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 Maschinentechnik 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.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 Gesteinskörnung 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 Gesteinskörnung 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 Gesteinskörnung 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 Machbarkeits-studien 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).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- 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 rauhe Oberfläche.
  → Die Rauhigkeit 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.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 gewinnnen (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?

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 verfahrentechnische Optimierung verringert wird.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 Stuktur 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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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.

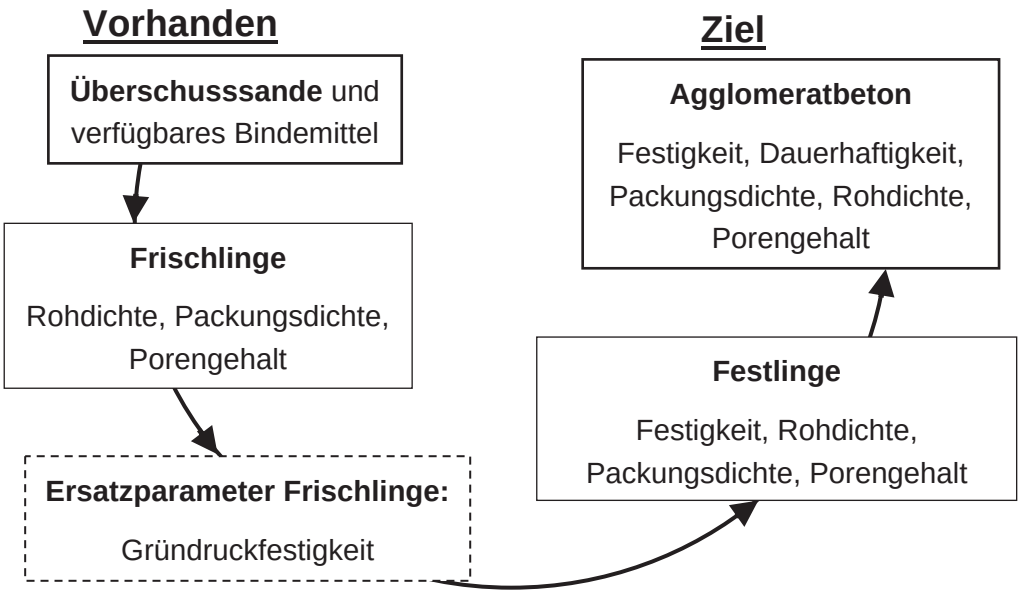

Abbildung 2.2: Argumentationsbogen von Eigenschaften der Frischlinge über die der Festlinge zum Agglomeratbeton

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 Puntke-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-Tausalzwiderstand
- Untersuchungen zu Formänderungen: Schwinden, E-Modul

Einige Probekörper wurden zur Langzeitbeobachtung unter freier Bewitterung ausgelagert.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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/mm² 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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 wasserunlößlich 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 enstehende 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 signifkanter 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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 Zementleimmatrix 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 kleinformatigen Waren ohne Belang.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 detailierter 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:

$$\Phi = \frac{V_F}{V_R} \tag{3.1}$$

$$\varepsilon = \frac{V_{Por}}{V_R} = 1 - \Phi \tag{3.2}$$

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:

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 Elipsoidform 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 Elipsoide mit einem Verhältnis von Länge zu Breite L/B und mit den Exponten 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

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

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 $d_{Füll}$ 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.

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

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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)]*

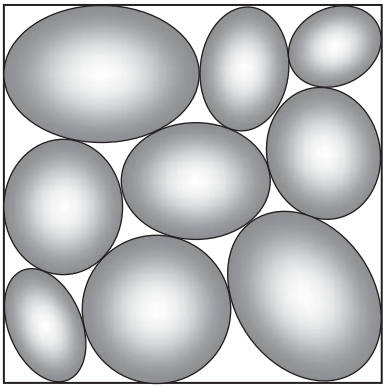

Abbildung 3.1: Packung aus Partikeln einer Kornklasse, z.B. Kies 8/16 mm
Quelle: eigene

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.

