

# **Morphologische Charakterisierung feiner Ge- steinskörnung mittels Computertomographie zur Optimierung von Mörtelzusammensetzungen**

Beim Fachbereich  
Bauingenieurwesen der  
Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau  
zur Verleihung des akademischen Grades

**DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**DISSERTATION**

von

**Sophie Burgmann, M. Sc.**

aus Hamburg

Prüfungsvorsitz:	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. R. Jüpner
1. Berichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Breit
2. Berichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. C. Vrettos
3. Berichterstatterin:	Prof. Dr. rer. nat. B. Meng
Tag der mündlichen Prüfung:	06.12.2024

Kaiserslautern 2024

(D 386)





Sophie Burgmann

**Morphologische Charakterisierung feiner Ge-  
steinskörnung mittels Computertomographie zur  
Optimierung von Mörtelzusammensetzungen**

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (bis 31.12.2022: Technische Universität Kaiserslautern).

Die Fragestellung, inwiefern morphologische Kenngrößen von Gesteinskörnungen mittels Computertomographie ermittelt werden können und welchen Einfluss sie auf Mörtel Eigenschaften haben, ergab sich aus der Bearbeitung eines Forschungsprojektes gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) [Projektnummer 413140723].

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit für die hervorragende Betreuung, die konstruktiven fachlichen Diskussionen und die gewährten Freiräume bei der Bearbeitung der Forschungsfrage, welche maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben. Auch möchte ich mich für die Möglichkeit bedanken, zusätzlich Erfahrungen in der Lehre sammeln zu können.

Danken möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Vrettos sowie Frau Prof. Dr. rer. nat. Meng für die Übernahme der Berichterstattung sowie Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jüpner für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Für die gelungene Zusammenarbeit im Rahmen des DFG-Forschungsvorhabens und die Arbeit an gemeinsamen Veröffentlichungen möchte ich dem Team der Abteilung Bildverarbeitung des Fraunhofer Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) danken.

Meinen Kolleginnen und Kollegen vom Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen möchte ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre, die zahlreichen Diskussionen, die Unterstützung bei der Arbeit im Labor danken. Ebenfalls wäre diese Arbeit ohne die tatkräftige Unterstützung meiner wissenschaftlichen Hilfskräfte bei der Laborarbeit und der Bildbearbeitung nicht möglich gewesen. Auch ihnen gilt daher mein herzlicher Dank.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie für ihre Unterstützung und ihren Rückhalt bedanken.

Mainz, Dezember 2024

Sophie Burgmann



## Inhalt

<b>Zusammenfassung</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vi</b>
<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
<b>2 Verfahren zur automatisierten Korncharakterisierung mittels Computertomographie</b>	<b>7</b>
2.1 Grundlagen der Computertomographie und Bildbearbeitung	7
2.1.1 Funktionsweise der Röntgenröhre und Durchstrahlung der Probe	7
2.1.2 Funktionsweise des Flachbilddetektors	9
2.1.3 Rekonstruktion von Computertomographie-Aufnahmen	10
2.1.4 Artefakte	12
2.1.5 Filtern des Grauwertbildes	15
2.1.6 Schwellenwertverfahren zur Erstellung eines Binärbildes	16
2.1.7 Segmentierung von Körnern	18
2.1.8 Messungenauigkeit	22
2.1.9 Zusammenfassung und Festlegung von Parametern zum Tomographieren und zur Bildbearbeitung	25
2.2 Einflussfaktoren auf die Messungenauigkeit von CT-Aufnahmen der Gesteinskörnung	27
2.2.1 Einfluss der Voxelgröße auf die Messungenauigkeit von CT-Aufnahmen	27
2.2.1.1 Einleitung	27
2.2.1.2 Versuchsablauf	28
2.2.1.3 Materialien	28
2.2.1.4 Anfertigung von CT-Aufnahmen und Bildbearbeitung	29
2.2.1.5 Versuchsauswertung und statistische Methoden	31
2.2.1.6 Einfluss der strukturellen Auflösung auf die Bestimmung von Korngrößen	33
2.2.1.7 Bestimmung der erweiterten Messungenauigkeit	37
2.2.1.8 Diskussion der Versuchsergebnisse	41
2.2.2 Einfluss der Probenpräparation auf die Messungenauigkeit von CT-Aufnahmen	41
2.2.2.1 Einleitung	41

2.2.2.2	Materialien	42
2.2.2.3	Anfertigung von CT-Aufnahmen und Bildbearbeitung	43
2.2.2.4	Versuchsauswertung und statistische Methoden	44
2.2.2.5	Ergebnisse und Diskussion	45
2.2.3	Zusammenfassung und Fazit	48
2.3	Entwicklung eines Verfahrens zur automatisierten Kornsegmentierung	49
2.3.1	Einleitung	49
2.3.2	Materialien	49
2.3.3	Anfertigung von CT-Aufnahmen und Bildbearbeitung	50
2.3.4	Versuchsablauf und statistische Methoden	51
2.3.5	Ergebnisse und Diskussion	54
2.4	Zusammenfassung und Festlegung eines Konzepts zur automatisierten Korncharakterisierung mittels CT	61
<b>3</b>	<b>Morphologische Charakterisierung der Gesteinskörnung mittels CT</b>	<b>63</b>
3.1	Grundlagen der morphologischen Charakterisierung von Gesteinskörnungen anhand von CT-Aufnahmen	63
3.1.1	Einleitung und Begriffsdefinition	63
3.1.2	Digitale Darstellung eines Korns	64
3.1.3	Korngröße	64
3.1.4	Siebgröße	66
3.1.5	Kornform	67
3.1.6	Eckigkeit	72
3.1.7	Rauigkeit	74
3.1.8	Zusammenfassung und Fazit	75
3.2	Auswahl geeigneter morphologischer Kenngrößen für Gesteinskörnungsschüttungen	75
3.2.1	Einleitung	75
3.2.2	Materialien	76
3.2.3	Anfertigung von CT-Aufnahmen und Bildbearbeitung	77
3.2.4	Bestimmung von morphologischen Parametern zur Charakterisierung von Gesteinskörnungsschüttungen	79
3.2.5	Versuchsablauf und statistische Methoden	80
3.2.6	Ergebnisse und Diskussion	81
3.3	Zusammenfassung und Festlegung morphologischer Kenngrößen zur Charakterisierung von Schüttungen	84
<b>4</b>	<b>Einfluss morphologischer Kenngrößen auf Mörtel­eigenschaften</b>	<b>86</b>
4.1	Grundlagen zum Einfluss morphologischer Eigenschaften der Gesteinskörnung auf Mörtel- und Betoneigenschaften	86



4.1.1	Packung der Gesteinskörnung _____	86
4.1.1.1	Grundlagen der Packungsdichte _____	86
4.1.1.2	Einfluss morphologischer Parameter auf die Packungsdichte _____	87
4.1.2	Konsistenz von Mörtel und Beton _____	88
4.1.2.1	Grundlagen der Konsistenz und Rheologie von Mörtel und Beton _____	88
4.1.2.2	Bestimmung rheologischer Kenngrößen _____	92
4.1.2.3	Ein-Punkt-Versuche zur Bestimmung der Konsistenz _____	92
4.1.2.4	Einfluss morphologischer Parameter auf die Konsistenz _____	93
4.1.3	Mechanische Eigenschaften von Mörtel und Beton _____	98
4.1.3.1	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften _____	98
4.1.3.2	Einfluss morphologischer Parameter auf die mechanischen Eigenschaften _____	100
4.1.4	Zusammenfassung und Fazit _____	102
4.2	Analyse des Einflusses morphologischer Kenngrößen auf Mörteleigenschaften _____	103
4.2.1	Einleitung _____	103
4.2.2	Statistische Versuchsplanung _____	104
4.2.3	Materialien _____	106
4.2.3.1	Gesteinskörnung _____	106
4.2.3.2	Zement und Kalksteinmehl _____	109
4.2.3.3	Mörtelzusammensetzung _____	110
4.2.4	Versuchsablauf und statistische Methoden _____	110
4.2.4.1	Bestimmung von Frischmörteleigenschaften _____	110
4.2.4.2	Bestimmung von Festmörteleigenschaften _____	113
4.2.4.3	Statistische Methoden _____	115
4.2.5	Ergebnisse und Diskussion _____	118
4.2.5.1	Einfluss morphologischer Eigenschaften auf die dynamische Viskosität _____	118
4.2.5.2	Einfluss morphologischer Eigenschaften auf die Fließgrenze _____	123
4.2.5.3	Einfluss morphologischer Eigenschaften auf Setzmaß und Setzfließmaß _____	127
4.2.5.4	Einfluss morphologischer Eigenschaften auf das Ausbreitmaß _____	131
4.2.5.5	Einfluss morphologischer Eigenschaften auf die Druckfestigkeit _____	134
4.2.5.6	Einfluss morphologischer Eigenschaften auf die Biegezugfestigkeit _____	136
4.2.5.7	Einfluss morphologischer Eigenschaften auf den dynamischen E- Modul _____	138
4.2.6	Zusammenfassung und Fazit _____	140
4.3	Verifikation der Versuchsergebnisse und Optimierung der Zusammensetzung von Sieblinien mit Brechsand _____	143
4.3.1	Einleitung _____	143

4.3.2	Materialien	144
4.3.2.1	Gesteinskörnung	144
4.3.2.2	Zement und Kalksteinmehl	145
4.3.2.3	Mörtelzusammensetzung	145
4.3.3	Versuchsplanung und Optimierung der Zusammensetzung von Sieblinien aus natürlichem Sand und Brechsand	146
4.3.4	Versuchsablauf	148
4.3.5	Ergebnisse und Diskussion	148
4.3.5.1	Verifikation der Versuchsergebnisse	148
4.3.5.2	Optimierung des Anteils an Brechsand am Gesamtanteil der Gesteinskörnung	155
4.3.6	Zusammenfassung und Fazit	158
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>161</b>
5.1	Zusammenfassung	161
5.2	Fazit und Ausblick	166
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>168</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>190</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>200</b>
	<b>Anhang</b>	<b>203</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>228</b>

## Zusammenfassung

Ressourcenschonung und die Kreislaufführung von Rohstoffen stellen zwei zentrale Herausforderungen für die Beton- und Mörtelherstellung dar. Vor diesem Hintergrund bietet sich der vermehrte Einsatz von Brechsanden an, insbesondere von rezyklierten Brechsanden. Charakteristisch für diese Materialien ist ihre im Vergleich zu natürlichem Sand abweichende Kornform und Eckigkeit. Diese zwei morphologischen Eigenschaften haben wiederum Einfluss auf die Eigenschaften von Mörtel und Beton. Ziele dieser Arbeit sind die morphologische Charakterisierung von Gesteinskörnungen mittels Computertomographie sowie die Steuerung von Mörtel Eigenschaften anhand dieser morphologischen Kenngrößen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird in einem ersten Schritt unter Berücksichtigung einer tolerablen Messungengenauigkeit ein Verfahrensablauf zum Tomographieren von feinen Gesteinskörnungsproben mit Korngrößen kleiner 2 mm als lose Schüttung entwickelt. Als Verfahren zur Trennung von sich berührenden Körnern im Zuge der Bildbearbeitung kommt die adaptive H-Extrematransformation in Kombination mit Wasserscheidentransformation zum Einsatz. Es zeigt sich, dass die automatisierte Vorgabe der vom Nutzer vorzugebenden Eingangsgrößen für dieses Verfahren anhand der Schüttdichte möglich ist. Basierend auf diesem automatisierten Verfahrensablauf kann ein Set aus vier Kenngrößen in einem weiteren Schritt zur morphologischen Charakterisierung von Schüttungen identifiziert werden, die sowohl die Ausprägung als auch Verteilung von Kornform und Eckigkeit innerhalb der Schüttung beschreiben. Die morphologische Charakterisierung von zehn Schüttungen natürlichen und rezyklierten Ursprungs und unterschiedlicher Korngrößenzusammensetzung findet in einem folgenden Schritt Eingang in eine multiple lineare Regressionsanalyse zur Untersuchung des Einflusses dieser Kenngrößen auf Frisch- und Festmörteleigenschaften. Gegenstand der Untersuchung sind die dynamische Viskosität, Fließgrenze, Setz- und Setzfließmaß sowie Ausbreitmaß als Frischmörteleigenschaften sowie der dynamische Elastizitätsmodul, die Biegezug- und Druckfestigkeit als Festmörteleigenschaften.

Im Hinblick auf die Mörtel Eigenschaften zeigt sich ein komplexer Einfluss sowohl der Kornform als auch Eckigkeit, der mit anderen Parametern der Mörtelzusammensetzung wie dem Verhältnis von Wasser zu Zement, dem Massenverhältnis von Bindemittelleim zu Gesteinskörnung sowie der Korngrößenzusammensetzung interagiert. Eine erhöhte Länglichkeit von Körnern kann sowohl zu einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit führen, als auch zur Steigerung des Entmischungsrisikos. Im Hinblick auf den Einsatz von Brechsand kann eine Verringerung der Eckigkeit bedingt durch den Aufbereitungsprozess eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit ermöglichen, während eine erhöhte Eckigkeit zu einer Steigerung von Biegezug- und Druckfestigkeit führen. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse dienen als Grundlage für die Optimierung von Mörtelzusammensetzungen mit erhöhtem Brechsandanteil. Auch wenn die Vorgaben hinsichtlich der angestrebten Druckfestigkeit nicht vollumfänglich eingehalten werden können, zeigt sich, dass die Berücksichtigung der Auswirkungen morphologischer Eigenschaften der Gesteinskörnung zu einer Erhöhung des Brechsandanteils beitragen kann.

## **Abstract**

Conservation of natural resources as well as cycle management of raw materials are two major challenges of concrete and mortar production. The increasing use of crushed sands, especially recycled crushed sands, could be an approach for solving these problems. A characteristic property for these materials is their deviating shape and angularity in comparison to natural sand. These morphological properties have in turn an influence on the properties of mortar and concrete. Aims of this study are therefore the morphological characterization of aggregates using micro-computed tomography and the control of mortar properties using these morphological characteristics.

In a first step an imaging procedure for packed beds of fine aggregates with particle size below 2 mm is developed considering an appropriate measurement accuracy. For separating touching particles during image processing adaptive h-extrema transform in combination with watershed transform is used. Results indicate that an automatic specification of user-defined input parameters for h-extrema transform is possible based on packing density. Based on this automated process flow, a set of four parameters is identified for morphological characterization of bulk materials taking into account the strength as well as the distribution of shape and angularity features within the sample. The morphological characterization of ten natural or recycled aggregate samples with varying particle size distribution are the input for a multiple linear regression analysis to examine the influence of these characteristics on fresh and hardened mortar properties. Fresh mortar properties are characterized by dynamic viscosity, yield stress, slump, slump flow, and flow table test while hardened mortar properties are characterized by dynamic modulus of elasticity, bending strength, and compressive strength.

With respect to mortar properties results show a complex influence of shape and angularity that interacts with other properties of the mortar composition like the mass ratio of water to cement, the mass ratio of binder to aggregates, and the particle sieve size distribution. While an increasing elongation of particles favours a better workability simultaneously the risk of segregation increases. With respect to the use of increasing amounts of crushed sands a reduction of angularity while processing the material could result in a better workability. At the same time an increased angularity of particles results in increased bending and compressive strength. The results of regression analysis are used for optimizing mortar compositions with increased amounts of crushed sands. Although specifications with respect to compressive strength are not fully met the experimental results show that the consideration of morphological properties of aggregates can contribute to an increase in recycled fines content.

## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

### Lateinische Großbuchstaben

$A$	Scherfläche [m <sup>2</sup> ]
$A_{BG}$	Eckigkeit nach Bullard und Garboczi [-]
$A_{ED}$	Flächeninhalt der Kornprojektion nach sechsfacher Anwendung von Erosion und Dilation [m <sup>2</sup> ]
$A_{GB}$	Eckigkeit nach Garboczi und Bullard [-]
$A_{HO}$	Eckigkeit nach Hayakawa und Oguchi [-]
$A_{Korn}$	Flächeninhalt einer Kornprojektion [m <sup>2</sup> ]
$A_{ZW}$	Eckigkeit nach Zhao und Wang [-]
$A_c$	Belastete Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
$A_n$	Flächeninhalt einer Dreiecksfläche, die Teil einer Kornecke ist [m <sup>2</sup> ]
$AT_{2D}$	Eckigkeit und Rauigkeit nach Zhang, Huang et al. im Zweidimensionalen [-]
$AT_{3D}$	Eckigkeit und Rauigkeit nach Zhang, Huang et al. im Dreidimensionalen [-]
$C_L$	Korrekturfaktor [-]
$D_i$	Obere Siebgröße einer Kornklasse [mm]
$E$	Elastizitätsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]
$E_c$	Fließkoeffizient [s]
$E_{dyn}$	Dynamischer E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
$F$	Kraft [N]
$Fl$	Plattigkeitskennzahl [%]
$I$	Intensität der Röntgenstrahlung [W/m <sup>2</sup> ]
$I_0$	Anfangsintensität der Röntgenstrahlung [W/m <sup>2</sup> ]
$K$	Mittlere Krümmung bestimmt über die Kornoberfläche [1/m]
$K_{Kugel}$	Krümmung der größten innerhalb des Korns liegenden Kugel [1/m]
$K_{max}$	Maximale Krümmung eines Punktes auf der Kornoberfläche [1/m]
$K_{min}$	Minimale Krümmung eines Punktes auf der Kornoberfläche [1/m]
$LL_D$	Länglichkeit nach Denis, Barat et al. [-]
$LL_J$	Länglichkeit nach Janke [-]

$LL_{SF}$	Länglichkeit nach Sneed und Folk [-]
$LL_Z$	Länglichkeit nach Zingg [-]
$N$	Drehzahl [U/min]
$O$	Oberfläche [m <sup>2</sup> ]
$O_{\text{Ellipsoid}}$	Oberfläche eines Ellipsoids dessen Halbachsen den halben Abmessungen $l$ , $b$ und $d$ des Kornes entsprechen [m <sup>2</sup> ]
$O_{\text{Konvex}}$	Oberfläche der konvexen Hülle eines Kornes [m <sup>2</sup> ]
$O_{\text{Korn}}$	Kornoberfläche [m <sup>2</sup> ]
$O_{\text{Kugel}}$	Oberfläche einer Kugel mit einem Volumen entsprechend dem Kornvolumen [m <sup>2</sup> ]
$O_T$	Oberfläche des Tetradekaedermodells des Kornes [m <sup>2</sup> ]
$O_{T\text{-Kugel}}$	Oberfläche einer Kugel mit Volumen entsprechend des Tetradekaedermodells des Kornes [m <sup>2</sup> ]
$P$	Leistung [W]
$PL_A$	Plattigkeit nach Aschenbrenner [-]
$PL_C$	Plattigkeit nach Corey [-]
$PL_{SF}$	Plattigkeit nach Sneed und Folk [-]
$PL_W$	Plattigkeit nach Wentworth [-]
$PL_Z$	Plattigkeit nach Zingg [-]
$R$	Korrelationskoeffizient nach Pearson [-]
$R^2$	Bestimmtheitsmaß [-]
$R_{\text{min}}$	Strukturelle Auflösung einer CT-Aufnahme als Verhältnis von minimaler Korngröße zu Voxelgröße [-]
$R_s$	Verhältnis aus minimaler zu maximaler Siebgröße einer Schüttung [-]
$S$	Öffnungsweite eines Quadratmaschensiebes [mm]
$SI$	Kornformkennzahl [%]
$SP_A$	Sphärizität nach Aschenbrenner [-]
$SP_B$	Sphärizität nach Bullard und Garboczi [-]
$SP_G$	Sphärizität nach Garboczi und Bullard [-]
$SP_H$	Sphärizität nach Hofmann [-]
$SP_{HO}$	Sphärizität nach Hayakawa und Oguchi [-]
$SP_K$	Sphärizität nach Krumbein [-]
$SP_{SF}$	Sphärizität nach Sneed und Folk [-]

$SP_Q$	Sphärizität basierend auf dem Quadermodell [-]
$SP_W$	Sphärizität nach Wadell [-]
$T$	Drehmoment [Nmm]
$T_{MB}$	Rauigkeit nach Masad und Button [-]
$U_A$	Röhrenspannung [V]
$U_{cal}$	Erweiterte Messungengenauigkeit des Referenzwertes [-]
$U_{Konvex}$	Umfang der konvexen Hülle einer Kornprojektion [m]
$U_{Korn}$	Umfang einer Kornprojektion [m]
$U_{MP}$	Erweiterte Messungengenauigkeit
$V_{GK}$	Volumen einer Gesteinskörnungsprobe [m <sup>3</sup> ]
$V_{Konvex}$	Volumen der konvexen Hülle eines Kornes [m <sup>3</sup> ]
$V_{Korn}$	Kornvolumen [m <sup>3</sup> ]
$V_{Kugel}$	Kugelvolumen [m <sup>3</sup> ]
$V_M$	Volumen des Messgefäßes [m <sup>3</sup> ]
$VK_V$	Volumengewichteter Variationskoeffizient [-]
$VS$	Voxelgröße [µm]
$WA$	Wasseraufnahme [%]

### **Lateinische Kleinbuchstaben**

$a_{min}$	Mindestausbreitmaß [mm]
$b$	Kornbreite [m]
$d$	Korndicke [m]
$d_{A10}$	Ausprägung eines Merkmals bei einem prozentualen Durchgang von 10 % der Körner bezogen auf die Gesamtanzahl an Körnern
$d_{A50}$	Ausprägung eines Merkmals bei einem prozentualen Durchgang von 50 % der Körner bezogen auf die Gesamtanzahl an Körnern
$d_{A90}$	Ausprägung eines Merkmals bei einem prozentualen Durchgang von 90 % der Körner bezogen auf die Gesamtanzahl an Körnern
$d_i$	Untere Siebgröße einer Kornklasse [mm]
$d_v$	Durchmesser einer Kugel mit dem gleichen Volumen wie das Korn [m]
$d_{V10}$	Ausprägung eines Merkmals bei einem prozentualen Durchgang von 10 % der Körner bezogen auf das Gesamtvolumen der Körner
$d_{V50}$	Ausprägung eines Merkmals bei einem prozentualen Durchgang von 50 % der Körner bezogen auf das Gesamtvolumen der Körner

## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

---

$d_{V90}$	Ausprägung eines Merkmals bei einem prozentualen Durchgang von 90 % der Körner bezogen auf das Gesamtvolumen der Körner
$e$	Abstand zwischen den beiden Platten des Schermodells [m]
$f_c$	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{fi}$	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f(x,y)$	Flächenfunktion
$g$	Grauwert [-]
$h$	Dynamischer Parameter der (nicht) adaptiven H-Extrematransformation [-]
$h_{crit}$	Grenzwert für den dynamischen Parameter $h$ [-]
$k$	Statistischer Erweiterungsfaktor [-]
$l$	Kornlänge [m]
$l_g$	Längste Verbindungslinie zwischen zwei Punkten auf der Kornoberfläche [m]
$l_{Kugel}$	Kugellänge [-]
$l_m$	Durchschallungsstrecke im Mörtelprisma [m]
$l_w$	Durchschallungsstrecke im Wasser [m]
$\vec{n}$	Normalenvektor des betrachteten Punktes auf der Kornoberfläche
$p$	Signifikanzwert [-]
$r$	Radius [m]
$\vec{r}$	Vektor zwischen Volumenschwerpunkt und betrachteten Punkt auf der Kornoberfläche
$r_{ak}$	Radius der kleinsten das Korn umhüllenden Kugel [m]
$r_c$	Effektstärke nach Cohen [-]
$r_{ik}$	Radius der größten innerhalb des Kornes liegenden Kugel [m]
$s$	Teilabschnitt einer Wegstrecke [m]
$s_r$	Wiederholstandardabweichung
$sd$	Standardabweichung
$t$	Schwellenwert zur Erstellung eines Binärbildes [-]
$t_{ges}$	Gesamte gemessene Durchschallungszeit [s]
$t_m$	Durchschallungszeit einer Ultraschallwelle im Mörtelprisma [s]
$t_w$	Durchschallungszeit einer Ultraschallwelle im Wasser [s]



$u_b$	Systematische Abweichung zwischen dem Messwert und dem Referenzwert
$u_{cal}$	Messungenauigkeit, mit der das Referenzobjekt vermessen wird
$u_{drift}$	Messungenauigkeit zur Berücksichtigung von Änderungen der Form des Werkstückes seit Anfertigung der Referenzmessung
$u_p$	Messungenauigkeit aus dem Prozess des Tomographieren des Werkstücks
$u_w$	Messungenauigkeit resultierend aus dem Produktionsprozess der Werkstücke
$v$	Schergeschwindigkeit [m/s]
$v_w$	Durchschallungsgeschwindigkeit einer Ultraschallwelle in Wasser [m/s]
$x$	Wegstrecke [m]
$\bar{x}$	Mittelwert
$x_f$	Abminderungsfaktor für die Druckfestigkeit [-]

### **Griechische Buchstaben**

$\Delta$	Differenz zwischen zwei Werten
$\Theta$	Winkelbezeichnung [°]
$\Phi$	Packungsdichte [-]
$\dot{\gamma}$	Scherrate [1/s]
$\varepsilon$	Dehnung [-]
$\eta$	Dynamische Viskosität [Pa·s]
$\eta_{rel}$	Relativ gemessene dynamische Viskosität [-]
$\eta_{Otsu}$	Kriterium zur Festlegung des Schwellenwertes nach Otsu [-]
$\lambda$	Wellenlänge [m]
$\mu$	Materialspezifischer Schwächungskoeffizient [1/m]
$\rho$	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_a$	Scheinbare Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_b$	Schüttdichte [g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_R$	Festmörtelrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_A^2$	Varianz eines Merkmals innerhalb einer Schüttung bezogen auf die Anzahl an Körnern

$\sigma_B^2$	Varianz zwischen zwei durch einen Schwellenwert getrennte Gruppen von Grauwerten einer CT-Aufnahme [-]
$\sigma_T^2$	Varianz der Grauwerte einer CT-Aufnahme [-]
$\sigma_V^2$	Volumengewichtete Varianz eines Merkmals innerhalb einer Schüttung
$\tau$	Schubspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_0$	Fließgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{0,rel}$	Relativ gemessene Fließgrenze [-]

## **Abkürzungen**

BB	Rezyklierter Betonbruch
BIC	Bayessches Informationskriterium
b/gk-Wert	Massenverhältnis des Bindemittelleimanteils zum Gesteinskörnungsanteil einer Mörtelzusammensetzung
CT	Computertomographie
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
E-Modul	Elastizitätsmodul
G	Kalknatronglas
HC0	Robuste Standardfehler nach White
ITWM	Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik
$K_{\alpha,\beta}$	Charakteristische Linienspektren
MB	Rezyklierter Mauerwerksbruch
MS	Mikrodioritsplitt
Q	Quarzkies
NoS	Normsand
SA	Rheinsand
S	Basaltsplitt
VIF	Varianzinflationsfaktor
w/z-Wert	Wasser-Zement-Wert

# 1 Einführung

## 1.1 Motivation und Problemstellung

Die Reduktion von Treibhausgasemissionen sowie die Ressourcenschonung sind die zentralen Herausforderungen für die Herstellung von Beton [1]. Neben Kalkstein, welcher maßgeblich für die Zementproduktion erforderlich ist, werden feine und grobe Gesteinskörnungen für die Herstellung von Beton benötigt [1]. Ein durchschnittlicher Beton der Festigkeitsklassen C25/30 bis C50/60 enthält zwischen 76 M.-% und 80 M.-% Gesteinskörnung, wobei der Sandanteil zwischen 26 M.-% und 28 M.-% variiert [2]. Deutschlandweit wurden im Jahr 2019 259 Mio.t Tonnen Kiese und Sande abgebaut, wovon allein 48,3 % für die Herstellung von Beton verwendet wurden [3]. Auch weltweit stellt der Abbau von Gesteinskörnungen einen der volumenmäßig größten Stoffströme dar [4]. Sande und Kiese werden in der Regel aufgrund der hohen Kosten, die mit einem Transport verbunden sind, lokal abgebaut und verarbeitet [5]. Sowohl bezogen auf Deutschland als auch die gesamte Europäische Union kann dabei der Bedarf an Kiesen und Sanden unabhängig von Importen gedeckt werden [5, 6]. Deutschland gilt grundsätzlich als reich an Kies- und Sandvorkommen, die zum Beispiel aus eiszeitlichen Ablagerungen oder Ablagerungen in Flussbetten stammen, um den Bedarf an Gesteinskörnungen zur Herstellung von Beton auf absehbare Zeit decken können [6]. Doch nicht jedes Sand- oder Kiesvorkommen kommt für einen Abbau in Frage. Mögliche Gründe, die einem Abbau entgegenstehen, sind zum Beispiel die Besiedlung von Flächen, Bedenken von Anwohnern im Hinblick auf Lärm- und Staubbelastrung oder Anforderungen, die aus dem Naturschutz resultieren [6]. Obwohl renaturierte Flächen des Sand- oder Kiesabbaus oft einen hohen ökologischen Wert aufweisen, bedeutet der Abbau dieser Materialien während der aktiven Nutzungsphase einer Abbaufäche einen bedeutenden Eingriff in Flora und Fauna [5–7].

Einen politischen und juristischen Rahmen für Bemühungen zur Reduktion des Bedarfs an natürlichen Ressourcen wie Sand und Kies zur Herstellung von Beton bilden verschiedene Gesetze und Initiativen auf nationaler sowie europäischer Ebene [8–11]. So formuliert die Europäische Kommission im Rahmen des Grünen Deals [8] unter anderem die Forderung nach einer „ressourceneffizienten Wirtschaft“, welche 2021 im europäischen Klimagesetz verankert wurde [11]. Zudem sieht der Grüne Deal eine konsequente Umsetzung der Kreislaufwirtschaft vor und fordert im Hinblick auf die Baubranche explizit Ressourcenschonung ein [8]. In Deutschland besteht aufgrund des 2012 erlassenen und 2020 novellierten Kreislaufwirtschaftsgesetzes die Anforderung, natürliche Ressourcen zu schonen sowie Materialien und Produkte im Sinne einer Kreislaufwirtschaft wiederzuverwenden oder zu rezyklieren [9]. Untermuert werden diese Anforderungen durch das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm III [10]. Mit Blick auf die Baubranche fordert dieses Ressourceneffizienzprogramm eine vermehrte Verwendung von Baustoffen aus rezyklierten Materialien oder nachwachsenden Rohstoffen sowie die Stärkung des selektiven Rückbaus, um ein Recycling von Baustoffen zu ermöglichen [10].

Im Hinblick auf die Betonherstellung eignen sich grobe rezyklierte Gesteinskörnungen als Ersatz für natürliche Kiese und natürliche und rezyklierte Brechsande mit einer Korngröße  $\leq 2$  mm als Ersatz für natürlichen Sand [1, 4, 12]. Durch Aufbereitung in

Form von Sortieren, Brechen und Sieben von Beton- sowie Mauerwerksabbruch entsteht eine grobe rezyklierte Gesteinskörnung [13]. Diese kann zur Herstellung von Beton für den Hochbau verwendet werden, um einen Teil des natürlichen Kiesbedarfs zu ersetzen [1]. Als Nebenprodukt des Brechprozesses entsteht jedoch auch feine rezyklierte Gesteinskörnung, die eine Korngröße  $\leq 2$  mm aufweist [14, 15]. Gleiches gilt für den Herstellprozess von Schotter und Splitten aus Natursteinen, wobei natürlicher Brechsand anfällt [16]. Sowohl natürlicher als auch rezyklierter Brechsand kommen grundsätzlich als Ersatz für natürliche Sande in Frage und können damit einen Beitrag zur Ressourcenschonung und zur Kreislaufführung von Materialien leisten [4, 15]. Während der Gültigkeitsdauer der DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ [17] ist eine Verwendung von feinen rezyklierten Gesteinskörnungen zur Herstellung von Beton für den Hochbau jedoch nicht möglich. Mit Überführung der Regelungen der DAfStb-Richtlinie in die 2023 erschienene DIN 1045-2 [13] als nationales Anwendungsdokument zur DIN EN 206 [18], ist der Einsatz von feiner rezyklierter Gesteinskörnung, hergestellt aus Betonabbruch, nun auch in Deutschland wieder möglich, wie dies bereits im Rahmen der DAfStb-Richtlinie „Beton mit rezykliertem Zuschlag“ von 1998 der Fall war [19].

Brechsande unterscheiden sich in ihrer Form, Eckigkeit und Rauigkeit von natürlichen Sanden [20, 21]. Aufgrund des Verwitterungsprozesses im Rahmen der Entstehungsgeschichte von natürlichen Sanden, weisen diese in der Regel eine kugelhähnliche Form und geringe Eckigkeit auf [20, 22]. Im Unterschied dazu zeichnen sich sowohl rezyklierte als auch natürliche Brechsande durch plattigere bzw. länglichere Kornformen mit scharfkantigen Ecken aus [20, 21]. Bei Verwendung von Brechsanden zur Herstellung von Beton oder Mörtel zeigt sich, dass neben einem erhöhten Feinanteil die Unterschiede in der Kornform und Eckigkeit einen vielfältigen Einfluss auf verschiedene Eigenschaften der hergestellten Materialien im frischen und festen Zustand haben [20, 21, 23–26]. So steigt zum Beispiel mit zunehmender Abweichung von der Kugelform und zunehmender Eckigkeit von Körnern deren spezifische Oberfläche und damit der Wasseranspruch der Gesteinskörnung [20, 25]. Eine Vielzahl von Studien können daher eine Abnahme der Verarbeitbarkeit bzw. einen erhöhten Fließmittelbedarf von Mörtel und Beton bei Einsatz von Brechsanden belegen [20, 21, 23, 24, 26]. Sowohl für die Druckfestigkeit als auch die Biegezugfestigkeit, kann eine Zunahme bei Einsatz von Sanden mit erhöhter Eckigkeit beobachtet werden [23, 24, 27, 28]. Wobei diese Beobachtung bei Verwendung von rezyklierten Brechsanden nicht bestätigt werden kann [26]. Insbesondere in Abgrenzung zu anderen Parametern wie zum Beispiel dem Verhältnis von Wasser zu Zement oder dem Anteil an Feinanteilen der Gesteinskörnung mangelt es jedoch an einer Datengrundlage, auf deren Basis der Einfluss von Kornform und Eckigkeit auf Eigenschaften von Mörtel und Beton quantifiziert werden kann. Die Quantifizierung des Einflusses von Brechsanden auf die Eigenschaften von Mörtel und Beton ist jedoch eine Voraussetzung für die Verwendung steigender Brechsandmengen zur Herstellung dieser Materialien.

Die Herausforderung bei der Quantifizierung des Einflusses von Kornform und Eckigkeit auf die Eigenschaften von Mörtel und Beton stellt die Charakterisierung dieser morphologischen Kenngrößen dar. Gängige mechanische Laborverfahren wie die Bestimmung der Kornformkennzahl  $S_f$  nach DIN EN 933-4 [29] als Maß für den Anteil

länglicher Körner an der gesamten Gesteinskörnung oder die Bestimmung der Plattigkeitskennzahl  $F_l$  nach DIN EN 933-3 [30] als Maß für den Anteil plattiger Körner an der gesamten Gesteinskörnung sind nur für Körner größer 4 mm geeignet und damit für natürliche und rezyklierte Sande nicht anwendbar. Lediglich die Bestimmung des Fließkoeffizienten  $E_c$  nach DIN EN 933-6 [31] liefert einen Anhaltspunkt bezüglich Form und Eckigkeit der Sande. Als bildgebendes, dreidimensionales Verfahren bietet die Computertomographie (CT) hier die Möglichkeit einer detaillierten Charakterisierung von Form und Eckigkeit auch von Gesteinskörnungen mit Korngrößen kleiner 2 mm [25, 32–35]. Unter der Voraussetzung, dass sich berührende Körner im Rahmen einer Bildbearbeitung voneinander trennen lassen, ist die Charakterisierung von jedem einzelnen Korn der tomographierten Probe möglich. Eine Vielzahl von in der Literatur vorgeschlagenen Kenngrößen ermöglicht dann eine Charakterisierung im Hinblick auf Form und Eckigkeit der Körner der unterschiedlichen Sande [36–40]. Daran anschließend ist eine Untersuchung des Einflusses dieser Kenngrößen auf die Eigenschaften von Mörtel und Beton im frischen und ausgehärteten Zustand möglich.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines weitestgehend automatisierten Verfahrens zur morphologischen Charakterisierung von feinen Gesteinskörnungsschüttungen mittels Computertomographie sowie die Nutzung dieser morphologischen Informationen zur Steuerung von Mörtel Eigenschaften. Hierfür soll der Einfluss morphologischer Charakteristika wie Kornform oder Korneckigkeit der Gesteinskörnung auf Mörtel Eigenschaften im frischen und ausgehärteten Zustand untersucht werden, in Abgrenzung zu anderen, die Mörtel Eigenschaften beeinflussenden Kenngrößen wie dem Verhältnis von Wasser zu Zement, dem Massenverhältnis von Bindemittelleim zu Gesteinskörnung und dem Anteil an Feinanteilen der Gesteinskörnung. Daran schließt sich die Fragestellung an, inwiefern Kornzusammensetzungen optimiert zusammengesetzt werden können, um den Brechsandanteil an der gesamten Gesteinskörnung zu maximieren.

Diese Zielsetzung wird von drei zugrundeliegenden Forschungsfragen geleitet, die graphisch in Abb. 1.1 dargestellt sind und aufeinander aufbauen. So ist zur Untersuchung des Einflusses morphologischer Charakteristika der Gesteinskörnungen auf Mörtel Eigenschaften die Definition geeigneter Parameter zur Beschreibung von Eigenschaften wie Kornform und Korneckigkeit von feinen Gesteinskörnungen erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher Parameter zur morphologischen Charakterisierung der feinen Gesteinskörnung festgelegt, mit dem Ziel von Kornform über Korneckigkeit eine möglichst große Bandbreite an morphologischen Eigenschaften abzudecken und gleichzeitig aus Effizienzgründen eine minimale Anzahl von Parametern zur Vermeidung der Angabe redundanter Informationen zu verwenden. Datengrundlage zur morphologischen Charakterisierung bilden im Rahmen dieser Arbeit CT-Aufnahmen von losen Schüttungen der natürlichen und rezyklierten Sande. Ziel ist die Entwicklung eines möglichst automatisierten Verfahrens zur Anfertigung der CT-Aufnahmen, der Bildbearbeitung und Bereitstellung der Datengrundlage zur morphologischen Charakterisierung, welches für natürliche und rezyklierte feine Gesteinskörnungen geeignet ist. Dies umfasst die Untersuchung der vorhandenen Messungsgenauigkeit

in Abhängigkeit von der Art der Probenvorbereitung sowie der erforderlichen Mindestauflösung der CT-Aufnahmen sowie die automatisierte Trennung von Körnern, die sich auf der CT-Aufnahme berühren, im Rahmen der Bildbearbeitung.

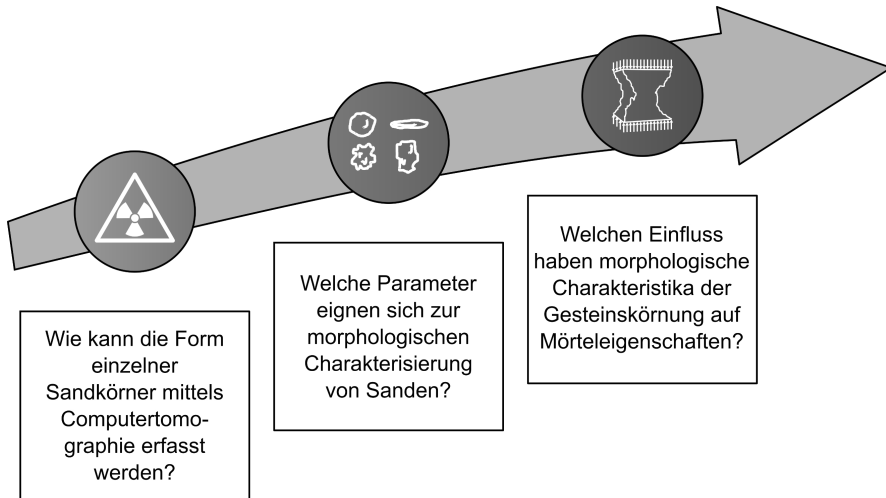


Abb. 1.1: Darstellung der Forschungsfragen.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die in Abschnitt 1.2 formulierten Ziele werden im Rahmen dieser Arbeit entsprechend der Darstellung in Abb. 1.2 behandelt.

**Kapitel 1** umfasst dabei die Motivation und Einführung in die generelle Problemstellung, die Formulierung der Zielsetzung sowie die Beschreibung des Aufbaus dieser Arbeit.

**Kapitel 2** befasst sich mit der Computertomographie als Verfahren zur automatisierten Korncharakterisierung. Hierzu wird zunächst auf der Grundlage einer Literaturlauswertung die grundlegende Funktionsweise des Verfahrens der Computertomographie erläutert und ausgewählte, im Rahmen dieser Arbeit relevante, Störgrößen erläutert. Daran anschließend werden Verfahren zur Bildbearbeitung von der Glättung der Grauwertbilder über die Erstellung von Binärbildern bis zur Segmentierung sich auf der CT-Aufnahme berührender Körner aufgezeigt. Basierend auf den Ergebnissen der Literaturlauswertung erfolgt eine erste Festlegung von Parametern zum Tomographieren sowie der anschließenden Bildbearbeitung von feinen Gesteinskörnungsschüttungen. Als nächster Schritt werden die Versuche zu Einflussfaktoren auf die Messungenauigkeit von CT-Aufnahmen der Gesteinskörnung erläutert. Zum einen wird anhand von einzelnen Körnern, die bei unterschiedlichen Auflösungen tomographiert werden, der Einfluss der Auflösung auf die Messungenauigkeit untersucht und daraus Minimalanforderungen an die Auflösung von Körnern auf CT-Aufnahmen abgeleitet. Zum anderen wird der Einfluss der Probenpräparation in Form von einer Segmentierung sich berührender Körner bei Anfertigung von CT-Aufnahmen von losen Schüttungen im Rahmen der Bildbearbeitung sowie bei manuellem Trennen von Körnern vor Anfertigung der CT-Aufnahme analysiert. An diese Versuche schließt sich die Entwicklung

eines Verfahrens zur automatisierten Kornsegmentierung an. Basierend auf den Ergebnissen dieser Versuche erfolgt die Festlegung eines Verfahrens zur Anfertigung von CT-Aufnahmen sowie der anschließenden Bildbearbeitung von feinen Gesteinskörnungsschüttungen, welches für die Versuche der folgenden Kapitel verwendet wird.

Liegen digitale, dreidimensionale Abbildungen einzelner Körner einer Gesteinskörnungsschüttung vor, kann die morphologische Beschreibung dieser Schüttungen erfolgen. Im Rahmen von **Kapitel 3** werden zunächst Parameter zur Charakterisierung von Korngröße, Kornform, Korneckigkeit und Kornrauigkeit aus der Literatur vorgestellt, die anhand der dreidimensionalen Darstellung einzelner Körner basierend auf CT-Aufnahmen bestimmt werden können. Für die anschließend dargestellten Versuche werden CT-Aufnahmen einer Glaskugelschüttung, eines natürlichen Rheinsandes, eines Brechsandes aus Mikrodiorit sowie zweier Brechsande aus rezykliertem Betonbruch und rezykliertem Mauerwerksbruch angefertigt. Für diese fünf Materialien werden aus der Vielzahl in der Literatur vorgeschlagenen Parameter zur morphologischen Charakterisierung diejenigen ausgewählt, die eine möglichst große Bandbreite unterschiedlicher Eigenschaften wie zum Beispiel Kornform oder Korneckigkeit beschreiben. Weitere Kriterien zur Auswahl geeigneter morphologischer Parameter sind zum einen, dass sie geeignet sind sowohl die Ausprägung eines jeweiligen Merkmals als auch die Verteilung innerhalb einer Schüttung darzustellen. Zum anderen sollen sie eine minimale Korrelation zu anderen ausgewählten morphologischen Parametern aufweisen.

Sowohl die CT-Aufnahmen der unterschiedlichen Materialien als auch deren morphologische Charakterisierung stellen die Grundlage für die in **Kapitel 4** durchgeführte Untersuchung des Einflusses morphologischer Kenngrößen auf Mörtel Eigenschaften dar. Zunächst erfolgt ein Überblick über in der Literatur dokumentierte Einflüsse von morphologischen Kenngrößen wie Kornform oder Korneckigkeit auf Eigenschaften von Mörtel und Beton sowohl im frischen als auch ausgehärteten Zustand. Aufgrund der Vielzahl von Einflussgrößen, die neben den morphologischen Charakteristika der Gesteinskörnung zusätzlich die Frisch- und Festmörtel Eigenschaften beeinflussen, sind die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche auf dem Prinzip der statistischen Versuchsplanung aufgebaut. Zweck ist es, gezielt Haupteffekte aber auch Interaktionen der morphologischen Kenngrößen mit anderen Parametern der Mörtelzusammensetzung wie zum Beispiel dem Verhältnis von Wasser zu Zement analysieren zu können. Die Frischmörteluntersuchungen umfassen die Bestimmung rheologischer Kenngrößen, das Setz- und Setzfließmaß sowie das Ausbreitmaß. Die Festmörteluntersuchungen umfassen die Bestimmung von Biegezug- und Druckfestigkeit sowie des dynamischen Elastizitätsmoduls. Im Rahmen von Versuchen zur Verifikation der erzielten Ergebnisse wird ein Teil der durchgeführten Versuche mit bisher nicht verwendeten Gesteinskörnungsschüttungen wiederholt. Zusätzlich wird aus den erzielten Versuchsergebnissen ein Optimierungsansatz zur Maximierung des Brechsandanteils an der gesamten Gesteinskörnung abgeleitet. Zur Verifikation dieses Optimierungsansatzes werden Mörtelzusammensetzungen mit einem Gesteinskörnungsanteil bestehend aus natürlichem Sand und unterschiedlichen Brechsanden untersucht.

Die in den vorangegangenen Kapiteln erzielten Versuchsergebnisse werden in **Kapitel 5** zusammenfasst und in den Kontext der formulierten Zielsetzungen eingeordnet. Des Weiteren wird ein Ausblick über mögliche weiterführende Untersuchungen und

weiterführende Anwendungsmöglichkeiten der erzielten Versuchsergebnisse gegeben.

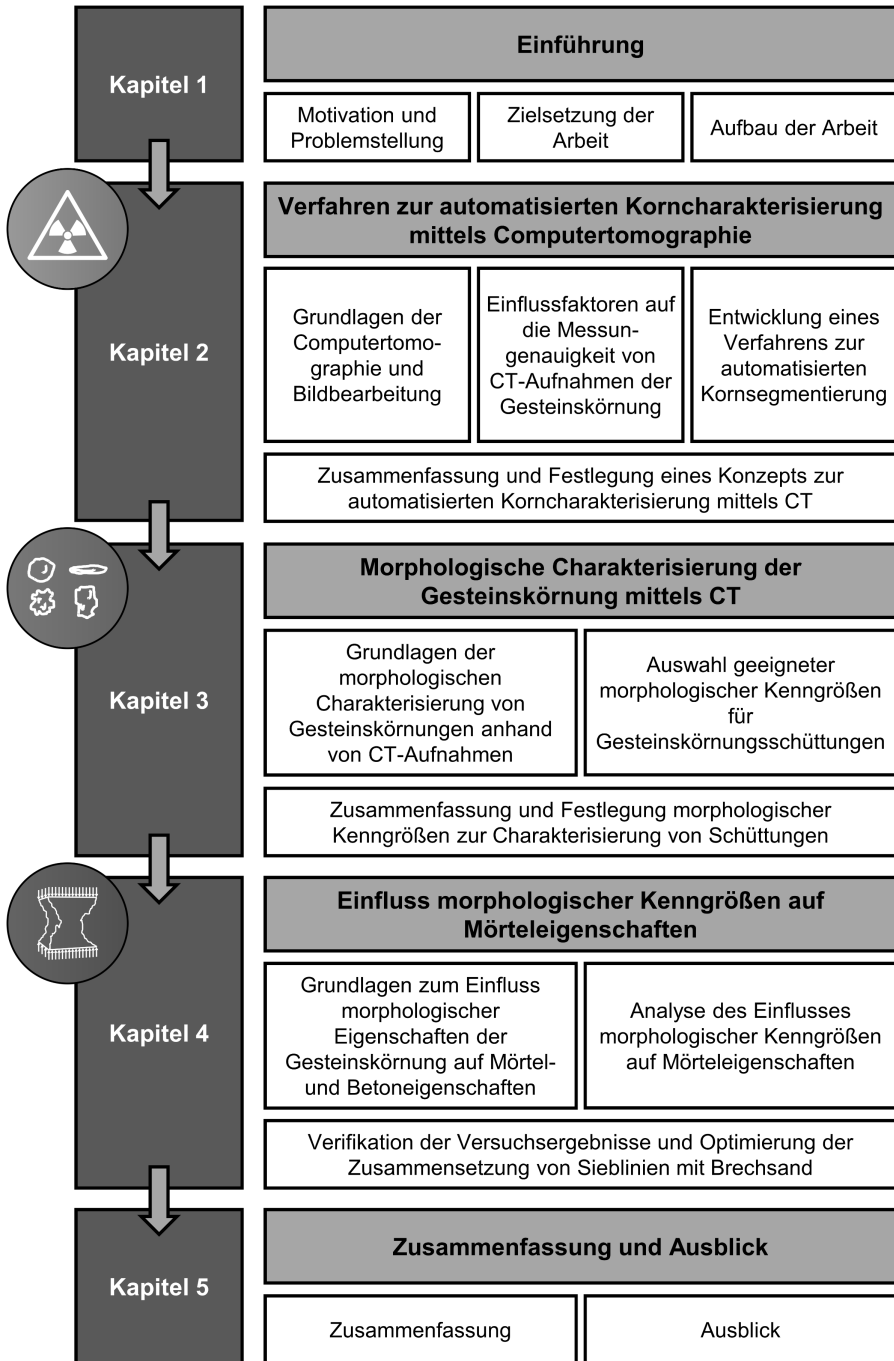


Abb. 1.2: Schematische Darstellung des Aufbaus dieser Arbeit.



## **2 Verfahren zur automatisierten Korncharakterisierung mittels Computertomographie**

### **2.1 Grundlagen der Computertomographie und Bildbearbeitung**

#### **2.1.1 Funktionsweise der Röntgenröhre und Durchstrahlung der Probe**

Das Prinzip der Computertomographie (CT) beruht auf der Anfertigung von Röntgenbildaufnahmen einer Probe aus verschiedenen Winkelpositionen, welche in einem nachgelagerten Schritt mittels Rekonstruktionsalgorithmus zu einem dreidimensionalen Bild zusammen gesetzt werden [41, 42]. Wichtige Grundlagen der Computertomographie legten Cormack [43] mit einer Methode zur Rekonstruktion einer Bildebene auf Basis von Röntgenaufnahmen aus verschiedenen Richtungen sowie Hounsfield [44] mit dem Bau des ersten Computertomographen, wofür beide Forscher 1979 gemeinsam mit dem Nobelpreis für Medizin ausgezeichnet wurden [45]. Bereits in den 1980er Jahren fand die Computertomographie Einzug in die industrielle Praxis, hauptsächlich im Rahmen der Qualitätskontrolle zur Erkennung innerer Fehlstellen von Werkstücken [46]. Mittlerweile spielt auch die Vermessung eines Werkstückes eine zunehmende Rolle [46, 47]. Aufbau und Funktionsweise werden im Folgenden anhand des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten CT-Gerätes (CT ALPHA-240, ProCon X-Ray) erläutert, siehe Abb. 2.1.

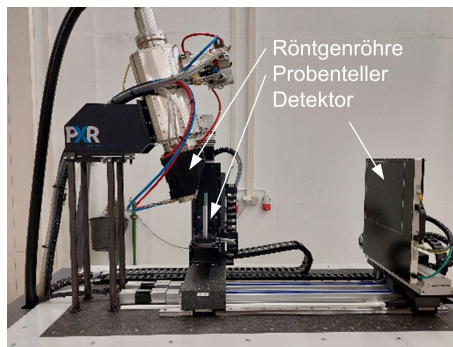


Abb. 2.1: Aufbau des CT-Gerätes CT ALPHA-240 (ProCon X-Ray) mit Röntgenröhre (links), Probenteller (mittig) und Detektor (rechts).

Während der Rotation der Probe um die vertikale Achse wird diese mit Röntgenstrahlung bestrahlt. Der Detektor registriert dabei für jeden Winkelschritt ein Röntgenbild der Probe, im Folgenden Projektion genannt. Bei der 1895 vom Physiker Röntgen [48] entdeckten Röntgenstrahlung handelt es sich um elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge  $\lambda$  zwischen 0,01 nm und 10 nm [49, 50]. Durch Erhitzen des Filaments, welches als Kathode fungiert, werden Elektronen aus dem Wolfram-Filament der Röntgenröhre herausgelöst. Diese werden mittels der angelegten Röhrenspannung  $U_A$  in Richtung Anode beschleunigt, wo durch Interaktion mit dem Anodenmaterial Röntgenstrahlung entsteht, welche kegelförmig in Richtung der Probe abgestrahlt wird [42, 46]. Die vom Anwender vorgegebene Stromspannung beeinflusst das Energieniveau der

Röntgenstrahlung, während die Stromstärke die Intensität der emittierten Röntgenstrahlung steuert [51]. Bei der emittierten Röntgenstrahlung handelt es sich um ein polychromatisches Intensitätsspektrum, welches in Abb. 2.2 dargestellt ist [52].

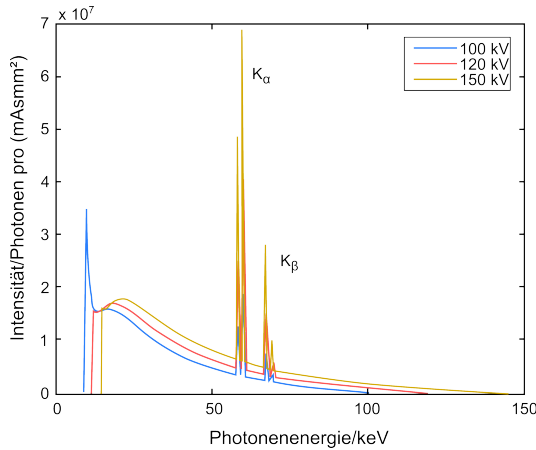


Abb. 2.2: Beispielhaftes Röntgenstrahlungsspektrum gekennzeichnet durch Bremsstrahlung und den charakteristischen Linienspektren ( $K_\alpha$ - und  $K_\beta$ -Linie), nach [52], ins Deutsche übersetzt.

Beim Durchstrahlen der Probe wird die Röntgenstrahlung abgeschwächt. Die Photonen der von der Röntgenstrahlungsquelle ausgehenden Strahlung weisen aufgrund des polychromatischen Charakters des Röntgenstrahlungsspektrums sowie der eingestellten Röhrenspannung unterschiedliche Energieniveaus auf. In Abhängigkeit von der Energie der Photonen der einfallenden Röntgenstrahlung führen vier Mechanismen, die kohärente Streuung, der Photoeffekt, der Compton-Effekt und die Paarbildung, zur Abschwächung der Röntgenstrahlung [51, 53].

Bei niedrigem Energieniveau der einfallenden Photonen dominieren die kohärente Streuung und der Photoeffekt, detaillierte Informationen hierzu können den Referenzen [51, 53, 54] entnommen werden. Bei mittlerem Energieniveau kommt es hauptsächlich zu einer Abschwächung durch die Comptonstreuung und bei hohem Energieniveau auch zur Paarbildung. Vertiefende Informationen zur Comptonstreuung und zur Paarbildung liefern [55–57]. Die Abschwächung der einfallenden Röntgenstrahlung wird über den Massenschwächungskoeffizienten  $\mu/\rho$  beschrieben [41, 58]. Hierbei handelt es sich um den materialspezifischen Schwächungskoeffizienten  $\mu$ , welcher mittels Dichte  $\rho$  des jeweiligen Materials normalisiert wird. Die Berechnung der Intensität nach Durchstrahlung der Probe erfolgt nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz, welches auf Arbeiten der Forscher Bouguer, Lambert und Beer [59] basiert. Dieses beschreibt die Abschwächung  $I$  der Anfangsintensität  $I_0$  der Strahlung durch ein homogenes Material mit konstantem linearem Schwächungskoeffizienten  $\mu$  auf einer Wegstrecke  $x$  nach Gleichung (2.1) [52, 59].

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (2.1)$$

mit:	$I$	Intensität nach Durchstrahlung der Probe [W/m <sup>2</sup> ]
	$x$	Wegstrecke, die ein Röntgenstrahl in der Probe zurücklegt [m]
	$I_0$	Anfangsintensität der Röntgenstrahlung [W/m <sup>2</sup> ]
	$\mu$	Linearer Schwächungskoeffizient des Materials [1/m]

Dass rein homogene Materialien tomographiert werden, ist jedoch nur selten der Fall, sodass eine Erweiterung auf inhomogene Materialien erforderlich ist. Gleichung (2.2) berücksichtigt daher mittels Linienintegral die unterschiedlichen linearen Schwächungskomponenten der einzelnen Materialien, die ein Röntgenstrahl auf seinem Weg von der Röntgenquelle zum Detektor in Teilabschnitten  $s$  durchstrahlt [43].

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\int_0^x \mu(s) ds} \quad (2.2)$$

mit:	$I$	Intensität nach Durchstrahlung der Probe [W/m <sup>2</sup> ]
	$x$	Wegstrecke, die ein Röntgenstrahl in der Probe zurücklegt [m]
	$I_0$	Anfangsintensität der Röntgenstrahlung [W/m <sup>2</sup> ]
	$\mu$	Linearer Schwächungskoeffizient des Materials [1/m]
	$s$	Teilabschnitt der Wegstrecke $x$ [m]

Hinzu kommt, dass der lineare Schwächungskoeffizient  $\mu$  wie bereits erläutert abhängig ist von der Anfangsintensität der Strahlung, welche wie in Abb. 2.2 dargestellt ein polychromatisches Spektrum abdeckt. Da dieses Spektrum jedoch im Rahmen der CT-Aufnahme nicht gemessen wird und damit unbekannt ist, bleibt dieser Aspekt unberücksichtigt [43].

### 2.1.2 Funktionsweise des Flachbilddetektors

Bei der Computertomographie wird die rotierende Probe aus verschiedenen Winkelpositionen mit Röntgenstrahlung bestrahlt. Der Detektor erfasst dabei für jede Winkelposition, wie stark die Röntgenstrahlung durch die Probe abgeschwächt wird. Flachbildszintillationsdetektoren, wie im Rahmen dieser Arbeit verwendet, setzen sich aus gitterförmig angeordneten Pixeln zusammen, die die Abschwächung der Röntgenstrahlung registrieren und in ein elektrisches Signal umwandeln [60]. Dem von jedem Pixel registrierten einfallenden Licht wird je nach Intensität ein Grauwert  $g$  zugeordnet [52]. Der Detektor wird dabei durch die Bit-Tiefe seiner Pixel charakterisiert, welche angibt, in wie viele Grauwertstufen der Dynamikbereich des Detektors unterteilt wird. Der Grauwert  $g=0$  (schwarz) wird für ein Pixel gespeichert, welches kein Signal registriert hat. Dieser Punkt markiert das untere Ende des sogenannten Dynamikbereichs [52]. Einem Signal mit maximaler Stärke wird hingegen der Grauwert  $g=2^n$  (weiß) zugewiesen, was dem oberen Ende des Dynamikbereichs entspricht.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein 16-bit-Flachbilddetektor verwendet, womit der Dynamikbereich folglich in  $2^{16}=65.536$  Grauwertstufen unterteilt wird. Wichtig für die Interpretation der mittels Flachbilddetektor aufgenommenen Projektion ist, dass zwischen der registrierten Intensität der einfallenden Strahlung und dem gespeicherten Grauwert ein linearer Zusammenhang besteht. Dies ist für Flachbildszintillationsdetektoren nicht über den gesamten Dynamikbereich der Fall [61]. Eine Untersuchung von Ning et al. [61] an einem Flachbildszintillationsdetektor zeigt, dass im Bereich hoher Intensitäten der einfallenden Röntgenstrahlung ein Sättigungspunkt erreicht wird, ab dem keine lineare Zuordnung zwischen der Intensität der einfallenden Strahlung und dem vom Pixel registrierten Signal mehr erfolgt. Unterschiede in der Intensität der einfallenden Röntgenstrahlung, die auf Materialunterschiede in der durchstrahlten Probe zurückzuführen sind, werden ab diesem Sättigungspunkt nicht mehr durch unterschiedliche Grauwerte widerspiegelt. Von Linearität kann bei modernen Flachbildszintillationsdetektoren in einem Bereich von 80-90 % des Dynamikbereichs ausgegangen werden [62, 63].

### 2.1.3 Rekonstruktion von Computertomographie-Aufnahmen

Die dreidimensionale Darstellung des tomographierten Objektes wird auf Basis der aus verschiedenen Winkelpositionen aufgenommenen Projektionen unter Verwendung eines Rekonstruktionsalgorithmus bestimmt.

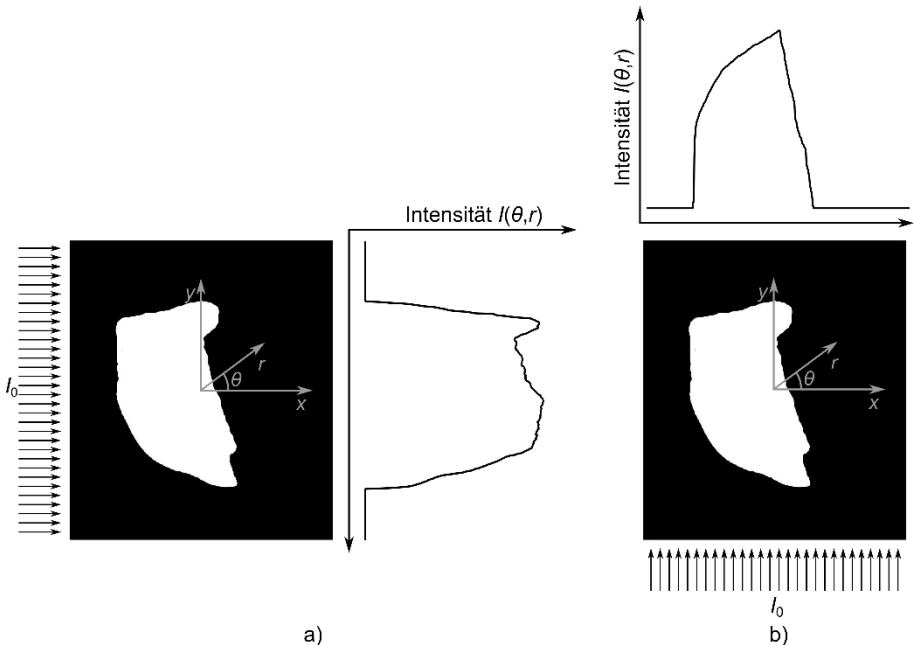


Abb. 2.3: Veranschaulichung des registrierten Intensitätsverlaufs nach Durchstrahlung einer zweidimensionalen Korndarstellung unter dem Winkel a)  $\Theta_1=0^\circ$  und b)  $\Theta_2=90^\circ$ .

Im Folgenden werden die Grundlagen der Rekonstruktion anhand eines zweidimensionalen Beispiels näher erläutert. Abb. 2.3 zeigt links eine zweidimensionale Darstellung eines Korns, das mit parallel verlaufender Röntgenstrahlung  $I_0$  aus einem Winkel

$\theta_1$  bestrahlt wird. Der nachgeschaltete Liniendetektor registriert einen Intensitätsverlauf  $I(\theta, r)$  entlang des Bildbereichs, welcher aus der Abschwächung der Röntgenstrahlung durch das Objekt resultiert. Rechts ist der resultierende Intensitätsverlauf nach Durchstrahlung des Objektes aus einem zweiten Winkel  $\theta_2$  abgebildet. Jeder Punkt auf dem Intensitätsverlauf  $I(\theta, r)$  entspricht dem in Gleichung (2.2) dargestellten Linienintegral der abgeschwächten Intensität. Das zweidimensionale Objekt in Abb. 2.3 kann mathematisch als Flächenfunktion  $f(x, y)$  beschrieben werden. Grundlegendes Ziel der Rekonstruktion ist die Bestimmung dieser Flächenfunktion ausschließlich auf Basis der vorab aufgenommenen Projektionen  $I(\theta, r)$ . Jedem Punkt der Flächenfunktion  $f(x, y)$  soll folglich ein Grauwert zugeordnet werden, der die Abschwächung der Röntgenstrahlung durch das Material in eben diesem Punkt repräsentiert [52]. Vertiefende Informationen zu den mathematischen Grundlagen der Rekonstruktion von CT-Aufnahmen können [51, 52] entnommen werden, eine anschauliche Erläuterung bietet [64].

Grundlage vieler Rekonstruktionsalgorithmen bildet die gefilterte Rückprojektion. Abb. 2.4 a) zeigt zunächst das Verfahren der einfachen Rückprojektion anhand des Beispiels in Abb. 2.3 b) für den Winkel  $\theta_2$ . Jedem Punkt der Flächenfunktion  $f(x, y)$ , welcher auf der durch  $r$  und  $\theta_2$  definierten Rückprojektionsgerade liegt, wird die vom Detektor registrierte Intensität  $I(\theta_2, r)$  zugewiesen. Die Flächenfunktion  $f(x, y)$  ergibt sich durch Aufsummieren der registrierten Intensitäten, wenn dieses Verfahren für alle aufgenommenen Projektionen wiederholt wird. In Abb. 2.4 b) und c) ist das Ergebnis der einfachen Rückprojektion bei Aufnahme von 18 und 180 Projektionen zu sehen.

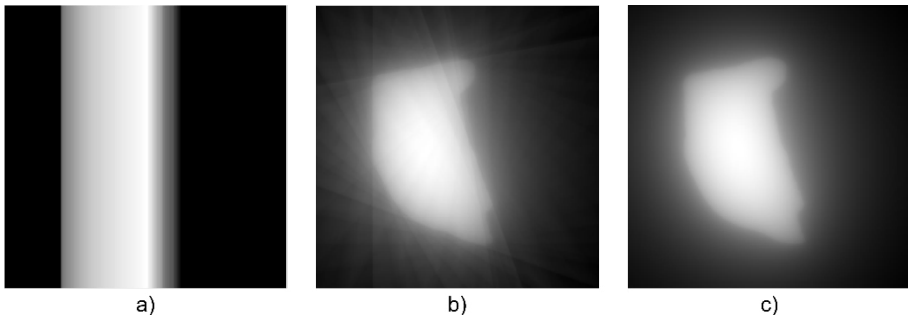


Abb. 2.4: Prinzip der einfachen Rückprojektion bei Verwendung von a) einer Projektion, b) 18 Projektionen und c) 180 Projektionen.

Es zeigt sich, dass mit zunehmender Anzahl an aufgenommenen Projektionen die Unschärfe des rekonstruierten Bildes abnimmt. Da jedoch bei der einfachen Rückprojektion jedem Punkt (auch Punkten, die außerhalb des Objektes liegen), ein Wert größer Null zugewiesen wird, verbleibt immer eine gewisse Unschärfe, siehe Abb. 2.4 c). Zur Rekonstruktion von CT-Aufnahmen stellen Ramachandran und Lakshminarayan [65] daher einen Algorithmus vor, der auf der gefilterten Rückprojektion basiert. Der Unterschied zur einfachen Rückprojektion ist, dass der vom Detektor registrierte Intensitätsverlauf vor der Rückprojektion gefiltert wird. Zur Reduktion von Rauschartefakten, welche durch diesen Filter hervorgerufen werden, wird zur Rekonstruktion von CT-Aufnahmen oft stattdessen eine Filterfunktion nach Shepp und Logan [66] verwendet.

Wird eine gefilterte Rückprojektion mit Shepp-Logan-Filter anstatt der einfachen Rückprojektion verwendet, führt dies, wie in Abb. 2.5 b) zu sehen, zu einer Verringerung der Unschärfe bei Verwendung von 180 Projektionen.

Neben der Erweiterung vom bisher beschriebenen Fall der Zweidimensionalität zur Dreidimensionalität kommt bei industriellen CT-Aufnahmen hinzu, dass die Probe kegelstrahlförmig und nicht parallel von Röntgenstrahlen durchstrahlt wird. Ein weit verbreiteter Algorithmus zur Rekonstruktion von dreidimensionalen CT-Aufnahmen bei kegelstrahlförmiger Durchstrahlung ist der Feldkamp-Davis-Kress-Algorithmus [67].

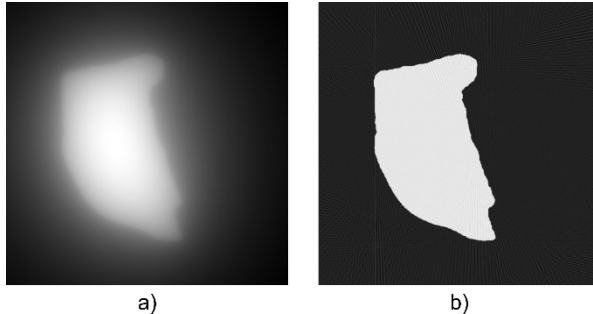


Abb. 2.5: Ergebnis der Rückprojektion bei Verwendung von 180 Projektionen a) als ungefilterte Rückprojektion und b) als gefilterte Rückprojektion bei Verwendung des Shepp-Logan-Filters.

#### 2.1.4 Artefakte

Artefakte, welche ihren Ursprung in der Durchstrahlung einer Probe mit Röntgenstrahlung, der Detektion der abgeschwächten Strahlung sowie der Rekonstruktion haben können, beeinflussen die dreidimensionale Darstellung des durchstrahlten Objektes maßgeblich. Im Folgenden werden die Phänomene der Strahlaufhärtung, der Streustrahlung sowie des Rauschens näher erläutert, welche Einfluss auf die Bildqualität der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Gesteinskörnungsproben haben können. Eine Übersicht über weitere Artefakte im Zusammenhang mit CT-Aufnahmen bietet [46].

Abb. 2.6 zeigt die Auswirkungen der Strahlaufhärtung auf CT-Aufnahmen anhand eines Beispiels zweier Kugeln aus Kalknatronglas. Im Vergleich zur Kugelmitte erscheinen die Grauwerte und damit die Dichte im Randbereich der Kugeln erhöht, trotz der bekannten Materialhomogenität. Der zweite durch Strahlaufhärtung hervorgerufene Effekt sind die Streifenartefakte, welche zwischen den beiden Kugeln erkennbar sind. Zurückzuführen sind diese Artefakte auf das in Abschnitt 2.1.1 beschriebene polychromatische Intensitätsspektrum der Röntgenstrahlung sowie die Abschwächung dieses mittels Photoeffekt. Je länger die Wellenlänge der einfallenden Strahlung, desto stärker ist die Abschwächung dieser Strahlung durch den Photoeffekt [68–70]. Bezogen auf den Anwendungsfall der Computertomographie bedeutet dies, dass bei Durchstrahlung der randnahen Bereiche der Kugeln die langwelligen Anteile des Intensitätsspektrums verstärkt abgeschwächt werden [69]. Infolgedessen verengt sich das Intensitätsspektrum mit zunehmender Durchstrahlungsstrecke auf die kurzwelligen Anteile

des ursprünglichen Intensitätsspektrums [69]. Die randfernen Bereiche der Kugeln werden folglich vermehrt von kurzwelliger Röntgenstrahlung durchstrahlt, wobei die Abschwächung durch den Photoeffekt im Vergleich zu den randnahen Bereichen geringer ausfällt [70].

Strahlaufhärtung kann ebenfalls zu den in Abb. 2.6 erkennbaren Streifenartefakten führen [71]. In Abhängigkeit vom Rotationswinkel während der CT-Aufnahme werden entweder beide Kugeln nacheinander oder parallel zueinander durchstrahlt, sodass die Strahlaufhärtung je nach Rotationswinkel unterschiedlich starken Einfluss auf die Abschwächung der Röntgenstrahlung hat [72].

Artefakte aufgrund von Strahlaufhärtung können durch Filterung der polychromatischen Röntgenstrahlung, Linearisierung der vom Detektor registrierten Intensität, Dual-Energy-Aufnahmen oder algorithmischer Korrektur nach der Rekonstruktion reduziert werden [73]. Zum Filtern der Röntgenstrahlung wird eine dünne Metallplatte, in der Regel aus Aluminium oder Kupfer, zwischen der Röntgenquelle und dem zu durchstrahlenden Objekt montiert. Anteile des polychromatischen Röntgenspektrums niedriger Intensität werden damit herausgefiltert, wodurch Strahlaufhärtungsartefakte minimiert werden [69, 74]. Gleichzeitig bewirkt eine starke Vorfilterung eine Verringerung der Gesamtintensität der Röntgenstrahlung, was zu einer Erhöhung des Rauschniveaus führen kann [75].

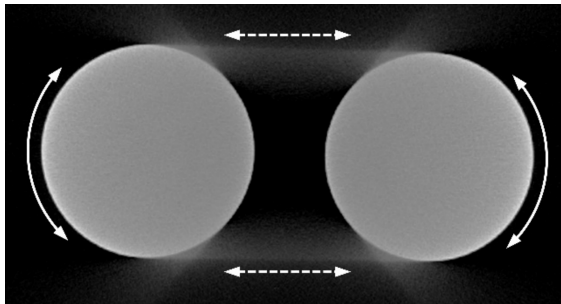


Abb. 2.6: Veranschaulichung von Strahlaufhärtungsartefakten anhand zweier nebeneinander gescannter Kugeln aus Kalknatronglas mit ausgeprägten Streifenartefakten zwischen den Kugeln (gestrichelte Pfeile) sowie erhöhten Grauwerten im Randbereich der Kugeln (durchgezogene Pfeile).

Neben der Strahlaufhärtung führt der Effekt der Streustrahlung zu einer Diskrepanz zwischen der vom Detektor registrierten abgeschwächten Röntgenstrahlung und der aufgrund der materiellen Zusammensetzung und Geometrie des durchstrahlten Objektes theoretisch zu erwartenden Intensitätsverteilung. Bei Abschwächung der Röntgenstrahlung durch Comptonstreuung erfolgt die Streuung eines langwelligeren Photons in einem Winkel unterschiedlicher Größe zur ursprünglichen Ausbreitungsrichtung [55, 76]. Wird diese gestreute Strahlung vom Detektor registriert, kommt es zu Grauwertschwankungen oder Streifenartefakten auf der CT-Aufnahme, die aus der fehlerhaften Zuordnung von registrierter Strahlung zu den entsprechenden Punkten im Probenkörper resultieren [76, 77].

Zwei Strategien zur Minimierung von Artefakten durch Streustrahlung existieren: zum einen die Reduktion von Streustrahlung und zum anderen die nachträgliche Korrektur von Artefakten [72]. Eine Möglichkeit zur Reduktion von Streustrahlung auf der CT-Aufnahme ist die Vergrößerung des Abstandes zwischen Probekörper und Detektor, was zu einer Minimierung der Wahrscheinlichkeit der Registrierung eines gestreuten Photons durch den Detektor führt [72, 78]. Des Weiteren können Streustrahlennester oder Kollimatoren zum Einsatz kommen [76, 79, 80]. Erste Algorithmen zur nachträglichen Korrektur basieren auf der Annahme, dass Artefakte aufgrund von Streustrahlung konstant über den gesamten Bildbereich verteilt auftreten und mittels eines konstanten Fehlerterms korrigiert werden können [76, 77]. Verschiedene Simulationsstudien sowie Untersuchungen an Proben zeigen jedoch, dass die Verteilung von Streustrahlung von Faktoren wie zum Beispiel der zu untersuchenden Probe abhängig ist [77, 81, 82]. Bei industriellen CT-Anlagen bestehen jedoch auch Einflüsse aus dem verwendeten Detektor oder dem Gehäuse [83].

Der auf Zufallsprozessen basierende Effekt, dass benachbarten Bildpunkten, die das selbe Material repräsentieren, unterschiedliche Grauwerte zugeordnet werden, wird als Rauschen bezeichnet [41, 62]. Abb. 2.7 zeigt einen Bildausschnitt der in Abb. 2.6 gezeigten Glaskugel mit Grauwertunterschieden trotz Materialhomogenität. Die Intensität der abgeschwächten Röntgenstrahlung wird von den Detektorpixeln durch Messen der einfallenden Photonen registriert [84]. Dieser Messprozess unterliegt statistischen Schwankungen, dem sogenannten statistischen Rauschen [84, 85]. Brooks und Di Chiro [84] zeigen, dass mit zunehmender Photonenenergie das statistische Rauschen abnimmt, was durch eine Erhöhung von Stromspannung und Stromstärke erreicht werden kann. Ebenfalls zu einer Verringerung des Rauschens führt die sogenannte Bildmittelung [72, 86]. Hierbei werden mehrere Projektionen in jeder Winkelposition aufgezeichnet und anschließend gemittelt. Neben dem statistischen Rauschen beeinflussen elektronisches Rauschen der Detektorelektronik oder Rundungsfehler das Gesamtrauschniveau einer CT-Aufnahme. Nähere Informationen hierzu können [85] entnommen werden.

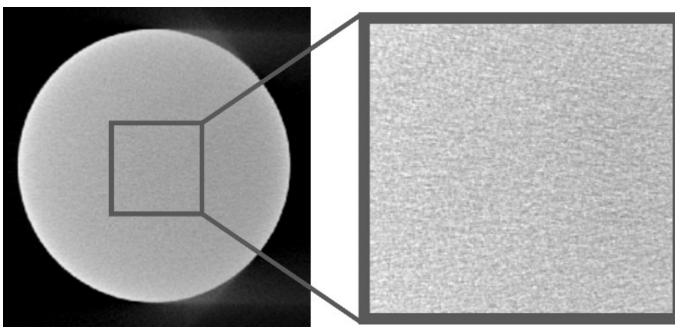


Abb. 2.7: Ausschnitt eines zweidimensionalen Schnittes durch eine Kugel aus Kalknatronglas zur Veranschaulichung von Rauschartefakten bei CT-Aufnahmen.

Neben zufällig auftretenden Rauschartefakten kann im Rahmen von CT-Aufnahmen stationäres Rauschen beobachtet werden, welches unter anderem aus einer unterschiedlichen Sensitivität benachbarter Detektorpixel, beschädigten Detektorpixeln oder Unterschieden beim Auslesen des Signals resultiert [87–89]. Artefakte aufgrund



von stationärem Rauschen können mittels Flat-Field-Korrektur reduziert werden [88, 89].

