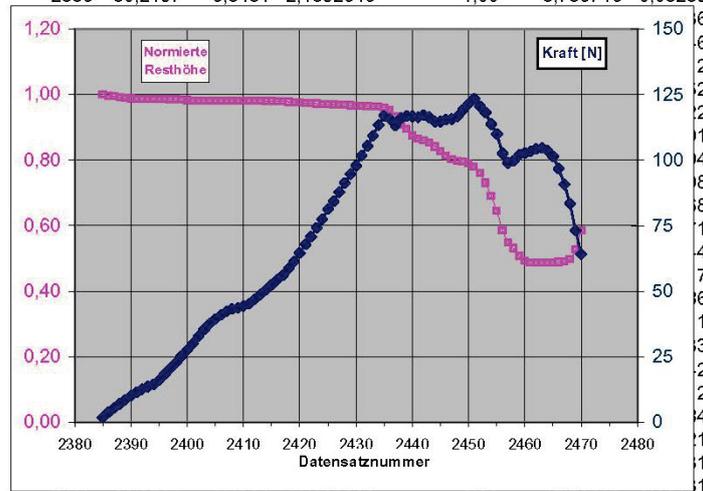


Anlage 30, Blatt 9

Zu Absatz 4.6.2: Rezeptur K04 (VT1), Aufteilung des Messlogs in die Daten 11 einzelner Festlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 7

Zusammenstellung der Einzelkörner

Vers.Nr.:	7	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!	
Korn Nr.:	7	Beginn	Ende	vorher	nachher
Korrekturwerte:	2385	2480			
	Anzahl: 95			Grundwert Kraft 5 Datensätze vorher:	
Weg bei Beginn der Kraft:	6,3192				
berechnete Höhe des Kornes:	7,68 mm				-1,597451
max. Kraft, korrigiert in N:	123,302 N			Maßgebende Kraft: 116,9	
Kraft am 1. Knick [N]:				Normierte Resthöhe	Kraft in N, korrigiert
lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Kraft in N gemessen		Kraft, normiert
2385	80,1861	6,3192	0,2758829	1,00	1,873334
2386	80,2197	6,3481	2,1892646	1,00	3,786716



43,17568	0,36934
43,6251	0,37318
44,28811	0,37885
45,1914	0,38658
46,78886	0,40025
48,66664	0,41631
50,58002	0,43268
52,45781	0,44874
54,36674	0,46507
56,14218	0,48026
58,60733	0,50135
61,424	0,52544
64,58776	0,5525
67,78711	0,57987
70,74172	0,60515
74,15021	0,6343
77,48751	0,66285
81,23863	0,69494
84,26444	0,72082
87,77527	0,75086
91,21936	0,78032
94,659	0,80974
97,92509	0,83768
101,7163	0,87011
105,4718	0,90224
109,2585	0,93463
113,3256	0,96942
116,872	0,99976
115,6572	0,98937
113,1521	0,96794
115,9687	0,99203
116,872	0,99976
116,5961	0,9974
116,3158	0,995

2440	82,0362	7,2772	114,99869	0,88
2441	82,0698	7,348	114,71835	0,87

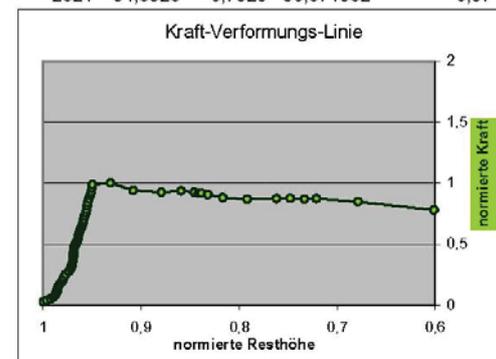
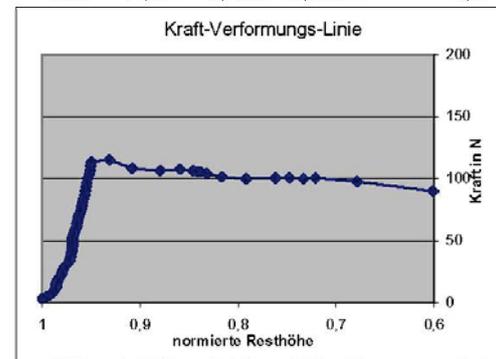
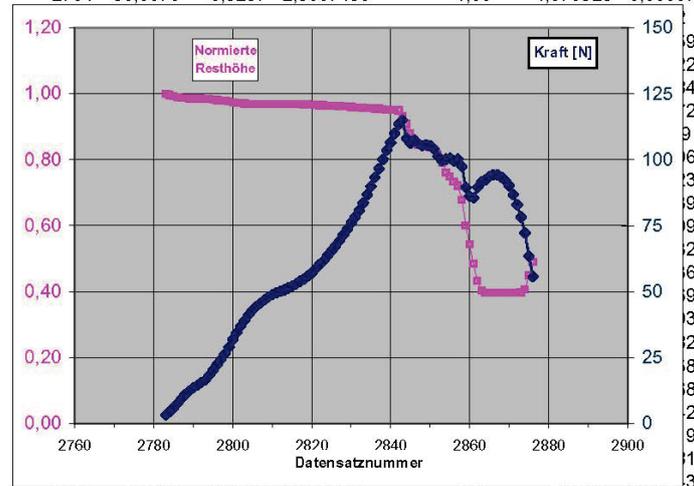


Anlage 30, Blatt 10

Zu Absatz 4.6.2: Rezeptur K04 (VT1), Aufteilung des Messlogs in die Daten 11 einzelner Festlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 8

Zusammenstellung der Einzelkörner

Vers.Nr.:	8	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!	
Korn Nr.:	8	Beginn	Ende	vorher	nachher
Korrekturwerte:	2783	2880			
	Anzahl: 97				
Weg bei Beginn der Kraft:				6,4968	
berechnete Höhe des Kornes:				7,50 mm	
max. Kraft, korrigiert in N:				114,999 N	
Kraft am 1. Knick [N]:				Maßgebende Kraft:	
lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Kraft in N gemessen	Normierte Resthöhe	Kraft in N, korrigiert
2783	93,574	6,4968	1,2859705	1,00	3,163754
2784	93,6076	6,5257	2,5007453	1,00	4,378529
					Kraft, normiert
					0,02751
					0,03807



44,3949	0,38605					
45,68087	0,39723					
46,89565	0,40779					
47,83454	0,41596					
48,84463	0,42474					
49,46759	0,43016					
50,0594	0,4353					
50,68682	0,44076					
51,30978	0,44618					
52,00838	0,45225					
52,91168	0,46011					
53,85057	0,46827					
54,61147	0,47489					
55,93304	0,48638					
57,11667	0,49667					
58,74972	0,51087					
60,28042	0,52418					
61,63759	0,53599					
63,58212	0,55289					
65,4599	0,56922					
67,30209	0,58524					
69,25107	0,60219					
71,47593	0,62154					
73,6296	0,64026					
76,16594	0,66232					
78,25286	0,68047					
80,72246	0,70194					
83,53468	0,7264					
86,66729	0,75364					
89,83104	0,78115					
93,27068	0,81106					
96,57238	0,83977					
2838	95,4241	6,8485	98,205426	0,95	100,0832	0,8703
2839	95,4577	6,8601	101,64951	0,95	103,5273	0,90025

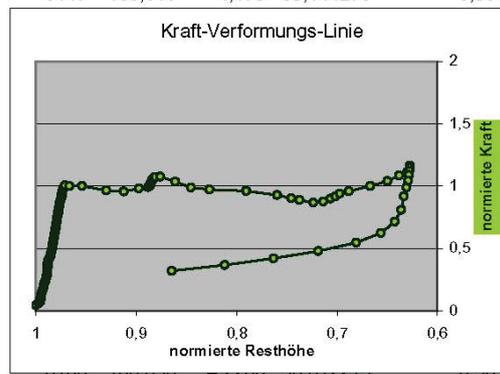
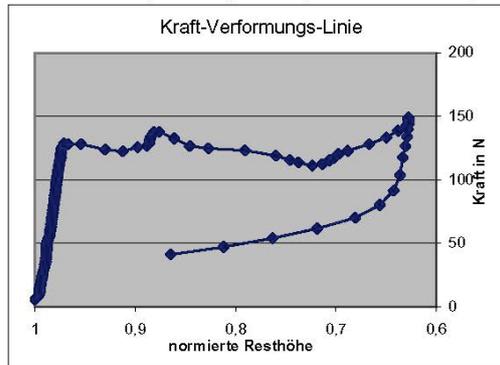
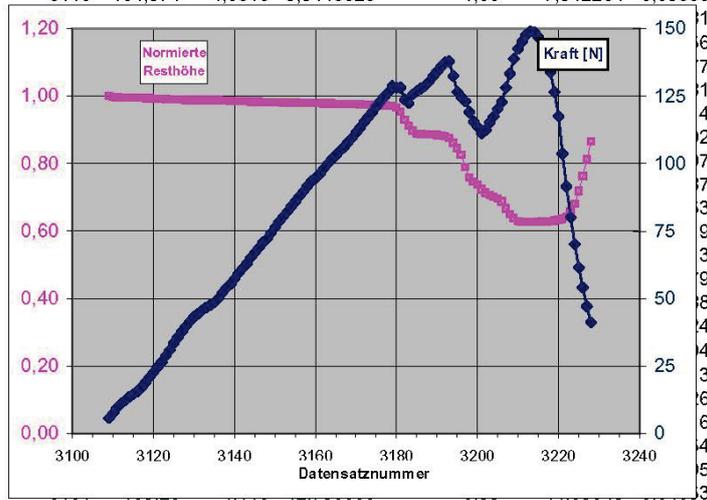


Anlage 30, Blatt 11

Zu Absatz 4.6.2: Rezeptur K04 (VT1), Aufteilung des Messlogs in die Daten 11 einzelner Festlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 9

Zusammenstellung der Einzelkörner

Vers.Nr.:	9	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!	
Korn Nr.:	9	Beginn	Ende	vorher	nachher
Korrekturwerte:	3109	3109	3230		
	Anzahl: 121			Grundwert Kraft	
Weg bei Beginn der Kraft:	4,0022			5 Datensätze vorher:	
berechnete Höhe des Kornes:	10,00 mm				
max. Kraft, korrigiert in N:	148,923 N			Maßgebende Kraft:	128,1
Kraft am 1. Knick [N]:		Kraft in N		Normierte Resthöhe	Kraft in N, Kraft, normiert
lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	gemessen	korrigiert	
3109	104,54	4,0022	4,1026463	1,00	5,700097 0,0445
3110	104,574	4,0316	5,9448323	1,00	7,542284 0,05888



3164	106,39	4,226	99,909671	0,98	45,71202 0,35685
3165	106,424	4,2287	101,44038	0,98	46,61532 0,3639

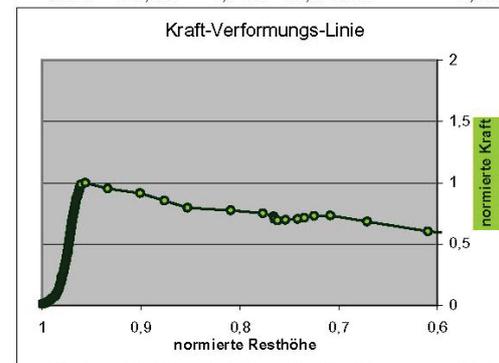
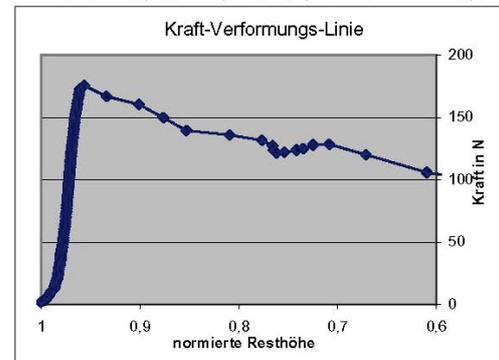
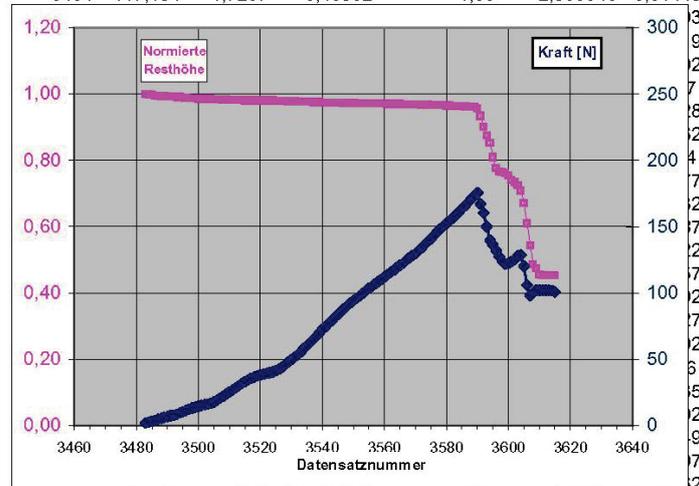


Anlage 30, Blatt 12

Zu Absatz 4.6.2: Rezeptur K04 (VT1), Aufteilung des Messlogs in die Daten 11 einzelner Festlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 10

Zusammenstellung der Einzelkörner

Vers.Nr.:	10	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!	
Korn Nr.:	10	Beginn	Ende	vorher	nachher
Korrekturwerte:	3483	3620			
	Anzahl: 137				
Weg bei Beginn der Kraft:				Grundwert Kraft	
berechnete Höhe des Kornes:				5 Datensätze vorher:	
max. Kraft, korrigiert in N:				-2,051323	
Kraft am 1. Knick [N]:				Maßgebende Kraft:	
lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Kraft in N gemessen	Normierte Resthöhe	Kraft in N, korrigiert
3483	117,121	1,7072	-0,173539	1,00	1,877784
3484	117,154	1,7237	0,48502	1,00	2,536343



18,94693	0,10795
20,50878	0,11685
22,07508	0,12577
23,67254	0,13487
25,23884	0,1438
26,80069	0,15269
28,3314	0,16141
29,8977	0,17034
31,49515	0,17944
33,0926	0,18854
34,34743	0,19569
35,5622	0,20261
36,57229	0,20837
37,51118	0,21372
38,09854	0,21706
38,72595	0,22064
39,38896	0,22441
39,73604	0,22639
40,359	0,22994
41,2979	0,23529
42,54827	0,24241
44,11457	0,25134
46,02795	0,26224
47,90574	0,27294
49,77907	0,28361
51,65686	0,29431
53,4323	0,30442
55,58596	0,31669
58,09116	0,33097
60,17363	0,34283
62,67882	0,3571
64,73015	0,36879
67,23089	0,38304
70,08317	0,39929

3538	118,971	2,0101	65,179569	0,98
3539	119,004	2,0142	68,031842	0,98

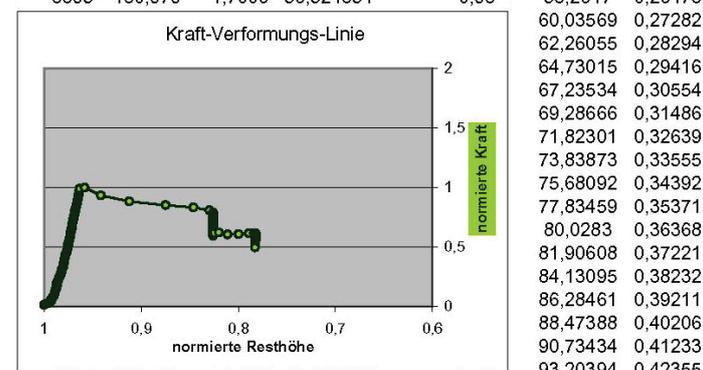
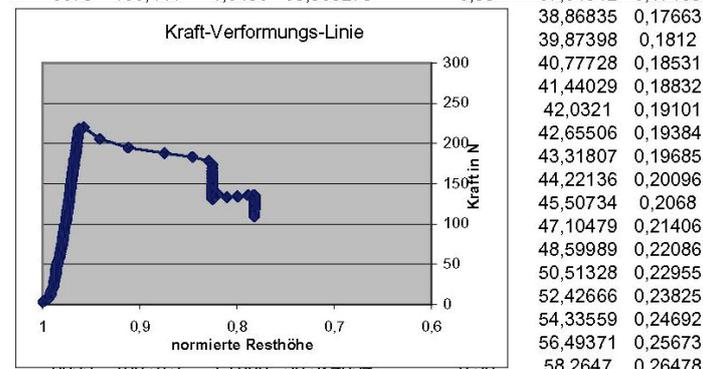
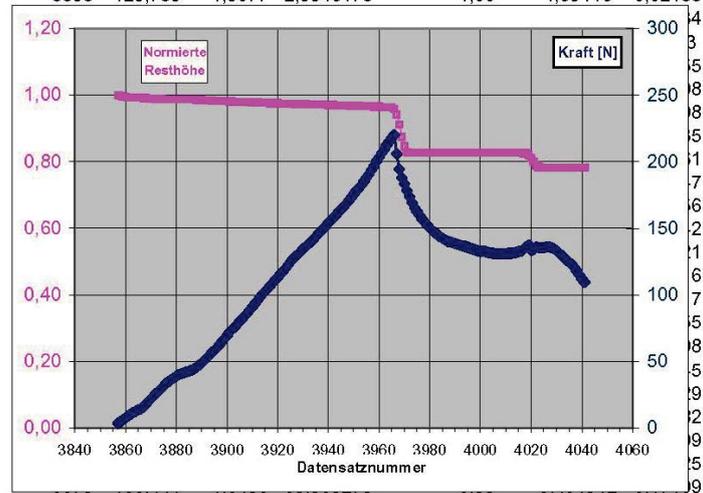


Anlage 30, Blatt 13

Zu Absatz 4.6.2: Rezeptur K04 (VT1), Aufteilung des Messlogs in die Daten 11 einzelner Festlinge, Übersicht über Messlog und Bruchkräfte, Korn 11

Zusammenstellung der Einzelkörner

Vers.Nr.:	11	Datensatz Nr.:		Kraft in N!!!	
Korn Nr.:	11	Beginn	Ende	vorher	nachher
Korrekturwerte:	3857	4041			
	Anzahl:	184		Grundwert Kraft 5 Datensätze vorher:	
Weg bei Beginn der Kraft:		1,4832		-1,739842	
berechnete Höhe des Korn:		12,52 mm			
max. Kraft, korrigiert in N:		220,052 N		Maßgebende Kraft:	
Kraft am 1. Knick [N]:		Kraft in N		Normierte Resthöhe	Kraft, normiert
lfd. Nr.	Zeitstempel	Weg	Kraft in N gemessen	Kraft in N, korrigiert	Kraft, normiert
3857	129,701	1,4832	1,6686468	1,00	3,408489
3858	129,735	1,5077	2,9546173	1,00	4,69446

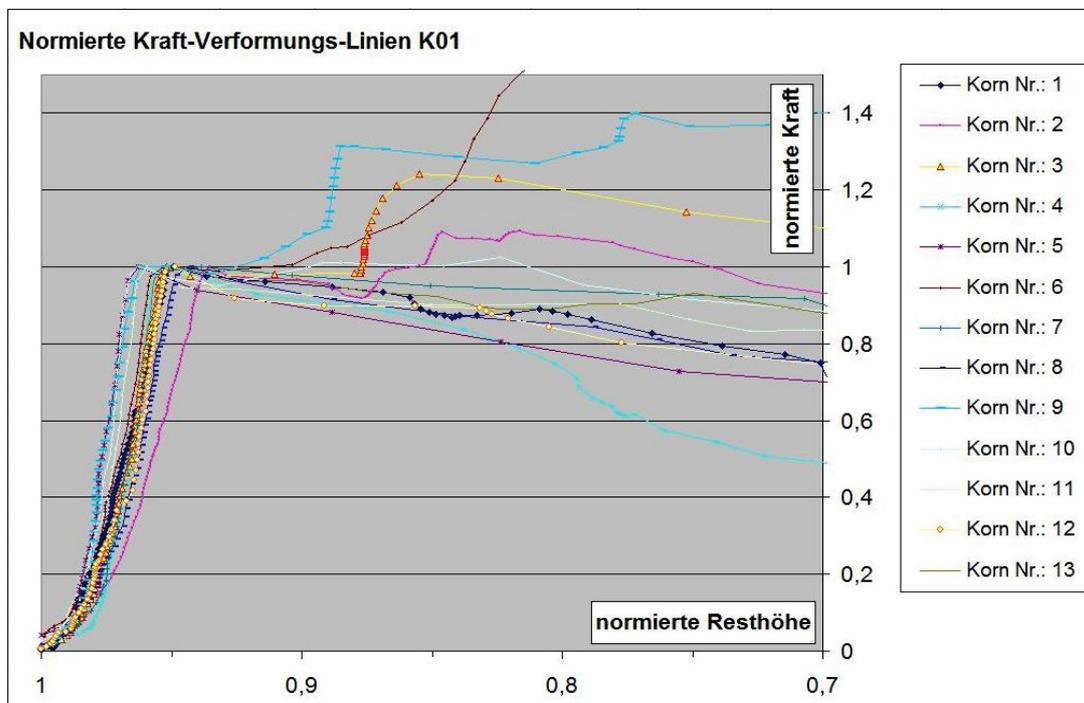
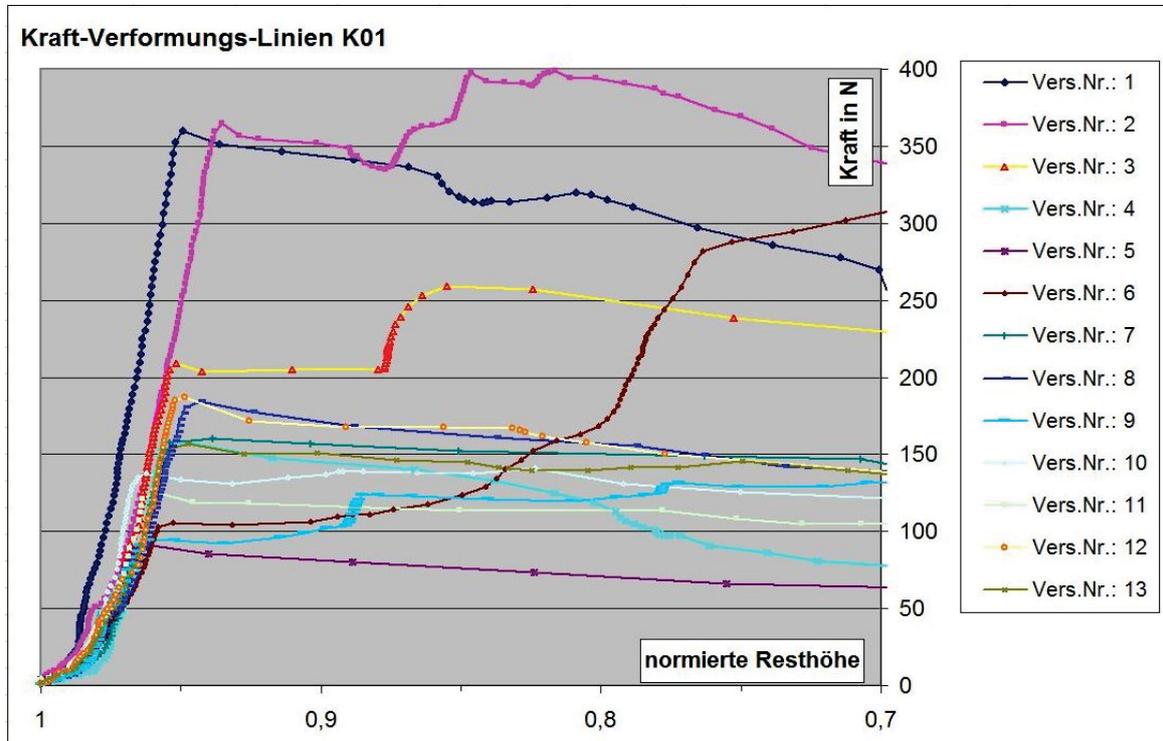