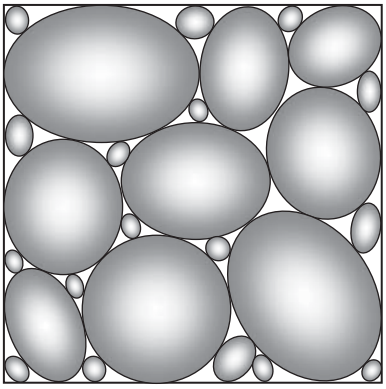

Abbildung 3.2: Bimodale Packung; Die Zwickel zwischen dem Grobkorn werden mit Partikeln einer wesentlich kleineren Kornklasse z.B. Sand 2/4 mm gefüllt.

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

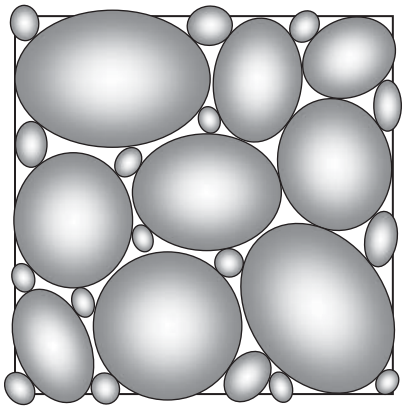

Abbildung 3.3: Kleine Körner sind um ca. 10 % gegenüber Abbildung 3.2 vergrößert, drängen die großen Körner auseinander und die Packungsdichte verringert sich

Quelle: eigene

Die Betrachtungen in *[German (1989)]* zeigen für „Ein-Korn-Gemische“ aus 3 Klassen jeweils gleichgroßer, kugeliger 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 Materialen 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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

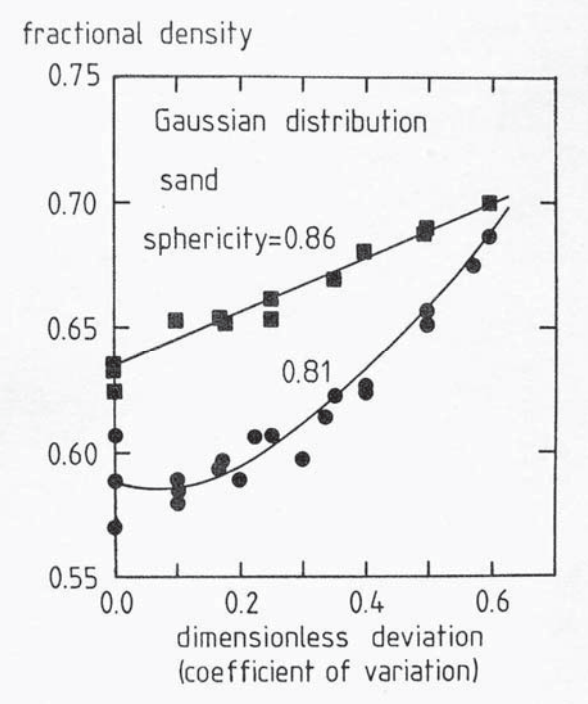

Abbildung 3.4: Packungsdichte als Funktion des Variationskoeffizienten von zwei gaußverteilten Sanden verschiedener Sphärizität (Höhere erreichbare Packungsdichte bei großem Variantionskoeffizient)

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.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

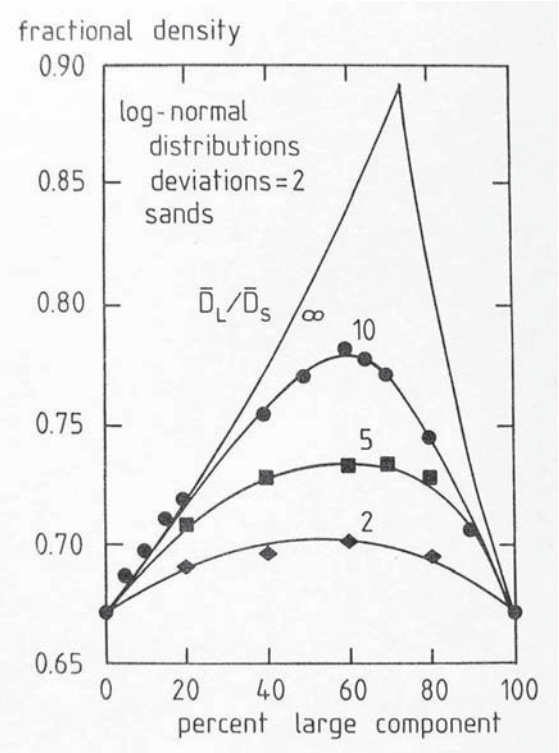

Abbildung 3.5: Abhängigkeit der erreichbaren Packungsdichte von Größenverhältnis der Mittelwerte der beteiligten Kornklassen und ihren Volumenanteilen