In Abb. 2.8 ist links ein sogenanntes Hellbild zu sehen, welches die vom Detektor registrierten Grauwerte unter Bestrahlung ohne Objekt zwischen Röntgenquelle und Detektor zeigt. Zu erwarten wäre die Registrierung eines homogenen Grauwertes über den gesamten Detektorbereich. Rechts in Abb. 2.8 ist das Hellbild nach Durchführung der Flat-Field-Korrektur dargestellt, mit einer erkennbaren Reduktion des stationären Rauschens. Für die Flat-Field-Korrektur werden zum einen ein Hellbild mit Bestrahlung und zum anderen ein Dunkelbild ohne Bestrahlung aufgenommen. Für die Aufnahme des Hellbildes erfolgt die Bestrahlung des Detektors ohne Objekt mit Röntgenstrahlung einer Intensität, welche der anschließenden CT-Aufnahme entspricht. Jede im folgenden Messprozess aufgenommene Projektion wird mittels des Korrekturbildes, der Differenz aus Hellbild und Dunkelbild, normalisiert [87, 88].

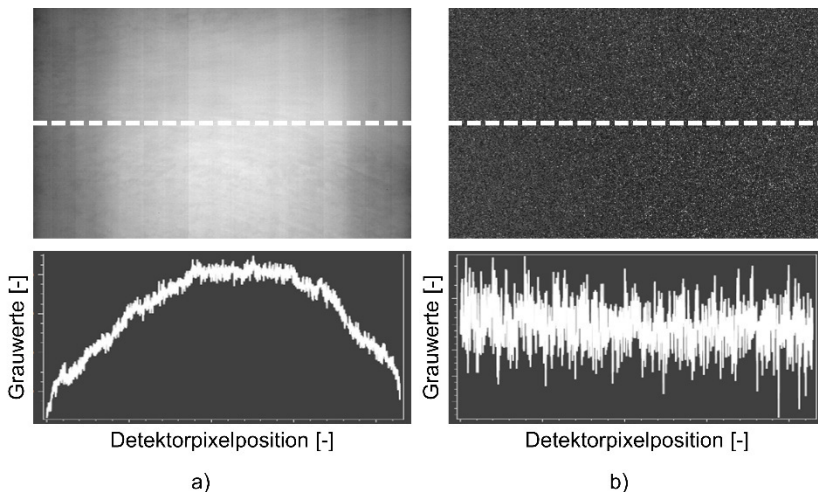


Abb. 2.8: Vom Detektor registrierte Grauwerte bei Bestrahlung ohne Probe mit a) vor und b) nach der Flat-Field-Korrektur. Das Linienprofil spiegelt die Grauwerte entlang der gestrichelten Linie wider.

### 2.1.5 Filtern des Grauwertbildes

Ergebnis der Rekonstruktion einer CT-Aufnahme ist ein dreidimensionales Volumenbild des tomographierten Objektes, welches aus einzelnen Voxeln zusammengesetzt ist, denen ein Grauwert  $g$  entsprechend der Abschwächung der Intensität durch die Probe zugeordnet ist. Ein Voxel ist dabei das dreidimensionale Pendant zum Pixel [41]. Die in Abschnitt 2.1.4 beschriebenen Rauschartefakte können mit Hilfe verschiedener Filter minimiert werden [90]. Dieses Vorgehen vereinfacht die im folgenden Abschnitt 2.1.6 beschriebenen Verfahren zur Umwandlung des Grauwertbildes in ein Binärbild. Detaillierte Informationen zu einer Vielzahl von Filtermethoden können [91] entnommen werden.

Im Folgenden wird lediglich auf die für diese Arbeit verwendeten linearen Filter und Rangordnungsfiler näher eingegangen. Zum Filtern eines Bildes wird jedem Voxel des

Grauwertbildes ein neuer Grauwert zugewiesen, der von der Definition des verwendeten Filters abhängig ist. Hierfür wird der Grauwert des betrachteten Voxels und dessen Umgebung analysiert [90]. Welche Nachbarvoxel zu dieser Umgebung zählen, ist vorab vom Nutzer zu definieren. Kommt ein 3er-Filter zum Einsatz, zählen alle direkten Nachbarvoxel senkrecht, waagrecht und diagonal zu dieser Umgebung. Bei Rangordnungsfiltren werden die originalen Grauwerte des betrachteten Voxels sowie seiner festgelegten Nachbarschaft der Größe nach sortiert.

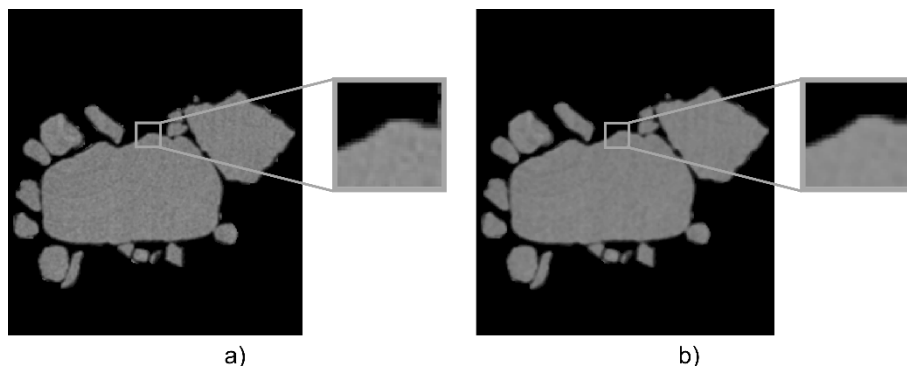


Abb. 2.9: Veranschaulichung der Filterung des Grauwertbildes zur Reduktion von Rauschartefakten anhand eines zweidimensionalen Querschnitts durch eine Sandprobe mit a) Grauwertbild nach der Rekonstruktion und b) gefiltertes Grauwertbild bei Verwendung eines Medianfilters mit 3er-Maske.

Ein gängiger Rangordnungsfiler ist der Medianfilter, welcher zur Bearbeitung von CT-Aufnahmen von Gesteinskörnungen im Rahmen verschiedener Studien zum Einsatz kommt [92, 93]. Der neue Grauwert des betrachteten Voxels wird mit dem Median der Rangordnungsreihe gleichgesetzt [90]. Im Vergleich zum originalen Grauwertbild in Abb. 2.9 a) verringert der Medianfilter das Rauschniveau [90], siehe Abb. 2.9 b). Ein typischer linearer Filter ist der Mittelwertfilter, wobei das betrachtete Voxel mit dem Mittelwert gleichgesetzt wird. Während der Mittelwertfilter zu einer stärkeren Reduktion des Rauschniveaus führen kann als der Medianfilter, bietet dieser den Vorteil, dass Kanten weniger verschwimmen [94]. Abb. 2.9 b) zeigt im vergrößerten Ausschnitt, dass auch nach Anwendung des Medianfilters die Kante zwischen Korn und Hintergrund deutlich dargestellt wird.

### 2.1.6 Schwellenwertverfahren zur Erstellung eines Binärbildes

Voraussetzung für die Identifizierung von einzelnen Körnern ist zunächst, dass die Körner vom Hintergrund der CT-Aufnahme getrennt werden. Hierfür wird das Grauwertbild in ein Binärbild umgewandelt. Das Binärbild einer CT-Aufnahme enthält lediglich zwei Grauwerte. Entweder ist der Grauwert null, falls ein Voxel zum Hintergrund gehört oder eins, falls ein Voxel zu einem Korn gehört. Die Zuordnung der binären Grauwerte basiert auf dem ursprünglichen Grauwert  $g$  jedes Voxels der CT-Aufnahme und erfolgt in Abhängigkeit vom Schwellenwert  $t$  [91].

Grundsätzlich kann zwischen zwei verschiedenen Strategien zur Festlegung des Schwellenwertes  $t$  unterschieden werden. Zum einen existieren globale Schwellenwertverfahren, bei denen ein konstanter Schwellenwert  $t$  für die gesamte Abbildung festgelegt wird [91]. Zum anderen basieren lokale Schwellenwertverfahren darauf, dass der Schwellenwert  $t$  jedes Voxels einzeln bestimmt wird in Abhängigkeit von Bildinformationen der umgebenden Voxel [91]. Einen Überblick sowie detaillierte Informationen zu einer Vielzahl an Verfahren zur Festlegung eines Schwellenwertes bieten Sezgin und Sankur [95]. Im Folgenden wird lediglich das Verfahren nach Otsu [96] näher erläutert, welches zur Trennung von Körnern vom Hintergrund einer CT-Aufnahme verwendet werden kann [92, 93] und auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird.

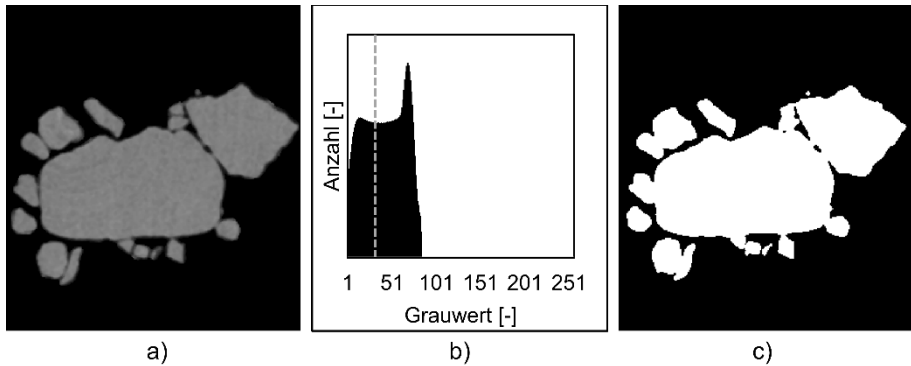


Abb. 2.10: Veranschaulichung der Erstellung eines Binärbildes nach der Methode von Otsu anhand eines zweidimensionalen Querschnitts durch eine Sandprobe mit a) Grauwertbild nach Anwendung eines Medianfilters, b) Histogramm der Grauwerte mit dem grau gestrichelt markierten Schwellenwert nach Otsu und c) Binärbild.

Abb. 2.10 a) zeigt einen zweidimensionalen Querschnitt eines originalen Grauwertbildes einer Sandprobe nach Anwendung eines Medianfilters. Die Wahl des Schwellenwertes  $t$  nach Otsu basiert auf der Analyse des Histogramms aller Grauwerte der CT-Aufnahme, siehe Abb. 2.10 b). Das Verfahren nach Otsu beruht nach Gleichung (2.3) auf einer Maximierung von  $\eta_{\text{Otsu}}$ , dem Verhältnis aus der Varianz zwischen den beiden durch  $t$  getrennten Gruppen  $\sigma_B^2$  und der Varianz der Grauwerte der gesamten CT-Aufnahme  $\sigma_T^2$ .

$$\eta_{\text{Otsu}} = \frac{\sigma_B^2(t)}{\sigma_T^2(t)} \quad (2.3)$$

- mit:
- $\eta_{\text{Otsu}}$  Kriterium zur Festlegung des Schwellenwertes nach Otsu [-]
  - $\sigma_B^2$  Varianz zwischen zwei durch einen Schwellenwert getrennten Gruppen von Grauwerten einer CT-Aufnahme [-]
  - $\sigma_T^2$  Varianz der Grauwerte einer CT-Aufnahme [-]
  - $t$  Schwellenwert zur Erstellung eines Binärbildes [-]

Ist der Kontrast zwischen Vorder- und Hintergrund hoch, sind in der Regel zwei deutliche Spitzen getrennt von einem Tal im Histogramm erkennbar und der Schwellenwert

$t$  kann gleich dem minimalen Grauwert zwischen diesen beiden Spitzen gesetzt werden [96]. Ein geringerer Kontrast zwischen Vorder- und Hintergrund, Rauschartefakte oder Grauwertschwankungen über den Verlauf des Bildes erschweren jedoch die eindeutige Festlegung des Schwellenwertes  $t$  [95, 96]. Abb. 2.10 c) zeigt das resultierende Binärbild, wenn das Verfahren nach Otsu angewendet wird.

### 2.1.7 Segmentierung von Körnern

In dem Binärbild sind die Körner vom Hintergrund der CT-Aufnahme getrennt. Bevor jedoch morphologische Parameter für jedes Korn einzeln berechnet werden können, ist eine Identifizierung der einzelnen Körner erforderlich. Hierfür wird jedem Korn eine Nummer, das sogenannte Label, zugeordnet. Wurde die Probe vor dem Tomographieren derart vorbereitet, dass sich Körner nicht berühren, wird jeder Gruppe von sich berührenden Voxeln ein Label zugewiesen [97]. Wird die Probe von Körnern jedoch als lose Schüttung tomographiert, berühren sich Körner auf dem Binärbild.

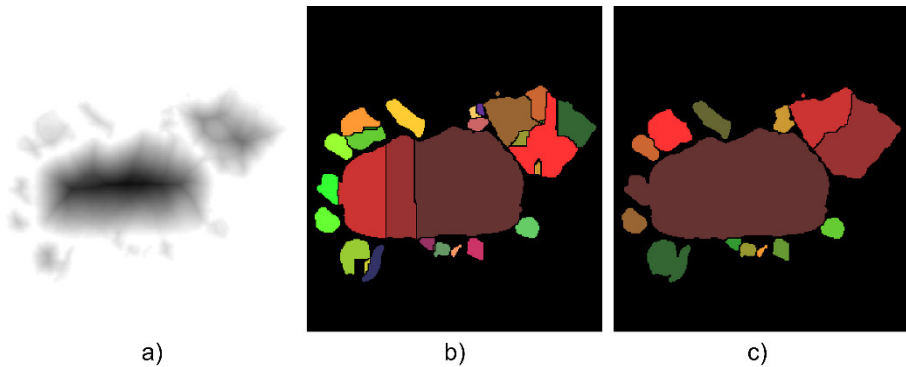


Abb. 2.11: Veranschaulichung der Kornsegmentierung anhand eines zweidimensionalen Querschnitts durch eine Sandprobe mit a) invertierter Euklidischer Distanztransformation, b) Ergebnis der Wasserscheidentransformation und c) Ergebnis der vorgefluteten Wasserscheidentransformation mit Grenzwert von 100.

Eine weit verbreitete Methode zur Segmentierung von sich berührenden Körnern ist die Wasserscheidentransformation nach Beucher und Lantuéjoul [98], welche anhand des zweidimensionalen Beispiels in Abb. 2.11 näher erläutert wird. Hierfür wird in einem ersten Schritt die Euklidische Distanztransformation bestimmt. Abb. 2.11 a) zeigt das Ergebnis der invertierten Euklidischen Distanztransformation für ein Beispiel von Normsandkörnern unterschiedlicher Korngröße. Jedem Voxel des Vordergrundes wird dabei ein Grauwert  $g$  zugewiesen, der dem Abstand zum nächstgelegenen Voxel des Hintergrundes entspricht [91]. Diese Darstellung wird anschließend invertiert. Die Wasserscheidentransformation lässt sich anschaulich anhand der Analogie zur Topographie einer Gebirgslandschaft mit Tälern und Gipfeln erklären [98]. Das Bild der Euklidischen Distanztransformation entspricht dabei einer topographischen Karte, bei der die hohen Grauwerte (nah am Kornrand) einen Gipfel darstellen und die niedrigen Grauwerte (im Bereich der Kornmitte) ein Tal symbolisieren. Das Prinzip der Wasserscheidentransformation basiert auf einer virtuellen Flutung der Täler mit Wasser, wobei

eine Quelle an jedes lokale Minimum der invertierten Euklidischen Distanztransformation gesetzt wird [98, 99]. Wenn zwei sich ausbreitende Quellen aufeinandertreffen, wird an diesem Punkt eine Wasserscheide gesetzt [98, 99]. Anschließend wird das Binärbild als Maske über das Ergebnis der Wasserscheidentransformation gelegt, damit nur die Bereiche des Vordergrundes auf dem finalen Bild sichtbar sind, siehe Abb. 2.11 b). Abb. 2.11 b) zeigt, dass es bei Anwendung dieser Methode zur sogenannten Übersegmentierung kommen kann [98, 99]. In diesem Fall wird ein Korn fälschlicherweise in mehrere Kornteile separiert. Hintergrund ist, dass die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Körner nicht kugelförmig sind. Es kann daher vorkommen, dass innerhalb eines Kornes mehrere lokale Minima vorhanden sind.

Eine Möglichkeit zur Vermeidung von Übersegmentierungen ist die Anwendung der vorgefluteten Wasserscheidentransformation [91]. Hierbei wird bei Entstehung einer Wasserscheide zwischen zwei virtuell mit Wasser gefüllten Bereichen die Größe dieser Bereiche überprüft. Hat einer dieser Bereiche eine Größe unterhalb des vom Nutzer festgelegten Grenzwertes, wird dieser Bereich mit dem benachbarten größeren zusammengelegt. Abb. 2.11 c) zeigt das Ergebnis der vorgefluteten Wasserscheidentransformation bei Wahl eines Grenzwertes von 100.

Problem bei Körnern unterschiedlicher Korngröße ist jedoch, dass zum einen das Korn in der rechten oberen Ecke weiterhin übersegmentiert ist und zum anderen gleichzeitig eine Untersegmentierung auftritt. Eine Untersegmentierung besteht zum Beispiel zwischen dem großen mittleren Korn und dem kleinen Korn links davon. Zur Vermeidung dieser Untersegmentierung müsste der Grenzwert gesenkt werden, während zur Vermeidung der Übersegmentierung eine Anhebung erforderlich wäre. Eine Alternative stellt eine vor die Wasserscheidentransformation geschaltete H-Extrematransformation dar. Ziel ist die Reduktion von lokalen Minima der invertierten Euklidischen Distanztransformation, von denen aus die virtuellen Wasserquellen starten [91, 100]. Ob ein lokales Minimum als Ausgangspunkt einer virtuellen Wasserquelle berücksichtigt wird, hängt von dem Parameter  $h$  ab. Abb. 2.12 a) zeigt anhand eines Grauwertprofils entlang eines Schnitts durch die invertierte Euklidische Distanztransformation die Bestimmung dieses Parameters. Der Parameter ist als Höhe definiert, die auf dem Grauwertprofil überwunden werden muss, um von einem lokalen Minimum zum benachbarten lokalen Minimum zu gelangen, welches einen niedrigeren Grauwert  $g$  aufweist als das betrachtete Minimum [91]. Alle lokalen Minima, deren  $h$ -Parameter kleiner ist als ein vom Nutzer festgelegter Grenzwert  $h_{crit}$ , werden bei der anschließenden Wasserscheidentransformation nicht als Ausgangspunkt einer virtuellen Quelle berücksichtigt [91, 100], siehe Abb. 2.12 b). Abb. 2.12 c) zeigt das Ergebnis der Wasserscheidentransformation in Kombination mit der H-Extrematransformation mit einem  $h_{crit}$  von 10. Der Grenzwert wurde derart gewählt, dass keine Übersegmentierung auftritt. Allerdings ist in Abb. 2.12 c) die Untersegmentierung von mehreren Körnern zu sehen, da ein globaler Grenzwert  $h_{crit}$  bei Körnern unterschiedlicher Korngröße lokale Minima von kleineren Körnern unterdrückt. Die Kombination aus H-Extrematransformation und Wasserscheidentransformation eignet sich insbesondere zur Segmentierung von Körnern einer einheitlichen Korngröße.

So verwenden Godehardt und Schladitz [101] diese Methode zur Segmentierung von keramischen Leichtzuschlägen, die in eine Matrix aus Metall oder Polymeren eingebettet sind. Kohlepartikel, die als lose Schüttung tomographiert werden, werden von

Videla et al. [102] mit der Wasserscheidentransformation und einer vorausgehenden H-Extrematransformation segmentiert. Die Autoren stellen jedoch fest, dass das Ergebnis der Segmentierung von der Wahl des Grenzwertes  $h_{crit}$  abhängig ist, der manuell festgelegt werden muss. Aus diesem Grund führen sie einen sogenannten Semi-variogramm-Operator ein, der ein Maß für die mittlere, abgeschätzte Korngröße darstellt. Nähere Informationen zur Bestimmung dieses Operators können [102] entnommen werden. Der Wert  $h_{crit}$  wird anschließend zur Hälfte der derart abgeschätzten Korngröße gesetzt. Als Resultat bleibt eine Fehlsegmentierungsrate von 4 % der Körner.

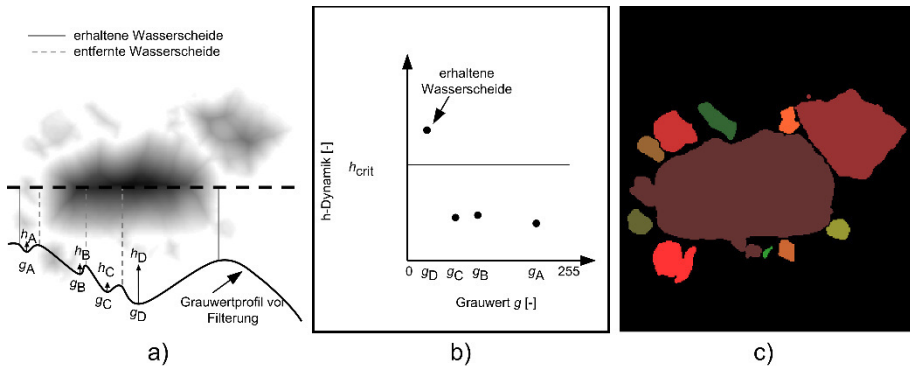


Abb. 2.12: Veranschaulichung der Kornsegmentierung anhand eines zweidimensionalen Querschnitts durch eine Sandprobe mit a) invertierter Euklidischer Distanztransformation mit beispielhaften Grauwertprofil und Parametern der H-Extrematransformation, b) Prinzip der H-Extrematransformation und c) Ergebnis der Kornsegmentierung bei Verwendung der H-Extrematransformation mit  $h_{crit}=10$ .

Statt eines konstanten Grenzwertes  $h_{crit}$  verwendet die adaptive H-Extrematransformation einen Grenzwert  $h_{crit}(g)$ , der von der Höhe des Grauwerts  $g$  abhängig ist [91]. Der Nutzer gibt einen Grenzwert  $h_{crit}(0)$  für lokale Minima mit niedrigem Grauwert vor sowie einen zweiten  $h_{crit}(255)$  für lokale Minima mit hohem Grauwert. Lokale Minima mit niedrigem Grauwert gehören dabei potenziell zu großen Körnern, während lokale Minima mit hohem Grauwert potenziell zu kleinen Körnern gehören. In diesem Beispiel wird davon ausgegangen, dass die invertierte Euklidische Distanztransformation, siehe Abb. 2.13 a), Grauwerte auf einer 8 bit-Skala aufweist, folglich zwischen 0 und 255. Für Grauwerte zwischen 0 und 255 wird der Grenzwert  $h_{crit}$  linear interpoliert, siehe Abb. 2.13 b). Das Ergebnis der adaptiven H-Extrematransformation mit  $h_{crit}(0)=10$  und  $h_{crit}(255)=1$  ist in Abb. 2.13 c) zu sehen. Im Unterschied zu Abb. 2.11 und Abb. 2.12 ist weder eine Über- noch eine Untersegmentierung erkennbar. Die Güte der Segmentierung hängt jedoch stark von der Wahl von  $h_{crit}(0)$  und  $h_{crit}(255)$  ab, die manuell vom Nutzer festgelegt werden müssen. Dieses Verfahren wenden Godehardt und Schladitz [101] zur Segmentierung der Luftporen innerhalb des bereits erwähnten keramischen Leichtzuschlages an, da aufgrund der großen Unterschiede zwischen der Größe der einzelnen Luftporen die H-Extrematransformation in Kombination mit der Wasserscheidentransformation zu Fehlsegmentierungen führt.

Eine Filterung der lokalen Minima der Distanztransformation vor Einsatz der Wasserscheidentransformation verwenden Zheng et al. [103] zur Segmentierung von Bodenpartikeln, wobei lediglich zweidimensionale Aufnahmen bearbeitet werden. Die Autoren schlagen ein Verfahren zur automatisierten Festlegung der Steigung der Geraden zwischen  $h_{crit}(0)$  und  $h_{crit}(255)$  vor, welches auf der Auswertung mehrerer 100.000 Körner beruht. Demnach sollten Wasserscheiden zwischen Kornteilen entfernt werden, wenn das Verhältnis aus  $h$ -Parameter zu Grauwert  $g$  eines lokalen Minimums kleiner als 0,14 ist. Übertragen auf die Darstellung in Abb. 2.13 b) entspricht dies einer adaptiven H-Extrematransformation mit einer Steigung der Geraden  $h_{crit}(g)$  von 0,14. Die vom Nutzer definierten Grenzwerte betragen  $h_{crit}(255)=0$  und  $h_{crit}(0)=255 \cdot 0,14=36$ . Für das im Rahmen der Studie von Zheng et al. verwendete Beispiel konnten keine Fehlsegmentierungen detektiert werden.

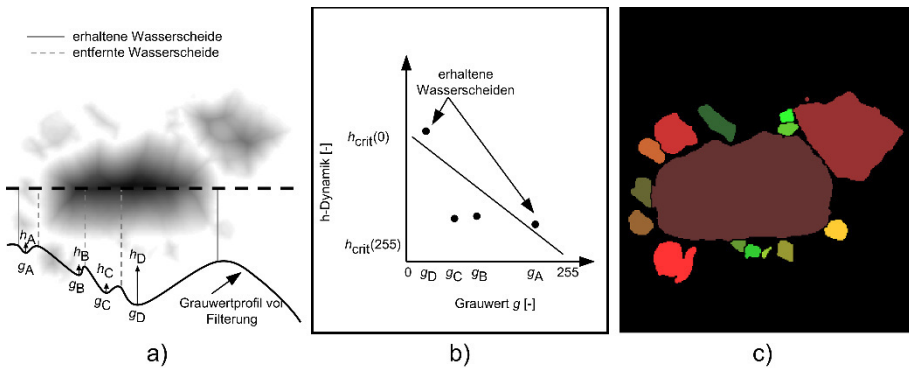


Abb. 2.13: Veranschaulichung der Kornsegmentierung anhand eines zweidimensionalen Querschnitts durch eine Sandprobe mit a) invertierter Euklidischer Distanztransformation mit beispielhaften Grauwertprofil und Parametern der adaptiven H-Extrematransformation, b) Prinzip der adaptiven H-Extrematransformation und c) Ergebnis der Kornsegmentierung bei Verwendung der adaptiven H-Extrematransformation, in Anlehnung an [104].

Neben den bereits vorgestellten Verfahren existieren weitere Verfahren zur Segmentierung von sich berührenden Körnern auf 2D- oder 3D-Aufnahmen. Diese Verfahren weichen in einem oder mehreren Punkten von dem vorgestellten Prozedere aus Erstellung eines Binärbildes, Bestimmung der invertierten Euklidischen Distanztransformation und Anwendung einer nicht-adaptiven oder adaptiven H-Extrematransformation und anschließender Wasserscheidentransformation ab. Hierzu zählt das von Sun und Luo [105] vorgestellte Verfahren zur Segmentierung von sich berührenden Körnern auf zweidimensionalen Aufnahmen. Statt einer nicht-adaptiven oder adaptiven H-Extrematransformation schlagen die Autoren vor, überflüssige lokale Extrema der Euklidischen Distanztransformation auf Basis eines Überlappungsparameters zu entfernen, der aus den Grauwerten von zwei benachbarten lokalen Extrempunkten berechnet wird. Wird eine Überlappung von zwei Kornteilen festgestellt, wird der Ausgangspunkt der virtuellen Wasserquelle des kleineren Kornteils entfernt. Im hier vorgestellten Beispiel führt das vorgestellte Verfahren zu keiner Fehlsegmentierung.

Verschiedene Autoren stellen des Weiteren Verfahren vor, die vor einer Segmentierung von Körnern versuchen, die Kontaktpunkte zwischen benachbarten Körnern auf dem Binärbild zu reduzieren. So bearbeiten Matsushima et al. [106] das Binärbild von tomographierten Bodenproben mit vier Erosionszyklen. Jeder Erosionszyklus führt dabei zu einer Entfernung von Vordergrundvoxeln, die den Kornrand bilden [91]. Ziel ist, dass Kontaktpunkte zwischen Körnern auf diese Art und Weise minimiert werden. Jeder Gruppe von sich berührenden Voxeln wird anschließend ein Label zugewiesen. In einem letzten Schritt werden die Vordergrundvoxel, die durch Erosion entfernt wurden, nach einem nicht genannten Kriterium den gelabelten Körnern wieder zugeordnet. Im Ergebnis können die Autoren allerdings keine Vermeidung von Fehlsegmentierungen beobachten.

Ein anderer Ansatz basiert auf der Verbesserung der Erstellung des Binärbildes anhand eines selbstlernenden Algorithmus, dem WEKA-Algorithmus [107]. Auf das Grauwertbild werden verschiedene Filter angewandt, deren Ergebnisse in die Entscheidung mit einfließen, ob ein Voxel dem Vorder- oder Hintergrund zuzuordnen ist [108–110]. Ziel ist, dass im Bereich von möglichen Kornkontakten eine deutlichere Trennung der Körner durch Hintergrundvoxel sichtbar ist. Wang et al. [108] verwenden diese Art der Erstellung eines Binärbildes und segmentieren anschließend die Körner mit einer Kombination aus H-Extrematransformation und Wasserscheidentransformation, wobei der Semivariogramm-Operator nach Videla et al. [102] zum Einsatz kommt. Im Ergebnis kann die Fehlsegmentierungsrate bei Anwendung des WEKA-Algorithmus von über 24 % auf unter 9 % reduziert werden. Nachteil dieser Methode ist, dass die Fehlsegmentierungsrate bei Schüttungen aus Körnern unterschiedlicher Größe hoch ist. Wang et al. [109] stellen daher eine Weiterentwicklung dieses Verfahrens vor, bei dem zwischen der Extraktion von Ausgangspunkten virtueller Wasserquellen für große und kleine Körner unterschieden wird. Die Ausgangspunkte in großen Körnern werden, durch Anwendung eines globalen Schwellenwertes auf das Bild der Euklidischen Distanztransformation, extrahiert. Anschließend werden die Ausgangspunkte für kleine Körner anhand der H-Extrematransformation identifiziert. Nach einer Wasserscheidentransformation liegt die Fehlsegmentierungsrate bei Anwendung dieses Verfahrens bei unter 3 %. Neben der Wasserscheidentransformation existieren Verfahren wie zum Beispiel von Lai und Chen [110] oder Bai et al. [111], bei denen die Erkennung von Kornkanten im Vordergrund steht. Hierfür kommen Filter wie zum Beispiel der Sobel-Filter zum Einsatz, die deutliche Unterschiede in den Grauwerten von benachbarten Bildbereichen detektieren können [111]. Auch bei diesen Verfahren kann es jedoch zu Fehlsegmentierungen insbesondere im Bereich von Kornkontakten kommen.

### **2.1.8 Messungenauigkeit**

Jede Bestimmung eines Wertes, unabhängig von der verwendeten Messmethode, ist mit einer Ungenauigkeit behaftet. Die Messungenauigkeit beschreibt die realistisch erwartbaren Abweichungen einer Messung vom wahren Messwert [112]. Die Schwierigkeit bei der Bestimmung der Messungenauigkeit von Größen wie zum Beispiel den Kornabmessungen oder dem Kornvolumen liegt in der großen Anzahl an möglichen Einflussfaktoren, die teilweise nicht oder nur schwierig zu quantifizieren sind [113–115]. Wesentliche Einflussgrößen resultieren aus dem Messsystem wie zum Beispiel der Röntgenquelle, der Brennfleckgröße dem Detektor oder der Genauigkeit der Achs-



einstellung. Weitere Einflussgrößen sind die vom Nutzer verwendeten Einstellungen zur Anfertigung einer CT-Aufnahme wie Spannung, Stromstärke oder Voxelgröße sowie Einflüsse aus der Umgebung des Messsystems, unter anderem die Raumtemperatur oder die Staubbelastung [113–116]. Nach Erstellung der CT-Aufnahme kommen weitere Einflussfaktoren auf die Messungenauigkeit aus der Bildbearbeitung hinzu. Dies betrifft zum Beispiel verwendete Filter oder das Schwellenwertverfahren zur Erstellung eines Binärbildes [113, 115].

Ein mögliches Verfahren zur Bestimmung der Messungenauigkeit von CT-Aufnahmen beschreibt die VDI-Richtlinie 2630 Blatt 2.1 [117]. Bestimmt wird die erweiterte Messungenauigkeit  $U_{MP}$ , die neben den Beiträgen der verschiedenen Einflussgrößen auf die Messungenauigkeit auch einen statistischen Erweiterungsfaktor  $k$  beinhaltet, sodass die Messungenauigkeit mit einer definierten Überdeckungswahrscheinlichkeit angegeben werden kann. Das Verfahren nach VDI-Richtlinie 2630 Blatt 2.1 basiert auf der Analyse eines Referenzobjektes, welches sowohl tomographiert als auch mit einem weiteren, anerkannten Messverfahren, kalibriert wird.

Wichtige Einflussfaktoren im Hinblick auf die Ungenauigkeit von Messungen verschiedener Größen wie Länge, Oberfläche oder Volumen von Objekten stellen die Auflösung und der in diesem Zusammenhang auftretende Partialvolumeneffekt dar. Der Partialvolumeneffekt resultiert aus der Erfassung des Bildes in Form von Detektorpixeln beziehungsweise der diskreten Darstellung anhand von Voxeln. Dies führt zu einer Beeinflussung des Messergebnisses in zweierlei Hinsicht [118, 119]. Lin et al. [119] unterscheiden in diesem Zusammenhang zwischen systematischen Fehlern und zufälligen Fehlern. Erstens kommt es zum Partialvolumeneffekt bei der Registrierung der einzelnen Projektionen durch den Detektor. Der Grauwert, der von einem Detektorpixel registriert wird, spiegelt die Materialeigenschaften des Objektes in einem Bereich wider, der der Detektorpixelgröße entspricht [118]. Sind entweder die Materialeigenschaften in diesem Bereich inhomogen oder der betrachtete Bereich befindet sich am Übergang von Objekt zu Hintergrund, entspricht der registrierte Grauwert dem Mittelwert der tatsächlich vorhandenen Materialeigenschaften in diesem Bereich [51, 118, 120, 121]. Wie stark die Messungenauigkeit resultierend aus diesem Partialvolumeneffekt ist, hängt unter anderem von der Orientierung des Objektes relativ zu der Anordnung der Pixel auf dem Detektor ab und stellt somit einen zufälligen Fehler dar [119].

Neben einer Ungenauigkeit in der Darstellung von Übergängen zwischen unterschiedlichen Materialeigenschaften bewirkt dieser Partialvolumeneffekt die Entstehung von Streifenartefakten auf der CT-Aufnahme [118, 121]. Darüber hinaus tritt der Partialvolumeneffekt bei der Umwandlung des Grauwertbildes in ein Binärbild auf. Voxel die auf dem Grauwertbild den Übergang zwischen Objekt und Hintergrund markieren, werden je nach gewähltem Schwellenwert entweder dem Vorder- oder dem Hintergrund zugeordnet, sodass es in diesem Bereich entweder zu einer gewissen Vergrößerung oder Verkleinerung des Objektes kommt [119, 122]. Bei Verwendung eines globalen Schwellenwertes für die gesamte CT-Aufnahme stellt die Über- oder Unterschätzung der tatsächlichen Objektabmessungen einen systematischen Fehler dar [119]. Der Partialvolumeneffekt kann durch eine erhöhte Auflösung minimiert werden [118, 121]. Es ist jedoch zu beachten, dass die Auflösung einer CT-Aufnahme nicht der Voxelgröße entspricht [122]. Die Auflösung gibt an, bis zu welcher Größe Objekte auf einer

CT-Aufnahme unterscheidbar sind [122]. In der Regel ist es erforderlich, dass ein Objekt anhand mehrerer Voxel dargestellt werden muss, um in Größe und Form analysiert werden zu können. In Tab. 2.1 sind die verwendeten Voxelgrößen zusammengefasst, die für die Anfertigung von CT-Aufnahmen von Gesteinskörnungsproben der angegebenen Korngrößen in verschiedenen Studien genutzt wurden. Das Verhältnis  $R_{\min}$  aus minimaler Korngröße zu Voxelgröße  $VS$  ist dabei ein Maß für die erreichte strukturelle Auflösung und gibt an wie viele Voxel mindestens erforderlich für die Darstellung der Korngröße sind. Es zeigt sich, dass große Unterschiede im Hinblick auf die strukturelle Auflösung der CT-Aufnahmen existieren.

Lehmann et al. [123] führen eine Studie zum Einfluss der Voxelgröße im Vergleich zur untersuchten Korngröße sowohl auf Basis von CT-Aufnahmen von Sandkörnern als auch simulierten digitalen Körnern und Kugeln durch. Die Voxelauflösung ist hierbei definiert als das Verhältnis aus Voxelgröße zu mittlerer Korngröße. Analysiert wird unter anderem der Einfluss auf den mittleren Durchmesser sowie die Oberfläche. Im Ergebnis empfehlen die Autoren, dass das Verhältnis aus Voxelgröße zu mittlerer Korngröße für die Bestimmung des mittleren Durchmessers kleiner als 0,23 sein sollte, während für die Bestimmung der Oberfläche ein Wert kleiner 0,10 erforderlich ist. Eine Studie von Lin et al. [119] kommt zu dem Ergebnis, dass zur Volumenbestimmung bei einer maximalen Messungenauigkeit von 10 % jedes Objekt durch mindestens 260 Voxel dargestellt werden sollte. Dies entspricht umgerechnet einem  $R_{\min}$  von 6,38. Neumann et al. [124] stellen anhand einer Analyse von numerisch simulierten Körnern fest, dass ab einem  $R_{\min}$  von 20 die Messungenauigkeit für die Volumenbestimmung sogar bei unter 0,2 % liegt.

Tab. 2.1: Verwendete Voxelgröße zur Anfertigung von CT-Aufnahmen von Körnern unterschiedlicher Größe, die daraus resultierende strukturelle Auflösung der CT-Aufnahme sowie Angabe der Veröffentlichung, in Anlehnung an [125].

Korngröße [ $\mu\text{m}$ ]	Voxelgröße [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\min}$ [-]	Veröffentlichung
20-1.200	1,02-19,86	19,65-60,42	Estephane et al. [25]
38-75	2,0	19,0-37,5	Erdogan et al. [35]
40	3,97	10,08	Taylor et al. [34]
90	8	11,25	Erdogan et al. [126]
150-425	4,59	32,8-92,6	Wang et al. [108]
350-5.000	18,52	18,89-269,98	Wang et al. [109]
6.350-76.200	321,45	19,75-237,05	Wang et al. [109]
1.000-2.000	15	66,67-133,33	Zhao et al. [93]
1.000-2.000	60	16,67-33,33	Lai et al. [110]
4-250	0,32-3,87	12,5-64,6	Cepuritis et al. [127]

### 2.1.9 Zusammenfassung und Festlegung von Parametern zum Tomographieren und zur Bildbearbeitung

Im Rahmen dieser Arbeit sollen CT-Aufnahmen von Gesteinskörnungen angefertigt werden, die die Grundlage zur Charakterisierung von morphologischen Eigenschaften der Körner bilden, um anschließend deren Einfluss auf Frisch- und Festmörteleigenschaften zu analysieren. Ein geeignetes Verfahren zur Anfertigung von CT-Aufnahmen sowie deren Bildbearbeitung im Rahmen dieser Arbeit umfasst die weitestgehend automatisierte Bestimmung morphologischer Parameter einer repräsentativen Anzahl an Körnern einer Gesteinskörnungsprobe bei minimalem Zeit- und Bearbeitungsaufwand. Hierfür ist das Tomographieren einer großen Anzahl von Körnern, idealerweise als lose Schüttung, erforderlich. Auf Basis der Ergebnisse der Literaturrecherche aus den Abschnitten 2.1.1 bis 2.1.8 sowie den Anforderungen aus DIN EN ISO 15708-2 wird im Folgenden ein auf die Messaufgabe abgestimmtes Konzept zur Anfertigung von CT-Aufnahmen von Gesteinskörnungsproben abgeleitet, welches in Tab. 2.2 zusammengefasst ist.

Tab. 2.2: Zusammenfassung der Anforderungen an das Konzept zur Erstellung und Bearbeitung von CT-Aufnahmen von Gesteinskörnungsproben.

Parameter	Anforderung
Stromspannung und Stromstärke	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Registrierte Grauwerte zwischen <math>13.107 &lt; g &lt; 52.429</math></li> <li>• Die Leistung in Watt als Produkt aus Stromspannung und Stromstärke ist kleiner als die Voxelgröße in <math>\mu\text{m}</math></li> </ul>
Belichtungsdauer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wahl einer möglichst langen Belichtungsdauer</li> <li>• Wahrung einer annehmbaren Gesamtdauer der Erstellung der CT-Aufnahme</li> </ul>
Bildmittelungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindestens drei</li> </ul>
Vorfilterung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verwendung eines Aluminiumfilters</li> <li>• Bedingung ist, dass die Anforderungen an den minimalen Grauwert erfüllt werden</li> </ul>
Flat-Field-Korrektur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchführung vor Beginn der Erstellung der CT-Aufnahme</li> </ul>
Anzahl an Projektionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindestens entsprechend dem Durchmesser der Probe in Pixeln multipliziert mit dem Faktor <math>0,5 \cdot \pi</math></li> </ul>
Rekonstruktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feldkamp-Davis-Kress Algorithmus</li> <li>• Shepp-Logan Filter</li> </ul>
Bildbearbeitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Glättung mit 3er-Medianfilter</li> <li>• Umwandlung in ein Binärbild mit dem globalen Schwellenwertverfahren nach Otsu</li> </ul>

Zur Festlegung von Spannung und Stromstärke ist die Berücksichtigung dreier Aspekte erforderlich. Erstens hängt die Größe des optischen Brennflecks nach DIN EN

ISO 15708-2 von der Leistung  $P$  der Röntgenstrahlung, dem Produkt aus Stromspannung und Stromstärke, ab und beeinflusst damit die geometrische Unschärfe im Randbereich des durchstrahlten Objektes. Um den Einfluss der geometrischen Unschärfe in Abhängigkeit von der Auflösung der CT-Aufnahme zu begrenzen, existiert eine Faustformel [128], die besagt, dass die Leistung in Watt als das Produkt aus Stromspannung und Stromstärke kleiner sein sollte als die eingestellte Voxelgröße in  $\mu\text{m}$ . Zweitens limitiert der in Abschnitt 2.1.2 erläuterte lineare Bereich des Detektors das Energieniveau sowie die Intensität der Röntgenstrahlung. Stromspannung und Stromstärke sollten derart gewählt werden, dass nach Durchstrahlung des Objektes die vom Detektor registrierten Grauwerte unterhalb des Sättigungspunktes und damit im linearen Bereich des Detektors liegen. Für den hier verwendeten 16 bit-Detektor bedeutet dies, dass die maximal vom Detektor registrierten Grauwerte kleiner als  $g < 0.8 \cdot 65.536 = 52.429$  liegen sollten. Als dritter Punkt ist die minimale Stromspannung und Stromstärke zu berücksichtigen, die erforderlich wird, um auch Bereiche hoher Dichte zu durchstrahlen. Nach DIN EN ISO 15708-2 sollte die Intensität der Röntgenstrahlung nach Durchstrahlung der Probe mindestens 10-20 % der Anfangsintensität  $I_0$  betragen. Dies bedeutet, dass die minimal registrierten Grauwerte bei  $g > 0.2 \cdot 65.536 = 13.107$  liegen sollten.

Die Wahl von Belichtungsdauer und Anzahl an Bildmittelungen erfolgt vor dem Hintergrund einer maximalen Reduktion von den in Abschnitt 2.1.4 beschriebenen Rauschartefakten. Aus diesem Grund ist eine lange Belichtungsdauer erstrebenswert. Gleiches gilt für die Anzahl an Bildmittelungen. Im Spannungsfeld zwischen Zeitbedarf und Rauschminimierung werden mindestens drei Aufnahmen je Projektion gemittelt. Es wird die maximale Belichtungsdauer gewählt, die noch zu einer annehmbaren Dauer der Erstellung der CT-Aufnahme führt. Zur Reduktion von in Abschnitt 2.1.4 erläuterten Artefakten auf der CT-Aufnahme werden weitere Maßnahmen getroffen: Zur Reduktion von stationären Rauschartefakten wird vor Beginn einer CT-Aufnahme eine Flat-Field-Korrektur durchgeführt. Artefakte aus Strahlaufhärtung werden durch Vorschaltung eines Aluminiumfilters minimiert.

Ein weiterer vom Nutzer festzulegender Parameter für die Anfertigung von CT-Aufnahmen ist die erforderliche Anzahl an Projektionen. Nach Abschnitt 2.1.3 steigt die Schärfe der rekonstruierten CT-Aufnahme mit zunehmender Anzahl an angefertigten Projektionen. Gleichzeitig steigt der Zeitbedarf mit zunehmender Anzahl an Projektionen. Nach DIN EN ISO 15708-3 sollte die Anzahl an Projektionen mindestens dem Durchmesser der tomographierten Probe, angegeben als Anzahl an Pixeln, multipliziert mit dem Faktor  $0,5 \cdot \pi$  betragen.

Nach Abschnitt 2.1.3 erfolgt die Rekonstruktion der Projektionen zur dreidimensionalen CT-Aufnahme unter Verwendung des Feldkamp-Davis-Kress-Algorithmus sowie eines Shepp-Logan-Filters. Zur Minimierung von Artefakten aus Streustrahlung und Rauschen wird das Grauwertbild nach Rekonstruktion mit einem 3er-Medianfilter geglättet. Die Erstellung eines Binärbildes erfolgt unter Verwendung des globalen Schwellenwertverfahrens nach Otsu.

Tab. 2.2 zeigt die im Rahmen dieser Arbeit auf Basis der in Abschnitt 2.1.1 bis 2.1.8 beschriebenen Grundlagen zu Computertomographie und Bildbearbeitung festgeleg-

ten Parameter zur Anfertigung von CT-Aufnahmen von Gesteinskörnungsproben. Allerdings können aufgrund einer nicht vorhandenen Datenbasis für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Messaufgabe nicht alle relevanten Parameter festgelegt werden. Die in den folgenden Abschnitten 2.2 und 2.3 vorgestellten Untersuchungsergebnisse dienen daher der näheren Betrachtung folgender Fragestellungen:

1. Welche Voxelgröße ist erforderlich, um Kornabmessungen, Kornoberfläche und Kornvolumen mit einer möglichst kleinen Messungenauigkeit zu bestimmen, während gleichzeitig eine möglichst große Anzahl an Körnern tomographiert werden kann?
2. Ist eine Probenpräparation in Form einer Separierung von Körnern vor Anfertigung einer CT-Aufnahme erforderlich?
3. Ist eine automatisierte Segmentierung von Körnern möglich, wenn Kontakt zwischen Körnern auf dem Binärbild der CT-Aufnahme besteht?

## **2.2 Einflussfaktoren auf die Messungenauigkeit von CT-Aufnahmen der Gesteinskörnung**

### **2.2.1 Einfluss der Voxelgröße auf die Messungenauigkeit von CT-Aufnahmen**

#### **2.2.1.1 Einleitung**

Eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst die Messungenauigkeit von CT-Aufnahmen, wovon die minimale Größe der tomographierten Körner im Verhältnis zur vom Nutzer gewählte Voxelgröße  $R_{\min}$  einer ist, wie in Abschnitt 2.1.8 erläutert. Soll die CT zur morphologischen Charakterisierung der Gesteinskörnung in der Praxis genutzt werden, ist es erforderlich, eine repräsentative Anzahl von Körnern mit möglichst niedriger Messungenauigkeit bei möglichst geringem Zeitaufwand zu tomographieren. Unabhängig davon, ob es sich um Mikroskopie-, Photographie- oder CT-Aufnahmen handelt, stehen diese Kriterien im Widerspruch zueinander [33, 35, 129]. Je größer die gewählte Voxelgröße, desto kleiner ist die Anzahl an Körnern, die auf einer Aufnahme abgebildet werden können. Die in Tab. 2.1 gelisteten Verhältnisse aus Korngröße zu Voxelgröße von  $10 < R_{\min} < 270$  zeigen, dass in der Forschung sehr unterschiedliche strukturelle Auflösungen zur dreidimensionalen Abbildung von Körnern zum Einsatz kommen. Empfehlungen zur minimalen Anzahl an Voxeln zur Darstellung des Korndurchmessers, liegen überwiegend zwischen 4 und 10 [33, 123, 130–133] und damit tendenziell unterhalb der in den in Tab. 2.1 gelisteten Studien verwendeten Verhältnisse aus Korngröße zu Voxelgröße. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden der Einfluss der Voxelgröße auf die Messungenauigkeit untersucht, mit dem Ziel, eine Mindestanforderung an das Verhältnis aus Korngröße zu Voxelgröße  $R_{\min}$  für CT-Aufnahmen zur morphologischen Charakterisierung von Gesteinskörnungen zu formulieren. Die folgend vorgestellten Versuchsergebnisse wurden in [125] vorab veröffentlicht.

### 2.2.1.2 Versuchsablauf

Die Untersuchung zum Einfluss der Voxelgröße auf die Messungengenauigkeit basiert auf dem wiederholten Tomographieren von 80 einzelnen Körnern mit einer Siebgröße zwischen 2 mm und 20 mm bei unterschiedlichen Voxelgrößen  $VS$ . Für jedes Korn wird die Kornlänge  $l$ , definiert als der größte Abstand zwischen zwei Punkten auf der Kornoberfläche, die Kornoberfläche  $O_{\text{Korn}}$  und das Kornvolumen  $V_{\text{Korn}}$  bestimmt.

Als Referenzwert für  $l$ ,  $O_{\text{Korn}}$  und  $V_{\text{Korn}}$  dient der bei einer Voxelgröße von  $VS=25\ \mu\text{m}$  ermittelte Messwert. Zur Abschätzung der mit diesem Referenzmesswert behafteten Ungenauigkeit wird eine Hochpräzisionskugel aus Glas wiederholt bei einer Voxelgröße von  $25\ \mu\text{m}$  tomographiert. Jedes Korn wird anschließend zusätzlich bei einer Voxelgröße von  $40\ \mu\text{m}$ ,  $55\ \mu\text{m}$ ,  $70\ \mu\text{m}$  und  $85\ \mu\text{m}$  tomographiert. Die Bestimmung der erweiterten Messungengenauigkeit  $U_{\text{MP}}$  erfolgt in Anlehnung an das in der VDI-Richtlinie 2630 Blatt 2.1 [117] beschriebene Verfahren.

### 2.2.1.3 Materialien

Aus drei Arten von Gesteinskörnungen werden die 80 Einzelkörner entnommen. Als Materialien kommen Rheinkies, Quarzkies und gebrochener Mikrodioritsplitt zum Einsatz, siehe Abb. 2.14. Charakteristische Eigenschaft des Rheinkies ist die heterogene Materialzusammensetzung, die gerundete Oberfläche sowie die erhöhte Rauigkeit der Oberfläche aufgrund natürlicher Verwitterungsprozesse. Quarzkies hingegen setzt sich aus Körnern homogenen Materials zusammen. Ein Großteil der Körner weist eine hohe Sphärizität auf und die Kornoberfläche ist überwiegend glatt. Aufgrund des Brechprozesses weisen die Körner der Splittkörnung eine hohe Eckigkeit und hohe Rauigkeit auf. Die Materialzusammensetzung ist in diesem Fall sehr homogen.



Abb. 2.14: Verwendete Gesteinskörnungsarten zur Auswahl der Einzelkörner, hier dargestellt sind Schüttungen mit Körnern zwischen 2 mm und 8 mm Siebgröße: Rheinkies (links), Quarzkies (mittig) und gebrochener Mikrodioritsplitt (rechts).

Die Auswahl der Einzelkörner erfolgte sowohl nach dem Kriterium Korngröße als auch nach dem Kriterium Kornform. Tab. 2.3 zeigt bei Verwendung eines Siebsatzes zusammengestellt aus den in Spalte 1 angegebenen Sieben die Anzahl der ausgewählten Körner je Gesteinskörnungsart und unterer Siebgröße. Von den 24 Rheinkieskör-

nern größer 4 mm gelten 4 als plattig nach DIN EN 933-3. Von den 16 Quarzkieskörnern sind 7 plattig und von den 20 Splittkörnern größer 4 mm zählen 10 als plattig. Neben den Körnern wird eine Hochpräzisionskugel aus Kalknatronglas (Sigmund Lindner) mit den Durchmessern von 5 mm neunmal hintereinander tomographiert. Der Durchmesser dieser Kugel wird zudem zur Bestimmung der Messgenauigkeit verbunden mit diesem Referenzobjekt 20-mal mit einer Messschraube mit einer Toleranz von  $\pm 0,001$  mm vermessen.

Es werden jeweils vier bis fünf Körner einer Siebgröße und einer Materialart zusammen tomographiert. Die Körner werden hierfür in einem Prisma aus Steckschwamm befestigt, sodass kein Kontakt zwischen den Körnern besteht. Steckschwamm ist als Probenhalterung geeignet, da dieses Material die Röntgenstrahlung im Vergleich zu den Körnern nur in sehr geringem Maße abschwächt und daher auf der CT-Aufnahme nicht sichtbar ist. Die durch Steckschwamm getrennten Körner werden in einem zylindrischen Gefäß aus Acrylglas befestigt, das der Zentrierung auf dem Probenhalter des CT-Systems dient. Zusätzlich wird die Referenzkugel ebenfalls in einer Halterung aus Steckschwamm befestigt und in einem zylindrischen Acrylglasgefäß tomographiert.

Tab. 2.3: Anzahl der ausgewählten Einzelkörner der jeweiligen unteren Siebgröße und Materialart.

Untere Siebgröße [mm]	Anzahl an Rhein- kieskörnern [-]	Anzahl an Quarz- kieskörnern [-]	Anzahl an Splitt- körnern [-]
2	5		5
3,15	5		5
4	4	4	
5		4	4
6,3		4	
8	4	4	4
12,5	4		4
16	8		4
20	4		4

#### 2.2.1.4 Anfertigung von CT-Aufnahmen und Bildbearbeitung

Die vorbereiteten Proben werden auf dem Probenhalter des in Abschnitt 2.1.1 gezeigten CT-Systems CT ALPHA-240 (ProCon X-Ray) mit einem 16 bit-Flachbildszintillationsdetektor der Größe 2.144 x 1.760 Pixel bei einer Pixelgröße von 139  $\mu$ m platziert. Die Parameter zum Tomographieren der Proben werden entsprechend den Vorgaben aus Abschnitt 2.1.9, Tab. 2.2 gewählt. Da Körner unterschiedlichen Materials bei unterschiedlicher Voxelgröße tomographiert werden, variieren die Parameter zur Anfertigung der CT-Aufnahme. Die Stromspannung variiert zwischen 120 kV und 180 kV, die

Stromstärke zwischen  $150 \mu\text{A}$  und  $200 \mu\text{m}$  und die Belichtungsdauer zwischen  $0,1 \text{ s}$  und  $0,5 \text{ s}$ . Je nach Voxelgröße wird die Anzahl der Projektionen an das in Tab. 2.2 gelistete Kriterium angepasst, sodass zwischen 400 und 1.680 Projektionen pro Probe aufgenommen werden. Zur Reduktion von Artefakten wird eine Flat-Field-Korrektur sowie eine Bildmittelung von je fünf Bildern pro Projektion durchgeführt. Die Projektionen werden mit VGSTUDIO 3.2 (Volume Graphics) unter Verwendung des Feldkamp-Davis-Kress Algorithmus sowie einem Shepp-Logan Filter rekonstruiert. Anschließend erfolgt die Bildbearbeitung mit ToolIP erweitert durch MAVIkit [134] (Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM)). Die einzelnen Schritte der Bildbearbeitung sind anhand eines Beispiels von zwei Rheinkieskörnern in Abb. 2.15 dargestellt. Die im Folgenden vorgestellten Verfahren zur Identifikation des Probengefäßes sowie zur Filterung und Verbesserung der Bildqualität des Grauwertbildes wurden vom ITWM entwickelt und zur Verfügung gestellt. Weitere Informationen hierzu können [125] entnommen werden.

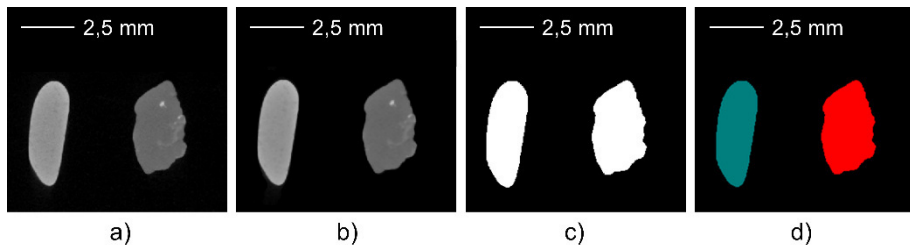


Abb. 2.15: Ablauf der Bildbearbeitung der Einzelkörner beispielhaft für zwei Rheinkieskörner mit a) Originalgrauwertbild, b) Grauwertbild nach Glättung, c) Binärbild und d) gelabelte Einzelkörner.

Zunächst erfolgt die Identifikation des Probengefäßes aus Acrylglas, welches entfernt wird. Anschließend wird die CT-Aufnahme mit einem 3er-Medianfilter geglättet. Sowohl in Radialrichtung als auch entlang der Rotationsachse des CT-Systems kann es zu kontinuierlichen Grauwertänderungen kommen, welche in einem folgenden Schritt ausgeglichen werden. Das Grauwertbild vor und nach Glättung ist in Abb. 2.15 a) und b) zu sehen. Die Extraktion der Körner vom Hintergrund erfolgt unter Verwendung des in Abschnitt 2.1.6 beschriebenen globalen Schwellenwertverfahrens nach Otsu, siehe Abb. 2.15 c). Ein Teil der tomographierten Körner enthält Hohlräume im Inneren des Kornes. Da im Rahmen dieser Arbeit die äußere Form der Körner anhand von morphologischen Parametern beschrieben werden soll, werden diese Hohlräume unter Verwendung eines Fill-Holes Algorithmus geschlossen. Dieses Vorgehen verhindert zudem, dass in die Bestimmung der Oberfläche  $O_{\text{Korn}}$  Flächen aus dem inneren des Kornes eingerechnet werden. Die Auswirkung auf  $V_{\text{Korn}}$  und  $I$  sind hingegen gering, wie eine Analyse in [125] zeigt. Detaillierte Informationen zur Funktionsweise dieses Algorithmus können [100] entnommen werden. Die tomographierten Körner berühren sich auf der CT-Aufnahme nicht, daher erfolgt die Zuweisung eines Labels anhand eines einfachen Labelings, bei dem alle Voxel, die in Kontakt zueinander stehen, das gleiche Label zugewiesen bekommen. Abb. 2.15 d) zeigt das Resultat des Labelings, wobei jede Farbe ein Label repräsentiert. Die Parameter zur Beschreibung der Größe der Körner  $I$ ,  $O_{\text{Korn}}$  und  $V_{\text{Korn}}$  werden mit MAVI erweitert durch MAVIparticle [97, 135] (ITWM) berechnet.



### 2.2.1.5 Versuchsauswertung und statistische Methoden

Der Referenzwert für  $V_{\text{Korn}}$ ,  $O_{\text{Korn}}$  und  $l$  wird basierend auf der CT-Aufnahme eines Kornes, aufgenommen bei einer Voxelgröße von 25  $\mu\text{m}$ , bestimmt. Für die CT-Aufnahmen bei 40  $\mu\text{m}$ , 55  $\mu\text{m}$ , 70  $\mu\text{m}$  und 85  $\mu\text{m}$  wird nach Gleichung (2.4) bis (2.6) jeweils die Differenz der Messgröße zu diesem Referenzwert bestimmt. In diesem Fall spielt das Vorzeichen der festgestellten Abweichung vom Referenzwert eine untergeordnete Rolle, weswegen eine Betrachtung der Absolutwerte erfolgt. Dies trägt zudem zur Einhaltung der im folgenden beschriebenen Voraussetzungen für die durchgeführte lineare Regressionsanalyse bei.

$$\Delta V_{\text{Korn-}i} = \left| \frac{V_{\text{Korn-}25} - V_{\text{Korn-}i}}{V_{\text{Korn-}25}} \right| \quad (2.4)$$

$$\Delta O_{\text{Korn-}i} = \left| \frac{O_{\text{Korn-}25} - O_{\text{Korn-}i}}{O_{\text{Korn-}25}} \right| \quad (2.5)$$

$$\Delta l_i = \left| \frac{l_{25} - l_i}{l_{25}} \right| \quad (2.6)$$

mit:	$\Delta V_{\text{Korn-}i}$	Differenz zwischen dem Kornvolumen bei $VS=i$ [-]
	$V_{\text{Korn-}25}$	Referenzwert des Kornvolumens bei $VS=25 \mu\text{m}$ [ $\text{m}^3$ ]
	$V_{\text{Korn-}i}$	Kornvolumen bei $VS=i$ [ $\text{m}^3$ ]
	$\Delta O_{\text{Korn-}i}$	Differenz zwischen der Kornoberfläche bei $VS=i$ [-]
	$O_{\text{Korn-}25}$	Referenzwert der Kornoberfläche bei $VS=25 \mu\text{m}$ [ $\text{m}^2$ ]
	$O_{\text{Korn-}i}$	Kornoberfläche bei $VS=i$ [ $\text{m}^2$ ]
	$\Delta l_i$	Differenz zwischen der Kornlänge bei $VS=i$ [-]
	$l_{25}$	Referenzwert der Kornoberfläche bei $VS=25 \mu\text{m}$ [m]
	$l_i$	Kornlänge bei $VS=i$ [m]

Der Zusammenhang zwischen der Differenz der jeweiligen Messgröße und der strukturellen Auflösung  $R_{\text{min}}$  als das Verhältnis aus minimaler Siebgröße zu Voxelgröße wird unter Verwendung einer linearen Regressionsanalyse untersucht. Zur statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse wird die Software R [136] mit RStudio [137] verwendet. Vor Bestimmung einer Regressionsgeraden für die erhobenen Messwerte werden diese auf Ausreißer überprüft. Da Ausreißer einen starken Einfluss auf das Ergebnis der Regressionsanalyse haben, werden starke Ausreißer aus dem Datensatz entfernt, sollte keine behebbare Ursache für die starke Abweichung von den übrigen Messwerten identifiziert werden können [138].

Ziel der linearen Regression ist das Finden einer linearen Geraden, die den Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable und der unabhängigen Variable beschreibt. Die abhängige Variable ist in diesem Fall die Differenz zwischen dem jeweiligen Messwert und dem Referenzwert  $\Delta V_{\text{Korn-}i}$ ,  $\Delta O_{\text{Korn-}i}$  oder  $\Delta l_i$ . Die unabhängige Variable ist die strukturelle Auflösung  $R_{\text{min}}$ . Anschauliche Erläuterungen zur Methode der linearen Regression können [139, 140] entnommen werden. Als Bewertungskriterium einer optimalen Geraden wird die Methode der kleinsten Quadrate herangezogen

[139]. Damit basierend auf der Methode der kleinsten Quadrate eine statistisch aussagekräftige Regressionsgerade ermittelt werden kann, müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein [139, 140]:

1. Der Zusammenhang zwischen der abhängigen und der unabhängigen Variable ist linear. Solange die Datenpunkte zu einem linearen Verlauf transformiert werden können, ist diese erste Voraussetzung erfüllt. Eine visuelle Prüfung anhand eines Streudiagramms ist zur Überprüfung dieser Voraussetzung geeignet und wird im Rahmen dieser Arbeit verwendet.
2. Der Erwartungswert der Residuen, der Differenz zwischen dem tatsächlichen Datenpunkt und dem mittels Regressionsgeraden geschätzten Wert, ist Null. Dies bedeutet, dass der gemittelte Wert aller Residuen nahe Null liegen sollte. Zur visuellen Überprüfung dieser Voraussetzung wird ein Streudiagramm, bei dem die Residuen gegen die geschätzten Werte auf Basis der Regressionsgeraden aufgetragen werden, genutzt.
3. Zwischen der unabhängigen Variable und den Residuen der Regression besteht keine Korrelation. Hierfür wird ein Streudiagramm zwischen den Residuen der Regression sowie den Werten der unabhängigen Variable zur visuellen Überprüfung im Rahmen dieser Arbeit genutzt.
4. Es liegt Homoskedastizität vor. Von Homoskedastizität wird gesprochen, wenn die studentisierten Residuen über den gesamten Verlauf der ermittelten Regressionsgeraden gleichmäßig stark streuen. Dieser Effekt ist deutlicher erkennbar, wenn statt nicht-studentisierter Residuen studentisierte Residuen betrachtet werden. Bei der Studentisierung mittels z-Transformation wird von dem betrachteten Datenwert der Mittelwert aus allen Datenpunkten subtrahiert und das Ergebnis ins Verhältnis mit der Standardabweichung der Stichprobe gesetzt. Auch diese Voraussetzung wird visuell im Rahmen dieser Arbeit anhand eines Streudiagramms der studentisierten Residuen gegenüber den geschätzten Werten der Regressionsgeraden überprüft. Diese Voraussetzung wird zusätzlich mit dem Breusch-Pagan-Test [141] überprüft. Der Breusch-Pagan-Test testet die Nullhypothese, dass Homoskedastizität vorliegt. Ist der Signifikanzwert ( $p$ -Wert) dieser Teststatistik größer als das festgelegte Signifikanzniveau (hier 5 %), kann diese Hypothese angenommen werden, ansonsten ist von Heteroskedastizität auszugehen.
5. Die Residuen müssen normalverteilt sein. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Voraussetzung visuell auf Basis eines Q-Q-Diagramms bewertet. Für ein Q-Q-Diagramm werden in einem Streudiagramm die theoretischen Quantile einer Normalverteilung gegen die studentisierten Residuen aufgetragen. Zusätzlich wird diese Voraussetzung mit dem Shapiro-Wilk-Test [142] überprüft. Der Shapiro-Wilk-Test testet die Nullhypothese, dass die Residuen normalverteilt sind. Ist der  $p$ -Wert dieses Testes unterhalb des definierten Signifikanzniveaus von 5 %, ist diese Annahme zu verwerfen und es kann nicht von Normalverteilung der Residuen ausgegangen werden.
6. Es darf keine Autokorrelation der Residuen vorliegen. Liegt Autokorrelation vor, würde dies bedeuten, dass zum Beispiel nach sehr kleinen Residuen immer sehr große folgen und damit eine Abhängigkeit des einen Residuums vom darauffolgenden besteht. Diese Voraussetzung wird im Rahmen dieser Arbeit mit

dem Durbin-Watson-Test [143] überprüft. Anstatt eines  $p$ -Wertes ist das Ergebnis des Tests die Durbin-Watson-Statistik. Liegt diese zwischen zwei tabellierten Grenzwerten, kann davon ausgegangen werden, dass die Voraussetzung, dass keine Autokorrelation vorliegt, erfüllt ist [140].

Im Rahmen der Überprüfung der Annahmen der linearen Regressionsanalyse für die in Abschnitt 2.2.1.6 vorgestellten Versuchsergebnisse zeigt sich, dass zur Erfüllung der Anforderung an einen linearen Zusammenhang zwischen abhängiger und unabhängiger Variable eine Datentransformation erforderlich ist. Nach visueller Einschätzung eignet sich zur Transformation der unabhängigen Variable  $R_{\min}$  eine Potenzfunktion. Der Exponent dieser Potenzfunktion wird nach Box und Tidwell [144] bestimmt. Des Weiteren zeigt sich, dass weder eine Normalverteilung der Residuen noch Homoskedastizität der Residuen vorliegt. Bei der linearen Regressionsanalyse werden die Koeffizienten des linearen Modells derart bestimmt, dass nach der Methode der kleinsten Quadrate die Summe der quadrierten Residuen minimal ist. Für jeden dieser Regressionskoeffizienten wird der auf Basis des Datensatzes ermittelte Standardfehler angegeben, der ein Maß zur Abschätzung der Ungenauigkeit des Koeffizienten ist. Liegt keine Normalverteilung der Residuen oder Heteroskedastizität vor, sind die berechneten Standardfehler der Regressionskoeffizienten fehlerhaft [140, 145].

Im Rahmen dieser Arbeit werden für die durchgeführte Regressionsanalyse robuste Standardfehler HC0 nach White [146] berechnet. Diese Methode eignet sich vor allem zum Umgang mit Heteroskedastizität, kann jedoch auch bei nicht vorliegender Normalverteilung der Residuen eingesetzt werden [145]. Als zweites Verfahren kommt das sogenannte Bootstrapping zum Einsatz, welches insbesondere bei nicht vorhandener Normalität der Residuen zur robusten Bestimmung der Standardfehler geeignet ist [145]. Beim Bootstrapping wird aus der vorliegenden Stichprobe eine Vielzahl von neuen Stichproben gleicher Größe generiert, in diesem Fall 10.000 Stichproben, die zur robusten Abschätzung von Standardfehlern verwendet werden. Nähere Informationen zur Funktionsweise des Bootstrapping können [145] entnommen werden.

Ziel dieser Untersuchung ist die Angabe einer Messungenauigkeit für die strukturelle Auflösung einer CT-Aufnahme in Abhängigkeit von  $R_{\min}$ . Aus diesem Grund wird im Anschluss an die Regressionsanalyse das Vorhersageintervall, basierend auf robusten Standardfehlern HC0 sowie Bootstrapping bestimmt. Das Vorhersageintervall gibt an, wie stark ein Wert von dem mittels Regressionsgerade bestimmten Wert mit einer vom Anwender definierten Wahrscheinlichkeit abweichen kann [140]. Im Rahmen dieser Regressionsanalyse wird ein 90 %-Vorhersageintervall bestimmt. Zur Bewertung der Güte der Regression wird das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  angegeben, welches ein Maß für die anhand des Regressionsmodells erklärbare Varianz ist.

### **2.2.1.6 Einfluss der strukturellen Auflösung auf die Bestimmung von Korngrößen**

Das Ergebnis der linearen Regressionsanalyse zur Abhängigkeit des Kornvolumens  $\Delta V_{\text{Korn}}$  von der strukturellen Auflösung der CT-Aufnahme  $R_{\min}$  als Verhältnis aus Siebgröße zu Voxelgröße ist in Gleichung (2.7) dargestellt. Da sich bei der Überprüfung der in Abschnitt 2.2.1.5 gelisteten Voraussetzungen für die lineare Regression

gezeigt hat, dass die Residuen nicht normalverteilt sind sowie Heteroskedastizität vorliegt, erfolgt die Regressionsanalyse mit robusten Standardfehlern HC0. Von den 320 vorhandenen Datenpunkten werden sechs als starke Ausreißer von der Regressionsanalyse ausgeschlossen. Zwischen der abhängigen und unabhängigen Variable besteht ein statistisch signifikanter Zusammenhang mit ( $F(1,312)=174,3$  und  $p<0,05$ ) mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2=0,45$ .

$$\Delta V_{\text{Korn}}[\%]=0,57+4,702 \cdot 10^4 \cdot R_{\text{min}}^{-3,01} \quad (2.7)$$

- mit:
- $\Delta V_{\text{Korn}}$  Differenz zwischen dem Kornvolumen, abhängig von der strukturellen Auflösung, und dem Referenzwert bei einer Voxelgröße von 25  $\mu\text{m}$  [%]
  - $R_{\text{min}}$  Verhältnis von Siebgröße zu Voxelgröße [-]

Da aufgrund der nicht vorhandenen Normalverteilung der Residuen sowie der Heteroskedastizität die Bestimmung des Vorhersageintervalls beeinflusst sein kann, wird dieses mit drei unterschiedlichen Methoden bestimmt. Abb. 2.16 zeigt die ermittelte Regressionskurve des Zusammenhangs zwischen  $\Delta V_{\text{Korn}}$  und  $R_{\text{min}}$  sowie die dazugehörigen Datenpunkte der drei Gesteinskörnungsarten. Ebenfalls dargestellt sind einmal das 90 %-Vorhersageintervall, bestimmt ohne Maßnahmen zur Berücksichtigung der Heteroskedastizität und nicht vorhandenen Normalverteilung, sowie das 90 %-Vorhersageintervall bei Verwendung von robusten Standardfehlern und Bootstrapping.

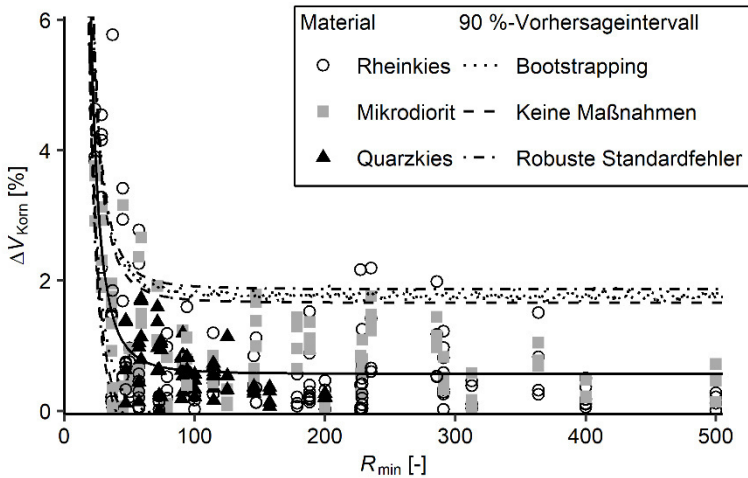


Abb. 2.16: Ergebnis der Regressionsanalyse zum Einfluss der strukturellen Auflösung  $R_{\text{min}}$  auf die Änderung des Kornvolumens  $\Delta V_{\text{Korn}}$  in Bezug auf den Referenzwert aufgenommen bei einer Voxelgröße von 25  $\mu\text{m}$  mit Regressionskurve (durchgezogene Linie) und 90 %-Vorhersageintervallen für Einzelkörner unterschiedlicher Materialien, in Anlehnung an [125].

Es zeigt sich in Abb. 2.16, dass sich das größte 90 %-Vorhersageintervall bei Verwendung von robusten Standardfehlern ergibt. Dieses Vorhersageintervall wird daher im Folgenden zur Bestimmung der erweiterten Messungenauigkeit in Abhängigkeit von

der strukturellen Auflösung verwendet. Über den gesamten Verlauf der Regressionskurve ist eine Streuung der Datenpunkte zu erkennen. Diese resultiert mutmaßlich aus der großen Anzahl von Faktoren, die, wie in Abschnitt 2.1.8 erläutert, das Ergebnis einer CT-Aufnahme beeinflussen [113, 114, 116].

Die stärkste Streuung der Datenpunkte um die Regressionskurve kann für die Rheinkieskörner beobachtet werden, während für Quarzkieskörner die Streuung am geringsten ausgeprägt ist. Neben den Einflussfaktoren aus dem CT-Prozess scheint daher die Materialzusammensetzung der Körner, welche für Rheinkies am heterogensten ist, einen Einfluss auf die Streuung der Datenpunkte zu haben. Abb. 2.16 zeigt zudem, dass die Volumenabweichung im Vergleich zum Referenzwert aufgenommen bei einer Voxelgröße von  $25\ \mu\text{m}$  mit zunehmender struktureller Auflösung  $R_{\text{min}}$  deutlich abnimmt und damit der Erwartung entspricht. Im Bereich niedriger struktureller Auflösung  $R_{\text{min}}$  steigt die Volumenabweichung deutlich an. Auch im Übergangsbereich zwischen dem annähernd horizontal verlaufenden Abschnitt der Regressionskurve sowie dem stark ansteigenden Abschnitt kann eine starke Streuung der Datenpunkte beobachtet werden.

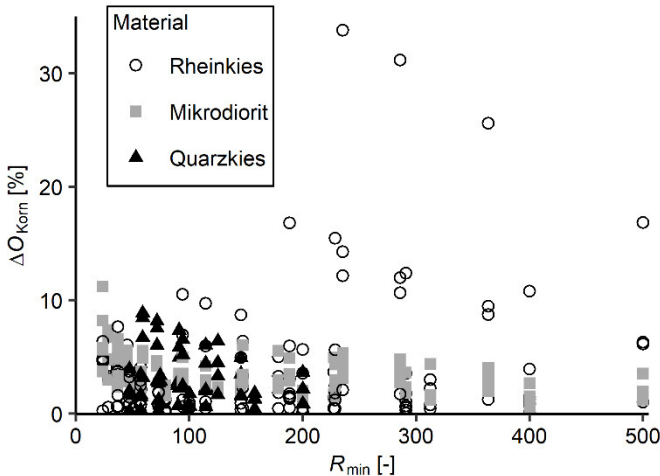


Abb. 2.17: Ergebnis der Regressionsanalyse zum Einfluss der strukturellen Auflösung  $R_{\text{min}}$  auf die Änderung der Kornoberfläche  $\Delta O_{\text{Korn}}$  in Bezug auf den Referenzwert, aufgenommen bei einer Voxelgröße von  $25\ \mu\text{m}$  für Einzelkörner unterschiedlicher Materialien, in Anlehnung an [125].

Abb. 2.17 zeigt das Streudiagramm zum Zusammenhang zwischen  $\Delta O_{\text{Korn}}$  und der strukturellen Auflösung  $R_{\text{min}}$ . Es zeigt sich, dass aufgrund der starken Streuung der Datenpunkte die erste Voraussetzung für die Regressionsanalyse aus Abschnitt 2.2.1.5, der erforderliche lineare Zusammenhang zwischen abhängiger und unabhängiger Variable, nicht einzuhalten ist. Grundsätzlich ist ebenfalls der Trend zu beobachten, dass mit Zunahme von  $R_{\text{min}}$  eine Abnahme der Differenz zwischen Referenzwert und der gemessenen Oberfläche bei Aufnahme mit der entsprechenden Voxelgröße erfolgt. Allerdings weichen insbesondere die Messwerte für mehrere Rheinkieskörner von den übrigen Ergebnissen ab, dies auch im Bereich hoher struktureller Auflösung.

Mögliche Ursache hierfür könnte die starke Skalenabhängigkeit von der Bestimmung der Oberfläche sein [34, 132, 147]. Mit zunehmender Auflösung von Oberflächendetails eines Messverfahrens steigt die gemessene Oberfläche des Kornes [132]. Die Angabe einer Oberfläche kann daher nur im Kontext der Angabe der Auflösung des Messverfahrens erfolgen [34]. Vor diesem Hintergrund kann davon ausgegangen werden, dass bei Anfertigung der CT-Aufnahme des Kornes bei einer Voxelgröße von 25  $\mu\text{m}$  mehr Oberflächendetails oder Anteile aus der Kornrauigkeit abgebildet werden als bei Verwendung höherer Voxelgrößen. Die besonders stark streuenden Datenpunkte in Abb. 2.17 gehören zu dem Rheinkieskorn Nr. 113, welches in Abb. 2.18 zu sehen ist.