3912	131,551	1,7631	93,688955	0,98	95,4288
3913	131,584	1,7669	96,225298	0,98	97,96514



Anlage 31, Blatt 1

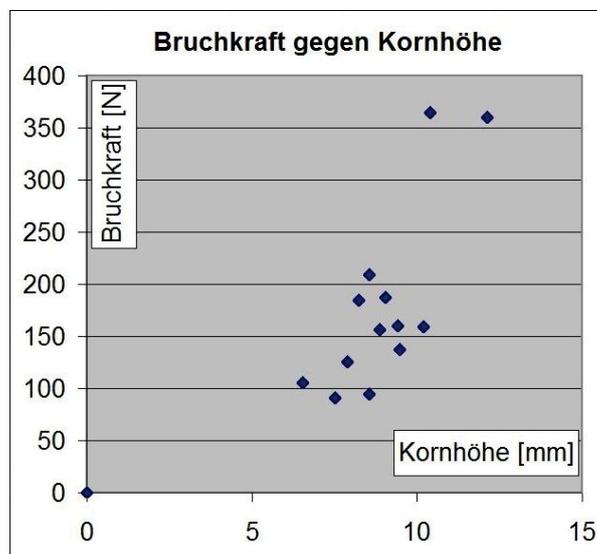
Zu Absatz 4.6.2: Festlinge der Rezeptur K01, Übersicht der Kraft-Verformungs-Linien



Anlage 31, Blatt 2

Zu Absatz 4.6.2: Festlinge der Rezeptur K01, Kornhöhen und Bruchkräfte

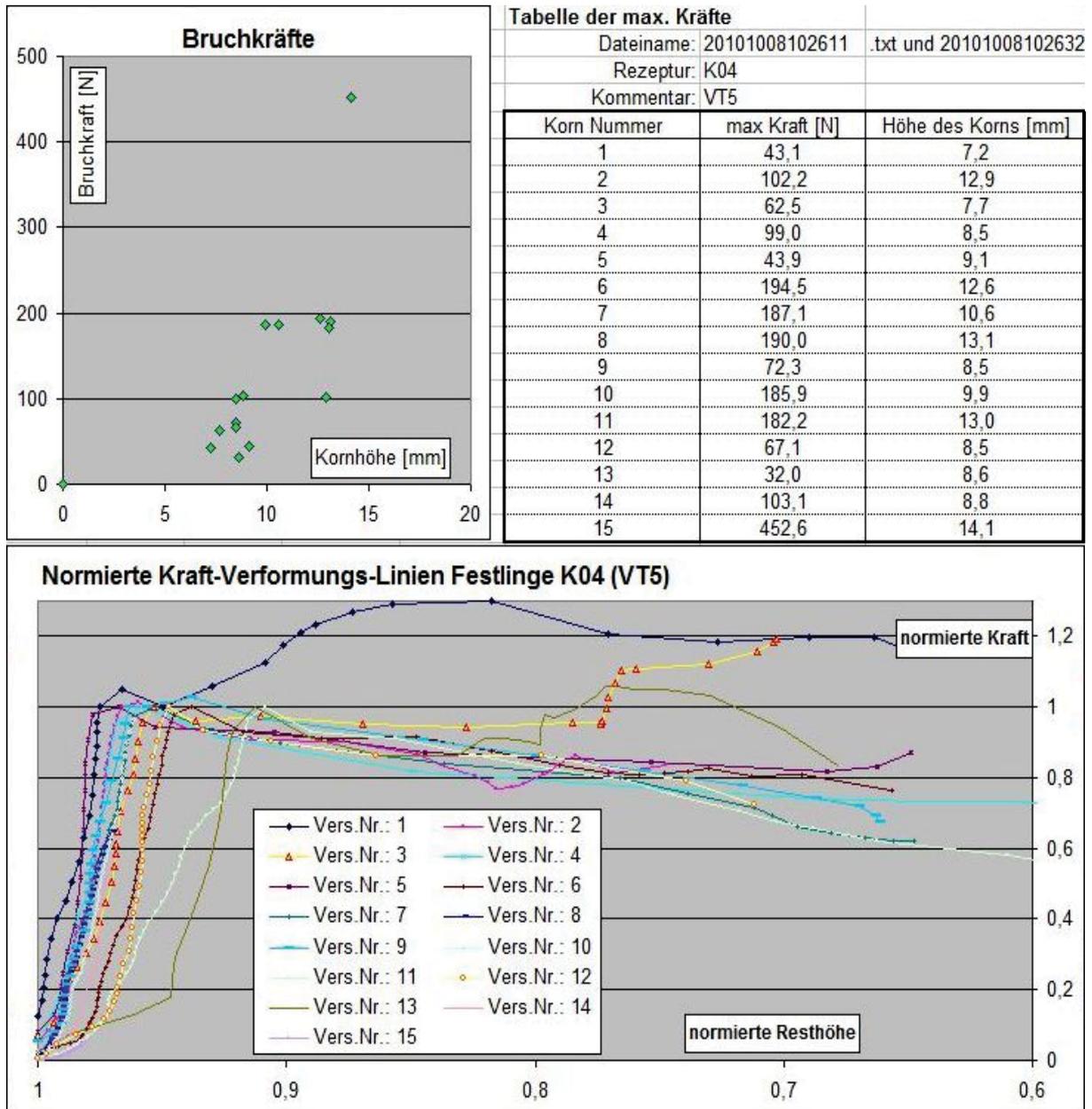
Tabelle der max. Kräfte		
Dateiname:	20100729163051	mit Datei
Rezeptur:	K01	20100729163419
Kommentar:	vom 17.06., oberflächenfeucht, Datei 1 von 3	
Korn Nummer	max Kraft [N]	Höhe des Kornes [mm]
1	360,0	12,1
2	364,4	10,4
3	208,9	8,6
4	158,8	10,2
5	91,2	7,5
6	105,4	6,5
7	160,3	9,4
8	184,5	8,2
9	94,2	8,6
10	137,5	9,5
11	125,6	7,9
12	187,0	9,0
13	156,6	8,9





Anlage 31, Blatt 3

Zu Absatz 4.6.2: Festlinge der Rezeptur K04 (VT5), Übersicht der Kraft-Verformungs-Linien, Kornhöhen und Bruchkräfte



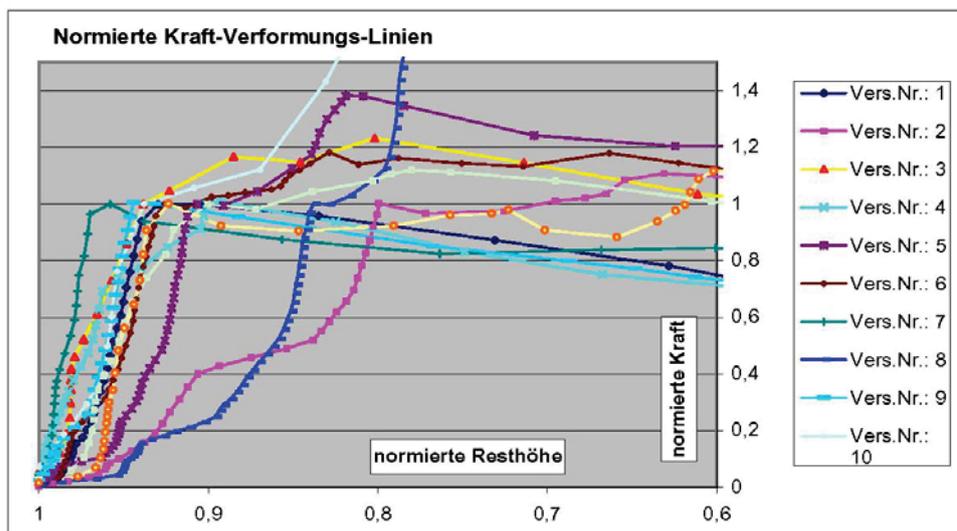
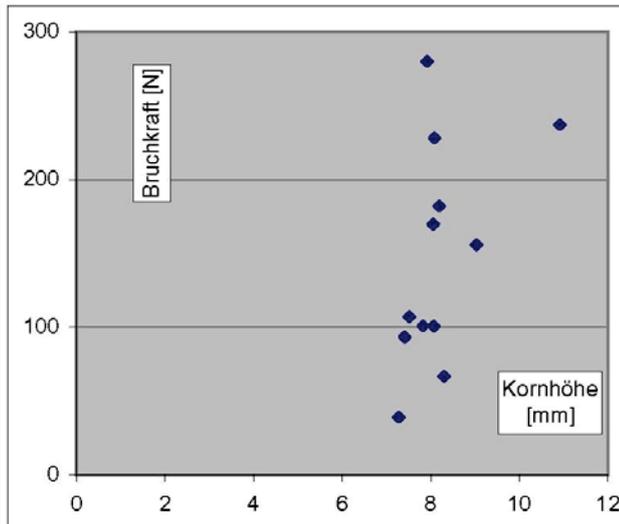


Anlage 31, Blatt 4

Zu Absatz 4.6.2: Festlinge der Rezeptur K06, 8. Messung, Übersicht der Kraft-Verformungs-Linien, Kornhöhen und Bruchkräfte

Zusammenstellung der maßgebenden Kräfte

Dateiname: 20100727113313 .txt			8
Rezeptur: K06c 8-16			
Nullmessung, 5. hatte großen			
Kommentar: Granitstein als Kern, Die letzten drei waren sichtbar porig.			
Korn Nummer	max Kraft [N]	Höhe [mm]	
1	228,1	8,1	
2	280,0	7,9	
3	66,6	8,3	
4	106,9	7,5	
5	155,6	9,0	
6	169,8	8,1	
7	93,2	7,4	
8	237,0	10,9	
9	181,9	8,2	
10	38,9	7,3	
11	100,8	7,8	
12	100,6	8,1	

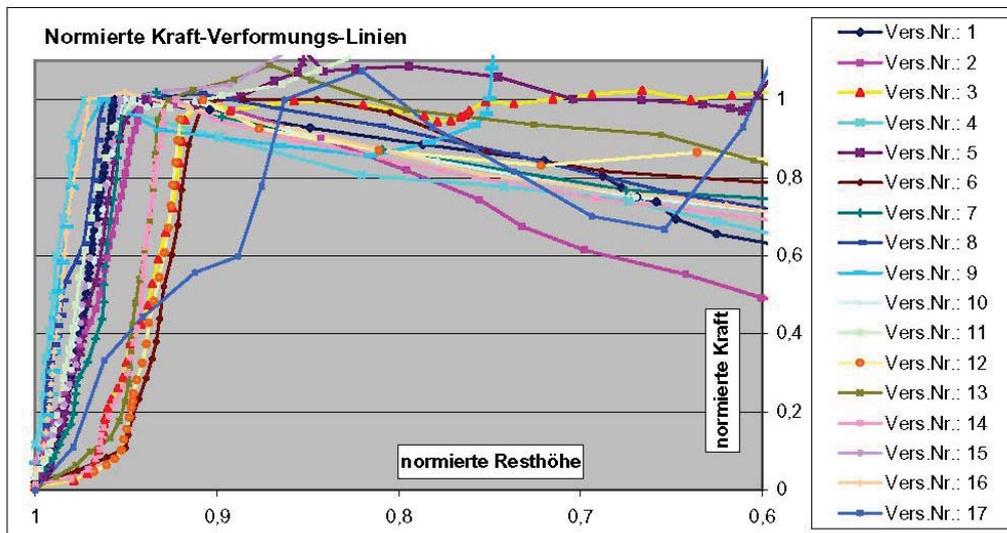
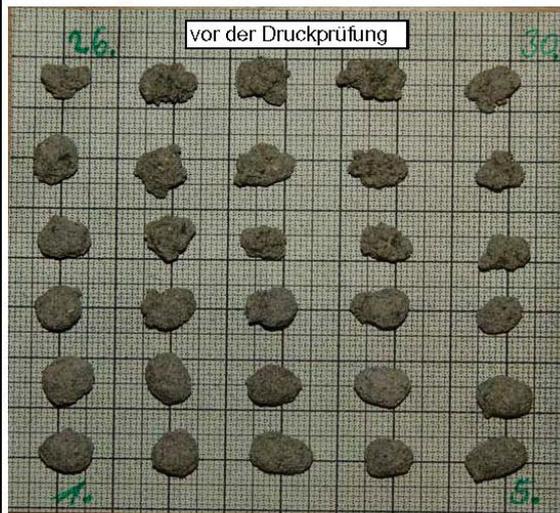
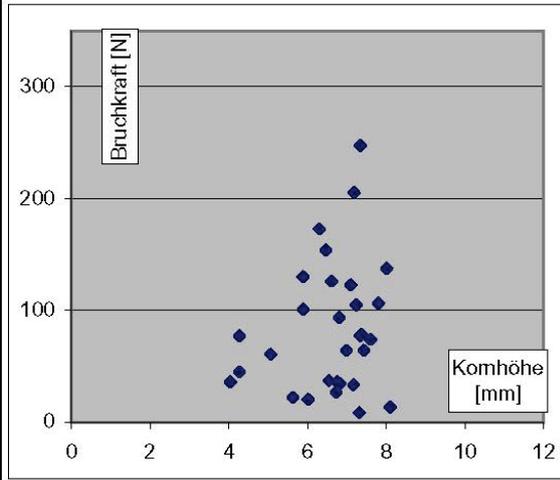




Anlage 31, Blatt 5

Zu Absatz 4.6.2: Festlinge der Rezeptur K06, 9. Messung, Übersicht der Kraft-Verformungs-Linien, Kornhöhen und Bruchkräfte

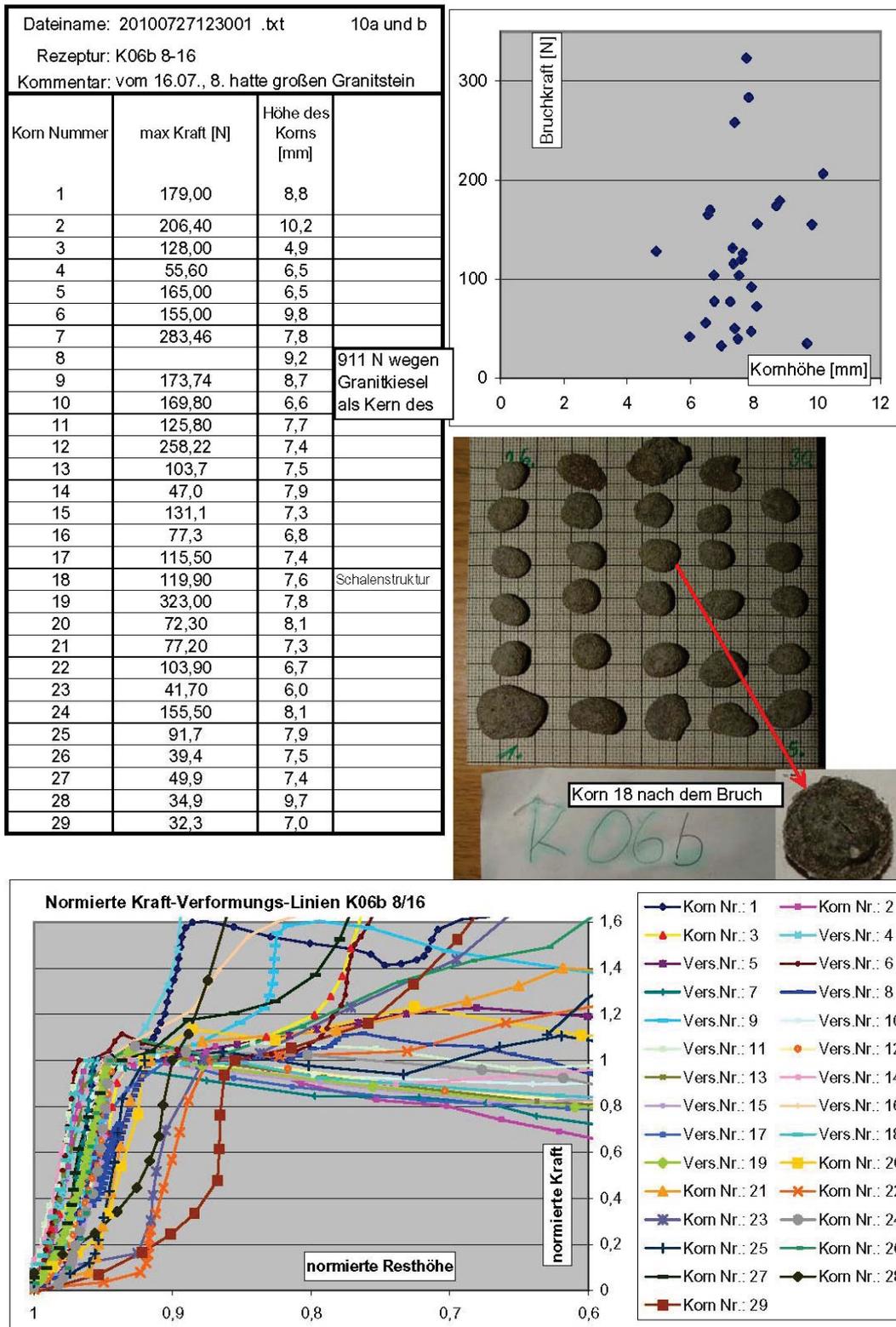
Dateiname: 20100727121232 .txt		9a und b	
Rezeptur: K06c 4-8			
Kommentar: Nullmessung, mit Fotos, inges 30 Stück			
Korn Nummer	max Kraft [N]	Höhe des Korns [mm]	
1	205,2	7,2	kompakt
2	247,3	7,3	kompakt
3	153,7	6,5	kompakt
4	34,8	6,8	kompakt
5	137,5	8,0	kompakt
6	64,0	7,0	kompakt
7	106,2	7,8	kompakt
8	122,6	7,1	kompakt
9	64,2	7,4	kompakt
10	77,4	7,3	kompakt
11	93,4	6,8	teils kompakt
12	126,2	6,6	teils kompakt
13	74,0	7,6	teils kompakt
14	172,8	6,3	teils kompakt
15	60,5	5,1	teils kompakt
16	104,8	7,2	sehr porig
17	33,3	7,2	sehr porig
18	76,9	4,3	sehr porig
19	8,50	7,3	sehr porig
20	37,30	6,5	sehr porig
21	100,90	5,9	sehr porig
22	26,70	6,7	sehr porig
23	20,40	6,0	sehr porig
24	44,85	4,3	sehr porig
25	78,40	7,4	sehr porig
26	36,00	4,0	sehr porig
27	13,4	8,1	sehr porig
28	22,0	5,6	sehr porig
29	36,0	6,8	sehr porig
30	130,0	5,9	sehr porig





Anlage 31, Blatt 6

Zu Absatz 4.6.2: Festlinge der Rezeptur K06, 10. Messung, Übersicht der Kraft-Verformungs-Linien, Kornhöhen und Bruchkräfte

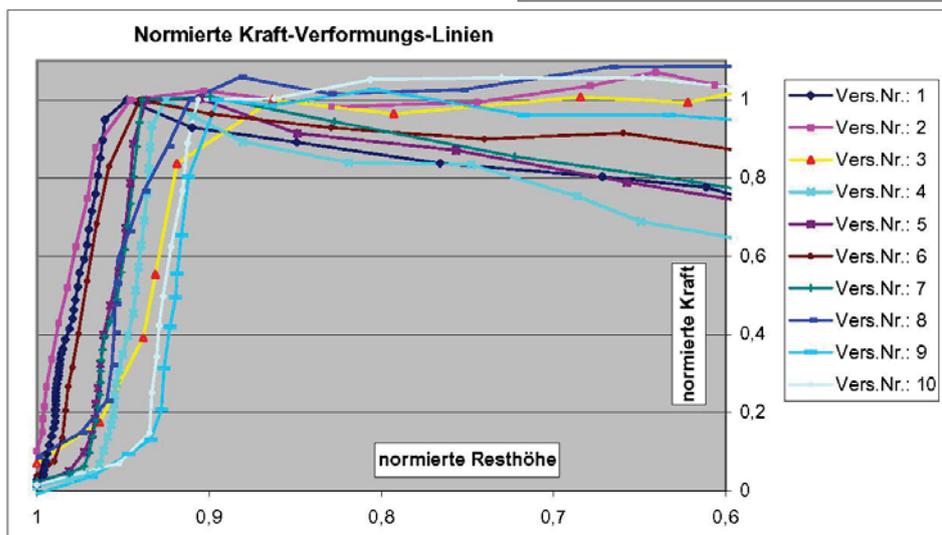
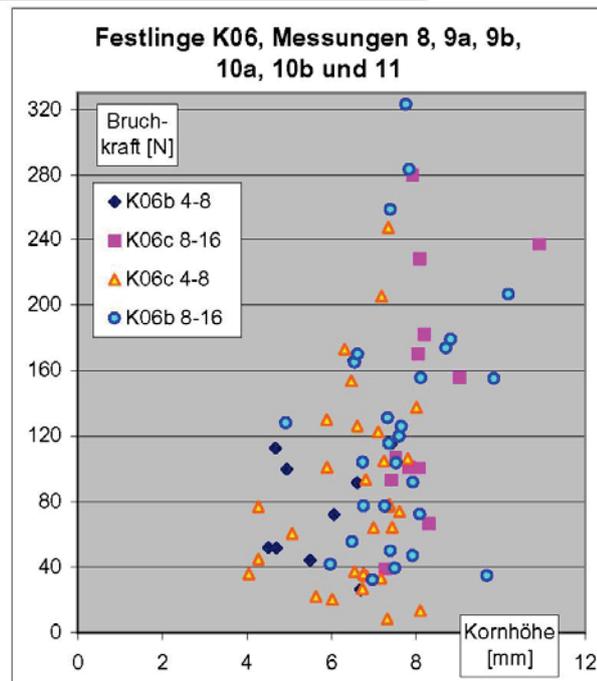
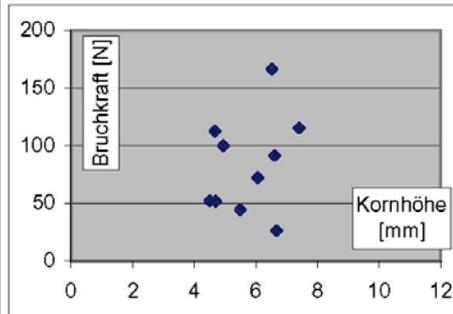