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.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

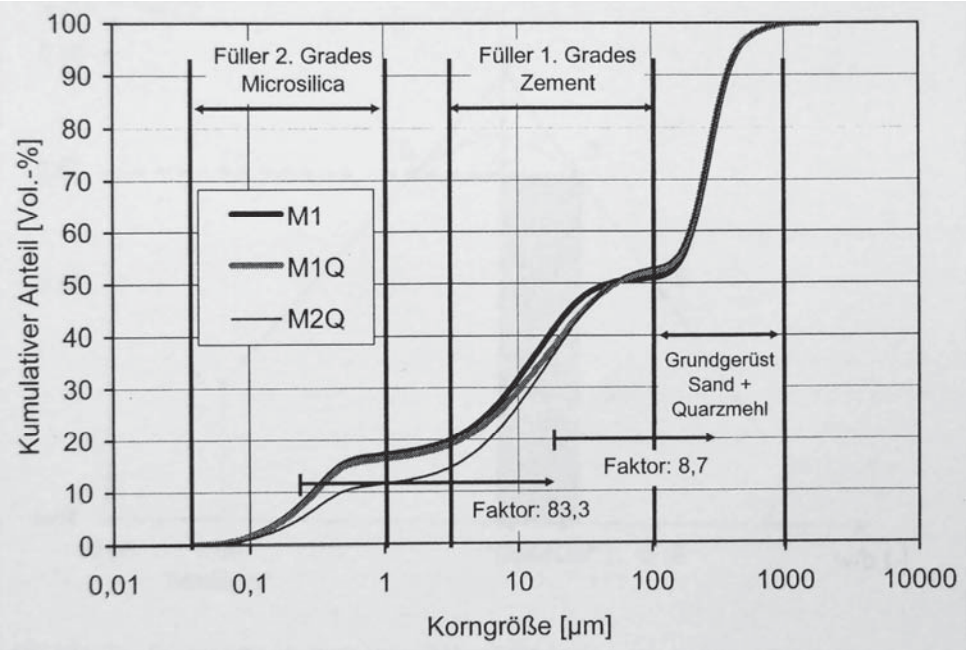

Abbildung 3.6: Optimierte Korngrößenverteilungen aus drei Komponeten für UHPC (Ultrahochfester Beton)

Quelle: [DAfStb (2008)]

3.3.2 Empirisch-numerische Berechnung von Packungsdichten in Sanden und Feinkorngemischen

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) schwimmt[1] 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)]*

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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*)

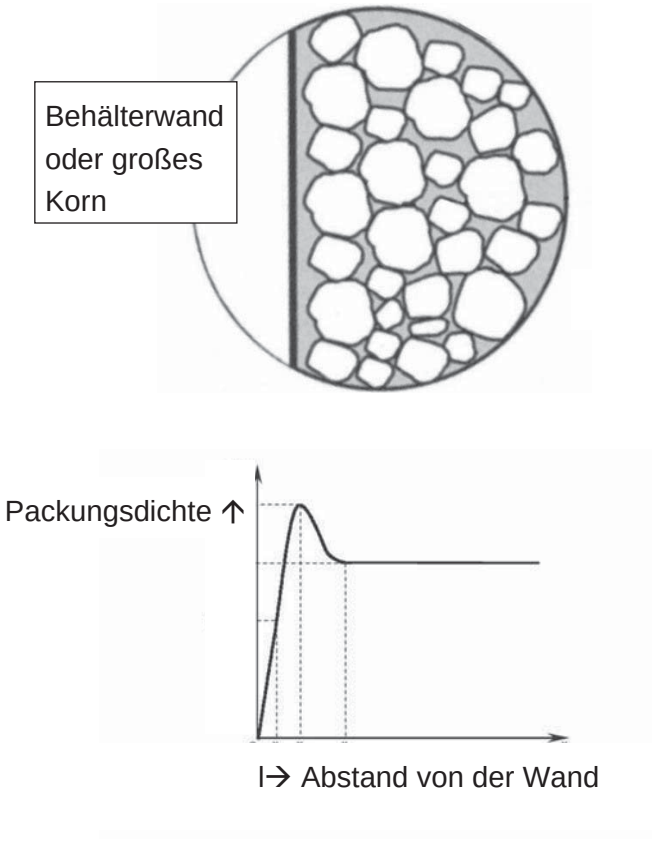

Abbildung 3.7: Skizze des Wandeffektes in Kornhaufwerken
Quellen: [Sekundärquelle Geisenhanslüke (2008): oben: Moosberg-Bustnes, Lagerblad, Forssberg; unten: Zeng, Li, Jones]

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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.