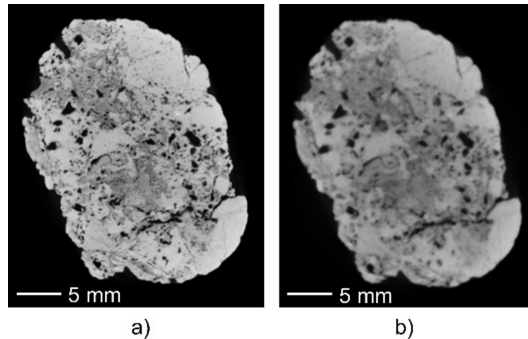


Abb. 2.18: Zweidimensionales Schnittbild des Rheinkieskorns Nr. 113 tomographiert bei einer Voxelgröße von a) 25  $\mu\text{m}$  und b) 85  $\mu\text{m}$ , nach [125].

Abb. 2.18 a) zeigt dabei das Korn aufgenommen mit der Referenzvoxelgröße von 25  $\mu\text{m}$ . Abb. 2.18 b) zeigt dasselbe Korn bei einer Voxelgröße von 85  $\mu\text{m}$ . Anhand dieses Beispiels lässt sich der Unterschied in den von der CT-Aufnahme erfassten Oberflächendetails erkennen. Die starke Abweichung der Messwerte bei höherer Voxelgröße im Vergleich zum Referenzmesswert ist des Weiteren auf die große Porosität des Kornes zurückzuführen. Bei sehr hoher struktureller Auflösung wird diese Porosität detaillierter abgebildet als bei niedriger. Auch wenn Hohlräume innerhalb des Kornes im Rahmen der Bildbearbeitung geschlossen werden, ist dies insbesondere bei großen Hohlräumen nicht vollständig möglich. Die Oberfläche dieser Hohlräume fließt daher in den hier gemessenen Referenzmesswert ein.

Abb. 2.19 zeigt das Ergebnis der Regressionsanalyse sowie die dazugehörigen Datenpunkte zur Untersuchung des Einflusses der strukturellen Auflösung  $R_{\text{min}}$  auf die Differenz der Längenmesswerte  $\Delta l$ . Von den 320 vorhandenen Datenpunkten werden acht als starke Ausreißer von der Regressionsanalyse ausgeschlossen. Da keine Homoskedastizität sowie Normalverteilung der Residuen vorliegen, wird die lineare Regression mit robusten Standardfehlern HC0 bestimmt. Diese ist statistisch signifikant ( $F(1,310)=46,24$  und  $p<0,05$ ) mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2=0,39$ , dargestellt in Gleichung (2.8).

$$\Delta l [\%] = 0,125 + 186,94 \cdot R_{\min}^{-1,60} \quad (2.8)$$

mit:  $\Delta l$  Differenz zwischen der Kornlänge, abhängig von der strukturellen Auflösung, und dem Referenzwert bei einer Voxelgröße von 25  $\mu\text{m}$  [%]

$R_{\min}$  Verhältnis von Siebgröße zu Voxelgröße [-]

Auch hier bestätigt sich, dass mit zunehmender struktureller Auflösung  $R_{\min}$  die Differenz zwischen dem Referenzmesswert und dem Messwert bei einer bestimmten Voxelgröße abnimmt. Genau wie bei der Regressionsanalyse zum Einfluss der strukturellen Auflösung auf die Differenz der Volumenmesswerte stellt das 90 %-Vorhersageintervall, bestimmt auf Basis der robusten Standardfehler HC0, die konservativste Abschätzung dieses Intervalls dar. Es wird daher für die folgende Bestimmung der erweiterten Messungenauigkeit verwendet.

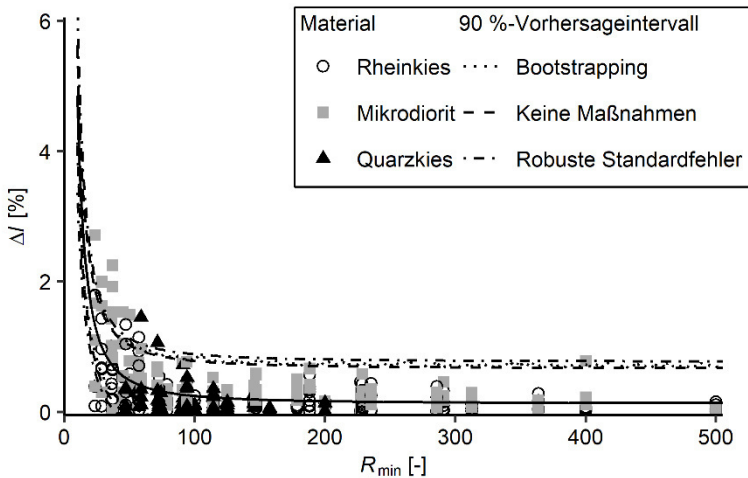


Abb. 2.19: Ergebnis der Regressionsanalyse zum Einfluss der strukturellen Auflösung  $R_{\min}$  auf die Änderung der Kornlänge  $\Delta l$  in Bezug auf den Referenzwert aufgenommen bei einer Voxelgröße von 25  $\mu\text{m}$  mit Regressionskurve (durchgezogene Linie) und 90 %-Vorhersageintervallen für Einzelkörner unterschiedlicher Materialien, in Anlehnung an [125].

### 2.2.1.7 Bestimmung der erweiterten Messungenauigkeit

Basierend auf dem Ergebnis der linearen Regressionsanalyse für den Einfluss der strukturellen Auflösung  $R_{\min}$  auf  $\Delta V_{\text{Korn}}$  und  $\Delta l$  sowie dem Tomographieren der Hochpräzisionskugeln wird die erweiterte Messungenauigkeit  $U_{MP}$  in Anlehnung an das Verfahren nach VDI-Richtlinie 2630 Blatt 2.1 bestimmt.

Die erweiterte Messungenauigkeit nach VDI-Richtlinie 2630 Blatt 2.1  $U_{MP}$  wird nach Gleichung (2.9) bestimmt.

$$U_{MP} = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_p^2 + u_w^2 + u_b^2} \quad (2.9)$$

mit:	$U_{MP}$	Erweiterte Messungenauigkeit
	$k$	Statistischer Erweiterungsfaktor
	$u_{cal}$	Messungenauigkeit, mit der das Referenzobjekt vermessen wird
	$u_{drift}$	Messungenauigkeit zur Berücksichtigung von Änderungen der Form des Werkstückes seit Anfertigung der Referenzmessung
	$u_p$	Messungenauigkeit aus dem Prozess des Tomographieren des Werkstücks
	$u_w$	Messungenauigkeit resultierend aus dem Produktionsprozess der Werkstücke
	$u_b$	Systematische Abweichung zwischen Messwert und Referenzwert

Der Beitrag zur Messungenauigkeit, der aus der Vermessung des Referenzobjektes  $u_{cal}$  resultiert, wird in einem ersten Schritt bestimmt. Dies erfordert nach VDI-Richtlinie 2630 Blatt 2.1 eine Bestimmung von  $V_{Korn}$  und  $l$  mit einem Messverfahren, für das die Messungenauigkeit bekannt ist. Zur Volumenbestimmung käme das Pyknometerverfahren in Frage und zur Längenbestimmung die Vermessung mit einem Messschieber. Allerdings wird davon ausgegangen, dass aufgrund der Problematik von Lufteinschlüssen, die Volumenbestimmung von einzelnen Körnern zu ungenau für eine Bewertung der Messungenauigkeit ist. Gleiches gilt für die Bestimmung der Kornlänge mit dem Messschieber, da insbesondere das Finden der gleichen Position zur Längenmessung wie anhand der CT-Aufnahme nicht möglich ist. Aus diesem Grund wird der Beitrag  $u_{cal}$  zur gesamten Messungenauigkeit anhand der Vermessung der Hochpräzisionskugeln ermittelt.

Die erweiterte Messungenauigkeit  $U_{cal}$  für den Beitrag aus der Vermessung des Referenzobjektes wird nach VDI-Richtlinie 2630 Blatt 2.1 bestimmt. Im Rahmen dieser Arbeit wird angenommen, dass  $U_{cal}$  für jedes der tomographierten Körner anhand einer Vermessung der Hochpräzisionsglaskugel abgeschätzt werden kann.  $U_{cal}(Korn)$  setzt sich dabei aus den Anteilen  $u_{cal}(Kugel)$ ,  $u_p(Kugel)$ ,  $u_b(Kugel)$  und dem Erweiterungsfaktor  $k$  zusammen. Der Beitrag  $u_{cal}(l_{Kugel})$  gibt dabei die Messungenauigkeit für die Vermessung des Durchmessers (der Länge) der Kugel an und entspricht der vom Hersteller angegebenen Toleranz von  $\pm 0,001$  mm. Die Messungenauigkeit  $u_{cal}(V_{Kugel})$  für das Volumen wird anhand einer, nach dem „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) [112] zulässigen Hochrechnung, nach Gleichung (2.10) bestimmt. Diese basiert auf der Toleranz der Längenvermessung. Der Wert  $l_{Kugel}$  stellt dabei den Mittelwert der 20 Vermessungen der Kugellänge dar.



$$u_{\text{cal}}(V_{\text{Kugel}}) = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot l_{\text{Kugel}}^2 \cdot u_{\text{cal}}(l_{\text{Kugel}}) \quad (2.10)$$

mit:  $u_{\text{cal}}(V_{\text{Kugel}})$  Referenzmessungenauigkeit des Kugelvolumens [mm<sup>3</sup>]

$u_{\text{cal}}(l_{\text{Kugel}})$  Referenzmessungenauigkeit der Kugellänge [mm]

$l_{\text{Kugel}}$  Mittelwert der Kugellänge, vermessen 20-mal mit der Messschraube [mm]

Die einzelnen Beiträge zur Messungenauigkeit der Referenzmessgröße eines Kornes sind in Tab. 2.4 gelistet. Die Hochpräzisionskugel wird bei unterschiedlichen Scanparametern neunmal tomographiert. Hieraus werden sowohl für die gemessene Kugellänge als auch das Kugelvolumen die Beiträge zur Messungenauigkeit des Referenzmesswertes  $u_p(\text{Kugel})$  und  $u_b(\text{Kugel})$  bestimmt. Der Wert  $u_p(\text{Kugel})$  ist hierbei die Standardabweichung der neun Messwerte für Kugellänge bzw. Kugelvolumen. Der Wert  $u_b(\text{Kugel})$  ist die Differenz zwischen dem mit der Messschraube bestimmten Referenzwert und dem Mittelwert aus der Bestimmung von Länge bzw. Volumen der Kugel anhand der CT-Aufnahmen.

Tab. 2.4: Beiträge zur Bestimmung der Messungenauigkeit von Länge und Volumen der Hochpräzisionskugel mit Durchmesser 5 mm, in Anlehnung an [125].

Beitrag zur Messungenauigkeit	Länge $l_{\text{Kugel}}$	Volumen $V_{\text{Kugel}}$
	[mm]	[mm <sup>3</sup> ]
$u_{\text{cal}}(\text{Kugel})$	0,001	0,039
$u_p(\text{Kugel})$	0,012	0,432
$u_b(\text{Kugel})$	0,004	0,161

Die erweiterte Messungenauigkeit des Referenzwertes von Kornlänge bzw. Kornvolumen bei einer Voxelgröße von 25 µm wird nach Gleichung (2.11) und (2.12) berechnet. Prozentual ergibt dies eine Messungenauigkeit für die Kornlänge  $U_{\text{cal}}(l)$  von 0,43 % und für das Kornvolumen  $U_{\text{cal}}(V_{\text{Korn}})$  von 1,17 % bezogen auf die Hochpräzisionskugel mit Durchmesser 5 mm. Die erweiterte Messungenauigkeit des Referenzmesswertes ergibt sich durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor  $k$ , der in diesem Fall zu  $k=1,65$  gesetzt wird, was einem Konfidenzniveau von 90 % entspricht.

$$U_{\text{cal}}(l) \approx k \cdot \sqrt{u_{\text{cal}}(l_{\text{Kugel}})^2 + u_p(l)^2 + u_b(l)^2} = 0,021 \text{ mm} \quad (2.11)$$

$$U_{\text{cal}}(V_{\text{Korn}}) \approx k \cdot \sqrt{u_{\text{cal}}(V_{\text{Kugel}})^2 + u_p(V_{\text{Korn}})^2 + u_b(V_{\text{Korn}})^2} = 0,763 \text{ mm}^3 \quad (2.12)$$

mit:  $U_{\text{cal}}$  Erweiterte Messungenauigkeit für den Referenzmesswert von Kornlänge [mm] oder Kornvolumen [mm<sup>3</sup>]

$l$  Kornlänge [mm]

$l_{\text{Kugel}}$  Kugellänge [mm]

$V_{\text{Korn}}$  Kornvolumen [mm<sup>3</sup>]

$V_{\text{Kugel}}$	Kugelvolumen [mm <sup>3</sup> ]
$k$	Statistischer Erweiterungsfaktor [-]
$u_{\text{cal}}$	Messungengenauigkeit für den Referenzmesswert von Kugellänge [mm] oder Kugelvolumen [mm <sup>3</sup> ]
$u_p$	Standardabweichung der neun Messwerte für Kugellänge [mm] bzw. Kugelvolumen [mm <sup>3</sup> ] aus dem wiederholten Tomographieren
$u_b$	Systematische Abweichung zwischen dem Referenzmesswert und dem Mittelwert der neun Messwerte für Kugellänge [mm] bzw. Kugelvolumen [mm <sup>3</sup> ] aus dem wiederholten Tomographieren der Kugel

Unter Verwendung der nach Gleichung (2.11) und (2.12) abgeschätzten Messungengenauigkeit  $U_{\text{cal}}(\text{Korn})$  für die Kornlänge und das Kornvolumen der Referenzmesswerte, kann die gesamte erweiterte Messungengenauigkeit für die Bestimmung von Kornlänge und Kornvolumen nach Gleichung (2.13) und (2.14) erfolgen. Die systematische Abweichung vom Referenzmesswert und der Kornlänge  $U_b(l)$  bzw. dem Kornvolumen  $U_b(V_{\text{Korn}})$  wird in Abhängigkeit von  $R_{\text{min}}$  aus dem oberen 90 %-Vorhersageintervall abgeleitet.

$$U_{\text{MP}}(l) = \sqrt{U_{\text{cal}}(l)^2 + U_b(l)^2} \quad (2.13)$$

$$U_{\text{MP}}(V_{\text{Korn}}) = \sqrt{U_{\text{cal}}(V_{\text{Korn}})^2 + U_b(V_{\text{Korn}})^2} \quad (2.14)$$

mit:	$U_{\text{MP}}$	Erweiterte Messungengenauigkeit der Bestimmung von Kornlänge [mm] bzw. Kornvolumen [mm <sup>3</sup> ]
	$l$	Kornlänge [mm]
	$V_{\text{Korn}}$	Kornvolumen [mm <sup>3</sup> ]
	$U_{\text{cal}}$	Erweiterte Messungengenauigkeit für den Referenzmesswert von Kornlänge [mm] oder Kornvolumen [mm <sup>3</sup> ]
	$U_b$	Systematische Abweichung zwischen dem Referenzmesswert und dem Mittelwert von Kornlänge [mm] bzw. Kornvolumen [mm <sup>3</sup> ]

Ziel ist, die erweiterte Messungengenauigkeit  $U_{\text{MP}}(l)$  und  $U_{\text{MP}}(V_{\text{Korn}})$  auf jeweils 5 % zu begrenzen. Basierend auf den berechneten Werten für  $U_{\text{cal}}(\text{Korn})$  sowie dem 90 %-Vorhersageintervall der Regressionsanalyse für  $l$  und  $V_{\text{Korn}}$  kann somit das minimal erforderliche  $R_{\text{min}}$  zur Einhaltung dieser Bedingung bestimmt werden. Soll die Messungengenauigkeit zur Bestimmung der Kornlänge auf 5 % begrenzt werden, ist hierfür ein  $R_{\text{min}} > 12$  erforderlich. Im Fall des Kornvolumens führt hingegen ein  $R_{\text{min}} > 25$  zur Begrenzung der Messungengenauigkeit auf maximal 5 %.

### **2.2.1.8 Diskussion der Versuchsergebnisse**

Die Tatsache, dass bei Volumenbestimmung von Körnern ein minimal erforderliches  $R_{\min}$  von 25 zur Begrenzung der Messungengenauigkeit auf 5 % erforderlich ist, während für die Bestimmung der Kornlänge lediglich ein  $R_{\min}>12$  hierfür benötigt wird, könnte auf den verstärkten Einfluss des in Abschnitt 2.1.8 erläuterten Partialvolumeneffektes zurückzuführen sein. In die Bestimmung des Kornvolumens fließen mehr Voxel am Rand des Kornes ein als bei der Bestimmung der Kornlänge. Diese Voxel am Übergang zwischen Korn und Hintergrund sind besonders vom Partialvolumeneffekt betroffen, sodass dies eine Ursache für die erhöhten Anforderungen an die strukturelle Auflösung bei Bestimmung des Kornvolumens gegenüber der Kornlänge sein kann. Des Weiteren kommt bei der Bestimmung des Kornvolumens hinzu, dass Details auf der Kornoberfläche, die bei hohem  $R_{\min}$  erfasst werden können, bei niedrigem jedoch nicht, einen stärkeren Einfluss auf das Messergebnis haben als bei der Bestimmung der Kornlänge.

Die auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen festgelegte Mindestanforderung  $R_{\min}>25$  für die Bestimmung von  $V_{\text{Korn}}$  bei Begrenzung der Messungengenauigkeit auf 5 % ist konservativer als die von Lin et al. [119] vorgestellte Empfehlung von  $R_{\min}>12$  zur Bestimmung des Kornvolumens. Die im Rahmen dieser Studie ermittelten erhöhten Anforderungen an  $R_{\min}$  zur Volumenbestimmung von Körnern könnten daraus resultieren, dass Lin et al. vor allem die Wahl des Schwellenwertes zur Erstellung des Binärbildes sowie den Partialvolumeneffekt als Fehlerquellen betrachten. Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchung werden jedoch ebenfalls Einflüsse aus der Wahl von drei unterschiedlichen Materialien sowie unterschiedlichen Scanparametern erwartet, was eine Ursache für die erhöhten Anforderungen sein kann.

Die Feststellung von Neumann et al. [124], dass bei  $R_{\min}>20$  die Messungengenauigkeit bei unter 0,2 % liegt, kann im Rahmen dieser Untersuchungen nicht bestätigt werden. Eine mögliche Ursache könnte in der unterschiedlichen Herangehensweise zur Bestimmung der Messungengenauigkeit liegen, die bei Neumann et al. ausschließlich auf am Computer simulierten Daten beruht. Tab. 2.1 zeigt, dass  $R_{\min}>12$  von einer Vielzahl unterschiedlicher Studien mindestens zum Tomographieren von Körnern verwendet wird. Die hier ermittelte Anforderung an  $R_{\min}$  zur Volumenbestimmung von Körnern wird jedoch in einem Großteil der Untersuchungen unterschritten. Dies könnte insbesondere auf die Schwierigkeit beim Tomographieren kleiner Körner mit hoher struktureller Auflösung zurückzuführen sein, da diese nicht mit allen CT-Geräten realisierbar ist.

### **2.2.2 Einfluss der Probenpräparation auf die Messungengenauigkeit von CT-Aufnahmen**

#### **2.2.2.1 Einleitung**

Zur Anfertigung von CT-Aufnahmen von Gesteinskörnungsschüttungen existieren zwei grundsätzliche Strategien. Entweder werden die Körner vor Anfertigung der CT-Aufnahme derart präpariert, dass kein Kontakt zwischen benachbarten Körnern be-

steht oder die Körner werden als lose Schüttung tomographiert [133]. Während im ersten Fall die Berechnung von Abmessungen und Kornformeigenschaften nach einem Zuweisen eines Labels für jedes Korn erfolgen kann, erfordert der zweite Fall eine Segmentierung von benachbarten Körnern [133]. Allerdings hat die zweite Strategie den Vorteil, dass mehr Körner auf einer CT-Aufnahme abgebildet werden können und damit weniger CT-Aufnahmen erforderlich sind, um eine repräsentative Probe der Gesteinskörnung zu charakterisieren [103, 133]. Empfehlungen zum Verhältnis von Körnern zu Matrixmaterial variieren zwischen 4 % und 20 % [35, 127, 130, 132, 148]. Für Körner größer 5 mm kommt entweder ein Zementbindemittelleim zur Trennung der Körner zum Einsatz [130] oder die Körner werden einzeln tomographiert [132]. Etwas kleinere Körner können auf ein Klebeband gestreut werden, welches im eingerollten Zustand tomographiert wird [132] oder einzeln in das Gefäß zum Tomographieren geklebt werden [93, 149]. Handelt es sich hingegen um feine Gesteinskörnungen, werden die Körner entweder in eine Matrix aus Epoxidharz eingebettet [35, 126, 127, 130, 132, 150] oder es kommen Polymere als Matrix zum Einsatz [151, 152]. Werden die Körner jedoch als lose Schüttung tomographiert, ist eine stabile Lage jedes einzelnen Kornes erforderlich [108]. Hierfür werden die Hohlräume teilweise mit Wachs [153] oder Epoxidharz [92, 154] verfüllt. Je nach verwendeter Methode zum physischen Trennen der Körner vor Anfertigung der CT-Aufnahme sind daher zur Abbildung der gleichen Anzahl an Körnern im Vergleich zum Tomographieren einer losen Schüttung 5-mal bis 20-mal mehr CT-Aufnahmen erforderlich. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit das Tomographieren von losen Schüttungen angestrebt. Im Rahmen der im folgenden vorgestellten Untersuchungen, deren Ergebnisse in [104] vorveröffentlicht wurden, wird daher zunächst der Einfluss der Probenpräparation auf das Ergebnis der Bestimmung von  $V_{\text{Korn}}$ ,  $O_{\text{Korn}}$  und  $l$  analysiert. Hierfür werden jeweils drei Schüttungen dreier unterschiedlicher Materialien zuerst als lose Schüttung tomographiert und anschließend mit physisch voneinander getrennten Körnern.

### **2.2.2.2 Materialien**

Es werden jeweils drei Schüttungen der Materialien Quarzkies mit einer Korngröße von 2 mm bis 4 mm, Mikrodioritplitz mit einer Korngröße von 2 mm bis 5 mm und Rheinkies mit einer Korngröße von 2 mm bis 8 mm untersucht. Es handelt sich um Proben aus denselben Materialien, die für die Untersuchung aus Abschnitt 2.2.1 verwendet werden und in Abb. 2.14 gezeigt sind. Abb. 2.20 a) zeigt das Probengefäß aus Acrylglas, welches zum Tomographieren der Proben als lose Schüttung verwendet wird. Anschließend wird jede der Proben in fünf bis sieben Teile geteilt. Diese Teilproben werden in eine Matrix aus Wachs eingearbeitet, sodass der Anteil an Körnern ca. 20 Vol.-% der Gesamprobe beträgt, siehe Abb. 2.20 b). Verwendet wird ein Modellierwachs.

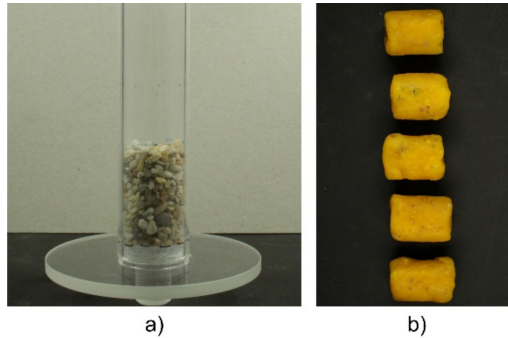


Abb. 2.20: Methoden zur Probenpräparation zur Anfertigung von CT-Aufnahmen: a) Lose Schüttung in Probengefäß aus Acrylglas und b) Körner eingebettet in Modellierwachs, in Anlehnung an [104].

### 2.2.2.3 Anfertigung von CT-Aufnahmen und Bildbearbeitung

Zunächst werden die Proben als lose Schüttung und anschließend eingebettet in Modellierwachs tomographiert. Die Auswahl der Parameter zur Anfertigung der CT-Aufnahmen erfolgt entsprechend den Vorgaben aus Abschnitt 2.1.9, Tab. 2.2. Alle CT-Aufnahmen werden bei einer Stromspannung von 150 kV, einer Stromstärke von 170  $\mu$ A und einer Belichtungsdauer von 0,12 s angefertigt. Es werden zwischen 1.700 und 2.400 Projektionen pro Probe aufgenommen. Zur Reduktion von Artefakten werden jeweils fünf Einzelprojektionen gemittelt, eine Flat-Field-Korrektur vorab durchgeführt und ein Aluminiumfilter eingesetzt. Die Voxelgröße wird zu 30  $\mu$ m gesetzt, sodass die Anforderungen an die strukturelle Auflösung  $R_{\min}$  entsprechend Abschnitt 2.2.1 erfüllt sind. Die Bildbearbeitung vom Grauwertbild bis zum Binärbild erfolgt analog zu dem in Abschnitt 2.2.1.4 erläuterten Vorgehen mit MAVI, erweitert durch MAVIparticle, und ToolIP, erweitert durch MAVIkit. Wird die Probe mit physisch getrennten Körnern tomographiert, erfolgt die Zuweisung eines Labels zu jedem Korn analog zu dem Vorgehen in Abschnitt 2.2.1.4, siehe Abb. 2.21 a) für eine Rheinkiesprobe.

Trotz des geringen Volumenanteils an Körnern an der Gesamtprobe, kann es zu einzeltem Kontakt zwischen benachbarten Körnern kommen. Diese werden manuell mit MAVI getrennt. Werden die Körner als lose Schüttung tomographiert, ist eine Kornsegmentierung erforderlich. Hierfür kommt das in Abschnitt 2.3 beschriebene Verfahren der Wasserscheidentransformation in Kombination mit der adaptiven H-Extrematransformation zum Einsatz. Der vom Nutzer vorgegebene Parameter  $h_{\text{crit}}(255)$  wird für alle tomographierten Schüttungen zu 1 gesetzt. Der zweite vom Nutzer zu definierende Parameter  $h_{\text{crit}}(0)$  variiert je nach Schüttdichte der Probe zwischen 48 und 84. Die Festlegung von  $h_{\text{crit}}(0)$  erfolgt dabei nach dem in Abschnitt 2.3 vorgestellten Verfahren. Nach Segmentierung der Körner mit Wasserscheidentransformation und adaptiver H-Extrematransformation kann es zu Fehlsegmentierungen der Körner kommen. Abb. 2.21 b) zeigt das Ergebnis der Kornsegmentierung nach manueller Korrektur von Fehlsegmentierungen. Für jedes Korn werden in einem letzten Schritt das Kornvolumen  $V_{\text{Korn}}$ , die Kornoberfläche  $O_{\text{Korn}}$  und die Kornlänge  $l$  bestimmt, wobei  $l$  als der

größte Abstand zwischen zwei Punkten auf der Kornoberfläche definiert ist. Bei Trennung der Körner mit Modellierwachs werden die Daten zu  $V_{\text{Korn}}$ ,  $O_{\text{Korn}}$  und  $l$  der fünf bis sieben Teilproben zu einem Datensatz vereint.

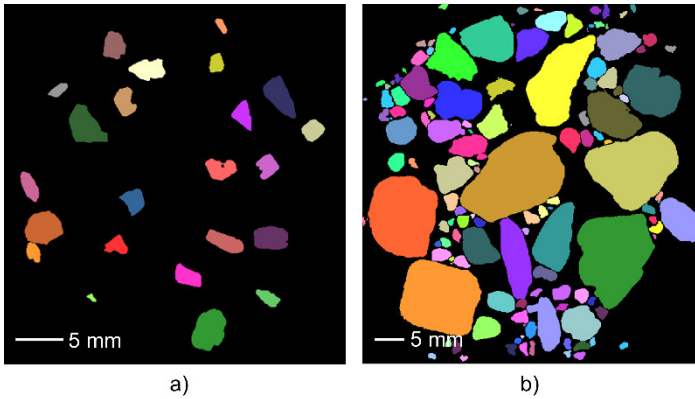


Abb. 2.21: Ergebnis der Bildbearbeitung bei a) Labeling voneinander getrennter Körner und b) nach Segmentierung mit adaptiver H-Extrematransformation und Wasserscheiden-  
transformation mit anschließender manueller Korrektur, in Anlehnung an [104].

#### 2.2.2.4 Versuchsauswertung und statistische Methoden

Ein Vergleich mit der Anzahl der Körner beim Tomographieren als lose Schüttung zeigt, dass bei Trennung mit Wachs mehr Körner erfasst werden. Dies ist hauptsächlich auf kleine Einschlüsse von Fremdmaterialien im Modellierwachs zurückzuführen. Bestimmte Objekte, die deutlich kleiner als das Kleinstkorn der eingesetzten Schüttungen sind, bestehend aus maximal 7.500 Voxeln, werden daher aus diesen Datensätzen entfernt. Bei Annahme eines kugelförmigen Kornes mit einem Durchmesser von 2 mm sollten bei einer Voxelgröße von 30  $\mu\text{m}$  Körner mindestens aus 155.000 Voxeln zusammengesetzt sein. Nach der Eliminierung von Artefakten werden jeweils die drei Datensätze als lose Schüttung bzw. vorab separiert je Material tomographiert und zu einem Datensatz kombiniert. Anschließend werden die Verteilungen bei Tomographieren als lose Schüttung sowie nach physischer Trennung anhand eines Wilcox-Tests [155] verglichen. Dieser Test eignet sich zum Vergleich zweier Verteilungen, wenn diese nicht einer Normalverteilung entsprechen [140]. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird der Wilcox-Test für ungepaarte Stichproben verwendet. Die Annahme, dass ungepaarte Stichproben vorliegen, kann jedoch nicht vollständig erfüllt werden, da in beiden der zu vergleichenden Stichproben dieselben Körner enthalten sind. Allerdings führt eine exakte Zuordnung von Körnern aus den beiden Stichproben in der Regel zu Fehlern [156], weswegen in diesem Fall davon abgesehen wird. Ist der  $p$ -Wert des Wilcox-Test kleiner als das Signifikanzniveau von 5 %, kann davon ausgegangen werden, dass die beiden Verteilungen nicht gleich sind. In diesem Fall wird die Effektstärke  $r_c$  dieses Befundes berechnet und nach der Definition von Cohen [157] in die Kategorien klein ( $r_c > 0,3$ ), mittel ( $0,3 > r_c > 0,5$ ) und groß ( $r_c > 0,5$ ) eingeordnet.

### 2.2.2.5 Ergebnisse und Diskussion

Für den Vergleich der Verteilung der Kornlänge  $V_{\text{Korn}}$ ,  $O_{\text{Korn}}$  und  $l$  innerhalb der Quarzkiesschüttung zeigen Abb. 2.22 bis Abb. 2.24 das Histogramm der als lose Schüttung tomographierten Probe sowie mit physisch voneinander getrennten Körnern. Die Abbildungen der Histogramme für  $V_{\text{Korn}}$ ,  $O_{\text{Korn}}$  und  $l$  der Rheinkies- sowie Mikrodioritsplittschüttung können Anhang A entnommen werden.

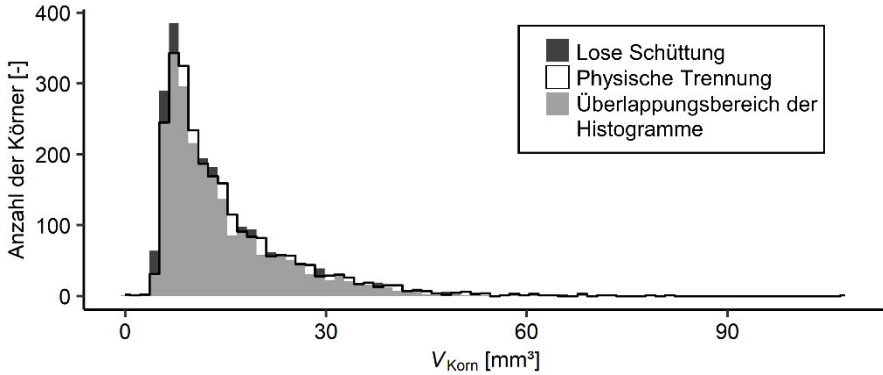


Abb. 2.22: Histogramm der Verteilung des Kornvolumens  $V_{\text{Korn}}$  innerhalb der Quarzkiesschüttung, tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner.

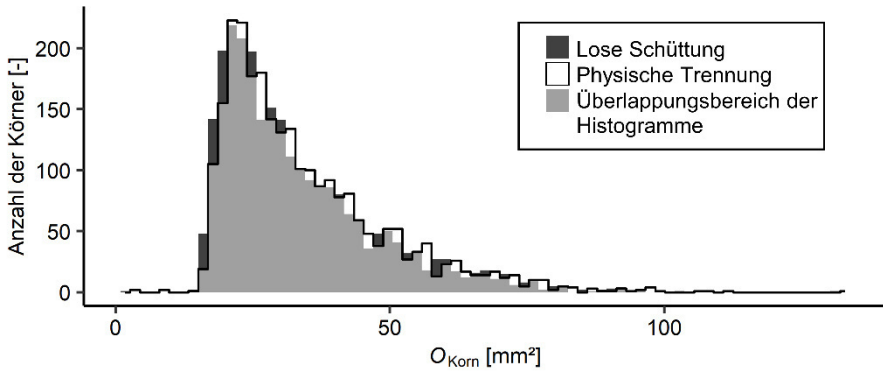


Abb. 2.23: Histogramm der Verteilung der Kornoberfläche  $O_{\text{Korn}}$  innerhalb der Quarzkiesschüttung, tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner.

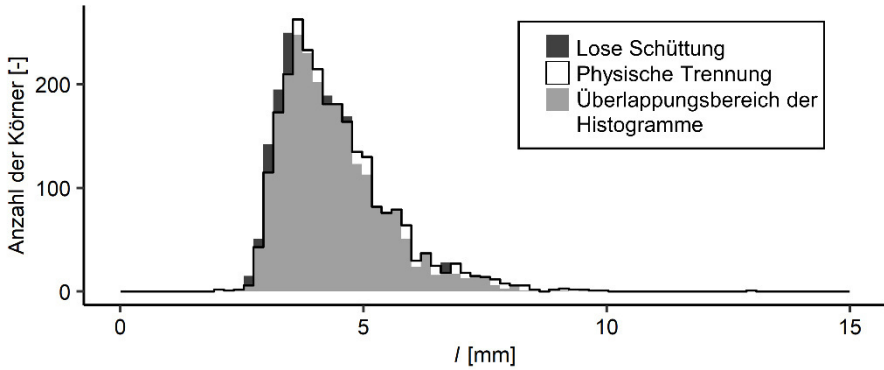


Abb. 2.24: Histogramm der Verteilung der Kornlänge  $l$  innerhalb der Quarzkiesschüttung, tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner, in Anlehnung an [104].

Die Ergebnisse des  $p$ -Wertes für den Wilcox-Test zum Vergleich der beiden Methoden zur Probenpräparation sind in Tab. 2.5 für  $V_{\text{Korn}}$ ,  $O_{\text{Korn}}$  und  $l$  zusammengefasst. Kann ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Verteilungen festgestellt werden, ist zusätzlich die Effektstärke  $r_C$  sowie die Einordnung in die entsprechende Kategorie klein, mittel oder groß angegeben. Die in Tab. 2.5 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass zwischen den Proben tomographiert als lose Schüttung und den Proben mit physischer Trennung der Körner durch Modellierwachs kein statistisch signifikanter Unterschied, bzw. nur ein signifikanter Unterschied mit sehr kleiner Effektstärke, beobachtet werden kann. Dies trifft sowohl auf die drei untersuchten Materialien als auch die Verteilung von  $V_{\text{Korn}}$ ,  $O_{\text{Korn}}$  oder  $l$  zu.

Tab. 2.5: Zusammenfassung der Ergebnisse des Wilcox-Test und dessen Effektstärke zum Vergleich der Verteilung von  $V_{\text{Korn}}$ ,  $O_{\text{Korn}}$  und  $l$  bei Anfertigung der CT-Aufnahme als lose Schüttung oder physischer Trennung der Körner, nach [104].

Material	Kornvolumen $V_{\text{Korn}}$		Kornoberfläche $O_{\text{Korn}}$		Kornlänge $l$	
	$p$ -Wert	Effektstärke $r_C$	$p$ -Wert	Effektstärke $r_C$	$p$ -Wert	Effektstärke $r_C$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Quarzkies	0,001	0,047 (klein)	0,001	0,046 (klein)	0,001	0,044 (klein)
Rheinkies	0,332	-	0,315	-	0,014	0,061 (klein)
Mikrodiorit-splitt	0,353	-	0,313	-	0,202	-

Für die in Abb. 2.22 dargestellten Verteilungen des Kornvolumens der Quarzkiesschüttung bei unterschiedlicher Probenpräparation zeigt sich zwischen den Histogrammen eine sehr große Ähnlichkeit in der Form. Allerdings scheint sich bei physischer Trennung der Körner die Verteilung des Kornvolumens innerhalb der Schüttung leicht in



Richtung größerer Volumina zu verschieben. Dieser Effekt ist ebenfalls für die Histogramme der Volumenverteilung bei Rheinkies und Mikrodioritplitt zu erkennen, siehe Anhang A. Unter der Annahme, dass die Bestimmung des Kornvolumens bei physischer Trennung der Körner voneinander als Grundwahrheit angesehen werden kann, bedeutet diese Verschiebung hin zu größeren Kornvolumina im Umkehrschluss, dass beim Tomographieren von losen Schüttungen das Kornvolumen leicht, in der Regel jedoch nicht statistisch signifikant, unterschätzt wird. Diese Beobachtung kann ebenfalls für die in Abb. 2.23 und Abb. 2.24 gezeigten Verteilungen für  $O_{Korn}$  und  $I$  der Quarzkieschüttung, aber auch für die Rheinkies- und Mikrodioritplittschüttungen in Anhang A gemacht werden.

Zwei mögliche Ursachen könnten zu der leichten Unterschätzung von  $V_{Korn}$ ,  $O_{Korn}$  und  $I$  bei Scannen als lose Schüttung führen. Wenn zwei Körner sich auf dem Binärbild der CT-Aufnahme berühren, müssen diese mittels Wasserscheide voneinander getrennt werden.

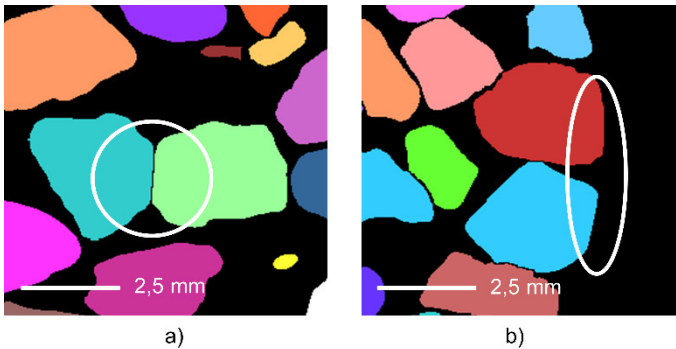


Abb. 2.25: Darstellung möglicher Fehlerquellen anhand eines beispielhaften 2D-Schnitts durch eine Quarzkiesprobe mit a) Wasserscheide zwischen zwei in Kontakt stehenden Körnern und b) Übergangsbereich zwischen Körnern und Probengefäß, nach [104].

Abb. 2.25 a) zeigt eine Wasserscheide zwischen zwei Körnern. Der Verlauf dieser Wasserscheide ist in der Regel geradlinig und entspricht damit nicht immer dem tatsächlichen Verlauf der Kontaktlinie zwischen den beiden Körnern. Dies führt für beide Körner zu einer leichten Glättung der Kornoberfläche. Der Effekt der Glättung dürfte besonders die Bestimmung der Kornoberfläche beeinflussen. Hinzu kommt, dass Voxel, die zum Hintergrund zählen, aus der Bestimmung von  $V_{Korn}$ ,  $O_{Korn}$  und  $I$  herausfallen. Dies betrifft Voxel im Bereich der Wasserscheide, welche vor der Kornsegmentierung noch zum Vordergrund zählen. Insbesondere die Bestimmung des Kornvolumens könnte durch diese Umwandlung von Vordergrund- zu Hintergrundvoxeln bei Tomographieren als lose Schüttung beeinflusst werden.

Bei vergleichbarem Volumen der tomographierten losen Schüttung setzt sich die Quarzkiesprobe aus mehr Körnern (2.584) als die Rheinkies- (798) oder Mikrodioritplittprobe (894) zusammen. Lediglich für die Quarzkiesprobe kann nach Tab. 2.5 bei der Bestimmung von  $V_{Korn}$  ein statistisch signifikanter Unterschied mit kleiner Effektstärke beobachtet werden, was auf die erhöhte Anzahl an Kontaktpunkten zwi-

schen Körnern und damit vermehrtem Einfluss der Volumenreduktion durch Wasserscheiden zurückzuführen sein könnte. Gleiches gilt für die Bestimmung von  $O_{\text{Korn}}$ , auch wenn als Ursache hier der Glättungseffekt der Kornoberfläche durch Wasserscheiden genannt werden kann. Die zweite Ursache für die Differenz der Messwerte, kann im Kontakt zwischen den Körnern und dem Probengefäß begründet liegen. Das Probengefäß wird im Rahmen der Bildbearbeitung durch Ausschneiden mit einer Kreismaske entfernt. Hierbei kann es, wie in Abb. 2.25 b) zu sehen, zu einem leichten Entfernen von Randbereichen der Körner kommen. Dieser Effekt kann sowohl zu den Unterschieden bei der Bestimmung von  $V_{\text{Korn}}$  und  $O_{\text{Korn}}$  als auch bei der Bestimmung von  $I$  beitragen, ist jedoch nicht ganz zu vermeiden, da bei Tomographieren als lose Schüttung ein Probengefäß erforderlich ist.

### 2.2.3 Zusammenfassung und Fazit

Die in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Untersuchungsergebnisse zum Einfluss der strukturellen Auflösung  $R_{\text{min}}$  auf die Genauigkeit der Bestimmung von Kornlänge und Kornvolumen zeigen, dass die Wahl eines geeigneten  $R_{\text{min}}$ -Wertes von der angestrebten Messaufgabe abhängig ist. Besteht diese ausschließlich aus der Bestimmung von Kornabmessungen, ist ein  $R_{\text{min}} > 12$  zur Begrenzung der Messungenauigkeit auf 5 % ausreichend. Soll jedoch ebenfalls das Volumen von Körnern bestimmt werden, empfiehlt sich ein  $R_{\text{min}} > 25$ . Die Bestimmung der Kornoberfläche hängt jedoch stark von der vorhandenen Kornrauigkeit ab, sodass keine Angabe eines erforderlichen  $R_{\text{min}}$ -Wertes für die Bestimmung von  $O_{\text{Korn}}$  möglich ist.

Neben der Voxelgröße hat die Art der Probenvorbereitung einen Einfluss auf die Genauigkeit des Messergebnisses für Kornvolumen, Kornoberfläche und Kornlänge. Der Unterschied zwischen der Verteilung von  $V_{\text{Korn}}$ ,  $O_{\text{Korn}}$  und  $I$  bei Tomographieren als lose Schüttung im Vergleich zum Tomographieren von physisch getrennten Körnern ist jedoch entweder statistisch nicht signifikant oder es besteht ein statistisch signifikanter Unterschied, dessen Effektstärke jedoch klein ist. Aufgrund der geringen Unterschiede zwischen den beiden Methoden zur Trennung von Körnern sowie der größeren Anzahl an Körnern, die beim Tomographieren als lose Schüttung auf einer CT-Aufnahme abgebildet werden können, erscheint eine physische Trennung von Körnern nicht erforderlich zu sein.

Wird eine Kornprobe als lose Schüttung tomographiert und die Voxelgröße entsprechend der in Abschnitt 2.2.1.8 ermittelten Anforderungen an  $R_{\text{min}}$  gewählt, kann die Wiederholpräzision für verschiedene Messgrößen bestimmt werden. Details zur Untersuchung der Wiederholpräzision des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Verfahrens zum Tomographieren von Schüttungen als lose Schüttung können Anhang B entnommen werden. Die Wiederholstandardabweichung  $s_r$  für das Kornvolumen liegt bei  $s_r = 0,022 \text{ cm}^3$  (0,18 %), bezogen auf ein Gesamtvolumen der Gesteinskörnungsschüttung zwischen  $11,45 \text{ cm}^3$  und  $12,92 \text{ cm}^3$ . Für die Kornoberfläche beträgt die Wiederholstandardabweichung  $s_r = 0,427 \text{ cm}^2$  (0,14 %), bezogen auf die Gesamtoberfläche einer Gesteinskörnungsschüttung von  $309,14 \text{ cm}^2$  bis  $314,64 \text{ cm}^2$ .

Einen weiteren Einflussfaktor auf die Messungenauigkeit stellt die Anzahl der tomographierten Körner einer Probe dar. Erforderlich ist eine repräsentative Stichproben-

größe zur Bestimmung der morphologischen Eigenschaften der Körner einer Schüttung. Anzustreben ist hierbei das Tomographieren einer ausreichenden Anzahl an Körnern zur Sicherstellung der Repräsentativität bei gleichzeitig minimalem Zeitaufwand. Die in [158] veröffentlichten und in Anhang C dargestellten Untersuchungsergebnisse zu diesem Aspekt zeigen, dass die Anzahl der Körner zur Bildung einer repräsentativen Stichprobe sowohl von der Homogenität der Verteilung einer Messgröße abhängig ist als auch von der Wahl des tolerierten Sicherheitsniveaus. Die Entscheidung, ob zusätzliche CT-Aufnahmen von weiteren Körnern erforderlich sind, kann anhand einer Analyse des Variationskoeffizienten der Messgrößen erfolgen.

## **2.3 Entwicklung eines Verfahrens zur automatisierten Kornsegmentierung**

### **2.3.1 Einleitung**

Bei der Abbildung von Gesteinskörnungsproben als lose Schüttung ist eine Kornsegmentierung zur Trennung von sich berührenden Körnern auf dem Binärbild der CT-Aufnahme erforderlich. Nach Kim et al. [159] sollte ein Verfahren zur Kornsegmentierung zu möglichst wenig über- und untersegmentierten Körnern führen. Des Weiteren sollte die Anzahl an Wasserscheiden, die nicht dem tatsächlichen Verlauf der Grenze zwischen zwei Körnern entspricht, möglichst gering sein. Im Rahmen dieser Arbeit werden Schüttungen von Körnern analysiert, deren Kornform von der einer Kugel abweicht und deren Korngröße innerhalb der Schüttung variiert. Aus diesem Grund eignet sich von den in Abschnitt 2.3 vorgestellten Verfahren zur Kornsegmentierung die adaptive H-Extrematransformation in Kombination mit der Wasserscheidentransformation. Vor dem Hintergrund einer Anwendung der Analyse der Kornform mittels CT in der Praxis, ist ein möglichst automatisiertes Verfahren zur Bildbearbeitung erforderlich, das ohne zeitaufwendiges Ausprobieren von nutzerdefinierten Parametern auskommt. Die adaptive H-Extrematransformation erfordert als Eingangsparameter die Vorgabe von  $h_{crit}(255)$  und  $h_{crit}(0)$ . Die in [104] veröffentlichte und im Folgenden vorgestellte Untersuchung verfolgt das Ziel, diese Eingangsparameter auf Basis vorab bekannter Charakteristika der Gesteinskörnungsprobe automatisiert abzuschätzen.

### **2.3.2 Materialien**

Analysiert werden Proben aus Quarzkies (Q), Normsand (NoS) nach DIN EN 196-1, Mikrodioritsplitt (MS), rezykliertem Betonbruch (BB) und rezykliertem Mauerwerksbruch (MB). Die Normsandprobe weist eine Korngröße zwischen 0,125 mm und 2 mm auf, die Quarzkiesprobe zwischen 2 mm und 4 mm. Es wird jeweils eine Probe mit Korngröße zwischen 0,125 mm und 2 mm, siehe Abb. 2.26, sowie mit Korngröße zwischen 2 mm und 4 mm bzw. 5 mm der Materialien Mikrodioritsplitt, rezyklierter Betonbruch und rezyklierter Mauerwerksbruch entnommen. Zur Herstellung der feinen Gesteinskörnungsproben mit Korngröße zwischen 0,125 mm und 2 mm erfolgt die Entfernung von Über- und Unterkorn mittels Siebung des ofentrockenen Materials.

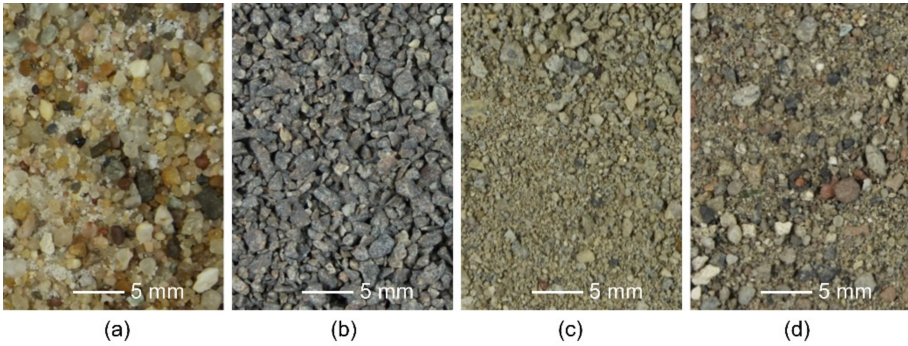


Abb. 2.26: Verwendete feine Gesteinskörnungsproben mit Korngröße zwischen 0,125 mm und 2 mm: a) Normsand, b) Mikrodioritsplitt, c) rezyklierter Betonbruch und d) rezyklierter Mauerwerksbruch, in Anlehnung an [160].

### 2.3.3 Anfertigung von CT-Aufnahmen und Bildbearbeitung

Die feinkörnigen Gesteinskörnungsproben werden in einem Probengefäß aus Steckschwamm tomographiert. Für die grobkörnigen Gesteinskörnungsproben kommt ein zylindrisches Probengefäß aus Acrylglas zum Einsatz. Die Anfertigung der CT-Aufnahmen erfolgt entsprechend den Vorgaben aus Tab. 2.2 mit dem CT-ALPHA-240 (ProCon X-Ray).

Tab. 2.6: Scanparameter zur Anfertigung von CT-Aufnahmen von feinkörnigen und groben Gesteinskörnungsproben.

Parameter	Feinkörnige Gesteinskörnungsprobe	Grobkörnige Gesteinskörnungsprobe
Voxelgröße [µm]	8	30
Stromspannung [kV]	100	140-150
Stromstärke [µA]	70-80	170
Belichtungsdauer [s]	0,40-0,45	0,12
Bildmittelung [-]	3	5
Anzahl an Projektionen [-]	1.680	1.700-2.400
Filter	Kein Filter	Aluminium

Tab. 2.6 fasst die verwendeten Scanparameter zur Erstellung der CT-Aufnahmen von feinkörnigen und grobkörnigen Gesteinskörnungsproben zusammen. Die feinkörnigen Gesteinskörnungsproben werden mit einer Voxelgröße von 8 µm tomographiert. Diese Voxelgröße entspricht der technisch bedingt minimal möglichen Voxelgröße des verwendeten CT-Geräts. Bei einer minimalen Korngröße von 125 µm wird die Anforderung an  $R_{min}$  aus Abschnitt 2.2.1 damit geringfügig unterschritten. Die Bildbearbeitung vom Grauwertbild bis zum Binärbild erfolgt mit ToolIP, erweitert durch MAVIkit [134] und MAVI [97] mit MAVIparticle [135] (ITWM) analog zu dem in Abschnitt 2.2.1.4 be-

schriebenen Verfahren. Anschließend werden sich berührende Körner mit der adaptiven H-Extrematransformation in Kombination mit der Wasserscheidentransformation segmentiert. Die H-Extrematransformation wird dabei auf das invertierte Bild der euklidischen Distanztransformation mit einem Grauwertbereich zwischen 0 und 255 (8 bit) angewendet. Zur Bewertung der Segmentierung mit adaptiver H-Extrematransformation wird das Ergebnis mit einer Grundwahrheit verglichen. Zur Erstellung der Grundwahrheit erfolgt die Kornsegmentierung mittels der in Abschnitt 2.1.7 vorgestellten vorgefluteten Wasserscheidentransformation. Fehlsegmentierungen werden anschließend mit MAVI manuell korrigiert. Trotz der manuellen Korrektur ist das Vorhandensein von Fehlsegmentierungen jedoch weiterhin möglich. Aufgrund der großen Anzahl an Körnern ist das Übersehen von Fehlsegmentierungen nicht ausgeschlossen. Des Weiteren ist auch für erfahrene Bildbearbeiter nicht immer eindeutig erkennbar, ob segmentierte Objekte zu einem oder mehreren Körnern gehören.

### **2.3.4 Versuchsablauf und statistische Methoden**

Anhand der Parameter  $h_{\text{crit}}(255)$  und  $h_{\text{crit}}(0)$  legt der Nutzer die Steigung der in Abb. 2.13 dargestellten Geraden zur Glättung des Bildes der invertierten euklidischen Distanztransformation fest. Eine zu starke Glättung führt dabei zu einer großen Anzahl von untersegmentierten Körnern, während eine zu geringe Glättung eine große Anzahl an übersegmentierten Körnern zur Folge hat. Im Rahmen dieser Untersuchung wird  $h_{\text{crit}}(255)=1$  für die Segmentierung mit adaptiver H-Extrematransformation verwendet und der Grad der Glättung lediglich über den Parameter  $h_{\text{crit}}(0)$  gesteuert.

In einem ersten Schritt wird für die acht CT-Aufnahmen der optimale Wert für  $h_{\text{crit}}(0)$  mit ToolIP ermittelt. Hierfür erfolgt die Kornsegmentierung der CT-Aufnahmen der vier grobkörnigen Gesteinskörnungsproben mit  $h_{\text{crit}}(0)$ -Werten beginnend zwischen 10 und 30 in 5er Schritten bis 130. Die feinen Gesteinskörnungsproben werden mit der adaptiven H-Extrematransformation in Kombination mit der Wasserscheidentransformation bei  $h_{\text{crit}}(0)$ -Werten beginnend zwischen 10 und 30 in 2er bis 5er Schritten bis 32 bzw. 90 segmentiert. Die Wahl des minimalen und maximalen  $h_{\text{crit}}(0)$ -Wertes orientiert sich dabei an der Anzahl an inkorrekt segmentierten Körnern, während die Schrittgröße abhängig von der Spannweite des minimalen und maximalen  $h_{\text{crit}}(0)$ -Wertes gewählt wird. Nach der Segmentierung mit der adaptiven H-Extrematransformation unter Verwendung des jeweiligen  $h_{\text{crit}}(0)$ -Wertes in Kombination mit der Wasserscheidentransformation wird anhand des Vergleichs mit der Grundwahrheit der Anteil der fehlsegmentierten Körner bestimmt.

Das Vorgehen ist in Abb. 2.27 dargestellt. Der prozentuale Anteil an fehlsegmentierten Körnern setzt sich aus dem Anteil der Unter- und Übersegmentierungen zusammen und bezieht sich auf die Gesamtanzahl der analysierten Körner. Da der Prozess der Bestimmung des Anteils fehlsegmentierter Körnern rechen- und zeitintensiv ist, werden CT-Aufnahmen, die mehr als 3.000 Körner enthalten, durch Zuschneiden verkleinert. Körner, die durch das Zuschneiden der CT-Aufnahme den Rand des Bildausschnitts berühren, werden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

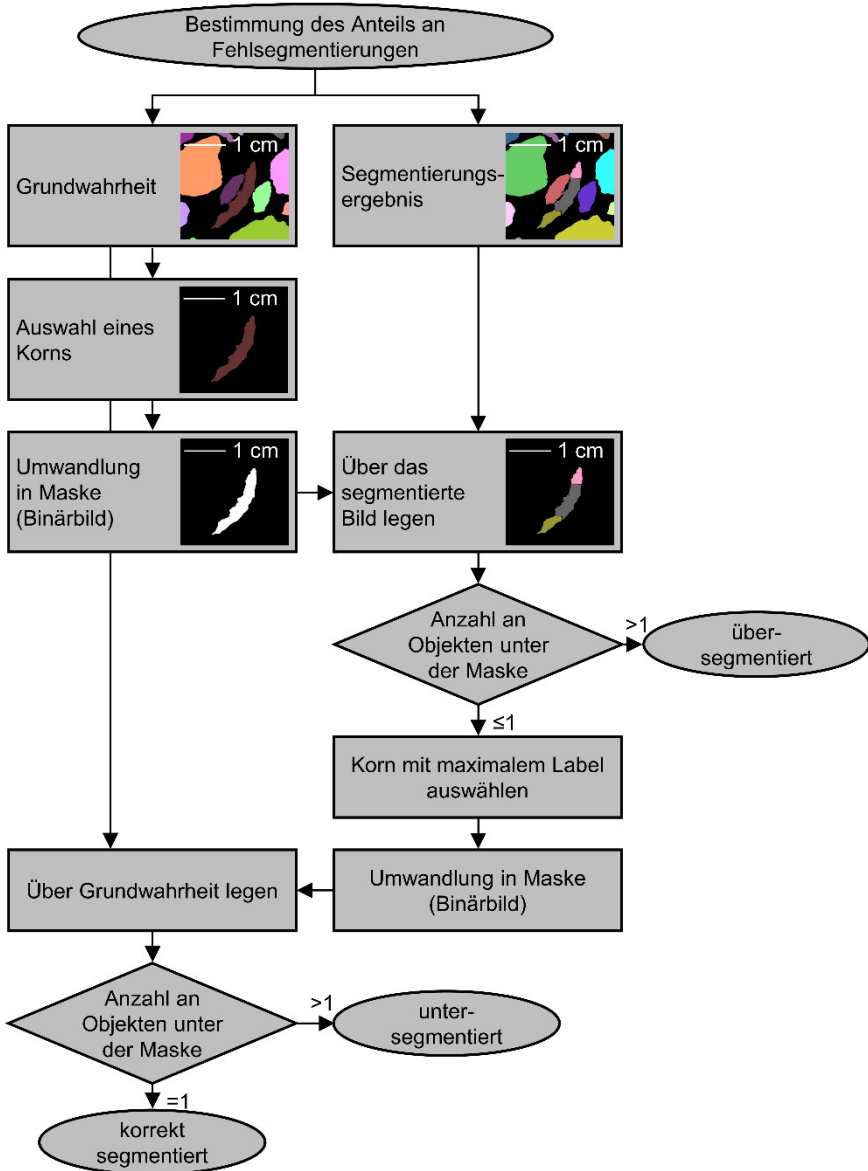


Abb. 2.27: Schema zur Bestimmung des Anteils an fehlsegmentierten Körnern bei Segmentierung mit adaptiver H-Extrematransformation mit variierendem  $h_{crit}(0)$  im Vergleich zur manuell korrigierten Grundwahrheit.

In einem zweiten Schritt wird der Zusammenhang zwischen dem optimalen  $h_{crit}(0)$ -Wert und charakteristischen Parametern der Gesteinskörnungsproben untersucht. Hierfür wird der Korrelationskoeffizient  $R$  nach Pearson bestimmt, welcher zwischen -1 und +1 variieren kann [139]. Je größer der Betrag des Korrelationskoeffizienten nach Pearson, desto stärker ist die Korrelation zwischen zwei Variablen. Untersucht

wird der Zusammenhang zwischen dem optimalen  $h_{\text{crit}}(0)$ -Wert und den nach Gleichung (2.15) und (2.16) definierten Parametern  $R_S$  und  $R_V$ , die auf den in der Regel bekannten Informationen zur unteren und oberen Korngröße einer Schüttung sowie der zum Tomographieren verwendeten Voxelgröße basieren.

$$R_S = \frac{d_i}{D_i} \quad (2.15)$$

$$R_{\text{min}} = \frac{d_i}{VS} \quad (2.16)$$

mit:

$R_S$	Verhältnis aus minimaler zu maximaler Siebgröße einer Schüttung [-]
$R_{\text{min}}$	Verhältnis aus minimaler Siebgröße einer Schüttung zu Voxelgröße [-]
$d_i$	Minimale Siebgröße einer Schüttung [mm]
$D_i$	Maximale Siebgröße einer Schüttung [mm]
VS	Voxelgröße [ $\mu\text{m}$ ]

Des Weiteren wird der Zusammenhang mit der Packungsdichte  $\Phi$  und dem optimalen  $h_{\text{crit}}(0)$ -Wert bestimmt. Hierfür wird aus dem Binärbild ein zylindrischer Probenbereich mit einem Radius von 300 Voxeln und einer Höhe von 1.000 Voxeln ausgeschnitten. Die Packungsdichte  $\Phi$  ergibt sich aus dem Verhältnis der Vordergrundvoxel zur Gesamtanzahl der Voxel des Zylinders. Die Bestimmung der Packungsdichte erfordert damit keine Kenntnisse, die vor Beginn der Bildbearbeitung ermittelt werden müssen. Zusätzlich wird der Zusammenhang von  $h_{\text{crit}}(0)$  und vier Parametern zur morphologischen Charakterisierung von Körnern untersucht, welcher in Abschnitt 3.1 näher erläutert werden. Mit MAVI und MAVIparticle werden die Kornabmessungen sowie Oberfläche und Volumen bestimmt. Basierend auf diesen Größen werden die Plattigkeit  $PL_Z$  nach Zingg [37] und die Plattigkeit  $PL_W$  nach Wentworth [161] entsprechend den Gleichungen aus Tab. 3.1 für jedes Korn der untersuchten Schüttungen berechnet. Die Sphärizität  $SP_W$  nach Wadell [36] wird entsprechend der Gleichung aus Tab. 3.3 sowie die Konvexität  $AT_{3D}$  nach Zhang et al. [40] entsprechend der Gleichung aus Tab. 3.4 ebenfalls für jedes Korn der untersuchten Schüttungen berechnet.

Stellvertretend für die morphologischen Parameter der einzelnen Körner wird der Median von  $PL_Z$ ,  $PL_W$ ,  $SP_W$  und  $AT_{3D}$  aller Körner einer Schüttung bestimmt. Nachteil dieser Kornformparameter ist, dass morphologische Kenngrößen der Körner bekannt sein müssen. Hierfür ist die Analyse einer korrekt segmentierten CT-Aufnahme erforderlich, welche vorab nicht vorliegt. Der optimale  $h_{\text{crit}}(0)$ -Wert könnte lediglich im Rahmen eines iterativen Vorgehens bestimmt werden. Unter Verwendung der im Rahmen der Korrelationsanalyse als geeignet identifizierten Parameter zur Abschätzung des optimalen  $h_{\text{crit}}(0)$ -wertes wird eine multiple lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Im Unterschied zu dem Vorgehen der in Abschnitt 2.2.1.5 beschriebenen einfachen linearen Regressionsanalyse erfolgt die Aufnahme von mehreren unabhängigen Variablen ins Regressionsmodell. Die Voraussetzungen der multiplen linearen Regression werden entsprechend den Vorgaben aus Abschnitt 2.2.1.5 überprüft. Zusätzliche

Voraussetzung für die Gültigkeit der Regressionsanalyse ist, dass keine Multikollinearität vorliegt, dass folglich keine Abhängigkeit zwischen den unabhängigen Variablen des Modells besteht. Diese Voraussetzung wird als erfüllt angesehen, wenn der Korrelationskoeffizient zwischen abhängigen Variablen nahe Null liegt.

In einem letzten Schritt erfolgt die Ermittlung der Fehlsegmentierungsrate für jeweils vier weitere CT-Aufnahmen der in Abschnitt 2.3.2 genannten Materialien unter Verwendung der adaptiven H-Extrematransformation mit Parameterschätzung entsprechend den Ergebnissen aus Abschnitt 2.3.5. Zusätzlich erfolgt die Segmentierung mit der nicht-adaptiven H-Extrematransformation. Der vom Nutzer vorzugebende Wert  $h_{crit}$  wird mittels Ausprobierens variierender  $h_{crit}$ -Werte und anschließender Bestimmung der Fehlsegmentierungsrate ermittelt. Weitere vier CT-Aufnahmen einer Materialprobe werden anschließend mit dem als optimal ermittelten  $h_{crit}$ -Wert segmentiert. Zuletzt erfolgt die Segmentierung mit der adaptiven H-Extrematransformation und anschließender Wasserscheidentransformation, allerdings mit einem  $h_{crit}(0)=36$  entsprechend des in Abschnitt 2.1.7 beschriebenen Vorschlags von Zheng et al. [103].

### **2.3.5 Ergebnisse und Diskussion**

Abb. 2.28 zeigt den Anteil an fehlsegmentierten Körnern bei Verwendung der adaptiven H-Extrematransformation mit variierenden  $h_{crit}(0)$ -Werten in Kombination mit der Wasserscheidentransformation der Schüttungen mit Korngrößen zwischen 0,125 mm und 2 mm. Die zugrunde liegenden Daten können Anhang D, Tab. D.1 entnommen werden. Für jede der vier Schüttungen zeigt sich, dass ein optimaler  $h_{crit}(0)$ -Wert existiert, der zu einer minimalen Fehlsegmentierungsrate führt. Wird  $h_{crit}(0)$  zu klein gewählt, steigt der Anteil an übersegmentierten Körnern stark an, während bei zu hohen  $h_{crit}(0)$ -Werten der Anteil an untersegmentierten Körnern steigt. In Tab. 2.7 sind die optimalen  $h_{crit}(0)$ -Werte zusammen mit dem Anteil an unter- und übersegmentierten Körnern sowie dem Gesamtanteil an fehlsegmentierten Körnern zusammen gefasst. Es zeigt sich, dass für die Normsandschüttung der optimale  $h_{crit}(0)$ -Wert signifikant niedriger ist als für die Mikrodioritplittschüttung sowie die Schüttungen aus rezykliertem Brechsand. Gleichzeitig bestehen Unterschiede zwischen dem Anteil an fehlsegmentierten Körnern bei optimalem  $h_{crit}(0)$ -Wert. Für die vier untersuchten feinen Schüttungen variiert dieser Anteil zwischen 0,62 % für die Mikrodioritplittschüttung und 5,20 % für die Schüttung aus rezyklierten Mauerwerksbruch.

Der Anteil an fehlsegmentierten Körnern bei Verwendung der adaptiven H-Extrematransformation mit variierenden  $h_{crit}(0)$ -Werten in Kombination mit der Wasserscheidentransformation für die untersuchten grobkörnigen Gesteinskörnungsschüttungen ist in Abb. 2.29 dargestellt. Die zugrunde liegenden Daten können Tab. D.2 aus Anhang D entnommen werden. Auch hier zeigt sich, dass ein Optimum bei der Wahl von  $h_{crit}(0)$  für die adaptive H-Extrematransformation besteht. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der feinen Gesteinskörnungsschüttungen existiert jedoch ein Bereich an optimalen  $h_{crit}(0)$ -Werten, siehe Tab. 2.7. Bei zu niedrig gewählten  $h_{crit}(0)$ -Werten steigt der Anteil an übersegmentierten Körnern, genau wie bei feinen Schüttungen, signifikant an. Der Anstieg an untersegmentierten Körnern nach Überschreiten des optimalen  $h_{crit}(0)$ -Wertes fällt jedoch weniger ausgeprägt aus. Der Anteil an fehlsegmentierten Körnern bei Wahl des optimalen  $h_{crit}(0)$ -Wertes variiert zwischen 1,39 % für die Quarzkiesschüttung und 8,92 % für die Schüttung aus rezykliertem Mauerwerksbruch.



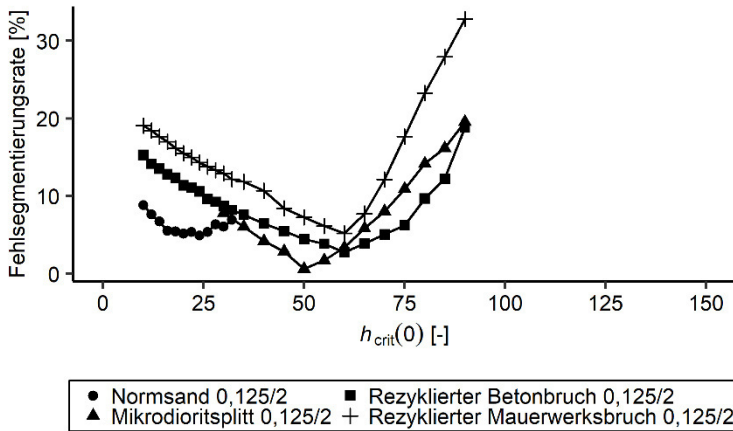


Abb. 2.28: Anteil fehlsegmentierter Körner als Summe der unter- und übersegmentierten Körner bei Variation des  $h_{crit}(0)$ -Wertes für die Schüttungen mit einer Korngröße zwischen 0,125 mm und 2 mm, in Anlehnung an [104].

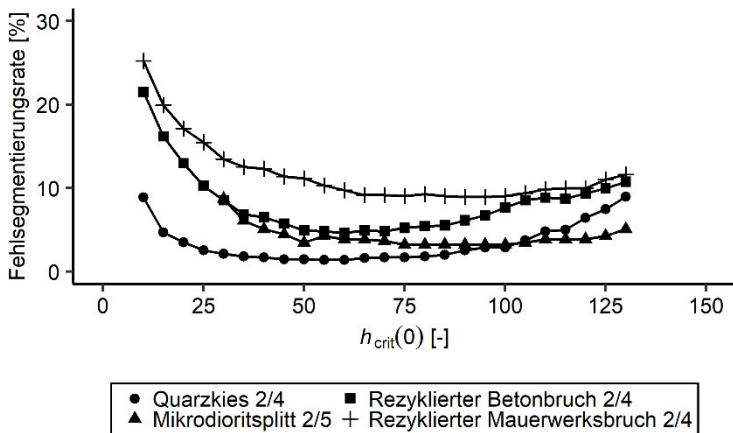


Abb. 2.29: Anteil fehlsegmentierter Körner als Summe der unter- und übersegmentierten Körner bei Variation des  $h_{crit}(0)$ -Wertes für die Schüttungen mit einer Korngröße zwischen 2 mm und 4 mm bzw. 5 mm, in Anlehnung an [104].

Im Vergleich zeigt sich, dass für die feinkörnigen Gesteinskörnungsschüttungen der Anteil an fehlsegmentierten Körnern sensibler auf die Wahl von  $h_{crit}(0)$  reagiert als bei den grobkörnigen Gesteinskörnungsschüttungen. Eine mögliche Ursache hierfür könnte die größere Spannweite an Korngrößen innerhalb der feinkörnigen Gesteinskörnungsschüttungen (zwischen 0,125 mm und 2 mm) im Vergleich zur Spannweite der Korngrößen innerhalb der grobkörnigen Gesteinskörnungsschüttungen (zwischen 2 mm und 4 mm bzw. 5 mm) sein. Im Fall von einer großen Spannweite an Korngrößen innerhalb einer Schüttung kommt es in der Regel zu einem Anstieg der Packungsdichte [162]. Daraus resultiert eine Zunahme an Kontaktpunkten zwischen Körnern. Die erhöhte Anzahl an Kontaktpunkten zwischen Körnern unterschiedlicher Korngröße

innerhalb der feinkörnigen Gesteinskörnungsschüttung kann den im Vergleich zu den grobkörnigen Schüttungen eingeschränkten Bereich optimaler  $h_{crit}(0)$ -Werte und der daraus resultierenden erhöhten Sensibilität des Anteils an Fehlsegmentierungen begründen. Insbesondere Kontaktpunkte zwischen Körnern mit sehr unterschiedlicher Korngröße neigen stark zur Untersegmentierung des kleinen Korns bzw. zur Übersegmentierung des großen Korns.

Tab. 2.7: Anteil an Über- und Untersegmentierungen sowie der Gesamtanteil an Fehlsegmentierungen bei Durchführung der adaptiven H-Extrematransformation mit optimalem  $h_{crit}(0)$ -Wert für die untersuchten feinkörnigen und grobkörnigen Gesteinskörnungsschüttungen.

<b>Material</b>	<b>Kornfraktion <math>d_i/D_i</math></b> [mm]	<b>Optimaler <math>h_{crit}(0)</math>-Wert</b> [-]	<b>Anteil untersegmentierter Körner</b> [%]	<b>Anteil übersegmentierter Körner</b> [%]	<b>Anteil fehlsegmentierter Körner</b> [%]
Normsand	0,125/2	24	2,48	2,43	4,91
Quarzkies	2/4	55-60	0,21	1,18	1,39
Mikrodiorit Splitt	0,125/2	50	0,00	0,62	0,62
	2/5	75-100	2,03	1,22	3,25
Rezyklierter Betonbruch	0,125/2	60	0,64	2,14	2,78
	2/4	60	2,01	2,62	4,63
Rezyklierter Mauerwerksbruch	0,125/2	60	2,41	2,79	5,20
	2/4	90-95	2,82	6,10	8,92

Des Weiteren zeigt sich, dass sowohl für die feinkörnige als auch die grobkörnige Schüttung aus rezyklisiertem Mauerwerksbruch der Anteil an Fehlsegmentierungen bei Wahl eines optimalen  $h_{crit}(0)$ -Wertes höher ist als bei den übrigen verwendeten Materialien. Eine mögliche Ursache hierfür könnte die Inhomogenität der Materialanteile sein, die für die MB-Schüttungen am ausgeprägtesten ist. Enthalten sind neben Bestandteilen von natürlicher Gesteinskörnung auch Ziegel- und Kalksandsteinanteile, die aufgrund ihrer geringeren Dichte auf der CT-Aufnahme deutlich niedrigere Grauwerte aufweisen. Im Zuge der Erstellung des Binärbildes ist es möglich, dass Materialanteile niedrigerer Dichte als Hohlraum auf dem Binärbild erscheinen. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 2.30 a) als Grauwertbild sowie dem daraus resultierend Binärbild in Abb. 2.30 b) zu sehen. Auch wenn nach der Erstellung des Binärbildes ein Fill-Holes-Algorithmus zum Schließen von innerhalb eines Korns liegenden Hohlräumen angewendet wird, ist die Eliminierung dieser großen Hohlräume nicht vollständig möglich. Infolgedessen kommt es vermehrt zu Übersegmentierungen von Körnern, insbesondere wenn Hohlräume auf dem Binärbild eine Verbindung vom Korninneren zum Hintergrund bilden.

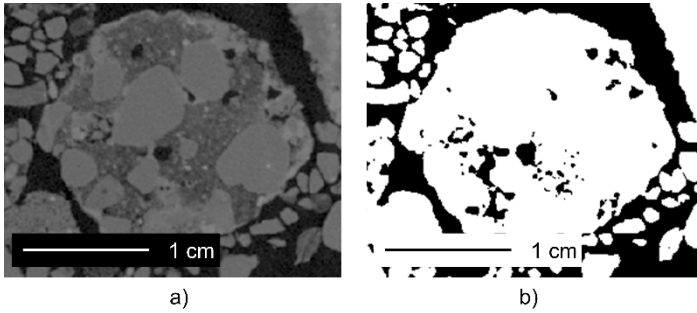


Abb. 2.30: Schnittbild durch eine CT-Aufnahme der feinen Mauerwerksbruchschüttung mit a) Grauwertbild und b) Binärbild nach Anwendung des Verfahrens nach Otsu.

Damit das rechen- und zeitintensive Ausprobieren von  $h_{crit}(0)$ -Werten nicht erfolgen muss, wird in einem weiteren Schritt der Zusammenhang zwischen den Parametern zur Charakterisierung der Gesteinskörnungsprobe untersucht. Diese Parameter sind entweder vor Anfertigung der CT-Aufnahme bekannt, können während der Bildbearbeitung ermittelt oder müssen in einem iterativen Verfahren bestimmt werden. Abb. 2.31 zeigt das Ergebnis der Korrelationsanalyse inklusive der Angabe des Korrelationskoeffizienten  $R$  nach Pearson und einer Geraden mit Steigung entsprechend  $R$  zur Veranschaulichung der Korrelation. Es zeigt sich, dass die stärkste Korrelation zwischen dem optimalen  $h_{crit}(0)$ -Wert und der Packungsdichte  $\phi$  besteht. Gleichzeitig streuen die Datenpunkte in diesem Fall nur geringfügig um die Korrelationsgerade. Dies untermauert die Vermutung, dass die Packungsdichte Einfluss auf die Wahl eines optimalen  $h_{crit}(0)$ -Wertes hat.

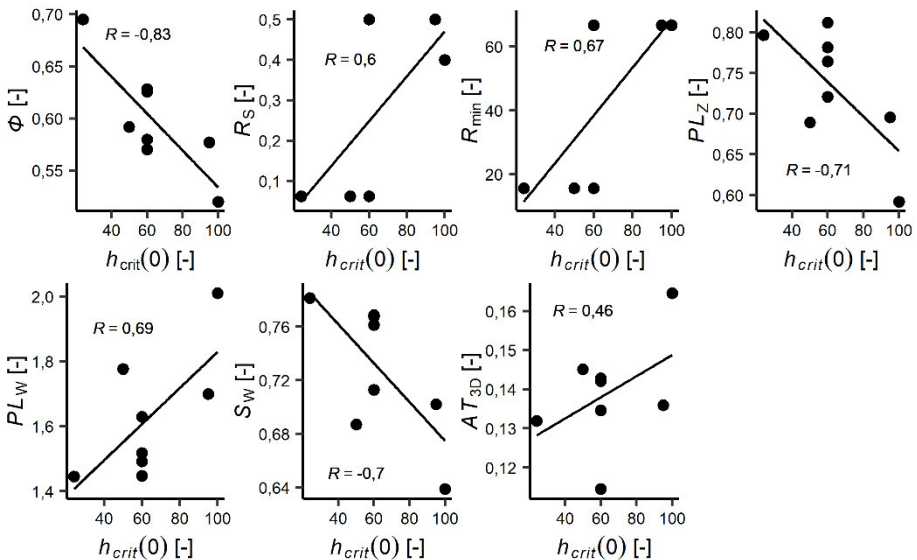


Abb. 2.31: Korrelation  $R$  nach Pearson zwischen dem optimalen  $h_{crit}(0)$ -Wert sowie verschiedenen Parametern zur Charakterisierung der Schüttungen, in Anlehnung an [104].

Für die vorab bekannten Parameter  $R_s$  und  $R_{min}$  ergibt sich ein niedrigerer Korrelationskoeffizient  $R$ , wobei aufgrund der Aufteilung in zwei Gruppen ( $R_s$  bzw.  $R_{min}$  für die feinkörnigen und grobkörnigen Schüttungen) die Datengrundlage für die Korrelationsanalyse mit  $h_{crit}(0)$  nicht optimal ist. Für die Kornformparameter  $PL_z$ ,  $PL_w$  und  $SP_w$  ergibt sich ein Korrelationskoeffizient  $R$  zwischen 0,69 und 0,71, wobei eine ausgeprägte Streuung der Daten um die angegebene Korrelationsgerade beobachtet werden kann. Der Korrelationskoeffizient zwischen den optimalen  $h_{crit}(0)$ -Werten und  $AT_{3D}$  ist mit 0,46 am niedrigsten.