Anlage 31, Blatt 7

Zu Absatz 4.6.2: Festlinge der Rezeptur K06, 11. Messung, Übersicht der Kraft-Verformungs-Linien, Kornhöhen und Bruchkräfte

Dateiname: 20100727123916 .txt		11
Rezeptur: K06b 4-8		
Kommentar: vom 16.07., Nullmessung und		
Korn Nummer	max Kraft [N]	Höhe des Korns [mm]
1	166,20	6,5
2	112,40	4,7
3	26,17	6,7
4	115,30	7,4
5	91,46	6,6
6	72,03	6,1
7	99,80	4,9
8	52,0	4,5
9	44,2	5,5
10	51,5	4,7





Anlage 32, Blatt 1

Zu Abschnitt 4.6.3: Rohdichtebestimmung durch Unterwasserwägung

Prob.-Nr.	Probenbezeichnung	Prüfdatum	Rohdichte ρ_0 [g/cm ³]		Porengehalt por in [Vol-%]		Packungsdichte ohne vom Zement gebundener Wassermenge ($\Phi=1-\text{por}/100$)	
			EW	MW	EW	MW		
132	D01 4/8	12.07.11	1,95		20,63		0,794	
105	D02* 4/8 -1	03.06.11	1,96	1,98	20,98	20,06	0,799	0,812
106	D02* 4/8 -2	03.06.11	1,97		20,49			
107	D02* 4/8 -3	03.06.11	2,02		18,71			
65	D02 8/16 -1	16.05.11	2,02	2,02	17,39	17,54	0,825	
66	D02 8/16 -2	16.05.11	2,02		17,70			
133	D03 4/8	12.07.11	2,00		17,06		0,829	
125	D04b 2/4	28.06.11	1,68	1,67	31,47	32,42	0,676	
127	D04c 2/4	28.06.11	1,66		33,37			
120	D04 4/8	21.06.11	1,85	1,79	19,83	22,88	0,771	0,762
122	D04* 4/8	23.06.11	1,83		23,06			
121	D04a	23.06.11	1,80		21,61			
124	D04b 4/8	28.06.11	1,72		26,09			
126	D04c 4/8	28.06.11	1,76		23,80			
117	D04 8/16 -1	21.06.11	1,90	1,90	17,63	17,91	0,821	
118	D04 8/16 -2	21.06.11	1,89		18,20			
119	D04 8/16 Sekundär.	21.06.11	1,81		21,96		0,780	
92	D05b 2/4 -1	26.05.11	1,69	1,73	28,12	27,67	0,723	
93	D05b 2/4 -2	26.05.11	1,73		27,82			
94	D05b 2/4 -3	26.05.11	1,76		27,07			
80	D05a* 4/8 -1	23.05.11	1,85	1,84	23,48	23,72	0,763	0,743
81	D05a* 4/8 -2	23.05.11	1,85		23,55			
82	D05a* 4/8 -3	23.05.11	1,83		24,43			
44	D05b 4/8 -1	02.05.11	1,84		23,58			
45	D05b 4/8 -2	02.05.11	1,84		23,57			
14	D06xFM 8/16 -1	18.04.11	1,71	1,72	32,00	31,57	0,684	
15	D06xFM 8/16 -2	18.04.11	1,73		31,14			
16	D08 4/8 -1	18.04.11	1,95	1,96	21,22	20,42	0,796	
17	D08 4/8 -2	18.04.11	1,97		19,62			
112	D08FM 4/8 -1	09.06.11	1,77	1,77	27,13	27,26	0,727	0,771
113	D08FM 4/8 -2	09.06.11	1,77		27,40			
115	D08 8/16	09.06.11	1,85		24,18		0,758	
114	D08FM 16/32	09.06.11	1,92		19,60		0,804	
116	D09 4/8	09.06.11	1,79		23,79		0,762	0,786
123	D09 8/16	23.06.11	1,89		19,10		0,809	
57	D10 4/8 -1	12.05.11	1,72	1,72	23,71	23,76	0,762	
58	D10 4/8 -2	12.05.11	1,71		23,81			



Anlage 32, Blatt 2

Zu Abschnitt 4.6.3: Rohdichtebestimmung durch Unterwasserwägung

Prob.-Nr.	Probenbezeichnung	Prüfdatum	Rohdichte ρ_0 [g/cm ³]		Porengehalt por in [Vol-%]		Packungsdichte ohne vom Zement gebundener Wassermenge ($\Phi=1-\text{por}/100$)	
			EW	MW	EW	MW		
51	D11 2/4 -1	09.05.11	1,97	1,98	18,43	17,78	0,822	0,820
52	D11 2/4 -2	09.05.11	1,99		17,14			
53	D11 4/8 -1	09.05.11	1,96	1,96	18,36	18,30	0,817	
54	D11 4/8 -2	09.05.11	1,96		18,25			
55	D11 8/16 -1	09.05.11	1,91	1,93	18,45	17,78	0,822	
56	D11 8/16 -2	09.05.11	1,94		17,10			
110	K01 4/8 -1	06.06.11	1,87	1,85	23,96	24,42	0,756	0,782
111	K01 4/8 -2	06.06.11	1,84		24,88			
89	K04 4/8 -1	26.05.11	1,94	1,93	22,40	22,60	0,774	
90	K04 4/8 -2	26.05.11	1,93		22,73			
91	K04 4/8 -3	26.05.11	1,93		22,68			
67	K04FM 1.Mi. -1	16.05.11	1,88	1,87	23,64	23,77	0,762	
68	K04FM 1.Mi. -2	16.05.11	1,86		23,90			
20	K04FM 2.Mi. -1	21.04.11	1,93	1,92	21,19	21,53	0,785	
21	K04FM 2.Mi. -2	21.04.11	1,90		21,86			
69	K04FM 3.Mi. -1	19.05.11	1,89	1,86	25,01	25,25	0,747	
70	K04FM 3.Mi. -2	19.05.11	1,84		25,49			
36	K04FM 4.Mi. -1	28.04.11	1,96	1,96	19,22	19,05	0,810	
37	K04FM 4.Mi. -2	28.04.11	1,96		18,87			
38	K04FM 4.Mi. 8/16-1	28.04.11	1,93	1,92	18,10	18,61	0,814	
39	K04FM 4.Mi. 8/16-2	28.04.11	1,92		19,11			
40	K05 4/8 -1	02.05.11	1,86	1,85	23,64	24,19	0,758	
41	K05 4/8 -2	02.05.11	1,86		23,44			
42	K05 4/8 -3	02.05.11	1,82		25,57			
43	K05 4/8 -4	02.05.11	1,85		24,11			
76	K06* 4/8 -1	23.05.11	2,03	1,99	17,05	17,37	0,826	
77	K06* 4/8 -2	23.05.11	1,98		17,11			
78	K06* 4/8 -3	23.05.11	1,98		16,78			
79	K06* 4/8 -4	23.05.11	1,95		18,52			
85	K06b 4/8	23.05.11	1,88		20,33		0,797	
46	K07 4/8 -1	05.05.11	1,93	1,92	19,49	20,09	0,799	
47	K07 4/8 -2	05.05.11	1,94		19,15			
48	K07 4/8 -3	05.05.11	1,89		21,64			
86	K07* 4/8 -1	26.05.11	1,95	1,95	19,33	19,36	0,806	
87	K07* 4/8 -2	26.05.11	1,94		19,51			
88	K07* 4/8 -3	26.05.11	1,94		19,23			
99	K07** 4/8	31.05.11	5,28		19,19			19,19



Anlage 32, Blatt 3

Zu Abschnitt 4.6.3: Rohdichtebestimmung durch Unterwasserwägung

Prob.-Nr.	Probenbezeichnung	Prüfdatum	Rohdichte ρ_0 [g/cm ³]		Porengehalt por in [Vol-%]		Packungsdichte ohne vom Zement gebundener Wassermenge ($\Phi=1-\text{por}/100$)		
			EW	MW	EW	MW			
62	K07 8/16 -1	16.05.11	1,95		16,23				
63	K07 8/16 -2	16.05.11	1,96	1,95	15,99	16,16	0,838		
64	K07 8/16 -3	16.05.11	1,95		16,25				
104	K07 16/32	31.05.11	1,98		12,73		0,873		
95	K07Sek 16/32	26.05.11	2,06		12,26		0,877		
49	K11a 4/8 -1	05.05.11	1,67	1,60	35,14	36,87	0,631	0,640	
50	K11a 4/8 -2	05.05.11	1,59		36,64				
103	K11b 4/8 -2	31.05.11	1,55		38,83				
59	K11b 8/16 -1	12.05.11	1,55	1,57	37,44	36,70	0,633		
60	K11b 8/16 -2	12.05.11	1,59		35,96				
61	K11b 16/32	12.05.11	1,56		34,56		0,654		
22	K12 4/8 -1	21.04.11	1,38	1,37	38,68	39,04	0,610		
23	K12 4/8 -2	21.04.11	1,36		39,09				
134	K12 4/8	12.07.11	1,38		39,35				
30	VV1 4/8 -1	26.04.11	2,08	2,09	13,72	13,49	0,865		0,861
31	VV1 4/8 -2	26.04.11	2,09		13,26				
71	VV1* 4/8 -1	19.05.11	2,04		16,19				
72	VV1* 4/8 -2	19.05.11	2,08	16,04	15,81	0,840			
73	VV1* 4/8 -3	19.05.11	2,14		16,13				
28	VV1 8/16 -1	26.04.11	2,09	2,10	12,46	12,29	0,877		
29	VV1 8/16 -2	26.04.11	2,10		12,12				
74	VV2 4/8 -1	19.05.11	1,86	1,83	26,09	25,00	0,750		
75	VV2 4/8 -2	19.05.11	1,78		28,65				
96	VV2* 4/8 -1	31.05.11	1,79		26,43				
97	VV2* 4/8 -2	31.05.11	1,80		25,43				
98	VV2* 4/8 -3	31.05.11	1,81		24,92				
108	VV2** 4/8 -1	03.06.11	1,83		22,93				
109	VV2** 4/8 -2	03.06.11	1,83	22,63					
83	VV3 8/16 -1	23.05.11	1,78	1,79	28,17	27,20	0,728		
84	VV3 8/16 -2	23.05.11	1,81		26,24				
24	VV6 4/8 -1	21.04.11	2,04	1,99	18,48	20,08	0,799		
25	VV6 4/8 -2	21.04.11	2,00		19,89				
32	VV6* 4/8 -1	26.04.11	1,97		21,07				
33	VV6* 4/8 -2	26.04.11	1,97		20,88				
26	VV 21 8/16 -1	12.04.11	1,94	1,92	19,33	20,48	0,795		
27	VV 21 8/16 -2	12.04.11	1,91		21,64				
135	Naturkies 4/8	12.07.11	2,34		11,69		0,883		

Anlage 33, Blatt 1

Zu Abschnitt 4.6.4: Erscheinungsbild der Agglomerate; hier Proben vor Frost-Tau-Prüfung



Rezeptur K07: Körnung 4/8 mit sehr unterschiedlichem Erscheinungsbild: glatte, normale, rauhe, runde, zusammenhaftende und klüftige



Rezeptur K07: Körnung 8/16 mit unterschiedlichem Erscheinungsbild: normale und glatte Körner mit Farbnuancen, vereinzelt Sekundärpartikel

Anlage 33, Blatt 2

Zu Abschnitt 4.6.4: Erscheinungsbild der Agglomerate; hier Proben vor Frost-Tau-Prüfung



Rezeptur D11: Körnung 4/8 mit normalen, gleichmäßigem Erscheinungsbild: vereinzelt glatte, raue und längliche Agglomerate



Rezeptur D11: wie oben, Detailaufnahme

Anlage 33, Blatt 3

Zu Abschnitt 4.6.4: Erscheinungsbild der Agglomerate; hier Proben vor Frost-Tau-Prüfung



Rezeptur VV22b: Körnung 4/8 mit normalen, gleichmäßigem Erscheinungsbild: überwiegend runde Partikel



Rezeptur VV22b: wie oben, Detailaufnahme

Anlage 33, Blatt 4

Zu Abschnitt 4.6.4: Erscheinungsbild der Agglomerate; hier Proben vor Frost-Tau-Prüfung



Rezeptur D10: Körnung 8/16 mit sehr unterschiedlichem Erscheinungsbild: glatte und normale sowie Sekundäräggglomerate



Rezeptur D10: wie oben, Detailaufnahme

Anlage 34, Blatt 1

Zu Abschnitt 4.6.4: Agglomerate nach Frost-Tau-Prüfung



Rezeptur D04: Körnung 8/16, kaum Absprengungen



Rezeptur D04: wie oben, abgesprengte Anteile 2/8 und 0/2

Anlage 34, Blatt 2

Zu Abschnitt 4.6.4: Agglomerate nach Frost-Tau-Prüfung



Rezeptur D04: Körnung 16/32, kaum Absprengungen



Rezeptur D04: wie oben, abgesprengte Anteile 4/8

Anlage 34, Blatt 3

Zu Abschnitt 4.6.4: Agglomerate nach Frost-Tau-Prüfung



Rezeptur D10: Körnung 8/16, kaum Absprengungen aber starkes Absanden



Rezeptur D10: wie oben, abgesprengte Anteile 2/8 und 0/2



Anlage 35, Blatt 1

Zu Absatz 4.6.5:

AKR-Schnellprüfverfahren [TUHH, B-3 (2011)]

Dehnungsmessung an Mörtelprismen Granulat D11 nach dem Schnellprüfverfahren										
Probekörper:		1			2			3		
		Lo in mm:	160,00	1,01	Lo in mm	160,00	0,80	Lo in mm	160,00	0,47
Tage	Datum	Meswert in mm	ΔL zu L_A in mm	e [mm/m]	Meswert in mm	ΔL zu L_A in mm	e [mm/m]	Meswert in mm	ΔL zu L_A in mm	e [mm/m]
0	16.06.11	1,1809	0,000	0,000	0,9679	0,000	0,000	0,6379	0,000	0,000
1	17.06.11	1,1873	0,006	0,040	0,9753	0,007	0,046	0,6443	0,006	0,040
4	20.06.11	1,2064	0,026	0,160	0,9934	0,026	0,160	0,6634	0,026	0,160
8	24.06.11	1,2263	0,045	0,284	1,0133	0,045	0,284	0,6843	0,046	0,290
11	27.06.11	1,2423	0,061	0,384	1,0303	0,062	0,390	0,6973	0,059	0,371
13	29.06.11	1,2522	0,071	0,445	1,0392	0,071	0,445	0,7092	0,071	0,445
19	05.07.11	1,3083	0,127	0,796	1,0963	0,128	0,803	0,7593	0,121	0,759
22	08.07.11	1,3428	0,162	1,012	1,1278	0,160	0,999	0,7868	0,149	0,931
25	11.07.11	1,3735	0,193	1,204	1,1615	0,194	1,210	0,8175	0,180	1,122
28	14.07.11	1,4110	0,230	1,438	1,1970	0,229	1,432	0,8520	0,214	1,338

*1 Gel
 *2 starke Gelschicht

Herstellung am 14.06.2011
Mörtelherstellung: nach DIN EN 196-1
 Mengenangaben für eine Mischung:
 Zement: CEM I 32,5 R; VDZ neuer Prüfzement 1,0 % Na₂O-Äquivalent: 555 g
 Zuschlag: Sieblinie 1250 g
 K₂SO₄: 4,72 g
 Wasser: 260,9 g
 AM 117 mm
 Der Grenzwert laut Richtlinie beträgt: 1 mm / m nach 13 Tagen.



Anlage 36, Blatt 2

Zu Abschnitt 4.7.1:

Betonprojektierung und Mischanweisung

Betonprojektierung Normalbeton				Rezepturname: B16K05		Herstelldatum: 24.01.2011	
gem. CEMEX-Heft von 01/2008				Probenbezeichnungen: 35-1 bis 35-3		3x100	
vorhandene Mengen Ausgangsstoffe [kg]:				Wasseraufnahme bei Wasserlagerung [% TM]		verbleibende Restmenge [kg TM]	
gem. Rezeptur	vorhand. Masse	Feuchtezustand geschätzt	% TM	vorhandene Trockenmasse [kg]	Nassmasse, wassergelagert	Oberflächenfeuchte die an Mischung teilnimmt [% TM]	verbleibende Restmenge [kg TM]
0/2	D1 1001	rt	0,1	1000,00	-	0,1	934,579
2/4	K05 1000,00	rt	7,0	934,58	990,65	5,0	18,988
4/8	K05 20,82	rt	4,0	20,02	21,22	5,0	0,000
8/16	K05 0,99	rt	4,0	0,95	1,01	5,0	
CEM I 42,5	-	-	-	-	-	-	
SFA Kraftwerk HRO	-	-	-	-	-	-	

off-oberflächentrocken, rf - raumlufttrocken	
Fertigkeitsklasse:	30/37
Nennfestigkeit:	37
Sieblinie:	B16
Konsistenzklasse:	F3
Wasseranspruch (S. 55):	20,5
Zementart:	CEM I 42,5
erford. w/z-Wert (S. 124):	0,54-0,59
gewählter w/z-Wert:	0,55

Zielfestigkeit: 47 N/mm ²	
Körnungsziffer (S. 53, 55): 2,89	
erford. Zementmenge (z = w : w/z-Wert): 372,7 [kg/m ³]	

Stoff:	Masse [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Volumen [dm ³]
Zement	372,7	3,1	120,2
Wasser	205,0	1,0	205,0
Luftporen	2,0%		20,0
Summe:			345,2
Differenz zum Volumen von 1 m ³ :			654,8

Hierin muß noch der Anteil des fest aufgesaugtem Wassers und der Teil des anhaftenden Wassers, das sich beim Mischen beteiligt, unterschieden werden.

Berechnung für einen Kubikmeter:			
erford. Zuschlagmengen für Sieblinie B8 in [Vol.%]	Feuchtrohdichte [kg/dm ³]	Feuchtmasse [kg/m ³]	in feuchter Zugabemenge enthaltene Oberflächenfeuchte [kg]
0/2	2,60	818,5	0,002
2/4	2,00	0,0	0,000
4/8	2,00	350,7	0,052
8/16	2,00	323,7	0,048
Kontrollsumme	100	1492,87	0,102

rechnerische Frischbetonrohichte in kg/dm ³ :		Zugabemenge, wassergesättigt in [kg]:	
Zement	1,10	2,41	0,00
Wasser	0,50	0,00	1,13
		0,95	1,05
Summe:		5,987 kg entspricht 2,892 dm ³	

Gesamtmenge:		Restvolumen [dm ³]	
100er Würfel	2,8	150er Würfel	0,09
Balken			



Anlage 36, Blatt 3

Zu Abschnitt 4.7.1:

Betonprojektierung und Mischanweisung

Betonprojektierung Normalbeton				Rezepturnamen: B8D01	Herstellungsdatum: 21.01.2011																								
gem. CEMEX-Heft von 01/2008		Probenbezeichnungen: 34-1 bis 34-2		2x100																									
vorhandene Mengen Ausgangsstoffe [kg]:																													
gem. Rezeptur	vorhand. Masse	Feuchtezustand geschätzt	% TM	vorhandene Trockenmasse [kg]	Wasseraufnahme bei Wasserlagerung [% TM]																								
0/2	1001	rit	0,1	1000,00	0,1																								
2/4	0,96	rit	7,0	0,90	6,0																								
4/8	2,56	rit	4,0	2,46	6,0																								
CEM I 42,5	-	-	-	-	-																								
SFA Kraftwerk HRO	-	-	-	-	-																								
Nassmasse, wasser- gelagert																													
Oberflächenfeuchte die an Mischung teilnimmt [% TM]																													
verbleibende Restmenge [kg TM]																													
Rückstellpr. z.B. für Frostversuch!																													
<table style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:33%;">Festigkeitsklasse: 30/37</td> <td style="width:33%;">Zielfestigkeit: 47 N/mm²</td> <td style="width:33%;"></td> </tr> <tr> <td>Nennfestigkeit: 37</td> <td>$f_{c,dry,cube}$ in [N/mm²]</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sieblinie: AB8</td> <td>Kömungsziffer (S. 53, 55): 2,89</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Konsistenzklasse: F3</td> <td>420 - 480 mm</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Wasseranspruch (S. 55): 225</td> <td>w in [kg/m³]</td> <td>± 10</td> </tr> <tr> <td>Zementart: CEM I 42,5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>erford. w/z-Wert (S. 124): 0,54-0,59</td> <td>erford. Zementmenge (z = w : w/z-Wert): 409,1 [kg/m³]</td> <td></td> </tr> <tr> <td>gewählter w/z-Wert: 0,55</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>						Festigkeitsklasse: 30/37	Zielfestigkeit: 47 N/mm ²		Nennfestigkeit: 37	$f_{c,dry,cube}$ in [N/mm ²]		Sieblinie: AB8	Kömungsziffer (S. 53, 55): 2,89		Konsistenzklasse: F3	420 - 480 mm		Wasseranspruch (S. 55): 225	w in [kg/m ³]	± 10	Zementart: CEM I 42,5			erford. w/z-Wert (S. 124): 0,54-0,59	erford. Zementmenge (z = w : w/z-Wert): 409,1 [kg/m ³]		gewählter w/z-Wert: 0,55		
Festigkeitsklasse: 30/37	Zielfestigkeit: 47 N/mm ²																												
Nennfestigkeit: 37	$f_{c,dry,cube}$ in [N/mm ²]																												
Sieblinie: AB8	Kömungsziffer (S. 53, 55): 2,89																												
Konsistenzklasse: F3	420 - 480 mm																												
Wasseranspruch (S. 55): 225	w in [kg/m ³]	± 10																											
Zementart: CEM I 42,5																													
erford. w/z-Wert (S. 124): 0,54-0,59	erford. Zementmenge (z = w : w/z-Wert): 409,1 [kg/m ³]																												
gewählter w/z-Wert: 0,55																													
<p>Hierin muß noch der Anteil des fest aufgesaugtem Wassers und der Teil des anhaftenden Wassers, das sich beim Mischen beteiligt, unterschieden werden.</p>																													
Berechnung für einen Kubikmeter:																													
erford. Zuschlagmengen für Sieblinie B8 in [Vol. %]	[kg/dm ³]		in feuchter Zugabemenge enthaltene Oberflächenfeuchte [kg]																										
	gewählt: AB8	Feuchtrohrdichte	Feuchtmasse [kg/m ³]	Mischmenge (Zugabemenge) TM wassergesättigt in [kg]:	Zugabemenge, wassergesättigt in [kg]:																								
0/2	57	2,60	560,7	1,51	0,002																								
2/4	17	2,00	333,7	0,90	0,045																								
4/8	26	2,00	487,7	1,31	0,066																								
Kontrollsumme	100	1382,1	1382,1	1,10	0,112																								
rechnerische Frischbetonrohddichte in kg/dm ³ :			2,02																										
Differenz zum Volumen von 1 m ³ : 377,0 / 623,0																													
Gesamtmenge: 5,309 kg entspricht 2,633 dm ³																													
<table style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:33%;">100er Würfel</td> <td style="width:33%;">150er Würfel</td> <td style="width:33%;">Balken</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">0,63</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: right;">Restvolumen [dm³]</td> </tr> </table>						100er Würfel	150er Würfel	Balken	2	2	0,63	Restvolumen [dm ³]																	
100er Würfel	150er Würfel	Balken																											
2	2	0,63																											
Restvolumen [dm ³]																													