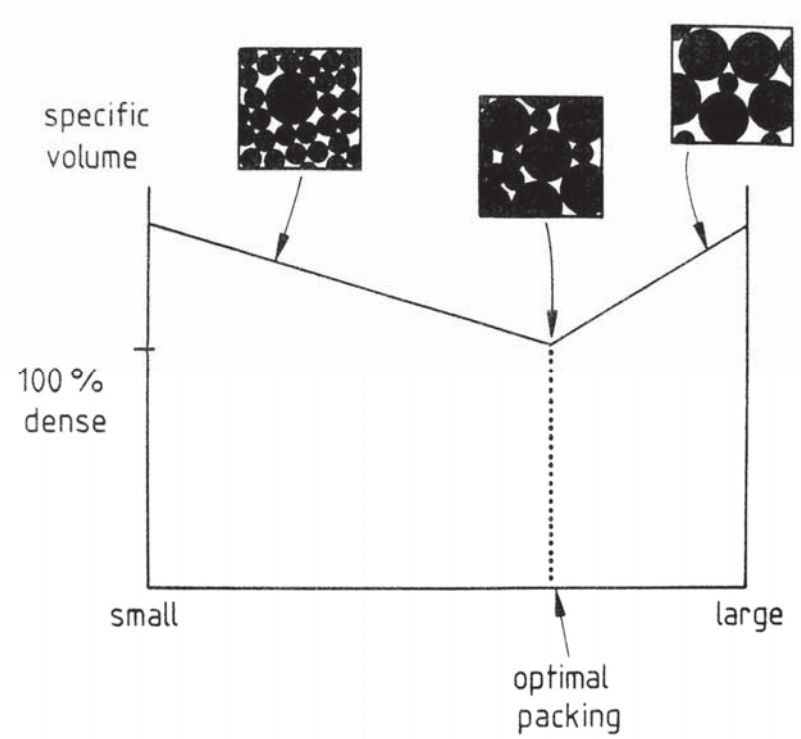

Abbildung 3.8: Prinzipskizze zum Erreichen maximaler Packungsdichte abhängig von den Anteilen zweier Kornfraktionen

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.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

3.3.3 DEM-Modellierung

Zur DEM-Modellierung (Diskrete-Elemente-Modellierung) der theoretischen Packungsdichte wurden am Institut für Feststoffverfahrtenstechnik 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“.

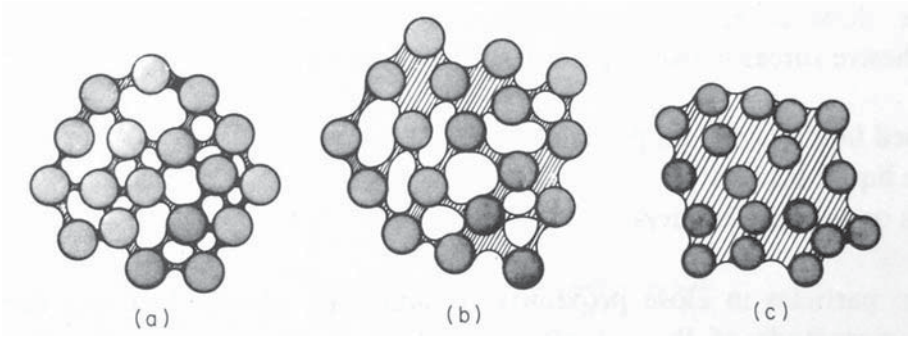

Abbildung 3.9: Kornhaufwerke bei verschiedenen Wassergehalten
Quelle: [Sherrington / Oliver (1981)]

Bei der weiteren Zufuhr von Wasser werden die Porenräume zwischen den Sandkörnern zunehmend aufgefüllt. Die Wasserbrücken verbinden sich miteinander 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“.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 µm) 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.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 gekennzeichent 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*)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 Materialen 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.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.