Basierend auf diesen Ergebnissen erscheint eine Abschätzung des optimalen  $h_{crit}(0)$ -Wertes anhand der Packungsdichte  $\phi$  am geeignetsten. Da, wie in Abb. 2.28 und Abb. 2.29 zu sehen, ein Unterschied im optimalen  $h_{crit}(0)$ -Wert in Abhängigkeit von der Spannweite an Korngrößen innerhalb einer Schüttung besteht, wird zusätzlich der Parameter  $R_s$  in die folgende Regressionsanalyse aufgenommen. Gleichung (2.17) zeigt das Ergebnis der multiplen linearen Regression ( $F(2,5)=8,8$  und  $p<0,05$ ) mit  $R^2=0,78$ , welche für Packungsdichten von  $0,09 \leq \phi \leq 0,76$  gültig ist.

$$h_{crit}(0) = 255 \cdot [1,29 \cdot (1 - \phi) + 0,14 \cdot R_s - 0,31] \quad \text{mit } 0,09 \leq \phi \leq 0,76 \quad (2.17)$$

- mit:
- $h_{crit}$       Grenzwert für den dynamischen Parameter der adaptiven H-Extrematransformation [-]
  - $\phi$           Packungsdichte der Gesteinskörnungsschüttung [-]
  - $R_s$         Verhältnis aus minimaler zu maximaler Siebgröße [-]

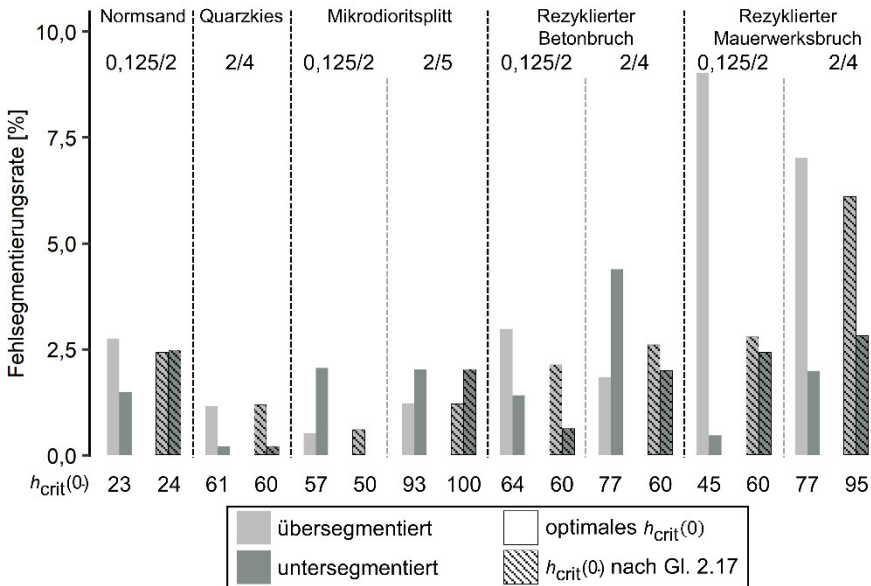


Abb. 2.32: Vergleich zwischen der Fehlsegmentierungsrate bei Verwendung des optimalen sowie dem nach Gleichung (2.17) berechneten  $h_{crit}(0)$ -Wert für die acht untersuchten Materialproben.

Unter Verwendung von Gleichung (2.17) wird der optimale  $h_{\text{crit}}(0)$ -Wert für die vier feinkörnigen und grobkörnigen Gesteinskörnungsschüttungen geschätzt, die die Datengrundlage der multiplen linearen Regression bilden. Abb. 2.32 zeigt den Vergleich zwischen dem optimalen und dem geschätzten  $h_{\text{crit}}(0)$ -Wert. Die maximale Differenz zwischen dem Anteil an Fehlsegmentierungen bei Verwendung des optimalen und des geschätzten  $h_{\text{crit}}(0)$ -Wertes liegt für die Schüttung aus feinem rezyklierten Mauerwerksbruch bei 4,30 %. Für die übrigen Schüttungen liegt die Differenz zwischen den beiden Werten bei unter 2 %. Für die Normsandschüttung sowie die Quarzkiesschüttung führt die Segmentierung mit der adaptiven H-Extrematransformation unter Verwendung des geschätzten  $h_{\text{crit}}(0)$ -Wertes zu einer geringeren Fehlsegmentierungsrate als bei Verwendung des ermittelten optimalen  $h_{\text{crit}}(0)$ . Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass beim Segmentieren mit variierendem  $h_{\text{crit}}(0)$  das Optimum aufgrund der gewählten Schrittgröße nicht exakt abgebildet werden kann. Die Differenz in der Fehlsegmentierungsrate bei optimalem und geschätztem  $h_{\text{crit}}(0)$  ist mit weniger als 1 % gering.

Zuletzt erfolgt die automatisierte Kornsegmentierung mittels adaptiver H-Extrematransformation mit Wasserscheidentransformation für jeweils vier weitere CT-Aufnahmen derselben Materialien bei Wahl des Parameters  $h_{\text{crit}}(0)$  entsprechend Gleichung (2.17). Abb. 2.33 zeigt die Boxplots für die ermittelten Fehlsegmentierungsraten, wobei der mittlere Strich den Median markiert und die umgebende Box mit Antennen ein Maß für die Streuung darstellt. Zum Vergleich des Segmentierungsergebnisses bei Verwendung unterschiedlicher Verfahren zeigt Abb. 2.33 ebenfalls die Fehlsegmentierungsrate bei Verwendung der nicht-adaptiven H-Extrematransformation sowie der adaptiven H-Extrematransformation mit  $h_{\text{crit}}(0)=36$  nach Zheng et al. [103]. Grundsätzlich zeigt sich, dass die H-Extrematransformation mit  $h_{\text{crit}}(0)$  nach Gleichung (2.17) zu niedrigeren Fehlsegmentierungsraten führt als bei Verwendung von  $h_{\text{crit}}(0)=36$  oder der nicht-adaptiven H-Extrematransformation. Lediglich für die NoS-Schüttung kann eine geringere Fehlsegmentierungsrate bei Verwendung der nicht-adaptiven H-Extrematransformation erreicht werden. Das Verfahren von Zheng et al. ist grundsätzlich für die Segmentierung von länglichen Körnern auf zweidimensionalen Aufnahmen vorgesehen, sodass eine Übertragung auf den dreidimensionalen Fall grundsätzlich kritisch zu sehen ist.

Fehlsegmentierungsraten über 5 % können insbesondere für die feinkörnige und die grobkörnige MB-Schüttung beobachtet werden. Mögliche Ursache hierfür könnte die bereits erläuterte Inhomogenität in der Materialzusammensetzung sowie erhöhte Porigkeit der Körner und die daraus resultierende erschwerte Kornsegmentierung aufgrund vorhandener Hohlräume sein. Die Fehlsegmentierungsraten der vier zusätzlich segmentierten CT-Aufnahmen liegen jedoch in einem vergleichbaren Bereich zur Fehlsegmentierungsrate bei Wahl eines optimalen  $h_{\text{crit}}(0)$ -Wertes, siehe Abb. 2.28 und Abb. 2.29. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass eine weitere Reduktion der Fehlsegmentierungsrate mit den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Verfahren nicht möglich ist. Hinzu kommt, dass bei Erstellung der Grundwahrheit Kornteile nicht immer eindeutig zugeordnet werden können, auch wenn diese Arbeit von erfahrenen Bildbearbeitern durchgeführt wird. Fehler beim manuellen Erstellen der Grundwahrheit können daher ebenfalls Einfluss auf die ermittelte Fehlsegmentierungsrate haben.

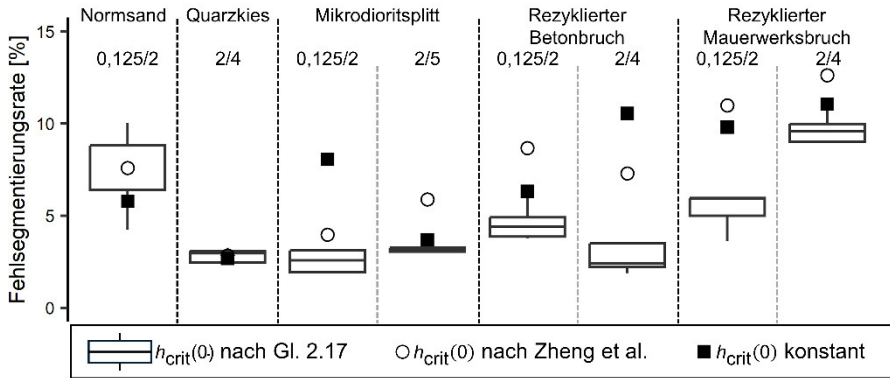


Abb. 2.33: Boxplots zur Veranschaulichung der Streuung der Fehlsegmentierungsrate der fünf Schüttungen einer Materialart sowie die Fehlsegmentierungsrate bei Verwendung eines konstanten  $h_{crit}(0)$ -Wertes nach Zheng et al. [103] und bei Anwendung der nicht-adaptiven H-Extrematransformation, in Anlehnung an [104].

Neben den MB-Schüttungen weist die NoS-Schüttung eine große Spannweite an Fehlsegmentierungsraten bei Abschätzung von  $h_{crit}(0)$  mit Gleichung (2.17) auf. Von den hier untersuchten Schüttungen weist die NoS-Schüttung die höchste Packungsdichte auf, sodass der höchste Anteil an Kontakten zwischen Körnern zu erwarten ist. Nach Gleichung (2.17) bewirken hohe Packungsdichten eine Abnahme des geschätzten  $h_{crit}(0)$ -Wertes und damit eine Verringerung der Glättungswirkung. Damit erhöht sich das Risiko von Übersegmentierungen insbesondere im Bereich von Körnern mit großer Korngröße. Aufgrund der hohen Packungsdichte ist auch die Wahrscheinlichkeit zwischen Kontakten von kleinen mit größeren Körnern erhöht. Je nach gewähltem  $h_{crit}(0)$  ist eine Untersegmentierung in diesem Fall möglich, wenn das lokale Minimum der Euklidischen Distanztransformation innerhalb des kleinen Kornes aufgrund der Glättung eliminiert wird. Dies ist ebenfalls eine mögliche Erklärung dafür, dass bei Verwendung der nicht-adaptiven H-Extrematransformation eine niedrigere Fehlsegmentierungsrate für diese Schüttung erreicht werden kann. Aufgrund der hohen Packungsdichte ist die Wahrscheinlichkeit für eine große Anzahl an kleinen Körnern hoch, die oft bei Segmentierung mit adaptiver H-Extrematransformation untersegmentiert werden. Bei Wahl eines klein gewählten Parameters  $h_{crit}$  für die nicht-adaptive H-Extrematransformation kann diese Untersegmentierung effektiv verhindert werden. Der Nachteil ist, dass große Körner in viele Kornteile übersegmentiert werden.

Mit Fehlsegmentierungsraten von unter 5 % für einen Großteil der untersuchten Materialien sowie von unter 10 % für Schüttungen mit hoher Packungsdichte oder großer Materialinhomogenität wird das vorgestellte Verfahren zur Segmentierung anhand der adaptiver H-Extrematransformation mit  $h_{crit}(0)$  nach Gleichung (2.17) und Wasserscheidentransformation als geeignet zur automatisierten Bildbearbeitung angesehen. Möglicherweise könnten weitere Verbesserungen durch eine Variation von  $h_{crit}(255)$  erzielt werden. Im Vergleich zu Fehlsegmentierungsraten von unter 9 % für das in Abschnitt 2.1.7 vorgestellte Verfahren nach Wang et al. [108] liegen die Fehlsegmentierungsraten bei Verwendung des hier vorgestellten Verfahrens in einem vergleichbaren Bereich. Nachteil des Verfahrens von Wang et al. [108] ist die begrenzte Nutzbarkeit bei Schüttungen von Körnern unterschiedlicher Korngröße. Die Weiterentwicklung von

Wang et al. [109], ebenfalls erläutert in Abschnitt 2.1.7, führt jedoch zu Fehlsegmentierungsraten von unter 3 %. Für einen Großteil der hier untersuchten Schüttungen kann ein vergleichbares Niveau an Fehlsegmentierungen erreicht werden. Ob das Verfahren nach Wang et al. [109] jedoch für Schüttungen mit hoher Packungsdichte und Materialinhomogenität zu niedrigeren Fehlsegmentierungsraten führen würde, ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Der Ansatz zur Kornsegmentierung unter Verwendung eines Random-Forests nach Lai und Chen [110], beschrieben in Abschnitt 2.1.7, führt allerdings zu höheren Fehlsegmentierungsraten von über 20 %.

## **2.4 Zusammenfassung und Festlegung eines Konzepts zur automatisierten Korncharakterisierung mittels CT**

Die in Abschnitt 2.2 durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss der strukturellen Auflösung der CT-Aufnahme und der Probenpräparation auf die Messungenauigkeit sowie das in Abschnitt 2.3 entwickelte Verfahren zur automatisierten Kornsegmentierung ergänzen die in Tab. 2.2 gelisteten Anforderungen an ein Verfahren zur automatisierten Korncharakterisierung mittels CT. Entsprechend der Untersuchungsergebnisse aus Abschnitt 2.2.1 ist ein Verhältnis der minimalen Korngröße zur Voxelgröße der CT-Aufnahme  $R_{\min} > 12$  erforderlich, wenn die Abmessungen von Körnern bestimmt werden sollen, um die erweiterte Messungenauigkeit auf 5 % zu begrenzen. Soll hingegen das Kornvolumen ermittelt werden, ist ein  $R_{\min} > 25$  erforderlich bei Begrenzung der erweiterten Messungenauigkeit auf ebenfalls 5 %. Der in Abschnitt 2.2.2 durchgeführte Vergleich zwischen Kornproben mit physisch voneinander getrennten Körnern und Kornproben, welche als lose Schüttung tomographiert werden, zeigt entweder keinen statistisch signifikanten Unterschied oder einen statistisch signifikanten Unterschied mit geringer Effektstärke. Vorteil der Anfertigung von CT-Aufnahmen von Kornproben als lose Schüttung ist gegenüber der physischen Trennung von Körnern, dass eine höhere Anzahl an Körnern auf einer einzelnen CT-Aufnahme abgebildet werden kann. Aus Effizienzgründen und aufgrund der geringen festgestellten Unterschiede zwischen den beiden Methoden zur Probenpräparation erscheint daher eine Verwendung von Kornproben als lose Schüttung geeignet. In diesem Fall berühren sich Körner auf der CT-Aufnahme, was eine Kornsegmentierung erforderlich macht. Nach Abschnitt 2.3 eignet sich hierfür die adaptive H-Extrematransformation mit  $h_{\text{crit}}(255)=1$  und  $h_{\text{crit}}(0)$  nach Gleichung (2.17) in Kombination mit der Wasserscheidentransformation. Dieses automatisierte Verfahren erfordert kein Vorwissen des Nutzers und führt zu Fehlsegmentierungsraten von unter 5 % für eine Vielzahl der untersuchten Materialien bzw. unter 10 % für Materialien, die eine hohe Packungsdichte oder starke Materialinhomogenität aufweisen. Die aus den Untersuchungsergebnissen der Abschnitte 2.2 und 2.3 resultierenden Anforderungen an die Anfertigung und Bearbeitung von CT-Aufnahmen sind in Tab. 2.8 zusammengefasst.

Tab. 2.8: Anforderungen an das Konzept zur Erstellung und Bearbeitung von CT-Aufnahmen von Gesteinskörnungsproben basierend auf den Untersuchungen aus Abschnitt 2.2 und 2.3.

<b>Parameter</b>	<b>Anforderung</b>
Voxelgröße	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bestimmung von Kornabmessungen: <math>R_{\min} &gt; 12</math></li><li>• Bestimmung von Kornvolumina: <math>R_{\min} &gt; 25</math></li></ul>
Probenvorbereitung	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tomographiert werden lose Schüttungen</li></ul>
Kornsegmentierung	<ul style="list-style-type: none"><li>• Adaptive H-Extrematransformation mit <math>h_{\text{crit}}(0)</math> nach Gleichung (2.17) und Wasserscheidentransformation</li></ul>

Die in Tab. 2.2 und Tab. 2.8 definierten Anforderungen an die Erstellung und Bearbeitung von CT-Aufnahmen von Kornproben bilden das Konzept zur automatisierten Korncharakterisierung, welches in den folgenden Kapiteln 3 und 4 zur Anwendung kommt. Sowohl für die Ermittlung geeigneter Parameter zur morphologischen Charakterisierung von Gesteinskörnungen in Kapitel 3 als auch für die Untersuchung des Einflusses morphologischer Charakteristika der Gesteinskörnung auf Mörtel Eigenschaften in Kapitel 4 werden eine Vielzahl von Kornproben tomographiert. Hierbei kommt das anhand von Tab. 2.2 und Tab. 2.8 festgelegte Konzept zur Anwendung, mit dem Ziel effizient hochwertige CT-Aufnahmen der Kornproben zu erstellen und zu bearbeiten.



### 3 Morphologische Charakterisierung der Gesteinskörnung mittels CT

#### 3.1 Grundlagen der morphologischen Charakterisierung von Gesteinskörnungen anhand von CT-Aufnahmen

##### 3.1.1 Einleitung und Begriffsdefinition

Die morphologische Beschreibung von Körnern einer Schüttung wird im Rahmen dieser Arbeit als Oberbegriff für die Charakterisierung von Größe, Form, Eckigkeit und Rauigkeit verwendet. Für verschiedene Disziplinen wie zum Beispiel die Geotechnik [92, 163, 164] oder die Beton- und Asphalttechnologie [35, 165–167] stellt die morphologische Beschreibung ein wichtiges Instrument zur Charakterisierung von Gesteinskörnungen dar. Im Hinblick auf die Beton- und Asphalttechnologie können morphologische Informationen zur Optimierung von Zusammensetzungen von Mörtel, Beton und Asphalt verwendet werden [23, 28, 168], dienen als Grundlage für die virtuelle Simulation dieser Materialien [126, 149] oder finden Anwendung im Rahmen der Produktionskontrolle bei Herstellung und Aufbereitung von Gesteinskörnungen [132, 169].

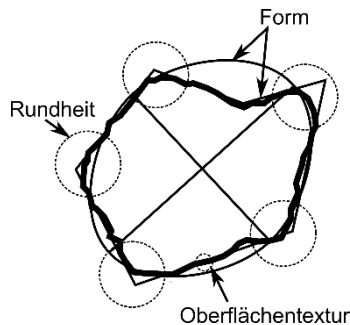


Abb. 3.1: Morphologische Beschreibung von Körnern anhand der Kategorien Form, Eckigkeit bzw. Rundheit und Rauigkeit bzw. Oberflächentextur, nach [170], übersetzt ins Deutsche.

Das Kornvolumen ist ein eindeutiger Parameter zur Beschreibung der Korngröße, in der Praxis jedoch schwierig für einzelne Körner einer Schüttung zu bestimmen [171]. Aus diesem Grund wird die Korngröße in der Regel entweder über die Angabe von Kornabmessungen wie der Länge  $l$ , Breite  $b$ , Dicke  $d$  [161, 163, 172] oder einer Siebgröße  $S$  spezifiziert [171, 173, 174]. Unabhängig von der Korngröße kann die Gestalt von Körnern anhand der drei Kategorien Form, Eckigkeit und Rauigkeit beschrieben werden. Diese, von Barrett [170] eingeführte und in die DIN ISO 9276-6 [175] aufgenommene, Definition basiert auf der Beschreibung von Merkmalen auf drei unterschiedlichen Detailebenen, welche in Abb. 3.1 dargestellt sind. Die Kornform umfasst Merkmale, die auf der Makroebene die Gestalt des Kornes beschreiben. Hierzu gehört unter anderem die Unterscheidung zwischen kubischen, länglichen oder plattigen Körnern. Wie in Abb. 3.1 zu sehen, beschreibt die Eckigkeit Informationen auf

Mesoebene, während die Rauigkeit auf Basis der Beschaffenheit eines Kornes auf Mikroebene ermittelt wird. Die drei Kategorien Form, Eckigkeit und Rauigkeit sind dabei unabhängig voneinander [37, 164, 170].

### 3.1.2 Digitale Darstellung eines Kornes

Nach dem Tomographieren der Gesteinskörnungsschüttung liegt eine CT-Aufnahme mit segmentierten Körnern vor. Jedes dieser Körner wird durch eine definierte Anzahl an Voxeln repräsentiert, das sogenannte Voxelmodell des Kornes [176]. Da die Größe der einzelnen Voxel bekannt ist, ergibt sich das Kornvolumen durch Zählen der Voxel, die ein Korn darstellen [176]. Nachteil des Voxelmodells ist der hohe Speicherbedarf aufgrund der großen Anzahl an Objekten, deren Position gespeichert wird, und der daraus resultierende hohe Zeitbedarf für die Bestimmung von morphologischen Parametern [33]. Eine Alternative zum Voxelmodell stellt die sogenannte Kugelflächenfunktion dar, die zur Repräsentation eines Kornes verwendet werden kann [33, 177]. Bei der Kugelflächenfunktion handelt es sich um eine mathematische Funktion, die Punkte auf der Kornoberfläche annähert. Detaillierte Informationen zur Herleitung der Darstellung von Körnern mit Hilfe von Kugelflächenfunktionen können [33, 177–179] entnommen werden. Nachteil dieser Art der digitalen Darstellung ist jedoch, dass nicht alle in der Realität vorkommenden Kornformen abbildbar sind. Abb. 3.2 zeigt sowohl die Darstellung eines Kornes anhand des Voxelmodells als auch anhand der Kugelflächenfunktion.

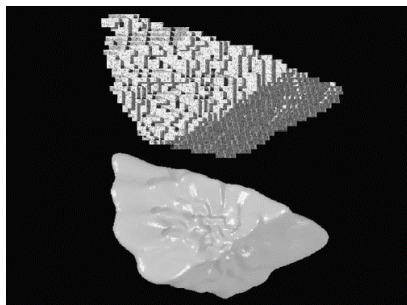


Abb. 3.2: Digitale Darstellung eines Kornes anhand des Voxelmodells (oben) sowie der Kugelflächenfunktion (unten), nach [33].

Im Rahmen dieser Arbeit werden die morphologischen Parameter anhand des Voxelmodells eines Kornes bestimmt, weswegen im Folgenden der Schwerpunkt auf morphologischen Parametern liegt, die auf dieser Grundlage bestimmt werden können.

### 3.1.3 Korngröße

Die Kornabmessungen Länge  $l$ , Breite  $b$  und Dicke  $d$  eignen sich zur Beschreibung der Korngröße, und sind in der Praxis oft einfacher zu bestimmen als das Kornvolumen [171]. Viele der in Abschnitt 3.1.5 vorgestellten Parameter zur Beschreibung der Kornform werden auf Basis der Kornabmessungen  $l$ ,  $b$  und  $d$  berechnet. Zur manuellen Bestimmung der Kornabmessungen kommen entweder Messschieber oder Maßbänder zum Einsatz [37, 161, 164]. Wie genau die Abmessungen eines Kornes bestimmt werden, hängt von der jeweiligen Definition ab, wovon zwei gängige im Folgenden

vorgestellt werden. Gemeinsam haben diese Definitionen, dass die Kornlänge größer als die Kornbreite und diese größer als die Korndicke ist [37, 161, 164, 172].

Nach Krumbein [164] werden die Kornabmessungen derart bestimmt, dass  $l$ ,  $b$  und  $d$  senkrecht zueinander stehen. Abb. 3.3 a) zeigt das Resultat der Bestimmung der Kornabmessungen nach Krumbein. Die Länge ist definiert als der größte Abstand zwischen zwei Punkten des Korns auf der größten Projektionsfläche, welche sich bei Rotation des Korns um die Längsachse ergibt. Im Anschluss an die Bestimmung der Kornlänge, dient zur Bestimmung der Breite der größte Abstand zwischen zwei Punkten senkrecht zur Längsachse. Senkrecht zur Längen- und Breitenachse wird anschließend die Korndicke wiederum als größter Abstand zwischen zwei Punkten bestimmt. Die Achsen von  $l$ ,  $b$  und  $d$  stehen folglich senkrecht zueinander, müssen sich jedoch nicht in einem Punkt kreuzen. Nach der Definition von Krumbein weichen die Kornabmessungen insbesondere für den Quader von der mathematischen Definition der Quaderabmessungen ab, da nach dieser Definition die Diagonale als Kornlänge  $l$  bezeichnet wird [172]. Aus diesem Grund schlagen Blott und Pye [172] eine Methode zur Bestimmung der Kornabmessungen vor, die sich an einem Quader orientiert, der das Korn umhüllt und gleichzeitig ein minimales Volumen aufweist. Die Kornabmessungen  $l$ ,  $b$  und  $d$  entsprechen den Abmessungen dieses umhüllenden Quaders, siehe Abb. 3.3 b).

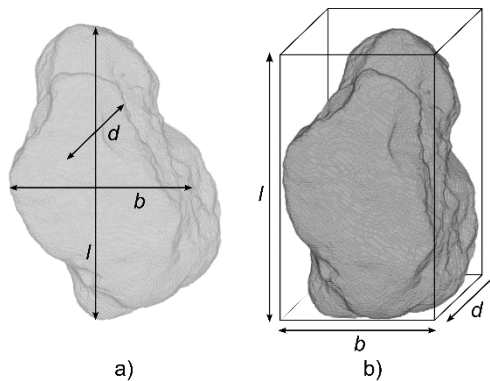


Abb. 3.3 Bestimmung der Kornabmessungen a) nach der Definition von Krumbein [164], b) nach der Definition von Blott und Pye [172].

Statt mit dem Messschieber können  $l$ ,  $b$  und  $d$  anhand der dreidimensionalen digitalen Darstellung des Korns numerisch nach Krumbein oder der Methode des kleinsten umhüllenden Quaders berechnet werden [130, 131]. Weiterführende Informationen zur Umsetzung eines Algorithmus zur Bestimmung dieses Quaders können zum Beispiel [131] entnommen werden. Vorteil des auf digitalen Abbildungen beruhenden Verfahrens ist die Sicherstellung der Anforderung bezüglich der Orthogonalität von  $l$ ,  $b$  und  $d$  [130]. Neben den bereits vorgestellten Methoden zur Bestimmung der Kornabmessungen, ermöglicht die digitale Darstellung eines Korns die Bestimmung von Kornabmessungen entlang der Hauptträgheitsachsen [92, 176, 180]. Nähere Informationen zur Bestimmung der Hauptträgheitsachsen können [176, 181] entnommen werden.

Die Korngröße in Form von Volumen und Oberfläche kann anhand der digitalen Darstellung eines Kornes als Voxelmodell bestimmt werden. Das Volumen ergibt sich aus der Anzahl der Voxel, die einem Korn nach der in Abschnitt 2.1.7 beschriebenen Kornsegmentierung zugeordnet sind, multipliziert mit dem Voxelvolumen [131, 180]. Wie in Abschnitt 2.2.1.6 erläutert, ist die Oberfläche eines Kornes abhängig von der Skala, auf der die Messung erfolgt [34, 132, 147]. Im Folgenden bezieht sich daher der Begriff „tatsächliche Oberfläche“ immer auf eine definierte Voxelauflösung. Deutlicher als dies bei der Bestimmung des Volumens der Fall ist, hängt das Ergebnis der Oberflächenmessung von der gewählten Methode ab [180]. Eine Methode zur Bestimmung der Oberfläche ist das Aufsummieren der Flächeninhalte aller Voxelflächen, die den Kornrand darstellen. Aufgrund der stufenförmigen Darstellung der Kornoberfläche kommt es jedoch zu einer Überschätzung der tatsächlichen Oberfläche [93, 180]. Als weitere Methoden zur Bestimmung der Kornoberfläche kommen die Kugelflächenfunktion [177, 180] oder der Marching Cube Algorithmus von Lorensen und Cline [182] in Frage. Die Kornoberfläche wird in MAVI [97] mit MAVIparticle [135] und ToolIP [134] (ITWM), der hier verwendeten Software, anhand von inneren Volumina und der Crofton-Formel bestimmt. Detaillierte Informationen können [91, 183] entnommen werden.

#### **3.1.4 Siebgröße**

Das Vermessen von Körnern mit dem Messschieber liefert zwar direkt die Kornabmessungen, ist jedoch auf Grund des hohen zeitlichen und personellen Aufwandes nur für Gesteinskörnungsproben mit sehr geringer Anzahl an Körnern geeignet, die zudem eine ausreichende Korngröße für das händische Vermessen aufweisen müssen. Aus diesem Grund kommt in der Praxis oft das Siebverfahren zur Anwendung [174, 184]. Hierfür wird nach DIN EN 933-1 [174] die Gesteinskörnung auf Sieben mit unterschiedlichen Öffnungsweiten gesiebt und jeweils der prozentuale Durchgang und Rückstand an Gesteinskörnung bezogen auf die Gesamtmasse der Probe bestimmt. Bis zu einer Korngröße von 3,15 mm kommen Maschensiebe aus Draht zum Einsatz, für größere Körner werden Blechsiebe mit quadratischen Aussparungen verwendet [185]. Die Verwendung von Sieben mit quadratischen Öffnungen führt jedoch dazu, dass keine direkte Korrelation zwischen der Siebgröße  $S$  eines Kornes und den Kornabmessungen Länge  $l$ , Breite  $b$  und Dicke  $d$  besteht, sondern auch eine Abhängigkeit von der Kornform [173, 184, 186, 187]. Sahu [173] nähert sich der Fragestellung der Korrelation mittels theoretischer Betrachtung von drei Fällen an. Grundsätzlich geht der Autor davon aus, dass ein Korn in Richtung der Kornlänge  $l$  orthogonal zur Siebebene das Sieb passiert. Wird der das Sieb passierende Kornquerschnitt als Kreis, Ellipse oder Quader vereinfacht beschrieben, ergibt sich für den Zusammenhang zwischen Kornbreite  $b$  und Siebgröße  $S$  ein Bereich von  $S < b < \sqrt{2}S$ . Neben den Kornabmessungen bestimmt folglich auch die Kornform, welcher Siebgröße ein Korn zugeordnet wird.

Der Gesteinskörnungsanteil für Mörtel und Beton besteht entweder aus einer oder mehreren zusammengesetzten Kornklassen, wobei jede Kornklasse nach DIN EN 12620 [188] und DIN 1045-2 [13] anhand einer unteren Siebgröße  $d_i$  und einer oberen  $D_i$  charakterisiert wird. Ein gewisser Massenanteil an Körnern darf dabei außerhalb der angegebenen Grenzsiebgrößen  $d_i$  und  $D_i$  liegen, welcher als Über- bzw. Unterkornanteil bezeichnet wird [188]. Die Verteilung der Korngrößen innerhalb einer Korngruppe

oder zusammengesetzten Schüttung wird als Korngrößenverteilung [188] oder Sieblinie [13] bezeichnet.

Zur Bestimmung der Siebgröße anhand der dreidimensionalen, digitalen Abbildung eines Kornes existieren verschiedene Ansätze. Als ein erster Ansatz ist die Siebgröße  $S$  einer der Kornabmessungen  $l$ ,  $b$  oder  $d$  gleichzusetzen. Ein Vergleich zwischen der Verteilung von  $l$ ,  $b$  und  $d$ , bestimmt entlang der Hauptträgheitsachsen eines Kornes, zur labortechnischen Siebung von Fonseca et al. [92] zeigt, dass die größte Übereinstimmung zwischen der Siebgröße  $S$  und der Kornbreite  $b$  besteht. Da die Siebgröße sowohl von den Kornabmessungen als auch der Kornform abhängig ist, werden in der Literatur unterschiedliche Verfahren vorgeschlagen, um die kleinste Quadratöffnung zu ermitteln, die das Voxelmmodell eines Korn passieren kann [124, 154, 189]. Diese Verfahren basieren entweder auf der Ermittlung des minimalen umhüllenden Quadrats für eine Vielzahl an Kornprojektionen eines Kornes [154] oder auf dem Vergleich zwischen einer Quadratöffnung und virtuell erstellten Kornscheiben [124, 189], beispielhaft zu sehen in Abb. 3.4.

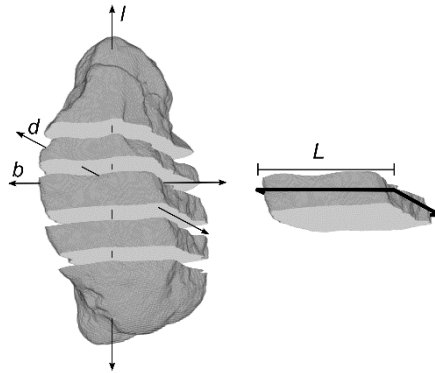


Abb. 3.4: Schematische und vereinfachte Darstellung der Bestimmung der Siebgröße anhand von virtuellen Kornscheiben entlang der Hauptträgheitsachse eines Kornes.

Ein weniger rechenintensiver Ansatz besteht darin, das Korn mit einem regelmäßigen, geometrischen Körper wie dem Quader [124, 190, 191], der Kugel [124, 130, 190, 191] oder einem Ellipsoid [124, 190, 191] anzunähern. In Abhängigkeit von der untersuchten Gesteinskörnung sowie dem gewählten geometrischen Modell entspricht das Ergebnis der labortechnischen Siebung dem digitalen Modell oder es besteht eine Abweichung [130, 190, 191].

### 3.1.5 Kornform

Entsprechend der Definition aus Abschnitt 3.1.1 ist die Kornform der beschreibende morphologische Parameter auf Makroebene. Basierend auf den Kornabmessungen können Verhältnisse von Kornabmessungen zur Beschreibung von Plattigkeit oder Länglichkeit gebildet werden. Vorteil der Bestimmung von Kornformparametern basierend auf der digitalen Darstellung von Körnern gegenüber labortechnischen Verfahren ist, dass kontinuierliche Verteilungen, analog zur Korngrößenverteilung, auch für die Verteilung von Kornformparametern dargestellt werden können, da Informationen zur

Kornform für jedes Korn einzeln vorliegen [92]. Auch wenn in der Literatur unterschiedliche Namen für die jeweiligen Kategorien verwendet werden [37, 164, 192], wird im Folgenden auf die Begriffe „länglich“, „plattig“ und „hohe Sphärizität“ zurückgegriffen. Ein Korn gilt dabei als länglich, wenn  $l$  deutlich größer als  $b$  und  $d$  ist. Plattige Körner sind durch ein  $d$  gekennzeichnet, dass im Vergleich zu  $b$  und  $l$  deutlich kleiner ist. Besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den drei Kornabmessungen, wird von Körnern mit hoher Sphärizität gesprochen. Im Folgenden werden in der Literatur vorgeschlagene Kornformparameter vorgestellt. Diese Kornformparameter sind zusammen mit ihrer Formel zur Berechnung in Tab. 3.1 bis Tab. 3.3 zusammengefasst. Nähere Informationen zu Hintergründen und weiteren Eigenschaften dieser Parameter können der jeweiligen Veröffentlichung entnommen werden.

Tab. 3.1: Zusammenfassung von Parametern zur Beschreibung der Plattigkeit mit Berechnungsformel, Erläuterung der verwendeten Formelzeichen sowie Angabe der Veröffentlichung, in Anlehnung an [160].

Kornformparameter	Formelzeichen	Veröffentlichung
$PL_W = \frac{l+b}{2 \cdot d}$	$l$ Kornlänge [m] $b$ Kornbreite [m] $d$ Korndicke [m]	Wentworth 1922 [161]
$PL_Z = \frac{d}{b}$	$b$ Kornbreite [m] $d$ Korndicke [m]	Zingg 1935 [37]
$PL_C = \frac{d}{\sqrt{l \cdot b}}$	$l$ Kornlänge [m] $b$ Kornbreite [m] $d$ Korndicke [m]	Corey 1949 [193]
$PL_{SF} = \frac{d}{l}$	$l$ Kornlänge [m] $d$ Korndicke [m]	Sneed und Folk 1958 [192]
$PL_A = \frac{l \cdot d}{b^2}$	$l$ Kornlänge [m] $b$ Kornbreite [m] $d$ Korndicke [m]	Aschenbrenner 1956 [163]

Tab. 3.2: Zusammenfassung von Parametern zur Beschreibung der Länglichkeit mit Berechnungsformel, Erläuterung der verwendeten Formelzeichen sowie Angabe der Veröffentlichung, in Anlehnung an [160].

Kornformparameter	Formelzeichen	Veröffentlichung
$LL_Z = \frac{b}{l}$	$l$ Kornlänge [m] $b$ Kornbreite [m]	Zingg 1935 [37]
$LL_J = \frac{d}{\sqrt{\frac{l^2 + b^2 + d^2}{3}}}$	$l$ Kornlänge [m] $b$ Kornbreite [m] $d$ Korndicke [m]	Janke 1966 [194]
$LL_{SF} = \frac{l-b}{l-d}$	$l$ Kornlänge [m] $b$ Kornbreite [m] $d$ Korndicke [m]	Sneed und Folk 1958 [192]
$LL_D = \frac{\pi \cdot l_g^3}{6 \cdot V_{Korn}}$	$l_g$ Längste Verbindungslinie zwischen zwei Punkten auf der Kornoberfläche [m] $V_{Korn}$ Kornvolumen [m <sup>3</sup> ]	Denis, Barat et al. 2008 [195]

Im Hinblick auf die Bestimmung der Sphärizität nach ihrer ursprünglichen Definition von Wadell [36] besteht der Nachteil darin, dass kein Verfahren existiert, die Oberfläche eines einzelnen Kornes exakt zu bestimmen [163, 164, 184]. Eine Ursache hierfür ist die Skalenabhängigkeit von der Oberflächenbestimmung [34, 132, 147]. Mit zunehmender Auflösung von Oberflächendetails eines Messverfahrens steigt die gemessene Oberfläche des Kornes [132]. Die Angabe einer Oberfläche kann daher nur im Kontext der Angabe der Auflösung des Messverfahrens erfolgen [34]. Alternative Kornformparameter zur Beschreibung der Sphärizität basieren daher auf den Kornabmessungen [164, 192, 196], auf der Annäherung des Kornes mit einem regelmäßigen geometrischen Körper, dessen Oberfläche bestimmbar ist [163], auf dem Vergleich zwischen einer das Korn umhüllenden Kugel mit minimalem Volumen und einer innerhalb des Kornes liegenden Kugel mit maximalem Volumen [38] oder auf der Krümmung der Kornoberfläche [132].

Tab. 3.3: Zusammenfassung von Parametern zur Beschreibung der Sphärität mit Berechnungsformel, Erläuterung der verwendeten Formelzeichen sowie Angabe der Veröffentlichung, in Anlehnung an [160].

Kornformparameter	Formelzeichen	Veröffentlichung
$SP_W = \frac{O_{\text{Kugel}}}{O_{\text{Korn}}}$	$O_{\text{Kugel}}$ Oberfläche einer Kugel mit einem Volumen entsprechend dem Kornvolumen [m <sup>2</sup> ] $O_{\text{Korn}}$ Kornoberfläche [m <sup>2</sup> ]	Wadell 1932 [36]
$SP_{SF} = \sqrt[3]{\frac{d^2}{l \cdot b}}$	$l$ Kornlänge [m] $b$ Kornbreite [m] $d$ Korndicke [m]	Sneed und Folk 1958 [192]
$SP_K = \sqrt[3]{\frac{b \cdot d}{l^2}}$	$l$ Kornlänge [m] $b$ Kornbreite [m] $d$ Korndicke [m]	Krumbein 1941 [164]
$SP_H = \frac{1}{\ln\left(\frac{1}{3}\right)} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{x_i}{l+b+d} \cdot \ln\left(\frac{x_i}{l+b+d}\right)$ mit $x_1=l, x_2=b$ und $x_3=d$	$l$ Kornlänge [m] $b$ Kornbreite [m] $d$ Korndicke [m]	Hofmann 1994 [38, 196]
$SP_A = \frac{O_{\text{T-Kugel}}}{O_T}$	$O_{\text{T-Kugel}}$ Oberfläche einer Kugel mit Volumen entsprechend des Tetradekaedermodells des Kornes [m <sup>2</sup> ] $O_T$ Oberfläche des Tetradekaedermodells des Kornes [m <sup>2</sup> ]	Aschenbrenner 1956 [163]
$SP_B = \frac{r_{ik}}{r_{ak}}$	$r_{ik}$ Radius der größten innerhalb des Kornes liegenden Kugel [m] $r_{ak}$ Radius der kleinsten das Korn umhüllenden Kugel [m]	Bullard und Garboczi 2013 [38]



Fortsetzung Tab. 3.3: Zusammenfassung von Parametern zur Beschreibung der Sphärität mit Berechnungsformel, Erläuterung der verwendeten Formelzeichen sowie Angabe der Veröffentlichung, in Anlehnung an [160].

Kornformparameter	Formelzeichen	Veröffentlichung
$SP_{HO} = \frac{O_{\text{Ellipsoid}}(l,b,d)}{O_{\text{Korn}}}$	$O_{\text{Ellipsoid}}$ Oberfläche eines Ellipsoids dessen Halbachsen den halben Abmessungen $l$ , $b$ und $d$ entsprechen [m <sup>2</sup> ] $O_{\text{Korn}}$ Kornoberfläche [m <sup>2</sup> ]	Hayakawa und Oguchi 2005 [39]
$SP_Q = \frac{6^3 \cdot V_{\text{Korn}}^2}{O_{\text{Korn}}^3}$	$V_{\text{Korn}}$ Kornvolumen [m <sup>3</sup> ] $O_{\text{Korn}}$ Kornoberfläche [m <sup>2</sup> ]	Denis, Barat et al. 2008 [195] Vecchio, Schladitz et al. 2011 [131]
$SP_G = \frac{2 \cdot K^1}{d_v}$	$K$ Mittlere Krümmung bestimmt über die Kornoberfläche [1/m] $d_v$ Durchmesser einer Kugel mit dem gleichen Volumen wie das Korn [m]	Garboczi, Liu et al. 2012 [132]

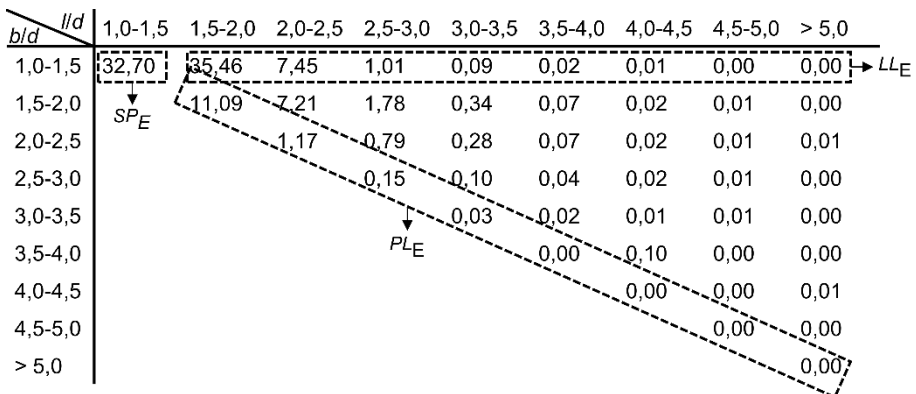


Abb. 3.5: Verteilung der Körner einer Kornschüttung zur Bestimmung von  $SP_E$ ,  $LL_E$  und  $PL_E$  (Angaben in % bezogen auf die Gesamtanzahl an Körnern).

Anhand der vorgestellten Kornformparameter zur Beschreibung von Länglichkeit, Plattigkeit und Sphärität können einzelne Körner einer Schüttung charakterisiert werden.

Für unterschiedliche Schüttungen von Gesteinskörnungen ermöglicht dies einen Vergleich der Verteilung einzelner Kornformparameter. Erdogan et al. [35] wählen hierfür eine übersichtliche Matrixdarstellung. Ein Beispiel hierfür zeigt Abb. 3.5. Jedes Korn wird entsprechend der Verhältnisse von  $l/d$  und  $b/d$  in eines der Matrixfelder eingeordnet. Der prozentuale Anteil an der Gesamtschüttung charakterisiert dann die Verteilung der Kornformen innerhalb der Schüttung. So befindet sich im oberen, linken Feld die Angabe über den Anteil an Körnern mit hoher Sphärizität  $SP_E$ , entlang der Diagonalen sind die plattigen Körner  $PL_E$  einsortiert sowie entlang der oberen Horizontalen die länglichen Körner  $LL_E$ .

### 3.1.6 Eckigkeit

Die Eckigkeit, der morphologische Parameter auf Mesoebene, kann labortechnisch entweder anhand der sehr zeitaufwendigen Vermessung einzelner Ecken eines Kornes erfolgen [36, 161, 197], anhand eines visuellen Vergleichs mit tabellierten Eckigkeitskategorien [164, 198], indirekt über eine Bestimmung des Hohlraumgehalts einer Schüttung [199, 200] oder indirekt über den Fließkoeffizienten [31, 201]. Das Voxelmodell ermöglicht die objektive Berechnung der Eckigkeit für jedes Korn einer Schüttung. Die in der Literatur vorgeschlagenen Parameter zur Charakterisierung der Eckigkeit eines Kornes, basierend auf dem Voxelmodell, können in drei Gruppen eingeteilt werden: Entweder wird der Grad der Eckigkeit anhand eines Verhältnisses von Kornoberfläche und Kornvolumen bestimmt, oder es erfolgt eine Beurteilung der Konvexität des Kornes oder drittens wird die Krümmung der Kornoberfläche untersucht. Zur ersten Gruppe zählt auch die tatsächliche Sphärizität nach Wadell [36], da eine Korrelation sowohl mit der Form als auch der Rundheit eines Kornes festgestellt werden kann [39, 170].

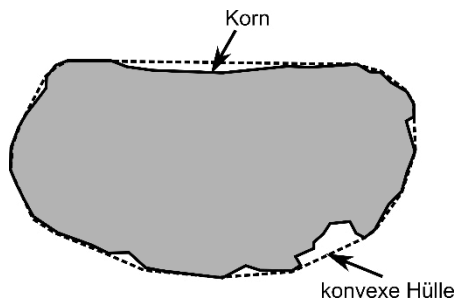


Abb. 3.6: Beispielhafte Darstellung der konvexen Hülle einer Kornprojektion.

Für die zweite Gruppe definiert sich ein konvexer Körper dadurch, dass jede gerade Verbindungslinie zwischen zwei Punkten auf der Kornoberfläche innerhalb des Körpers verläuft [202]. Die konvexe Hülle eines Kornes ist folglich ein konvexer Körper, der das Korn vollständig beinhaltet. Abb. 3.6 zeigt die konvexe Hülle anhand eines zweidimensionalen Beispiels. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Software MAVI [97] bestimmt die konvexe Hülle eines Kornes anhand von Ebenen, die senkrecht zu den 13 sogenannten Normalenrichtungen stehen und an das Korn angenähert werden. Eine Zusammenfassung der vorgeschlagenen Parameter inklusive ihrer Berechnungsformel enthält Tab. 3.4.

Tab. 3.4: Zusammenfassung von Parametern zur Beschreibung der Eckigkeit mit Berechnungsformel, Erläuterung der verwendeten Formelzeichen sowie Angabe der Veröffentlichung, in Anlehnung an [160].

Kornformparameter	Formelzeichen	Veröffentlichung
$SP_W = \frac{O_{Kugel}}{O_{Korn}}$	$O_{Kugel}$ Oberfläche einer Kugel mit Volumen entsprechend dem Kornvolumen [m <sup>2</sup> ] $O_{Korn}$ Oberfläche des Korns [m <sup>2</sup> ]	Wadell 1932 [36]
$A_{HO} = \frac{V_{Korn}}{O_{Korn} \cdot \sqrt[3]{l \cdot b \cdot d}}$	$V_{Korn}$ Kornvolumen [m <sup>3</sup> ] $O_{Korn}$ Kornoberfläche [m <sup>2</sup> ] $l$ Kornlänge [m] $b$ Kornbreite [m] $d$ Korndicke [m]	Hayakawa und Oguchi 2005 [39]
$AT_{2D} = \frac{U_{Korn} - U_{Konvex}}{U_{Konvex}}$ $AT_{3D} = \frac{O_{Korn} - O_{Konvex}}{O_{Konvex}}$	$U_{Korn}$ Umfang einer Projektion [m] $U_{Konvex}$ Umfang der konvexen Hülle einer Projektion [m] $O_{Korn}$ Kornoberfläche [m <sup>2</sup> ] $O_{Konvex}$ Oberfläche der konvexen Hülle des Korns [m <sup>2</sup> ]	Zhang, Huang et al. 2012 [40]
$A_{GB} = \frac{V_{Korn}}{V_{Konvex}}$	$V_{Korn}$ Kornvolumen [m <sup>3</sup> ] $V_{Konvex}$ Volumen der konvexen Hülle des Korns [m <sup>3</sup> ]	Garboczi und Bullard 2013 [203]

Fortsetzung Tab. 3.4: Zusammenfassung von Parametern zur Beschreibung der Eckigkeit mit Berechnungsformel, Erläuterung der verwendeten Formelzeichen sowie Angabe der Veröffentlichung, in Anlehnung an [160].

Kornformparameter	Formelzeichen	Veröffentlichung
$A_{ZW} = \frac{\sum \left( A_n \cdot \frac{K_{Kugel}}{0,5 \cdot (K_{max} + K_{min})} \right)}{\sum A_n}$	$K_{max}$	Maximale Krümmung eines Punktes auf der Kornoberfläche [1/m]
	$K_{min}$	Minimale Krümmung eines Punktes auf der Kornoberfläche [1/m]
	$A_n$	Flächeninhalt einer Dreiecksfläche, die Teil einer Kornecke ist [m <sup>2</sup> ]
	$K_{Kugel}$	Krümmung der größten, vollständig innerhalb des Kornes liegenden Kugel [1/m]
$A_{BG} = \frac{\int_O  \vec{r} \cdot \vec{n}  dO}{\int_O dO}$	O	Oberfläche [m <sup>2</sup> ]
	$\vec{r}$	Vektor zwischen Volumenschwerpunkt und betrachtetem Punkt auf der Kornoberfläche
	$\vec{n}$	Normalenvektor des betrachteten Punktes auf der Kornoberfläche
		Zhao und Wang 2016 [93]
		Bullard und Garboczi 2013 [38]

### 3.1.7 Rauigkeit

Eine Herausforderung bei der Bestimmung der Rauigkeit von Körnern stellt die große Abhängigkeit dieses auf der Mikroebene bestimmten Parameters von der Auflösung dar, da die Rauigkeit analog zur Oberfläche mit zunehmender Bildauflösung zunimmt [204, 205]. Die in Abschnitt 3.1.6 beschriebenen Verfahren liefern neben Informationen zur Eckigkeit von Körnern teilweise auch Anhaltspunkte für die Rauigkeit, werden im Folgenden jedoch nicht erneut aufgeführt. Masad und Button [206] stellen ein Verfahren vor, welches auf der Analyse des Randes einer Kornprojektion basiert. Hierfür werden Aufnahmen von Körnern mit einer maximalen Siebgröße von 1,18 mm mit einer Pixelgröße von 3 µm angefertigt. Die Aufnahmen werden in ein Binärbild umgewandelt und mit einer sich sechsmal wiederholenden Abfolge von Erosion und Dilation bearbeitet. Während bei der Erosion Pixel des Kornrandes entfernt werden, werden bei der Dilation Pixel hinzugefügt. Beide Verfahren führen zu einer Glättung des Kornrandes und damit zur Eliminierung der Kornrauigkeit. Detailliertere Information zu Erosion und

Dilation können [91, 207] entnommen werden. Nach Gleichung (3.1) ergibt sich das Maß für die Rauigkeit  $T_{MB}$  durch einen Vergleich des Flächeninhalts der Kornprojektion vor und nach Bearbeitung mit Erosion und Dilation.

$$T_{MB} = \frac{A_{Korn} - A_{ED}}{A_{Korn}} \quad (3.1)$$

mit:	$T_{MB}$	Rauigkeit nach Masad und Button [-]
	$A_{Korn}$	Flächeninhalt einer Kornprojektion [m <sup>2</sup> ]
	$A_{ED}$	Flächeninhalt der Kornprojektion nach sechsfacher Anwendung von Erosion und Dilation [m <sup>2</sup> ]

Dieses auf zweidimensionalen Kornprojektionen basierende Verfahren ist grundsätzlich auf den dreidimensionalen Fall übertragbar, vorausgesetzt eine CT-Aufnahme mit entsprechender Voxelgröße liegt vor. Anstatt des Vergleiches des Flächeninhalts der Kornprojektion kann der Parameter  $T_{MB}$  dann über einen Vergleich des Kornvolumens bestimmt werden.

### **3.1.8 Zusammenfassung und Fazit**

Abschnitt 3.1.3 bis 3.1.7 bieten für Körner sowie Schüttungen aus Körnern einen Überblick über Parameter zur Beschreibung von Form, Eckigkeit und Rauigkeit. Diese Parameter können grundsätzlich für Körner bestimmt werden, wenn deren dreidimensionale Abbildung digital vorliegt, wie dies zum Beispiel bei der Anfertigung von CT-Aufnahmen der Fall ist. Nach Anfertigung von CT-Aufnahmen einer Schüttung und einer anschließenden Bildbearbeitung können morphologische Parameter, basierend auf den mit MAVI und MAVIparticle bestimmten Kornabmessungen wie unter anderem  $l$ ,  $b$ ,  $d$ ,  $V_{Korn}$  oder  $O_{Korn}$ , bestimmt werden. Insbesondere für die Beschreibung der Kornform, aber auch für die Beschreibung der Eckigkeit, existiert eine große Vielzahl an Parametern. Die im folgenden Abschnitt dargestellten Versuchsergebnisse verfolgen das Ziel einen Satz aus Parametern zusammenzustellen, der zur Beschreibung von Form, Eckigkeit und Rauigkeit ganzer Schüttungen geeignet ist.

## **3.2 Auswahl geeigneter morphologischer Kenngrößen für Gesteinskörnungsschüttungen**

### **3.2.1 Einleitung**

Im Folgenden wird die Charakterisierung von Schüttungen im Hinblick auf Kornform und Eckigkeit näher untersucht. Ziel ist zum einen die Festlegung von Kenngrößen, die zur Beschreibung der Verteilung eines morphologischen Parameters innerhalb einer Schüttung aus Gesteinskörnungen geeignet sind. Zum anderen sollen aus den in den Abschnitten 3.1.5 und 3.1.6 vorgestellten Parametern geeignete Parameter zur Beschreibung von Form und Eckigkeit der Körner innerhalb einer Schüttung ermittelt werden. Die Charakterisierung der Textur von Körnern einer Schüttung wird im Folgenden nicht näher beleuchtet, da aufgrund der Systemgrenzen des verwendeten CT-Systems keine CT-Aufnahmen mit einer ausreichend hohen Auflösung erstellt werden können. Voraussetzung für die Auswahl von morphologischen Parametern ist eine

möglichst geringe Korrelation zwischen den ausgewählten Parametern zur Generierung eines maximalen Informationsgehalts bei minimaler Anzahl an zu bestimmenden Parametern. Die geringe Korrelation zwischen morphologischen Parametern stellt dabei auch eine Voraussetzung für die in Kapitel 4 durchgeführte multiple lineare Regressionsanalyse zur Untersuchung des Einflusses von morphologischen Parametern auf Mörtel Eigenschaften in frischem und festem Zustand dar.

### 3.2.2 Materialien

Die Untersuchung basiert auf zehn feinen Schüttungen unterschiedlicher Materialien sowie unterschiedlicher Korngrößenverteilungen mit Korngrößen zwischen 0,125 mm und 2 mm. Fünf Materialien kommen dabei zum Einsatz, siehe Abb. 3.7. Zunächst ein natürlicher Rheinsand (SA), welcher sich durch eine gerundete Kornform sowie natürlich verwitterte Oberfläche auszeichnet. Des Weiteren wird ein Basaltsplitt (S) mit aus dem Brechprozess resultierender eckiger Kornform und homogener mineralogischer Zusammensetzung verwendet. Als rezyklierte Schüttungen kommen ein reiner Betonbruch (BB), hergestellt aus der Überschuss- und Fehlproduktion eines Fertigteilwerks, sowie ein Mauerwerksbruch (MB) mit stark variierender mineralogischer Zusammensetzung zum Einsatz. Die rezyklierten Materialien weisen zudem im Vergleich zu den verwendeten natürlichen Schüttungen eine erhöhte Porosität auf. Als Referenzmaterial werden zudem Perlen aus Kalknatronglas (G) verwendet, die sich durch eine hohe Sphärizität sowie glatte Oberfläche auszeichnen.

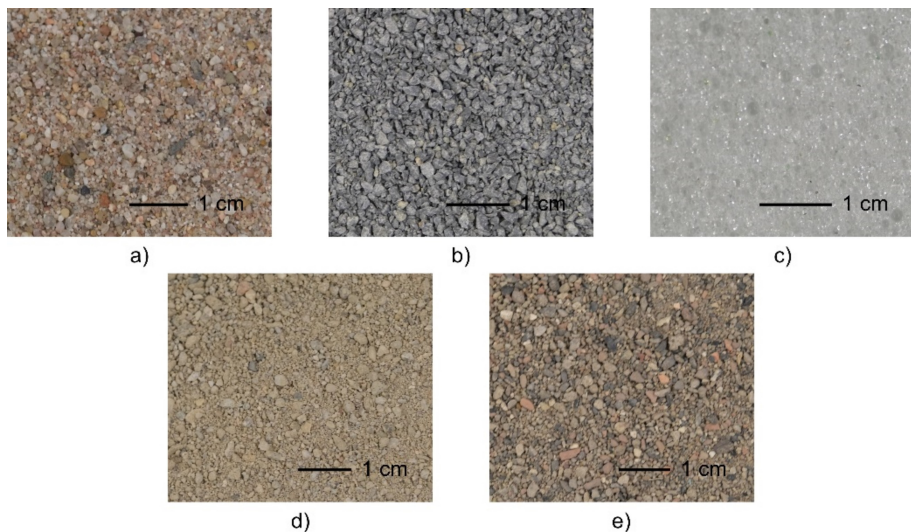


Abb. 3.7: Verwendete Materialien a) Rheinsand, b) Basaltsplitt, c) Kalknatronglas, d) Betonbruch und e) Mauerwerksbruch.

Da das Ziel der folgenden Untersuchung die Identifikation von geeigneten Parametern zur Charakterisierung von Kornform und Eckigkeit ist, soll ein Einfluss der Korngrößenverteilung ausgeschlossen werden. Die Gesteinskörnungsschüttungen werden hierfür in ofentrockenem Zustand in die Kornklassen 0,125/0,25, 0,25/0,5, 0,5/1 und 1/2 gesiebt, wobei alle Körner kleiner 0,125 mm und größer 2 mm verworfen werden.

Der Siebvorgang erfolgt mittels Siebmaschine, entsprechend den Vorgaben der DIN EN 933-1 [174]. Für jedes dieser Materialien erfolgt anschließend die manuelle Zusammensetzung einer AB- und einer BC-Sieblinie entsprechend der prozentualen Massenanteile aus Tab. 3.5.

Hierbei zeichnet sich die BC-Sieblinie durch einen im Vergleich zur AB-Sieblinie erhöhten Anteil an Körnern der feinen Kornfraktionen aus. Die AB-Sieblinie liegt zwischen der A- und B-Sieblinie, definiert für Gesteinskörnungsschüttungen mit einem Größtkorn von mindestens 8 mm nach DIN 1045-2 [13], während die BC-Sieblinie zwischen der definierten B- und C-Sieblinie liegt. Im Rahmen dieser Untersuchung werden die Vorgaben der DIN 1045-2 für ein Größtkorn von 8 mm auf ein Größtkorn von 2 mm übertragen.

Die Zusammensetzung der AB- und BC-Sieblinie für die Glaskugeln erfolgt entsprechend den Angaben in Tab. 3.6. Die Kornklassen orientieren sich hierbei an den kommerziell verfügbaren Lieferkornklassen. Mittels Siebung werden Glaskugeln kleiner 0,125 mm und größer 2 mm entfernt. Die Zusammensetzung der Sieblinie orientiert sich dabei an der Zusammensetzung der natürlichen und rezyklierten Materialien.

Tab. 3.5: Zusammensetzung der AB- und BC-Sieblinie für die Materialien Sand, Splitt, Betonbruch und Mauerwerksbruch.

Kornklasse	AB-Sieblinie [M.-%]	BC-Sieblinie [M.-%]
0,125/0,25	7	12
0,25/0,5	29	31
0,5/1	28	32
1/2	36	25

Tab. 3.6: Zusammensetzung der AB- und BC-Sieblinie für die Glaskugeln.

Kornklasse	AB-Sieblinie [M.-%]	BC-Sieblinie [M.-%]
0,125/0,2	4	7
0,2/0,4	20	24
0,4/1	40	44
1/1,7	25	18
1,7/2	11	7

### 3.2.3 Anfertigung von CT-Aufnahmen und Bildbearbeitung

Je Materialart und Sieblinie werden fünf Proben entnommen und in einem zylindrischen Gefäß aus Steckschwamm mit dem CT-ALPHA-240 (ProCon X-Ray) tomografiert. Jede der Proben wiegt wenige Gramm, weswegen bei der Probenentnahme auf eine sorgfältige Probenteilung geachtet wird. Die Anfertigung von CT-Aufnahmen erfolgt entsprechend der in Tab. 2.2 sowie Tab. 2.8 erarbeiteten Kriterien. CT-Aufnahmen werden bei einer Spannung von 100 kV, einer Stromstärke von 80  $\mu$ A sowie einer

Belichtungsdauer von 0,45 s angefertigt. Es werden jeweils 1.680 Projektionen aufgenommen. Zur Reduktion von Artefakten erfolgen eine Flat-Field-Korrektur sowie eine Mittelung von jeweils drei Projektionen. Die Voxelgröße beträgt 8  $\mu\text{m}$ . Bei einer Siebgröße zwischen 0,125 mm und 2 mm ergibt sich damit ein  $R_{\text{min}} > 15,625$ . Dieser Wert liegt oberhalb der Empfehlung zur minimal erforderlichen Voxelgröße bei Bestimmung von Kornabmessungen jedoch unterhalb derer zur Bestimmung von Kornvolumina nach Abschnitt 2.2.1.8. Die Voxelgröße von 8  $\mu\text{m}$  bedingt sich jedoch aus der Systemgrenze des verwendeten CT-Geräts. Zur Kornsegmentierung kommt das in Abschnitt 2.3 vorgestellte Verfahren, basierend auf der adaptiven H-Extrematransformation in Kombination mit der Wasserscheidentransformation, zum Einsatz. Die Bildbearbeitung sowie Bestimmung von morphologischen Charakteristika erfolgt unter Verwendung von MAVI [97] mit MAVIparticle [135] sowie ToolIP mit MAVIkit [134] (ITWM). Abb. 3.8 zeigt einen zweidimensionalen Querschnitt nach Durchführung der Kornsegmentierung der tomographierten Materialien mit einer AB-Sieblinie. Die Anzahl an tomographierten Körnern liegt zwischen 38.300 Körnern für die SA-Probe mit AB-Sieblinie und 78.600 Körnern für die MB-Probe mit einer AB-Sieblinie. Die Unterschiede in der Anzahl der tomographierten Körner gehen auf die unterschiedliche Probengröße bei der manuellen Entnahme zurück. Aufgrund der hohen Anzahl an tomographierten Körnern wird von einer repräsentativen Stichprobengröße ausgegangen.

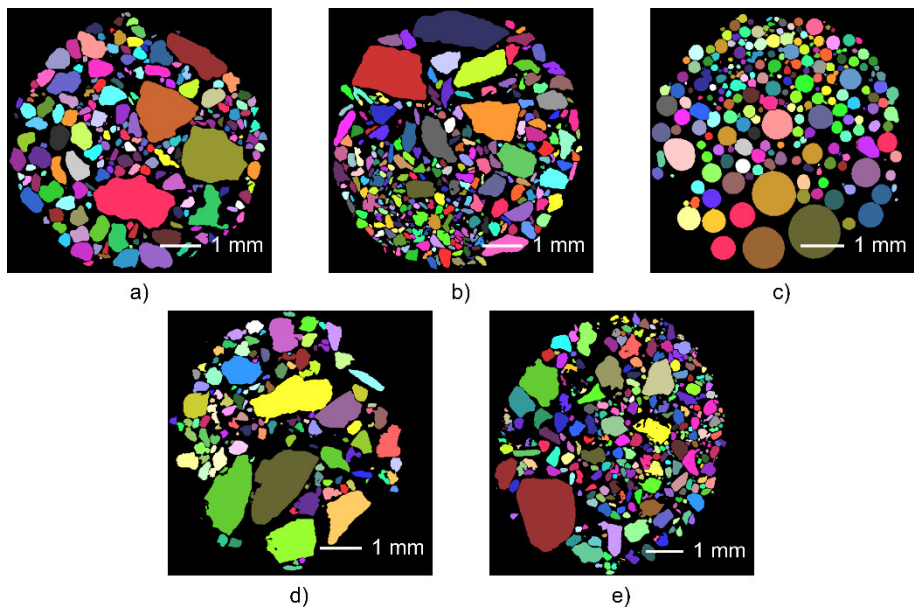


Abb. 3.8: Querschnitt der CT-Aufnahme nach Bildbearbeitung mit segmentierten Körnern der Materialien a) Rheinsand, b) Basaltsplitt, c) Kalknatronglas, d) rezyklierter Betonbruch und e) rezyklierter Mauerwerksbruch, in Anlehnung an [208].

Die Kornabmessungen  $l$ ,  $b$  und  $d$  werden entsprechend der Definition von Blott und Pye [172] bestimmt. Zusätzlich erfolgt die Bestimmung des Durchmessers einer Kugel mit maximalem Volumen, die vollständig innerhalb des Korns liegt  $r_k$  sowie einer Kugel



mit minimalem Durchmesser, die das Korn vollständig umhüllt  $r_{ak}$ . Als längste Verbindungslinie von zwei Punkten auf der Kornoberfläche wird der Parameter  $l_g$  ermittelt. Des Weiteren werden die Größen Volumen  $V_{Korn}$  und Volumen der konvexen Hülle  $V_{Konvex}$  sowie Oberfläche  $O_{Korn}$  und Oberfläche der konvexen Hülle  $O_{Konvex}$  bestimmt.

### 3.2.4 Bestimmung von morphologischen Parametern zur Charakterisierung von Gesteinskörnungsschüttungen

Die folgenden mit MAVI und MAVIparticle bestimmbaren morphologischen Parameter, vorgestellt in den Abschnitten 3.1.5 und 3.1.6, werden für jedes Korn der tomographierten Gesteinskörnungsschüttungen bestimmt. Hierfür wird R mit RStudio (R Core Team) [136, 137] verwendet.

- Plattigkeit (siehe Tab. 3.1):  $PL_W$ ,  $PL_Z$ ,  $PL_C$ ,  $PL_{SF}$  und  $PL_A$
- Länglichkeit (siehe Tab. 3.2):  $LL_Z$ ,  $LL_J$ ,  $LL_{SF}$  und  $LL_D$
- Sphärizität (siehe Tab. 3.3):  $SP_W$ ,  $SP_{SF}$ ,  $SP_K$ ,  $SP_H$ ,  $SP_A$ ,  $SP_B$  und  $SP_Q$
- Eckigkeit (siehe Tab. 3.4):  $A_{HO}$ ,  $AT_{3D}$  und  $A_{GB}$

Anhand der Einzelwerte der morphologischen Parameter jedes Kornes kann die Verteilung eines Merkmals innerhalb der Schüttung dargestellt werden. Ziel ist, sowohl die Ausprägung eines morphologischen Parameters als auch dessen Verteilung innerhalb der Schüttung, anhand weniger charakteristischer Kenngrößen zu beschreiben.

Die erste untersuchte Möglichkeit basiert auf der kumulativen Volumenverteilung des morphologischen Parameters. Abb. 3.9 a) zeigt eine beispielhafte Verteilung des Parameters  $PL_W$  in Abhängigkeit vom kumulativen Volumendurchgang einer Sandschüttung. Die Ausprägung des morphologischen Merkmals wird anhand des  $PL_W$ -Wertes bei einem Volumendurchgang von 50 %  $d_{V50}(PL_W)$ , dem Medianwert beschrieben. Zur Charakterisierung der Verteilung innerhalb der Schüttung werden die Werte  $d_{V90}(PL_W)$  und  $d_{V10}(PL_W)$  bestimmt und ins Verhältnis zueinander gesetzt. Alternativ zur volumengewichteten kumulativen Verteilung des morphologischen Merkmals kann eine Gewichtung nach Anzahl an Körnern erfolgen, siehe Abb. 3.9 b).

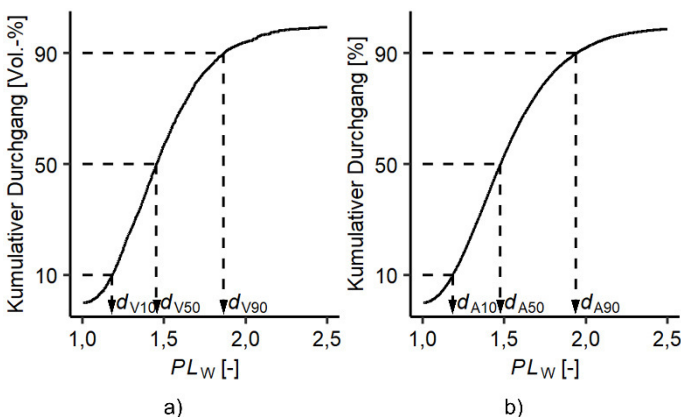


Abb. 3.9: Kenngrößen zur Charakterisierung der Verteilung des  $PL_W$ -Parameters innerhalb der Sandprobe mit Sieblinie AB, basierend auf der a) volumengewichteten Verteilung und b) nach Anzahl gewichteten Verteilung.

Analog werden ebenfalls die Ausprägung über den  $d_{A50}(PL_W)$ -Wert sowie die Verteilung innerhalb der Schüttung über das Verhältnis aus  $d_{A90}(PL_W)$  zu  $d_{A10}(PL_W)$  bestimmt. Der Unterschied zwischen der volumengewichteten Verteilung und der nach Anzahl an Körnern gewichteten ist, dass im letzteren Fall Körner mit kleinem Volumen einen stärkeren Einfluss auf das Messergebnis haben. Eine Alternative zur Charakterisierung der Verteilung des morphologischen Merkmals innerhalb der Schüttung stellt die Varianz dar, mit der die Streubreite des Merkmals bestimmt wird. Auch die Varianz wird volumengewichtet  $\sigma^2_V(PL_W)$  sowie bezogen auf die Anzahl der Körner  $\sigma^2_A(PL_W)$  berechnet. Zur Charakterisierung der Kornform einer Schüttung bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Plattigkeit, Länglichkeit und Sphärizität wird zusätzlich die in Abschnitt 3.1.5 vorgestellte Matrixdarstellung nach Erdogan et al. [35] bestimmt.  $LL_E$  bzw.  $PL_E$  stellen Parameter zur Charakterisierung der Verteilung von Länglichkeit und Plattigkeit dar. Um zusätzlich Angaben zur Ausprägung von Länglichkeit oder Plattigkeit anzugeben, werden zusätzlich die Kenngrößen  $d_{V50}$  und  $d_{A50}$  analog zu dem bereits beschriebenen Vorgehen für die Körner bestimmt, die entweder für die Bestimmung von  $LL_E$  oder  $PL_E$  herangezogen werden.

### **3.2.5 Versuchsablauf und statistische Methoden**

Die Auswahl von geeigneten Kenngrößen zur morphologischen Charakterisierung erfolgt nach drei Kriterien:

1. Jeder der ausgewählten morphologischen Parameter charakterisiert die zehn Schüttungen eindeutig.
2. Die Korrelation zwischen den ausgewählten morphologischen Parametern ist möglichst gering.
3. Je morphologischer Eigenschaft einer Schüttung soll jeweils eine Kenngröße zur Beschreibung der Ausprägung sowie eine Kenngröße für die Verteilung des Merkmals innerhalb der Schüttung verwendet werden.

In einem ersten Schritt wird jeweils ein Balkendiagramm des  $d_{V50}$ -Wertes aller untersuchten morphologischen Parameter erstellt. Ist keine eindeutige Unterscheidbarkeit der Schüttungen möglich, insbesondere im Hinblick auf Unterschiede zwischen verschiedenen Materialien, wird der Parameter von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. In einem zweiten Schritt wird die Korrelation zwischen den untersuchten morphologischen Parametern untersucht. Im Rahmen der folgenden Regressionsanalyse gehen alle Kenngrößen zur morphologischen Charakterisierung als unabhängige Variablen in die Analyse ein. Bei hoher Korrelation zwischen den unabhängigen Variablen liegt sogenannte Multikollinearität vor [209]. Problematisch daran ist, dass eine Änderung in der abhängigen Variable nicht eindeutig auf eine der unabhängigen Variablen zurückgeführt werden kann, da diese teilweise redundante Informationen enthalten. Für die multiple Regressionsanalyse bedeutet dies, dass das Ergebnis für die Regressionskoeffizienten instabil ist [209]. Zunächst wird getrennt der Korrelationskoeffizient nach Pearson  $R$  der  $d_{V50}$ -Werte sowie der  $d_{A50}$ -Werte bestimmt. Aufgrund der großen Anzahl an in Frage kommenden Kenngrößen zur Charakterisierung von Schüttungen wird zur Steigerung der Übersichtlichkeit die Auswertung auf die  $d_{V50}$ -Werte bzw.  $d_{A50}$ -Werte beschränkt. Von einer hohen Korrelation wird ausgegangen, wenn der Betrag von  $R$  größer als 0,7 ist [209]. Ziel ist die Identifikation von mindestens zwei morphologischen Parametern, die eine niedrige Korrelation untereinander aufweisen

und unterschiedliche morphologische Eigenschaften beschreiben. Im letzten Schritt wird jeder der identifizierten  $d_{V50}$ -Werte bzw.  $d_{A50}$ -Werte, welche die Ausprägung des Merkmals charakterisiert, durch eine Kenngröße zur Beschreibung der Verteilung des Parameters innerhalb der Schüttung ergänzt. Dieses Set an Kenngrößen wird wiederum auf Korrelation mittels des Korrelationskoeffizienten nach Pearson  $R$  und einem angestrebten Grenzwert für  $|R| < 0,7$  überprüft. Zusätzlich wird der Varianzinflationsfaktor VIF bestimmt, welcher für alle unabhängigen Variablen zur Vermeidung von Multikollinearität kleiner als 10 sein sollte [209]. Zur Bestimmung des VIFs wird eine multiple lineare Regression zwischen einer der unabhängigen Variablen und allen anderen unabhängigen Variablen durchgeführt [210]. Führt diese zu einem hohen Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , kann davon ausgegangen werden, dass die betrachtete unabhängige Variable mit anderen unabhängigen Variablen korreliert.

### 3.2.6 Ergebnisse und Diskussion

Inwiefern ein morphologischer Parameter die untersuchten Schüttungen mit eindeutigen Unterschieden charakterisiert, wird anhand von Balkendiagrammen visuell bewertet. Dabei zeigt sich, dass die vier morphologischen Parameter  $d_{V50}(SP_H)$ ,  $d_{V50}(PL_A)$ ,  $d_{V50}(LL_{SF})$  und  $d_{V50}(SP_A)$  kaum Unterschiede zwischen den Schüttungen registrieren. Abb. 3.10 zeigt am Beispiel der Kenngrößen  $d_{V50}(SP_H)$  und  $d_{V50}(PL_Z)$  den Unterschied zwischen einem Parameter, der Unterschiede zwischen den Materialien und Sieblinien registriert, siehe Abb. 3.10 b), und einem Parameter mit weniger eindeutigen registrierten Unterschieden, siehe Abb. 3.10 a). Maßgeblich ist hierbei der relative Unterschied zwischen dem betrachteten Merkmal der unterschiedlichen Materialien. Die vier Kenngrößen, die zu keiner eindeutigen Charakterisierung der unterschiedlichen Materialien und Sieblinie führen, bleiben im Rahmen der weiteren Auswertung unberücksichtigt.

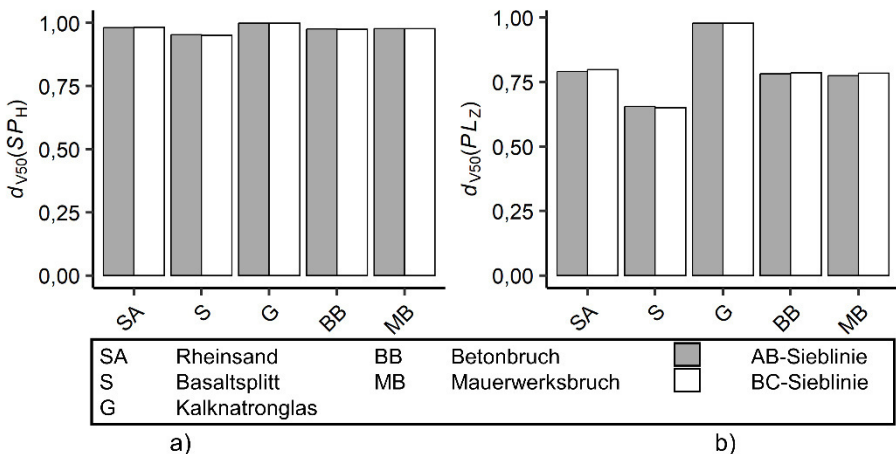


Abb. 3.10: Ausprägung des Merkmals  $d_{V50}$  für die untersuchten Schüttungen des morphologischen Parameters a)  $SP_H$  und b)  $PL_Z$ .

Für die verbliebenen Kenngrößen zur Charakterisierung der Ausprägung eines Merkmals innerhalb der Schüttung wird die Korrelation zwischen diesen bestimmt. Abb.

3.11 zeigt das Ergebnis bei Verwendung der Kenngrößen  $d_{V50}$ , während Abb. 3.12 die Korrelation zwischen den Kenngrößen  $d_{A50}$  abbildet.