Anlage 36, Blatt 5

Zu Abschnitt 4.7.1:

Betonprojektierung und Mischanweisung

Betonprojektierung Normalbeton			Rezepturname: B16D11Schw			Herstelldatum: 11.09.2011			
gem. CEMEX-Heft von 01/2008			Probenbezeichn.: 70-1 bis 70-5			3x160 + 1x100 + 1x600			
vorhandene Mengen Ausgangsstoffe [kg]:									
gem. Rezeptur	vorhandene Masse	Feuchtezustand geschätzt	% TM	vorhand. Trockenmasse [kg]	Wasseraufnahme bei Wasserlagerung [% TM]	Nassmasse, wasser-gelagert	Oberflächenfeuchte die an Mischung teilmimmt [% TM]	verbleibende Restmenge [kg TM]	
0/2	D11 Rest 8,96	regenfeucht	0,1	8,95	0,1	-	0,1	-	
2/4	D11 4,94	herstellfeucht	4,0	4,75	2,0	4,85	5,0	2,226	
4/8	D11 3,20	herstellfeucht	4,0	3,07	2,0	3,13	5,0	0,004	
8/16	D11 3,70	herstellfeucht	4,0	3,56	2,0	3,63	5,0	0,000	
CEM	CEM I 42,5	-	-	-	-	-	-	-	
SFA	Kraftwerk HRO	-	-	-	-	-	-	-	
Festigkeitsklasse: 30/37									
Nennfestigkeit: 37									
Sieblinie: B16									
Körnungsziffer (S. 53, 55): 47 N/mm ²									
Konsistenzklasse: F3									
Wasseranspruch (S. 55): 205									
Zementart: CEM I 42,5									
erford. w/z-Wert (S. 124): 0,54-0,59									
gewählter w/z-Wert: 0,55									
f _{c,dry,cube} in [N/mm ²] Zielfestigkeit: 47 N/mm ² Körnungsziffer (S. 53, 55): 2,89 + 100 ml Zusatzwasser und 40 ml FM1 von Addiment Deutliches weißes Bluten der Mischung, wohl zu wenig Feinstkorn in Restsand - dritter 100er Würfel mit in Form 20 erford. Zementmenge (z = w : w/z-Wert): 372,7 [kg/m ³]									
Hierin muß noch der Anteil des fest aufgesaugtem Wassers und der Teil des anhaftenden Wassers, das sich beim Mischen beteiligt, unterschieden werden.									
Berechnung für einen Kubikmeter:									
		[kg/dm ³]							
erford. Mengen für Sieblinie B16 in [Vol. %]	gewählt: B16	angenom. Trockenroh-dichte	Feucht-masse [kg/m ³]	Feuch-troh-dichte	Feucht-masse [kg/m ³]	vorhandene Menge	Mischmenge (Zugabemenge) TM in [kg]:	Zugabemenge, wassergesättigt in [kg]:	in feuchter Zugabemenge enthaltene Oberflächenfeuchte [kg]
0/2	42	2,60	687,5	2,50	687,5	0,013	8,20	0,008	0,008
2/4	14	2,00	211,6	2,02	211,6	0,022	2,52	0,126	0,126
4/8	20	2,00	257,3	2,02	257,3	0,012	3,07	0,153	0,153
8/16	24	2,00	298,3	2,02	298,3	0,012	3,56	0,178	0,178
Kontrollsumme	100		1454,63		1454,63	Zement	4,45	0,466	0,466
rechn. Frischbetonroh-dichte in kg/dm ³ :				2,03					
Gesamtmenge: 23,777 kg entspricht 11,702 dm ³									
100er Würfel oder 3 Stück 160-mm-Prismen		150er Würfel	Balken	Restvolumen [dm ³]					
1,77		0	0,74	-0,06					



Anlage 36, Blatt 6

Zu Abschnitt 4.7.1:

Betonprojektierung und Mischanweisung

Betonzusammensetzung Sandbeton Rezepturname: **SBD11Schw** Probenbezeichnungen: **66-1 bis 66-6**

Datum: 08.09.2011

auf Basis der Betonrezeptur **B16K04Schw** ohne den Zwischenschritt der Agglomeratherstellung

ursprüngliche Betonrezeptur: B16D11Schw mit den Proben-Nr.: 70-1 bis 70-4

Festigkeitsklasse: 30/37

Sieblinie: B16 Konsistenzklasse: F3

Rezeptur des Agglomeratbetons		D11 2/4	D11 4/8	D11 8/16	CEM I 42,5	Wasser	FM	37,30		
Sand D1 0/2	12,50	3,43	4,90	5,88	6,87	3,72	0,00			
Zugabemenge [kg TM]:		14,210							kg	
Zugabemengen von Rezeptur:		14,210							kg	
Zusammensetzung der Agglomerate im Beton		Sand D1	Sand D2	CEM I 42,5	SFA HRO	Wasser	FM	112		
Rezeptur D11 besteht aus [M%]:	70	0	20	10	12	0	0			
14,21 kg D11 bestehen aus [kg]:	9,95	0,00	2,84	1,42	1,71	0,00	0,00	15,92		
	12,50	9,95								
Insgesamt besteht die Rezeptur 'B16D11Schw' aus [kg]:		22,45	0,00	9,71	1,42	5,43	0,00	39,01		
		Sand D1	Sand D2	CEM I 42,5	SFA HRO					
entspricht in M%:	67	0	29	4	100					
Angemischt wurde die -fache Menge mit W1 anstatt D1										
Zusammensetzung Sandbeton:		Sand W1	Sand D1	Sand D2	CEM I 42,5	SFA HRO	Wasser	FM	LP-Gehalt gesch. [Vol%]	Summen
Gewichtsanteile [kg]	2,75	2,19	0,00	2,14	0,31	1,19	0,00	0,00	-	8,58
angenommene Trockenrohddichte, gemäß eigener Messung [kg/dm³]	2,61	2,63	2,64	3,10	1,93	1,00	1,00	1,00	-	
Volumen der Bestandteile [dm³]	1,05	0,83	0,00	0,69	0,16	1,19	0,00	0,00	?	4,10
daraus Anteile in [Vol.%]	25,7	20,3	0,0	16,8	3,9	29,2	0,0	0,0	4,0	100,00
Gewichtsanteile in 1m³ in [kg]	671,2	534,1	0,0	521,5	76,3	291,5	0,000	0,000		2094,7
rechnerische Frischbetonrohddichte in kg/dm³:		2,095								
100er Würfel oder 3 Stück 160-mm-Prismen		3,8	0	0	Balken	Restvolumen [dm³]				
150er Würfel		0	0	0		0,30				
3x320 + 3x100										



Anlage 37, Blatt 1

Zu Absatz 4.7.3: Frischbetoneigenschaften, Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen

Rezeptur:	Herstellung					Bruchkraft			Druckfestigkeit [N/mm ²]		Rohdichte [g/cm ³]		
	Form Nr.	Bezeichnung	Größe [mm]	Herstellungsdatum	Alter [d]	Bruchkraft [t]	korrigierte Bruchlast [kN]	Korrektur Würfelgröße	korrigierter Wert	Mittelwerte	Frischbeton	Ausformen	bei Druckprüfung
Projektiert wurde ein C20/25 mit Sieblinie B16 als V 2 mit "V V 6".	1	V 1-1	150	16.12.09	57	20,1	181,4	1,000	8,2	8,3	2,08	2,02	2,05
	2	V 1-2	150	16.12.09	57	20,7	187,0	1,000	8,4		2,08	2,02	2,05
	3	V 1-3	150	16.12.09	57	20,8	188,0	1,000	8,5		2,09	2,04	2,06
	4	V 1-4	150	16.12.09	57	20,8	188,0	1,000	8,4		2,08	2,04	2,06
	21	V 1-5	100	16.12.09	57	9,7	84,3	0,970	8,3	6,7		1,98	2,04
	21	V 1-6	100	16.12.09	34	8,2	70,3	0,970	6,9		2,09	1,96	2,00
	21	V 1-7	100	16.12.09	34	7,4	62,8	0,970	6,2			1,96	1,99
	19	V 1-8	100	16.12.09	34	8,2	70,3	0,970	7,0			2,00	2,03
	19	V 1-9	100	16.12.09	28	8,7	75,0	0,970	7,5		2,10	1,99	2,03
Projektiert wurde ein C20/25 mit Sieblinie B16 als V 2 mit "V V 6".	13	V 2-1	150	16.12.09	28	24	217,9	1,000	9,7	10,1	2,07	2,03	2,06
	10	V 2-2	150	16.12.09	34	28	255,2	1,000	11,3	12,0	2,06	2,02	2,05
	11	V 2-3	150	16.12.09	57	37	339,3	1,000	15,1	15,3	2,07	2,04	2,06
	7	V 2-4	150	16.12.09	28	23,5	213,2	1,000	9,6		2,08	2,04	2,06
	12	V 2-5	150	16.12.09	34	30,5	278,6	1,000	12,4		2,08	2,03	2,06
	14	V 2-6	150	16.12.09	28	26,2	238,4	1,000	10,6		2,05	2,02	2,04
	23	V 2-7	100	16.12.09	28	12	105,8	0,970	10,6			2,02	2,06
	23	V 2-8	100	16.12.09	34	14,5	129,1	0,970	12,7		2,08	2,01	2,07
	23	V 2-9	100	16.12.09	57	17,7	159,0	0,970	15,6			2,00	2,06
	24	V 2-10	100	16.12.09	57	16,9	151,5	0,970	14,7			2,04	2,08
	24	V 2-11	100	16.12.09	34	13,4	118,9	0,970	11,5		2,10	2,04	2,07
	24	V 2-12	100	16.12.09	57	17,1	153,4	0,970	14,7			2,04	2,08
	20	V 2-13	100	16.12.09	34	13,9	123,5	0,970	12,0			2,06	2,09
20	V 2-14	100	16.12.09	57	18,8	169,3	0,970	16,5		2,10	2,05	2,07	
20	V 2-15	100	16.12.09	57	13,9	123,5	0,970	15,4			2,02	2,05	
B32VV	1	V 4-1	150	29.07.10	29	66	595,2	1,000	26,5	27,0	2,19	2,18	2,20
	2	V 4-2	150	29.07.10	29	70	632,7	1,000	27,9		2,22	2,20	2,22
	3	V 4-3	150	29.07.10	29	62	557,7	1,000	24,6		2,24	2,22	2,24
	4	V 4-4	150	29.07.10	29	68	613,9	1,000	27,1		2,22	2,20	2,22
	5	V 4-5	150	29.07.10	29	70	632,7	1,000	28,1		2,25	2,22	2,25
	6	V 4-6	150	29.07.10	29	72	651,4	1,000	28,8		2,20	2,19	2,20
	7	V 4-7	150	29.07.10	29	66	595,2	1,000	26,6		2,22	2,20	2,22
	16	V 4-8	200	29.07.10	29	119	1092,1	1,035	28,2		2,23	2,22	2,24
	17	V 4-9	200	29.07.10	29	106	970,2	1,035	25,3		2,22	2,21	2,23
B16VV	8	V 5-1	150	29.07.10	29	82,5	749,9	1,000	33,7	34,1	2,19	2,18	2,20
	9	V 5-2	150	29.07.10	29	85	773,3	1,000	34,4		2,20	2,19	2,21
	10	V 5-3	150	29.07.10	29	84	763,9	1,000	34,0		2,19	2,18	2,20
	23	V 5-4	100	29.07.10	29	39	358,0	0,970	34,3		2,20	2,23	2,19



Anlage 37, Blatt 2

Zu Absatz 4.7.3: Frischbetoneigenschaften, Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen

Rezeptur:	Herstellung					Bruchkraft			Druckfestigkeit [N/mm ²]		Rohdichte [g/cm ³]		
	Form Nr.	Bezeichnung	Größe [mm]	Herst.-datum	Alter [d]	Bruchkraft [t]	korrigierte Bruchlast [kN]	Korrektur Würfelgröße	korrigierter Wert	Mittelwerte	Frischbeton	Ausformen	bei Druckprüfung
B16 V V 22b	5	V 6-1	150	15.09.10	28	85,5	778,0	1,000	35,0	36,2	2,22	2,20	2,23
	6	V 6-2	150	15.09.10	28	92	838,9	1,000	37,5		2,22	2,20	2,23
	7	V 6-3	150	15.09.10	28	92,5	843,6	1,000	37,9		2,23	2,21	2,23
	8	V 6-4	150	15.09.10	28	82,5	749,9	1,000	33,5		2,21	2,19	2,22
	12	V 6-5	150	15.09.10	28	88	801,4	1,000	35,9		2,22	2,19	2,22
	13	V 6-6	150	15.09.10	28	85	773,3	1,000	34,6		2,21	2,19	2,21
	9	V 6-7	150	15.09.10	28	96,5	881,1	1,000	39,4		2,22	2,20	2,22
	10	V 6-8	150	15.09.10	28			1,000			2,21	2,18	2,21
B16VVK04v	5	01-2	150	07.10.10	29	79	717,0	1,000	31,8	32,6	2,18	2,18	2,19
	6	01-3	150	07.10.10	29	80	726,4	1,000	32,2		2,20	2,20	2,21
	3	01-4	150	07.10.10	29	81	735,8	1,000	32,8		2,20	2,19	2,20
	24	01-5	100	07.10.10	29	37,2	341,1	0,970	33,0		2,22	2,20	2,21
		01-6	100	07.10.10	29	38	348,6	0,970	33,4			2,19	2,22
B8VV	6	V 7-1	150	28.10.10	28	90	820,2	1,000	36,7	35,0	2,21	2,20	2,20
	5	V 7-2	150	28.10.10	28	85,5	778,0	1,000	34,3		2,23	2,21	2,22
	3	V 7-3	150	28.10.10	28	82,5	749,9	1,000	33,6		2,21	2,18	2,19
	1	V 7-4	150	28.10.10	28	88,5	806,1	1,000	35,9		2,25	2,22	2,22
	4	V 7-5	150	28.10.10	28	86	782,7	1,000	34,7		2,19	2,16	2,16
B16 K04x	23	02-1	100	28.10.10	28	39,5	362,6	0,970	35,0	34,0	2,25	2,18	2,19
		02-2	100	28.10.10	28	37,5	344,0	0,970	33,4			2,18	2,18
		02-3	100	28.10.10	28	36,5	334,6	0,970	32,6			2,18	2,19
	10	02-4	150	28.10.10	28	80	726,4	1,000	35,0		2,22	2,20	2,21
B16 K04v	2	03-1	150	28.10.10	28	69,5	628,0	1,000	27,6	28,3	2,20	2,19	2,19
	20	03-2	100	28.10.10	28	31,5	287,9	0,970	27,9		2,21	2,19	2,19
		03-3	100	28.10.10	28	33,5	306,6	0,970	29,5			2,19	2,19
		03-4	100	28.10.10	28			0,970				2,16	2,16
B32 K07	5	04-1	150	18.11.10	28	119,5	1096,8	1,000	48,6	49,5	2,13	2,12	2,14
	6	04-2	150	18.11.10	28	124,5	1143,7	1,000	50,6		2,16	2,15	2,16
	2	04-3	150	18.11.10	28	107,5	984,3	1,000	44,1		2,15	2,15	2,16
	1	04-4	150	18.11.10	28	129	1185,8	1,000	54,6		2,14	2,13	2,14
B16 K07	3	05-2	150	18.11.10	28	88	801,4	1,000	35,5		2,13	2,09	2,10
B32 NK	6	06-1	150	09.12.10	28	136,0	1251,5	1,000	55,4	52,0	2,44	2,43	2,44
	24	06-2	100	09.12.10	28	54,8	505,5	0,970	48,7		2,51	2,43	2,44
B16 NK	5	07-1	150	09.12.10	28	126,5	1162,4	1,000	51,8	51,9	2,39	2,39	2,40
	20	07-2	100	09.12.10	28	55,7	513,9	0,970	51,9			2,41	2,43
B32 D05b	1	08-1	150	09.12.10	28	49,9	459,8	1,000	27,5		2,15	2,14	2,15
B32 D04	2	09-1	150	09.12.10	28	82,5	749,9	1,000	32,9	32,7	2,15	2,15	2,15
	4	09-2	150	09.12.10	28	84,0	763,9	1,000	33,7		2,16	2,15	2,16
	19	09-3	100	09.12.10	28	39,6	363,6	0,970	34,1		2,15	2,13	2,14
		09-4	100	09.12.10	28	34,9	319,7	0,970	29,9			2,14	2,15



Anlage 37, Blatt 3

Zu Absatz 4.7.3: Frischbetoneigenschaften, Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen

Rezeptur:	Herstellung					Bruchkraft				Druckfestigkeit [N/mm ²]	Rohdichte [g/cm ³]		
	Form Nr.	Bezeichnung	Größe [mm]	Herst.-datum	Alter [d]	Bruchkraft [t]	korrigierte Bruchlast [kN]	Korrektur Würfelgröße	korrigierter Wert	Mittelwerte	Frischbeton	Ausformen	bei Druckprüfung
SB K07	24	S01-2	100	06.01.11	28	55,7	513,9	0,970	50,5	53,3	2,15	2,11	2,13
		S01-7	100	06.01.11	28	57,6	531,7	0,970	50,7			2,09	2,11
		S01-8	100	06.01.11	28	58,5	540,1	0,970	53,2			2,13	2,15
	6	S01-3	150	06.01.11	28	144,0	1326,5	1,000	58,7		2,10	2,09	2,11
SB K04	20	S02-2	100	06.01.11	28	39,3	360,8	0,970	35,0	35,3	2,15	2,09	2,10
		S02-4	100	06.01.11	28	38,0	348,6	0,970	33,7			2,11	2,12
		S02-5	100	06.01.11	28	40,7	373,8	0,970	37,1			2,11	2,12
B16-Vol	5	12-3	150	11.01.11	31	105,5	965,5	1,000	43,6	41,7	2,12	2,09	2,11
	6	12-4	150	11.01.11	31	105,0	960,8	1,000	43,1		2,11	2,08	2,10
	1	12-5	150	11.01.11	31	91,5	834,2	1,000	37,6		2,15	2,10	2,12
	2	12-6	150	11.01.11	31	103,0	942,1	1,000	42,4		2,13	2,10	2,12
B16D02	5	13-1	150	14.01.11	28	110,5	1012,4	1,000	44,7	43,2	2,21	2,20	2,21
	6	13-2	150	14.01.11	28	106,0	970,2	1,000	43,3		2,21	2,20	2,22
	19	13-4	100	14.01.11	28	45,9	422,4	0,970	41,4		2,23	2,19	2,21
B16K07 Sek	3	14-1	150	14.01.11	28	119,5	1096,8	1,000	49,3		2,20	2,17	2,19
SBD05b-1	4	15-2 / S04	150	14.01.11	28	71,0	642,0	1,000	29,3	27,7	2,19	2,15	2,17
	24	15-3 / S04	100	14.01.11	28	31,8	290,7	0,970	28,7		2,24	2,16	2,20
		15-4 / S04	100	14.01.11	28	27,8	253,4	0,970	25,1		2,16	2,17	
B32K04FM 1.Mi.	6	16-1	150	18.01.11	28	79,0	717,0	1,000	31,9	27,7	2,13	2,12	2,13
B32K04FM 2.Mi.	3	17-1	150	18.01.11	28	67,5	609,2	1,000	27,6		2,12	2,09	2,10
B32K04FM 3.Mi.	4	18-1	150	18.01.11	28	66,5	599,8	1,000	26,4		2,12	2,10	2,11
B32K04FM 4.Mi.	14	19-1	150	18.01.11	28	61,5	553,0	1,000	24,8		2,08	2,08	2,09
SBD04	20	S03-2	100	21.01.11	28	55,3	510,2	0,970	50,0	48,6	2,21	2,19	2,20
		S03-3	100	21.01.11	28	50,5	465,4	0,970	45,3			2,17	2,18
		S03-4	100	21.01.11	28	55,7	513,9	0,970	50,4			2,17	2,18
SBD05b-2	12	S04-2	150	21.01.11	28	84,5	768,6	1,000	34,2		2,15	2,14	2,15
B08D06xFM	24	20-1	100	21.01.11	28	42,6	391,6	0,970	39,7	42,3	2,26	2,21	2,23
		20-2	100	21.01.11	28	47,8	440,2	0,970	45,0		2,20	2,22	
B08D08	2	21-1	150	21.01.11	28	97,0	885,8	1,000	39,7	39,7	2,18	2,17	2,18
	3	21-2	150	21.01.11	28	90,0	820,2	1,000	36,7		2,19	2,17	2,17
	4	21-3	150	21.01.11	28	104,0	951,4	1,000	42,6		2,18	2,16	2,16
B08K01	1	23-1	150	21.01.11	28	103,5	946,8	1,000	42,4	41,2	2,17	2,15	2,16
	5	23-2	150	21.01.11	28	98,0	895,2	1,000	39,9		2,17	2,16	2,17
U8K02	23	24-2	100	21.01.11	28	39,7	364,5	0,970	37,7		2,10	1,93	1,95
U8K03	21	25-2	100	21.01.11	28	52,8	486,9	0,970	46,6	50,3	2,17	2,14	2,16
		25-3	100	21.01.11	28	58,0	535,4	0,970	51,3			2,15	2,17
		25-4	100	21.01.11	28	59,0	544,8	0,970	52,9			2,15	2,17
B08K06c	19	26-1	100	21.01.11	28	56,5	521,4	0,970	51,8	45,7	2,22	2,19	2,22
		26-2	100	21.01.11	28	47,3	435,5	0,970	42,7			2,19	2,20
		26-3	100	21.01.11	28	47,3	435,5	0,970	42,7			2,18	2,20
B32D10	3	27-1	150	25.01.11	28	88,5	806,1	1,000	36,0	38,5	2,12	2,09	2,10
	6	27-2	150	25.01.11	28	100,5	918,6	1,000	41,0		2,11	2,10	2,11