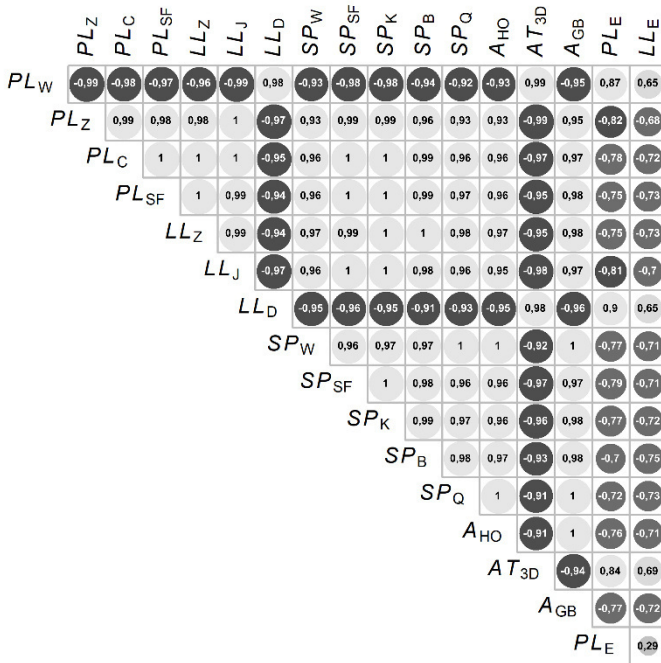


Abb. 3.11: Korrelationskoeffizient  $R$  nach Pearson für den Wert  $d_{V50}$  der morphologischen Parameter zur Charakterisierung von Gesteinskörnungsschüttungen.

Korrelationskoeffizienten  $|R| < 0,7$  treten sowohl bei Verwendung von  $d_{V50}$ -Kenngrößen als auch  $d_{A50}$ -Kenngrößen nur bei Berücksichtigung der Ausprägung von Länglichkeit oder Plattigkeit des Anteils an länglichen Körnern  $LL_E$  bzw. an plattigen Körnern  $PL_E$  auf. Dies könnte auf die Berechnungsmethode zurückgeführt werden. Während der Großteil der Kenngrößen auf dem jeweiligen morphologischen Parameter für jedes Korn einer Schüttung basiert, werden für die Berechnung von  $d_{V50}(LL_E)$ ,  $d_{A50}(LL_E)$  und  $d_{A50}(PL_E)$  nur die als länglich bzw. plattig klassifizierten Körner herangezogen. Abb. 3.11 und Abb. 3.12 zeigen jedoch für die übrigen morphologischen Kenngrößen, dass eine Charakterisierung der betrachteten Schüttungen basierend auf mehr als einer dieser Kenngrößen zu sehr hohen Korrelationskoeffizienten  $R$  führt. Im Rahmen einer linearen Regressionsanalyse müsste in diesem Fall von Multikollinearität ausgegangen werden. Eine mögliche Ursache hierfür kann im Ursprung der hier betrachteten Schüttungen liegen. Auch wenn zum Beispiel Länglichkeit und Eckigkeit zwei voneinander unabhängige morphologische Eigenschaften darstellen, kann für Schüttungen ein Zusammenhang zwischen diesen Parametern vorliegen. So ist es denkbar, dass im Rahmen des Brechprozesses zur Herstellung von Brechsanden in Abhängigkeit von der verwendeten Brechmethode ein erhöhter Anteil an länglichen Körnern entsteht. Gleichzeitig bewirkt ein Brechprozess in der Regel die Entstehung von eckigeren Körnern als für natürlichen Sand.

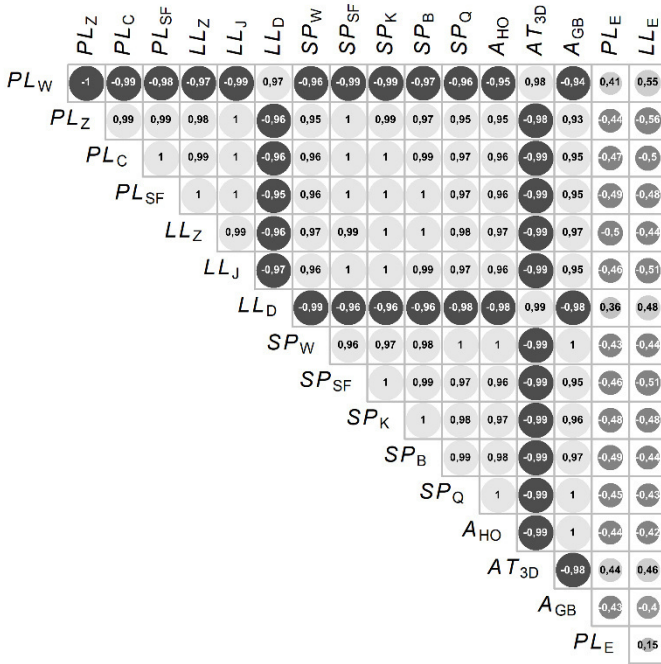


Abb. 3.12: Korrelationskoeffizient  $R$  nach Pearson für den Wert  $d_{A50}$  der morphologischen Parameter zur Charakterisierung von Gesteinskörnungsschüttungen.

Für die Kombinationen aus zwei morphologischen Parametern, die in Abb. 3.11 und Abb. 3.12 einen Korrelationskoeffizienten  $|R| < 0,7$  aufweisen, wird eine detailliertere Korrelationsanalyse unter Einbeziehung von Kenngrößen zur Beschreibung der Verteilung des Parameters innerhalb der Schüttung durchgeführt.

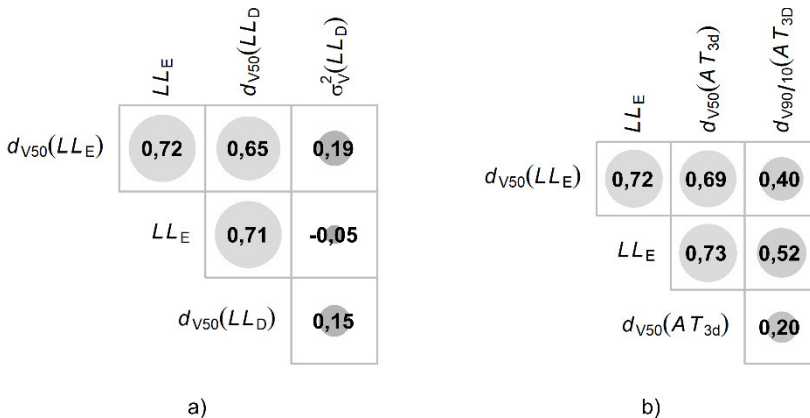


Abb. 3.13: Korrelationsmatrix zwischen den Parametern a)  $LL_E$  und  $LL_D$  sowie b)  $LL_E$  und  $AT_{3D}$ .

Ergänzend zum Parameter  $d_{V50}(LL_E)$  bzw.  $d_{A50}(LL_E)$  wird der Parameter  $LL_E$  in die Detailuntersuchung mit aufgenommen. Analog wird der Parameter  $d_{A50}(PLE)$  durch die Kenngröße  $PLE$  ergänzt. Für die übrigen Parameter wird zusätzlich zu  $d_{V50}$  bzw.  $d_{A50}$

entweder die Kenngröße  $d_{V90/10}$  bzw.  $d_{A90/10}$  oder  $\sigma^2_V$  bzw.  $\sigma^2_A$  berücksichtigt, wobei die Wahl sich an einer möglichst niedrigen Korrelation zu den übrigen Kenngrößen orientiert. Von den untersuchten Sets aus jeweils vier Parametern kommt es in jedem Fall zu mindestens einem  $|R| > 0,7$ . Allerdings überschreiten zwei der Sets, welche in Abb. 3.13 dargestellt sind, diesen nur geringfügig. Als besonders geeignet wird hierbei das in Abb. 3.13 b) dargestellte Set aus dem Median der Länglichkeit von als länglich klassifizierten Körnern  $d_{V50}(LL_E)$ , dem Anteil länglicher Körner  $LL_E$ , der Ausprägung der Eckigkeit  $d_{V50}(AT_{3D})$  und der Verteilung der Eckigkeit  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  betrachtet. Hier ist neben der Länglichkeit der Körner, einem morphologischen Parameter zur Charakterisierung der Kornform, mit  $AT_{3D}$  auch ein Parameter zur Charakterisierung der Eckigkeit enthalten. Zuletzt wird für dieses Set aus Kenngrößen zur Charakterisierung der hier untersuchten Schüttungen der VIF bestimmt. Dieser liegt für alle der ausgewählten Kenngrößen unterhalb des angestrebten Grenzwertes von 10. Werden diese Parameter im Rahmen einer multiplen linearen Regressionsanalyse als unabhängige Variablen verwendet, wird daher von keiner Multikollinearität ausgegangen.

Tab. 3.7: Varianzinflationsfaktor für die ausgewählten Kenngrößen zur Charakterisierung von Ausprägung und Verteilung der morphologischer Eigenschaften der Schüttungen.

Kenngröße	VIF [-]
$d_{V50}(LL_E)$	2,45
$LL_E$	3,48
$d_{V50}(AT_{3D})$	2,79
$d_{V90/10}(AT_{3D})$	1,57

### 3.3 Zusammenfassung und Festlegung morphologischer Kenngrößen zur Charakterisierung von Schüttungen

Kornform, Eckigkeit und Textur von Schüttungen aus Körnern können anhand einer Vielzahl von in der Literatur vorgeschlagenen Parametern charakterisiert werden. Allerdings ist eine Bestimmung all dieser Parameter aufgrund von Korrelationen untereinander nicht erforderlich. Ziel der vorgestellten Untersuchung ist daher, eine Auswahl an Parametern zu ermitteln, die einen möglichst hohen Informationsgehalt über die morphologischen Eigenschaften der Schüttungen widerspiegeln und gleichzeitig eine niedrige Korrelation untereinander aufweisen. Eine Schüttung kann sowohl anhand der Ausprägung eines morphologischen Merkmals, in diesem Fall dem Medianwert bezogen auf das Kornvolumen des Merkmals  $d_{V50}$ , als auch der Verteilung dieses Merkmals innerhalb der Schüttung, in diesem Fall dem Verhältnis aus  $d_{V90}$  zu  $d_{V10}$ , charakterisiert werden. Als geeignet kann die Charakterisierung von Kornform und Eckigkeit von Gesteinskörnungsschüttungen sowohl anhand der Ausprägung als auch der Verteilung innerhalb der Schüttung der morphologischen Kenngrößen  $LL_E$  und  $AT_{3D}$  angesehen werden. Damit ergibt sich ein Set aus vier Kenngrößen  $LL_E$ ,  $d_{V50}(LL_E)$ ,  $d_{V50}(AT_{3D})$  und  $d_{V90/10}(AT_{3D})$ , welche zur morphologischen Charakterisierung von Schüttungen geeignet sind.

In Kapitel 4 wird der Einfluss morphologischer Kenngrößen wie der Kornform und der Eckigkeit auf das Verhalten von Mörteln im frischen und festen Zustand untersucht. Als Datengrundlage dienen CT-Aufnahmen der eingesetzten Gesteinskörnungen, welche entsprechend dem in Kapitel 2 festgelegten Konzept angefertigt werden. Anschließend ist eine morphologische Charakterisierung dieser Schüttungen erforderlich, welche im Folgenden anhand der vier in Kapitel 3 als geeignet identifizierten Kenngrößen Anteil länglicher Körner  $LL_E$ , Median der Länglichkeit von als länglich klassifizierten Körnern  $d_{V50}(LL_E)$ , Ausprägung der Eckigkeit  $d_{V50}(AT_{3D})$  und Verteilung der Eckigkeit  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  erfolgt. Diese vier morphologischen Parameter gehen als unabhängige Variablen in die in Abschnitt 4.2 durchgeführte multiple lineare Regressionsanalyse ein.

## **4 Einfluss morphologischer Kenngrößen auf Mörtel­eigenschaften**

### **4.1 Grundlagen zum Einfluss morphologischer Eigenschaften der Gesteinskörnung auf Mörtel- und Betoneigenschaften**

#### **4.1.1 Packung der Gesteinskörnung**

##### **4.1.1.1 Grundlagen der Packungsdichte**

Die Packungsdichte  $\phi$  einer Schüttung aus Gesteinskörnung ist entsprechend Gleichung (4.1) als das Verhältnis des Volumens einer Gesteinskörnungsprobe  $V_{GK}$  zum Volumen des Messgefäßes  $V_M$ , welches diese ausfüllt, definiert [211].

$$\phi = \frac{V_{GK}}{V_M} \quad (4.1)$$

mit:  $\phi$  Packungsdichte [-]

$V_{GK}$  Volumen der Gesteinskörnung im Messgefäß [m<sup>3</sup>]

$V_M$  Volumen des Messgefäßes [m<sup>3</sup>]

Da hohe Packungsdichten im erhärteten Zustand von Mörtel und Beton in der Regel zu hohen Druckfestigkeiten führen, kann mit optimierten Packungsdichten der Gesteinskörnung eine Festigkeitssteigerung erzielt werden bei gleichzeitiger Minimierung des Bindemittelleimbedarfs [211, 212]. Eine Schüttung aus Kugeln gleicher Größe kann bei pyramidenförmiger Anordnung theoretisch eine maximale Packungsdichte von  $\phi=0,7405$  erreichen [162]. Werden die Hohlräume mit Kugeln kleineren Durchmessers aufgefüllt, können höhere Packungsdichten erreicht werden. White und Walton [162] führen Versuche mit natürlichen vorkommenden Körnern durch und stellen fest, dass die theoretisch berechnete Packungsdichte in der Praxis nicht erreicht werden kann. Als Ursache hierfür nennen die Autoren den Einfluss der Verdichtungsart sowie die von einer Kugel abweichende Form der verwendeten Körner. Auch die zufällige Anordnung von Körnern im Vergleich zu einer geordneten Anordnung mindert die tatsächliche Packungsdichte [213]. Im Rahmen der Entwicklung des sogenannten „Compressible Packing Model“ (CPM), welches zur Vorhersage der Packungsdichte von Gesteinskörnung geeignet ist, entwickeln de Larrard [211, 214] und de Larrard und Sedran [213] die Vorstellung, dass die Packungsdichte hauptsächlich von einer dominanten Kornfraktion bestimmt wird. Größere Körner, als die dominante Kornfraktion, können bis zu einem gewissen Grad die Packungsdichte verbessern, da sie zu weniger Hohlräumen in der Schüttung führen. Füllen Körner mit kleinerer Korngröße die Hohlräume auf, kann es ebenfalls zu einer Verbesserung der Packungsdichte kommen. Dem entgegen wirken mehrere Effekte. Beim sogenannten Aufweitungseffekt sind die Körner mit kleinerer Korngröße nicht optimal auf die Hohlraumgröße der dominanten Kornfraktion abgestimmt. Als Resultat sinkt die Packungsdichte, da die umliegenden Körner auseinander gedrückt werden [211]. Eine Verringerung der Packungsdichte bewirkt auch der Wandeffekt, welcher sowohl an der Kontaktzone zwischen Körnern unterschiedlicher Größe als auch an der Wand des Messgefäßes bei



Bestimmung der Packungsdichte auftritt [211, 213]. Ursache hierfür ist, dass sich die Körner mit kleinerer Korngröße nicht optimal an die Oberfläche des größeren Korns anpassen können und damit in unmittelbarer Nähe zu größeren Körnern größere Hohlräume entstehen [211, 213]. Kwan et al. [215] beobachten einen weiteren Effekt, der zu einer Verringerung der Packungsdichte bei optimal aufeinander abgestimmten Kornfraktionen auftritt. Hierbei verkeilen sich Körner mit kleiner Korngröße zwischen größeren Körnern, obwohl diese optimal auf die Größe der Hohlräume abgestimmt sind.

Zur Bestimmung der Packungsdichte eignen sich verschiedene labortechnische Verfahren, wie zum Beispiel die Bestimmung der Schüttdichte nach DIN EN 1097-3 [216]. Im Rahmen der von Fuller und Thompson [212] durchgeführten Versuche zeigt sich jedoch, dass die Bestimmung der Packungsdichte mit trockener Gesteinskörnung nicht den Zustand der Packungsdichte der Gesteinskörnung bei Kombination mit Wasser und Zement darstellt. Wong et al. [217] entwickeln ein Verfahren zur Bestimmung der Packungsdichte von Feinanteilen im feuchten Zustand. Hierbei wird die Schüttdichte der Gesteinskörnung bei Zugabe unterschiedlicher Wassermengen bestimmt und anhand des Ergebnisses der Hohlraumgehalt und die Packungsdichte abgeleitet. Die Packungsdichte im feuchten Zustand entspricht der maximalen im Versuch erreichten Packungsdichte. Kwan et al. [218] und Fung et al. [219] erweitern dieses Verfahren für Gesteinskörnungen mit Größtkorn bis zu 5 mm und zeigen, dass die Verdichtungsart einen deutlich geringeren Einfluss auf das Ergebnis der Packungsdichte hat.

#### **4.1.1.2 Einfluss morphologischer Parameter auf die Packungsdichte**

Die morphologischen Eigenschaften der Körner einer Schüttung haben einen Einfluss auf die Packungsdichte. So zeigt sich, dass Körner mit hoher Rundheit zu einer erhöhten Packungsdichte gegenüber eckigen Körnern führen [162, 199, 205, 220]. Auch ein Einfluss der Kornform auf die Packungsdichte wird im Rahmen verschiedener Studien beobachtet. Zou und Yu [221] beobachten, dass die Packungsdichte bei abnehmender Sphärizität abnimmt, während bei Messung der Packungsdichte in verdichtetem Zustand eine gewisse Zunahme beobachtet werden kann. Die Autoren führen dies auf eine zunehmende Ordnung der Körner im Messgefäß zurück, welche bei Verdichtung entsteht. Cho et al. [205] beobachten ebenfalls, dass der Einfluss der Sphärizität auf die Packungsdichte von der Verdichtungsart abhängig ist. Für ihre Studie wird die Sphärizität und Eckigkeit von 17 Brechsandschüttungen sowie 16 natürlichen Sanden auf Basis von mikroskopischen Aufnahmen anhand eines Vergleichs mit tabellierten Werten für Eckigkeit und Sphärizität bestimmt. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Sphärizität die Packungsdichte stärker zunimmt, wenn diese unter Verdichtung bestimmt wird, im Vergleich zur Bestimmung der Packungsdichte ohne Verdichten. Mögliche Ursache für den Einfluss der Sphärizität auf die Packungsdichte ist die geringere Mobilität der Körner bei niedrigen Sphärizitäten. Hafid et al. [222] bestimmen die Länglichkeit von Körnern dreier Brechsandschüttungen sowie eines natürlichen Sandes als das Verhältnis von Kornlänge zu Kornbreite sowie die Konvexität basierend auf zweidimensionalen Abbildungen. Es zeigt sich, dass die Packungsdichte sowohl im verdichteten als auch im unverdichteten Zustand, insbesondere mit zunehmender Länglichkeit der Körner, abnimmt. Shergold [199] stellt unabhängig von der Eckigkeit der

Körner fest, dass eine Erhöhung des Anteils an plattigen Körnern zu keiner Veränderung der Packungsdichte führt.

#### **4.1.2 Konsistenz von Mörtel und Beton**

##### **4.1.2.1 Grundlagen der Konsistenz und Rheologie von Mörtel und Beton**

Die Verarbeitbarkeit beschreibt eine Vielzahl von Materialeigenschaften von Mörtel und Beton vor Beginn der Erstarrung wie unter anderem die Fließfähigkeit, die Verdichtbarkeit, die Sedimentationsstabilität, die Pumpbarkeit oder die Transportfähigkeit [223, 224]. Statt dem Begriff „Verarbeitbarkeit“ wird nach DIN EN 206 [18] und DIN 1045-2 [13] der von Abrams [225] eingeführte Begriff „Konsistenz“ zur Beschreibung von Frischbetoneigenschaften verwendet. Unter den Begriff Konsistenz fällt vor allem die Beschreibung der Fließfähigkeit, die eine Voraussetzung für zum Beispiel die Verdichtbarkeit oder Pumpbarkeit ist. Eine quantitative Beschreibung der Konsistenz kann entweder anhand der zugrunde liegenden rheologischen Parameter Viskosität und Fließgrenze oder anhand von empirischen Versuchen wie dem Setzmaß, dem Setzfließmaß oder dem Ausbreitmaß erfolgen [223]. Mörtel und Beton können als ein mehrphasiges System, bestehend aus festen Bestandteilen wie Zement und Gesteinskörnung sowie dem flüssigen Bestandteil Wasser, angesehen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Definition von Bindemittelleim als Suspension aus Wasser und Zement mit einer maximalen Korngröße von 125  $\mu\text{m}$  zurückgegriffen. Unter Mörtel wird im Rahmen dieser Arbeit die Zusammensetzung aus Bindemittelleim und Gesteinskörnung mit einem Größtkorn von 2 mm und unter Beton die Zusammensetzung aus Bindemittelleim, feinkörniger Gesteinskörnung mit einem Größtkorn von 2 mm und grobkörnigen Gesteinskörnung mit Kleinstkorn größer 2 mm verstanden. Nach einer gängigen Modellvorstellung ist die Konsistenz abhängig von der Wasserfilmdicke oder Bindemittelleimschichtdicke, welche sich um die festen Bestandteile von Mörtel oder Beton ausbildet [226–229]. Wird ein System aus Zement und Wasser betrachtet, richtet sich die Konsistenz der Suspension nach der Wasserfilmdicke um jedes Zementkorn herum, welche davon abhängig ist, wieviel Wasser nach Füllen der Hohlräume der Packung noch vorhanden ist [227]. Analog kann diese Modellvorstellung auf das Zusammenspiel von Gesteinskörnung und Bindemittelleim übertragen werden [228]. Mit steigender Wasserfilm- oder Bindemittelleimschichtdicke vergrößert sich der Abstand zwischen den festen Bestandteilen, was zu einer geringeren Reibung dieser Körner führt [229].

Eng verknüpft mit dem Begriff der Konsistenz sind die rheologischen Eigenschaften von Mörtel und Beton. Unter Rheologie wird nach DIN 1342-1 [230] die „Lehre vom Deformations- und Fließverhalten der Stoffe“ verstanden. Zur Erläuterung wird in der Regel das Zwei-Platten-Modell herangezogen, siehe Abb. 4.1 [231, 232]. Zwischen zwei Platten befindet sich ein Stoff, welcher durch Aufbringung einer Kraft auf die obere Platte gesichert wird [231, 232]. Voraussetzung für diese Modellvorstellung ist, dass zwischen Platten und Stoff kein Rutschen oder Gleiten auftritt und die Scherung des Stoffes auf allen Ebenen ausschließlich in Richtung der Kraftaufbringung stattfindet [231]. Die resultierende Schubspannung  $\tau$  ist dann nach Gleichung (4.2) als das Verhältnis dieser Kraft  $F$  und der Scherfläche  $A$  definiert [230, 232].

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (4.2)$$

mit:  $\tau$  Schubspannung [N/mm<sup>2</sup>]  
 $F$  Kraft [N]  
 $A$  Scherfläche [mm<sup>2</sup>]

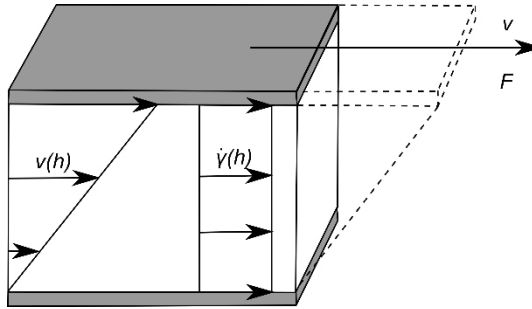


Abb. 4.1: Zwei-Platten-Modell zur Veranschaulichung des Verhaltens eines Stoffes unter Scherung, nach [232].

Während die untere Platte ortsfest ist, bewegt sich die obere Platte mit einer gewissen Geschwindigkeit  $v$  in Krafrichtung. Die einzelnen Schichten des Stoffes werden folglich mit zunehmender Geschwindigkeit geschert. Die Scherrate  $\dot{\gamma}$  gibt entsprechend Gleichung (4.3) dabei an, wie stark diese Zunahme über den Abstand der beiden Platten hinweg ausfällt [230, 232].

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{e} \quad (4.3)$$

mit:  $\dot{\gamma}$  Scherrate [1/s]  
 $v$  Schergeschwindigkeit [m/s]  
 $e$  Abstand zwischen den beiden Platten des Schermodells [m]

Ein Maß für den Widerstand, den der Stoff der Scherung leistet, ist die dynamische Viskosität  $\eta$ . Definiert ist die dynamische Viskosität als das Verhältnis von Schubspannung zu Scherrate entsprechend Gleichung (4.4) [230, 232]. Bei idealviskosen Fluiden, auch Newton'sche Fluide genannt, ist die dynamische Viskosität eine Konstante. Die Fließkurve für ein idealviskoses Fluid ist in Abb. 4.2 dargestellt.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4.4)$$

mit:  $\eta$  Dynamische Viskosität [Pa·s]  
 $\tau$  Schubspannung [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\dot{\gamma}$  Scherrate [1/s]

Abweichend von idealviskosen Fluiden existieren Stoffe, deren Verhalten entsprechend der Darstellung in Abb. 4.2 als scherverdünnend oder scherverdickend bezeichnet wird. Hierbei handelt es sich um eine Zunahme bzw. Abnahme der Viskosität mit steigender Scherrate [230, 232].

Bei einem weiteren Phänomen, der Thixotropie, handelt es sich um ein zeitabhängiges Verhalten von Stoffen, die unter Scherbeanspruchung scherverdünnendes Verhalten aufweisen, jedoch in einer anschließenden Ruheperiode ihre ursprüngliche Struktur wieder aufbauen [230, 233, 234]. Zunächst werden die Kräfte, die zwischen von Flüssigkeit umgebenen Partikeln wirken, durch die Scherbeanspruchung aufgehoben beziehungsweise reduziert, wodurch vormals strukturiert angeordnete Partikel in eine ungeordnete Struktur übergehen [233, 234]. Diese Veränderung der Mikrostruktur eines Stoffes, welche mit einer Verringerung der Viskosität einhergeht, wird als Strukturbruch bezeichnet.

Plastische Stoffe beginnen erst nach der Überwindung einer sogenannten Fließgrenze  $\tau_0$  zu fließen [230]. Nach Bingham entspricht die Fließgrenze der minimalen Scherbeanspruchung, die erforderlich ist, damit es zur kontinuierlichen Verformung kommt [235]. Inwiefern eine Fließgrenze tatsächlich existiert, wird kontrovers diskutiert [236, 237]. Blair [236] merkt hierzu bereits 1933 an, dass die Fließgrenze eher die Scherbeanspruchung ist, unterhalb derer kein Fließen beobachtet werden kann. Diese Beobachtung hängt wiederum von der verwendeten Messtechnik ab. Barnes und Walters [237] greifen diese These auf und gehen davon aus, dass mit der weiteren messtechnischen Entwicklung Fließgrenzen auch im niedrigen Scherratenbereich nicht mehr erfasst werden.

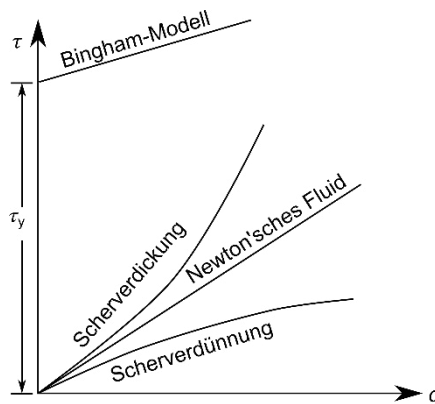


Abb. 4.2: Modellhafte Fließkurven für Stoffe mit und ohne Fließgrenze  $\tau_0$  (dargestellt als  $\tau_y$ ) als Zusammenhang zwischen Schubspannung  $\tau$  und Scherrate  $\dot{\gamma}$  (dargestellt als  $q$ ), nach [237], übersetzt ins Deutsche.

Zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens von Stoffen existieren verschiedene mathematische Modelle, mit Hilfe derer auf Basis weniger Messpunkte die Schubspannung über ein breites Spektrum an Scherraten angepasst werden kann. Das Modell nach Newton aus Gleichung (4.4) stellt hierbei ein Beispiel dar. In Abhängigkeit vom untersuchten Stoff wird eine große Anzahl an mathematischen Modellen in der Literatur vorgeschlagen [232]. Für Mörtel und Beton sind hierbei insbesondere die Modelle

nach Bingham und Herschel-Bulkley hervorzuheben [238, 239]. Das in Abb. 4.2 dargestellte Modell nach Bingham [240] ist charakterisiert durch eine Fließgrenze mit anschließend idealviskosem Fließen und wird mittels Gleichung (4.5) beschrieben.

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \tag{4.5}$$

- mit:  $\tau$  Schubspannung [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\tau_0$  Fließgrenze [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\eta$  Dynamische Viskosität [Pa·s]  
 $\dot{\gamma}$  Scherrate [1/s]

Beton, Mörtel und Zementsuspension gelten als heterogene Stoffgemische mit teilweise vergleichbaren, jedoch nicht identischen rheologischen Eigenschaften [241]. Untersuchungen an Zementsuspensionen zeigen, dass diese einen ausgeprägten Strukturbruch aufweisen [242, 243]. Wird nach dem erstmaligen Einbau der Probe in ein Rotationsrheometer die Scherrate gesteigert und anschließend wieder reduziert, zeigt die Fließkurve, wie in Abb. 4.3 zu sehen, eine sogenannte Hysterese­kurve. Grund hierfür ist die Abnahme der Viskosität mit Voranschreiten des Strukturbruchs und einer damit einhergehenden Verringerung der gemessenen Schubspannung bei gleichbleibender Scherrate. Mörtelproben weisen ebenso wie Zementsuspensionen einen Strukturbruch auf, dieser ist jedoch geringer ausgeprägt [238, 243]. Dies wird auf den erhöhten Anteil an Gesteinskörnung in der Probe zurückgeführt, welcher durch Reibung zu einer Beschleunigung des Abbaus von Kräften zwischen einzelnen Partikeln führt [243]. Bei Betonproben kann dieses Phänomen nicht beobachtet werden. Es wird davon ausgegangen, dass hier der Strukturbruch bereits während des Mischprozesses herbeigeführt wird, sodass bei anschließenden rheologischen Messungen kein weiterer Abbau der Struktur beobachtet werden kann [238]. Ist der Strukturbruch vollständig abgeschlossen, besteht zwischen der Scherrate und der Schubspannung ein linearer Zusammenhang, sodass im Allgemeinen das Bingham-Modell zur mathematischen Annäherung von Versuchsergebnissen als geeignet angesehen wird [168, 239, 241, 244, 245], teilweise jedoch auch auf das Herschel-Bulkley-Modell zurückgegriffen wird [21, 246].

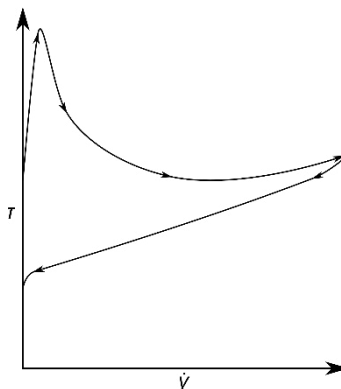


Abb. 4.3: Exemplarische Fließkurve einer Zementsuspension mit ausgeprägtem Strukturbruch, nach [224].

#### **4.1.2.2 Bestimmung rheologischer Kenngrößen**

Zur Bestimmung rheologischer Kenngrößen von Mörtel und Beton eignen sich Rotationsrheometer mit einer Messzellegeometrie, bei der die Probe im Messspalt zwischen zwei Zylindern abgeschert wird [241, 247]. Voraussetzung zur Bestimmung der rheologischen Kenngrößen dynamische Viskosität  $\eta$  sowie der Fließgrenze  $\tau_0$  sind, wie in Abschnitt 4.1.2.1 beschrieben, dass zwischen dem zu prüfenden Stoff und der Messeinrichtung kein Gleiten auftritt, eine Scherung, die ausschließlich in Richtung der aufgetragenen Kraft wirkt sowie eine konstante Scherrate im Messspalt [232]. Die Charakteristika von Mörtelproben erfordern jedoch Anpassungen der Messgeometrie. Grundsätzlich bestimmt die maximale vorhandene Korngröße des Mörtels die erforderliche Messspaltgröße. Als Faustformel gilt, dass der Messspalt sechs bis zehn Mal größer als das vorhandene Größtkorn sein sollte [243, 247, 248]. Dies wiederum führt bei Mörteln mit einem Größtkorn von bis zu 2 mm zu großen Messspaltgrößen, in denen eine konstante Scherrate im Messspalt nicht sichergestellt werden kann [248]. Bei rheologischen Untersuchungen an Mörtelproben wurde zudem beobachtet, dass zwischen der Mörtelprobe und der Zylinderwand ein Gleiten auftritt [241]. Dieses, auch bei anderen partikulären Suspensionen beobachtete Verhalten, kann unter anderem auf eine veränderte Packungsdichte in Wandnähe sowie Sedimentationsvorgänge zurück geführt werden [241, 249]. In der unmittelbaren Umgebung der Zylinderwand kommt es aufgrund der Undurchdringbarkeit der Wand durch Partikel zu einer Abnahme der Packungsdichte und einer damit einhergehenden verringerten Viskosität [249]. Des Weiteren können Sedimentationseffekte die Packungsdichte des Mörtels in Wandnähe verändern, wodurch es zu einer Verstärkung des Wandgleiten kommen kann [249]. Statt einer glatten kommen daher profilierte Zylinderwände bei der Bestimmung von rheologischen Kenngrößen von Mörtel zum Einsatz [241, 247, 249].

Eine weitere Herausforderung bei der Bestimmung von rheologischen Kenngrößen an Mörtelproben stellt die Entmischungsneigung im Zeitverlauf einer Messung dar. Um dieser entgegen zu wirken, kommen statt des inneren Zylinders sogenannte Mörtelpaddel oder Drehkörper mit Flügelgeometrie zum Einsatz, die während der gesamten Messdauer aufgrund der Rührwirkung ein Entmischen verhindern [224, 250]. Da folglich keine konstante Scherrate im Messspalt realisiert werden kann, sind die für Mörtelproben verwendeten Messgeometrien für Relativmessungen geeignet, nicht jedoch für die Bestimmung der Absolutmessgrößen  $\tau_0$  und  $\eta$ .

#### **4.1.2.3 Ein-Punkt-Versuche zur Bestimmung der Konsistenz**

Im Gegensatz zur Bestimmung rheologischer Kenngrößen mittels Rheometer, stellen Ein-Punkt-Versuche am Frischmörtel oder Frischbeton einfach durchzuführende und zeitsparende Versuche dar. Aus diesen Gründen finden diese eine breite Anwendung in der industriellen Praxis sowie Forschung [251, 252]. Charakteristisch für Ein-Punkt-Versuche ist, dass das Verhalten von Frischmörtel oder Frischbeton unter einer definierten Bedingung, entweder einer gleichbleibenden Scherrate oder einer gleichbleibenden Schubspannung, gemessen wird [224]. Vor dem Hintergrund, dass Mörtel und Beton als Bingham-Fluide charakterisiert werden können, wird ersichtlich, dass die Bestimmung rheologischer Kenngrößen unter dieser Voraussetzung nicht vollständig möglich ist [224]. Während in der Literatur eine Vielzahl von Versuchen zur Bestimmung der Konsistenz von Mörtel und Beton vorgeschlagen wird [223, 252], kommen

in Deutschland für Beton hauptsächlich das Setzmaß nach DIN EN 12350-2 [253], das Verdichtungsmaß nach DIN EN 12350-4 [254] und das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 [255] zur Anwendung [13, 252].

#### 4.1.2.4 Einfluss morphologischer Parameter auf die Konsistenz

Untersuchungen an Mörtel und Beton mit natürlich gerundeten Gesteinskörnungen sowie natürlichen oder rezyklierten gebrochenen Gesteinskörnungen lassen darauf schließen, dass ein Zusammenhang zwischen rheologischen Eigenschaften und der Kornform besteht. Im Folgenden werden zunächst Studien vorgestellt, die die zugrundeliegenden rheologischen Parameter dynamische Viskosität und Fließgrenze direkt in den Zusammenhang zu morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung setzen. Anschließend werden Studien zum Zusammenhang zwischen morphologischen Parametern und Ein-Punkt-Versuchen zur Bestimmung der Konsistenz näher beleuchtet.

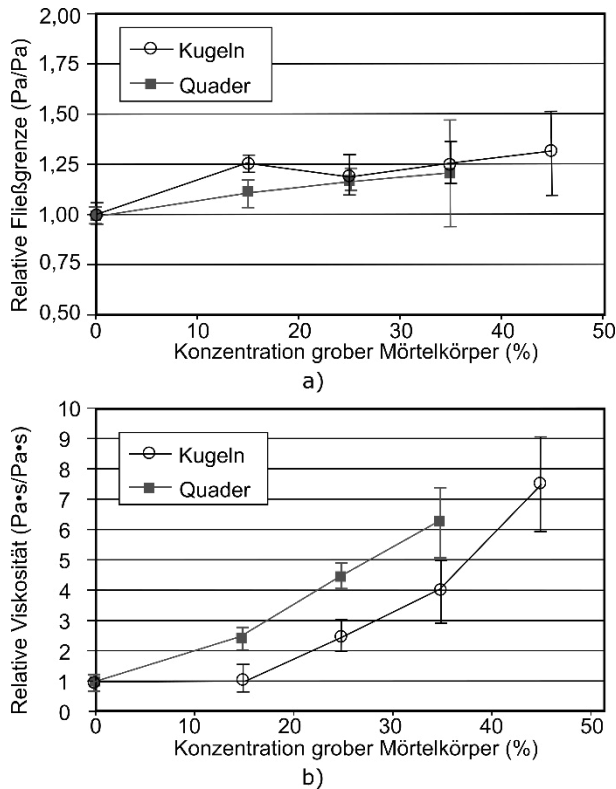


Abb. 4.4: Einfluss eines steigenden Anteils an groben, aus Mörtel hergestellten, Körpern im Beton sowie der Kornform auf a) Fließgrenze und b) dynamische Viskosität, nach [256], übersetzt ins Deutsche.

Westerholm et al. [20] untersuchen den Einfluss verschiedener Formparameter auf die rheologischen Kenngrößen dynamische Viskosität und Fließgrenze mittels Betonrheometer. Die eingesetzten Sande werden unter dem Mikroskop fotografiert und anhand

dieser zweidimensionalen Aufnahmen morphologisch charakterisiert. Hierbei zeigt sich, dass die Kornform gebrochener Sande einen großen Einfluss auf die dynamische Viskosität von Mörtel aufweist, wohingegen der Einfluss auf die Fließgrenze eher auf den Anteil an Feinanteilen zurückzuführen ist. Den signifikanten Anstieg der dynamischen Viskosität mit zunehmender Abweichung der Kornform von der einer Kugel führen die Autoren auf die erhöhte Verzahnung von Körnern untereinander zurück. Zu vergleichbaren Ergebnissen kommen Untersuchungen von Erdogan et al. [256], Cordeiro et al. [21], Ren et al. [168] sowie Kabagire et al. [257]. Um den Kornformeffekt isoliert betrachten zu können, führen Erdogan et al. [256] Versuche an Beton mit künstlich aus Mörtel hergestellten Körpern sowie Glaskugeln durch.

Neben dem Einfluss eines steigenden Anteils an groben, aus Mörtel hergestellten, Körpern in Beton, zeigt Abb. 4.4 den unterschiedlichen Einfluss der Kornform auf die dynamische Viskosität und die Fließgrenze. Bei Einsatz quaderförmiger Mörtelkörper zeigt sich eine erhöhte dynamische Viskosität im Vergleich zu Zusammensetzungen mit kugelförmigen Mörtelkörpern, während der Einfluss auf die Fließgrenze gering ist. Als mögliche Ursache für eine Zunahme der dynamischen Viskosität mit steigendem Anteil an gebrochener Gesteinskörnung sehen Cordeiro et al. [21] die verringerte Sphärizität sowie Rundheit der Brechsandkörner, welche im Rahmen der Studie anhand von zweidimensionalen Fotografien bestimmt wurde. Ren et al. [168] führen die erhöhte dynamische Viskosität auf die gestiegene Wahrscheinlichkeit der Kollision von gebrochenen Brechsandkörnern untereinander zurück, da mit abnehmender Sphärizität die Anzahl direkter Nachbarkörner steigt. Im Vergleich zu Kalksteinmörtel mit Glaskugeln als Gesteinskörnung stellen Kabagire et al. [257] eine erhöhte dynamische Viskosität bei Verwendung von natürlichem Sand als Gesteinskörnung fest. Die Autoren identifizieren die Kornform als Haupteinflussfaktor im Vergleich zu den Parametern Korngröße und Packungsdichte. Aissoun et al. [24] untersuchen den Einfluss der Kornform von grober gebrochener Gesteinskörnung auf die rheologischen Eigenschaften eines selbstverdichtenden Betons. Hierbei zeigt sich, dass sowohl ein Anstieg der Fließgrenze als auch der dynamischen Viskosität beobachtet werden kann, wobei der Einfluss auf die dynamische Viskosität ausgeprägter ist. Die Autoren gehen davon aus, dass bei Verwendung gebrochener grober Gesteinskörnung die Reibungskräfte zwischen Körnern im Vergleich zur Verwendung von natürlich gerundeten Gesteinskörnungen zunehmen, was zu dem beobachteten Anstieg insbesondere der dynamischen Viskosität führt. Des Weiteren werden im Rahmen dieser Studie zwei Betonzusammensetzungen mit grober gebrochener Gesteinskörnung hergestellt, die sich lediglich im Anteil an plattigen und länglichen Körnern unterscheiden. Mit steigendem Anteil an plattigen und länglichen Körnern zeigt sich ein Anstieg in Fließgrenze und dynamischer Viskosität.

Eine weitere Studie zum Einfluss der Kornform auf Fließgrenze und dynamische Viskosität von Zhao et al. [28] steht in gewissem Widerspruch zu den bisher vorgestellten Ergebnissen. Aus den drei Sorten Gesteinskörnung gebrochener Kalkstein, Splitt und natürlich gerundetem Kies werden fünf Korngemische zusammengesetzt, welche zur Herstellung von Beton mit gleichbleibendem Verhältnis von Wasser zu Zement sowie Bindemittelleim zu Gesteinskörnung verwendet werden. Die Korngemische werden entsprechen ihrer Kornform anhand von mikroskopischen Aufnahmen und Fotografien in fünf Kategorien von rund über plattig bis hin zu eckig eingeteilt. Im Hinblick auf die



Fließgrenze können die Autoren beobachten, dass mit zunehmendem Anteil an eckigen, gebrochenen Körnern diese ansteigt. Als Ursache hierfür wird von einer erhöhten Reibung zwischen Körnern sowie erhöhten Wahrscheinlichkeit der Kollision ausgegangen, die vor allem auf die erhöhte Rauigkeit der Körner zurückzuführen ist, welche mit einer gestiegenen Eckigkeit einhergeht. Entgegen den bisher dargestellten Beobachtungen zeigt sich im Rahmen der Versuche von Zhao et al. [28] eine abnehmende dynamische Viskosität mit steigendem Anteil an eckigen und plattigen Körnern. Als maßgebenden Faktor, welcher die dynamische Viskosität beeinflusst, identifizieren die Autoren die Plattigkeit in Kombination mit der ein Korn umgebenden Bindemittelschichtdicke. Aufgrund der erhöhten spezifischen Oberfläche von plattigen und länglichen Körnern gegenüber kugelförmigen, nimmt die durchschnittliche Bindemittelschichtdicke ab, was zu einer Absenkung der dynamischen Viskosität führt.

Neben der Kornform untersuchen Erdogan et al. [256] den Einfluss der Rauigkeit der künstlich hergestellten Gesteinskörnung auf die rheologischen Eigenschaften von Beton. Hierfür werden Fließgrenze und dynamische Viskosität von Zusammensetzungen mit Glaskugeln, welche eine glatte Oberfläche aufweisen, sowie aus Mörtel hergestellter Kugeln mit rauer Kornoberfläche, verglichen. Es zeigt sich, dass die Oberflächenrauigkeit auf beide Parameter keinen Einfluss zu haben scheint.

Dem entgegen stehen Ergebnisse einer Untersuchung von Ostheerend [16] zum Einfluss von Kornform und Rauigkeit verschiedener Brechsande auf die dynamische Viskosität und Fließgrenze von selbstverdichtendem Mörtel. Die Rauigkeit und Kornform von Brechsandkörnern wird anhand einer dynamischen Bildanalyse bestimmt. Während im Rahmen dieser Studie der Einfluss der Kornform, in diesem Fall der Sphärizität, als gering bewertet wird, ist ein Einfluss der Kornrauigkeit sowohl auf die dynamische Viskosität als auch die Fließgrenze zu beobachten. Auch Zhao et al. [28] beobachten einen Einfluss der Rauigkeit auf Fließgrenze und dynamische Viskosität. Während Ostheerend [16] jedoch eine Zunahme der dynamischen Viskosität mit zunehmender Rauigkeit beobachtet, ist der umgekehrte Effekt bei Zhao et al. [28] zu beobachten.

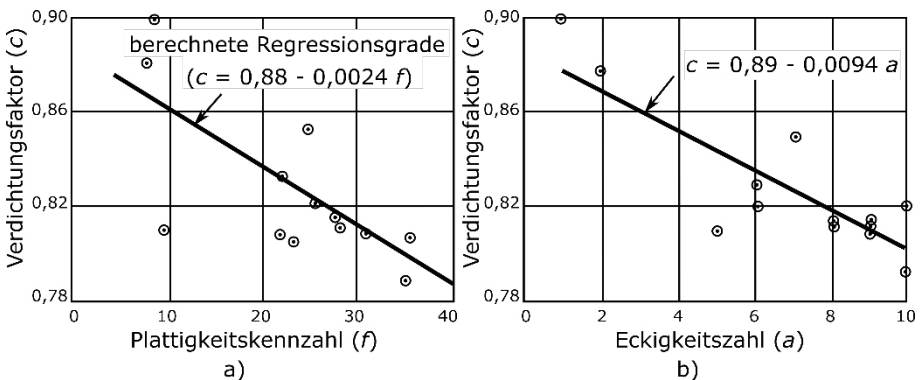


Abb. 4.5: Einfluss von a) Plattigkeit und b) Eckigkeit 13 verschiedener grober Gesteinskörnungen auf den Verdichtungsfaktor von Beton, nach [258], übersetzt ins Deutsche.

Auch Versuche zum Zusammenhang morphologischer Eigenschaften der Gesteinskörnung und dem Ergebnis von Ein-Punkt-Versuchen zeigen einen Einfluss auf die

Konsistenz von Mörtel und Beton. Der Einsatz von Brechsanden oder gebrochener grober Gesteinskörnung führt zu einer erschwerten Verarbeitbarkeit im frischen Zustand im Vergleich zu natürlich gerundetem Flusssand oder Kies, wofür Kornform und Rundheit als mögliche Ursache gelten [21, 23, 25, 32, 167, 258–262]. Verschiedene Studien untersuchen den Einfluss der Kornform auf die Verarbeitbarkeit von Mörteln oder Beton, wobei entweder ein Fokus auf den Ersatz der feinen Kornfraktion durch Brechsande [21, 23, 25, 32, 260–262] oder der groben Kornfraktion durch gebrochene Körner [167, 258, 259] gelegt wird. Gleichzeitig kommen unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung der Kornform oder Rundheit von labortechnischen Untersuchungen [23, 167, 258] über die Auswertung von zweidimensionalen Fotografien [21, 259, 260] bis hin zur CT-Analyse von Gesteinskörnungen [25, 32] zum Einsatz.

Unabhängig von der Wahl des Versuches zu Charakterisierung der Verarbeitbarkeit zeigt sich, dass mit abnehmender Sphärizität und Rundheit der Gesteinskörnung die Verarbeitbarkeit signifikant abnimmt. Abb. 4.5 zeigt links den von Kaplan [258] beobachteten Zusammenhang zwischen der im Labor ermittelten Plattigkeit und einem Verdichtungsfaktor. Der Verdichtungsfaktor gibt in diesem Fall das Verhältnis der Masse der teilweise verdichteten Betonprobe zur Masse der vollständig verdichteten Betonprobe an. In Abb. 4.5 rechts wird der Zusammenhang zwischen der über den Hohlraumgehalt bestimmten Eckigkeit nach Shergold [199] und dem Verdichtungsfaktor im Rahmen der von Kaplan [258] durchgeführten Untersuchungen an Betonzusammensetzungen mit dreizehn verschiedenen Sorten gebrochener und ungebrochener grober Gesteinskörnung dargestellt. Die Reduktion des Verdichtungsfaktors führt der Autor auf einen kombinierten Effekt aus steigender Plattigkeit und Eckigkeit zurück, wobei der Einfluss der Eckigkeit größer ist als der der Plattigkeit. Die zusätzlich ermittelte Kornrauigkeit scheint hingegen keinen signifikanten Einfluss auf den Verdichtungsfaktor zu haben.

Ebenfalls den Einfluss der Kornform auf den Verdichtungsfaktor von Beton ermittelten Jamkar und Rao [167] unter Verwendung von jeweils zwei verschiedenen natürlichen und gebrochenen groben Gesteinskörnungen. Zur Beschreibung der Kornform wird der selbst definierte IAPST-Parameter verwendet, welcher sowohl durch die Rundheit von Körnern als auch deren Rauigkeit beeinflusst wird. Hierfür wird die Gesteinskörnungsprobe in enge Kornfraktionen gesiebt. Für jede dieser Kornfraktionen wird der Hohlraumgehalt bei Verdichtung mit zwei unterschiedlichen Verdichtungsenergien bestimmt. Der IAPST-Parameter je Kornfraktion wird anhand dieser beiden Hohlraumgehalte anhand der in [167] angegebenen Gleichung bestimmt. Der IAPST-Parameter für der gesamten Gesteinskörnungsprobe ergibt sich anschließend aus dem massengewichteten Durchschnittswert der einzelnen Kornfraktionen. Die Autoren können zeigen, dass mit zunehmendem IAPST-Wert, folglich mit einer zunehmenden Eckigkeit und Rauigkeit, der Wasseranspruch einer Betonzusammensetzung steigt. Da jedoch der IAPST-Wert sowohl durch die Rundheit als auch die Rauigkeit der Körner beeinflusst wird, ist eine Trennung des jeweiligen Einflusses auf den Verdichtungsfaktor nicht möglich.

Der Einsatz gebrochener feiner oder grober Gesteinskörnung führt ebenfalls zu einer Verringerung des Setz- beziehungsweise Setzfließmaßes. So stellen Donza et al. [23] sowie Cordeiro et al. [21] einen zunehmenden Fließmittelbedarf zum Erreichen eines

vorher definierten Setzmaßes bei Verwendung von Brechsand im Vergleich zu Zusammensetzungen ausschließlich mit natürlichem Flusssand fest. Shen et al. [260] beobachten eine ähnliche Zunahme der erforderlichen Fließmitteldosierung bei Einsatz eines Großteils der im Rahmen der Studie verwendeten Brechsande. Neben der anhand von Fotografien bestimmten Sphärizität und Rundheit und der anhand von Lasermessungen bestimmten Rauigkeit haben auch andere Eigenschaften, wie zum Beispiel der Anteil an Feinanteilen, einen signifikanten Einfluss auf das Setzmaß. Dieser Effekt ist sogar stärker ausgeprägt, als der Einfluss von Kornform und Rauigkeit.

Wird statt gebrochener Gesteinskörnung aus natürlichem Gestein rezyklierte Gesteinskörnung verwendet, kann ebenfalls eine Abnahme des Setzmaßes im Vergleich zum Einsatz von natürlicher Gesteinskörnung beobachtet werden [26, 263, 264]. Die erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit der rezyklierten Gesteinskörnung stellt jedoch einen weiteren Einflussfaktor dar, der ebenfalls Ursache einer Abnahme des Setzmaßes sein kann. Eckert und Oliveira [263] beobachten die Entwicklung des Ausbreitmaßes für Beton­zusammensetzungen mit unterschiedlicher grober rezyklierte Gesteinskörnung sowie natürlicher Gesteinskörnung über einen Zeitraum von drei Stunden. Der Anteil länglicher Körner in der jeweiligen Schüttung wird als Kornformkennzahl nach DIN EN 933-4 angegeben. Es zeigt sich ein reduziertes Setzmaß für die Zusammensetzungen mit rezyklierte Gesteinskörnung. Im Rahmen des Herstellungsprozesses wird zum Ausgleich der erhöhten Wasseraufnahmefähigkeit Zusatzwasser entsprechend der Wasseraufnahme *WA* der Gesteinskörnung nach fünf Minuten zugegeben. Da weder ein eindeutiger Anstieg noch ein scharfer Abfall des Setzmaßes mit der Zeit beobachtet werden kann, gehen die Autoren davon aus, dass das zugegebene Zusatzwasser eine Aufnahme oder Abgabe von Wasser aus dem Bindemittelleim größtenteils verhindern konnte. Das verringerte Setzmaß führen sie daher hauptsächlich auf die erhöhte Rauigkeit der rezyklierten Körner sowie die erhöhte Kornformkennzahl der Schüttungen zurück. Zu vergleichbaren Ergebnissen im Hinblick auf eine Verringerung des Setzmaßes bei Einsatz rezyklierte Gesteinskörnung kommen Leite et al. [264]. Auch Fan et al. [26] beobachten diesen Effekt im Rahmen einer Studie, bei der die feine Kornfraktion gegen rezyklierten Brechsand ausgetauscht wird.

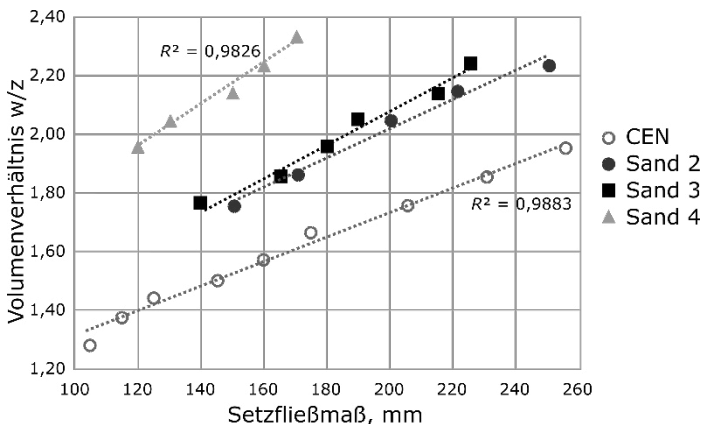


Abb. 4.6: Zusammenhang zwischen Setzfließmaß und Wasser-Zement-Wert bei Verwendung verschiedener Sande und Brechsande, nach [25], übersetzt ins Deutsche.

Im Rahmen einer Studie von Polat et al. [259] werden die Körner entsprechend ihrer Form (plattig, länglich, hohe Sphärizität) sortiert und getrennt zur Herstellung des Betons eingesetzt. Die Kornformparameter Plattigkeit, Länglichkeit und Sphärizität werden anschließend mittels digitaler Bildanalyse quantifiziert. Die Autoren können zeigen, dass mit zunehmender Sphärizität der Körner das Setzmaß steigt. Dies führen sie auf die geringere spezifische Oberfläche von Körnern mit hoher Sphärizität im Vergleich zu platten oder länglichen Körnern, und der damit verbundenen verringerten Reibung zwischen Gesteinskörnung und Bindemittelleimatrix, zurück.

Estephane et al. [25, 32] führen Mörteluntersuchungen mit fünf verschiedenen Sanden gleicher Korngrößenverteilung durch, wobei es sich um vier Brechsande sowie einen Referenzsand handelt, der den Anforderungen an einen CEN Normsand nach DIN EN 196-1 [265] entspricht. Die Sande werden in enge Kornfraktionen gesiebt und anschließend, eingebettet in eine Matrix aus Epoxidharz, tomographiert. Auf Basis der dreidimensionalen Abbildung der Körner werden Kornformparameter bestimmt. Unter Verwendung der fünf verschiedenen Sande sowie einer einheitlichen Zementmasse werden Mörtelzusammensetzungen hergestellt, wobei der Wassergehalt schrittweise erhöht wird. Dies führt sowohl zu einer Steigerung des Wasser-Zement-Wertes ( $w/z$ -Wert) als auch des Bindemittelleimanteils. Es zeigt sich, dass für die verschiedenen Sande ein unterschiedlicher Wasser-Zement-Wert ( $w/z$ -Wert) erforderlich ist, um ein einheitliches Setzfließmaß zu erreichen, siehe Abb. 4.6. Für ein definiertes Setzfließmaß und einen einheitlichen Zementgehalt ist der erforderliche Wasserbedarf für den CEN Normsand mit nahezu kugelförmigen Körnern am niedrigsten. Je plattiger die Körner einer Sandprobe sind, desto deutlicher zeigt sich die erforderliche Erhöhung des Wassergehalts. Gleichzeitig können die Autoren zeigen, dass bei hohen  $w/z$ -Werten der Einsatz plattiger Körner vorteilhaft sein kann, da diese eine zu starke Zunahme der Fließfähigkeit verhindern können und infolgedessen das Entmischungsrisiko vermindert wird.

### **4.1.3 Mechanische Eigenschaften von Mörtel und Beton**

#### **4.1.3.1 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften**

Die Festigkeit stellt eine der wesentlichen Eigenschaften von Mörtel und Beton im erhärteten Zustand dar. Neben der Druckfestigkeit werden die Festigkeitseigenschaften im Rahmen dieser Arbeit anhand der Biegezugfestigkeit sowie des Elastizitätsmoduls charakterisiert. Die Druckfestigkeit hängt maßgeblich von dem Verhältnis von Wasser zu Zement ab [225]. Die Druckfestigkeit  $f_c$  ist nach Gleichung (4.6) als Verhältnis aus maximal aufnehmbarer Kraft  $F$  bezogen auf die belastete Fläche der untersuchten Probe  $A_c$  definiert [266].

$$f_c = \frac{F}{A_c} \tag{4.6}$$

mit:	$f_c$	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
	$F$	Maximale Kraft beim Bruch [N]
	$A_c$	Belastete Fläche der Probe [mm <sup>2</sup> ]

Die Bestimmung der Druckfestigkeit von Beton erfolgt nach DIN EN 12390-3 [266], für Mauer- und Putzmörtel nach DIN EN 1015-11 [267] sowie für Zement nach DIN EN 196-1 [265]. Hierbei wird eine quaderförmige oder zylindrische Probe mit einer vertikal wirkenden Last bis zum Bruch belastet. Die Probenform, insbesondere ihr Verhältnis von Breite bzw. Durchmesser zu Höhe, beeinflusst dabei das Ergebnis der Druckfestigkeitsbestimmung [268, 269]. Die Wirkung einer Druckbeanspruchung auf Betonproben untersuchen Hsu et al. [270] anhand einer Analyse des Risszustandes bei unterschiedlichen Belastungsstadien. Hierfür wird nach einer Teilbelastung ein Querschnitt aus der Probe herausgeschnitten und dieser geschliffen. Anschließend wird das Rissbild unter dem Mikroskop analysiert. Bereits vor Beginn der Belastung existieren erste Verbundrisse zwischen Bindemittelleimmatrix und Korn. Bis zu einer Belastung von ca. 30 % der Höchstlast kann nur eine geringe Zunahme der Anzahl der Verbundrisse beobachtet werden. Bis zu dieser Druckbelastung kann ein annähernd linear-elastisches Verhalten der Betonprobe beobachtet werden. Mit zunehmender Belastung steigt die Anzahl der Verbundrisse an, bis sich ab einer Belastung von 70-90 % der Höchstlast erste Risse durch die Bindemittelleimmatrix bilden. Im weiteren Verlauf des Druckversuchs entsteht eine zunehmende Vernetzung der Risse. Diese Ausbildung eines zusammenhängenden Rissnetzes setzt sich auch nach Erreichen der Höchstlast fort. Die Autoren können nur vereinzelt Risse durch die Gesteinskörnung feststellen, welche vor allem kurz vor dem Versagen der Betonprobe auftreten.

Das annähernd linear-elastische Verhalten, welches Hsu et al. [270] bis zu einer Druckbeanspruchung von etwa 30 % der Höchstlast beobachten, kann anhand des sogenannten Elastizitätsmoduls (E-Modul) charakterisiert werden. Wobei die Abweichung von einem idealen linear-elastischen Verhalten, auf eine gewisse viskoelastische Verformung der Bindemittelleimmatrix zurück geführt werden kann [271]. Der E-Modul ist entsprechend des Hookschen Gesetzes nach Gleichung (4.7) als das Verhältnis von Spannung  $\sigma$  zu Dehnung  $\varepsilon$  definiert [181]. Hierbei ergibt sich die Spannung  $\sigma$  aus dem Verhältnis der aufgetragenen Kraft zur belasteten Querschnittsfläche, und die Dehnung  $\varepsilon$  als das Verhältnis der Längenänderung des Probekörpers zur Ausgangslänge. Der E-Modul beschreibt die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve im linear-elastischen Bereich. Die Bestimmung des statischen E-Moduls erfolgt für Beton nach DIN EN 12390-13 [272] oder für Mörtel nach DIN EN 13412 [273]. Alternativ bietet sich die zerstörungsfreie Prüfung des dynamischen E-Moduls an, welche auf der Laufzeitmessung einer Ultraschallwelle durch den Probekörper basiert [274].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.7)$$

mit:	$E$	Elastizitätsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]
	$\sigma$	Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]
	$\varepsilon$	Dehnung [-]

Die Bestimmung der Zugfestigkeit von Mörtel und Beton stellt eine versuchstechnische Herausforderung dar, da starke Spannungskonzentrationen an den Einspannstellen der Beton- oder Mörtelprobe beobachtet werden können, die zu einer Verfälschung des Versuchsergebnisses führen [275]. Alternativ zur direkten Bestimmung der Zugfestigkeit bieten sich indirekte Verfahren wie die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit

oder der Biegezugfestigkeit  $f_{ti}$  an. Die Biegezugfestigkeit wird für Beton nach DIN EN 12390-5 [276] und für Mörtel nach DIN EN 196-1 [265] bestimmt.

#### **4.1.3.2 Einfluss morphologischer Parameter auf die mechanischen Eigenschaften**

Im Rahmen verschiedener Studien konnte gezeigt werden, dass die Kornform einen Einfluss auf die Eigenschaften von Mörtel und Beton im ausgehärteten Zustand hat. Je nach betrachtetem Parameter zur Beschreibung der Kornform existieren jedoch teilweise widersprüchliche Aussagen zu den beobachteten Auswirkungen auf Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit und E-Modul.

Kaplan [27] untersucht anhand von 13 Sorten grober Gesteinskörnung sowie Flusssand den Einfluss der Kornform auf Druck- und Biegezugfestigkeit anhand von Betonzusammensetzungen mit unterschiedlichem w/z-Wert und Bindemittelleimgehalt. Kornform- und Plattigkeitskennzahl werden mit einer speziellen Kornlängen- bzw. Korndickenlehre bestimmt, welche vor allem in Großbritannien zur Anwendung kommen. Die Eckigkeit der jeweiligen Schüttung wird nach dem Verfahren von Shergold [199] über den Hohlraum in verdichtetem Zustand bestimmt. Zusätzlich wird die Kornrauigkeit labortechnisch bestimmt. Mit steigender Kornrauigkeit nehmen sowohl Biegezug- als auch Druckfestigkeit zu, wobei dieser Effekt mit steigender Festigkeit ausgeprägter wird. Neben der Kornrauigkeit kann ein Zusammenhang mit der Eckigkeit beobachtet werden. Der Autor geht davon aus, dass mit zunehmender Rauigkeit und Eckigkeit die spezifische Oberfläche der Körner gegenüber kugelförmigen Körnern steigt und damit höhere Verbundkräfte zwischen Bindemittelleimmatrix und Korn wirken.

Diesen Zusammenhang zwischen Kornrauigkeit und Druck- sowie Biegezugfestigkeit können weitere Studien bestätigen [23, 24, 28]. Donza et al. [23] führen Versuche an Beton unter Verwendung eines gebrochenen Granitsteins als grobe Gesteinskörnung sowie verschiedenen natürlichen und gebrochenen Sanden durch. Dabei wird die Kornform der Sande nach Augenschein in die Kategorien rund, eckig, länglich, glatt, kristallin und rau eingeordnet. Es zeigt sich, dass aus dem Einsatz von Brechsanden mit erhöhter Eckigkeit und Rauigkeit erhöhte Druckfestigkeiten resultieren. Bei Untersuchungen an selbstverdichtendem Beton beobachten Aissoun et al. [24] einen Anstieg der Druckfestigkeit, wenn statt natürlicher Gesteinskörnung gebrochene Korngemische zum Einsatz kommen. Zhao et al. [28] beobachten sowohl einen Anstieg der Druck- als auch der Biegezugfestigkeit mit zunehmender Rauigkeit und Eckigkeit der eingesetzten groben Gesteinskörnung. Die Autoren stellen fest, dass die Biegezugfestigkeit maßgeblich von der Kornrauigkeit beeinflusst wird, während die Druckfestigkeit vor allem von der Eckigkeit abhängig ist. Genau wie Kaplan [27] führen Donza et al. [23], Aissoun et al. [24] und Zhao et al. [28] die erhöhte Druck- bzw. Biegezugfestigkeit auf die erhöhten Verbundkräfte zwischen Korn und Bindemittelleimmatrix bei eckigen und rauen Körnern zurück.

In gewissem Widerspruch zu diesen Ergebnissen stehen Untersuchungen von Wills [277] sowie Cordeiro et al. [21]. Wills stellt Beton aus einer Kombination von 25 verschiedenen feinen und groben Kiesschüttungen her, wobei der Wassergehalt auf ein einheitliches Setzmaß eingestellt wird. Die Kornform wird mittels Schüttdichte und

Fließkoeffizient labortechnisch bestimmt, womit die Schüttungen entsprechend ihrer Eckigkeit und Rauigkeit eingeordnet werden können. Hierbei konnte kein Zusammenhang zwischen der Kornform und der Biegezugfestigkeit bei steigender Rauigkeit oder Eckigkeit beobachtet werden.

Inwiefern ein Einfluss zwischen der Rauigkeit und Eckigkeit sowie des E-Moduls besteht, wird im Rahmen der Studien von Donza et al. [23] sowie Cordeiro et al. [21] näher beleuchtet. Dabei unterscheiden sich die betrachteten Betonzusammensetzungen weder im Bindemittelleimgehalt, im w/z-Wert noch im Gesteinskörnungsanteil. Im Fall der Verwendung von gebrochener Gesteinskörnung erfolgt lediglich eine Anpassung der Verarbeitbarkeit mit Fließmittel. Donza et al. [23] beobachten ein abnehmender E-Modul, wenn natürlicher Sand durch Brechsand ersetzt wird, was mit einer Steigerung der Eckigkeit und Rauigkeit einhergeht. Im Gegensatz dazu zeigt sich im Rahmen der Studie von Cordeiro et al. [21] bei Erhöhung der Austauschrate von natürlichem Sand durch Brechsand keine Beeinflussung des E-Moduls. Die Autoren führen dies auf die hohe Kornfestigkeit des Brechsandes, hergestellt aus Granitgestein, zurück.

Neben der Rauigkeit und Eckigkeit kann im Rahmen verschiedener Studien außerdem gezeigt werden, dass zwischen Formparametern wie der Plattigkeit oder der Sphärizität und der Druckfestigkeit ein Zusammenhang besteht [27, 28, 259, 278]. Polat et al. [259] sortieren natürlich gerundeten Flusskies von Hand in die drei Kategorien platt, länglich und Körner mit einer hohen Sphärizität. Anhand von Fotografien aus zwei Richtungen, und einer anschließenden digitalen Bildanalyse, werden Parameter zur Beschreibung von Form und Eckigkeit bestimmt. Abb. 4.7 zeigt den Einfluss der Sphärizität auf die Druckfestigkeit der hergestellten Betonzylinder. Es zeigt sich, dass mit steigender Sphärizität die Druckfestigkeit ansteigt. Mit zunehmender Plattigkeit und Länglichkeit der Körner nimmt die Druckfestigkeit hingegen ab.

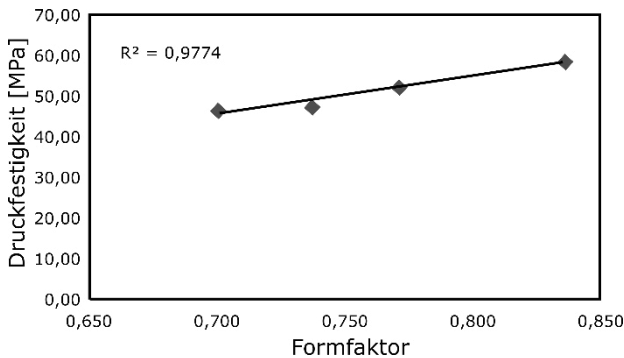


Abb. 4.7: Einfluss des Formfaktors Sphärizität auf die Druckfestigkeit von Beton, nach [259], übersetzt ins Deutsche.

Genau wie Polat et al. sortieren Deng et al. [278] aus einer Schüttung von Kalkstein Körner entsprechend ihrer Kornform in die Kategorien platt, länglich und Körner mit einer hohen Sphärizität. Im Anschluss daran werden drei Betonzusammensetzungen mit unterschiedlichem w/z-Wert hergestellt. Jede dieser Betonzusammensetzungen enthält natürlichen Flusssand als feine Gesteinskörnung und eine Kombination aus

einer oder mehrerer Kategorien der sortierten groben Gesteinskörnung. Im Ergebnis zeigt sich ebenfalls, dass die höchste Druckfestigkeit bei Körnern mit hoher Sphärizität erzielt werden kann. Die niedrigste Druckfestigkeit stellt sich für Betone mit einem hohen Anteil an platten oder länglichen Körnern ein. Eine Regressionsanalyse zeigt, dass insbesondere die Kornformparameter Sphärizität und Länglichkeit einen maßgeblichen Einfluss auf die Druckfestigkeit des Betons haben. Eine mögliche Ursache für die beobachtete niedrige Druckfestigkeit leiten die Autoren aus der Analyse der Bruchflächen ab. Dabei zeigt sich, dass bei Körnern mit hoher Sphärizität die Bruchfläche in der Regel durch die Matrix oder die Verbundzone zur Matrix verläuft. Bei Einsatz von platten oder länglichen Körnern tritt der Bruch dagegen im Kornbereich auf. Zu dem gleichen Schluss kommen Zhao et al. [28], die ebenfalls eine Abnahme der Druckfestigkeit beobachten, wenn der Anteil an platten Körnern steigt.

**4.1.4 Zusammenfassung und Fazit**

Die Abschnitte 4.1.1 bis 4.1.3 geben einen Überblick über die Ergebnisse verschiedener Studien zum Einfluss morphologischer Charakteristika der Gesteinskörnung auf die Eigenschaften von Mörtel und Beton im frischen sowie erhärteten Zustand. Hierbei zeigt sich, dass der Einfluss morphologischer Parameter auf die Eigenschaften von Mörtel und Beton vielfältig ist. Teilweise konnte im Rahmen verschiedener Studien ein widersprüchlicher Einfluss festgestellt werden. Die folgende Tab. 4.1 gibt einen Überblick über den Einfluss auf verschiedene Mörtel- oder Betoneigenschaften, wenn der jeweilige morphologische Parameter zunimmt.

Tab. 4.1: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Literatur zum Einfluss verschiedener morphologischer Parameter der Gesteinskörnung auf die Eigenschaften von Mörtel oder Beton im frischen und erhärteten Zustand.

Beeinflusste Mörtel- oder Betoneigenschaft	Morphologische Parameter der Gesteinskörnung				
	Plattigkeit ↑	Länglichkeit ↑	Sphärizität ↑	Eckigkeit ↑	Rauigkeit ↑
Dynamische Viskosität	↑, ↓*	↑, ↓*	↓	↑, ↓*	↑, →, ↓*
Fließgrenze	↑	↑		↑	→
Verarbeitbarkeit (Ein-Punkt-Versuche)	↓	↓	↑	↓	→, ↓*
Druckfestigkeit	↓	↓	↑	↑	↑
Biegezugfestigkeit				↑	↑
E-Modul				→, ↓*	
↑ Eigenschaft nimmt zu ↓ Eigenschaft nimmt ab → Eigenschaft bleibt unverändert * Bei widersprüchlichen Ergebnissen verschiedener Studien sind mehrere mögliche Einflüsse angegeben					



Basierend auf dem Ergebnis dieser Literaturrecherche stellt sich die Frage, inwiefern die vorgestellten Versuchsergebnisse von der Interaktion morphologischer Eigenschaften der Gesteinskörnung und anderen Parametern der Mischungszusammensetzung, wie zum Beispiel dem w/z-Wert oder dem Bindemittelleimgehalt, abhängig sind. Im Hinblick auf den Einsatz von rezyklierter grober oder feiner Gesteinskörnung kann gezeigt werden, dass der Einfluss der erhöhten Eckigkeit auf die Verarbeitbarkeit von Mörtel und Beton ein Hindernis bei der Erhöhung des Anteils dieses Materials darstellt.

Ziel der im Folgenden vorgestellten Versuche ist die nähere Beleuchtung folgender Fragestellungen:

1. Welcher Zusammenhang besteht zwischen morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung und Frisch- und Festmörtel­eigenschaften in Abgrenzung zu anderen Parametern, die die Zusammensetzung von Mörtelmischungen bestimmen?
2. Kann der Anteil von feiner rezyklierter Gesteinskörnung zur Herstellung von Mörtel, bei Berücksichtigung der morphologischen Eigenschaften, optimiert beziehungsweise maximiert werden?

## **4.2 Analyse des Einflusses morphologischer Kenngrößen auf Mörtel­eigenschaften**

### **4.2.1 Einleitung**

CT-Aufnahmen ermöglichen die Bestimmung einer Vielzahl von Kenngrößen zur Charakterisierung von Korngröße, Kornform und Eckigkeit, basierend auf der dreidimensionalen Gestalt einzelner Körner einer Schüttung. Insbesondere für feine Gesteinskörnung kleiner 2 mm bietet sich damit die Möglichkeit, eine Charakterisierung über die Korngrößenverteilung hinaus durchzuführen. Im Ergebnis liegen detaillierte Informationen zu den morphologischen Eigenschaften feiner Gesteinskörnungsschüttungen vor, die mit gängigen labortechnischen Verfahren wie zum Beispiel dem Fließkoeffizienten  $E_c$  nach DIN EN 933-6 nicht erhoben werden können. Anhand von CT-Aufnahmen von Gesteinskörnungsproben können damit auch Unterschiede zwischen natürlichen Sanden und Brechsanden aus natürlichem oder rezykliertem Gestein quantifiziert werden. Die morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung beeinflussen wiederum die Eigenschaften von Mörtel und Beton sowohl in frischem als auch erhärtetem Zustand, siehe Abschnitt 4.1.

Ziel der im Folgenden vorgestellten Untersuchung ist die Quantifizierung des Einflusses morphologischer Merkmale feiner Gesteinskörnungsschüttungen auf Frisch- und Festmörtel­eigenschaften. Zur Abgrenzung der morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung von Parametern der Mörtel­zusammensetzung werden zusätzlich zur Variation der Gesteinskörnungsart die Parameter Wasser-Zement-Wert, das Massenverhältnis von Bindemittelleim zu Gesteinskörnung und die Kornzusammensetzung (Sieblinie) berücksichtigt. Die im Folgenden vorgestellten Untersuchungsergebnisse wurden in [208] teilweise vorveröffentlicht.

#### **4.2.2 Statistische Versuchsplanung**

Im Anschluss an die Herstellung der Mörtelzusammensetzungen inklusive der Bestimmung der Frisch- und Festmörtel Eigenschaften erfolgt eine Analyse des Zusammenhangs mit morphologischen Charakteristika der Gesteinskörnung mittels multipler linearer Regression. Der Versuchsplan wird anhand der statistischen Versuchsplanung auf die Durchführung einer multiplen linearen Regressionsanalyse abgestimmt. Zunächst wird die Anzahl an zu untersuchenden Einflussgrößen festgelegt, die sogenannten unabhängigen Variablen. Kennzeichnend für die unabhängigen Variablen ist, dass sie auf einer oder mehreren Stufen variiert werden können, ohne dabei die Ausprägung einer anderen unabhängigen Variable zu beeinflussen. Im Rahmen dieser Untersuchung werden die folgenden unabhängigen Variablen berücksichtigt:

1. Art der Gesteinskörnung auf fünf Stufen (Rheinsand, Basaltsplitt, rezyklierter Betonbruch, rezyklierter Mauerwerksbruch, Kalknatronglas)
2. Sieblinie auf zwei Stufen (AB und BC)
3. w/z-Wert auf zwei Stufen (0,45 und 0,55)
4. Verhältnis der Bindemittelmasse zur Gesteinskörnungsmasse (b/gk-Wert) auf zwei Stufen (0,95 und 1,05)

Es werden fünf Arten von Gesteinskörnung ausgewählt, die für die Herstellung von Mörtel und Beton genutzt werden können. Da die Verwendung einer AB-Sieblinie oder BC-Sieblinie zur Herstellung von Mörtel und Beton in der Praxis gängig sind, werden diese beiden Stufen für die Variable Sieblinie gewählt. Die Festlegung der Stufen für den w/z-Wert und den b/gk-Wert basiert auf Vorversuchen. Bei jeder Kombination der Stufen dieser beiden Variablen soll die Bestimmung rheologischer Kenngrößen möglich sein, was eine geringe Entmischungsneigung erfordert sowie eine ausreichend weiche Konsistenz. Gleichzeitig sollen die beiden Stufen so weit wie möglich auseinander liegen, damit Effekte, die auf diese Stufenunterschiede zurück gehen, sich so wenig wie möglich überlappen [279, 280]. Der w/z-Wert ist sowohl zur Steuerung der Mörtelkonsistenz als auch Mörteldruckfestigkeit geeignet und als Massenverhältnis zwischen dem Wasser- und dem Zementanteil definiert. Orientierend an Untersuchungen von de Schutter und Poppe [281] und Cortes et al. [262] zum Einfluss verschiedener Sandarten auf Frisch- und Festmörtel Eigenschaften, wird im Rahmen dieser Arbeit der b/gk-Wert als Massenverhältnis zwischen dem Bindemittelleim- und dem Gesteinskörnungsanteil definiert, welcher zur Steuerung der Bindemittelmasse innerhalb der Mörtelzusammensetzung geeignet ist. Alternativ zum Massenverhältnis von Bindemittelleim zu Gesteinskörnung wäre eine Variation des volumetrischen Bindemittelleimgehalts möglich. Vorteile der Steuerung des Bindemittelanteils als Massenverhältnis liegen zum einen in der konsistenten Definition der Variationsparameter w/z-Wert und b/gk-Wert sowie zum anderen in der praktikablen Bestimmung der Wasser- und Zementmasse je Mörtelzusammensetzung unabhängig von anderen das Mörtelvolumen beeinflussenden Parametern wie zum Beispiel dem Luftporengehalt oder die Rohdichte der verwendeten Gesteinskörnung. Wie im folgenden Abschnitt 4.2.3 erläutert, stellt insbesondere die Bestimmung der Rohdichte im oberflächenfeuchten Zustand gebrochener feiner Gesteinskörnung eine Herausforderung dar, da das genormte Standardverfahren nach DIN EN 1097-6 eine Bewertung des oberflächenfeuchten Zustandes feiner Gesteinskörnungsschüttungen lediglich für natürlich gerundete Körner

vorsieht. Die Bestimmung der Trockenrohddichte  $\rho_{rd}$ , welche wiederum auf der Bestimmung des oberflächentrockenen Zustandes basiert, ist damit insbesondere für rezyklierte feine Gesteinskörnung abhängig von der Definition dieses Zustandes. Bei Verwendung des b/gk-Wertes als Massenverhältnis von Bindemittel zu Gesteinskörnung, wird die Gesteinskörnung in ofentrockenem Zustand verwendet, ohne dass die Definition zur Bestimmung der Trockenrohddichte  $\rho_{rd}$  Einfluss auf diesen Variationsparameter hat. Gleichzeitig zeigen die durchgeführten Vorversuche, dass das gewählte Vorgehen eine Variation der Wassermasse sowie der Bindemittelmasse unabhängig voneinander ermöglicht.