Anlage 37, Blatt 4

Zu Absatz 4.7.3: Frischbetoneigenschaften, Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen

Rezeptur:	Herstellung					Bruchkraft				Druckfestigkeit [N/mm ²]		Rohdichte [g/cm ³]		
	Form Nr.	Bezeichnung	Größe [mm]	Herst.-datum	Alter [d]	Bruchkraft [t]	korrigierte Bruchlast [kN]	Korrektur Würfelgröße	korrigierter Wert	Mittelwerte	Frischbeton	Ausformen	bei Druckprüfung	
B16D10	5	28-2	150	25.01.11	28	94,5	862,4	1,000	38,5	39,9	2,10	2,10	2,11	
	24	28-3	100	25.01.11	28	43,8	402,8	0,970	38,6		2,19	2,11	2,12	
		28-4	100	25.01.11	28	48,3	444,8	0,970	42,7		2,11	2,12	2,12	
B32D04 Sekundäragglos	1	29-1	150	25.01.11	28	94,0	857,7	1,000	38,4	38,0	2,17	2,15	2,16	
	8	29-2	150	25.01.11	28	91,5	834,2	1,000	37,5		2,14	2,14	2,14	
B16D05b	24	30-1	100	25.01.11	28	43,2	397,2	0,970	38,0		2,19	2,19	2,21	
B32D04	10	31-1	150	25.01.11	28	105,5	965,5	1,000	43,8	42,6	2,15	2,15	2,15	
	14	31-2	150	25.01.11	28	100,5	918,6	1,000	41,4		2,15	2,15	2,16	
B16D05a	9	32-1	150	25.01.11	28	99,0	904,6	1,000	40,3	40,4	2,19	2,18	2,19	
	21	32-2	100	25.01.11	28	45,8	421,5	0,970	40,6		2,21	2,17	2,18	
B08D05a	21	33-1	100	25.01.11	28	53,6	494,3	0,970	47,4	47,5	2,21	2,19	2,21	
		33-2	100	25.01.11	28	54,4	501,8	0,970	48,5			2,19	2,20	
	23	33-3	100	25.01.11	28	52,1	480,3	0,970	46,5		2,19	2,16	2,17	
B08D01	23	34-1	100	25.01.11	28	48,5	446,2	0,970	43,9	45,1	2,19	2,19	2,21	
	20	34-2	100	25.01.11	28	50,8	468,2	0,970	46,3		2,24	2,20	2,21	
B16K05	20	35-1	100	25.01.11	28	48,8	449,5	0,970	43,7	40,7	2,24	2,19	2,19	
		35-2	100	25.01.11	28	41,9	385,0	0,970	37,7			2,19	2,20	2,20
B16D07	19	36-1	100	25.01.11	28	19,7	177,7	0,970	17,5	18,5	2,17	2,12	2,11	
		36-2	100	25.01.11	28	22,2	201,0	0,970	19,4			2,12	2,10	2,10
B08D07	13	37-1	150	25.01.11	28	56,9	525,1	1,000	23,3	24,0	2,10	2,09	2,11	
	15	37-2	150	25.01.11	28	59,5	549,4	1,000	24,6		2,11	2,10	2,10	
B16D08FM	5	39-1	150	26.01.11	28	76,0	688,9	1,000	30,9	30,6	2,17	2,15	2,15	
	6	39-2	150	26.01.11	28	75,0	679,5	1,000	30,4		2,19	2,15	2,18	
B08D08FM	3	40-1	150	26.01.11	28	80,5	731,1	1,000	32,9	33,6	2,16	2,14	2,15	
	4	40-2	150	26.01.11	28	84,0	763,9	1,000	34,3		2,18	2,15	2,17	
B16D01	21	41-1	100	26.01.11	28	44,3	407,5	0,970	40,0	41,3	2,24	2,22	2,23	
		41-2	100	26.01.11	28	48,9	450,4	0,970	44,1			2,21	2,22	2,22
		41-3	100	26.01.11	28	44,5	409,3	0,970	39,8			2,21	2,22	2,22
B08D03	26	42-1a	50x300	26.01.11	48		1053,0	1,198	55,6	57,0			2,17	
		42-1b	00x300	26.01.11	48		397,0	1,292	58,4				2,19	
	20	42-2	150	26.01.11	28	117,0	1073,3	1,000	48,3	46,0	2,20	2,18	2,20	
		42-3	100	26.01.11	28	50,5	465,4	0,970	45,6			2,23	2,18	2,19
		42-4	100	26.01.11	28	48,9	450,4	0,970	44,0			2,16	2,18	
B32K06	12	43-1	150	26.01.11	28	122,5	1124,9	1,000	50,1		2,17	2,16	2,17	
B16K06	19	44-2	100	26.01.11	28	45,6	419,6	0,970	41,2	47,4	2,20	2,19	2,20	
		44-3	100	26.01.11	28	59,9	553,2	0,970	54,0			2,18	2,19	2,19
		44-4	100	26.01.11	28	52,6	485,0	0,970	46,9			2,18	2,20	2,20
B08K06	14	45-2	150	26.01.11	28	137,5	1265,5	1,000	56,9	56,8	2,22	2,21	2,23	
	15	45-3	150	26.01.11	28	134,0	1232,7	1,000	54,9		2,23	2,21	2,23	
	7	45-4	150	26.01.11	30	141,5	1303,0	1,000	59,0		2,22	2,21	2,22	
	11	45-5	150	26.01.11	30	137,0	1260,9	1,000	56,3		2,20	2,19	2,20	



Anlage 37, Blatt 5

Zu Absatz 4.7.3: Frischbetoneigenschaften, Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen

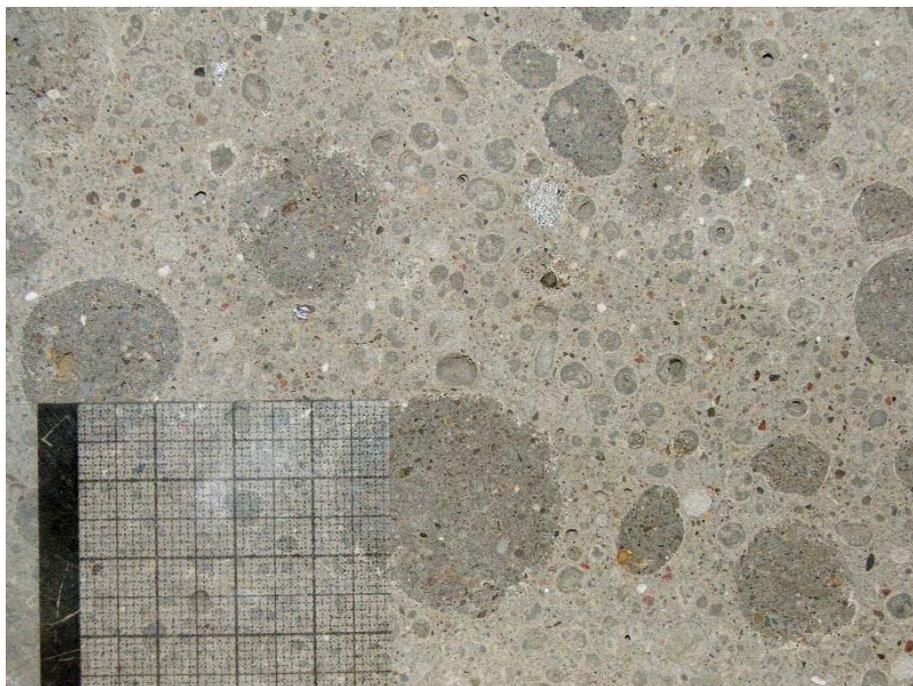
Rezeptur:	Herstellung					Bruchkraft			Druckfestigkeit [N/mm ²]		Rohdichte [g/cm ³]		
	Form Nr.	Bezeichnung	Größe [mm]	Hersteldatum	Alter [d]	Bruchkraft [t]	korrigierte Bruchlast [kN]	Korrektur Würfelgröße	korrigierter Wert	Mittelwerte	Frischbeton	Ausformen	bei Druckprüfung
B32K04-2	14	46-1	150	27.01.11	29	93,5	853,0	1,000	38,3		2,19	2,19	2,18
B16K04-2	11	47-1	150	27.01.11	29	97,0	885,8	1,000	39,8	42,3	2,19	2,18	2,17
	19	47-3	100	27.01.11	29	48,4	445,8	0,970	43,1		xxx	2,19	2,21
		47-4	100	27.01.11	29	48,3	444,8	0,970	43,9			2,18	2,19
B08K07-1	6	48-1	150	27.01.11	29	150,5	1387,4	1,000	62,2		2,23	2,21	2,21
		48-5a	00x300	27.01.11	47		529,0	1,294	75,9	70,2			2,21
		48-5b	50x300	27.01.11	47		1209,0	1,197	64,5				2,19
	12	48-8	150	27.01.11	29	151,5	1396,8	1,000	63,2	62,2	2,25	2,22	2,22
	20	48-9	100	27.01.11	29	69,0	623,3	0,970	61,2		2,37	2,23	2,24
B16K04tr	24	49-1	100	27.01.11	29	46,8	430,8	0,970	41,9	43,4	2,22	2,19	2,19
		49-2	100	27.01.11	29	49,2	453,2	0,970	44,3			2,21	2,20
		49-3	100	27.01.11	29	48,6	447,6	0,970	43,9			2,19	2,19
B16K12	21	51-1	100	27.01.11	29	18,9	170,2	0,970	16,8	16,5	1,97	1,95	1,90
		51-2	100	27.01.11	29	18,6	167,4	0,970	16,2			1,94	1,89
B08K12	23	52-1	100	27.01.11	29	25,9	235,6	0,970	23,7	23,3	2,06	2,05	2,03
		52-2	100	27.01.11	29	24,9	226,3	0,970	22,5			2,03	2,01
		52-3	100	27.01.11	29	26,2	238,4	0,970	23,7			2,03	2,00
B16VV22a	6	53-1	150	28.01.11	28	94,5	862,4	1,000	38,6	42,5	2,18	2,17	2,18
	3	53-3	150	28.01.11	28	96,0	876,4	1,000	39,2		2,18	2,16	2,16
	19	53-4	100	28.01.11	32	55,8	514,9	0,970	49,6		2,20	2,20	2,19
B16VV22b	12	54-3	150	28.01.11	32	128,5	1181,2	1,000	52,8	47,2	2,21	2,20	2,20
	19	54-4	100	28.01.11	32	45,6	419,6	0,970	40,4		2,20	2,15	2,15
		54-5	100	28.01.11	32	46,3	426,1	0,970	41,2		2,16	2,14	
	21	54-6	100	28.01.11	32	62,4	561,4	0,970	54,6		2,21	2,20	2,20
B16VV21	15	55-3	150	28.01.11	32	105,5	965,5	1,000	43,1	42,1	2,19	2,18	2,17
	8	55-4	150	28.01.11	32	105,5	965,5	1,000	42,7		2,19	2,17	2,17
	21	55-5	100	28.01.11	32	47,6	438,3	0,970	45,3		2,21	2,17	2,15
		55-6	100	28.01.11	32	41,8	384,1	0,970	37,3		2,19	2,17	
B16VV1	14	56-1	150	28.01.11	32	137,0	1260,9	1,000	56,3		2,20	2,20	2,21
B16VV22bNK	5	58-3	150	31.01.11	29	124,5	1143,7	1,000	50,6	48,6	2,27	2,25	2,25
	19	58-4	100	31.01.11	29	51,7	476,6	0,970	46,8		2,27	2,23	2,25
		58-5	100	31.01.11	29	53,4	492,5	0,970	48,4		2,22	2,24	
B16GemischVV	21	60-5	100	31.01.11	29	42,5	390,7	0,970	38,0	41,1	2,17	2,13	2,14
		60-6	100	31.01.11	29	49,4	455,1	0,970	44,1			2,12	2,13
B08D11		HL1	100	19.07.11	28		641,4	0,970	57,2	57,8			2,18
		HL2	100	19.07.11	28		640,9	0,970	57,2		2,18		
		HL3	100	19.07.11	28		661,5	0,970	59,0		2,20		
B08K04		HL4	150	19.07.11	28		1144,4	1,000	51,6				2,13

Anlage 38, Blatt 1

Zu Absatz 4.7.3: Betonproben nach Frost-Tau-Prüfung in Wasser



Rezeptur D04: Größtkorn 32 mm

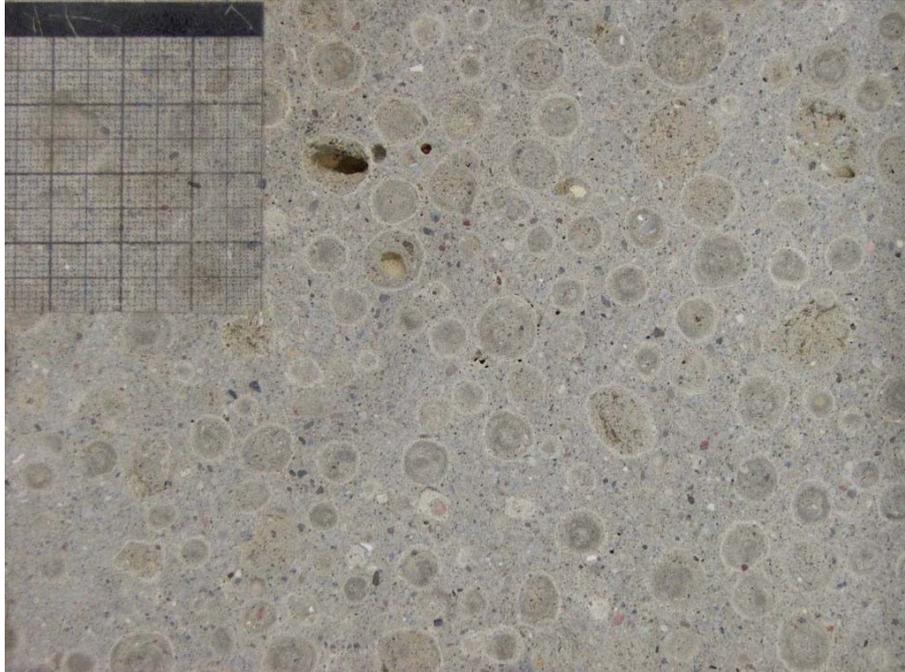


Rezeptur D04: wie oben, Detailaufnahme



Anlage 38, Blatt 2

Zu Absatz 4.7.3: Betonproben nach Frost-Tau-Prüfung in Wasser



Rezeptur: K04 Größtkorn 16 mm, Probekörper 47-2



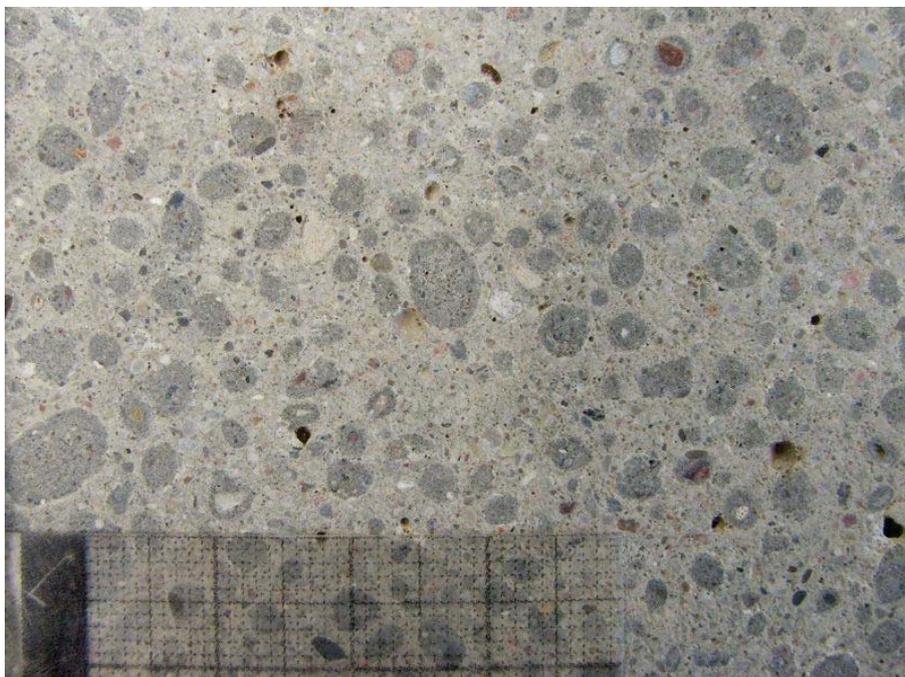
Rezeptur: K04 wie oben, Detailaufnahme

Anlage 38, Blatt 3

Zu Absatz 4.7.3: Betonproben nach Frost-Tau-Prüfung in Wasser



Rezeptur K07: Größtkorn 8 mm, Probekörper 48-3



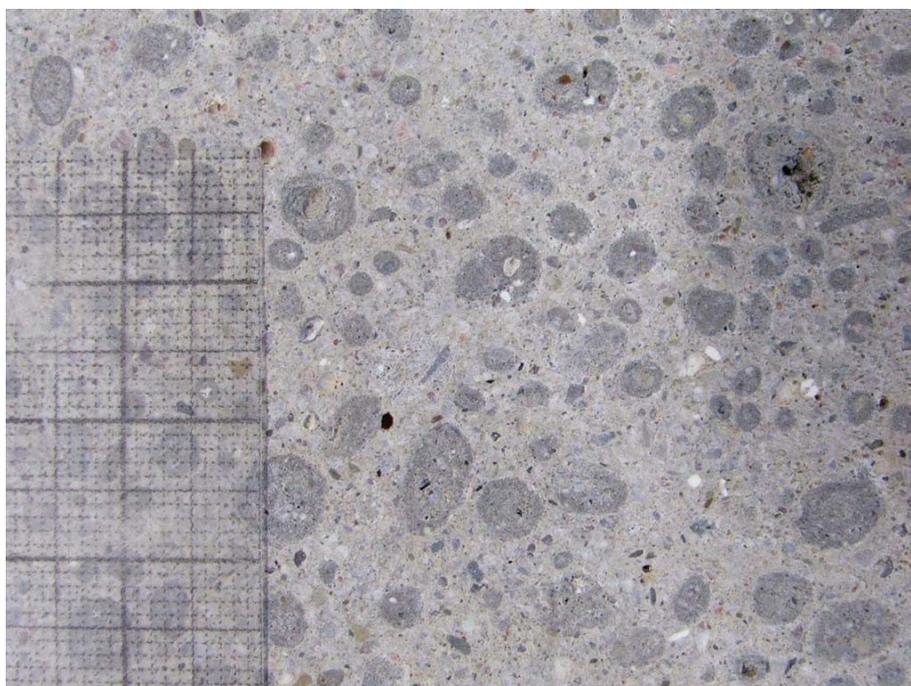
Rezeptur K07: wie oben, Detailaufnahme

Anlage 38, Blatt 4

Zu Absatz 4.7.3: Betonproben nach Frost-Tau-Prüfung in Wasser



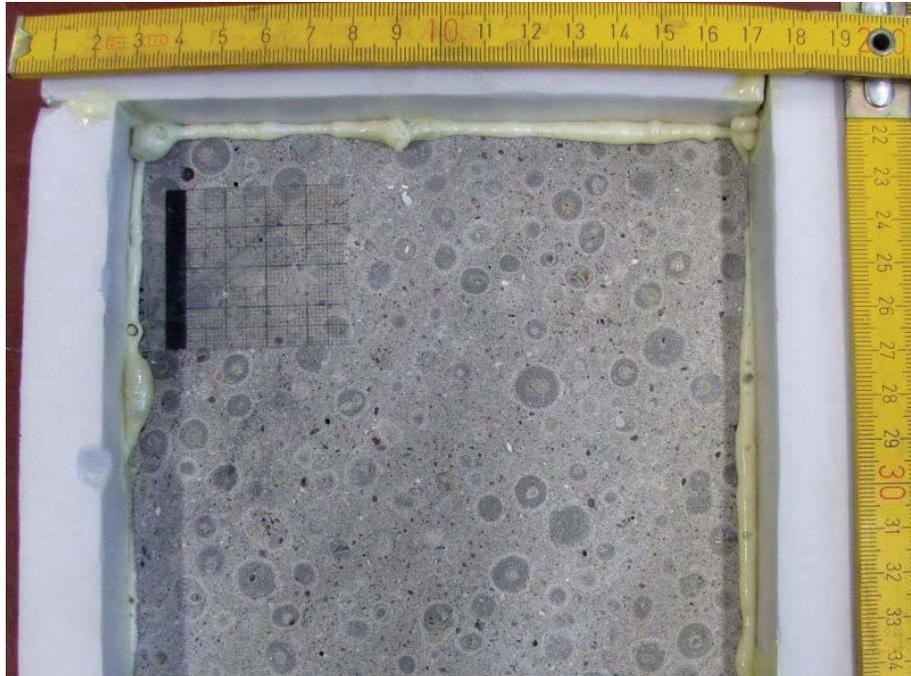
Rezeptur K07: Größtkorn 8 mm, Probekörper 48-6



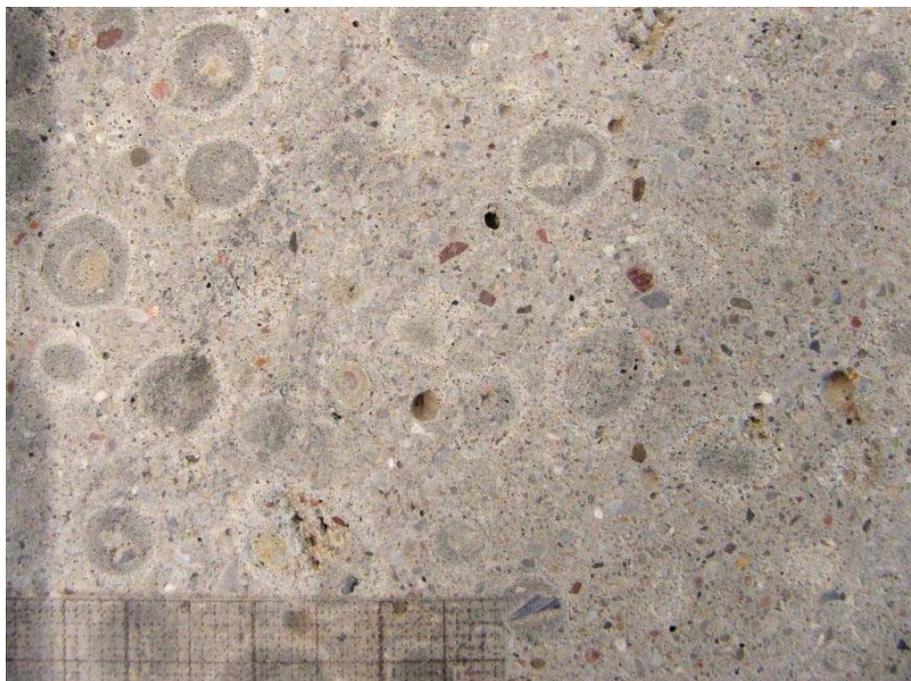
Rezeptur K07: wie oben, Detailaufnahme

Anlage 38, Blatt 5

Zu Absatz 4.7.3: Betonproben nach Frost-Tau-Prüfung in Wasser



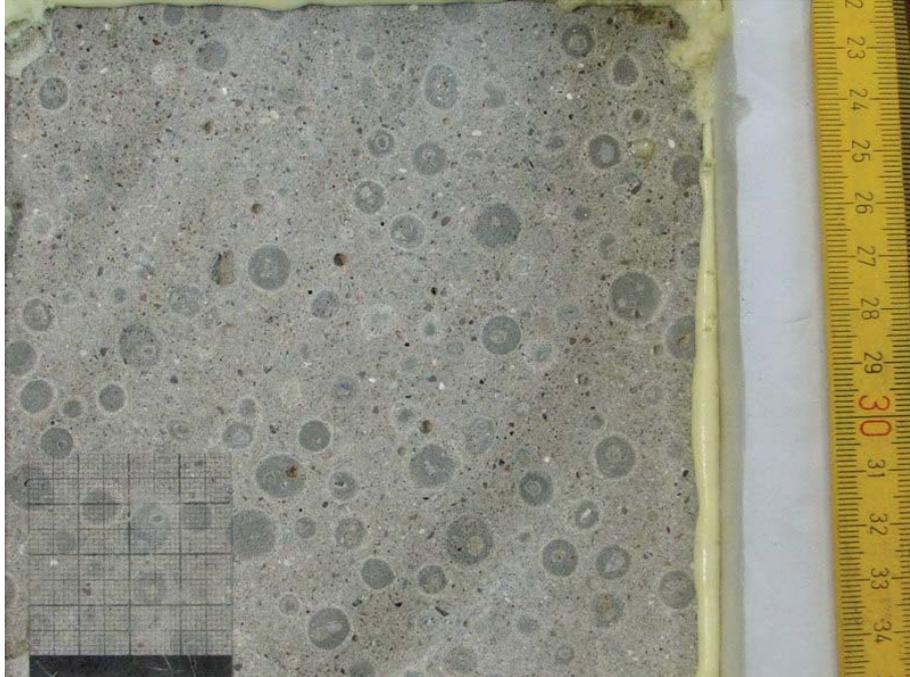
Rezeptur VV22b: Größtkorn 16 mm, Probekörper 54-1



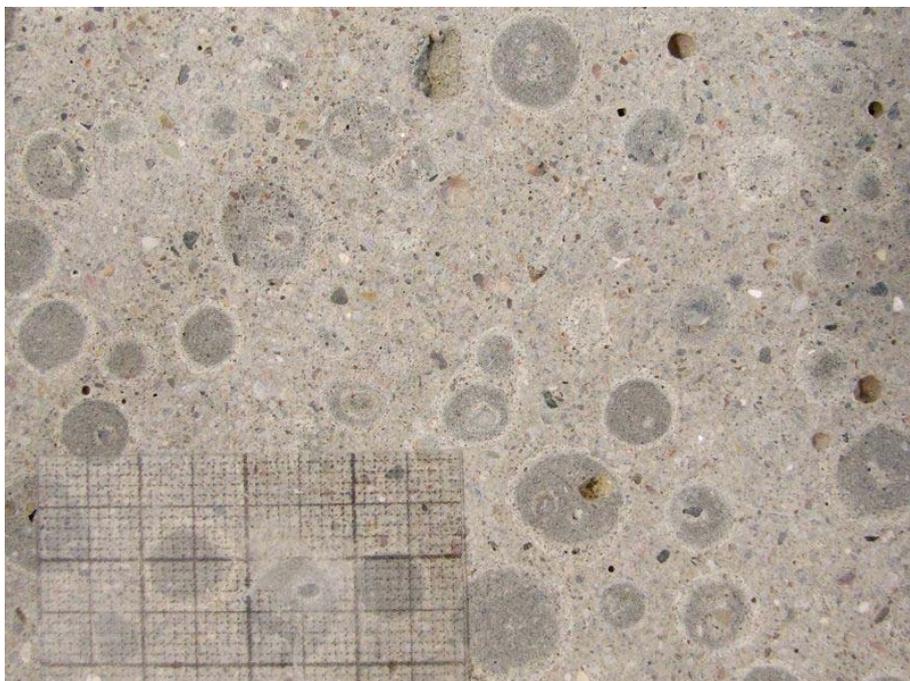
Rezeptur VV22b: wie oben, Detailaufnahme, Sandkerne von Agglomeraten sind ausgefroren

Anlage 38, Blatt 6

Zu Absatz 4.7.3: Betonproben nach Frost-Tau-Prüfung in Wasser



Rezeptur VV22b: Größtkorn 16 mm, Probekörper 54-2



Rezeptur VV22b: wie oben, Detailaufnahme, Sandkerne von Agglomeraten sind ausgefroren



Anlage 39, Blatt 1

Zu Absatz 4.7.3: Ergebnisse der FT-Prüfung an Betonproben in Tausalzlösung, aus Prüfbericht MPA Schleswig Holstein, Lübeck [MPA-SH (2011)]

MPA Schleswig-Holstein

Prüfzeugnis P 138-11

Seite 4

Tab. 3: Ergebnisse der Ermittlung der Rohdichte und Druckfestigkeit.

Nr.	Bezeichnung der Würfel		Prüf- tag	Prüf- alter d	Länge l mm	Breite b mm	Höhe h mm	Bruch- typ ^{a)}
–	–		–	–	–	–	–	–
1	B 8 D 11-A		16.08.2011	28	100	100	100	n
2	B 8 D 11-B		16.08.2011	28	100	100	100	n
3	B 8 D 11-C		16.08.2011	28	100	100	100	n
4	B 8 K 04		16.08.2011	28	150	136	150	n
Nr.	Masse m kg	Rohdichte ρ_R kg/m ³	Druckfläche $A_c = l \cdot b$ mm ²		Höchst- last ^{b)} F_u N	Druckfestig- keit ^{c,d} $f_{ci,eube}$ N/mm ²		
–	–	–	–		–	–		
1	2,18	2180	10 000		641 360	57,2		
2	2,18	2180	10 000		640 860	57,2		
3	2,20	2200	10 000		661 480	59,0		
Mittelwert:		2190	Mittelwert f_{cm} :		57,8			
4	6,52	2130	20 400		1 144 390	51,6		

^{a)} Bruchtypen: n ... normal; u ... ungewöhnlich (bei Zahlenangaben vgl. DIN EN 12390, Bild 2)

^{b)} Prüfgeschwindigkeit: $\dot{\sigma} = (0,6 \pm 0,2) \text{ N}/(\text{mm}^2 \text{ s})$

^{c)} Druckfestigkeit bei Lagerung nach DIN EN 12390-2, Anhang NA: $f_{ci} = 0,92 \cdot F_u/A_c$

^{d)} Druckfestigkeit bei Kantenlänge 100 mm nach DIN 1045-2: $f_{ci} = 0,97 \cdot F_u/A_c$

Tab. 4: Widerstand gegen Frost-Tauwechsel mit Tausalz.

Probe Nr. –	Prüffläche mm	Masse des abgewitterten Materials mg	Masseverlust je Flächeneinheit kg/m ²
R 1	22 875	76 890	3,361
R 2	22 725	67 140	2,954
R 3	22 575	129 240	5,725
R 4	22 725	10 340	0,455
47-2	22 500	173 590	7,715
48-3	22 500	75 910	3,374
31-3	22 500	263 800	11,724
54-1	22 575	220 290	9,758

Fotos vor und nach der Frostbeanspruchung (Proben R 1 bis R 4 sowie 31-3, 47-2, 48-3 und 54-1) zeigen die Abb. 6 bis 13 im Anhang.

3 Unterschriften

Lübeck, den 11.01.2012/Win

Für die Leitung der MPA:


(Prof. Dr.-Ing. Siegfried Bausch)




(Prof. Dr.-Ing. Rosemarie Haase)

Anlage 39, Blatt 2

Zu Absatz 4.7.3: Betonproben nach FT-Prüfung in Tausalzlösung, Detailaufnahmen der Prüfoberflächen aus Prüfbericht MPA S-H, Lübeck

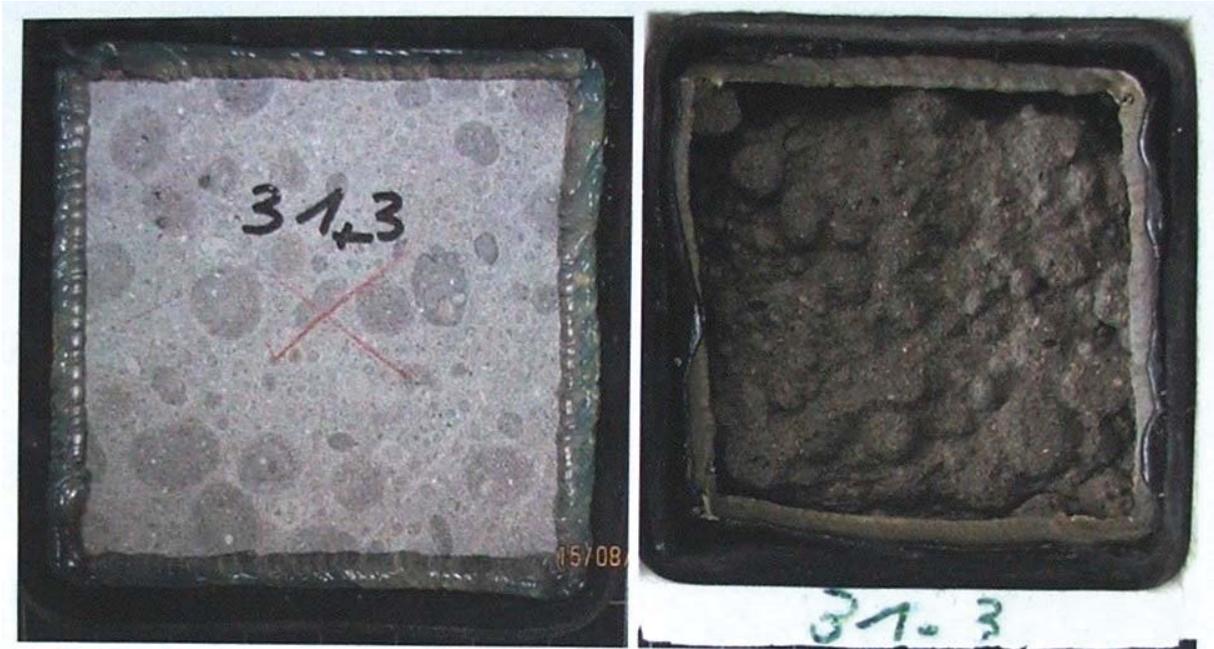


Abb. 10: Probe 31-3, links: vor der Frostbeanspruchung und rechts: nach der Frostbeanspruchung



Abb. 11: Probe 47-2, links: vor der Frostbeanspruchung und rechts: nach der Frostbeanspruchung

Anlage 39, Blatt 3

Zu Absatz 4.7.3: Betonproben nach FT-Prüfung in Tausalzlösung, Detailaufnahmen der Prüfoberflächen aus Prüfbericht MPA S-H, Lübeck



Abb. 12: Probe 48-3, links: vor der Frostbeanspruchung und rechts: nach der Frostbeanspruchung

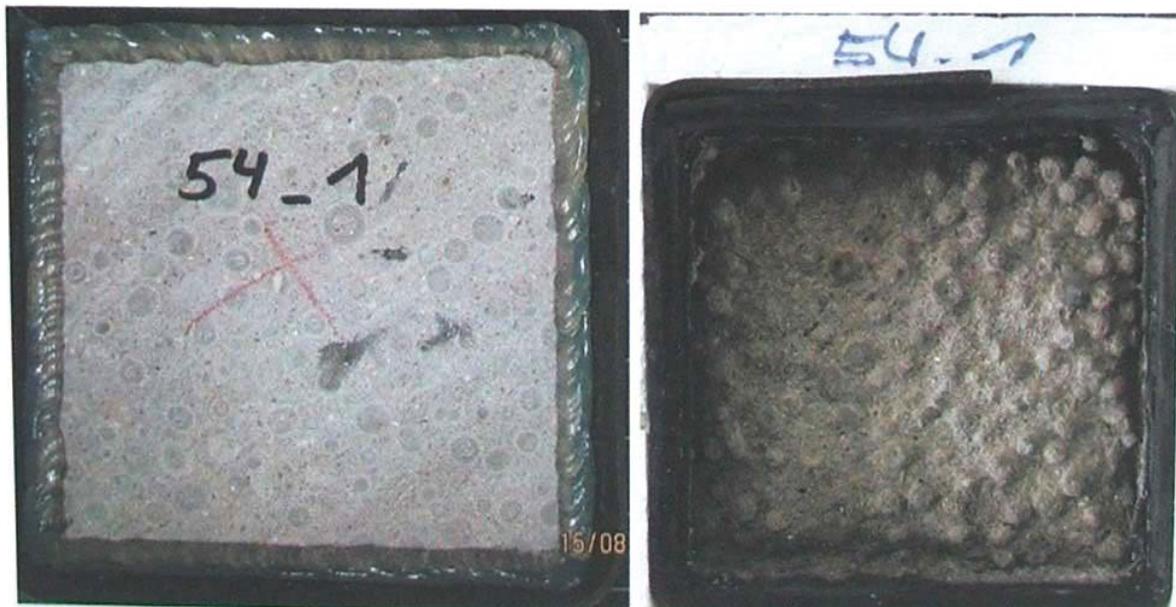


Abb. 13: Probe 54-1, links: vor der Frostbeanspruchung und rechts: nach der Frostbeanspruchung

Anlage 39, Blatt 4

Zu Absatz 4.7.3: Betonproben nach FT-Prüfung in Tausalzlösung, Detailaufnahmen der Prüfoberflächen aus Prüfbericht MPA S-H, Lübeck

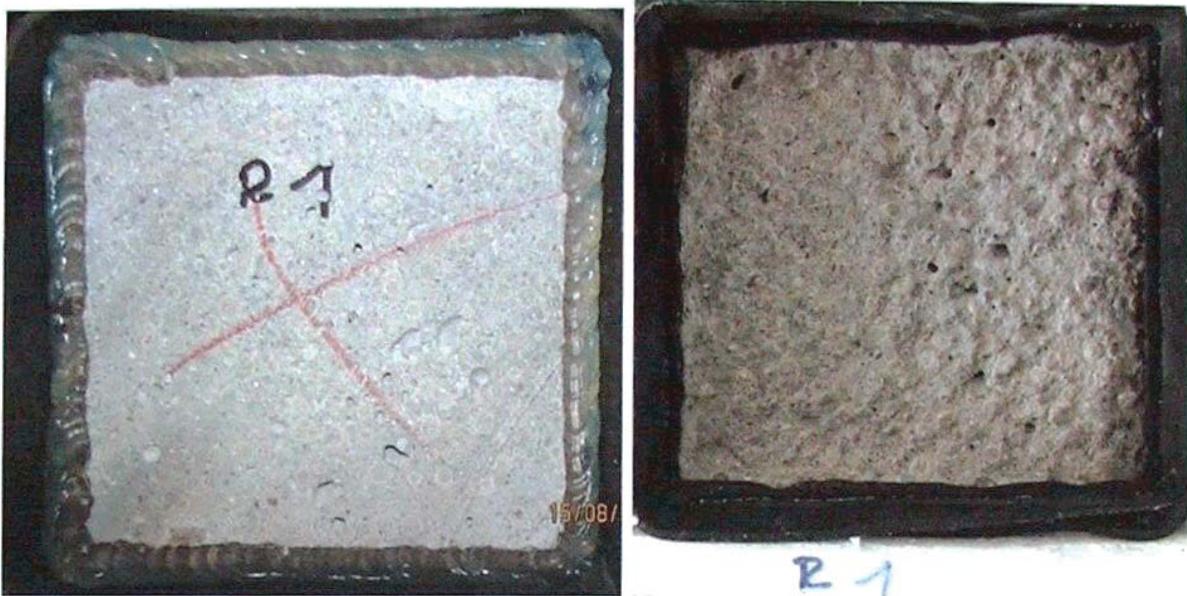


Abb. 6: Probe R1, links: vor der Frostbeanspruchung und rechts: nach der Frostbeanspruchung

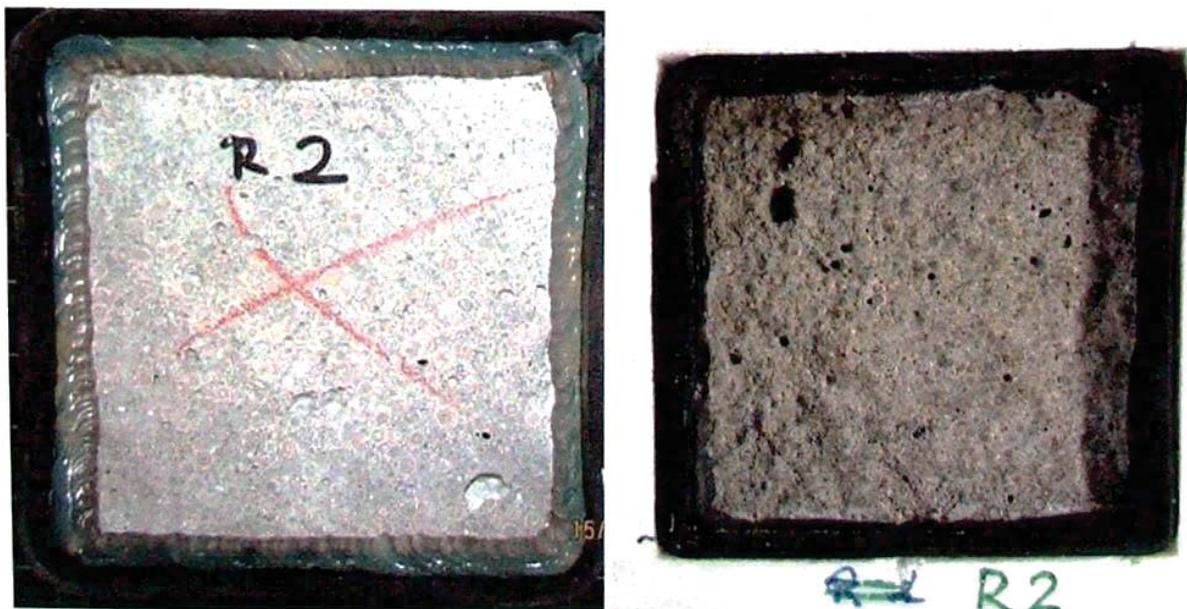


Abb. 7: Probe R2, links: vor der Frostbeanspruchung und rechts: nach der Frostbeanspruchung

Anlage 39, Blatt 5

Zu Absatz 4.7.3: Betonproben nach FT-Prüfung in Tausalzlösung, Detailaufnahmen der Prüfoberflächen aus Prüfbericht MPA S-H, Lübeck



Abb. 8: Probe R3, links: vor der Frostbeanspruchung und rechts: nach der Frostbeanspruchung

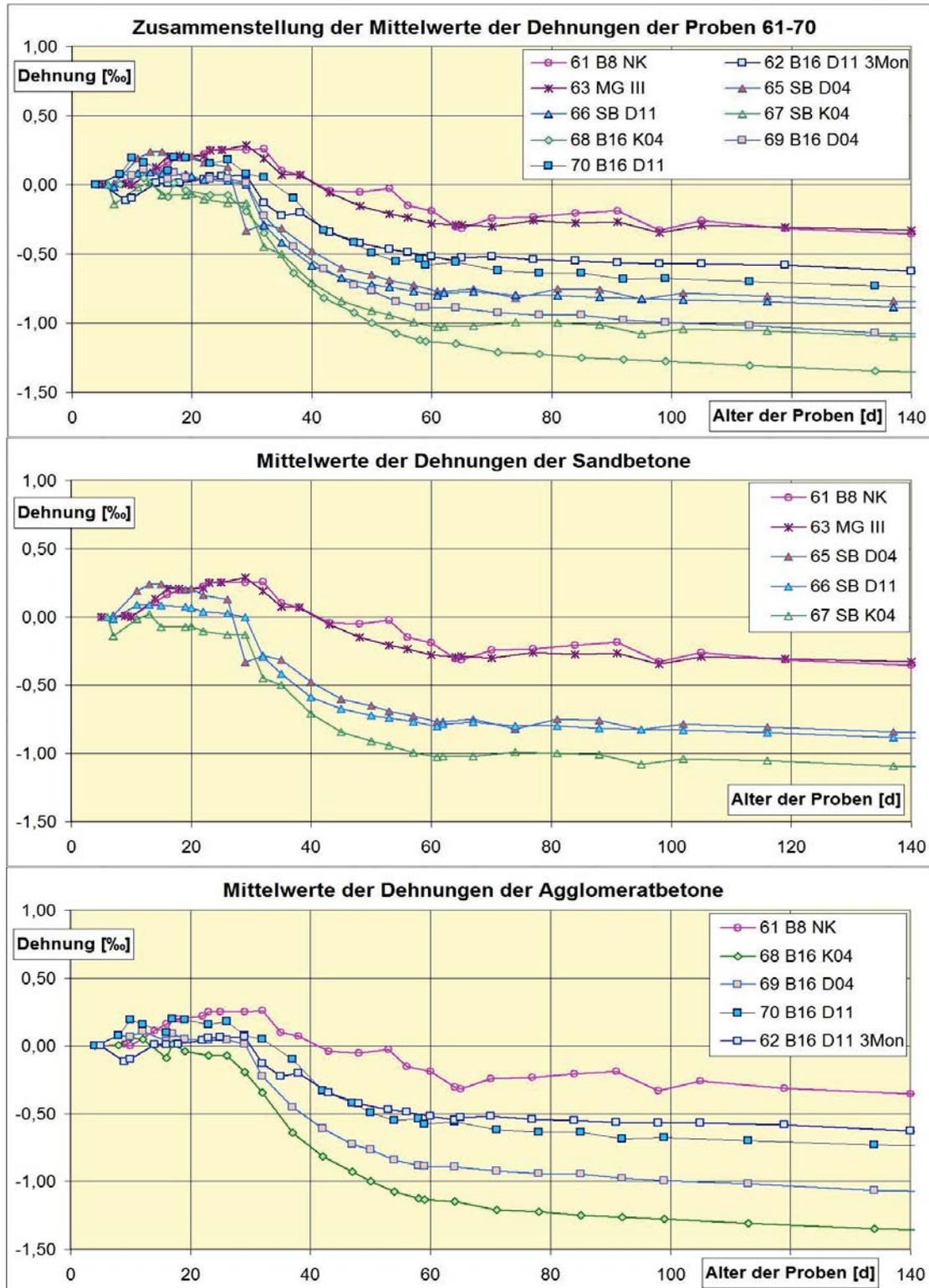


Abb. 9: Probe R4, links: vor der Frostbeanspruchung und rechts: nach der Frostbeanspruchung