Die morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung werden im Rahmen der multiplen linearen Regression als Kovariaten in das Modell mit aufgenommen, da eine unabhängige Einstellung auf unterschiedlichen Stufen in diesem Fall nicht möglich ist [280]. Als Kovariaten werden entsprechend der vorgestellten Ergebnisse in Abschnitt 3.2 die folgenden Variablen berücksichtigt:

1.  $d_{V50}(LL_E)$  (Median der Länglichkeit von als länglich klassifizierten Körnern)
2.  $LL_E$  (Anteil länglicher Körner)
3.  $d_{V50}(AT_{3D})$  (Ausprägung der Eckigkeit)
4.  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  (Verteilung der Eckigkeit)

Neben den abhängigen Variablen und Kovariaten existieren Störgrößen, die ebenfalls einen Einfluss auf die untersuchte abhängige Variable haben können [279]. Diese Störgrößen sollten im Rahmen der Versuchsdurchführung nach Möglichkeit minimiert bzw. kontrolliert werden. Beispiele von Störgrößen, die beispielsweise bei der Bestimmung von Frisch- und Festmörtel Eigenschaften auftreten können, sind:

1. Messfehler bei der Bestimmung von Frisch- und Festmörtel Eigenschaften
2. Variierende Temperatur der Ausgangsstoffe zur Mörtelherstellung
3. Variierende Raumlufttemperatur und variierender Luftfeuchtegehalt
4. Variierende Lagerungsbedingungen der Mörtelprismen

Zur Erstellung des Versuchsplans werden folglich drei zweistufige Variablen sowie eine fünfstufige Variable berücksichtigt. Werden diese Variablen unabhängig voneinander auf den jeweiligen Stufen variiert, setzt sich der Vollfaktorplan aus 40 Versuchen zusammen. Ziel der statistischen Versuchsplanung ist es, einen Versuchsplan zu entwickeln, der in annehmbarer Zeit mit leistbaren Ressourcen durchgeführt werden kann. Gleichzeitig soll die erforderliche Datenbasis für die anschließende multiple lineare Regressionsanalyse geliefert werden [279]. Hierfür ist eine ausreichende Anzahl an Freiheitsgeraden erforderlich. Die Anzahl an Freiheitsgraden gibt an, wie viele der vorhandenen Beobachtungswerte zur Abschätzung der Streuung bzw. des Fehlerterms genutzt werden können [280]. Diese Anzahl ergibt sich aus den vorhandenen Beobachtungswerten abzüglich der Anzahl an Termen, welche im Rahmen der Regressionsanalyse bestimmt werden. Die Anzahl der Regressionsterme setzt sich aus der Anzahl der berücksichtigten Haupteffekte, Interaktionseffekte und dem konstanten Term zusammen [280]. Haupteffekte geben dabei den Einfluss einer der unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable an, während Interaktionseffekte den Einfluss einer unabhängigen Variable auf die abhängige Variable in Abhängigkeit von einer oder mehrere anderen unabhängigen Variablen angeben [210, 280]. Der Grad einer

Interaktion bezeichnet die Anzahl der an der Interaktion beteiligten unabhängigen Variablen der multiplen linearen Regressionsanalyse. Im Rahmen der statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse sollen neben Haupteffekten auch Interaktionseffekte zweiten Grades berücksichtigt werden. Interaktionen höheren Grades bleiben aufgrund der großen Anzahl an erforderlichen Freiheitsgraden sowie geringen Wahrscheinlichkeit von statistisch signifikanten Einflüssen auf die abhängige Variable unberücksichtigt [279]. Auf die Reduktion des Vollfaktorplans bestehend aus 40 Versuchen wird verzichtet, um eine ausreichende Anzahl von Freiheitsgraden für die anschließende multiple lineare Regressionsanalyse bereit zu stellen.

Für jede der 40 Mörtelzusammensetzungen werden vier Replikationen durchgeführt, was zu einer Gesamtgröße des Versuchsplans von 160 Versuchen führt. Aufgrund der zusätzlichen Versuche bewirken Replikationen eine Erhöhung der zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade, welche zum einen zur erhöhten Genauigkeit der Bestimmung von Haupt- und Interaktionseffekten dient und zum anderen eine verbesserte Abschätzung der Versuchsstreuung ermöglicht [279, 280]. Der Versuchsplan gliedert sich in vier Blöcke, die jeweils aus einem Vollfaktorplan bestehen. Innerhalb jedes dieser Blöcke werden die Versuche randomisiert abgearbeitet. Die zufällige Festlegung der Reihenfolge, in der die Versuche abgearbeitet werden, ermöglicht, dass Störgrößen ebenfalls zufällig auf die Messergebnisse der einzelnen Versuche verteilt werden [279]. Der Versuchsplan wird mit R [136] (R Core Team) und RStudio [137] erstellt und kann Anhang F, Tab. F.1 bis Tab. F.4 entnommen werden.

### **4.2.3 Materialien**

#### **4.2.3.1 Gesteinskörnung**

Die in Abschnitt 3.2.2 vorgestellten Materialien natürlicher Rheinsand (SA), ein Brechsand aus Basaltsplitt (S), ein Referenzmaterial aus Kalknatronglaskugeln (G) sowie zwei rezyklierte Brechsande aus Betonbruch (BB) und Mauerwerksbruch (MB) kommen zur Herstellung der Mörtelzusammensetzungen zum Einsatz. Die Materialien werden in ofentrockenem Zustand in Kornfraktionen gesiebt und entsprechend Tab. 3.5 und Tab. 3.6 aus Abschnitt 3.2.2 zu einer AB-Sieblinie und einer BC-Sieblinie zusammengesetzt. Zur morphologischen Charakterisierung werden die Ergebnisse der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Untersuchung mittels CT-Aufnahmen verwendet. Jede der Schüttungen wird anhand des Sets aus  $d_{v50}(LLE)$ ,  $LLE$ ,  $d_{v50}(AT_{3D})$  und  $d_{v90/10}(AT_{3D})$  charakterisiert. Abb. 4.8 zeigt das Ergebnis der morphologischen Charakterisierung im Hinblick auf die Länglichkeit, während Abb. 4.9 das Ergebnis für den Grad der Eckigkeit sowie die Verteilung der Eckigkeitswerte innerhalb der Schüttungen zeigt.

Zusätzlich zur morphologischen Charakterisierung anhand von CT-Aufnahmen erfolgt die Bestimmung der Rohdichte  $\rho_a$  und der Wasseraufnahme  $WA$  nach DIN EN 1097-6 [282], des Fließkoeffizienten  $E_c$  nach DIN EN 933-6 [31] und der Schüttdichte nach DIN EN 1097-3 [216]. Tab. 4.2 fasst die Ergebnisse der Materialcharakterisierung zusammen.

Tab. 4.2: Materialkennwerte für die zehn verwendeten Materialien, in Anlehnung an [208].

<b>Material</b>	<b>Sieblinie</b>	<b>Scheinbare Rohdichte <math>\rho_a</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Wasseraufnahme <math>WA</math> [%]</b>	<b>Schüttdichte <math>\rho_b</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Fließkoeffizient <math>E_c</math> [s]</b>
Rheinsand	AB	2,62	1,28	1,53	29
	BC	2,63	1,71	1,52	28
Basaltsplitt	AB	3,07	1,80	1,46	40
	BC	3,11	2,70	1,47	38
Kalknatronglas	AB	2,49	0,00	1,62	21
	BC	2,49	0,00	1,61	21
Betonbruch	AB	2,67	15,10	1,08	45
	BC	2,67	16,50	1,07	43
Mauerwerksbruch	AB	2,64	13,70	1,17	42
	BC	2,71	13,70	1,22	40

Anhand des wassergesättigten Zustandes kann die Wasseraufnahme unter Berücksichtigung innerer und von außen für Wasser zugängliche Hohlräume bestimmt werden. Für Rheinsand und Glas der Sieblinie AB und BC erfolgt die Bestimmung von Rohdichte  $\rho_a$  und Wasseraufnahme  $WA$  nach DIN EN 1097-6. Für feine Gesteinskörnungen mit Größtkorn kleiner 4 mm stellt die visuelle Festlegung des wassergesättigten, oberflächentrockenen Zustandes der Gesteinskörnungprobe eine subjektive Entscheidung des jeweiligen Laboranten dar. Aus diesem Grund sieht DIN EN 1097-6 das Einfüllen der Probe in einen Kegelstumpfzylinder vor, mit einer anschließenden Bewertung des Zustandes nach Anheben dieser Form. Bei Erreichen eines definierten Bruchbildes des Sandzylinders kann von einem oberflächentrockenen Zustand ausgegangen werden. Auf Brechsande sowohl aus natürlichem als auch rezykliertem Gestein ist dieses Verfahren jedoch nicht anwendbar [283]. Das Bruchbild des Sandzylinders wird in diesen Fällen stark von der gegenüber natürlichem Sand abweichenden Kornform und Eckigkeit der Körner beeinflusst [283, 284]. Daher wird für die Brechsandschüttungen lediglich die Rohdichte  $\rho_a$  nach DIN EN 1097-6 ermittelt, während die Wasseraufnahme  $WA$  über eine Messung des elektrischen Widerstandes bei unterschiedlichen Feuchtegehalten der Probe bestimmt wird. Dieses von Kim et al. [283] und Sosa et al. [284] für rezyklierte Brechsande beschriebene Verfahren, beruht auf der Annahme, dass die Höhe des gemessenen elektrischen Widerstandes von der Menge des Wassers zwischen den Körnern abhängig ist. Sobald kein Wasser auf der Oberfläche von Körnern mehr vorhanden ist, kommt es zu einer signifikanten Zunahme des gemessenen Widerstandes.

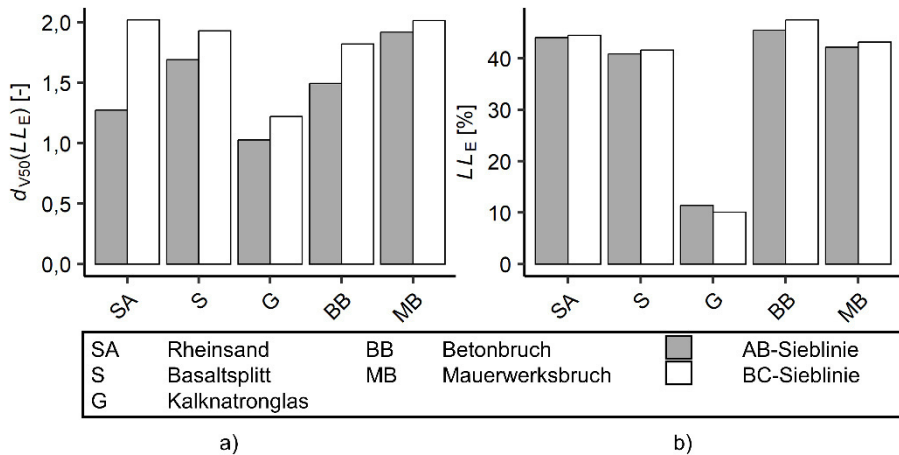


Abb. 4.8: Morphologische Charakterisierung der verwendeten Schüttungen im Hinblick auf a) den Grad der Länglichkeit  $d_{v50}(LL_E)$  und b) den Anteil länglicher Körner  $LL_E$ , in Anlehnung an [208].

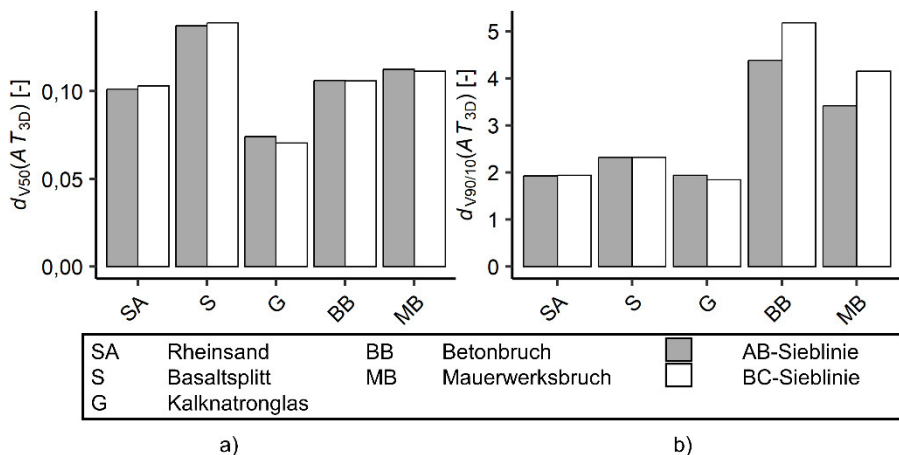


Abb. 4.9: Morphologische Charakterisierung der verwendeten Schüttungen im Hinblick auf a) den Grad der Eckigkeit  $d_{v50}(AT_{3D})$  und b) die Verteilung der Eckigkeit  $d_{v90/10}(AT_{3D})$ , in Anlehnung an [208].

Abb. 4.10 zeigt den verwendeten Versuchsaufbau, bestehend aus einem quaderförmigen Acrylglasgefäß mit einer Seitenlänge von 25 mm x 60 mm, einer Kupferelektrode an jeder Seite sowie einem Stößel zum gleichmäßigen Verdichten der Probe. Die Probe wird 24 Stunden unter Wasser gelagert. Anschließend erfolgt die Trocknung mittels Heizplatte und die schrittweise Entnahme von Teilproben unterschiedlichen Feuchtegehalts. Diese Teilproben werden luftdicht bis zum Erreichen der Raumtemperatur gelagert und anschließend in das Acrylglasgefäß eingebaut. Der Widerstand für jede Probe wird bestimmt und die Masse der Sandprobe gemessen. Nach Rücktrocknung kann der tatsächliche Wassergehalt der Teilprobe angegeben werden.



Abb. 4.10: Bestimmung der Wasseraufnahme  $WA$  von Brechsand mittels Messung des elektrischen Widerstands.

Abb. 4.11 zeigt beispielhaft die Bestimmung der Wasseraufnahme für die Brechsandprobe aus Betonbruch der Sieblinie AB. Hierfür wird der Logarithmus des gemessenen Widerstands gegen den Feuchtegehalt der Teilprobe aufgezeichnet und die Kurve anhand von zwei Geraden angenähert [283]. Die Zuweisung der Messpunkte zu einer Geraden erfolgt mit dem Ziel, zwei Geraden mit maximalem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  zu generieren [284]. Der Schnittpunkt der beiden Geraden markiert die Wasseraufnahme  $WA$  der jeweiligen Brechsandprobe in Prozent.

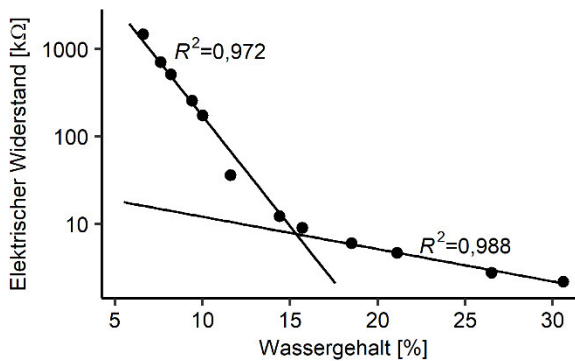


Abb. 4.11: Bestimmung der Wasseraufnahme  $WA$  anhand von zwei Regressionsgeraden nach Bestimmung des elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit vom Wassergehalt.

#### 4.2.3.2 Zement und Kalksteinmehl

Verwendet wird ein Portlandzement CEM I 42,5 R mit einem Blaine-Wert von 3.810  $\text{cm}^2/\text{g}$ , bestimmt nach DIN EN 196-6 [285]. Jeweils bestimmt nach DIN EN 196-3 [286] liegt der Erstarrungsbeginn bei 180 min, während das Erstarrungsende nach 260 min eintritt. Der Wasseranspruch des verwendeten Portlandzements liegt nach DIN EN 196-3 bei Normsteife bei 29,6 %. Die Normfestigkeit beträgt nach DIN EN 196-1 nach 28 Tagen 63,7  $\text{N}/\text{mm}^2$ . Zum Ausgleich der abgesiebten Feinanteile der Gesteinskörnung wird Kalksteinmehl (Calciumcarbonat  $\text{CaCO}_3$ ) zugegeben.

### **4.2.3.3 Mörtel­zusammensetzung**

Der in Abschnitt 4.2.2 vorgestellte Versuchsplan sieht Mörtel­zusammensetzungen mit variierenden Gesteinskörnungen, w/z-Werten, b/gk-Werten sowie Sieblinien vor. Zunächst erfolgt die Festlegung des Gesteinskörnungsanteils auf 1.700 g. Ausgehend davon kann eine ausreichende Mörtel­masse zur Durchführung aller Frisch- und Festmörtel­untersuchungen bereitgestellt werden, während gleichzeitig die maximale Kapazität des verwendeten Mörtelmischers nicht überschritten wird. Der Gesteinskörnungsanteil setzt sich aus der ofentrockenen Gesteinskörnung, des zusätzlich erforderlichen Wassers zur Abdeckung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung sowie des Kalksteinmehls zusammen. Der Kalksteinmehlanteil an der Gesamt­masse der Gesteinskörnung beträgt 12,5 %. Da Körner kleiner 125  $\mu\text{m}$  mittels Siebung aus den verwendeten Sanden entfernt werden, kommt es bei der Herstellung von Mörtel zur Entmischung und Absonderung von Wasser auf der Mörtel­oberfläche. Der im Rahmen von Voruntersuchungen festgelegte Anteil an Kalksteinmehl minimiert diese Entmischung.

Bei der in Tab. 4.2 gelisteten Wasseraufnahme *WA* handelt es sich um das Wasseraufnahme­vermögen der Gesteinskörnung innerhalb von 24 Stunden. Untersuchungen zeigen jedoch, dass eine Zugabe von Zusatzwasser zum Ausgleich der Wasseraufnahme nach 24 Stunden nicht zu einem vollständigen Aufsaugen dieses Wassers durch die Gesteinskörnung führt [264, 287, 288]. Stattdessen kann eine weichere Konsistenz des Frischmörtels beobachtet werden, weswegen von einer Aufnahme von Teilen dieses zusätzlichen Wassers in den Bindemittelleim ausgegangen werden kann [264]. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Untersuchung Zusatzwasser in Höhe der Wasseraufnahme nach 24 Stunden abgemindert durch den Faktor 0,8 zugegeben [263, 289].

Basierend auf der Vorgabe des w/z-Wertes sowie des b/gk-Wertes wird die Zement­masse sowie die Wassermasse bestimmt. Die verwendeten Mörtel­zusammensetzungen können Anhang E, Tab. E.1 entnommen werden.

## **4.2.4 Versuchsablauf und statistische Methoden**

### **4.2.4.1 Bestimmung von Frischmörtel­eigenschaften**

Die Herstellung des Mörtels sowie die Bestimmung der Frischmörtel­eigenschaften erfolgen im kontrollierten Laborklima bei einer Temperatur von  $20 \pm 2$  °C sowie einem relativen Luftfeuchtegehalt von  $65 \pm 5$  %. Die Mörtelbestandteile Gesteinskörnung, Zement, Kalksteinmehl und Wasser werden für mindestens 24 Stunden bei diesem Laborklima gelagert. Die Herstellung des Frischmörtels orientiert sich an dem Verfahren nach DIN EN 196-1 [265] und ist in Abb. 4.12 schematisch dargestellt. Im Unterschied zum Standardverfahren der Mörtel­herstellung erfolgt eine Ruhephase von 10 Minuten vor der Zugabe des Zementes, während der die ofentrockene Gesteinskörnung Wasser aufnehmen kann. Zur Mörtel­herstellung wird ein Mörtelmischer (SEGER) entsprechend der Vorgaben der DIN EN 196-1 verwendet, welcher auf Stufe 1 mit  $62 \pm 5$  U/min und auf Stufe 2 mit  $125 \pm 10$  U/min rührt.



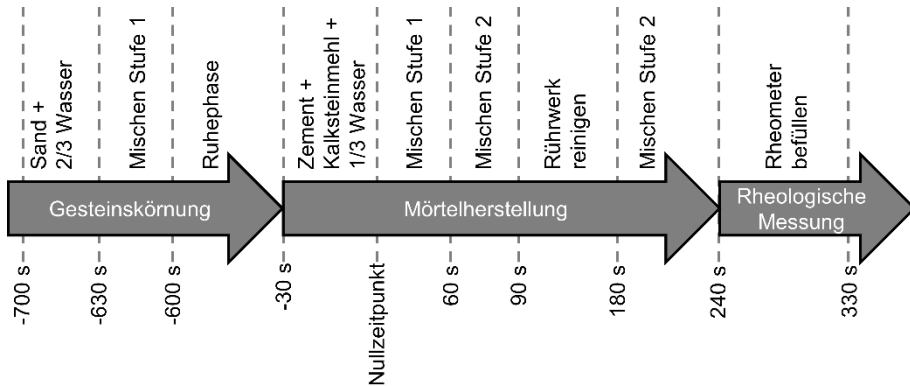


Abb. 4.12: Zeitlicher Ablauf der Mörtelherstellung.

Nach Herstellung des Frischmörtels wird dieser innerhalb von 90 s in den Messtopf des Rheometers bis knapp über die Markierung eingefüllt. Die Bestimmung der rheologischen Kennwerte erfolgt für alle hergestellten Mörtelzusammensetzungen 90 s nach Mischende. Abb. 4.13 zeigt das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Rheometer Viskomat NT [250] (Schleibinger Geräte Teubert und Greim GmbH) sowie den verwendeten Messtopf, bestehend aus einem zylinderförmigen Probenbehälter und einem Mörtelpaddel. Die verwendete Messgeometrie ist für Mörtel mit einem Größtkorn von maximal 2 mm geeignet. Es wird ein Mörtelpaddel mit Fischgrätenform verwendet, da diese Formgebung der Entmischung der Mörtelprobe entgegenwirkt [224, 250]. Während des Messvorgangs wird die Temperatur der Mörtelprobe kontinuierlich mittels der integrierten Temperaturmesssonde gemessen. Das Rheometer arbeitet nach der Couette-Methode, bei der sich der Probenbehälter während der Versuchsdurchführung dreht und das Mörtelpaddel statisch bleibt [290].

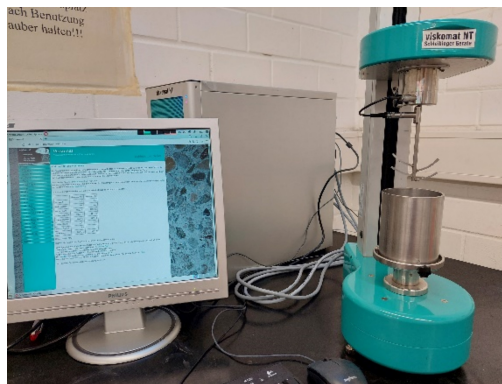


Abb. 4.13: Rheometer Viskomat NT (Schleibinger Geräte Teubert und Greim GmbH) mit Messtopf und Mörtelpaddel in Fischgrätenform mit integrierter Temperaturmesssonde.

Im Rahmen dieser Arbeit werden sogenannte CR-Versuche durchgeführt, bei denen die Drehzahl  $N$  des Probenbehälters vorgegeben wird und das resultierende Drehmoment  $T$  des Mörtelpaddels gemessen wird [232]. Abb. 4.14 zeigt das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Messprofil. Zur Sicherstellung vergleichbarer Messbedingungen erfolgt die Bestimmung der Fließkurve nach Eintreten des vollständigen Strukturbruchs

[241]. Der in Abschnitt 4.1.2.1 beschriebene Strukturbruch von Mörtel setzt hierbei bereits während des Mischvorgangs im Mörtelmischer ein. Es wird davon ausgegangen, dass der Strukturbruch nach Ende der Mörtelmischphase noch nicht vollständig abgeschlossen ist [241, 247]. Nach dem Einfüllen der Mörtelprobe in den Probebehälter erfolgt zunächst eine Steigerung der Drehzahl in fünf Stufen auf einen Wert von 50 U/min. Daran schließt sich eine Vorscherphase von 20 s an, damit sich der Strukturbruch vollständig ausbilden kann. Für die anschließende Messphase wird die Drehzahl in fünf Stufen auf den Wert von 10 U/min abgesenkt. Auf jeder Stufe erfolgt die Scherung der Probe für eine Dauer von 15 s.



Abb. 4.14: Messprofil mit Vorscherphase und Nummerierung der Stufen der Messphase.

Es besteht eine Korrelation zwischen der Drehzahl  $N$  und der Scherrate  $\dot{\gamma}$  sowie zwischen dem Drehmoment  $T$  und der Schubspannung  $\tau$ , woraus die Relativmesswerte  $\tau_{0,rel}$  und  $\eta_{rel}$  für die Fließgrenze  $\tau_0$  und die dynamische Viskosität  $\eta$  abgeleitet werden können [250]. Abb. 4.15 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer rheologischen Untersuchung an Mörtel mit einer Glasschüttung. Für jede der fünf Abwärtsstufen des Messprofils wird der Median der Messwerte für  $N$  und  $T$  gebildet. Die Messwerte der ersten 7 s sowie der letzten 2 s einer Messstufe bleiben bei der Bildung dieses Medianwertes unberücksichtigt, da die Messwerte von Beginn und Ende einer Messstufe durch Ungenauigkeiten aus der Veränderung der Drehzahl geprägt sein können. Das Bingham-Modell wird mittels linearer Regression an die ermittelten fünf Messwertpaare angepasst. Anhand der Steigung der Fließkurve wird die relativ gemessene dynamische Viskosität  $\eta_{rel}$  ermittelt. Die relativ gemessene Fließgrenze  $\tau_{0,rel}$  wird unter der Annahme, dass das rheologische Verhalten von Mörtel dem Bingham-Modell folgt, mittels Extrapolation der gemessenen Daten bestimmt.

Im Anschluss an die rheologische Charakterisierung des Frischmörtels erfolgt die Bestimmung des Ausbreitmaßes nach DIN EN 1015-3 [291] sowie die Bestimmung von Setzmaß und Setzfließmaß in Anlehnung an DIN EN 12350-2 [253] und DIN EN 12350-8 [292]. Im Unterschied zur Bestimmung des Setzmaßes sowie Setzfließmaßes von Beton nach DIN EN 12350-2 und DIN EN 12350-8 wird der kleinformatige Setzkegel nach DIN 1015-3 für die Prüfung des Frischmörtels verwendet. Zur Kontrolle gleichbleibender Mörtelqualität wird zusätzlich die Frischmörtelrohichte durch Füllen und Wiegen eines Gefäßes mit bekanntem Volumen bestimmt. Die Prüfergebnisse der

Frischmörteluntersuchungen können Anhang F, Tab. F.1 bis Tab. F.4 entnommen werden.

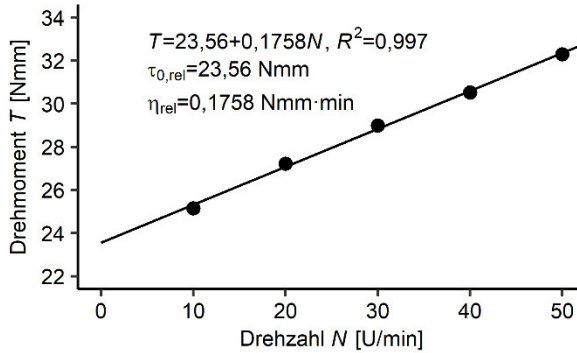


Abb. 4.15: Bestimmung der Fließgrenze  $\tau_{0,rel}$  und der dynamischen Viskosität  $\eta_{rel}$  mittels linearer Regression für das Beispiel einer Mörtelzusammensetzung aus Glas mit einer Sieblinie BC, einem w/z-Wert von 0,45 und einem b/gk-Wert von 0,95.

#### 4.2.4.2 Bestimmung von Festmörtel Eigenschaften

Der Frischmörtel wird in eine Form zur Herstellung von drei Mörtelprismen mit den Abmessungen 160 mm x 40 mm x 40 mm eingefüllt. Abweichend von den Vorgaben der DIN EN 196-1 erfolgt die Verdichtung manuell durch Aufwärts- und Abwärtsbewegungen mit einem Spatel, um eine einheitliche Verdichtung aller Mörtelzusammensetzungen sicherzustellen. Nach Ausschalen der Probekörper können keine auffälligen Hohlräume oder Fehlstellen beobachtet werden. Die Probekörper werden mit einer Acrylglascheibe abgedeckt und für einen Tag, bis zum Ausschalen, in einer Klimatrube bei  $20 \pm 2$  °C und einer Luftfeuchtigkeit von mindesten 90 % gelagert. Nach dem Ausschalen lagern die Probekörper bis zum Zeitpunkt der Festmörtelprüfungen bei einer Temperatur von  $20 \pm 2$  °C im Wasserbad.

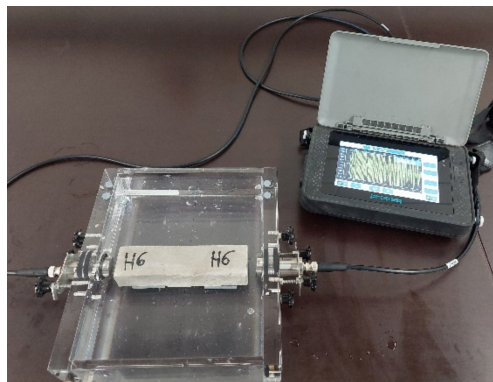


Abb. 4.16: Bestimmung des dynamischen E-Moduls mit dem PUNDIT PL-200/PE (proceq).

Nach 28 Tagen erfolgt zuerst die Prüfung des dynamischen E-Moduls mit dem PUNDIT PL-200/PE (proceq), siehe Abb. 4.16. Zur Bestimmung des dynamischen E-Moduls wird das Mörtelprisma in ein Wasserbad zwischen einem Sende- und einem Empfänger­messkopf platziert. Vom Sendemesskopf ausgehend, durchqueren Ultraschallwellen das Prisma, deren Laufzeit vom Sender zum Empfänger gemessen wird [274]. Im Rahmen dieser Untersuchung werden Ultraschallwellen mit einer Frequenz von 80 kHz verwendet. Das Messprinzip beruht darauf, dass die Ultraschallwellen Teilchen des Prismas in geringem Maße anregen, wodurch Dehnungen im Probekörper entstehen, die die Laufzeit der Ultraschallwelle beeinflussen [293]. Über diesen Einfluss kann in Form des dynamischen E-Moduls ein Rückschluss auf das elastische Verhalten des Probekörpers gezogen werden. Der dynamische E-Modul wird im Rahmen dieser Untersuchung, in Anlehnung an den zur Bestimmung der inneren Schädigung bei Frost-Tau-Beanspruchung geeigneten Versuchsaufbau, bestimmt [294]. Hierfür wird das Prisma direkt nach der 28-tägigen Wasserlagerung in ein Wasserbad gelegt, sodass die Bestimmung an wassergesättigten Proben erfolgt [294]. Zwischen den Messköpfen und dem Prisma besteht ein Abstand von 10 mm. Der Wasserstand des Prüfbeckens wird konstant für jede Messung auf 10 mm unterhalb der Prüf­beckenoberkante eingestellt. Nach BAW-Merkblatt „Frostprüfungen für Beton“ [294] erfolgt die Bestimmung der Durchschallungszeit  $t_w$  des Wasseranteils anhand von Gleichung (4.8).

$$t_w = \frac{l_w}{v_w} \quad (4.8)$$

mit:  $t_w$  Durchschallungszeit einer Ultraschallwelle im Wasser [s]

$l_w$  Durchschallungsstrecke im Wasser [m]

$v_w$  Durchschallungsgeschwindigkeit einer Ultraschallwelle in Wasser (1.490 m/s bei  $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) [m/s]

Daraus ergibt sich die Durchschallungszeit  $t_m$  des Mörtelprismas nach Gleichung (4.9).

$$t_m = t_{\text{ges}} - t_w \quad (4.9)$$

mit:  $t_m$  Durchschallungszeit einer Ultraschallwelle im Mörtelprisma [s]

$t_{\text{ges}}$  Gesamte gemessene Durchschallungszeit [s]

$t_w$  Durchschallungszeit einer Ultraschallwelle im Wasser [s]

Der dynamische E-Modul  $E_{\text{dyn}}$  wird nach Gleichung (4.10), entsprechend den Vorgaben des Hefts 422 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) [274], bestimmt. Da die Mörtelprismen hiernach nicht als besonders schmal gelten, wird für  $C_L$  der Wert 0,9 zur Berücksichtigung der Querdehnungs­behinderung verwendet. Vorteil der Prüfung des dynamischen E-Moduls gegenüber des statischen E-Moduls ist die schnelle und zerstörungsfreie Durchführung dieses Versuchs sowie der verringerte messtechnische Aufwand [274, 293].

$$E_{\text{dyn}} = \frac{1}{t_m^2} \cdot l_m^2 \cdot \rho_R \cdot C_L \quad (4.10)$$

mit:	$E_{\text{dyn}}$	Dynamischer E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
	$t_m$	Durchschallungszeit einer Ultraschallwelle im Mörtelprisma [s]
	$l_m$	Durchschallungsstrecke im Mörtelprisma [m]
	$\rho_R$	Festmörtelroh­dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
	$C_L$	Korrekturfaktor [-]

Nach der Bestimmung des dynamischen E-Moduls wird jeder Probekörper vermessen und gewogen, um die Festmörtelroh­dichte  $\rho_R$  zu berechnen. Anschließend erfolgt die Bestimmung von Biegezug- und Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1, siehe Abb. 4.17. Die Biegezug- und Druckfestigkeit wird mit der kombinierten Druck- und Biegezugprüfmaschine ZK 300-15 (TESTING Bluhm & Feuerherdt GmbH), der 5.000 kN Druckprüfmaschine (FORM + TEST SEIDNER) und der Biegezugprüfmaschine Z050 (Zwick) ermittelt. Die Ergebnisse der Festmörtel­untersuchungen können Anhang F entnommen werden.



Abb. 4.17: Bestimmung von Biegezug- und Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1 mit der kombinierten Druck- und Biegezugprüfmaschine ZK 300-15 (TESTING Bluhm & Feuerherdt GmbH).

#### **4.2.4.3 Statistische Methoden**

Ziel der Auswertung ist die Analyse des Einflusses morphologischer Eigenschaften der Gesteinskörnung auf das Verhalten von Mörtel im frischen und festen Zustand. Zunächst erfolgt die Überprüfung der gewonnenen Messdaten auf Ausreißer und fehlerhafte Messwerte. Anschließend wird der Einfluss der morphologischen Charakteristika der Gesteinskörnung auf die Mörtel­eigenschaften mit Hilfe einer multiplen linearen Regressionsanalyse untersucht.

Für die Überprüfung der Messwerte der Frisch- und Festmörtel Eigenschaften auf fehlerhafte Messwerte wird ein Streudiagramm erstellt, welches das jeweilige Versuchsergebnis über den Zeitraum der Versuchsdurchführung abbildet. Sind Ausreißer zu erkennen, wird versucht, die Ursache für die Abweichung des Messwerts zu ermitteln und diesen zu korrigieren. Ist keine Ursache feststellbar, obwohl es sich bei dem Messwert um einen erkennbaren Ausreißer handelt, wird dieser von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen. Dies betrifft für das Ausbreitmaß, die dynamische Viskosität und die Fließgrenze jeweils zwei Messwerte sowie für die Druckfestigkeit einen Messwert.

Anhand des Streudiagramms können auch systematische Veränderungen der Versuchsergebnisse über den Untersuchungszeitraum identifiziert werden. Abb. 4.18 a) zeigt dieses Streudiagramm für die Versuchsergebnisse des Ausbreitmaßes. Erkennbar ist, dass sich die Datenpunkte in zwei Gruppen aufteilen lassen, was auf die unterschiedlichen w/z-Werte und b/gk-Werte zurückzuführen ist. Über den zeitlichen Verlauf ist jedoch keine systematische Erhöhung oder Absenkung der Messwerte erkennbar. Vergleichbare Beobachtungen können für die übrigen Frischmörtel Eigenschaften Setzmaß, Setzfließmaß, dynamische Viskosität und Fließgrenze gemacht werden.

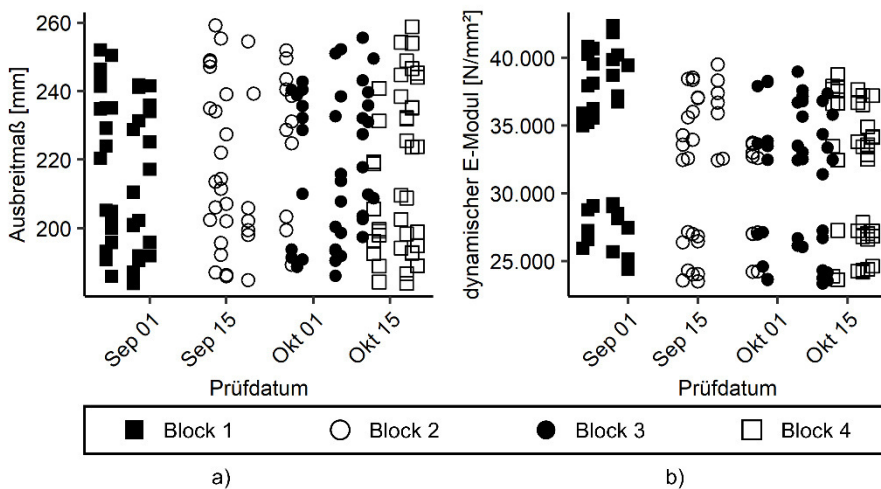


Abb. 4.18: Streudiagramm der Versuchsergebnisse über den Untersuchungszeitraum für a) Ausbreitmaß und b) dynamischer E-Modul.

Im Gegensatz dazu zeigt Abb. 4.18 b) das Streudiagramm des dynamischen E-Moduls. Hier ist ein Unterschied zwischen den ersten 40 Versuchsergebnissen und den verbliebenen Versuchsergebnissen erkennbar. Die Messwerte des dynamischen E-Moduls des ersten Blocks liegt dabei vergleichsweise höher als die Messwerte des zweiten bis vierten Blocks. Eine Ursache für die Abweichung der Messergebnisse zwischen den Versuchen des ersten Blocks und den drei weiteren Blöcken, kann nicht abschließend festgestellt werden. In Frage kommt möglicherweise eine erneute Kalibrierung des Ultraschallmessgeräts. Daher werden die 40 Versuchsergebnisse des ersten Blocks aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Da insgesamt vier Replikationen für jede Mörtelzusammensetzung hergestellt werden, verbleiben drei dieser

Versuchsergebnisse für die weitere Auswertung. Ähnliches kann für die Versuchsergebnisse des vierten Blocks der Druckfestigkeit beobachtet werden. Eine mögliche Ursache hierfür kann nicht eindeutig identifiziert werden. Die folgende Auswertung der Versuchsergebnisse beruht jedoch ausschließlich auf den Datensätzen der Blöcke eins bis drei.

Der Einfluss morphologischer Charakteristika auf die Frisch- und Festmörtel Eigenschaften wird mit Hilfe einer multiplen linearen Regression untersucht. Die folgenden unabhängigen Variablen werden im Rahmen dieser Regressionsanalyse berücksichtigt:

1. w/z-Wert (kategorisch 0,45 oder 0,55)
2. b/gk-Wert (kategorisch 0,95 oder 1,05)
3. Sieblinie (kategorisch AB oder BC)
4.  $d_{V50}(LL_E)$  (kontinuierlich)
5.  $LL_E$  (kontinuierlich)
6.  $d_{V50}(AT_{3D})$  (kontinuierlich)
7.  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  (kontinuierlich)
8. (Materialursprung) (kategorisch NA oder RZ)

Die Materialart der Gesteinskörnung wird nicht als unabhängige Variable in die Regressionsanalyse aufgenommen, da diese Informationen über die Kornform beinhaltet und damit kollinear zu den morphologischen Charakteristika der Gesteinskörnung sein würden. Allerdings zeigt sich im Rahmen der Regressionsanalyse für die Festmörtel Eigenschaften, dass durch Entfallen der Variable Materialart die einbezogenen unabhängigen Variablen nicht ausreichen, um Veränderungen der abhängigen Variable zu erklären. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Ergebnissen für Mörtelprismen mit natürlicher und solchen mit rezyklierter Gesteinskörnung, die nicht auf die morphologischen Eigenschaften dieser Schüttungen zurückgeführt werden können. Eine mögliche Ursache hierfür könnte in der unterschiedlichen Kornfestigkeit der Körner dieser Schüttungen liegen oder in teilweise vorhandenen Anlagerungen unhydratisierten Zementes, welcher dem Ursprungsmaterial entstammt. Anders als die morphologischen Charakteristika der Gesteinskörnung werden diese Materialeigenschaften jedoch nicht im Rahmen dieser Untersuchung bestimmt. Aus diesem Grund wird in die Regressionsanalyse die zusätzliche unabhängige Variable Materialursprung aufgenommen, die auf den zwei Stufen NA für Gesteinskörnungen natürlichen Ursprungs und RZ für Gesteinskörnungen rezyklierten Ursprungs definiert ist. Die Sand-, Glas- und Splittschüttungen werden damit der Kategorie NA zugeordnet, während die Betonbruch- sowie Mauerwerksbruchschüttungen in die Kategorie RZ eingeordnet werden. Die kategoriale Variable Materialursprung berücksichtigt damit Unterschiede in der Kornfestigkeit und mineralogischen Zusammensetzung zwischen natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungsschüttungen.

Für jede der abhängigen Variablen Setzmaß, Setzfließmaß, Ausbreitmaß, dynamische Viskosität, Fließgrenze, dynamischer E-Modul, Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit wird die multiple lineare Regressionsanalyse separat durchgeführt. Neben Haupteffekten sollen Interaktionseffekte zweiten Grades analysiert werden. Bei Berücksichtigung aller Hauptterme sowie aller möglichen Kombinationen zwischen zwei der unabhängigen Variablen als Interaktion würden 135 bzw. 264 Terme in die Regressionsanalyse

einfließen. Dies führt mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit zu einer Überbestimmung [210]. Daher ist eine Reduktion der Regressionsterme sinnvoll. Gängige Praxis ist es, Interaktionsterme aufgrund von Vorwissen von der Regressionsanalyse auszuschließen [209]. Im vorliegenden Fall werden daher nur Interaktionsterme zwischen einer der vier morphologischen Charakteristika und den kategorialen Variablen w/z-Wert, b/gk-Wert und Sieblinie berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass die übrigen möglichen Interaktionen keinen signifikanten Erklärungsbeitrag liefern. Damit verbleiben für die Frischmörtel Eigenschaften 19 Terme (7 Haupteffekte und 12 Interaktionsterme) sowie für die Festmörtel Eigenschaften 20 Terme (8 Haupteffekte und 12 Interaktionsterme). Im Vergleich zu der erhobenen Anzahl an Datensätzen stellt dies immer noch eine große Anzahl an Regressionstermen dar.

Zur Variablenreduktion bei multiplen linearen Regressionsanalysen existieren verschiedene Verfahren. Zu nennen sind hier zum Beispiel schrittweise Verfahren [210]. Basierend auf dem Ergebnis der Regressionsanalyse bei Verwendung eines bestimmten Teils der möglichen Regressionsterme werden dabei entweder weitere Terme ins Modell aufgenommen oder aus dem Modell entfernt. Hierbei kommt es allerdings zu Mehrfachtestungen, was zu einer Überschätzung des Bestimmtheitsmaß  $R^2$  oder einer Unterschätzung der Breite von Konfidenzintervallen führt [210]. Hier wird daher eine Regression der besten Teilmengen durchgeführt, wobei für jede mögliche Kombination aus Haupt- und Interaktionstermen eine multiple Regressionsanalyse durchgeführt wird. Es werden Kombinationen ausgeschlossen, die zwar einen Interaktionsterm enthalten, jedoch nicht die zugehörigen Hauptterme [210]. Damit ergeben sich im Fall der Frischmörtel Eigenschaften 8.694 Kombinationen und im Fall der Festmörtel Eigenschaften 17.389 Kombinationen. Nach Bestimmung dieser Regressionsmodelle wird das beste Modell anhand des minimalen Bayesschen Informationskriteriums (BIC) ausgewählt [295]. Für dieses Regressionsmodell werden anschließend die Annahmen, erläutert in den Abschnitten 2.2.1.5 und 2.3.4, überprüft. Im Fall der Verletzung erfolgt die Transformation der abhängigen oder unabhängigen Variablen. Teilweise liegt eine leichte Abweichung von den Anforderungen an die Autokorrelation, überprüft mittels Durbin-Watson Test vor, die jedoch als nicht gravierend eingestuft wird.

### **4.2.5 Ergebnisse und Diskussion**

#### **4.2.5.1 Einfluss morphologischer Eigenschaften auf die dynamische Viskosität**

Zunächst erfolgt die Betrachtung der Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse zwischen den abhängigen Variablen sowie der logarithmierten dynamischen Viskosität. Diese Regressionsanalyse ist mit  $F(6,150)=164,5$  und  $p<0,05$  bei einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2=0,868$  statistisch signifikant. Das Ergebnis der Regressionsanalyse kann Tab. 4.3 entnommen werden. Es zeigt sich, dass sowohl die Länglichkeit der Körner als auch deren Eckigkeit Einfluss auf das Messergebnis der dynamischen Viskosität haben. Die Werte in Klammern hinter den kategorialen Variablen geben die sogenannte Dummycodierung an. So gibt die Bezeichnung „w/z-Wert (0,55)“ zum Beispiel an, dass im Rahmen der Regressionsanalyse der w/z-Wert von 0,55 zu eins gesetzt wird, während der w/z-Wert von 0,45 das Level null zugewiesen bekommt.



Tab. 4.3: Regressionsergebnis für die logarithmierte abhängige Variable dynamische Viskosität, in Anlehnung an [208].

Variable	Regressionskoeffizient	Standardfehler	p-Wert
Achsenabschnitt	-1,493	0,074	0,000
w/z-Wert (0,55)	-1,474	0,099	0,000
$LL_E$	-0,004	0,001	0,005
$d_{V50}(AT_{3D})$	-0,830	0,824	0,316
w/z-Wert (0,55) : $d_{V50}(AT_{3D})$	5,357	0,904	0,000
$d_{V90/10}(AT_{3D})$	-0,071	0,013	0,000
w/z-Wert (0,55) : $d_{V90/10}(AT_{3D})$	0,125	0,016	0,000

Es kann ein statistisch signifikanter Einfluss des Anteils länglicher Körner  $LL_E$  auf die dynamische Viskosität festgestellt werden, wobei der Grad der Länglichkeit  $d_{V50}(LL_E)$  keinen Einfluss zu haben scheint. Mit zunehmendem Anteil an länglichen Körnern zeigt sich eine Abnahme der dynamischen Viskosität und damit des Widerstandes gegen Scherung, siehe Abb. 4.19.

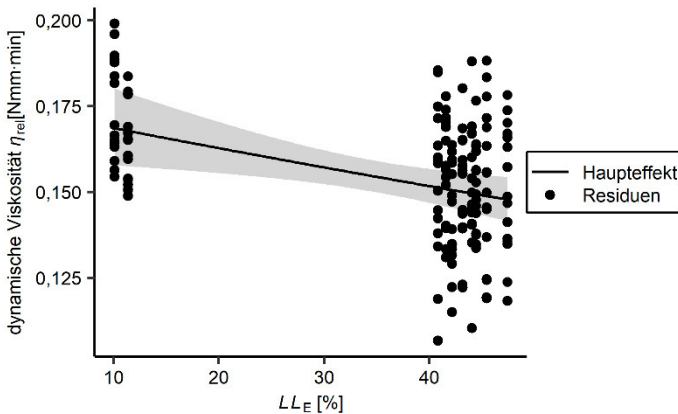


Abb. 4.19: Einfluss des Anteils länglicher Körner  $LL_E$  auf die dynamische Viskosität mit grau hinterlegtem Konfidenzintervall sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen), in Anlehnung an [208].

Dies widerspricht den Untersuchungsergebnissen der Studien von Westerholm et al. [20] und Aissoun et al. [24], die eine Zunahme der dynamischen Viskosität mit zunehmendem Anteil an länglichen Körnern beobachten. Begründet wird dies mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit der Kollision zwischen Körnern, deren Form deutlich von der einer Kugel abweicht. In diesem Fall steigt die spezifische Oberfläche gegenüber kugelförmigen Körnern, was zu einem erhöhten Bindemittelleimanspruch führt [226]. Die durchschnittliche Schichtdicke des Bindemittelleims ist damit kleiner als bei kugel-

förmigen Körnern [226]. Im Rahmen der Studie von Westerholm et al. [20] wird allerdings nicht eindeutig zwischen Kornform und Eckigkeit unterschieden, sodass die Zunahme der dynamischen Viskosität auch auf den Einfluss der Eckigkeit zurückgeführt werden könnte. Im Rahmen einer Studie von Zhao et al. [28] kann jedoch analog zu Abb. 4.19 eine Abnahme der dynamischen Viskosität bei erhöhten Anteilen länglicher Körner beobachtet werden. Als mögliche Ursache kommt die Ausrichtung der Körner entlang ihrer Längsachse in Frage. Richten sich die Körner innerhalb der Probe in Richtung der Rührbewegung aus, kann es zu einer Abnahme der dynamischen Viskosität gegenüber kugeligem Körnern kommen. Die Ergebnisse der hier vorgestellten Untersuchung legen nahe, dass der Effekt ausgerichteter Körner dominanter als der einer abnehmenden Bindemittelschichtdicke sein könnte.

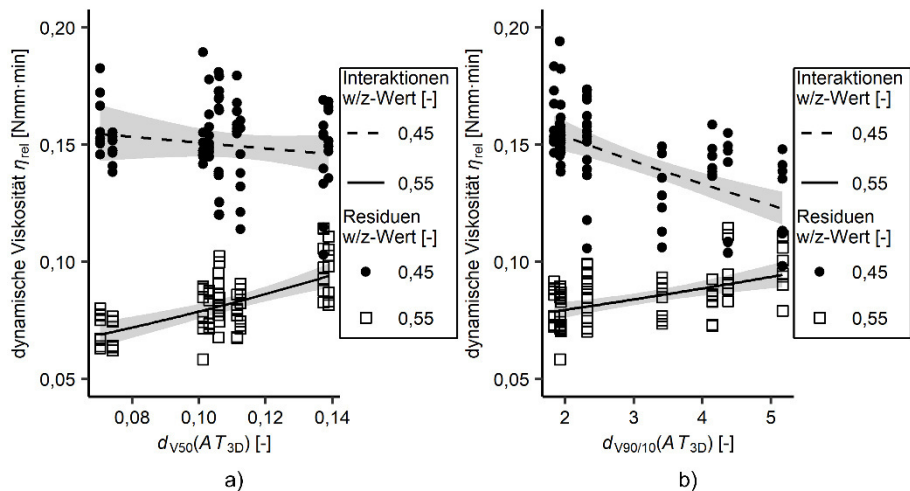


Abb. 4.20: Einfluss der Eckigkeit auf die dynamische Viskosität mit grau hinterlegtem Konfidenzintervall sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von  $d_{v50}(AT_{3D})$  in Abhängigkeit vom w/z-Wert und b) Einfluss von  $d_{v90/10}(AT_{3D})$  in Abhängigkeit vom w/z-Wert, in Anlehnung an [208].

Im Hinblick auf die Eckigkeit zeigt sich ein Einfluss auf die dynamische Viskosität in Abhängigkeit vom w/z-Wert. Diese Beobachtung zeigt die Bedeutung von Interaktionseffekten im Hinblick auf Einflussmechanismen von morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung auf Mörtel Eigenschaften. Im Fall der dynamischen Viskosität bewirkt die Eckigkeit der Gesteinskörnung einen gegenläufigen Einfluss in Abhängigkeit vom w/z-Wert des Mörtels. Mit zunehmendem Wert sowohl für  $d_{v50}(AT_{3D})$  als auch  $d_{v90/10}(AT_{3D})$  zeigt sich bei niedrigem w/z-Wert eine Abnahme und bei hohem w/z-Wert eine Zunahme der dynamischen Viskosität, siehe Abb. 4.20. Für  $d_{v50}(AT_{3D})$  ist die Zunahme der dynamischen Viskosität bei hohem w/z-Wert ausgeprägter als der der Abnahme bei niedrigem w/z-Wert, siehe Abb. 4.20 a). Die Zunahme der dynamischen Viskosität bei Anstieg der Eckigkeit von Körnern kann im Rahmen anderer Studien ebenfalls beobachtet werden [21, 24, 168, 256].

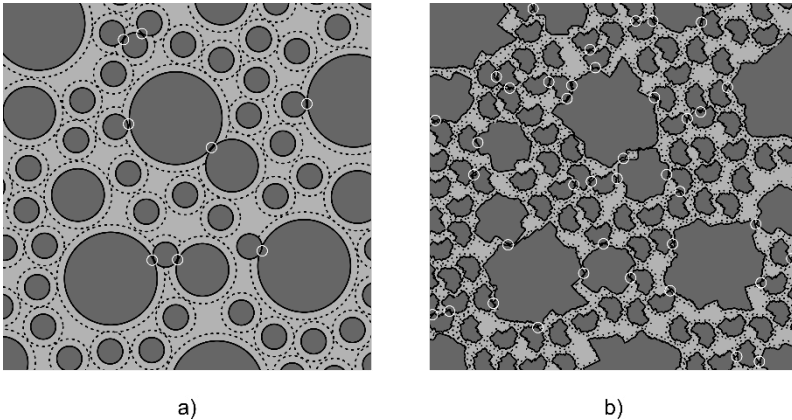


Abb. 4.21: Beispielhafte Darstellung der Bindemittelschicht, welche die Körner umhüllt, mit weiß markierten Kontaktpunkten zwischen Körnern bei gleichbleibender Bindemittel­masse für a) kugelförmige Körner und b) eckigke Körner.

Mehrere Ursachen tragen möglicherweise hierzu bei. Zum einen ist die spezifische Oberfläche von eckigen Körnern größer als die von runden, was zu einem erhöhten Bindemittelsanspruch führt [226]. Dadurch sinkt bei gleichbleibender Bindemittel­masse innerhalb des Mörtels die durchschnittliche Bindemittelschicht­dicke, die ein Korn umhüllt. Als Resultat steigt die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen zwischen Körnern [21, 24, 168]. Abb. 4.21 veranschaulicht diesen Effekt.

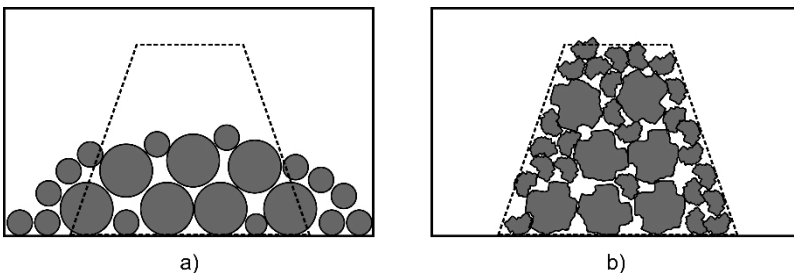


Abb. 4.22: Exemplarisches Bruchbild nach Füllen und Abheben einer Kegelstumpfform in Ab­hängigkeit von der Kornform der verwendeten Körner mit a) kugelförmigen Körnern und b) eckigen Körnern.

Zum anderen ist eine vermehrte Verzahnung von Körnern bei steigender Eckigkeit möglich [21]. Abb. 4.22 zeigt diesen Effekt anhand eines Beispiels, bei dem ein Kegel­stumpf entweder mit kugelförmigen oder eckigen Körnern gefüllt und angehoben wird. Das resultierende Bruchbild hängt dabei von der Verzahnung der verwendeten Körner ab. Für Mörtelzusammensetzungen mit niedrigem  $w/z$ -Wert, bei denen der Bindemittel­eim eine steifere Konsistenz aufweist, kann dieses Phänomen nicht beobachtet werden. Mit zunehmender Eckigkeit der Körner  $d_{V50}(AT_{3D})$  zeigt sich eine moderate Abnahme der dynamischen Viskosität. Mögliche Ursache hierfür könnte sein, dass der steife Bindemittelschicht mit seinem hohen Widerstand gegen Scherung die dynamische Viskosität der gesamten Mörtelmischung steuert. Daher kommt es weniger zu Kollisi-

onen oder Verzahnungen zwischen Körnern. Möglicherweise geht die leichte Absenkung der dynamischen Viskosität bei steigendem  $d_{V50}(AT_{3D})$  darauf zurück, dass bei zunehmender Eckigkeit und gleichbleibender Bindemittelmasse die Bindemittelschichtdicke zwischen den Körnern sinkt. Damit reduziert sich der Einfluss des Bindemittels auf die dynamische Viskosität, was zu der leichten Abnahme führt.

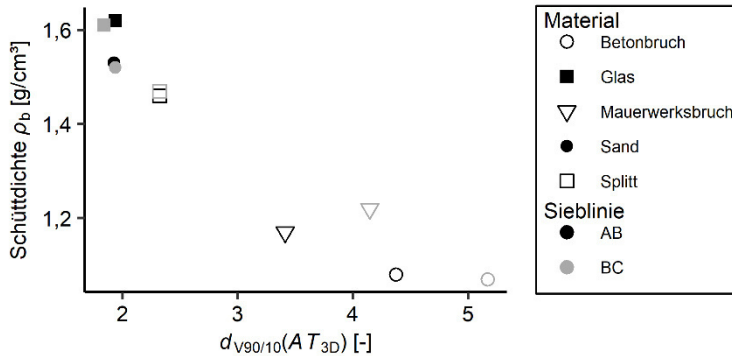


Abb. 4.23: Zusammenhang zwischen der Schüttdichte  $\rho_b$  als Maß der Packungsdichte und der Verteilung der Eckigkeit  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  innerhalb einer Schüttung für die zehn verwendeten Gesteinskörnungen.

Für Mörtelzusammensetzungen mit hohem w/z-Wert zeigt sich zudem eine Zunahme der dynamischen Viskosität bei steigendem  $d_{V90/10}(AT_{3D})$ , siehe Abb. 4.20 b). Die zunehmende dynamische Viskosität könnte auf den Aufweitungseffekt zurückzuführen zu sein. Wie in Abschnitt 4.1.1.1 beschrieben, bewirkt der Aufweitungseffekt eine Abnahme der Packungsdichte der Gesteinskörnung. Mit zunehmender Variabilität zwischen den Eckigkeitswerten der Körner könnte dieser Effekt, insbesondere aufgrund der zunehmenden Verzahnung und damit abnehmenden Mobilität von Körnern, zunehmen. Weicht die Kornform von der einer runden Kugel ab, kann eine Abnahme der Packungsdichte in verschiedenen Studien beobachtet werden [199, 221, 222]. Abb. 4.23 zeigt den Zusammenhang zwischen der Schüttdichte  $\rho_b$  als Maß für die Packungsdichte und  $d_{V90/10}(AT_{3D})$ . Hier zeigt sich, dass mit zunehmendem Wert von  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  die Packungsdichte abnimmt, was auf den Aufweitungseffekt zurückzuführen sein kann. Die zusätzlich entstehenden Hohlräume werden mit dem zur Verfügung stehenden Bindemittelleim gefüllt, was zu einer Reduktion der Bindemittelschichtdicke führt. Dies wiederum kann die erhöhte dynamische Viskosität bei steigendem  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  erklären. Für Mörtelzusammensetzungen mit niedrigem w/z-Wert stellt sich ein gegenteiliger Effekt ein. Dies könnte ebenfalls auf den bereits beschriebenen Effekt des Bindemittels mit hohem Widerstand gegen Scherung auf die gesamte Mörtelzusammensetzung zurückgehen. Kommt es aufgrund des Aufweitungseffektes zu einem erhöhten Hohlraumgehalt, werden diese Hohlräume durch den zur Verfügung stehenden Bindemittelleim gefüllt. Damit sinkt die Bindemittelschichtdicke zwischen Körnern, was zu einer Abnahme des Einflusses des Bindemittels auf die dynamische Viskosität des gesamten Mörtels führen kann. Dies wiederum kann die abnehmende dynamische Viskosität bei steigendem  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  begründen.

#### 4.2.5.2 Einfluss morphologischer Eigenschaften auf die Fließgrenze

Neben der dynamischen Viskosität bestimmt außerdem die Fließgrenze das rheologische Verhalten von Mörtel im frischen Zustand. Die multiple lineare Regressionsanalyse ist mit  $F(12,144)=2.077$  und einem  $p<0,05$  bei einem  $R^2$  von 0,994 statistisch signifikant. Für die Fließgrenze wird im Besonderen die Interaktion der morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung mit Parametern der Mörtelzusammensetzung wie dem w/z-Wert, dem b/gk-Wert und der Sieblinie deutlich. Das Ergebnis der Regressionsanalyse zwischen den unabhängigen Variablen und der logarithmierten Fließgrenze ist in Tab. 4.4 dargestellt.

Tab. 4.4: Regressionsergebnis für die logarithmierte abhängige Variable Fließgrenze, in Anlehnung an [208].

Variable	Regressionskoeffizient	Standardfehler	p-Wert
Achsenabschnitt	-0,744	0,249	0,003
w/z-Wert (0,55)	-1,063	0,018	0,000
b/gk-Wert (1,05)	-0,041	0,035	0,242
Sieblinie (BC)	-0,265	0,043	0,000
$LL_E$	-0,010	0,001	0,000
Sieblinie (BC) : $LL_E$	0,011	0,001	0,000
$d_{V50}(LL_E)$	4,863	0,403	0,000
$(d_{V50}(LL_E))^2$	-1,550	0,121	0,000
$d_{V50}(AT_{3D})$	7,271	0,451	0,000
b/gk-Wert (1,05) : $d_{V50}(AT_{3D})$	-1,364	0,322	0,000
$d_{V90/10}(AT_{3D})$	0,074	0,008	0,000
w/z-Wert (0,55) : $d_{V90/10}(AT_{3D})$	0,032	0,006	0,000
Sieblinie (BC) : $d_{V90/10}(AT_{3D})$	-0,035	0,008	0,000

Bei zunehmendem Grad der Länglichkeit, der als länglich klassifizierten Körner  $d_{V50}(LL_E)$ , zeigt sich entgegen der Erwartung zunächst eine Zunahme der Fließgrenze bis zu einem Wert von  $d_{V50}(LL_E)$  von etwa 1,50 und anschließend eine Abnahme, siehe Abb. 4.24 a). In der Literatur werden unterschiedliche Beobachtungen in diesem Zusammenhang dokumentiert. So stellen Westerholm et al. [20] keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Grad der Länglichkeit und der Fließgrenze fest. Zhao et al. [28] hingegen dokumentieren eine Zunahme der Fließgrenze bei zunehmender Länglichkeit, die sie auf die Abnahme der Bindemittelschichtdicke zwischen Körnern zurückführen, die zu einer erhöhten Anzahl an Kollisionen zwischen Körnern sowie Verzahnungen führt. Diese Ursache würde die im Rahmen dieser Untersuchung beobachtete Zunahme der Fließgrenze bei Steigerung von  $d_{V50}(LL_E)$  von 1,00 auf 1,50 begründen.  $LL_E$  ist als das Verhältnis von Kornlänge zu Korndicke definiert. In einem

Bereich von  $LL_E$  zwischen 1,00 und 1,50 handelt es sich folglich um Körner, deren Kornform von der einer Kugel abweicht, deren Länglichkeit jedoch noch nicht sehr stark ausgeprägt ist. Für die beobachtete Abnahme der Fließgrenze bei  $LL_E$  größer 1,50 kommt möglicherweise die Ausrichtung dieser sehr länglichen Körner beim Einfüllprozess in den Messtopf vor der rheologischen Messung in Frage. Die Einfüllrichtung steht dabei senkrecht zur anschließenden Bewegungsrichtung während des Messprozesses. Damit ist es möglich, dass sich Körner entsprechend ihrer längsten Achse beim Einfüllen ausrichten könnten und damit eine Abnahme der Fließgrenze bewirken. Die Effekte einer zunehmenden Anzahl an Kollisionen zwischen Körnern bei moderat steigender Länglichkeit sowie die Ausrichtung von Körnern bei deutlich erhöhter Länglichkeit, liefern eine mögliche Erklärung für das beobachtete Phänomen, dass die Fließgrenze zunächst mit zunehmender Länglichkeit der Körner steigt und anschließend wieder abfällt.

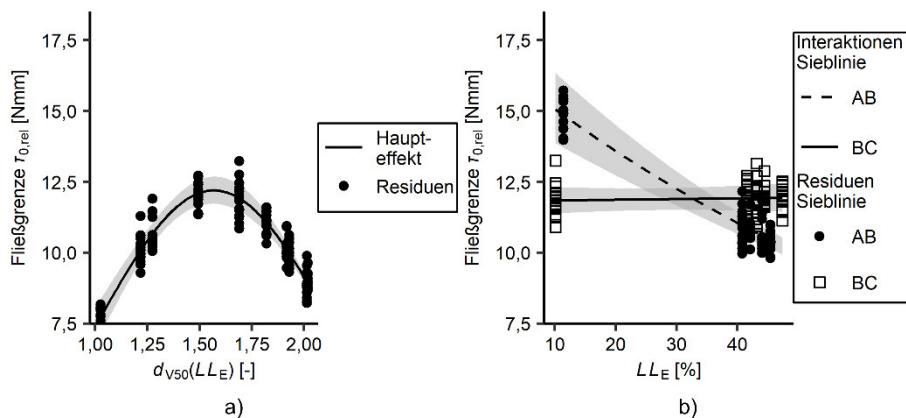


Abb. 4.24: Einfluss der Länglichkeit auf die Fließgrenze mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von  $d_{v50}(LL_E)$  und b) Einfluss von  $LL_E$  in Abhängigkeit von der Sieblinie, in Anlehnung an [208].

Der Anteil an länglichen Körnern  $LL_E$  bewirkt keine ausgeprägte Änderung der Fließgrenze, wenn es sich um eine BC-Sieblinie handelt. Liegt hingegen eine AB-Sieblinie vor, kommt es zu einer Reduktion der Fließgrenze mit zunehmendem Anteil an länglichen Körnern, siehe Abb. 4.24 b). Dem entgegen stehen die Beobachtungen von Aissoun et al. [24], die bei steigendem Anteil an plattigen Körnern einen Anstieg der Fließgrenze beobachten.

Grundsätzlich kann der Aufweitungseffekt, siehe Abb. 4.25, bei länglichen und plattigen Körnern zu einer Abnahme der Packungsdichte führen [199, 221, 222]. Während der Hohlraumgehalt zwischen Körnern mit niedriger Länglichkeit wie in Abb. 4.25 a) gering ist, steigt dieser bei zunehmender Länglichkeit der Körner an, siehe Abb. 4.25 b). Bei erhöhtem Hohlraumgehalt des Frischmörtels könnte daraus ein niedrigeres Drehmoment resultieren, welches für die Überwindung der Fließgrenze erforderlich ist. Die AB- und BC-Sieblinie unterscheiden sich vor allem in ihrem unterschiedlichen Anteil an Körnern größerer Korngröße, welcher für die AB-Sieblinie größer ist. Da eine

Abhängigkeit des Einflusses von  $LL_E$  auf die Fließgrenze von der verwendeten Sieblinie festgestellt werden kann, könnte eine unterschiedliche Verteilung des Anteils länglicher Körner in Abhängigkeit von der Korngröße eine Ursache darstellen.

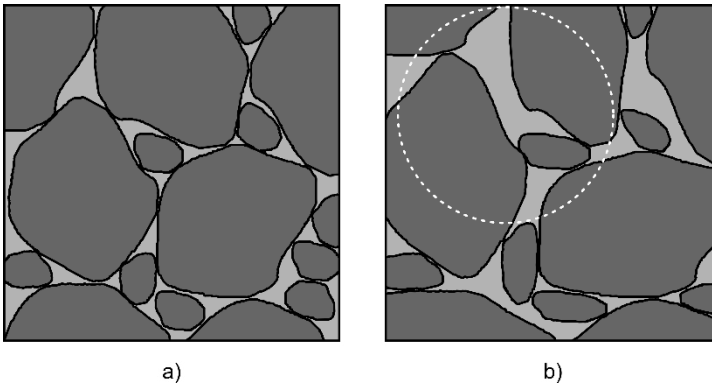


Abb. 4.25: Schematische Darstellung des Aufweitungs-effekt mit a) Hohlraumgehalt der Packung bei Körnern niedriger Länglichkeit und b) erhöhtem Hohlraumgehalt der Packung (weiß markiert) bei Körnern höherer Länglichkeit.

Abb. 4.26 a) zeigt zunächst den Anteil der als länglich klassifizierten Körner in Abhängigkeit von der Kornbreite als Maß für die Korngröße. Dieser, auf die Anzahl der Körner einer Gruppe mit bestimmter Spannweite an Kornbreiten bezogene Wert, sinkt mit zunehmender Breite der Korngruppe.

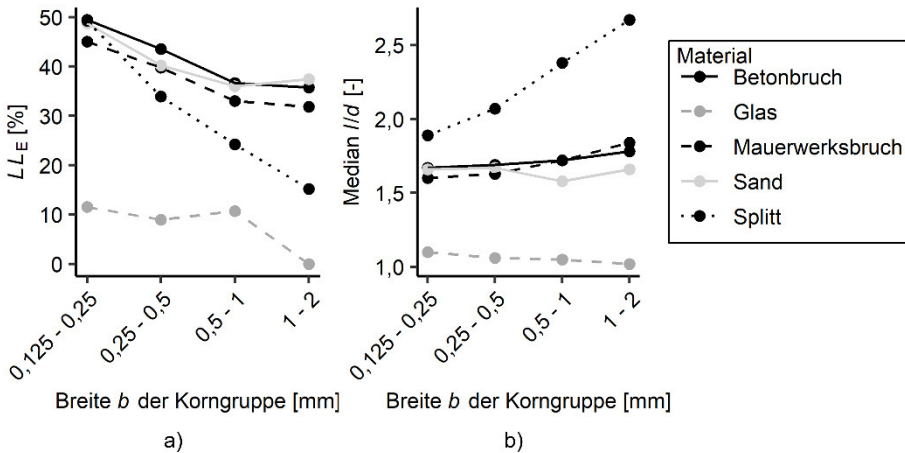


Abb. 4.26: Aufgeschlüsselt nach Kornbreite b a) Anteil länglicher Körner und b) Medianwert des Verhältnisses von Kornlänge  $l$  zu Korndicke  $d$ .

Allerdings zeigt Abb. 4.26 b), dass der Median des Verhältnisses aller Körner der jeweiligen Korngruppe mit zunehmender Kornbreite steigt. Dieser Effekt ist besonders für Gesteinskörnungen aus gebrochenem Material erkennbar. Auch wenn der prozentuale Anteil an länglichen Körnern der Korngruppe mit größerer Kornbreite damit niedriger liegt als der der Korngruppe mit niedrigerer Kornbreite, steigt die durchschnittliche

Länglichkeit aller Körner mit zunehmender Kornbreite an. Da bei Verwendung einer AB-Sieblinie ein erhöhter Anteil an Körnern größerer Korngröße eingesetzt wird, scheint der Einfluss auf die Packungsdichte größer als bei einer BC-Sieblinie zu sein. Dies wiederum stellt eine mögliche Ursache für den Effekt von  $LL_E$  auf die Fließgrenze in Abhängigkeit von der Sieblinie dar.

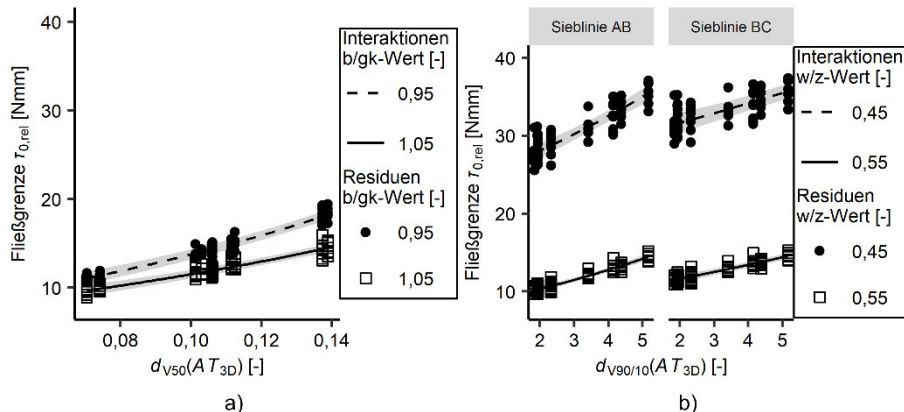


Abb. 4.27: Einfluss der Eckigkeit auf die Fließgrenze  $\tau_{0,rel}$  mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von  $d_{V50}(AT_{3D})$  in Abhängigkeit vom b/gk-Wert und b) Einfluss von  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  in Abhängigkeit vom w/z-Wert und von der Sieblinie, in Anlehnung an [208].

Abb. 4.27 a) zeigt den Einfluss des Grades der Eckigkeit  $d_{V50}(AT_{3D})$  auf die Fließgrenze. Mit zunehmendem  $d_{V50}(AT_{3D})$  steigt die Fließgrenze an, wobei dieser Effekt für Mörtelzusammensetzungen mit niedrigem Verhältnis von Bindemittelmasse zu Gesteinskörnungsmasse stärker ausfällt. Ein ähnliches Bild zeichnet sich für den Einfluss der Verteilung der Eckigkeit  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  ab, siehe Abb. 4.27 b). Auch hier nimmt die Fließgrenze mit zunehmendem  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  zu, in Abhängigkeit sowohl von der Sieblinie als auch vom w/z-Wert. Die Interaktionseffekte sind in diesem Fall für den Einfluss der Sieblinie weniger ausgeprägt als für den Einfluss des w/z-Wertes. Dass mit zunehmender Eckigkeit der Körner ein Anstieg der Fließgrenze festgestellt werden kann, entspricht Beobachtungen aus der Literatur [24, 28]. Zurück geführt wird dieser Effekt zum einen auf die erhöhte Reibung zwischen Körnern, die aufgrund der erhöhten Eckigkeit dieser Körner vorliegt [24] sowie aus dem erhöhten Bindemittelmanspruch von Körnern mit erhöhter Eckigkeit, welcher zu geringen Mörtelschichtdicken zwischen Körnern führt und damit die Wahrscheinlichkeit des Kontaktes zwischen Körnern erhöht [28]. Die vorliegenden Versuchsergebnisse bestätigen diese Beobachtungen aus der Literatur. Für die aufgrund des niedrigeren b/gk-Wertes bzw. niedrigeren w/z-Wertes steiferen Mörtelmischungen zeigt sich dieser Effekt deutlicher als für die weicheren Zusammensetzungen. Dies spricht für einen Einfluss der erhöhten Reibung zwischen Körnern als Ursache für die erhöhte Fließgrenze. Für die weicheren Mörtelzusammensetzungen scheint trotz niedrigerer Bindemittelmischschichtdicke bei Einsatz eckiger Körner die Fließgrenze weniger stark beeinflusst zu werden.



#### 4.2.5.3 Einfluss morphologischer Eigenschaften auf Setzmaß und Setzfließmaß

Sowohl das Setzmaß als auch das Setzfließmaß stellen Ein-Punkt Versuche zur Charakterisierung der Konsistenz von Mörteln dar. Diese Versuche werden grundsätzlich beide zur Abschätzung der Fließgrenze herangezogen und sind tendenziell für weiche bis fließfähige Zusammensetzungen besser geeignet als für steife [271, 296, 297]. Die Regressionsanalyse für das Setzmaß, deren Ergebnis in Tab. 4.5 dargestellt ist, ist statistisch signifikant mit  $F(7, 152)=914,1$  und  $p<0,05$  bei einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2=0,977$ . Gleiches gilt für die Regressionsanalyse für das Setzfließmaß mit  $F(10, 149)=464,1$  und  $p<0,05$  bei einem  $R^2$  von 0,969, siehe Tab. 4.6.

Tab. 4.5: Regressionsergebnis für die abhängige Variable Setzmaß.

Variable	Regressionskoeffizient	Standardfehler	p-Wert
Achsenabschnitt	34,28	3,37	0,000
w/z-Wert (0,55)	17,54	0,51	0,000
b/gk-Wert (1,05)	2,30	0,19	0,000
$d_{v50}(LL_E)$	-10,02	5,10	0,051
$(d_{v50}(LL_E))^2$	3,56	1,54	0,022
$d_{v50}(AT_{3D})$	-75,14	8,00	0,000
$d_{v90/10}(AT_{3D})$	-0,54	0,13	0,000
w/z-Wert (0,55) : $d_{v90/10}(AT_{3D})$	-1,13	0,16	0,000

Tab. 4.6: Regressionsergebnis für die abhängige Variable Setzfließmaß.