Anlage 40, Blatt 1

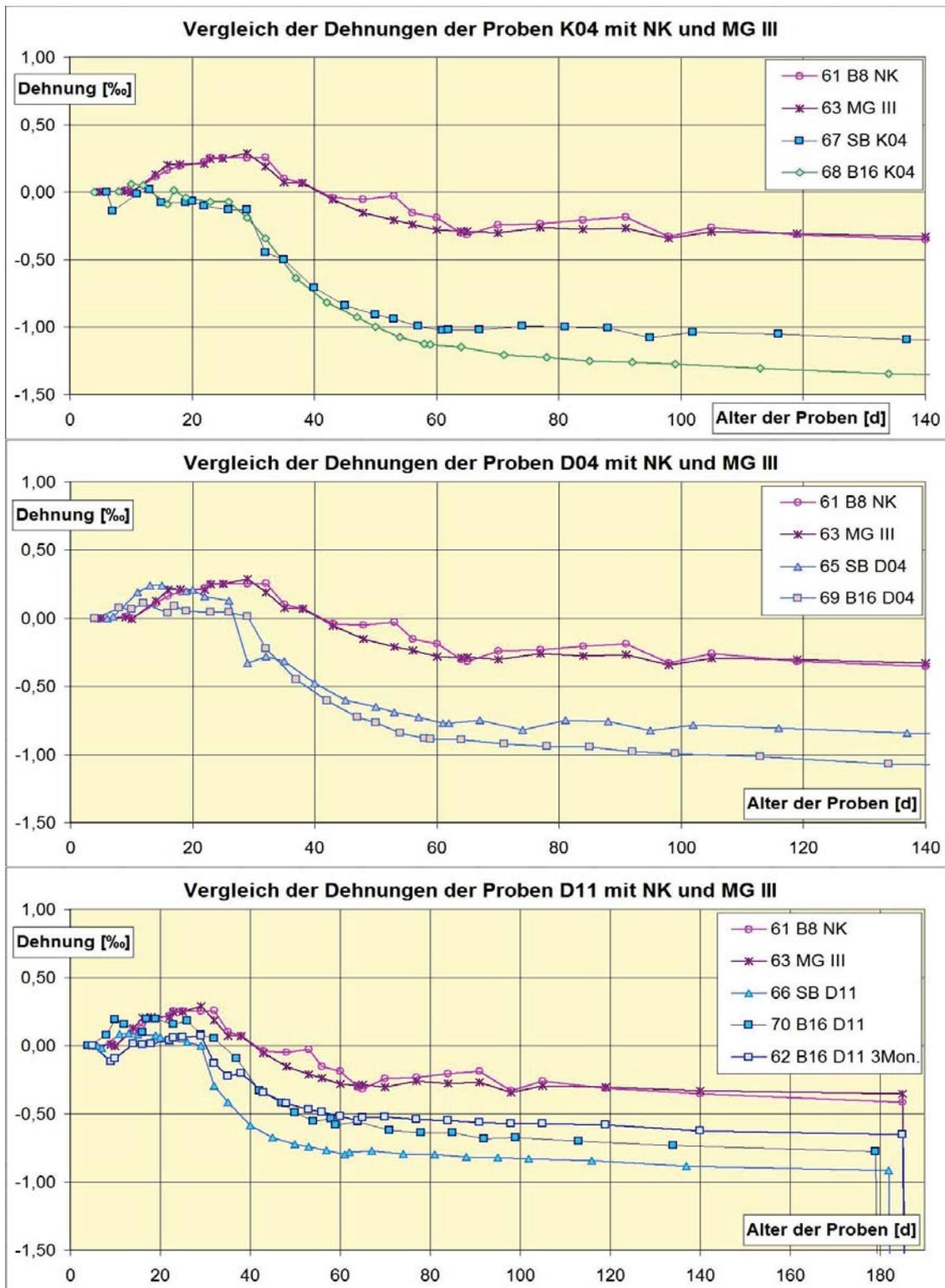
Zu Absatz 4.7.3: Schwindprüfung-Prüfung an Agglomeratbeton





Anlage 40, Blatt 2

Zu Absatz 4.7.3: Schwindprüfung-Prüfung an Agglomeratbeton





Anlage 41, Blatt 1

Zu Absatz 4.7.3: Bestimmung des E-Moduls von Agglomeratbeton

Bestimmung des E-Moduls von Agglomeratbeton

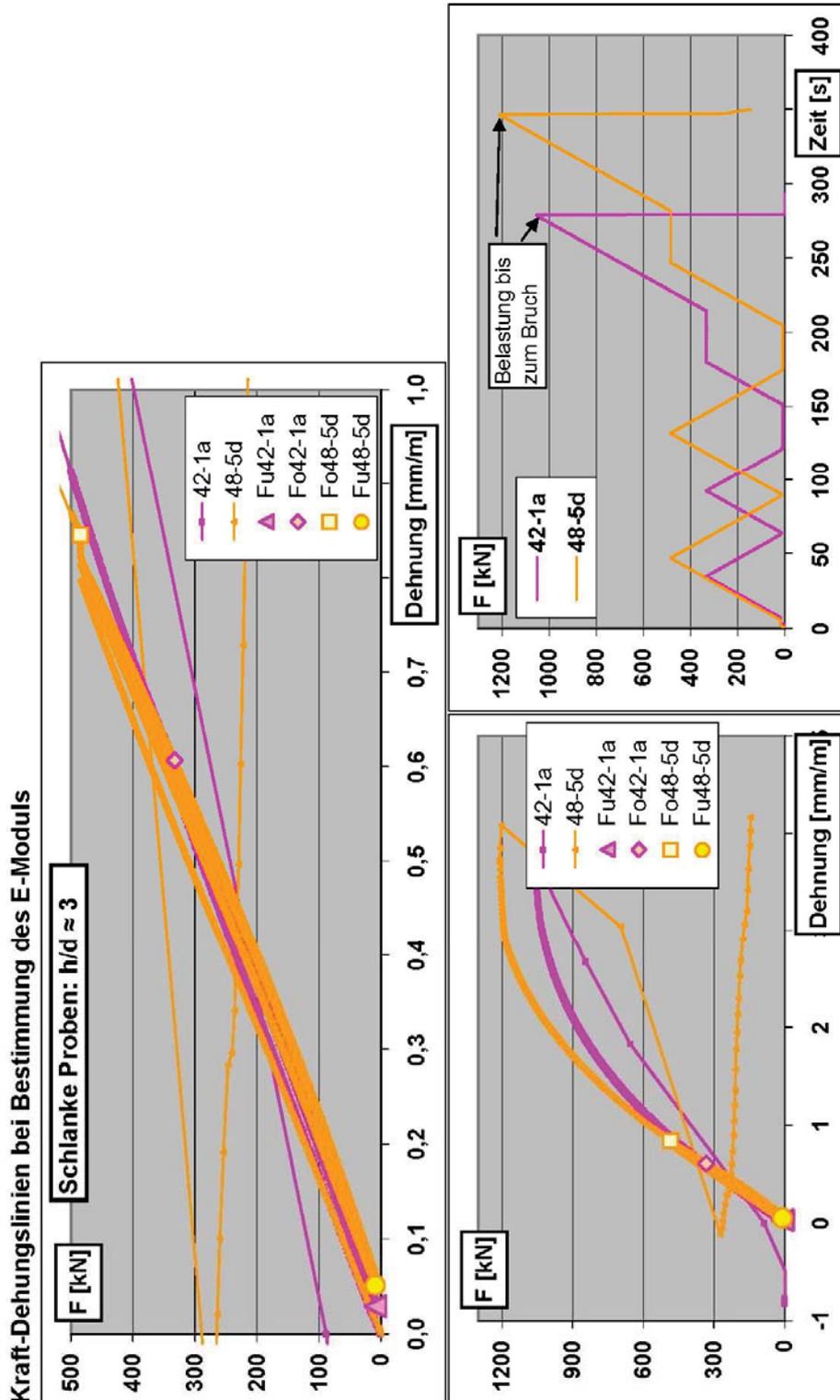
Probe Nr.	Maße [mm]			h/d	m	ρ kg/m ³	σ_u N/mm ²	σ_o N/mm ²	ϵ mm/m		F_u kN	F_o kN
	b	t	h						ϵ_u	ϵ_o		
42-1a	150,4	151,2	299,3	Soll: 3-4 1,98	14,771	2170	0,4	14,6	0,029	0,607	9,2	332,5
42-1b	96,3	91,2	291,8	3,11	5,609	2189	0,5	15,0	0,033	0,599	4,6	131,6
48-5a	99,4	90,7	298,0	3,14	5,945	2213	0,5	21,5	0,055	0,795	4,8	193,4
48-5d	150,5	149,0	295,2	1,97	14,50	2190	0,4	21,6	0,052	0,845	8,9	484,4

Angenommene Betonfestigkeit f_{ck} [N/mm ²]	Ermittelte Bruch- festigkeit f_{ck} [N/mm ²]	Bestimmung des E-Moduls		E-Modul E_b [N/mm ²]	
		Probekörper	Rezeptur	Einzel- werte	Mittel- werte
45	55,5 58,4	42-1a 42-1b	D03	24582 25511	25000
65	75,9 64,5	48-5a 48-5d	K07	28240 26723	27500
zum Vergleich: Tabellenwerte für E_{cm} (Sekantenmodul) [N/mm ²]		31900 33300 37800			



Anlage 41, Blatt 2

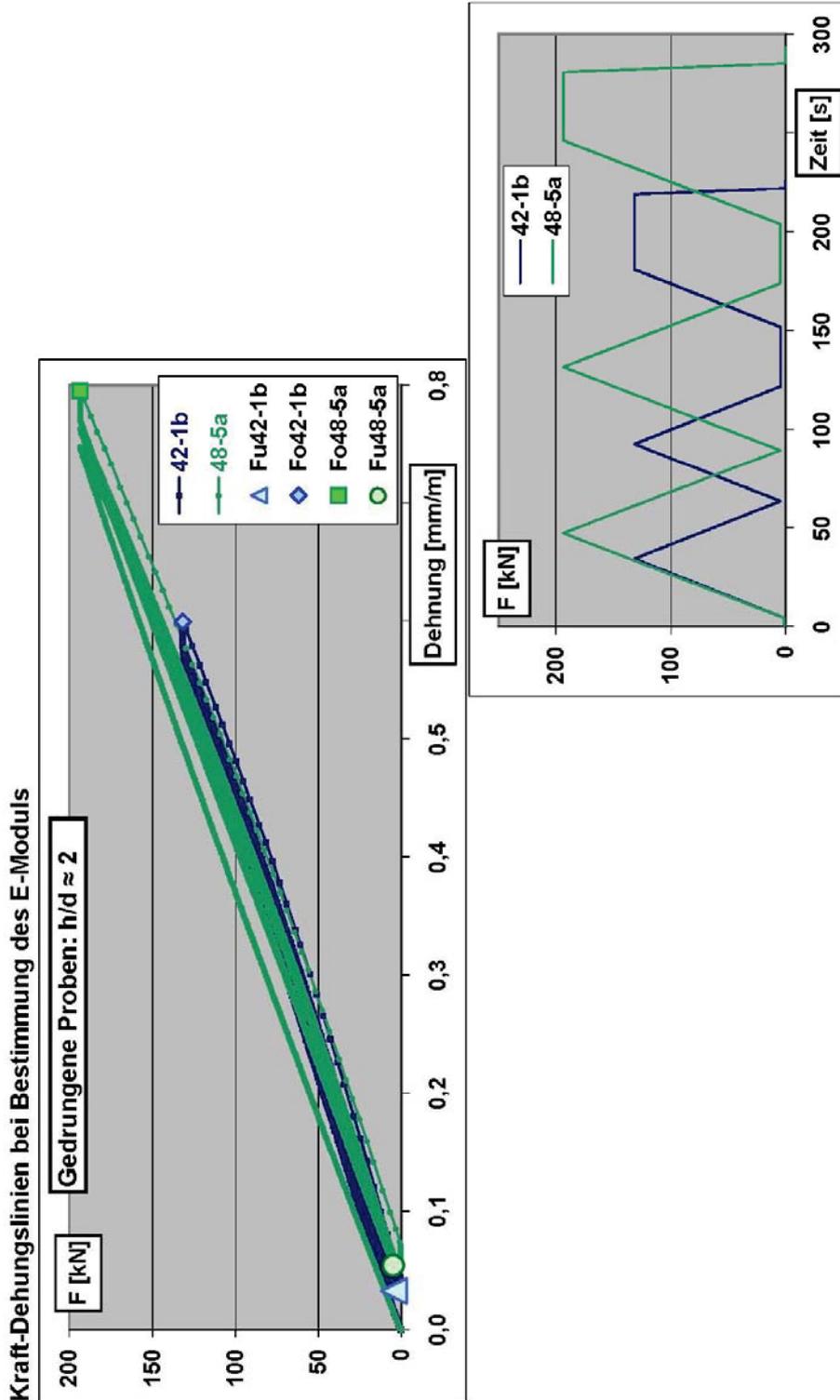
Zu Absatz 4.7.3: Bestimmung des E-Moduls von Agglomeratbeton





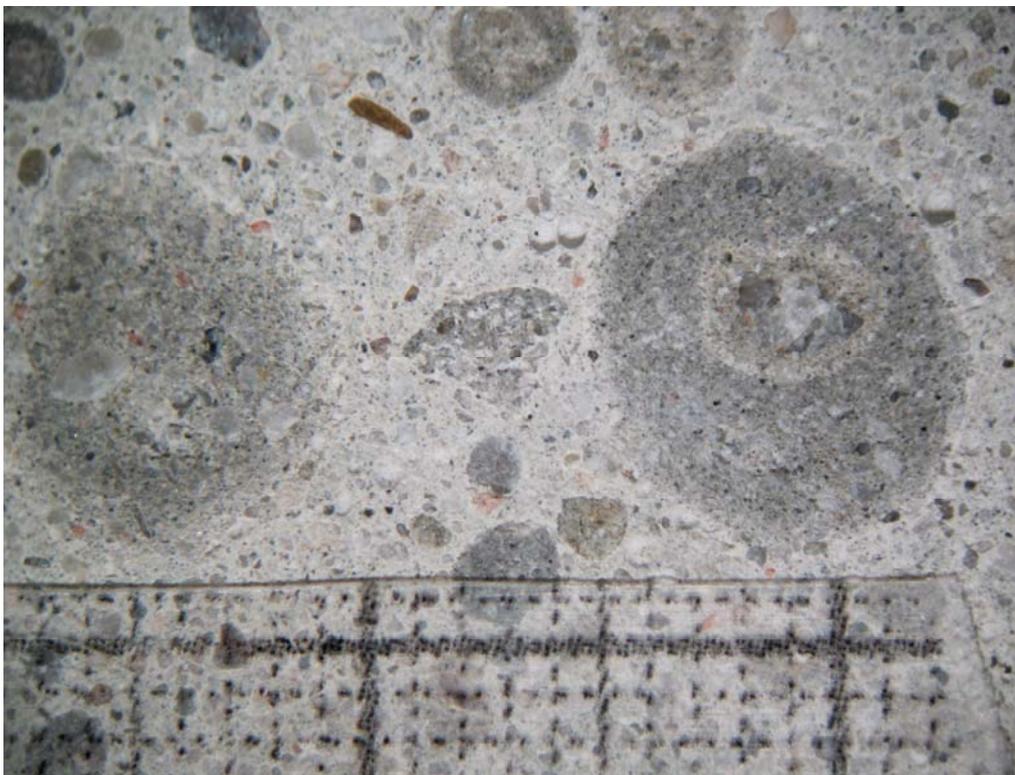
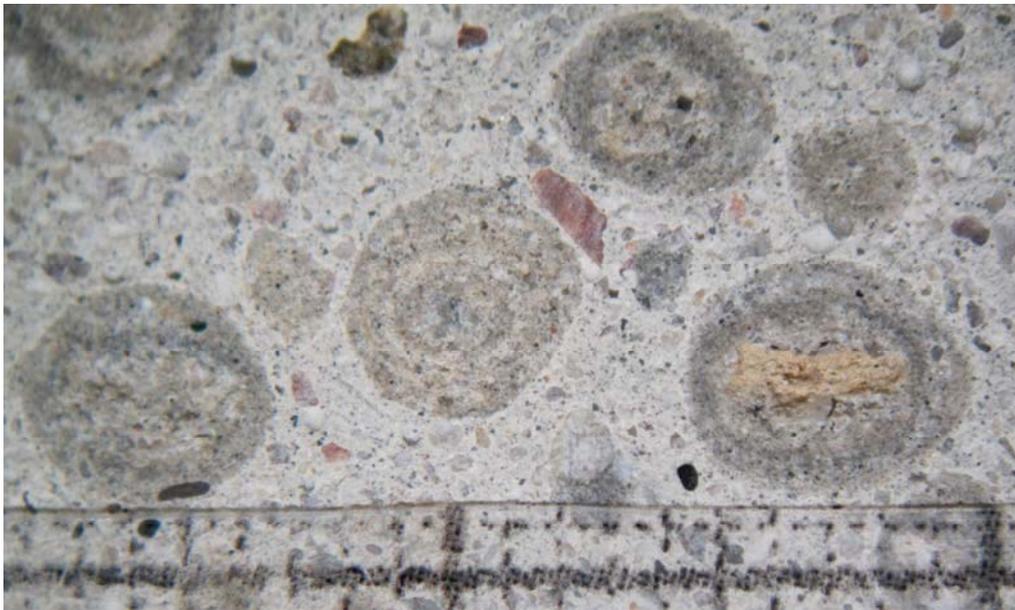
Anlage 41, Blatt 3

Zu Absatz 4.7.3: Bestimmung des E-Moduls von Agglomeratbeton



Anlage 42, Blatt 1

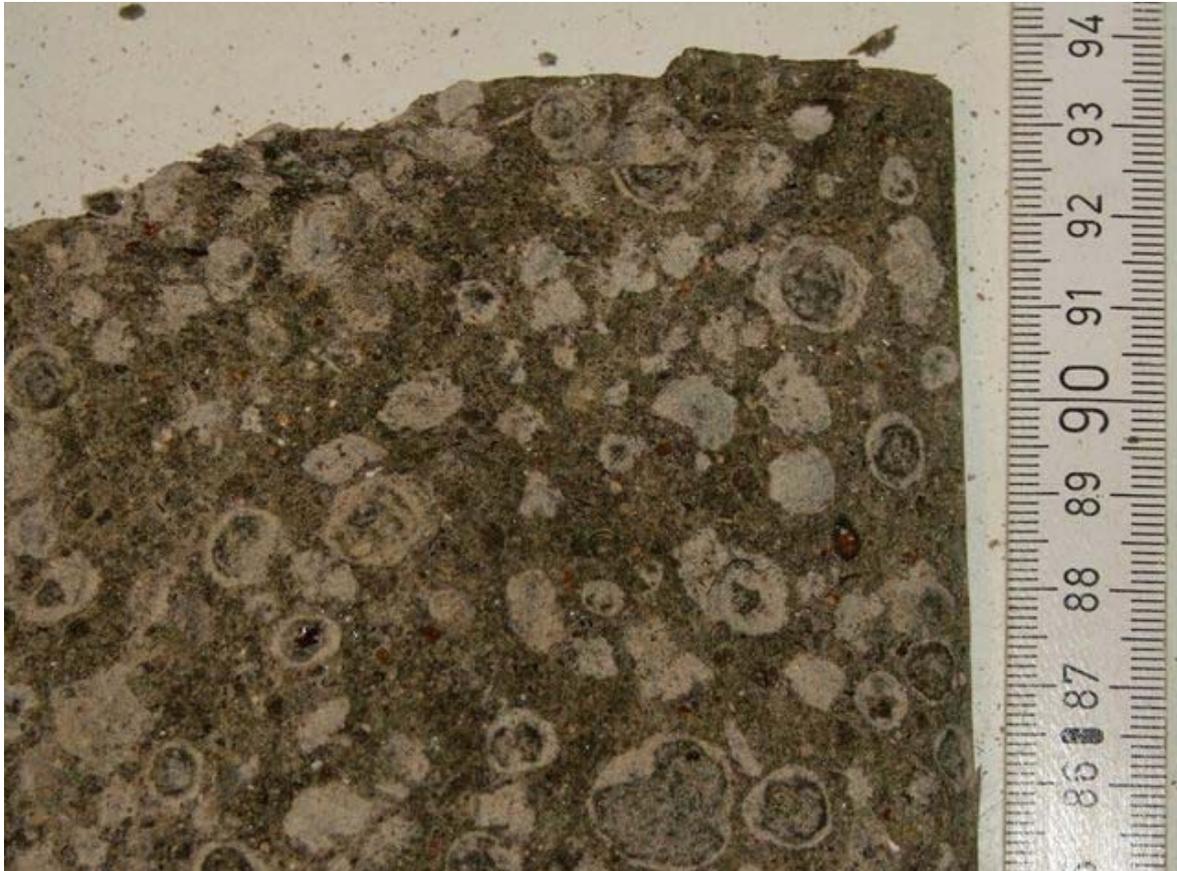
Zu Absatz 4.7.3: Mikroskopieaufnahmen an Agglomeratbetonschnitten (vollständige Verwachsung zwischen Agglomeraten und umgebender Betonmatrix)