Variable	Regressionskoeffizient	Standardfehler	p-Wert
Achsenabschnitt	172,49	15,08	0,000
w/z-Wert (0,55)	96,35	4,25	0,000
b/gk-Wert (1,05)	8,79	0,77	0,000
$LL_E$	0,14	0,06	0,016
$d_{v50}(LL_E)$	-77,43	22,12	0,001
$(d_{v50}(LL_E))^2$	23,69	6,65	0,000
w/z-Wert (0,55) : $d_{v50}(LL_E)$	10,17	3,33	0,003
$d_{v50}(AT_{3D})$	-73,73	42,80	0,087
w/z-Wert (0,55) : $d_{v50}(AT_{3D})$	-402,10	50,79	0,000
$d_{v90/10}(AT_{3D})$	-1,19	0,57	0,039
w/z-Wert (0,55) : $d_{v90/10}(AT_{3D})$	-7,76	0,72	0,000

Abb. 4.28 und Abb. 4.29 a) zeigen beide zunächst den, entgegen der Erwartung auftretenden, Abfall des Setz- bzw. Setzfließmaßes bei zunehmendem Grad der Länglichkeit der Körner  $d_{V50}(LL_E)$  mit anschließender Steigerung ab einem  $d_{V50}(LL_E)$  von etwa 1,5. Im Fall des Setzfließmaßes ist die Abnahme bei niedrigem w/z-Wert ausgeprägter als bei hohem w/z-Wert, während für den Anstieg von  $d_{V50}(LL_E)$  ab etwa 1,5 der umgekehrte Fall beobachtet werden kann. Diese Beobachtung deckt sich mit der in Abschnitt 4.2.5.2 beschriebenen Beobachtung für die Fließgrenze, da eine Abnahme des Setzmaßes bzw. Setzfließmaßes mit einer Zunahme der Fließgrenze vergleichbar ist. Die in Abschnitt 4.2.5.2 genannten und in Abb. 4.21 und in Abb. 4.22 veranschaulichten Ursachen für den unterschiedlichen Einfluss eines steigenden  $d_{V50}(LL_E)$  auf die Fließgrenze können daher auf das Setz- bzw. Setzfließmaß übertragen werden. Die Beobachtung des unterschiedlich stark ausgeprägten Einflusses auf das Setzfließmaß in Abhängigkeit vom w/z-Wert könnte in diesem Kontext darauf hindeuten, dass die Abnahme des Setzfließmaßes bis zu einem  $d_{V50}(LL_E)$  von etwa 1,5 neben der Kornform der Gesteinskörnung ebenfalls von der Konsistenz des umgebenen Bindemittelleims abhängig ist. Bei hohem w/z-Wert ist der Effekt weniger stark ausgeprägt, da in diesem Fall möglicherweise die Fließgrenze stärker von der Konsistenz des Bindemittelleims gesteuert wird. Die Abnahme des Setzfließmaßes mit zunehmender Länglichkeit der Körner deckt sich zudem mit der Beobachtung von Polat et al. [259].

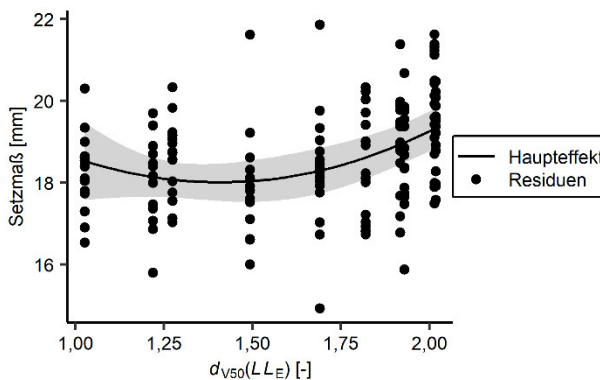


Abb. 4.28: Einfluss des Grades der Länglichkeit  $d_{V50}(LL_E)$  auf das Setzmaß mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen).

Für das Setzfließmaß lässt sich entsprechend Abb. 4.29 b) eine leichte Zunahme bei Steigerung des Anteils länglicher Körner erkennen. Dies würde, übertragen auf die Fließgrenze, einer Abnahme dieser entsprechend. Teilweise kann diese Abnahme in Abschnitt 4.2.5.2 beobachtet werden, wobei in diesem Fall eine Abhängigkeit von der Sieblinie besteht, die für das Setzfließmaß nicht festgestellt werden kann. Auch für den Einfluss von  $LL_E$  auf das Setzfließmaß könnte der Aufweitungseffekt, siehe Abb. 4.25, eine mögliche Ursache für das zunehmende Setzfließmaß darstellen. Bei geringerer Packungsdichte liegen weniger Reibungspunkte zwischen benachbarten Körnern vor, sodass das Ausbreiten des Mörtelkegels vereinfacht gegenüber Zusammensetzungen mit höherer Packungsdichte ist. Die Beobachtung von Estephane et al. [25, 32], dass

Mörtelzusammensetzungen bei steigendem Anteil von länglichen Körnern einen erhöhten Wasseranspruch aufweisen, um ein festgelegtes Setzfließmaß zu erreichen, steht allerdings im Widerspruch zu den hier vorgestellten Versuchsergebnissen. Die Zunahme des Setzfließmaßes bei steigendem  $LL_E$  deckt sich jedoch mit dem beobachteten Einfluss einer abnehmenden dynamischen Viskosität in Abschnitt 4.2.5.1. Im Fall der dynamischen Viskosität kann dieser Effekt gegebenenfalls auf eine Ausrichtung der länglichen Körner entlang der Fließrichtung zurückgeführt werden. Da das Setzfließmaß deutlicher als das Setzmaß von der Fließbewegung der Körner innerhalb der Mörtelprobe abhängig ist, ist dieser Effekt möglicherweise auf die Veränderung der dynamischen Viskosität der Mörtelzusammensetzung zurückzuführen. Auch wenn Setz- und Setzfließmaß vor allem zur Abschätzung der Fließgrenze herangezogen werden, ist ein Einfluss der dynamischen Viskosität auf das Messergebnis nicht auszuschließen [298].

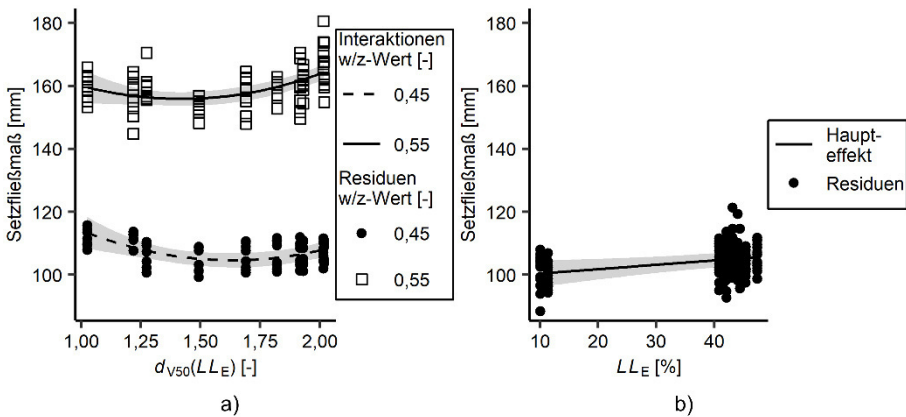


Abb. 4.29: Einfluss der Länglichkeit auf das Setzfließmaß mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von  $d_{v50}(LL_E)$  in Abhängigkeit vom w/z-Wert und b) Einfluss von  $LL_E$ .

Das Setzmaß und das Setzfließmaß nehmen sowohl mit steigendem  $d_{v50}(AT_{3D})$  als auch mit steigendem  $d_{v90/10}(AT_{3D})$  ab, siehe Abb. 4.30 und Abb. 4.31. Grundsätzlich besteht hierbei eine Abhängigkeit vom w/z-Wert. Bei niedrigem w/z-Wert ist die Abnahme des Setz- bzw. Setzfließmaßes sowohl für  $d_{v50}(AT_{3D})$  als auch  $d_{v90/10}(AT_{3D})$  weniger stark ausgeprägt als bei hohem w/z-Wert. Einzig für den Einfluss von  $d_{v50}(AT_{3D})$  auf das Setzmaß kann keine Abhängigkeit vom w/z-Wert festgestellt werden. Diese Ergebnisse korrelieren grundsätzlich mit denen einer zunehmenden Fließgrenze bei steigender Eckigkeit der Körner. Des Weiteren decken sich diese Beobachtungen mit denen mehrerer in der Literatur beschriebenen Versuchsreihen [23, 26, 260, 264]. Als Ursache kommt für die Verringerung von Setz- und Setzfließmaß bei steigender Eckigkeit der Körner ebenfalls eine erhöhte Verzahnung sowie Reibung zwischen benachbarten Körnern in Frage, die zu einer Verringerung der Mobilität einzelner Körner führt [26, 264].

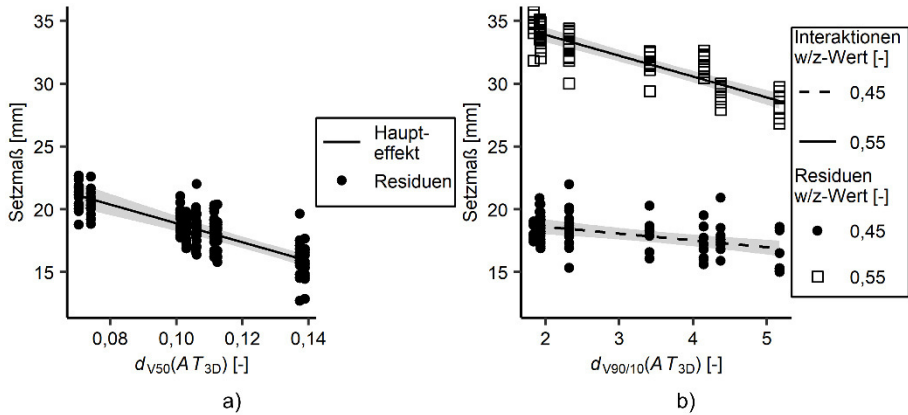


Abb. 4.30: Einfluss der Eckigkeit auf das Setzmaß mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von  $d_{v50}(AT_{3D})$  und b) Einfluss von  $d_{v90/10}(AT_{3D})$  in Abhängigkeit vom w/z-Wert.

Die Abhängigkeit dieses Effektes vom w/z-Wert zeigt, dass bei fließfähigeren Mörteln die Abnahme von Setz- und Setzfließmaß ausgeprägter ist. Die Abnahme dieser Kenngrößen in Folge einer zunehmenden Eckigkeit der Körner hängt von der Konsistenz des Bindemittelleims ab. Bei steiferen Bindemittelleimkonsistenzen ist die Mobilität von einzelnen Körnern innerhalb der Mischung grundsätzlich eingeschränkt, während sich dieser Effekt bei höherer Konsistenz erst durch die zunehmende Verzahnung und Reibung zwischen Körnern zeigt.

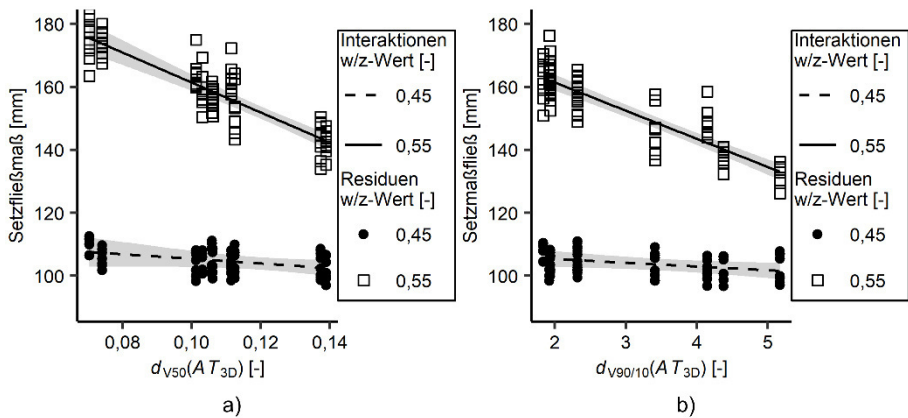


Abb. 4.31: Einfluss der Eckigkeit auf das Setzfließmaß mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von  $d_{v50}(AT_{3D})$  in Abhängigkeit vom w/z-Wert und b) Einfluss von  $d_{v90/10}(AT_{3D})$  in Abhängigkeit vom w/z-Wert.

**4.2.5.4 Einfluss morphologischer Eigenschaften auf das Ausbreitmaß**

Zusätzlich zum Setz- und Setzfließmaß wird im Rahmen dieser Untersuchung das Ausbreitmaß, ein gängiger Versuch im deutschsprachigen Raum, zur Charakterisierung der Konsistenz von Mörtel durchgeführt. Das Ergebnis der multiplen linearen Regressionsanalyse ist statistisch signifikant mit  $F(10,147)=354,3$  und  $p<0,05$  bei einem  $R^2$  von 0,960, wobei eine leichte Autokorrelation der Residuen beobachtet werden kann, die jedoch als unproblematisch angesehen wird. Das Ergebnis der Regressionsanalyse ist in Tab. 4.7 zusammengefasst.

Tab. 4.7: Regressionsergebnis für die abhängige Variable Ausbreitmaß.

Variable	Regressionskoeffizient	Standardfehler	p-Wert
Achsenabschnitt	357,31	27,63	0,000
w/z-Wert (0,55)	46,41	2,00	0,000
b/gk-Wert (1,05)	7,63	0,74	0,000
Sieblinie (BC)	31,94	8,65	0,000
$LL_E$	0,43	0,07	0,000
$d_{V50}(LL_E)$	-222,42	47,60	0,000
$(d_{V50}(LL_E))^2$	65,32	14,00	0,000
$d_{V50}(AT_{3D})$	50,66	84,60	0,550
Sieblinie (BC) : $d_{V50}(AT_{3D})$	-245,27	76,35	0,002
$d_{V90/10}(AT_{3D})$	-2,29	0,62	0,000
w/z-Wert (0,55) : $d_{V90/10}(AT_{3D})$	-1,81	0,63	0,005

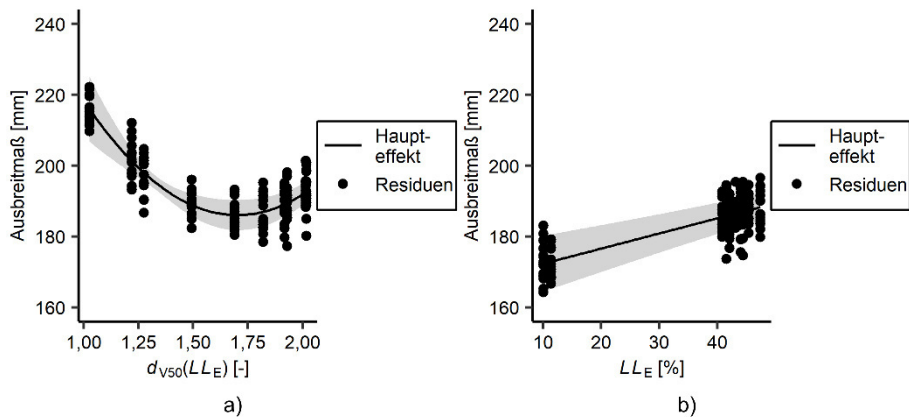


Abb. 4.32: Einfluss der Länglichkeit auf das Ausbreitmaß mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von  $d_{V50}(LL_E)$  und b) Einfluss von  $LL_E$ .

Analog zum beobachteten Einfluss des Grades der Länglichkeit  $d_{V50}(LL_E)$  auf Fließgrenze, Setzmaß und Setzfließmaß, zeigt sich auch im Fall des Ausbreitmaßes unerwarteterweise zunächst eine Abnahme und bei steigendem  $d_{V50}(LL_E)$  eine Zunahme, siehe Abb. 4.32 a). Das niedrigste Ausbreitmaß kann in diesem Kontext bei einem  $d_{V50}(LL_E)$  von etwa 1,7 beobachtet werden. Auf das Ausbreitmaß wirken zum einen die Schwerkraft und zum anderen die Kräfte aus der Schlagbewegung. Trotzdem ist das Ausbreitmaß zur Abschätzung der Fließgrenze der Mörtelprobe geeignet, wenngleich auch davon ausgegangen werden kann, dass die dynamische Viskosität Einfluss auf das Messergebnis hat [299]. Die mögliche Ursache für die Abnahme des Ausbreitmaßes bei Erhöhung des Grades der Länglichkeit bis etwa 1,7 kann daher analog zur Fließgrenze möglicherweise auf die abnehmende Bindemittelleimschichtdicke zwischen Körnern erhöhter Länglichkeit im Unterschied zu kugelförmigen Körnern zurückgeführt werden. Damit werden Kollisionen oder Verzahnungen zwischen benachbarten Körnern wahrscheinlicher [28]. Werden Körner mit ausgeprägter Länglichkeit mit  $d_{V50}(LL_E)$  größer 1,7 eingesetzt, scheint die Ausrichtung dieser Körner während des Schlagvorgangs möglich. Das Ausbreiten des Mörtelkegels könnte in diesem Fall erleichtert werden.

Vergleichbar zum Setzfließmaß zeigt sich in Abb. 4.32 b) eine Zunahme des Ausbreitmaßes bei zunehmendem Anteil an länglichen Körnern  $LL_E$ . Dieses Verhalten entspricht der Beobachtung für die dynamische Viskosität, welche bei zunehmenden  $LL_E$  abnimmt. Da der Schlagprozess während der Bestimmung des Ausbreitmaßes ein Fließen des Mörtels bewirkt, ist ein Einfluss der dynamischen Viskosität auf das Messergebnis möglich. In diesem Fall könnte ebenfalls eine Ausrichtung der Körner in Fließrichtung eine Zunahme des Ausbreitmaßes bewirken, da ein Gleiten der Körner entlang ihrer Längsrichtung im Vergleich quer zur Längsachse einen geringeren Widerstand hervorrufen könnte.

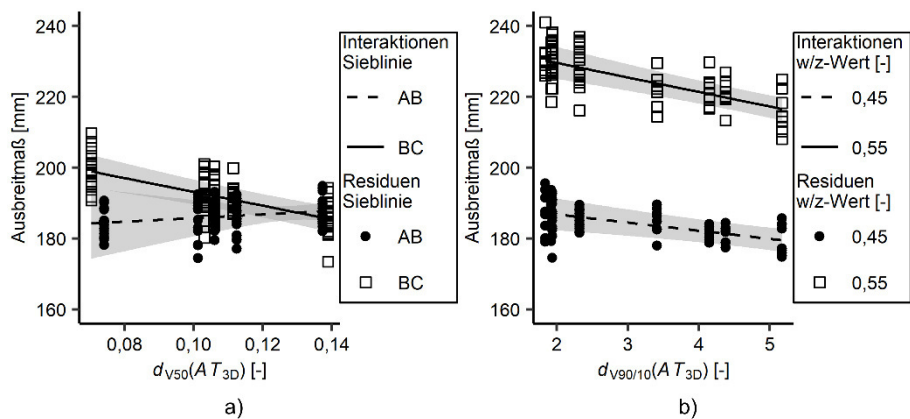


Abb. 4.33: Einfluss der Eckigkeit auf das Ausbreitmaß mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von  $d_{V50}(AT_{3D})$  in Abhängigkeit von der Sieblinie und b) Einfluss von  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  in Abhängigkeit vom w/z-Wert.

Der Einfluss einer zunehmenden Eckigkeit  $d_{V50}(AT_{3D})$  auf das Ausbreitmaß ist weniger eindeutig, als dies bei Setz- und Setzfließmaß der Fall ist. Mit zunehmendem

$d_{V50}(AT_{3D})$  kommt es zu einer Verringerung des Ausbreitmaßes, wenn eine BC-Sieblinie verwendet wird und zum gegenteiligen Effekt bei Einsatz einer AB-Sieblinie, siehe Abb. 4.33 a). Nimmt  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  zu, kommt es wie in Abb. 4.33 b) dargestellt, analog zu Setz- und Setzfließmaß zu einer Abnahme des Ausbreitmaßes. Grundsätzlich zeigt sich daher, dass mit zunehmender Eckigkeit das Ausbreitmaß abnimmt und es damit zu einer Verringerung der Verarbeitbarkeit des Mörtels kommt. Auch in diesem Fall kommen als mögliche Ursachen eine vermehrte Verzahnung sowie erhöhte Reibungskräfte zwischen Körnern in Frage, woraus eine Verringerung der Mobilität einzelner Körner hervorgerufen wird [26, 264]. Für das Ausbreitmaß zeigt sich eine verhältnismäßig schwach ausgeprägte Interaktion zwischen  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  und dem w/z-Wert. Genau wie beim Setz- und Setzfließmaß legt dies nahe, dass bei Bindemittelleimen mit fließfähiger Konsistenz die zunehmende Verzahnung und Reibung zwischen Körnern eine größere Rolle spielt, da im Fall von Bindemittelleimen mit steiferer Konsistenz, die Mobilität der Körner bereits aufgrund des Bindemittelleims eingeschränkt ist.

Eine mögliche Ursache für den unterschiedlichen Einfluss von  $d_{V50}(AT_{3D})$  auf das Ausbreitmaß in Abhängigkeit von der Sieblinie könnte in der unterschiedlichen Verteilung der durchschnittlichen Eckigkeit der Körner in Abhängigkeit von ihrer Korngröße liegen.

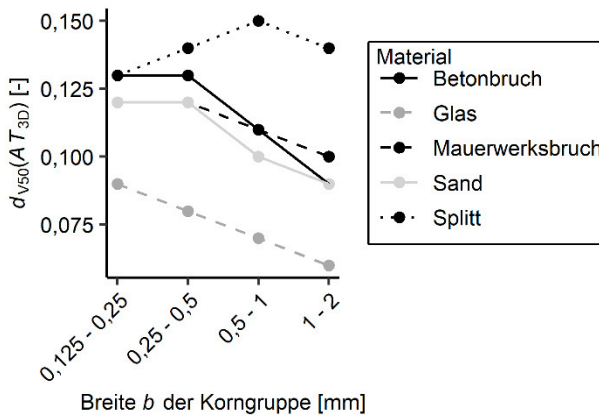


Abb. 4.34: Grad der Eckigkeit  $d_{V50}(AT_{3D})$  in Abhängigkeit von der Kornbreite  $b$  für die fünf verwendeten Materialarten.

Abb. 4.34 zeigt, dass insbesondere die Körner der kleinen Kornfraktion erhöhte Eckigkeitswerte aufweisen, mit Ausnahme der Splittschüttung. Dies könnte für die gebrochenen Gesteinskörnungsarten auf den Aufbereitungsprozess zurück gehen, da sich in den kleinen Kornfraktionen Absplitterungen von größeren Körnern mit eckiger Struktur anreichern können. Die AB-Sieblinie zeichnet sich durch einen geringeren Anteil an Körnern mit kleiner Korngröße aus. Der beobachtete Anstieg des Ausbreitmaßes bei AB-Sieblinien ist jedoch mit einem verhältnismäßig großen Konfidenzintervall und damit erhöhter Unsicherheit behaftet. Zudem ist der registrierte Anstieg bei zunehmendem  $d_{V50}(AT_{3D})$  sehr gering. Der Effekt scheint daher nicht ausgeprägt zu sein. Möglicherweise führt die Erhöhung von  $d_{V50}(AT_{3D})$ , welche im Fall der AB-Sieblinie vor allem auf die Körner der größeren Kornfraktion zurück geht, zu einem Aufweitungseffekt der Packung. Dies bewirkt wiederum eine verbesserte Mobilität der Körner aufgrund

des steigenden Hohlraumgehalts. Im Unterschied zur BC-Sieblinie weist eine AB-Sieblinie aufgrund ihrer geringeren spezifischen Oberfläche einen geringeren Bindemittelaufwand auf. Damit könnte im Fall der AB-Sieblinie mehr überschüssiges Bindemittel zur Füllung der Hohlräume zur Verfügung stehen, als dies bei der BC-Sieblinie der Fall ist. Möglicherweise resultiert hieraus der verringerte Einfluss von  $d_{V50}(AT_{3D})$  auf das Ausbreitmaß im Vergleich zu den Mörtelzusammensetzungen mit einer BC-Sieblinie, bei denen der Aufweitungseffekt zu einer verstärkten Verringerung der Bindemittelschichtdicke um die Körner herumführt, wodurch Reibung und Verzahnung von benachbarten Körnern begünstigt werden.

#### 4.2.5.5 Einfluss morphologischer Eigenschaften auf die Druckfestigkeit

Das in Tab. 4.8 dargestellte Ergebnis der multiplen linearen Regressionsanalyse zeigt, dass insbesondere die Eckigkeit der Körner einen Einfluss auf die Druckfestigkeit des Mörtels hat. Die Regressionsanalyse ist mit  $F(7,111)=342$  und  $p<0,05$  bei einem  $R^2$  von 0,956 statistisch signifikant, wobei eine leichte Autokorrelation der Residuen beobachtet werden kann, die jedoch als unproblematisch angesehen wird. Zur Analyse der Festmörtel Eigenschaften wird zusätzlich der kategoriale Parameter „Materialursprung“ mit in die Regressionsanalyse aufgenommen, welcher auf den beiden Stufen „NA“ für natürliche und „RZ“ für rezyklierte Gesteinskörnung definiert ist und Unterschiede in der Kornfestigkeit und mineralogischen Zusammensetzung zwischen diesen beiden Gesteinskörnungsarten berücksichtigt.

Tab. 4.8: Regressionsergebnis für die abhängige Variable Druckfestigkeit, in Anlehnung an [208].

Variable	Regressionskoeffizient	Standardfehler	p-Wert
Achsenabschnitt	52,13	1,56	0,000
w/z-Wert (0,55)	-11,76	0,99	0,000
b/gk-Wert (1,05)	0,98	0,37	0,009
Materialursprung (RZ)	84,06	21,39	0,000
$d_{V50}(AT_{3D})$	190,26	10,49	0,000
Materialursprung (RZ) : $d_{V50}(AT_{3D})$	-891,03	181,74	0,000
$d_{V90/10}(AT_{3D})$	-1,49	0,85	0,082
w/z-Wert (0,55) : $d_{V90/10}(AT_{3D})$	1,30	0,31	0,000

Das Ergebnis der Regressionsanalyse zeigt, dass kein Einfluss der Länglichkeit  $d_{V50}(LL_E)$  und  $LL_E$  auf die Druckfestigkeit besteht. Diese Beobachtung deckt sich mit der von Aissoun et al. [24], widerspricht jedoch denen von Polat et al. [259] und Deng et al. [278], die einen Rückgang der Druckfestigkeit bei Einsatz von länglichen und plattigen Körnern feststellen. Abb. 4.35 a) zeigt, dass mit zunehmender Eckigkeit  $d_{V50}(AT_{3D})$  die Druckfestigkeit bei Verwendung natürlicher Gesteinskörnung zunimmt. Kommt jedoch rezyklierte Gesteinskörnung zum Einsatz, ist ein gegenteiliger Effekt zu



beobachten. In diesem Fall ist jedoch anzumerken, dass lediglich zwei rezyklierte Gesteinskörnungsschüttungen Teil der Untersuchung sind, welche beide hohe  $d_{V50}(AT_{3D})$ -Werte aufweisen. Die in Abb. 4.35 a) dargestellte Effektklinie stellt damit im Abschnitt niedriger  $d_{V50}(AT_{3D})$ -Werte eine Extrapolation dar und ist mit ausgeprägten Konfidenzintervallen behaftet. Die Spannweite der Eckigkeitswerte  $d_{V90/10}(AT_{3D})$ , siehe Abb. 4.35 b), weist lediglich einen geringen Einfluss auf die Druckfestigkeit auf. Bei hohem w/z-Wert ist auch bei zunehmendem  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  keine Veränderung der Druckfestigkeit erkennbar, während bei niedrigem w/z-Wert eine leichte Abnahme feststellbar ist. Dass mit zunehmender Eckigkeit der Körner erhöhte Druckfestigkeiten erzielt werden, wird in zahlreichen Studien beschrieben [23, 24, 27, 28]. Die Autoren führen dies auf eine erhöhte spezifische Oberfläche der Körner im Vergleich zu runden Körnern mit glatter Oberfläche zurück. Damit können sich vermehrt Verbundkräfte zwischen Korn und Bindemittelsteinmatrix ausbilden [23, 24, 27, 28]. Für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung beobachten Eckert und Oliviera [263] eine Abnahme der Druckfestigkeit mit steigendem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung und erklären dies mit einer geringeren Kornfestigkeit. Bei Einsatz von natürlicher Gesteinskörnung kommt es in der Regel zu einem Druckversagen in der Verbundzone zwischen Korn und Bindemittelsteinmatrix oder innerhalb der Bindemittelsteinmatrix. Im Fall von rezyklierter Gesteinskörnung mit höherer Porosität und niedrigerer Kornfestigkeit ist ein Versagen im Korn jedoch ebenfalls möglich [263]. Dies könnte die grundsätzlich niedrigere Druckfestigkeit bei Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung erklären.

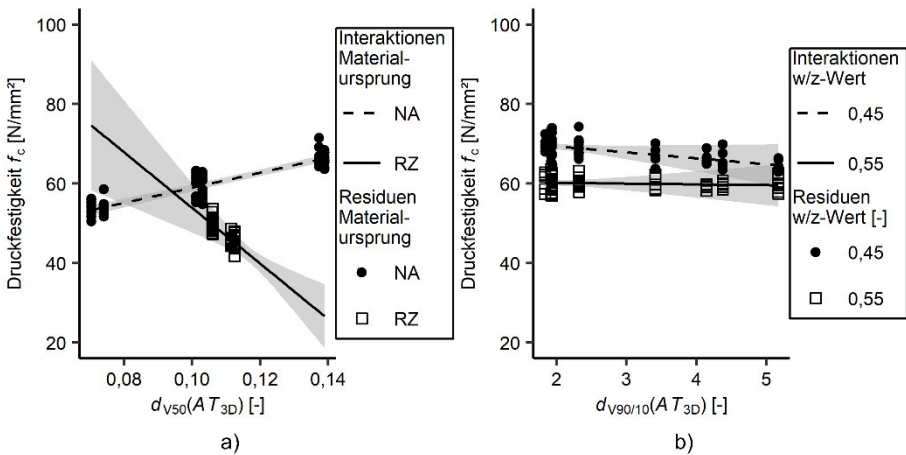


Abb. 4.35: Einfluss der Eckigkeit auf die Druckfestigkeit mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von  $d_{V50}(AT_{3D})$  in Abhängigkeit vom Materialursprung und b) Einfluss von  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  in Abhängigkeit vom w/z-Wert, in Anlehnung an [208].

Abb. 4.36 zeigt eine Nahaufnahme der Bruchfläche bei Verwendung von Rheinsand und rezyklertem Betonbruch. Hier zeigt sich, dass der Bruch bei Rheinsand bei Versagen unter Druckbeanspruchung in der Regel nicht durch die Sandkörner verläuft, sondern diese aus der Bruchfläche hervorstehen. Für die Mörtelprobe mit rezyklierten Betonbruch verläuft der Bruch nach Druckbeanspruchung allerdings teilweise auch durch die in Abb. 4.36 b) markierten Körner.

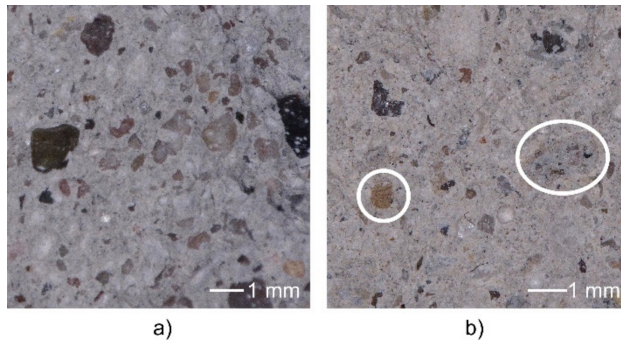


Abb. 4.36: Bruchfläche bei Druckbeanspruchung von a) Mörtel mit Rheinsand und b) Mörtel mit rezyklierten Betonbruch und weiß markierten Bruchflächen durch Brechsandkörner hindurch.

Aufgrund der großen Konfidenzintervalle bei Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung ist eine Interpretation der in Abb. 4.35 a) dargestellten Versuchsergebnisse jedoch mit großer Unsicherheit behaftet. Inwiefern tatsächlich eine Abnahme der Druckfestigkeit bei Erhöhung von  $d_{V50}(AT_{3D})$  bei Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung eintritt, könnte erst nach Durchführung weitergehender Versuche mit Mörtelzusammensetzungen erfolgen, welche mit rezyklierten Brechsanden mit höheren sowie niedrigeren  $d_{V50}(AT_{3D})$ -Werten hergestellt werden.

Die Tatsache, dass mit zunehmender Streuung  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  innerhalb einer Schüttung eine leichte Abnahme der Druckfestigkeit beobachtet werden kann, könnte auf Spannungskonzentrationen innerhalb der Mörtelprobe zurückzuführen sein. Im Fall von Körnern mit erhöhter Eckigkeit liegt aufgrund der erhöhten spezifischen Oberfläche potenziell eine stärkere Verbundzone zur Bindemittelsteinmatrix vor, als dies bei den runden Körnern einer Schüttung der Fall ist [27]. Möglicherweise können sich Druckspannungen in diesen Bereichen konzentrieren und zu einem früheren Versagen führen. Allerdings ist der beobachtete Effekt von  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  auf die Druckfestigkeit ebenfalls mit großen Konfidenzintervallen und damit großen Unsicherheiten behaftet, was eine Interpretation der Versuchsergebnisse erschwert. Zur weitergehenden Analyse der zugrundeliegenden Ursachen für den beobachteten Einfluss von  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  auf die Druckfestigkeit von Mörtel wären weiterführende Versuche sowie Finite-Element-Modellierungen von Druckspannungsverläufen entlang von runden und eckigen Körnern erforderlich.

#### **4.2.5.6 Einfluss morphologischer Eigenschaften auf die Biegezugfestigkeit**

Unter allen möglichen Kombinationen von unabhängigen Variablen und Interaktionstermen, welche im Rahmen dieser Untersuchung getestet werden, weist das in Tab. 4.9 dargestellte Regressionsmodell, welches lediglich den w/z-Wert und den Grad der Eckigkeit  $d_{V50}(AT_{3D})$  als Einflussgrößen berücksichtigt, den niedrigsten, in Abschnitt 4.2.4.3 erläuterten BIC-Wert auf. Das Ergebnis der multiplen linearen Regression ist statistisch signifikant mit  $F(2, 155)=90,07$  und  $p<0,05$  bei einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2=0,538$ , wobei leichte Anzeichen von Autokorrelation beobachtet werden können, die jedoch als vernachlässigbar eingestuft werden. Das im Vergleich zu den bisher vorgestellten Ergebnissen der Regressionsanalyse niedrige Bestimmtheitsmaß kann

möglicherweise auf die starke Streuung der Versuchsergebnisse zurückzuführen sein, da bereits die drei Messwerte der Prismen einer einzigen Prismenschalung teilweise eindeutig voneinander abweichen. Ursächlich hierfür ist unter anderem die Versuchsanordnung mit einer mittigen Einzellast, an der die maximale Momentbelastung der Probe auftritt [275]. Da Mörtel eine inhomogene Struktur aufweist und die mittige Lasteinleitung in einem Punkt erfolgt, resultieren daraus größere Streuungen der Versuchsergebnisse als bei zwei Lasteinleitungen in den Drittelpunkten des Prismas, die zu einer homogenen Momentbelastung im mittleren Bereich des Prismas führen [275].

Tab. 4.9: Regressionsergebnis für die abhängige Variable Biegezugfestigkeit, in Anlehnung an [208].

Variable	Regressionskoeffizient	Standardfehler	p-Wert
Achsenabschnitt	-0,27	0,45	0,550
w/z-Wert (0,55)	0,39	0,17	0,024
$d_{V50}(AT_{3D})$	53,74	4,07	0,000

Von den untersuchten Parametern zur Charakterisierung von Kornform und Eckigkeit hat lediglich  $d_{V50}(AT_{3D})$  einen signifikanten Einfluss auf die Biegezugfestigkeit, siehe Abb. 4.37. Dieses Versuchsergebnis deckt sich mit den Beobachtungen anderer Studien zum Einfluss der morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung auf die Biegezugfestigkeit [23, 27, 28]. Zum einen verfügen eckigere und rauere Körner über eine höhere spezifische Oberfläche als runde und glatte Körner, sodass sich vermehrt Verbundkräfte zwischen Gesteinskörnung und Bindemittelsteinmatrix ausbilden können und zum anderen verzahnen sich eckige Körner untereinander stärker, sodass der Widerstand gegen die Biegezugbelastung steigt [23, 27].

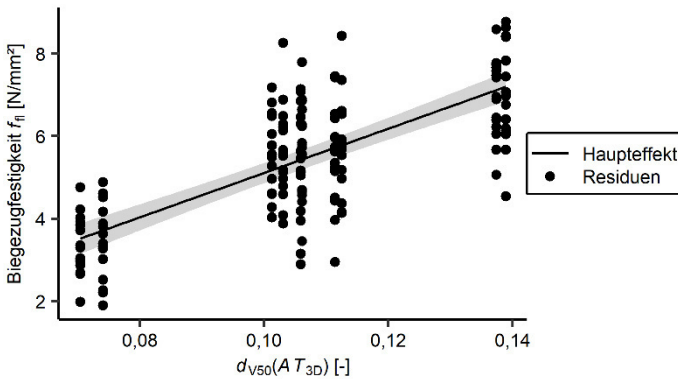


Abb. 4.37: Einfluss der Ausprägung der Eckigkeit  $d_{V50}(AT_{3D})$  auf die Biegezugfestigkeit mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen), in Anlehnung an [208].

Andere Einflussgrößen wie die Länglichkeit von Körnern oder der Materialursprung scheinen keinen signifikanten Einfluss auf die Biegezugfestigkeit im Rahmen dieser

Untersuchung zu haben. Dies erscheint plausibel vor dem Hintergrund, dass insbesondere die Verbundkräfte zwischen Korn und Matrix die Biegezugfestigkeit bestimmen, welche bei Ausgleich der Wasseraufnahme von rezyklierten Brechsanden nicht geringer ausfallen als bei natürlichen Sanden.

#### 4.2.5.7 Einfluss morphologischer Eigenschaften auf den dynamischen E-Modul

Das mit  $F(12,106)=1.102$  und  $p<0,05$  bei einem  $R^2$  von 0,991 statistisch signifikante Regressionsmodell für den Einfluss morphologischer Kenngrößen und Parameter der Mörtelzusammensetzung auf den dynamischen E-Modul ist in Tab. 4.10 dargestellt.

Tab. 4.10: Regressionsergebnis für die abhängige Variable dynamische Viskosität.

Variable	Regressionskoeffizient	Standardfehler	p-Wert
Achsenabschnitt	32.997,27	799,43	0,000
w/z-Wert (0,55)	-2.832,58	534,35	0,000
b/gk-Wert (1,05)	-432,31	89,82	0,000
Sieblinie (BC)	298,07	277,74	0,286
Materialursprung (RZ)	5.896,81	5.992,41	0,327
$LL_E$	-38,58	11,06	0,001
w/z-Wert (0,55) : $LL_E$	40,00	11,97	0,001
Sieblinie (BC) : $LL_E$	-25,27	7,82	0,002
Materialursprung (RZ) : $LL_E$	-432,59	160,52	0,008
$d_{v50}(AT_{3D})$	26.874,83	7.171,45	0,000
w/z-Wert (0,55) : $d_{v50}(AT_{3D})$	-30.111,43	6.573,65	0,000
$d_{v90/10}(AT_{3D})$	1.576,96	528,11	0,004
w/z-Wert (0,55) : $d_{v90/10}(AT_{3D})$	316,75	94,05	0,001

Abb. 4.38 zeigt den komplexen Einfluss des Anteils länglicher Körner  $LL_E$  auf den dynamischen E-Modul, welcher durch Interaktionen mit dem w/z-Wert, der Sieblinie und dem Materialursprung gekennzeichnet ist. Abb. 4.38 b) zeigt für einen w/z-Wert von 0,55, dass der dynamische E-Modul niedriger anzusetzen ist, als bei einem w/z-Wert von 0,45. Die Steigung der Geraden, welche die Abnahme des dynamischen E-Moduls bei steigendem  $LL_E$  kennzeichnet, fällt geringer aus. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich für die Interaktion zwischen der Sieblinie und  $LL_E$ . Für den Einfluss des Materialursprungs zeigt sich, dass die Abnahme des dynamischen E-Moduls bei steigendem  $LL_E$  im Fall von rezyklierter Gesteinskörnung stärker ausgeprägt ist als bei natürlicher Gesteinskörnung.

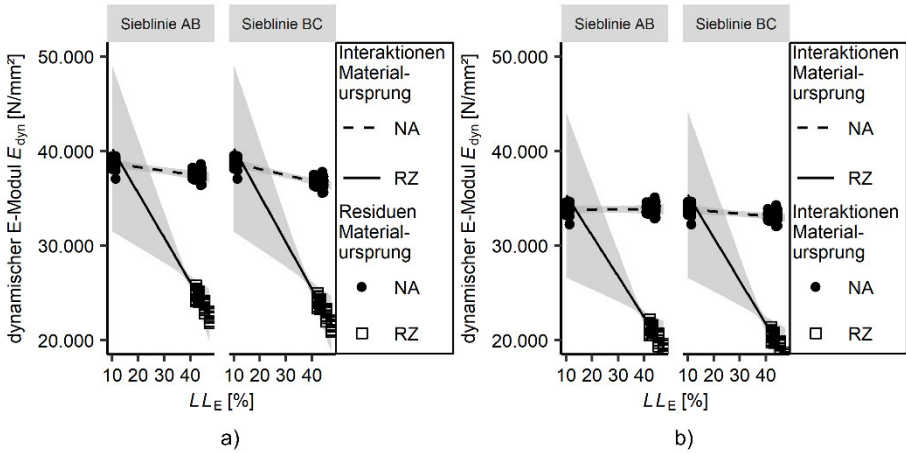


Abb. 4.38: Einfluss des Anteils länglicher Körner  $LL_E$  auf den dynamischen E-Modul in Abhängigkeit von der Sieblinie und vom Materialursprung mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) a) für einen w/z-Wert=0,45 und b) für einen w/z-Wert=0,55.

Obwohl ein statistisch signifikanter Einfluss anhand der Regressionsanalyse identifiziert werden kann, ist die starke Zunahme des dynamischen E-Moduls bei abnehmendem  $LL_E$  insbesondere im Bereich niedriger  $LL_E$ -Werte mit großen Konfidenzintervallen behaftet, was eine Interpretation dieses Versuchsergebnisses erschwert. Zusätzliche Versuche mit natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen mit niedrigerem  $LL_E$  würden zu einer verbesserten Abschätzung des morphologischen Einflusses der Gesteinskörnung auf den dynamischen E-Modul führen.

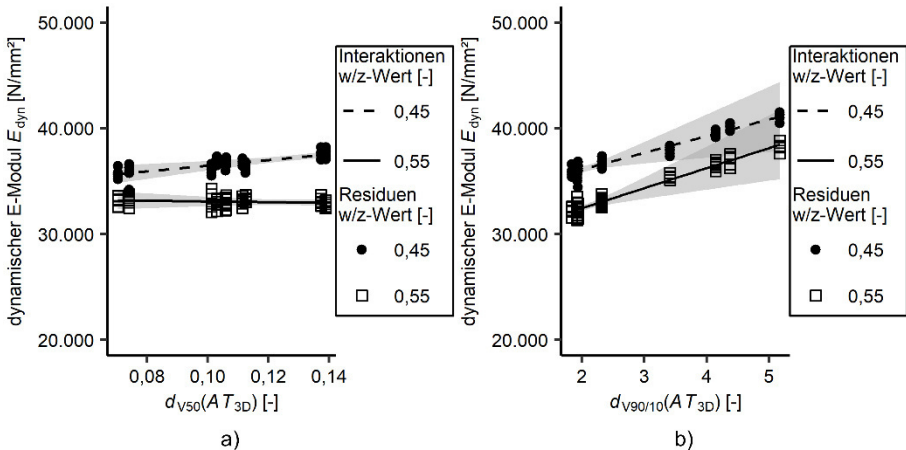


Abb. 4.39: Einfluss der Eckigkeit auf den dynamischen E-Modul mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von  $d_{v50}(AT_{3D})$  in Abhängigkeit vom w/z-Wert und b) Einfluss von  $d_{v90/10}(AT_{3D})$  in Abhängigkeit vom w/z-Wert.

Die Abnahme des E-Moduls bei zunehmendem Anteil länglicher Körner wird in der Literatur nicht beschrieben. Die Abnahme des E-Moduls bei Einsatz von rezyklierte Gesteinskörnung entspricht allerdings der Beobachtung anderer Untersuchungen und lässt sich auf den verringerten E-Modul der rezyklierten Gesteinskörnung gegenüber natürlicher Gesteinskörnung zurückführen [14, 300, 301]. Als mögliche Ursache für die Abnahme bei steigendem  $LL_E$  könnte der Aufweitungseffekt der Packungsdichte, siehe Abb. 4.25, aufgrund eines erhöhten Anteils an länglichen Körnern sein. Bei steigendem Anteil länglicher Körner könnte daher der Hohlraumgehalt um länglichere Körner herumsteigen, welcher mit dem im frischen Zustand zur Verfügung stehenden Bindemittelteil aufgefüllt wird. Grundsätzlich zeigt sich, dass sowohl der dynamische als auch statische E-Modul vom Volumen der Gesteinskörnung abhängig ist [271]. Da der E-Modul der Gesteinskörnung über der der Bindemittelsteinmatrix liegt, nimmt der E-Modul von Mörtel oder Beton mit steigendem Gesteinskörnungsvolumen zu [271]. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung wird die Masse der Gesteinskörnung konstant gehalten und der w/z-Wert sowie der b/gk-Wert vorgegeben. Damit ergeben sich in Abhängigkeit von der Rohdichte der Gesteinskörnung variierende Bindemittelteilvolumina, was die Interpretation der vorliegenden Versuchsergebnisse beeinflusst. Weiterführende Versuche, bei denen das Bindemittelteilvolumen als unabhängige Variable auf zwei Stufen berücksichtigt wird, könnten daher zu einem verbesserten Verständnis des Einflusses von  $LL_E$  auf den dynamischen E-Modul beitragen.

Entsprechend Abb. 4.39 hat sowohl  $d_{V50}(AT_{3D})$  einen signifikanten Einfluss auf den dynamischen E-Modul in Abhängigkeit vom w/z-Wert als auch von  $d_{V90/10}(AT_{3D})$ . Im Fall eines steigenden  $d_{V50}(AT_{3D})$  steigt der dynamische E-Modul bei niedrigem w/z-Wert an, während keine Änderung bei hohem w/z-Wert beobachtet werden kann. Mit zunehmendem  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  steigt der dynamische E-Modul an, wobei dieser Effekt bei hohem w/z-Wert ausgeprägter ist als bei niedrigem. Dies widerspricht grundsätzlich der Beobachtung von Donza et al. [23], die für natürliche Gesteinskörnung eine Abnahme des statischen E-Moduls mit zunehmender Eckigkeit beobachten. Cordeiro et al. [21] können hingegen keinen Einfluss der Eckigkeit auf den E-Modul feststellen und führen dies auf die vergleichbare Kornfestigkeit der untersuchten Gesteinskörnungsarten zurück. Dies entspricht dem hier festgestellten Einfluss von  $d_{V50}(AT_{3D})$  auf den dynamischen E-Modul bei einem w/z-Wert von 0,55. Allerdings werden hier Gesteinskörnungen unterschiedlicher Kornfestigkeit betrachtet. Der E-Modul von Mörtel und Beton wird maßgeblich vom E-Modul des Gesteinskörnungsanteils bestimmt [271]. Insofern könnte der hier beobachtete Anstieg des dynamischen E-Moduls auch auf Unterschiede in der Kornfestigkeit und damit im E-Modul der verwendeten Gesteinskörnung liegen, die jedoch im Rahmen dieser Untersuchung nicht quantifiziert wird.

#### **4.2.6 Zusammenfassung und Fazit**

Die Versuchsergebnisse zum Einfluss von  $d_{V50}(LL_E)$ ,  $LL_E$ ,  $d_{V50}(AT_{3D})$  und  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  auf die untersuchten Frisch- und Festmörtel­eigenschaften sind in Tab. 4.11 zusammengefasst. Liegen Interaktionen mit anderen Parametern vor, sind diese in Klammern angegeben. Entsprechend der Erwartung zeigt sich, dass der Grad der Länglichkeit sowie der Anteil länglicher Körner vor allem einen Einfluss auf die Frischmörtel­eigenschaften haben, da dieser morphologische Parameter insbesondere das Fließverhal-

ten Mörtel beeinflusst. Nur der dynamische E-Modul bildet eine Ausnahme für die Festmörtel Eigenschaften. Die Eckigkeit hingegen führt sowohl bei den Frisch- als auch den Festmörtel Eigenschaften zu einer Beeinflussung des Ergebnisses. Im Fall der Festmörtel Eigenschaften Druckfestigkeit und E-Modul hängt die Art der Beeinflussung des Messergebnisses zudem vom Materialursprung des eingesetzten Sandes ab.

Tab. 4.11: Ergebnisse zum Einfluss morphologischer Kenngrößen auf die Frisch- und Festmörtel Eigenschaften.

Beeinflusste Mörtel Eigenschaft	Morphologische Parameter der Gesteinskörnung			
	$d_{v50}(LL_E)$ ↑	$LL_E$ ↑	$d_{v50}(AT_{3D})$ ↑	$d_{v90/10}(AT_{3D})$ ↑
Dynamische Viskosität		↓	↑, ↓ (w/z-Wert)	↑, ↓ (w/z-Wert)
Fließgrenze	~	→, ↓ (Sieblinie)	↑ (b/gk-Wert)	↑ (Sieblinie und w/z-Wert)
Setzmaß und Setzfließmaß	∩	↑	↓ (w/z-Wert)	↓ (w/z-Wert)
Ausbreitmaß	∩	↑	↑, ↓ (Sieblinie)	↓ (w/z-Wert)
Druckfestigkeit			↑, ↓ (Materialursprung)	↓, → (w/z-Wert)
Biegezugfestigkeit			↑	
E-Modul		↓ (Materialursprung, w/z-Wert und Sieblinie)	→, ↑ (w/z-Wert)	↑ (w/z-Wert)
↑ Eigenschaft nimmt zu ↓ Eigenschaft nimmt ab → Eigenschaft bleibt unverändert ~ Eigenschaft nimmt zunächst zu und anschließend ab ∩ Eigenschaft nimmt zunächst ab und anschließend zu () Angabe des Interaktionseffekts				

Anhand der grundlegenden Parameter zur Beschreibung der Konsistenz von Mörtel, dynamische Viskosität und Fließgrenze, zeigt sich der Einfluss des Grades der Länglichkeit und des Anteils an länglichen Körnern. Insbesondere die Wirkungsweise morphologischer Parameter auf die Fließgrenze werden auch bei Bestimmung des Setzmaßes, Setzfließmaßes oder Ausbreitmaßes beobachtet.

Eine Erhöhung des Anteils länglicher Körner bewirkt eine Abnahme der dynamischen Viskosität. Je nach gewählter Mörtelzusammensetzung kann die Erhöhung des Anteils länglicher Körner damit einen Vor- oder Nachteil für die Verarbeitbarkeit von Mörteln bedeuten. Handelt es sich um eine steife Mörtelzusammensetzung kann diese Erhöhung des Anteils länglicher Körner zu einer erhöhten Fließfähigkeit des Mörtels und

damit vereinfachten Verarbeitbarkeit führen, während bei fließfähigeren Zusammensetzungen das Entmischungsrisiko möglicherweise steigt.

Für die Fließgrenze und analog dazu für das Setzmaß, das Setzfließmaß und das Ausbreitmaß zeigt sich mit zunehmender Länglichkeit der Körner zunächst eine Abnahme und anschließend eine Zunahme der Fließgrenze. Inwiefern eine erhöhte Länglichkeit von Körnern sich positiv oder negativ auf die Verarbeitbarkeit der Mörtelzusammensetzung auswirkt, hängt damit von der Bezugsgröße ab.

Bei Erhöhung des Anteils länglicher Körner zeigt sich in Abhängigkeit von der Sieblinie eine Verringerung der Fließgrenze und analog dazu eine Zunahme von Setz-, Setzfließ- und Ausbreitmaß. Im Fall einer möglichen Entmischung bei fließfähigen Mörtelzusammensetzungen bietet es sich daher an, den Anteil länglicher Körner zu begrenzen, um die Fließgrenze der Mörtelzusammensetzung zu erhöhen. Damit steigt der Scherwiderstand, welcher überwunden werden muss, bevor die Mörtelzusammensetzung zu fließen beginnt, wodurch das Entmischungsrisiko möglicherweise minimiert werden kann. Handelt es sich jedoch um eine steife Mörtelzusammensetzung, könnte eine Erhöhung des Anteils länglicher Körner eine vereinfachte Verarbeitbarkeit ermöglichen. Diese resultiert möglicherweise aus einem erhöhten Hohlraumgehalt der Packung aufgrund des Aufweitungseffektes bei Einsatz erhöhter Anteile länglicher Körner, welcher zu einer Verringerung der Fließgrenze beiträgt.

Der Einfluss der Eckigkeit in Form von  $d_{V50}(AT_{3D})$  und  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  auf die Konsistenz ist differenziert zu betrachten. Bei steiferer Mörtelzusammensetzung ist durch den Einsatz von Gesteinskörnungen mit erhöhter Eckigkeit eine abnehmende dynamische Viskosität zu beobachten, was zu einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit führen kann. Für Mörtel mit hohem w/z-Wert bewirkt eine Zunahme der Eckigkeit der Körner hingegen eine Zunahme der dynamischen Viskosität und damit eine mögliche Reduktion der Verarbeitbarkeit. Mit zunehmender Eckigkeit der Körner steigt die Fließgrenze, bzw. analog dazu nehmen Setz-, Setzfließ- und Ausbreitmaß ab. Diese Zunahme bzw. Abnahme interagiert mit verschiedenen anderen Parametern der Mörtelzusammensetzung wie dem b/gk-Wert, dem w/z-Wert sowie der Sieblinie. Dieses Phänomen kann möglicherweise auf die erhöhte spezifische Oberfläche von eckigen Körnern und dem damit einhergehenden erhöhten Bindemittelleimanspruch zurückgeführt werden. Infolgedessen kommt es zu einer erhöhten Verzahnung zwischen Körnern, die besonders bei Mörtelzusammensetzungen mit niedrigem w/z-Wert ausgeprägt ist. Soll der Anteil an Brechsanden erhöht werden, ist daher insbesondere auf die in der Regel erhöhte Eckigkeit der Körner zu achten. Kann im Aufbereitungsprozess der gebrochenen Gesteinskörnung der Grad der Eckigkeit minimiert werden, bewirkt dies eine weniger ausgeprägte Reduktion der Verarbeitbarkeit im Vergleich zu natürlichen Sanden.

Sowohl der Grad der Länglichkeit als auch der Anteil länglicher Körner scheint keinen signifikanten Einfluss auf die Festmörtel Eigenschaften Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit zu haben. Die Eckigkeit der Körner beeinflusst diese Kenngrößen jedoch, was ebenfalls auf den dynamischen E-Modul zutrifft. Insbesondere bei Verwendung natürlicher Gesteinskörnung kann eine Steigerung der Eckigkeit der Körner zu einer Verbesserung der Druckfestigkeit führen, da sich vermutlich vermehrt Verbundkräfte zwischen Korn und Bindemittelsteinmatrix ausbilden können. Für Mörtelzusammen-



setzungen mit rezyklierter Gesteinskörnung kann hingegen eine Abnahme der Druckfestigkeit bei Steigerung der Eckigkeit beobachtet werden. Dieser beobachtete Effekt ist jedoch mit großen statistischen Unsicherheiten behaftet. Zur Steigerung der Aussagekraft der durchgeführten multiplen linearen Regressionsanalyse wären daher weiterführende Untersuchungen an Mörtelzusammensetzungen mit rezyklierter Gesteinskörnung mit niedriger Eckigkeit der Körner erforderlich. Vor dem Hintergrund dieses Einflusses der Eckigkeit von Körnern auf die Druckfestigkeit von Mörtelzusammensetzungen mit rezyklierten Gesteinskörnungen bietet es sich an, bei der Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung auf möglichst niedrige Eckigkeitswerte zu achten, um keinen negativen Einfluss auf diese wichtige Festmörtel eigenschaft zu generieren.

Unabhängig vom Materialursprung steigt die Biegezugfestigkeit hingegen bei Zunahme der Eckigkeit der Körner. Für den dynamischen E-Modul zeigt sich ein gewisser Anstieg bei zunehmendem Grad der Eckigkeit der Körner. Bei Einsatz von Brechsand aus rezyklierten Gesteinskörnungen kann daher eine Erhöhung der Eckigkeit und Rauigkeit vorteilhaft für eine Erhöhung des dynamischen E-Moduls und der Biegezugfestigkeit sein. Allerdings basieren die im Rahmen dieser Untersuchung vorgestellten Versuchsergebnisse lediglich auf zwei verschiedenen Materialien rezyklierten Brechsandes. Eine erweiterte Datenbasis wäre für eine aussagekräftigere Bewertung dieser Beobachtung erforderlich, welche zudem die Analyse des Einflusses verschiedener Bindemittelleimvolumina beinhalten könnte.

Grundsätzlich bewirkt insbesondere eine erhöhte Eckigkeit der Körner sowohl Vor- als auch Nachteile im Hinblick auf die Frisch- und Festmörtel eigenschaften. Während die Verarbeitbarkeit tendenziell abnimmt, kann die Erhöhung der Eckigkeit allerdings auch eine Verringerung des Entmischungsrisikos bei fließfähigen Mörtelzusammensetzungen bedeuten. Die Festigkeitseigenschaften werden, mit einigen Ausnahmen, vor allem positiv durch erhöhte Eckigkeitswerte der Gesteinskörnung beeinflusst. Ist eine Erhöhung des Anteils an Brechsanden das Ziel, sollte daher insbesondere der Eckigkeit der Körner bereits im Aufbereitungsprozess Aufmerksamkeit geschenkt werden.

## **4.3 Verifikation der Versuchsergebnisse und Optimierung der Zusammensetzung von Sieblinien mit Brechsand**

### **4.3.1 Einleitung**

Ziel der im Folgenden vorgestellten Versuchsergebnisse ist es zum einen die in Abschnitt 4.2 dargestellten Ergebnisse zu verifizieren und zum anderen, basierend auf den Versuchsergebnissen aus Abschnitt 4.2, Mörtelzusammensetzungen mit hohem Brechsandanteil bei definierten Anforderungen an Verarbeitbarkeit und Festigkeit zu entwickeln. Neben Rheinsand aus der gleichen Quelle wie dem in Abschnitt 4.2 verwendeten Rheinsand, kommen als Gesteinskörnung verschiedene Brechsande aus Quellen zum Einsatz, die sich von denen aus Abschnitt 4.2 unterscheiden. Analog zu dem Vorgehen aus Abschnitt 4.2 werden zunächst die morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung anhand von CT-Aufnahmen bestimmt. Anhand der morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung wird im Anschluss ein Optimierungsansatz zur Zusammenstellung von Sieblinien erarbeitet, mit dem Ziel, einen möglichst hohen Anteil des natürlichen Rheinsandes durch einen der zur Verfügung stehenden

Brechsande zu ersetzen. Die Ergebnisse der Bestimmung von Frisch- und Festmörtel Eigenschaften werden anschließend sowohl im Hinblick auf eine Übereinstimmung mit den in Abschnitt 4.2 erzielten Ergebnissen überprüft als auch auf den Einfluss des erhöhten Anteils an Brechsand auf die Mörtel Eigenschaften ausgewertet.

### 4.3.2 Materialien

#### 4.3.2.1 Gesteinskörnung

Als natürliche Gesteinskörnung wird Rheinsand (SA-V) aus der gleichen Quelle, jedoch aus anderer Charge als in Abschnitt 4.2 verwendet. Als natürlicher Brechsand kommt ein gebrochener Andesitsplitt (S-V) zum Einsatz. Zusätzlich werden zwei rezyklierte Brechsande, hergestellt aus Abbruchmaterial, verwendet. Hierbei handelt es sich um einen rezyklierten Brechsand mit hohem Anteil an Betonbruch (BB-V) sowie einen rezyklierten Brechsand mit hohem Anteil an Mauerwerksbruch (MB-V). Abb. 4.40 zeigt jeweils die Kornfraktion zwischen 1 mm und 2 mm der hier verwendeten Materialien.

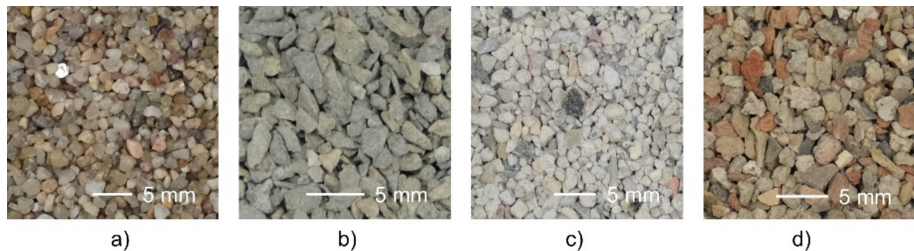


Abb. 4.40: Kornfraktion zwischen 1 mm und 2 mm Siebgröße der verwendeten Materialien a) Rheinsand, b) Andesitsplitt, c) rezyklierter Betonbruch und d) rezyklierter Mauerwerksbruch.

Alle Gesteinskörnungen werden nach dem Sieben in ofentrockenem Zustand in enge Kornfraktionen zu einer AB-Sieblinie, entsprechend den Angaben in Tab. 3.5 aus Abschnitt 3.2.2, zusammengesetzt.

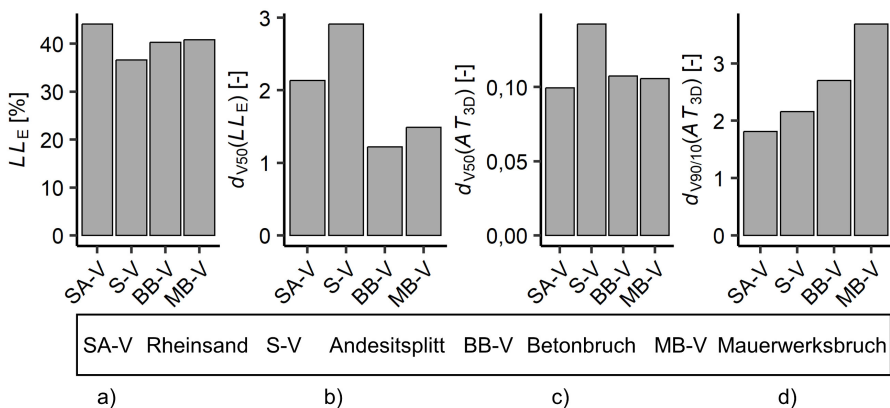


Abb. 4.41: Morphologische Charakterisierung der verwendeten Gesteinskörnung mit a)  $LL_E$ , b)  $d_{v50}(LL_E)$ , c)  $d_{v50}(AT_{3D})$  und d)  $d_{v90/10}(AT_{3D})$ .

Die morphologischen Kenngrößen  $d_{V50}(LLE)$ ,  $LLE$ ,  $d_{V50}(AT_{3D})$  und  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  werden anhand von CT-Aufnahmen bestimmt. Hierfür werden jeweils fünf Teilproben jedes Materials, analog zu dem Vorgehen aus Abschnitt 3.2.3, tomographiert. Anschließend erfolgt die Bildbearbeitung und automatisierte Kornsegmentierung nach Abschnitt 2.3. Das Ergebnis der morphologischen Charakterisierung ist in Abb. 4.41 für die Länglichkeit und für die Eckigkeit dargestellt.

Analog zum Vorgehen in Abschnitt 4.2 wird für jede Gesteinskörnungsschüttung die scheinbare Rohdichte  $\rho_a$  nach DIN EN 1097-6 bestimmt. Für den Rheinsand erfolgt zusätzlich die Bestimmung der Wasseraufnahme  $WA$  nach DIN EN 1097-6. Für die verwendeten Brechsande wird das in Abschnitt 4.2.3.1 beschriebene Verfahren zur Bestimmung der Wasseraufnahme mittels elektrischen Widerstands angewendet. Für alle Schüttungen wird der Fließkoeffizient  $E_c$  nach DIN EN 933-6 und die Schüttdichte  $\rho_b$  nach 1097-3 bestimmt. Die Versuchsergebnisse sind in Tab. 4.12 zusammengefasst.

Tab. 4.12: Charakteristische Materialeigenschaften der verwendeten Gesteinskörnungsschüttungen.

<b>Material</b>	<b>Scheinbare Rohdichte</b> $\rho_a$ [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>Wasseraufnahme</b> $WA$ [%]	<b>Schüttdichte</b> $\rho_b$ [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>Fließkoeffizient</b> $E_c$ [s]
Rheinsand SA-V	2,59	0,0	1,51	30
Andesitsplitt S-V	2,64	5,8	1,25	42
Betonbruch BB-V	2,62	13,7	1,17	39
Mauerwerksbruch MB-V	2,61	11,5	1,13	42

#### 4.3.2.2 Zement und Kalksteinmehl

Zum Einsatz kommen der Portlandzement CEM I 42,5 R sowie das Kalksteinmehl, welche ebenfalls in Abschnitt 4.2 verwendet werden.

#### 4.3.2.3 Mörtelzusammensetzung

Die Mörtelzusammensetzung richtet sich nach den Vorgaben aus Abschnitt 4.2.3.3. Der Gesteinskörnungsanteil wird ebenfalls auf 1.700 g festgelegt und setzt sich aus der ofentrockenen Gesteinskörnung, dem Kalksteinmehl sowie dem erforderlichen Zusatzwasser zum Ausgleich der Wasseraufnahme zusammen. Der Anteil an Kalksteinmehl beträgt 12,5 % bezogen auf die Gesamtmasse der Gesteinskörnung. Analog zu Abschnitt 4.2.3.3. entspricht die Menge an Zusatzwasser der in Tab. 4.12 angegebenen Wasseraufnahme  $WA$  nach 24 Stunden, abgemindert mit dem Faktor 0,8. Der

Gesteinskörnungsanteil wird entsprechend der in Abschnitt 3.2.2 vorgestellten Vorgaben zu einer AB-Sieblinie zusammengesetzt. Dabei wird der Gesteinskörnungsanteil einzeln aus den ofengetrockneten Kornfraktionen 0,125/0,25, 0,25/0,5, 0,5/1 und 1/2 zusammengestellt. Die Zusammensetzung des Gesteinskörnungsanteils erfolgt nach Abschnitt 4.3.3 aus bis zu zwei Gesteinskörnungsarten. Hierfür werden optimale Brechsandanteile an der Gesamtgesteinskörnung bestimmt, welche in Tab. 4.13 zusammengefasst sind. Da die Angabe der morphologischen Charakteristika der Gesteinskörnung  $d_{V50}(LLE)$ ,  $LLE$ ,  $d_{V50}(AT_{3D})$  und  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  bezogen auf das Volumen der Körner erfolgt, zeigt Tab. 4.13 ebenfalls optimale Volumenanteile des Brechsandes bezogen auf das Gesamtvolumen der Gesteinskörnung. Die Bestimmung der Einwaage der jeweiligen Gesteinskörnungsart erfolgt daher unter Berücksichtigung der Rohdichte im oberflächentrockenen Zustand  $\rho_{ssd}$ . Entsprechend dem vorgegebenen w/z-Wert und b/gk-Wert werden die Zementmasse sowie die Wassermasse bestimmt.

#### 4.3.3 Versuchsplanung und Optimierung der Zusammensetzung von Sieblinien aus natürlichem Sand und Brechsand

Diese Versuchsreihe dient zum einen der Verifikation der in Abschnitt 4.2 dargestellten Versuchsergebnisse bei Verwendung von Gesteinskörnungen aus anderer Quelle und zum anderen zur Optimierung des Brechsandanteils an der Gesamtgesteinskörnung. Zur Verifikation der Versuchsergebnisse werden Mörtelzusammensetzungen hergestellt, bei denen die gleichen Parameter der Mörtelzusammensetzung als unabhängige Variablen wie in Abschnitt 4.2 variiert werden, jedoch in geringerem Umfang. Grundsätzlich kommen alle Gesteinskörnungen als AB-Sieblinie zum Einsatz. Je Materialart der Gesteinskörnung wird eine Mörtelzusammensetzung mit eher fließfähiger Konsistenz (w/z-Wert von 0,55 und b/gk-Wert von 0,95) und eine Mörtelzusammensetzung mit steiferer Konsistenz (w/z-Wert von 0,45 und b/gk-Wert von 1,05) hergestellt. Damit ergibt sich für die vier Gesteinskörnungsarten eine Anzahl von acht Versuchen. Hinzu kommen Mörtelzusammensetzungen, die aus natürlichem Rheinsand und einem möglichst hohen Anteil an einem der drei zur Verfügung stehenden Brechsande bestehen. Basierend auf den Versuchsergebnissen aus Abschnitt 4.2.5 kann der Einfluss morphologischer Charakteristika der Gesteinskörnung auf die Mörtel Eigenschaften im frischen und festen Zustand zurückgeführt werden. Ziel ist die Herstellung von Mörtel mit möglichst hohem Anteil an natürlichem oder rezyklierten Brechsand, welcher Abweichungen ausschließlich innerhalb definierter Grenzen gegenüber den Frisch- und Festmörtel Eigenschaften aus natürlichem Sand aufweist. Für die durchgeführte Optimierung des Brechsandanteils werden folgende Randbedingungen definiert:

1. Die Zusammensetzung der Sieblinie erfolgt aus natürlichem Rheinsand und einer anderen Brechsandsorte. Für das Gesamtvolumen aus Sand und Brechsand  $V_{GK}$  gilt Gleichung (4.11).

$$V_{GK} = V_{Sand} + V_{Brechsand} \quad (4.11)$$

mit:  $V_{GK}$  Gesamtvolumen aus Sand und Brechsand [ $m^3$ ]

$V_{Sand}$  Volumen des Sandanteils [ $m^3$ ]

$V_{Brechsand}$  Volumen des Brechsandanteils [ $m^3$ ]

2. Die Druckfestigkeit des Mörtels verringert sich maximal um den Abminderungsfaktor  $x_f$  im Vergleich zu Mörtel, der mit 100 % natürlichem Sand hergestellt wird.
3. Das Ausbreitmaß des Mörtels liegt über der definierten Mindestanforderung für das Ausbreitmaß  $a_{min}$ .

Tab. 4.13: Randbedingungen für die Optimierung des Anteils an Brechsand am Gesamtvolumen der Gesteinskörnung sowie das Optimierungsergebnis.

<b>Brechsand</b>	<b>w/z-Wert</b> [-]	<b>b/gk-Wert</b> [-]	<b>Abminderungsfaktor</b> $x_f$ [-]	<b>Mindestausbreitmaß</b> $a_{min}$ [mm]	<b>Brechsandvolumen</b> $V_{Brechsand}$ [%]	<b>Sandvolumen</b> $V_{Sand}$ [%]
Betonbruch BB-V	0,55	0,95	0,10	190	71,3	28,7
Mauerwerksbruch MB-V	0,55	0,95	0,10	190	75,1	24,9
Andesitplitt S-V	0,55	0,95	0,10	190	100,0	0,0
Betonbruch BB-V	0,45	1,05	0,10	190	72,8	27,2
Mauerwerksbruch MB-V	0,45	1,05	0,10	190	69,5	30,5
Andesitplitt S-V	0,45	1,05	0,10	190	100,0	0,0
Betonbruch BB-V	0,55	0,95	0,05	190	45,9	54,1
Mauerwerksbruch MB-V	0,55	0,95	0,05	190	47,0	53,0
Andesitplitt S-V	0,55	0,95	0,05	190	100,0	0,0
Betonbruch BB-V	0,45	1,05	0,05	190	45,8	54,2
Mauerwerksbruch MB-V	0,45	1,05	0,05	190	41,33	58,7
Andesitplitt S-V	0,45	1,05	0,05	190	100,0	0,0

Zur Optimierung der Zusammenstellung der Sieblinie, im Hinblick auf einen möglichst hohen Anteil an Brechsand, wird Matlab (MathWorks) [302] verwendet. Matlab stellt eine Reihe von Optimierungsalgorithmen zur Verfügung. Grundsätzliches Ziel einer Optimierung ist, unter den vorgegebenen Randbedingungen eine optimale Lösung für ein System mit mehreren Variablen zu finden [303]. Im Rahmen dieser Untersuchung wird die Optimierung des Anteils von Brechsand an dem Gesamtvolumen der Gesteinskörnung als „problembasiert“ ausgeführt. Dies bedeutet, dass die oben definierten Randbedingungen vorgegeben werden, eine Festlegung von w/z-Wert, b/gk-Wert und Sieblinie erfolgt und die Daten zur morphologischen Charakterisierung der Gesteinskörnung eingelesen werden. Anschließend wählt Matlab automatisch einen geeigneten Optimierungsalgorithmus aus und berechnet den maximal möglichen Brechsandanteil auf Basis der definierten Randbedingungen. Im Fall der vorliegenden Daten wählt Matlab den nicht-linearen Optimierungsalgorithmus „fmincon“ als geeignet aus. Das Ergebnis dieser Optimierung ist in Tab. 4.13 in den Spalten sieben und acht als Anteil von Brechsand und natürlichem Sand bezogen auf das Gesamtvolumen der Gesteinskörnung angegeben.

#### **4.3.4      Versuchsablauf**

Die Herstellung des Mörtels, sowie die Bestimmung von Frischmörtelroh­dichte, Setzmaß, Setzfließmaß und Ausbreitmaß erfolgen analog zu dem in Abschnitt 4.2.4.1 beschriebenen Vorgehen. Im Unterschied zu den Versuchen aus Abschnitt 4.2.4.1 wird jedoch im Rahmen der Verifikation auf die Bestimmung der rheologischen Kenngrößen Fließgrenze und dynamische Viskosität verzichtet. Nach dem manuellen Verdichten des Frischmörtels lagern die Mörtelprismen bis zum Ausschalen für 24 Stunden in einer Klimatrube bei  $20 \pm 2$  °C und einer Luftfeuchtigkeit von mindesten 90 %. Anschließend erfolgt eine Lagerung für weitere 27 Tage bei  $20 \pm 2$  °C unter Wasser. Analog zu dem in Abschnitt 4.2.4.2 beschriebenen Vorgehen, wird der dynamische E-Modul mit dem Ultraschallmessgerät PUNDIT PL-200/PE (proceq) bestimmt. Zur Bestimmung von Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1 kommt die kombinierte Druck- und Biegezugprüfmaschine ZK 300-15 (TESTING Bluhm & Feuerherdt GmbH) zum Einsatz.

#### **4.3.5      Ergebnisse und Diskussion**

##### **4.3.5.1    Verifikation der Versuchsergebnisse**

Die Versuchsergebnisse, auf welchen die folgende Diskussion beruht, können Anhang G, Tab. G.1 bis Tab. G.3 entnommen werden. Inwiefern die Ergebnisse aus Abschnitt 4.2 anhand der im Folgenden vorgestellten Untersuchungsergebnisse bei Verwendung bisher nicht verwendeten Gesteinskörnungen bestätigt werden können, wird durch Bestimmung des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  überprüft. Neben dem  $R^2$  der Regressionsanalyse, bei Verwendung der Datenbasis aus Abschnitt 4.2, listet Tab. 4.14 zusätzlich das  $R^2$  der Regressionsmodelle aus Abschnitt 4.2 unter Verwendung der Datenbasis aus Abschnitt 4.3 auf.

Tab. 4.14: Vergleich von  $R^2$  bei Verwendung des Regressionsmodells aus Abschnitt 4.2 mit den Daten aus Abschnitt 4.2 sowie zur Verifikation aus Abschnitt 4.3.

Mörtel eigenschaft	$R^2$ bei Verwendung der Daten aus Abschnitt 4.2	$R^2$ bei Verwendung der Daten aus Abschnitt 4.3
Setzmaß	0,977	0,855 (0,948)*
Setzfließmaß	0,969	0,728 (0,952)*
Ausbreitmaß	0,960	0,250 (0,836)*
Dynamischer E-Modul	0,991	0,741
Biegezugfestigkeit	0,538	0,540
Druckfestigkeit	0,956	0,791
* $R^2$ bei Ausschluss von Mörtelzusammensetzungen mit Andesitsplitt		

Je näher die beiden Bestimmtheitswerte beieinander liegen, desto besser ist das in Abschnitt 4.2 ermittelte Regressionsmodell auch auf Mörtelzusammensetzungen, hergestellt mit anderen Gesteinskörnungen, anzuwenden. Grundsätzlich zeigt sich, dass das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  für die Versuche zur Verifikation niedriger liegt im Vergleich zu den Ergebnissen aus Abschnitt 4.2. Dies entspricht der Erwartung, da die Regressionsmodelle nicht auf den Versuchsergebnissen zur Verifikation basieren.

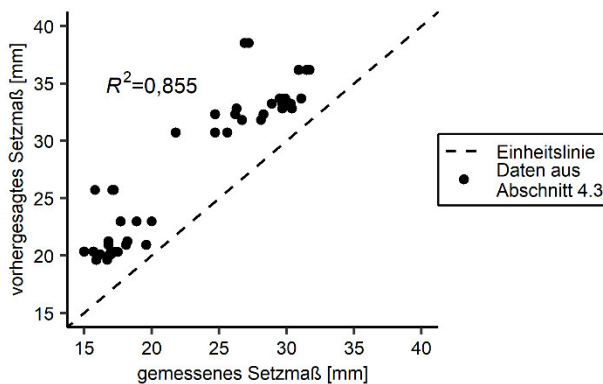


Abb. 4.42: Vergleich von in Abschnitt 4.3 gemessenem Setzmaß und mittels Regressionsmodell aus Abschnitt 4.2 vorhergesagtem Setzmaß inklusive Einheitslinie und Bestimmtheitsmaß  $R^2$ .

Obwohl die Versuchsdurchführung in Abschnitt 4.3 der aus Abschnitt 4.2 entspricht, kann davon ausgegangen werden, dass gewisse Parameter wie möglicherweise das Laborklima, nicht exakt übereinstimmen. Je größer die Abweichung zwischen den beiden ermittelten  $R^2$ -Werten, desto eher scheint das in Abschnitt 4.2 ermittelte Regressionsmodell Varianzen nicht zu erklären, die bei Verwendung von anderen Gesteinskörnungen im Rahmen der Versuche zur Verifikation auftreten. Starke Abweichungen, wie dies nach Tab. 4.14 im Fall des Ausbreitmaßes beobachtet werden kann, können einen Hinweis darauf geben, dass das in Abschnitt 4.2 ermittelte Regressionsmodell

systematische Zusammenhänge, die sich aus den morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung ergeben, nicht erfasst.