Anlage 42, Blatt 2

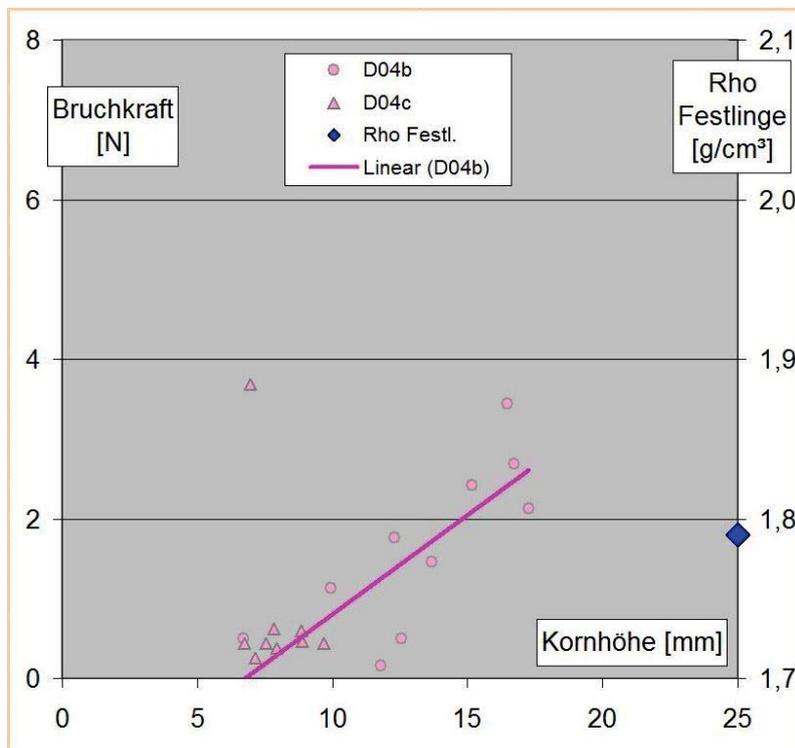
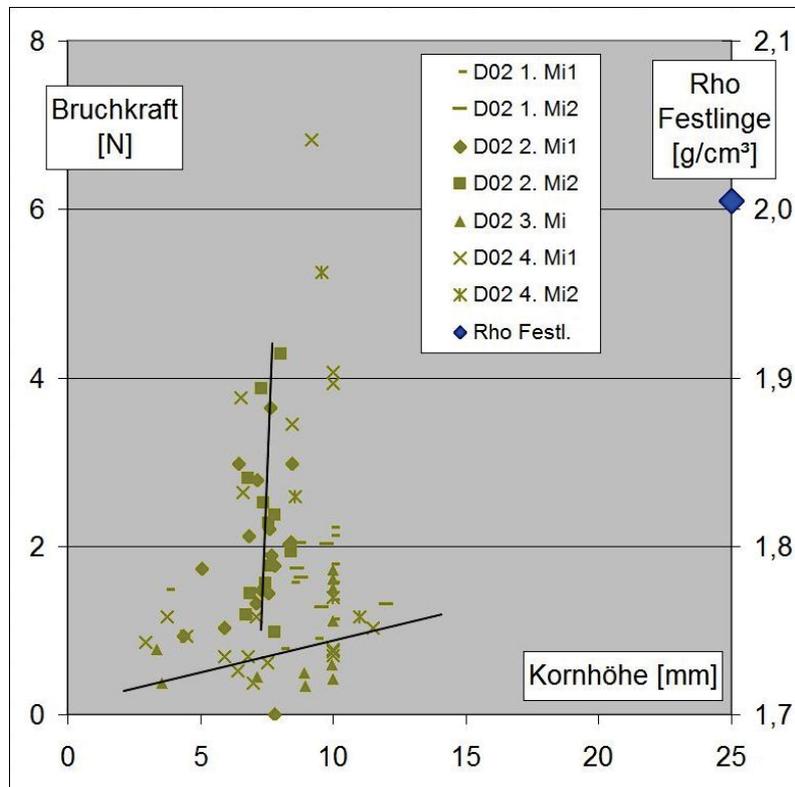
Zu Absatz 4.7.3: Detailaufnahme an Agglomeratbeton nach Druckprüfung





Anlage 43, Blatt 1

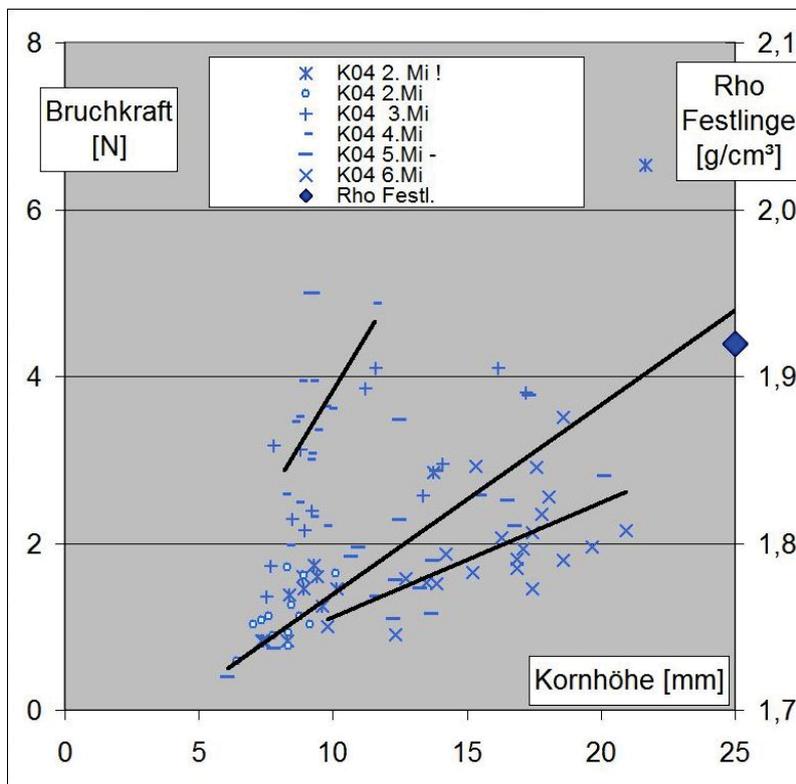
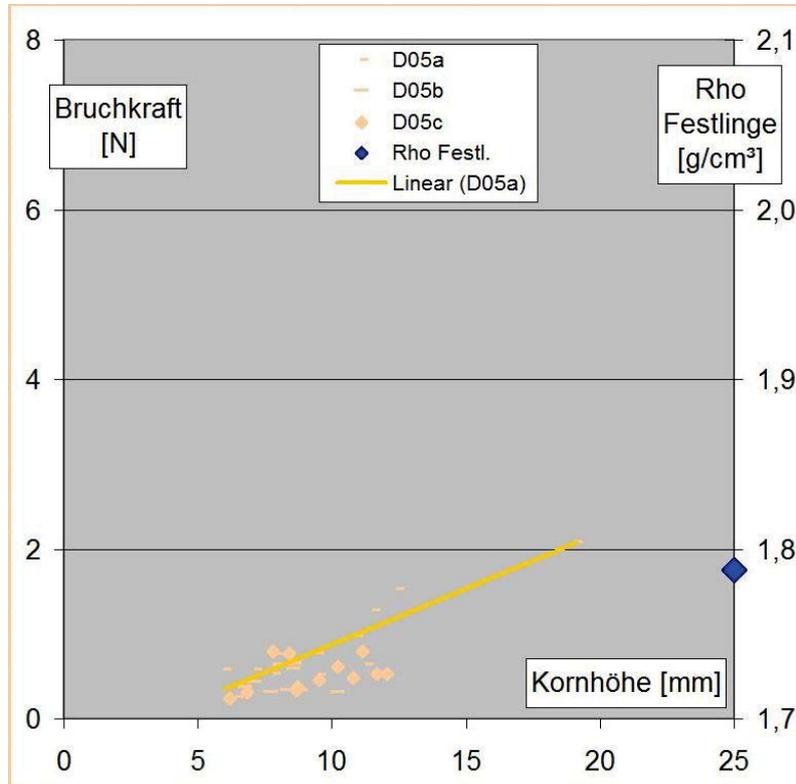
Zu Absatz 5.3: Quervergleich Bruchkraft Frischlinge – Rohdichte Festlinge





Anlage 43, Blatt 2

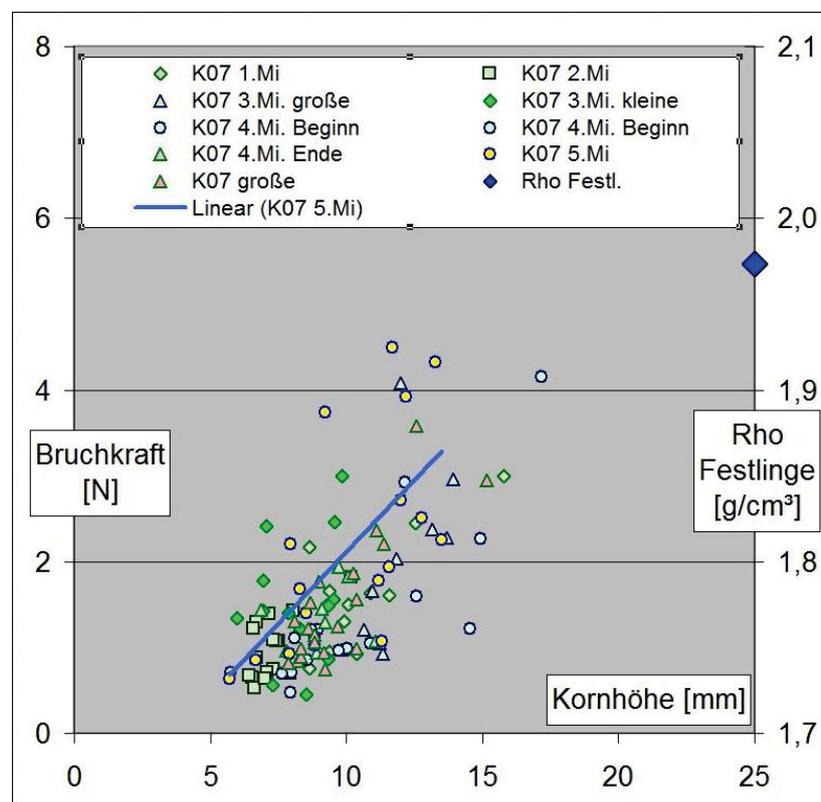
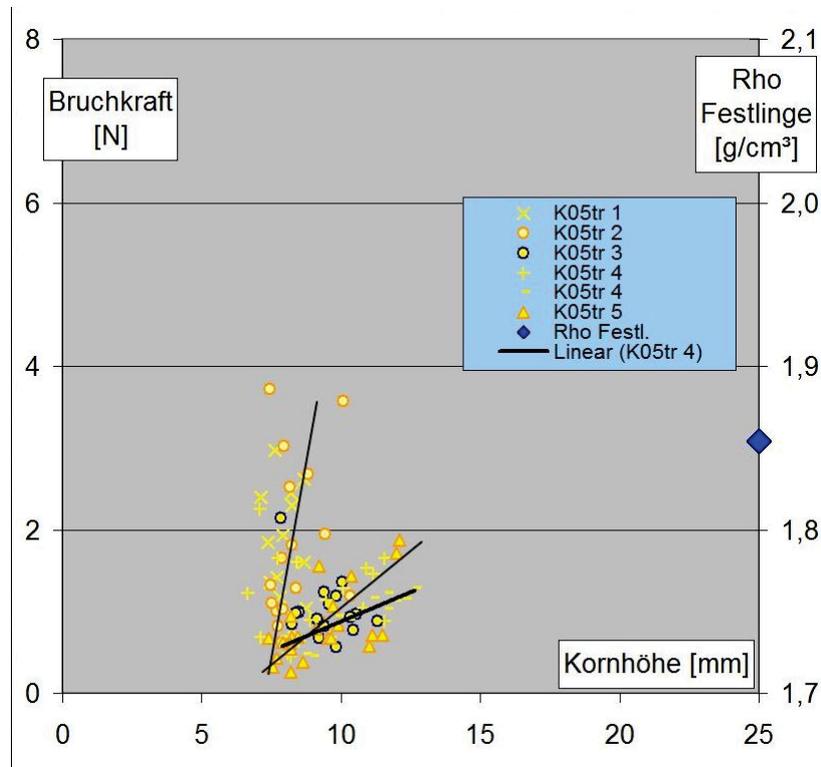
Zu Absatz 5.3: Quervergleich Bruchkraft Frischlinge – Rohdichte Festlinge





Anlage 43, Blatt 3

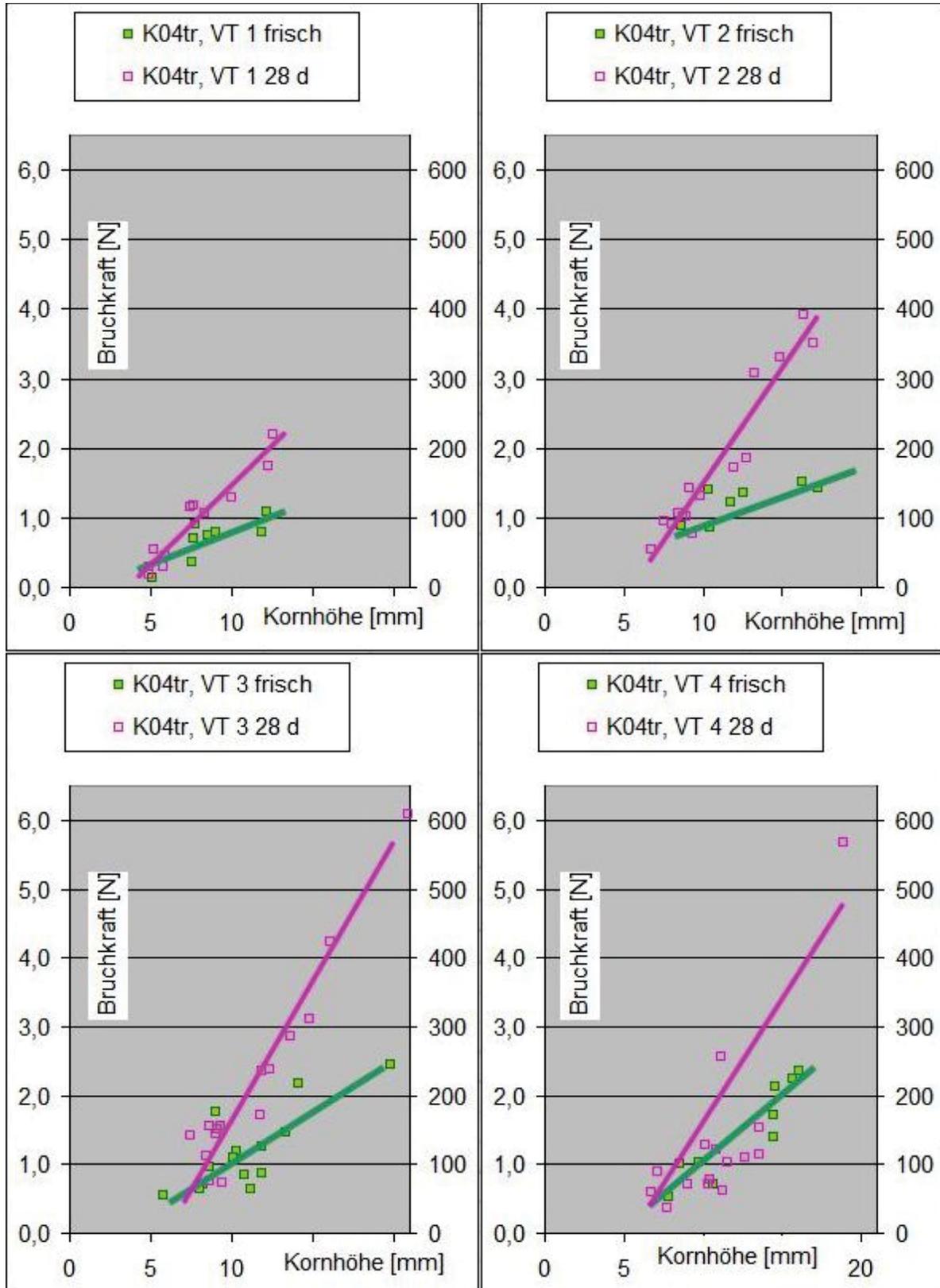
Zu Absatz 5.3: Quervergleich Bruchkraft Frischlinge – Rohdichte Festlinge





Anlage 44, Blatt 1

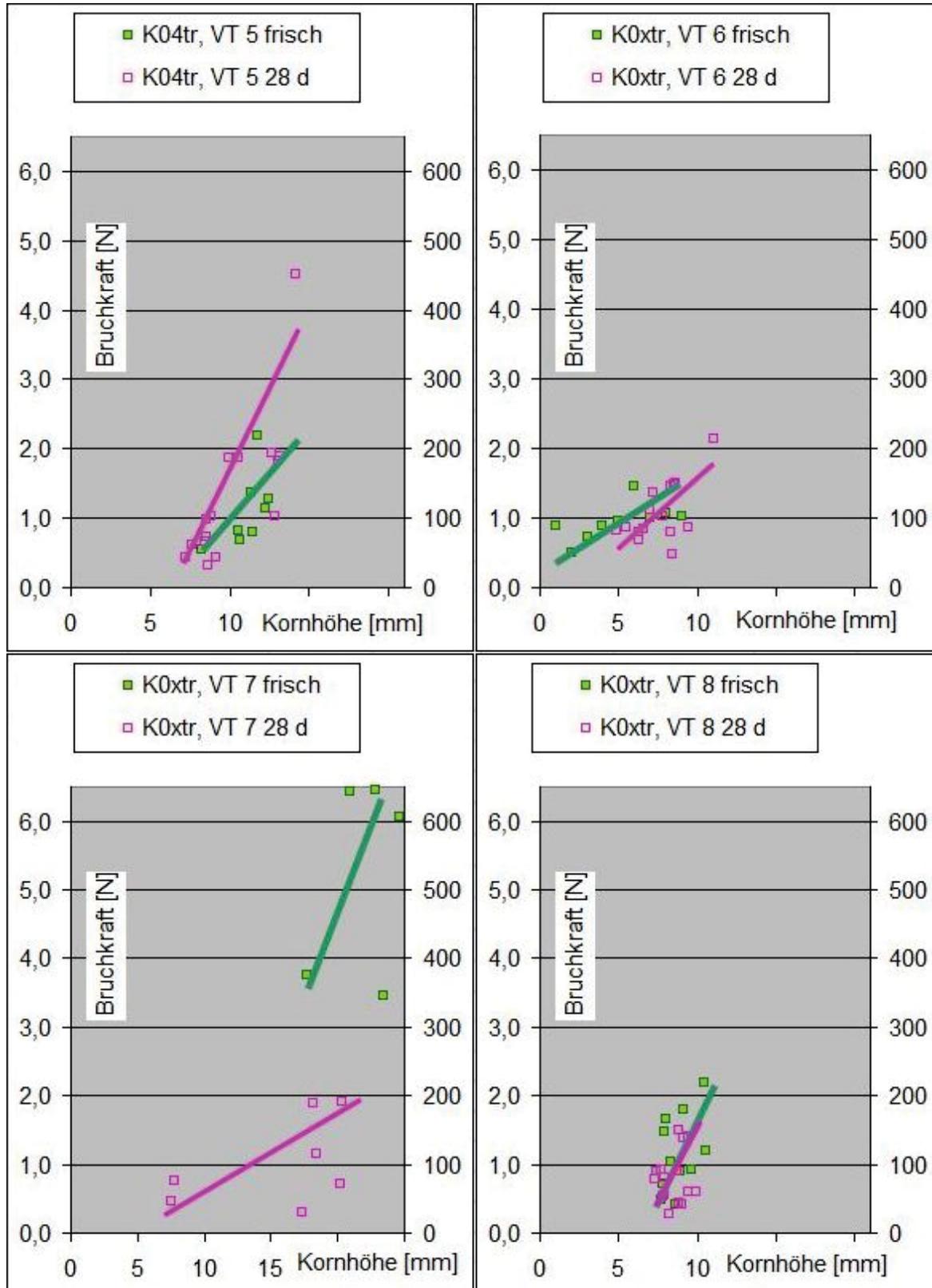
Zu Absatz 5.3: Quervergleich Bruchkraft Frischlinge - Bruchkraft Festlinge





Anlage 44, Blatt 2

Zu Absatz 5.3: Quervergleich Bruchkraft Frischlinge - Bruchkraft Festlinge





Lebenslauf

Name: Dose

Vorname: Björn-Axel

Geburtsdatum: 02.04.1970

Geburtsort, Land: Rostock, Deutschland

09/1976 - 08/1986 Allgemeinbildende Polytechnische Oberschulen in Rostock und Wismar sowie Sportschule in Berlin

09/1986 - 08/1988 Erweiterte Oberschule in Wismar, Abschluss: Abitur

09/1988 - 05/1990 Wehrdienst an Flottenschule Stralsund, Ausbildung zum Maschinist und Schiffselektriker

10/1990 - 02/1996 Studium „Bauingenieurwesen und Umwelttechnik“ an der Technischen Universität Hamburg Harburg; Vertiefung in Stahlbau und Massivbau

04/1996 - 09/1999 Setzpfandt und Lindschulte GmbH Rostock, Tragwerksplaner und Statiker im Konstruktiven Ingenieurbau

09/1999 - 05/2005 Dr. Herold AG & Co. KG, Beratende Ingenieure, Bauüberwacher im konstruktiven Ingenieurbau und Straßenbau

07/2005 - 09/2005 Intensivsprachkurs in Vancouver, Kanada

12/2005 - 02/2007 DSI, DYWIDAG Systems International, Engineer for product development in stay cables, post tensioning and ground anchor systems

03/2007 - 10/2007 Bauhaus Universität Weimar, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strukturmechanik

10/2007 - 01/2012 Technische Universität Hamburg-Harburg, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Angewandte Bautechnik

04/2012 - heute Landesbetrieb für Straßen, Brücken und Gewässer der Freien und Hansestadt Hamburg; Projektingenieur für konstruktiven Ingenieurbau