Im Fall von Setzmaß und Setzfließmaß liegt das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  bei Verwendung der Versuchsergebnisse zur Verifikation aus Abschnitt 4.3 niedriger. Die Abweichung zu den in Abschnitt 4.2 ermittelten Werten ist jedoch nicht sehr groß. Abb. 4.42 zeigt beispielhaft für das Setzmaß den Vergleich zwischen dem hier bestimmten Versuchsergebnis und dem geschätzten Ergebnis bei Verwendung des ermittelten Regressionsmodell aus Abschnitt 4.2. Die Gerade stellt die Einheitslinie dar, welche bei exakter Übereinstimmung der beiden Größen erreicht werden würde. In Abb. 4.42 kann eine systematische Überschätzung der anhand des Regressionsmodells aus Abschnitt 4.2 vorhergesagten Ergebnisse festgestellt werden. Vom Verlauf her besteht jedoch eine hohe Übereinstimmung. Mögliche Ursachen für diese Abweichung können in Abweichungen der morphologischen Eigenschaften der hier verwendeten Gesteinskörnung im Gegensatz zu den morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung aus Abschnitt 4.2 liegen oder auf leicht veränderte Rahmenbedingungen während der Versuchsdurchführung wie zum Beispiel eine abweichende Raumtemperatur oder Luftfeuchtigkeit zurückzuführen zu sein. Im Fall vom Setzmaß und analog dazu im Fall des Setzfließmaßes scheinen beide Ursachen eine Rolle zu spielen.

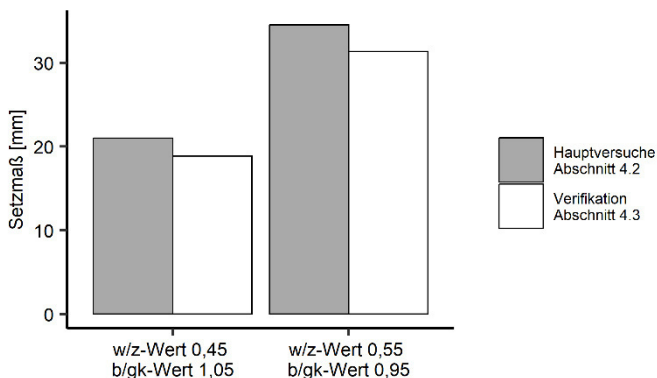


Abb. 4.43: Vergleich von mittlerem Setzmaß für Mörtelzusammensetzungen, bestehend aus Sand der Sieblinie AB der Versuchsergebnisse aus Abschnitt 4.2 und der Versuchsergebnisse aus Abschnitt 4.3.

Abb. 4.43 zeigt das mittlere Setzmaß von Mörtelzusammensetzungen aus Sand der Sieblinie AB sowohl mit w/z-Wert 0,45 und b/gk-Wert 1,05 als auch mit w/z-Wert 0,55 und b/gk-Wert 0,95. Diese Mörtelzusammensetzungen sind sowohl Bestandteil der Versuchsreihe aus Abschnitt 4.2 als auch Abschnitt 4.3. Der verwendete Sand kommt in beiden Fällen aus der gleichen Quelle, unterscheidet sich lediglich in der Liefercharge. Obwohl ein gleichbleibendes Verhalten im Hinblick auf Setz- und Setzfließmaß zu erwarten wären, zeigt sich eine geringfügige Abweichung der Versuchsergebnisse zur Verifikation nach unten. Als Ursache hierfür könnte ein trotz Raumklimatisierung verändertes Laborklima in Frage kommen. So zeigt sich im Mittel eine um 1,3 °C niedrigere Raumlufttemperatur und 14,5 % niedrigere Luftfeuchtigkeit bei Durchführung der hier vorgestellten Versuchsergebnisse im Vergleich zu den Raumluftbedingungen während der Herstellung der Mörtelzusammensetzungen aus Abschnitt 4.2.



Ein Teil des niedrigeren Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  im Fall der Versuche zur Verifikation scheint damit nicht auf unerklärte Einflüsse, ausgehend von den morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung zurückzugehen, sondern auf Unterschiede in der Versuchsdurchführung.

Auch Unterschiede in den morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung, welche nicht anhand des Regressionsmodells erklärt werden können, stellen eine Ursache für die Abweichung zwischen den beiden Bestimmtheitsmaßen dar. So zeigt Abb. 4.44 den Zusammenhang zwischen  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  und dem Setzmaß sowohl für die Versuche aus Abschnitt 4.2 (weiß) als auch für die Versuche zur Verifikation (schwarz) inklusive der in Abschnitt 4.2 ermittelten Regressionsgeraden.

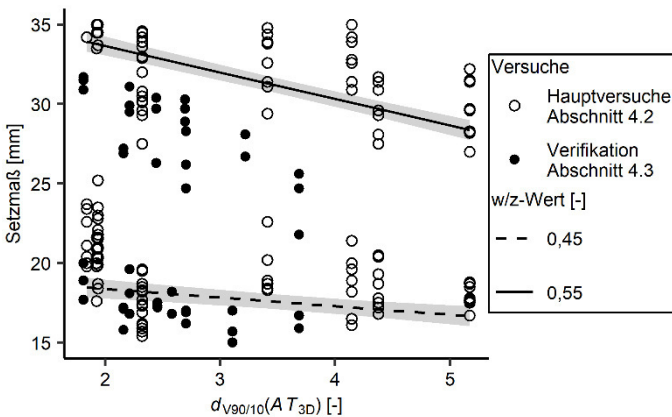


Abb. 4.44: Ergebnis der Regressionsanalyse für  $d_{V90/10}(AT_{3D})$ , basierend auf den Daten aus Abschnitt 4.2 mit zusätzlich schwarz markierten Daten aus Abschnitt 4.3.

Bei einem w/z-Wert von 0,45 kann eine gute Übereinstimmung zwischen den Datenpunkten der Versuchsergebnisse zur Verifikation und der in Abschnitt 4.2 ermittelten Regressionsgeraden festgestellt werden. Für einen w/z-Wert von 0,55 zeigt sich, dass im Unterschied zu den Versuchsergebnissen aus Abschnitt 4.2 die Ergebnisse aus den Verifikationsversuchen stärker abfallen. Auch wenn der generelle Trend, dass bei hohem w/z-Wert mit zunehmendem  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  ein abnehmendes Setzmaß zu erwarten ist, bestätigt werden kann, besteht somit eine Abweichung in der Intensität dieses Trends. Zusätzliche Versuche könnten in diesem Fall zu einer Verbesserung des ermittelten Regressionsmodells führen. Des Weiteren weist die Splittschüttung ein  $d_{V50}(LLE)$  von 2,91 auf und liegt damit oberhalb der  $d_{V50}(LLE)$ -Werte, welche im Rahmen von Abschnitt 4.2 berücksichtigt werden. Auch diese Extrapolation über den bisher betrachteten Rahmen hinaus kann einen Teil der Abweichung zwischen den Bestimmtheitsmaßen erklären. Da dieser Effekt insbesondere im Rahmen der Versuche zum Einfluss morphologischer Kenngrößen auf das Ausbreitmaß auftritt, wird dieser im Folgenden nicht anhand der Ergebnisse für Setz- und Setzfließmaß erläutert, kann jedoch auf diese Kenngrößen übertragen werden.

Eine deutliche Abweichung zwischen den beiden Bestimmtheitsmaßen von  $R^2=0,960$  aus Abschnitt und  $R^2=0,250$  bei Verwendung der Versuchsergebnisse zur Verifikation besteht für das Ausbreitmaß. Ein Vergleich zwischen dem im Rahmen der Versuche

aus Abschnitt 4.3 bestimmten Ausbreitmaß und den anhand des Regressionsmodells geschätzten Werten in Abb. 4.45 b) zeigt, dass für einen überwiegenden Teil der Datenpunkte eine sehr gute Übereinstimmung besteht. Lediglich für sechs Datenpunkte ist die Abweichung von der Einheitsgeraden signifikant, siehe Abb. 4.42 a). Diese stark abweichenden Datenpunkte stellen die Ursache für das niedrige  $R^2$  im Fall der Versuche zur Verifikation dar und sind alle den Mörtelzusammensetzungen mit Splitt als Gesteinskörnung zuzuordnen. Würden diese Mörtelzusammensetzungen nicht berücksichtigt werden, würde das  $R^2$  im Fall der Versuche zur Verifikation auf  $R^2=0,836$  ansteigen. Die verbliebene Abweichung zwischen den Bestimmtheitsmaßen kann möglicherweise genau wie beim Setz- und Setzfließmaß auf Unterschiede in der Versuchsdurchführung zurückzuführen sein.

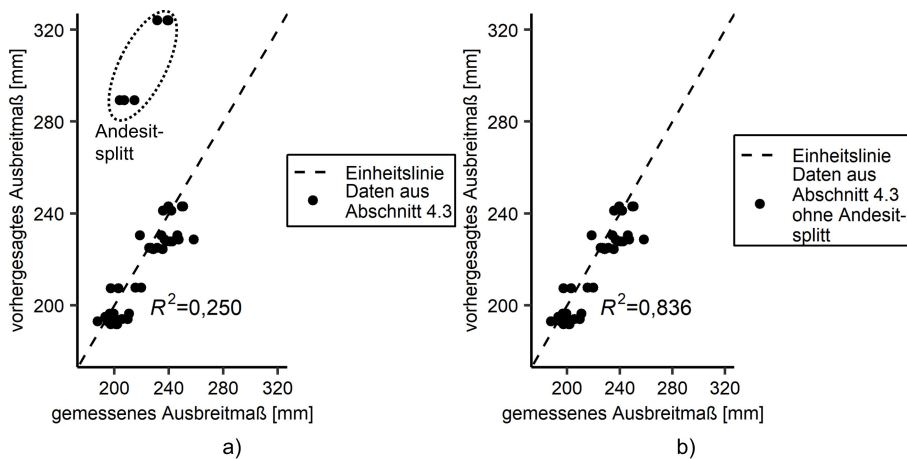


Abb. 4.45: Vergleich von in Abschnitt 4.3 gemessenem Ausbreitmaß und mittels Regressionsmodell aus Abschnitt 4.2 vorhergesagtem Ausbreitmaß inklusive Einheitslinie und Bestimmtheitsmaß  $R^2$  und a) unter Berücksichtigung der Mörtelzusammensetzungen mit Andesitsplitt und b) bei Ausschluss der Mörtelzusammensetzungen mit Andesitsplitt.

Der im Folgenden beschriebene Einfluss der Splittschüttung auf die Abweichung zwischen Regressionsmodell und den im Rahmen der Versuche zur Verifikation ermittelten Ergebnissen kann sowohl für das Ausbreitmaß als auch in geringerem Umfang für das Setz- und Setzfließmaß festgestellt werden. Die Vorhersage des Ausbreitmaßes anhand des in Abschnitt 4.2 ermittelten Regressionsmodells für einen  $d_{V50}(LL_E)$ -Wert von 2,91 stellt eine Extrapolation über den bisher betrachteten Wertebereich zwischen  $1,02 \leq d_{V50}(LL_E) \leq 2,01$  dar. Abb. 4.46 zeigt den Zusammenhang zwischen  $d_{V50}(LL_E)$  und dem Ausbreitmaß inklusive des Teils des Regressionsmodells, welcher den Effekt von  $d_{V50}(LL_E)$  auf das Ausbreitmaß beschreibt. Es ist hierbei anzumerken, dass der dargestellte Haupteffekt den Einfluss bereinigt von anderen Einflussgrößen, wie zum Beispiel dem w/z-Wert, zeigt und daher in einem Bereich mit niedrigeren Ausbreitmaßwerten angesiedelt ist als ein Großteil der tatsächlichen Datenpunkte. Bei einem Vergleich der Datenpunkte in Abb. 4.46 mit der Effektkurve ist daher zu beachten, dass die tatsächlichen Datenpunkte von anderen unabhängigen Variablen wie zum Beispiel dem w/z-Wert, welche Teil des in Abschnitt 4.2.5.4 diskutierten Regressionsmodells

sind, beeinflusst sind, während die Effektkurve um diese Einflussgrößen bereinigt dargestellt ist.

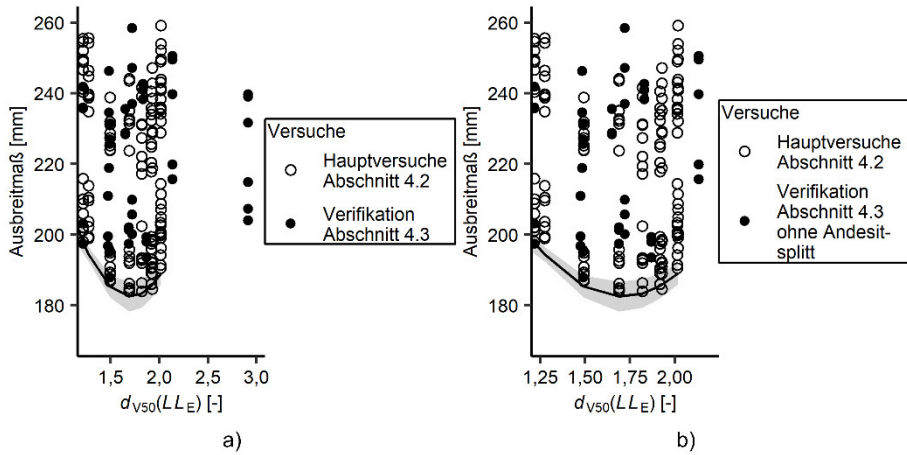


Abb. 4.46: Ergebnis der Regressionsanalyse für  $d_{v50}(LL_E)$ , basierend auf den Daten aus Abschnitt 4.2 mit zusätzlich markierten Daten der Versuchsergebnisse der Verifikation aus Abschnitt 4.3 und a) unter Berücksichtigung der Mörtelzusammensetzungen mit Andesit splitt und b) bei Ausschluss der Mörtelzusammensetzungen mit Andesit splitt.

Ausgenommen die Datenpunkte, welche auf die Mörtelzusammensetzungen mit Andesit splitt aus Abschnitt 4.3 basieren, besteht eine gute Übereinstimmung zwischen den Versuchsergebnissen aus Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3, siehe Abb. 4.46 b). Liegen die morphologischen Eigenschaften des verwendeten Materials im Hinblick auf den Grad der Länglichkeit  $d_{v50}(LL_E)$  im gleichen Wertebereich wie bei Aufstellung des Regressionsmodells in Abschnitt 4.2, können die Versuche zur Verifikation den in Abschnitt 4.2 festgestellten Einfluss von  $d_{v50}(LL_E)$  auf das Ausbreitmaß bestätigen. Entsprechend der Erwartung trifft dies für die Extrapolation über diesen Wertebereich hinaus nicht zu. In Abb. 4.46 a) ist zu sehen, dass die anhand des Regressionsmodells geschätzte quadratische Zunahme des Ausbreitmaßes bei  $d_{v50}(LL_E)$ -Werten ab 1,75 zu einer Überschätzung der tatsächlich beobachteten Werte führt. Das Regressionsmodell zum Einfluss von  $d_{v50}(LL_E)$  auf das Ausbreitmaß und analog dazu auf das Setz- und Setzfließmaß müsste daher auf Werte von  $d_{v50}(LL_E)$  angepasst werden. Hierfür wäre eine größere Datenbasis mit  $d_{v50}(LL_E)$ -Werten größer 2,0 erforderlich.

Die in Abschnitt 4.2 ermittelten Regressionsmodelle für den Zusammenhang zwischen morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung und der Biegezugfestigkeit, der Druckfestigkeit und dem dynamischen E-Modul, können weitestgehend anhand der Versuche in Abschnitt 4.3 verifiziert werden. Für die Biegezugfestigkeit ergibt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen den in Tab. 4.14 gelisteten Bestimmtheitsmaßen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass das Regressionsmodell aus Abschnitt 4.2 bestätigt werden kann. Für die Druckfestigkeit sowie den dynamischen E-Modul zeigt sich, dass das  $R^2$  im Fall der Versuche zur Verifikation unterhalb des  $R^2$ -Wertes der Versuche aus Abschnitt 4.2 liegt. Zu beachten ist, dass die jeweiligen Regressionsmodelle für die Druckfestigkeit und den dynamischen E-Modul den Materialur-

sprung („NA“ für Gesteinskörnung natürlichen Ursprungs und „RZ“ für rezyklierte Gesteinskörnung) beinhalten. Aus diesem Grund werden die Mörtelzusammensetzungen, die eine Mischung aus natürlichem Sand und einem Brechsand enthalten, aus der Auswertung zur Verifikation des Regressionsmodells ausgeschlossen.

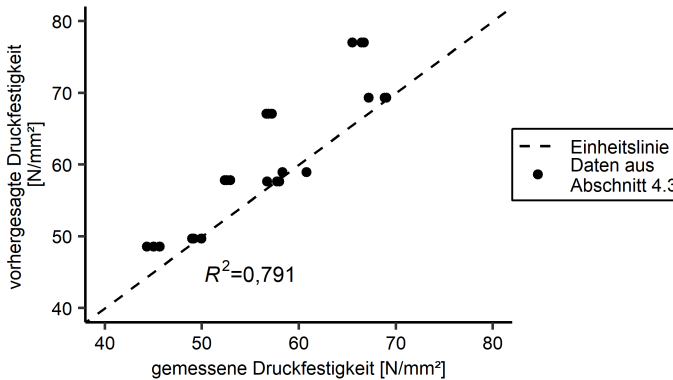


Abb. 4.47: Vergleich von in Abschnitt 4.3 gemessener Druckfestigkeit und mittels Regressionsmodell aus Abschnitt 4.2 vorhergesagter Druckfestigkeit inklusive Einheitslinie und Bestimmtheitsmaß  $R^2$ .

Abb. 4.47 zeigt für die verbliebenen Datensätze am Beispiel der Druckfestigkeit, inwiefern eine Übereinstimmung zwischen den in Abschnitt 4.3 ermittelten Versuchsergebnissen und den anhand des Regressionsmodells vorhergesagten Werten besteht. Hierbei zeigt sich eine leichte Überschätzung der vorhergesagten Druckfestigkeiten im Vergleich zu den tatsächlich gemessenen. Die Datenpunkte folgen jedoch grundsätzlich dem Verlauf der Einheitslinie. Für die unterschiedlichen morphologischen Eigenschaften zeigt sich bei Vergleich der Ergebnisse aus Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3 keine deutliche Abweichung im Hinblick auf den Zusammenhang mit der Druckfestigkeit bzw. dem dynamischen E-Modul.

Mögliche Ursache für die Abweichung des  $R^2$  bei Verwendung der Versuchsergebnisse zur Verifikation, kann jedoch eine systematische Abweichung sowohl der Druckfestigkeit als auch des dynamischen E-Moduls sein. Beispielhaft für die Druckfestigkeit zeigt Abb. 4.48 einen Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen der Mörtelzusammensetzungen aus natürlichem Sand der Sieblinie AB aus Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3. Obwohl sich die Mörtelzusammensetzungen lediglich in der Liefercharge des verwendeten Sandes unterscheiden, zeigt sich, dass systematisch niedrigere Werte im Rahmen der Versuchsreihe zur Verifikation gemessen werden. Hintergrund könnte eine leichte Änderung beim manuellen Verdichten des Frischmörtels in der Prismenschalung oder veränderte Lagertemperaturen trotz Raumklimatisierung sein. Diese Ursachen könnten die Abweichungen zwischen den Bestimmtheitsmaßen aus Tab. 4.14 möglicherweise erklären. Die beobachteten Unterschiede in der mittleren Druckfestigkeiten der Mörtelzusammensetzungen aus Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3 liegen jedoch innerhalb der in DIN EN 196-1 angegebenen Langzeit-Wiederholpräzision. Die Langzeit-Wiederholpräzision gibt dabei die erwartbare Abweichung von Versuchsergebnissen bei Wiederholung von Versuchen mit denselben Materialien und Prüfbedin-

gungen über einen Zeitraum von bis zu einem Jahr an. Diese liegt für die Druckfestigkeit von Mörtelzusammensetzungen hergestellt nach DIN EN 196-1 bei einem Variationskoeffizienten von 3,5 %. Der Mittelwert der Druckfestigkeit von Mörtelzusammensetzungen mit einem w/z-Wert von 0,45, einem b/gk-Wert von 1,05 und einem Gesteinskörnungsanteil aus Sand der Sieblinie AB liegt für die Versuche aus Abschnitt 4.2 bei 69,8 N/mm<sup>2</sup>. Bei einem Variationskoeffizienten von 3,5 % entsprechen Abweichungen von bis zu 2,44 N/mm<sup>2</sup> der angegebenen Langzeit-Wiederholpräzision. Die in Abschnitt 4.3 vorgestellten Versuchsergebnisse der vergleichbaren Mörtelzusammensetzungen weisen Druckfestigkeiten zwischen 67,2 N/mm<sup>2</sup> und 69,0 N/mm<sup>2</sup> auf und liegen damit überwiegend innerhalb der erwartbaren Spannweite von Versuchsergebnissen entsprechend der angegebenen Langzeit-Wiederholpräzision. Gleiches gilt für Mörtelzusammensetzungen bestehend aus Sand der Sieblinie AB, einem w/z-Wert von 0,55 und einem b/gk-Wert von 0,95. Auch wenn für die Versuchsergebnisse vorgestellt in Abschnitt 4.3 systematisch niedrigere Druckfestigkeiten beobachtet werden können, liegen diese Abweichungen folglich innerhalb der zu erwartenden Langzeit-Wiederholpräzision.

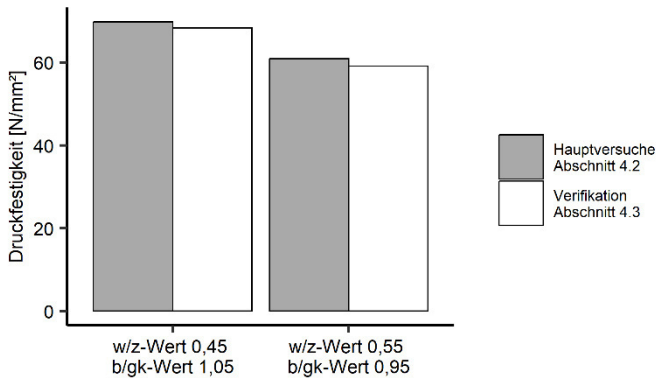


Abb. 4.48: Vergleich von mittlerer Druckfestigkeit für Mörtelzusammensetzungen, bestehend aus Sand der Sieblinie AB aus Abschnitt 4.2 und aus Abschnitt 4.3.

#### 4.3.5.2 Optimierung des Anteils an Brechsand am Gesamtanteil der Gesteinskörnung

Im Rahmen dieser Versuchsreihe sollen Mörtelzusammensetzungen mit maximalem Anteil an Brechsand hergestellt werden, die gewissen Anforderungen an die Druckfestigkeit sowie das Ausbreitmaß entsprechen. Hierfür wird, auf Basis der in Abschnitt 4.2 ermittelten Regressionsmodelle für die Druckfestigkeit und das Ausbreitmaß, eine Optimierung des Anteils an Brechsand durchgeführt. Diese Optimierung basiert auf den morphologischen Eigenschaften der Materialien und erfolgt mit Matlab. Betrachtet werden zwei unterschiedliche Szenarien. Im ersten Fall wird eine maximale Verringerung der Druckfestigkeit der Mörtel mit Brechsand um 5 % gefordert, während das Ausbreitmaß mindestens 190 mm betragen soll. Abb. 4.49 zeigt das Ergebnis der Druckfestigkeit sowie des Ausbreitmaßes für eine Mörtelzusammensetzung mit einem w/z-Wert

## Einfluss morphologischer Kenngrößen auf Mörtel Eigenschaften

von 0,45 und einem b/gk-Wert von 1,05. Abb. 4.50 zeigt das Ergebnis der Druckfestigkeit für den Fall, dass eine Mörtelzusammensetzung mit einem w/z-Wert von 0,55 und einem b/gk-Wert von 0,95 zum Einsatz kommt.

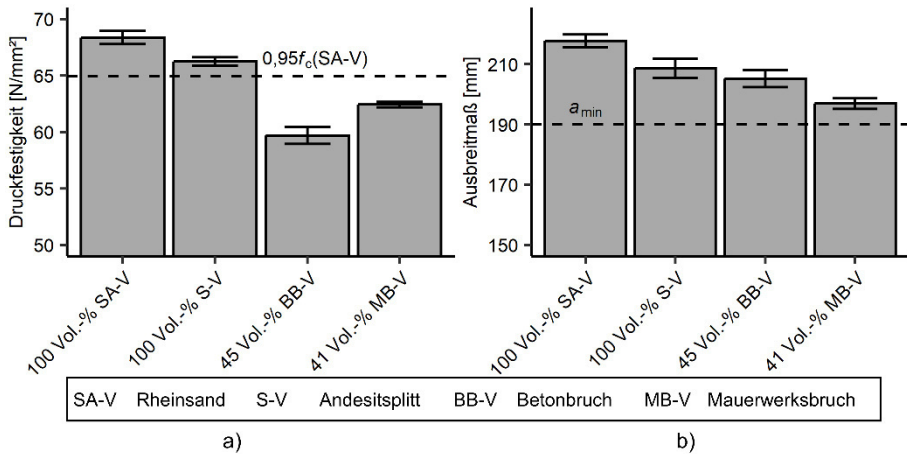


Abb. 4.49: Optimierung einer Mörtelzusammensetzung mit einem w/z-Wert von 0,45, einem b/gk-Wert von 1,05 bei maximaler Verringerung der Druckfestigkeit um 5 % bei Einsatz von Brechsand mit Ergebnissen zur a) Druckfestigkeit und b) Ausbreitmaß.

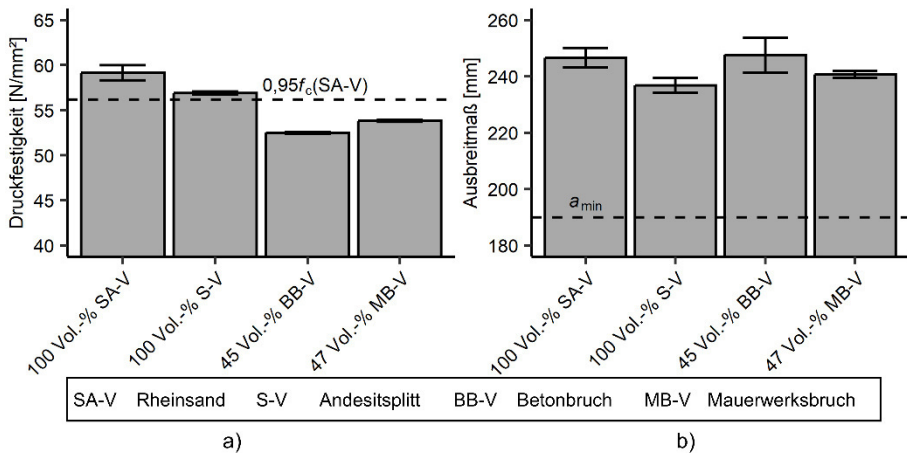


Abb. 4.50: Optimierung einer Mörtelzusammensetzung mit einem w/z-Wert von 0,55, einem b/gk-Wert von 0,95 bei maximaler Verringerung der Druckfestigkeit um 5 % bei Einsatz von Brechsand mit Ergebnissen zur a) Druckfestigkeit und b) Ausbreitmaß.

Im zweiten Fall wird eine Abnahme der Druckfestigkeit bei Einsatz von Brechsand um bis zu 10 % toleriert, was zu einer Erhöhung der Austauschrate mit Brechsand führt. Die Versuchsergebnisse für eine Mörtelzusammensetzung mit w/z-Wert von 0,45 und b/gk-Wert von 1,05 sind in Abb. 4.51 dargestellt. Abb. 4.52 zeigt die Ergebnisse bei Verwendung einer Mörtelzusammensetzung mit w/z-Wert von 0,55 und einem b/gk-

Wert von 0,95. Für alle Mörtelzusammensetzungen wird die Anforderung an das minimale Ausbreitmaß  $a_{min}$  erfüllt. Für die Druckfestigkeit kann die Anforderung an die maximale Verringerung um  $x_f=0,05$  bzw.  $x_f=0,10$ , außer für die Brechsandschüttung aus Splitt, jedoch nicht erfüllt werden. Insbesondere bei Einsatz von rezykliertem Betonbruch ist die Abweichung zur angestrebten Druckfestigkeit ausgeprägt. Mögliche Ursache hierfür könnte in der Vorhersage der Druckfestigkeit unter Verwendung des in Abschnitt 4.2 ermittelten Regressionsmodells liegen. Zum einen zeigt sich in Abschnitt 4.3.5.1, dass grundsätzlich nur eine niedrigere Druckfestigkeit im Rahmen der Versuche zur Verifikation erzielt werden kann im Vergleich zu den Versuchen aus Abschnitt 4.2. Zum anderen fließt in die Vorhersage der Druckfestigkeit die Variable „Materialursprung“ ein. Im Rahmen der durchgeführten Optimierung wird für Mörtelzusammensetzungen mit gemischtem Gesteinskörnungsanteil linear zwischen den beiden Stufen NA und RZ dieser Variable interpoliert. Die vorliegenden Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass diese lineare Interpolation zu Abweichungen zum tatsächlichen Versuchsergebnis führen. Zur Verbesserung des Regressionsmodells wären daher weitere Versuchsreihen mit zusammengesetztem Gesteinskörnungsanteil erforderlich. Hinzu kommt, dass die Regressionsmodelle in Abschnitt 4.2 nicht mit dem Ziel einer exakten Vorhersage der Mörtel Eigenschaften durchgeführt werden, sondern der Fokus auf dem Einfluss morphologischer Kenngrößen auf die Mörtel Eigenschaften liegt. Ein erweitertes Versuchsprogramm könnte daher zu einer Verbesserung der Vorhersage führen. Zuletzt ist anzumerken, dass die Optimierung des Anteils an Brechsand am gesamten Gesteinskörnungsanteil ohne Vorhaltemaß durchgeführt wird. Da insbesondere die Druckfestigkeit, wie auch an den Fehlerbalken in Abb. 4.49 bis Abb. 4.52 zu erkennen, jedoch gewissen Streuungen unterliegt, ist eine Abweichung vom prognostizierten Wert daher möglich. Die Tatsache, dass die Anforderung an das minimale Ausbreitmaß  $a_{min}$  in allen untersuchten Fällen eingehalten werden kann, während dies für  $x_f$  nicht der Fall ist, zeigt, dass das Kriterium der maximalen Abminderung der Druckfestigkeit den maximalen Anteil von Brechsand an der gesamten Gesteinskörnung steuert und nicht das Kriterium zum minimalen Ausbreitmaß.

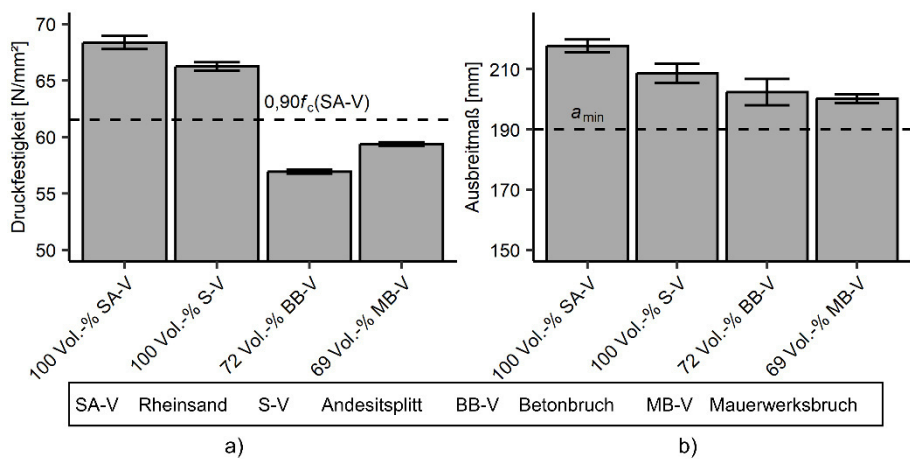


Abb. 4.51: Optimierung einer Mörtelzusammensetzung mit einem w/z-Wert von 0,45, einem b/gk-Wert von 1,05 bei maximaler Verringerung der Druckfestigkeit um 10 % bei Einsatz von Brechsand mit Ergebnissen zur a) Druckfestigkeit und b) Ausbreitmaß.

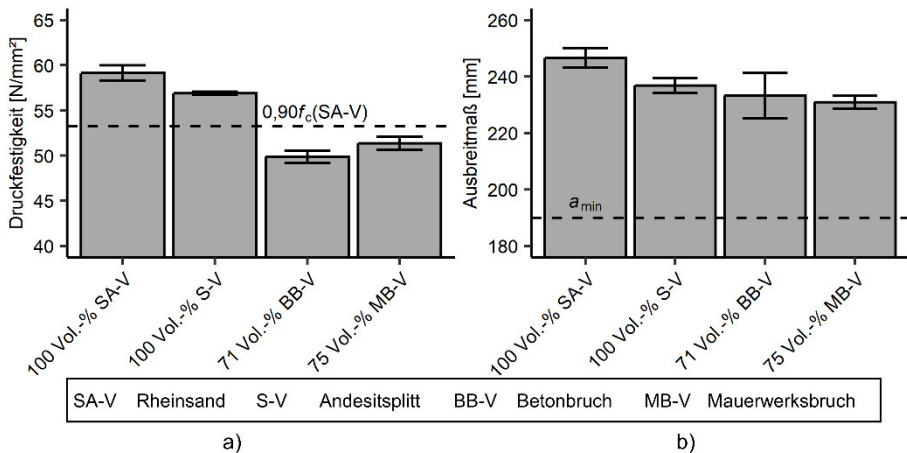


Abb. 4.52: Optimierung einer Mörtelzusammensetzung mit einem w/z-Wert von 0,55, einem b/gk-Wert von 0,95 bei maximaler Verringerung der Druckfestigkeit um 10 % bei Einsatz von Brechsand mit Ergebnissen zur a) Druckfestigkeit und b) Ausbreitmaß.

Auch wenn die vorgegebenen Anforderungen an die maximale Abminderung der Druckfestigkeit bei Einsatz von Brechsand nicht eingehalten werden können, zeigen die vorliegenden Versuchsergebnisse, dass trotz hoher Brechsandanteile zufriedenstellende Mörtelkonsistenzen erreicht werden können. Bedingung hierfür ist der Ausgleich der erhöhten Wasseraufnahme von rezyklierten Brechsanden. Erfolgt dieser Ausgleich durch Zugabe zusätzlichen Wassers, können trotz der abweichenden morphologischen Eigenschaften der Brechsandkörner verarbeitbare Mörtelzusammensetzungen hergestellt werden. Die beobachtete Verringerung der Druckfestigkeit gegenüber Mörtelzusammensetzungen mit natürlichem Sand liegt, bei einem Einsatz von 45-72 Vol.-% rezykliertem Brechsand aus Betonbruchabfällen, bei maximal 16,7 %. Für Mörtel mit rezykliertem Brechsand aus Mauerwerksbruch mit Volumenanteilen zwischen 41 Vol.-% und 75 Vol.-% kann eine maximale Abnahme der Druckfestigkeit von 13,2 % beobachtet werden. Diese beobachtete Abnahme der Druckfestigkeit bei Erhöhung des Anteils an Brechsand der Gesteinskörnung ist zwar signifikant, führt jedoch zu Mörtelzusammensetzungen, die für eine Vielzahl von praktischen Anwendungen auch im Hinblick auf eine ausreichende Druckfestigkeit einsetzbar sind.

#### 4.3.6 Zusammenfassung und Fazit

Die zur Verifikation der in Abschnitt 4.2 ermittelten Regressionsmodelle durchgeführten Versuche im Hinblick auf den Einfluss morphologischer Kenngrößen auf das Setzmaß, das Setzfließmaß, das Ausbreitmaß, die Biegezugfestigkeit, die Druckfestigkeit und den dynamischen E-Modul, bestätigen grundsätzlich diese Modelle. Als eines der Bewertungskriterien dient das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , welches für das jeweilige Regressionsmodell, unter Verwendung der Versuchsergebnisse aus Abschnitt 4.2 sowie der Versuchsergebnisse aus Abschnitt 4.3, berechnet wird. Ein gewisser Teil der beobachteten Abweichungen geht möglicherweise auf geänderte Bedingungen bei der Mörtelherstellung und Versuchsdurchführung der Versuche zur Verifikation zurück wie zum Beispiel Abweichungen in Raumlufttemperatur oder Luftfeuchtigkeit während der



Herstellung des Mörtels. Weiterer Einflussfaktor kann eine zusätzliche Varianz im Hinblick auf die morphologischen Eigenschaften der im Rahmen der Versuche zur Verifikation verwendeten Gesteinskörnungen sein, da diese aus Quellen stammen, die sich von denen der Gesteinskörnung aus Abschnitt 4.2 unterscheiden. Weisen diese Gesteinskörnungsschüttungen morphologische Charakteristika auf, die im Rahmen der vorangegangenen Regressionsanalyse nicht aufgetreten sind, handelt es sich um eine Extrapolation der Regressionsergebnisse. Insbesondere für das Ausbreitmaß, aber auch für das Setz- und Setzfließmaß kann eine Abweichung beim Einfluss des Grades der Länglichkeit  $d_{V50}(LL_E)$  auf die jeweilige Kenngröße festgestellt werden, welche hauptsächlich auf den hohen  $d_{V50}(LL_E)$ -Werten der Andesitsplittschüttung, die in Abschnitt 4.3 zum Einsatz kommen, beruht. Dies führt zu einer Extrapolation der Versuchsergebnisse aus Abschnitt 4.2 über den betrachteten Wertebereich hinaus. Entsprechend der Erwartung zeigt sich, dass der Zusammenhang zwischen  $d_{V50}(LL_E)$  und dem Ausbreitmaß, dem Setz- oder Setzfließmaß in diesem Bereich hoher  $d_{V50}(LL_E)$ -Werte unzutreffend durch die Regressionsmodelle aus Abschnitt 4.2 beschrieben werden können. Werden jedoch die Mörtelzusammensetzungen mit Andesitsplitt als Gesteinskörnung aus diesem Vergleich ausgeschlossen, zeigt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen den in Abschnitt 4.2 ermittelten Regressionsergebnissen und den Versuchen zur Verifikation in Abschnitt 4.3. Auch für die Verteilung der Eckigkeit  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  zeigt sich eine gewisse Abweichung zwischen den Versuchsergebnissen zur Verifikation und dem in Abschnitt 4.2 ermittelten Regressionsmodell für das Setz- und Setzfließmaß. Für eine weitere Verbesserung der genannten Regressionsmodelle wäre eine erweiterte Datenbasis erforderlich, die größere Wertebereiche der morphologischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen abdeckt.

Die Versuche zur Optimierung des Brechsandanteils an der gesamten Gesteinskörnung zeigen, dass eine gewisse Abweichung zwischen Vorhersage der zu erwartenden Druckfestigkeit bei Anwendung der ermittelten Regressionsmodelle und den durchgeführten Versuchen mit Mörtelzusammensetzungen mit hohem Brechsandanteil in Abschnitt 4.3.5.2 besteht. Bei Einsatz von rezyklierten Brechsanden zeigt sich eine Abnahme der Druckfestigkeit gegenüber Mörtelzusammensetzungen mit natürlichem Sand, die über den prognostizierten Werten liegen. Ursächlich hierfür können unter anderem eine zu geringe Datenbasis zur Vorhersage von Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von morphologischen Eigenschaften der Gesteinskörnung und anderen Parametern der Mörtelzusammensetzung sein. Die Variable „Materialursprung“ berücksichtigt unter anderem Unterschiede in der Kornfestigkeit von natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen. Die in Abschnitt 4.3 vorgestellten Versuchsergebnisse für Mörtelzusammensetzungen mit hohem Anteil an rezyklierten Brechsanden weisen eine niedrigere Druckfestigkeit auf im Vergleich zu der basierend auf dem Regressionsmodell vorhergesagten Druckfestigkeit. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass der Einfluss der Variable „Materialursprung“ und damit der Einfluss unter anderem der Kornfestigkeit auf die Druckfestigkeit stärker ausfällt, als im Rahmen der Regressionsanalyse aus Abschnitt 4.2.5.5 festgestellt. Die Einbeziehung weiterer Gesteinskörnungsarten natürlichen und rezyklierten Ursprungs im Rahmen weiterführender Versuche könnte daher zu einer Verbesserung des Regressionsmodells führen. Außerdem kann die verwendete lineare Interpolation für die Variable „Materialursprung“ bei Mischung von natürlichem Sand und rezykliertem Brechsand eine mögliche Ursache darstellen.

Die hier vorgestellten Versuchsergebnisse zeigen, dass auch bei hohen Anteilen an rezyklierten Brechsanden Mörtelzusammensetzungen mit annehmbarer Verarbeitbarkeit und für viele praktische Anwendungen ausreichende Druckfestigkeit, hergestellt werden können. Die morphologische Charakterisierung mittels Computertomographie bietet damit eine quantitative Grundlage zur Abschätzung des Einflusses veränderter Kornform- und Korneckigkeitseigenschaften der Gesteinskörnung auf Frisch- und Festmörtel­eigenschaften wie die Druckfestigkeit oder das Ausbreitmaß. Darauf aufbauend ist die Zusammenstellung des Gesteinskörnungsanteils eines Mörtels mit erhöhten Brechsandanteilen möglich, wenngleich die vorliegenden Versuchsergebnisse aus Abschnitt 4.3 zeigen, dass weiterführende Versuche zur Verbesserung der Vorhersage anhand der in Abschnitt 4.2 Regressionsmodelle ermittelten Regressionsmodelle erforderlich sind.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

### 5.1 Zusammenfassung

Der Einsatz von Brechsanden kann einen Beitrag zur Kreislaufführung von Materialien im Bereich der Mörtel- und Betonherstellung leisten und zur Schonung natürlicher Sandressourcen beitragen. Als Ersatz für natürlichen Sand kommen sowohl Brechsande, welche als Nebenprodukt der Schotter- und Splitterherstellung anfallen, in Frage als auch rezyklierte Brechsande, welche im Rahmen des Aufbereitungsprozesses von Beton- und Mauerwerksabbruch entstehen. Insbesondere die morphologischen Eigenschaften wie Korngröße, Kornform, Eckigkeit und Rauigkeit dieser Brechsande unterscheiden sich jedoch von denen natürlicher Sande. Daraus resultieren Auswirkungen auf die Eigenschaften von Mörtel und Beton sowohl im frischen als auch erhärteten Zustand, die einen Einsatz insbesondere rezyklierter Brechsande erschweren. Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Quantifizierung morphologischer Charakteristika wie Kornform und Korneckigkeit feiner Gesteinskörnungsschüttungen mittels Computertomographie und eines automatisierten Verfahrens zur anschließenden Bildbearbeitung. Daran schließt sich die Untersuchung des Einflusses morphologischer Eigenschaften der Gesteinskörnung auf Frisch- und Festmörteleigenschaften an. Hierbei liegt besonderes Augenmerk auf der Abgrenzung dieser Einflussfaktoren von anderen, die Zusammensetzung von Mörtel definierenden Kenngrößen wie dem Verhältnis von Wasser zu Zement, dem Verhältnis der Bindemittelmasse zur Masse der Gesteinskörnung sowie der Sieblinie.

Im Rahmen dieser Arbeit werden, basierend auf einer Literaturrecherche, Kenngrößen identifiziert, die zur morphologischen Beschreibung von Eigenschaften einer Gesteinskörnungsschüttung geeignet sind. Für deren Bestimmung bietet die Computertomographie die Möglichkeit, anhand der dreidimensionalen, digitalen Abbildung einzelner Körner die Größe, Form und Eckigkeit zu bestimmen. Gegenüber nicht-bildgebenden labortechnischen Verfahren wie der Bestimmung der Plattigkeitskennzahl nach DIN EN 933-3 oder der Kornformkennzahl nach DIN EN 933-4 besteht damit der Vorteil einer morphologischen Charakterisierung von Körnern mit Korngrößen kleiner 4 mm. Bedingung für die Anwendung der Computertomographie zur Charakterisierung feiner Gesteinskörnungsschüttungen ist ein möglichst automatisiertes Verfahren zur Erstellung von CT-Aufnahmen und anschließender Bildbearbeitung, welches das Tomographieren von Proben als lose Schüttung erlaubt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Gesteinskörnungsproben als lose Schüttung tomographiert, welches eine zeiteffiziente Erfassung einer repräsentativen Stichprobengröße ermöglicht. Wenn die Körner vorab nicht versuchstechnisch getrennt werden und sich Körner auf der CT-Aufnahme berühren, ist im Rahmen der anschließenden Bildbearbeitung eine Trennung erforderlich. Hierfür wird ein automatisiertes Verfahren zur Kornsegmentierung entwickelt sowie eine Analyse der vorhandenen Messungsgenauigkeit durchgeführt. Die vorhandene Messungsgenauigkeit richtet sich dabei maßgeblich nach der vom Nutzer vorgegebenen Voxelgröße. Zur Analyse des Einflusses der Voxelgröße auf die Messungsgenauigkeit von CT-Aufnahmen werden zunächst einzelne Körner mit einer Siebgröße zwischen 2 mm und 20 mm bei fünf Voxelgrößen zwischen 25  $\mu\text{m}$  und 85  $\mu\text{m}$  tomographiert. Es zeigt sich, dass zur Sicherstellung einer

Messungenauigkeit kleiner 5 % bezogen auf Kornabmessungen wie Länge, Breite oder Dicke ein Verhältnis von Siebgröße zu Voxelgröße von  $R_{\min} > 12$  ausreichend ist. Für eine Messungenauigkeit kleiner 5 % bezogen auf das Kornvolumen ist jedoch ein  $R_{\min} > 25$  erforderlich.

Werden Körner vor Anfertigung der CT-Aufnahme physisch voneinander getrennt, entfällt diese Kornsegmentierung. Allerdings ist die Anfertigung von mehr CT-Aufnahmen zur Abbildung einer repräsentativen Stichprobe erforderlich. Ein Vergleich beider Methoden anhand von Gesteinskörnungsschüttungen drei unterschiedlicher Materialarten zeigt, dass bei Tomographieren von losen Schüttungen entweder kein statistisch signifikanter Unterschied oder ein signifikanter Unterschied mit sehr geringer Effektstärke im Vergleich zur Probenvorbereitung mit physischer Trennung von Körnern besteht.

Die Kornsegmentierung von sich berührenden Körnern auf der CT-Aufnahme wird erschwert durch die Abweichung der natürlichen Kornform von der einer Kugel sowie der großen Spannweite an Korngrößen, die in einer für die Herstellung von Mörtel oder Beton geeigneten Gesteinskörnungsschüttung enthalten sind. Verschiedene Verfahren, basierend auf der Wasserscheidentransformation, sind grundsätzlich zur Kornsegmentierung geeignet. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine Segmentierung mittels Wasserscheidentransformation mit einer vorgeschalteten adaptiven H-Extrematransformation, welche sich besonders zum Segmentieren von Schüttungen mit Körnern unterschiedlicher Korngröße eignet. Hierbei müssen vom Nutzer Parameter zur Festlegung des Glättungsgrades der adaptiven H-Extrematransformation vorgegeben werden, die in der Regel durch zeitaufwendiges manuelles Iterieren ermittelt werden. Die Untersuchung zur Entwicklung eines automatisierten Segmentierungsverfahrens basiert auf CT-Aufnahmen von vier feinkörnigen Gesteinskörnungsschüttungen mit Korngrößen zwischen 125  $\mu\text{m}$  und 2 mm sowie vier grobkörnigen Gesteinskörnungsschüttungen mit Korngrößen zwischen 2 mm und 4 mm bzw. 5 mm, welche mit der adaptiven H-Extrematransformation bei unterschiedlicher Glättung segmentiert werden. Es zeigt sich, dass eine automatisierte Festlegung des Glättungsparameters  $h_{\text{crit}}(0)$  in Abhängigkeit von der Schüttdichte der analysierten Probe erfolgen kann, was für einen Großteil der untersuchten Materialien zu einer Fehlsegmentierungsrate von unter 5 % führt. Für Gesteinskörnungsschüttungen mit hoher Packungsdichte oder hoher Materialinhomogenität kann eine Fehlsegmentierungsrate von unter 10 % erreicht werden.

Basierend auf den Ergebnissen einer Literaturrecherche, den Untersuchungsergebnissen zu Einflussfaktoren auf die Messungenauigkeit sowie dem entwickelten Verfahren zur automatisierten Kornsegmentierung wird damit ein Konzept zum Tomographieren von Gesteinskörnungsschüttungen aufgestellt, welches Anwendung für die anschließend durchgeführten Versuche findet. Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass Gesteinskörnungsschüttungen, insbesondere auch feine Gesteinskörnungsschüttungen mit einem Größtkorn kleiner 2 mm, effektiv mittels CT erfasst und im Detail anhand ihrer dreidimensionalen, digitalen Abbildung dargestellt werden können.

Liegt die dreidimensionale, digitale Abbildung der Körner einer Gesteinskörnungsschüttung vor, können Kenngrößen zur morphologischen Charakterisierung bestimmt werden. Aus einer Vielzahl von in der Literatur vorgeschlagenen Kenngrößen sollen im

Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen Parameter ausgewählt werden, die eine möglichst große Bandbreite an morphologischen Eigenschaften abdecken. Gleichzeitig sollen diese Parameter eine minimale Korrelation untereinander aufweisen, um die Bestimmung von redundanten Informationen zu vermeiden. Hierfür werden Schüttungen aus Rheinsand, Glaskugeln, Mikrodioritsplitt, Betonbruch und Mauerwerksbruch jeweils zusammengesetzt in zwei unterschiedlichen Sieblinien nach dem vorab festgelegten Verfahren tomographiert. Ziel ist, je morphologischer Kenngröße einen Parameter zur Angabe der Ausprägung des beschriebenen Merkmals innerhalb der untersuchten Gesteinskörnungsschüttung anzugeben sowie einen Parameter zur Beschreibung der Verteilung dieses Merkmals.

Im Rahmen der durchgeführten Korrelationsanalyse zeigt sich, dass zwischen vielen der untersuchten morphologischen Kenngrößen hohe Korrelationen bestehen. Diese können teilweise auf die Beschreibung von redundanten Informationen anhand unterschiedlicher Kenngrößen zurückgeführt werden, können jedoch teilweise auch im Herstell- bzw. Abbauprozess der untersuchten Gesteinskörnungen begründet sein. So geht das Brechen von Gesteinskörnung oft mit einer Erhöhung des Anteils länglicher Körner aufgrund von Absplitterungen einher, während gleichzeitig eine Steigerung der Eckigkeit beobachtet werden kann. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchung wird eine Auswahl aus vier morphologischen Kenngrößen als geeignet zur Charakterisierung feiner Gesteinskörnung identifiziert. Dieses setzt sich aus dem Median der Länglichkeit von als länglich klassifizierten Körnern  $d_{V50}(LL_E)$  und der Ausprägung der Eckigkeit anhand des Parameters  $d_{V50}(AT_{3D})$  zusammen. Diese beiden Kenngrößen werden zur Beschreibung der Verteilung von Form und Eckigkeit innerhalb der Schüttungen zusätzlich durch die Parameter  $LL_E$  als Anteil länglicher Körner und  $d_{V90/10}(AT_{3D})$  für die Verteilung der Eckigkeit ergänzt. Diese Auswahl an morphologischen Charakteristika weist eine niedrige Korrelation untereinander auf, beschreibt gleichzeitig sowohl Kornform als auch Eckigkeit und ist damit auch als Eingangsparameter für eine lineare Regressionsgerade geeignet.

Die Charakterisierung der feinen Gesteinskörnungsschüttungen anhand von CT-Aufnahmen stellt die Grundlage für die anschließend durchgeführte multiple lineare Regressionsanalyse zum Einfluss morphologischer Charakteristika der Gesteinskörnung auf Frisch- und Festmörteleigenschaften dar. Hierfür werden Mörtelzusammensetzungen unter Verwendung von Rheinsand, Mikrodioritsplitt, Glaskugeln, Betonbruch und Mauerwerksbruch mit variierendem Wasser-Zement-Wert, variierendem Massenverhältnis von Bindemittelteil zu Gesteinskörnung und unterschiedlichen Sieblinien hergestellt. Zur Charakterisierung der Frischmörteleigenschaften werden die rheologischen Kenngrößen Fließgrenze und dynamische Viskosität mittels Rheometer bestimmt, sowie das Setzmaß, Setzfließmaß und Ausbreitmaß ermittelt. Nach einer 28 tägigen Erhärtungsdauer werden die Festmörteleigenschaften dynamischer E-Modul, Biegezug- und Druckfestigkeit bestimmt.

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen mittels Rotationsrheometer kann eine abnehmende dynamische Viskosität mit zunehmendem Anteil an länglichen Körnern festgestellt werden. Als mögliche Ursache kommt die Ausrichtung von Körnern entlang ihrer Längsachse in Richtung der Scherbewegung in Frage, was in einer Verringerung des Widerstandes gegen Scheren resultieren kann. Damit ergibt sich eine Erhöhung der Fließfähigkeit des Mörtels bei Erhöhung des Anteils länglicher Körner.

Die dynamische Viskosität nimmt bei zunehmendem Grad der Eckigkeit sowie zunehmender Variabilität der Eckigkeit zu, wobei diese Zunahme im Fall des Grades der Eckigkeit mit dem  $w/z$ -Wert interagiert und nur bei hohen  $w/z$ -Werten beobachtet werden kann. Ursächlich kann die erhöhte spezifische Oberfläche eckiger Körner und der damit einhergehende erhöhte Bindemittelleimanspruch sein, welcher zu einer erhöhten Anzahl an Kollisionen und Verzahnungen von Körnern untereinander führt, wenn die Bindemittelleimmasse im Verhältnis zur Gesteinskörnungsmasse innerhalb der Zusammensetzung unverändert bleibt. Die abnehmende dynamische Viskosität bei steigender Eckigkeit der Körner und niedrigem  $w/z$ -Wert lässt hingegen darauf schließen, dass hier die dynamische Viskosität des Mörtels vor allem von der Steifigkeit des Bindemittelleims gesteuert wird, dessen Einfluss aufgrund geringerer Bindemittelleimschichtdicken bei erhöhter Eckigkeit nachlässt.

Eine Steigerung der Länglichkeit der Körner führt zunächst zu einer Zunahme der Fließgrenze, während für stärker ausgeprägte Länglichkeiten eine Abnahme der Fließgrenze beobachtet werden kann. Während die Zunahme der Fließgrenze möglicherweise auf vermehrte Kollisionen von Körnern mit einer zunehmend von der Kugel abweichenden Form zurückzuführen ist, scheint es bei ausgeprägterer Länglichkeit der Körner zu einer Ausrichtung dieser Körner beim Einfüllprozess in den Messtopf zu kommen, was zu einer Abnahme der Fließgrenze führt. Hinzu kommt, dass mit steigendem Anteil an länglichen Körnern eine Abnahme der Fließgrenze bei Mörtel mit Sieblinien, die einen erhöhten Anteil an größeren Körnern aufweisen, beobachtet werden kann. Mit steigender Eckigkeit von Körnern, zeigt sich, dass die Fließgrenze aufgrund vermehrter Verzahnung und Reibung zwischen Körnern steigt, was zu einer Abnahme der Verarbeitbarkeit der Mörtel führt.

Setzmaß, Setzfließmaß und Ausbreitmaß stellen demgegenüber labortechnische Verfahren dar, die zur Abschätzung der rheologischen Kenngröße Fließgrenze, aber auch der dynamischen Viskosität geeignet sind, dabei jedoch mit geringerem Zeit- und gerätetechnischem Ausstattungsaufwand durchgeführt werden können. Die Untersuchungen zum Einfluss morphologischer Charakteristika auf diese Frischmörtelkenngrößen im Rahmen dieser Arbeit decken sich größtenteils mit den Versuchsergebnissen zur dynamischen Viskosität und Fließgrenze. Auch hierbei zeigt sich, dass Teile des Einflusses morphologischer Kenngrößen von anderen Parametern der Mörtelzusammensetzung wie dem  $w/z$ -Wert, dem  $b/gk$ -Wert oder der Sieblinie, abhängig sind.

Die Ergebnisse des Einflusses morphologischer Charakteristika der Gesteinskörnung auf die rheologischen Eigenschaften von Mörtel zeigen, dass im Hinblick auf die Verwendung von Brechsand zur Herstellung von Mörtel der Eckigkeit bereits im Aufbereitungs- und Brechprozess eine besondere Bedeutung zukommt, da eine Verringerung der Eckigkeit zu einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit führen kann. Auch eine Kontrolle der Länglichkeit sowie des Anteils länglicher Körner bietet sich an, wobei der Einfluss dieser Kenngröße, je nach Anwendungsfall, zu gegenteiligen Effekten führt. Handelt es sich um weniger fließfähige Mörtelzusammensetzungen, kann die Erhöhung des Anteils länglicher Körner zu einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit führen, während für fließfähige Zusammensetzungen das Entmischungsrisiko steigt.

Die Steifigkeit von Festmörtel im linear-elastischen Bereich wird im Rahmen dieser Arbeit anhand des dynamischen E-Moduls quantifiziert. Es zeigt sich, dass mit steigender Eckigkeit und mit steigendem Anteil an länglichen Körnern eine Zunahme des dynamischen E-Moduls erfolgt. Diese Einflüsse interagieren jedoch mit einer Reihe von weiteren Parametern der Mörtelzusammensetzung. Die komplexen Einflussmechanismen zeigen daher, dass eine Betrachtung des Einflusses morphologischer Charakteristika der Gesteinskörnung nicht losgelöst von anderen Parametern der Mörtelzusammensetzung, wie zum Beispiel dem w/z-Wert, betrachtet werden können. Sowohl auf die Druck- als auch die Biegezugfestigkeit kann kein Einfluss der Länglichkeit oder des Anteils länglicher Körner innerhalb der Gesteinskörnung festgestellt werden. Es zeichnet sich jedoch eine Steigerung dieser beiden Festmörtelcharakteristika mit zunehmender Eckigkeit der Körner ab. Ursächlich hierfür kann die vermehrte Ausbildung von Verbundkräften zwischen Korn und Bindemittelleimmatrix aufgrund der erhöhten spezifischen Oberfläche eckiger Körner sein. Im Hinblick auf die Druckfestigkeit gilt diese Beobachtung jedoch nur für Mörtel mit natürlicher Gesteinskörnung. Für die rezyklierten Brechsande aus Betonbruch oder Mauerwerksbruch wird grundsätzlich eine niedrigere Druckfestigkeit festgestellt, die mit zunehmender Eckigkeit der Körner weiter abnimmt. Im Rahmen der Regressionsanalyse zeigt sich, dass dieser Effekt aufgrund der geringen Anzahl an untersuchten rezyklierten Materialien mit großen Unsicherheiten in Form von großen Konfidenzintervallen behaftet ist, was eine Interpretation der Ergebnisse erschwert.

Im Anschluss an die Regressionsanalyse zum Einfluss morphologischer Charakteristika der Gesteinskörnung auf die Mörtel Eigenschaften erfolgt eine Verifikation der Versuchsergebnisse anhand einer erneuten Untersuchung von Mörteln, hergestellt mit Rheinsand sowie drei bisher nicht verwendeten Brechsanden. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse können größtenteils bestätigt werden. Teilweise zeigen sich jedoch systematische Abweichungen, die womöglich auf geringfügige Abweichungen in der Versuchsdurchführung und Lagerungsdauer von Materialien zurückzuführen sind. Es zeigt sich, dass im Bereich sehr ausgeprägter Länglichkeiten von Körnern die Regressionsmodelle zu Abweichungen gegenüber den tatsächlichen Versuchsergebnissen führen. Ursächlich hierfür ist, dass sehr ausgeprägte Länglichkeiten von Körnern eine Extrapolation über den bisher betrachteten Datenbereich hinaus bedeuten. Hier wäre eine Anpassung der Regressionsmodelle basierend auf einer erweiterten Datenbasis erforderlich.

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse werden abschließend dazu verwendet, Mörtelzusammensetzungen mit optimiertem Brechsandanteil herzustellen. Ziel ist dabei, eine Maximierung des Brechsandanteils zum Ersatz des natürlichen Rheinsandes, bei Einhaltung von zuvor festgelegten Mindestanforderungen an die Druckfestigkeit sowie das Ausbreitmaß, zu erreichen. Die Ergebnisse zeigen, dass basierend auf den erarbeiteten Regressionsmodellen Mörtelzusammensetzungen mit hohem Brechsandanteil hergestellt werden können, die zwar die Voraussetzungen an das angestrebte Ausbreitmaß einhalten, jedoch die maximal erlaubte Absenkung der Druckfestigkeit geringfügig unterschreiten. Zur Verbesserung des Optimierungsansatzes wäre insbesondere eine detailliertere Untersuchung des Einflusses der Kornfestigkeit bzw. des Materialursprungs von natürlichen und rezyklierten Brechsanden sowie des Bindemittelleimvolumens statt des b/gk-Wertes erforderlich. Grundsätzlich zeigt sich aber, dass

auch bei hohem Brechsandanteil Mörtel mit annehmbarer Verarbeitbarkeit und für viele Praxisanwendungen ausreichender Druckfestigkeit hergestellt werden können, solange der Einfluss morphologischer Charakteristika der Gesteinskörnung ausreichend berücksichtigt wird.

### 5.2 Fazit und Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Versuchsergebnisse zeigen, dass ein deutlicher Einfluss morphologischer Charakteristika der Gesteinskörnung auf die Frisch- und Festmörteleigenschaften besteht, welcher in vielen Fällen von weiteren Parametern der Mörtelzusammensetzung wie dem Wasser-Zement-Wert, dem Massenverhältnis von Bindemittelleim zu Gesteinskörnung oder der Sieblinie, abhängig ist. Die Quantifizierung dieser Einflussgrößen auf die Verarbeitbarkeit und Festigkeit von Mörtel kann dafür verwendet werden, den Einfluss erhöhter Brechsandanteile auf Mörtel-eigenschaften abzuschätzen. Dieses bietet die Grundlage zur Verwendung erhöhter Brechsandanteile, insbesondere rezyklierter Brechsande, zur Herstellung von Mörtel. Besonders geeignet zur morphologischen Charakterisierung feiner Gesteinskörnungen mit Korngrößen kleiner 2 mm ist dabei die Computertomographie, die die Abbildung der dreidimensionalen Form jedes einzelnen Kornes einer Schüttung ermöglicht. Das hier vorgestellte Verfahren eignet sich zum Tomographieren von Proben als lose Schüttung mit einer anschließenden automatisierten Bildbearbeitung, an deren Ende die Bestimmung morphologischer Kenngrößen für jedes Korn einer Schüttung möglich ist. Damit kann sowohl die Ausprägung von Form und Eckigkeit innerhalb einer Gesteinskörnungsschüttung beschrieben werden, als auch die Verteilung von Merkmalen.

Weiterführende Untersuchungen bieten sich sowohl im Hinblick auf eine Verbesserung der automatisierten Kornsegmentierung von sich berührenden Körnern in der CT-Aufnahme an, als auch bezüglich der Verbesserung der Regressionsmodelle zur Abschätzung des Einflusses morphologischer Eigenschaften der Gesteinskörnung auf Mörtel- und Betoneigenschaften. Insbesondere die Verringerung der Fehlsegmentierungsrate bei Verwendung der adaptiven H-Extrematransformation in Kombination mit der Wasserscheidentransformation, würde zu einer Reduktion der Messungenauigkeit bei diesem Verfahren führen. Denkbar wäre zum einen die Untersuchung des zweiten, nutzerseitig vorzugebenden Glättungsparameters  $h_{crit}(255)$ , welcher im Rahmen dieser Arbeit konstant gehalten wurde. Zum anderen stellen selbstlernende Algorithmen, wie zum Beispiel Random-Forest-Anwendungen, vielversprechende Ansätze zur nachträglichen Korrektur von Fehlsegmentierungen dar [107, 110].

Bezüglich des Einflusses morphologischer Charakteristika der Gesteinskörnung auf Frisch- und Festmörteleigenschaften würde eine Erweiterung der Datenbasis mit Gesteinskörnungen, die ein breiteres Spektrum an morphologischen Eigenschaften abdecken, als dies im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen erfolgen konnte, zu einer Verbesserung der bestimmten Regressionsmodelle führen. Zudem bietet sich eine Erweiterung des Versuchsprogramms im Hinblick auf die Betrachtung des Einflusses des Bindemittelleimvolumens statt dem Massenverhältnis von Bindemittel zu Gesteinskörnung an, welche im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt wird. Hier wurde ein Fokus auf die Quantifizierung des Effektes morphologi-



scher Einflussgrößen gelegt. Basierend auf einer erweiterten Datenbasis könnte jedoch auch die Vorhersage von Eigenschaften wie Verarbeitbarkeit oder Festigkeit möglich sein. Zusätzlich wäre ein Hochskalieren der hier vorgestellten Versuchsergebnisse von Mörtel auf Beton von großem, für die Praxis der Betonherstellung relevantem, Interesse.

## Literaturverzeichnis

- [1] Verein Deutscher Zementwerke e. V. VDZ (Hg.) (2022): Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton - Potenziale und Handlungsstrategien.
- [2] Becke, A.; Reiners, J.; Phan, A. T. (2020): Umweltproduktdeklarationen - Erläuterungen zu den EPD's, InformationsZentrum Beton GmbH.
- [3] Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V. (Hg.) (2022): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-Erden-Industrie bis 2040 in Deutschland.
- [4] United Nations Environment Programme (2022): Sand and Sustainability - 10 strategic recommendations to avert a crisis.
- [5] Eynard, U.; Georgitzikis, K.; Wittmer, D.; El Latunussa, C.; Torres de Matos, C.; Mancini, L.; Unguru, M.; Blagoeva, D.; Bobba, S.; Pavel, C.; Carrara, S.; Mathieux, F.; Pennington, D.; Blengini, G. A. (2020): Study on the EU's list of critical raw materials - Non-critical raw materials factsheets, Europäische Kommission.
- [6] Elsner, H. (2022): Sand und Kies in Deutschland - Band I: Grundlagen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- [7] Rentier, E. S.; Cammeraat, L. H. (2022): The environmental impacts of river sand mining, in: Science of the Total Environment 838, S. 155877.
- [8] Europäische Kommission (Hg.) (2019): Der europäische Grüne Deal - Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen.
- [9] Deutscher Bundestag (2020): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz KrWG), 2. Fassung.
- [10] Deutscher Bundestag (2020): Rohstoffstrategie der Bundesregierung - Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen (Drucksache 19/16720).
- [11] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union (2021): Verordnung (EU) 2021/1119 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 (Europäisches Klimagesetz), 1. Fassung.
- [12] United Nations Environment Programme (2019): Sand and sustainability - Finding new solutions for environmental governance of global sand resources.
- [13] DIN 1045-2 (2023): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton, Deutsches Institut für Normung e.V.

- [14] Müller, C.; Dora, B. (2000): Verwertung von Brechsand aus Bauschutt, Hefte des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton Heft 506, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [15] Höffgen, J. P.; Dehn, F. (2023): Möglichkeiten zur Verwendung von Betonbrechsanden, in: Nolting, U.; Dehn, F.; Kind, V. M. (Hrsg.), Bauen mit Beton im Kreislauf - Recycling, Re-Use und Ressourcenschonung, 19. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruhe, S. 5–13.
- [16] Ostheeren, K. (2011): Die Zukunft der Brechsande? - Einfluss der Kornform von Sanden auf die Verarbeitungseigenschaften von SVB-Mörteln, in: AT Mineral Processing 52, S. 52–59.
- [17] DAfStb-Richtlinie (2010): Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton.
- [18] DIN EN 206 (2021): Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [19] DAfStb-Richtlinie (1998): Beton mit rezykliertem Zuschlag, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton.
- [20] Westerholm, M.; Lagerblad, B.; Silfwerbrand, J.; Forssberg, E. (2008): Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars, in: Cement and Concrete Composites 30, Heft 4, S. 274–282.
- [21] Cordeiro, G. C.; de Alvarenga, L. M. S. C.; Rocha, C. A. A. (2016): Rheological and mechanical properties of concrete containing crushed granite fine aggregate, in: Construction and Building Materials 111, S. 766–773.
- [22] Cepuritis, R.; Jacobsen, S.; Pedersen, B.; Mørtzell, E. (2016): Crushed sand in concrete – Effect of particle shape in different fractions and filler properties on rheology, in: Cement and Concrete Composites 71, S. 26–41.
- [23] Donza, H.; Cabrera, O.; Irassar, E. (2002): High-strength concrete with different fine aggregate, in: Cement and Concrete Research 32, Heft 11, S. 1755–1761.
- [24] Aissoun, B. M.; Hwang, S.-D.; Khayat, K. H. (2016): Influence of aggregate characteristics on workability of superworkable concrete, in: Materials and Structures 49, S. 597–609.
- [25] Estephane, P.; Garboczi, E. J.; Bullard, J. W.; Wallevik, O. H. (2019): Three-dimensional shape characterization of fine sands and the influence of particle shape on the packing and workability of mortars, in: Cement and Concrete Composites 97, S. 125–142.
- [26] Fan, C.-C.; Huang, R.; Hwang, H.; Chao, S.-J. (2016): Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes, in: Construction and Building Materials 112, S. 708–715.

- [27] Kaplan, M. F. (1959): Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse aggregates, in: *Journal of the American Concrete Institute* 55, Heft 5, S. 1193–1208.
- [28] Zhao, Y.; Duan, Y.; Zhu, L.; Wang, Y.; Jin, Z. (2021): Characterization of coarse aggregate morphology and its effect on rheological and mechanical properties of fresh concrete, in: *Construction and Building Materials* 286, S. 122940.
- [29] DIN EN 933-4 (2015): Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung der Kornform - Kornformkennzahl, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [30] DIN EN 933-3 (2012): Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung der Kornform - Plattigkeitskennzahl, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [31] DIN EN 933-6 (2023): Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Beurteilung der Oberflächeneigenschaften - Fließkoeffizienten von Gesteinskörnungen, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [32] Estephane, P.; Garboczi, E. J.; Bullard, J. W.; Wallevik, O. H. (2021): Using fine sand shape metrics determined from X-ray microcomputed tomography to illustrate the influence of particle shape on the properties of dispersed mortars, in: *Cement and Concrete Composites* 123, S. 104176.
- [33] Garboczi, E. J. (2002): Three-dimensional mathematical analysis of particle shape using X-ray tomography and spherical harmonics - Application to aggregates used in concrete, in: *Cement and Concrete Research* 32, Heft 10, S. 1621–1638.
- [34] Taylor, M. A.; Garboczi, E. J.; Erdogan, S. T.; Fowler, D. W. (2006): Some properties of irregular 3-D particles, in: *Powder Technology* 162, Heft 1, S. 1–15.
- [35] Erdoğan, S. T.; Garboczi, E. J.; Fowler, D. W. (2007): Shape and size of micro-fine aggregates - X-ray microcomputed tomography vs. laser diffraction, in: *Powder Technology* 177, Heft 2, S. 53–63.
- [36] Wadell, H. (1932): Volume, shape and roundness of rock particles, in: *The Journal of Geology* 40, Heft 5, S. 443–451.
- [37] Zingg, T. (1935): Beitrag zur Schotteranalyse, Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich.
- [38] Bullard, J. W.; Garboczi, E. J. (2013): Defining shape measures for 3D star-shaped particles - Sphericity, roundness, and dimensions, in: *Powder Technology* 249, S. 241–252.
- [39] Hayakawa, Y.; Oguchi, T. (2005): Evaluation of gravel sphericity and roundness based on surface-area measurement with a laser scanner, in: *Computers & Geosciences* 31, Heft 6, S. 735–741.

- [40] Zhang, D.; Huang, X.; Zhao, Y. (2012): Investigation of the shape, size, angularity and surface texture properties of coarse aggregates, in: *Construction and Building Materials* 34, S. 330–336.
- [41] VDI/VDE 2630 1.1 (2016): Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik - Grundlagen und Definitionen, VDI Verein Deutscher Ingenieure.
- [42] DIN EN ISO 15708-2 (2019): Zerstörungsfreie Prüfung - Durchstrahlungsverfahren für Computertomographie - Teil 2: Grundlagen, Geräte und Proben, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [43] Cormack, A. M. (1963): Representation of a funktion by its line integrals, with some radiological applications, in: *Journal of Applied Physics* 34, Heft 9, S. 2722–2727.
- [44] Hounsfield, G. N. (1976): Historical notes on computerized axial tomography, in: *The Journal of the Canadian Association of Radiologists* 27, Heft 3, S. 135–142.
- [45] The Nobel Assembly of Karolinska Institutet (1979): The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1979 (Pressemitteilung), Online im Internet: <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1979/press-release/>.
- [46] Kruth, J. P.; Bartscher, M.; Carmignato, S.; Schmitt, R.; de Chiffre, L.; Weckenmann, A. (2011): Computed tomography for dimensional metrology, in: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60, Heft 2, S. 821–842.
- [47] de Chiffre, L.; Carmignato, S.; Kruth, J.-P.; Schmitt, R.; Weckenmann, A. (2014): Industrial applications of computed tomography, in: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63, Heft 2, S. 655–677.
- [48] Röntgen, W. C. (1895): Über eine neue Art von Strahlen, in: *Sitzungsberichte der physikalisch-medizinischen Gesellschaft zu Würzburg*, S. 2–11.
- [49] Walter, B.; Pohl, R. (1908): Zur Frage der Beugung der Röntgenstrahlen, in: *Annalen der Physik* 330, Heft 4, S. 715–724.
- [50] Friedrich, W.; Knipping, P.; von Laue, M. (1912): Interferenz-Erscheinungen bei Röntgenstrahlen, in: *Sitzungsberichte der mathematisch-physikalischen Klasse der K. B. Akademie der Wissenschaft zu München*, S. 303–322.
- [51] Buzug, T. (2008): *Computed tomography - From photon statistics to modern cone-beam CT*, 1. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [52] Hermanek, P.; Rathore, J. S.; Aloisi, V.; Carmignato, S. (2018): Principles of X-ray computed tomography: in: *Industrial X-ray computed tomography*, Carmignato, S.; Dewulf, W.; Leach, R. (Hrsg.), Springer International Publishing AG, Cham, S. 25–67.
- [53] Demtröder, W. (2016): *Experimentalphysik 3 - Atome, Moleküle und Festkörper*, 5. Aufl., Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- [54] Lord Rayleigh, J. W. (1899): On the transmission of light through an atmosphere containing small particles in suspension, and on the origin of the blue of the sky,

- in: The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 47, Heft 287, S. 375–384.
- [55] Compton, A. H. (1923): A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements, in: Physical Review 21, Heft 5, S. 483–502.
- [56] Anderson, C. D. (1933): The positive electron, in: Physical Review 43, Heft 6, S. 491–494.
- [57] Hubbell, J. H. (2006): Electron–positron pair production by photons - A historical overview, in: Radiation Physics and Chemistry 75, Heft 6, S. 614–623.
- [58] Walter, B. (1926): Über die besten Formeln zur Berechnung der Absorption der Röntgenstrahlen in einem beliebigen Stoff, in: Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 35, S. 929–947.
- [59] Mayerhöfer, T. G.; Pahlow, S.; Popp, J. (2020): The Bouguer-Beer-Lambert law - Shining light on the obscure, in: ChemPhysChem 21, Heft 18, S. 2029–2046.
- [60] Antonuk, L. E.; Yorkston, J.; Huang, W.; Siewerdsen, J. H.; Boudry, J. M.; El-Mohri, Y.; Marx, M. V. (1995): A real-time, flat-panel, amorphous silicon, digital X-ray imager, in: Radiographics 15, Heft 4, S. 993–1000.
- [61] Ning, R.; Chen, B.; Yu, R.; Conover, D.; Tang, X.; Ning, Y. (2000): Flat panel detector-based cone-beam volume CT angiography imaging - System evaluation, in: IEEE Transactions on Medical Imaging 19, Heft 9, S. 949–963.
- [62] DIN EN ISO 15708-3 (2019): Zerstörungsfreie Prüfung - Durchstrahlungsverfahren für Computertomographie - Teil 3: Durchführung und Auswertung, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [63] PXR Procon X-Ray (Hg.): Manual for CT-ALPHA.
- [64] Dössel, O. (2016): Bildgebende Verfahren in der Medizin - Von der Technik zur medizinischen Anwendung, 2. Aufl., Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- [65] Ramachandran, G. N.; Lakshminarayanan, A. V. (1971): Three-dimensional reconstruction from radiographs and electron micrographs: application of convolutions instead of Fourier transforms, in: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 68, Heft 9, S. 2236–2240.
- [66] Shepp, L. A.; Logan, B. F. (1974): The fourier reconstruction of a head section, in: IEEE Transactions on Nuclear Science 21, Heft 3, S. 21–43.
- [67] Hsieh, J.; Nett, B.; Yu, Z.; Sauer, K.; Thibault, J.-B.; Bouman, C. A. (2013): Recent advances in CT image reconstruction, in: Current Radiology Reports 1, S. 39–51.
- [68] McCullough, E. C.; Baker, H. L.; Houser, W.; Reese, D. F. (1974): An evaluation of the quantitative and radiation features of a scanning X-ray transverse axial tomograph - The EMI scanner, in: Radiology 111, Heft 3, S. 709–715.
- [69] Brooks, R. A.; Di Chiro, G. (1976): Beam hardening in X-ray reconstructive tomography, in: Physics in Medicine and Biology 21, Heft 3, S. 390–398.

- [70] Herman, G. T. (1979): Correction for beam hardening in computed tomography, in: *Physics in Medicine and Biology* 24, Heft 1, S. 81–106.
- [71] Duerinckx, A. J.; Marcovski, A. (1978): Polychromatic streak artifacts in computed tomography images, in: *Journal of Computer Assisted Tomography* 2, Heft 4, S. 481–487.
- [72] Stolfi, A.; De Chiffre, L.; Kasperl, S. (2018): Error Sources: in: *Industrial X-ray computed tomography*, Carmignato, S.; Dewulf, W.; Leach, R. (Hrsg.), Springer International Publishing AG, Cham, S. 143–184.
- [73] Krumm, M.; Kasperl, S.; Franz, M. (2008): Reducing non-linear artifacts of multi-material objects in industrial 3D computed tomography, in: *NDT & E International* 41, Heft 4, S. 242–251.
- [74] Macovski, A.; Alvarez, R. E.; Chan, J.-H.; Stonestrom, J. P.; Zatz, L. M. (1976): Energy dependent reconstruction in X-ray computerized tomography, in: *Computers in Biology and Medicine* 6, Heft 4, S. 325–336.
- [75] Kerckhofs, G.; Schrooten, J.; Wevers, M.; Van Marcke, P.; Van Cleynenbreugel, T. (2006): Standardisation and validation of micro-CT for the morphological characterisation of porous structures, in: *European Federation for Non-Destructive Testing (Hg.)*, 9. European Conference on NDT, Berlin.
- [76] Glover, G. H. (1982): Compton scatter effects in CT reconstruction, in: *Medical Physics* 9, Heft 6, S. 860–867.
- [77] Joseph, P. M.; Spital, R. D. (1982): The effects of scatter in x-ray computed tomography, in: *Medical Physics* 9, Heft 4, S. 464–472.
- [78] Gould, R. G.; Hale, J. (1974): Control of scattered radiation by air gap techniques - Application to chest radiography, in: *American Journal of Roentgenology* 122, Heft 1, S. 109–118.
- [79] Endo, M.; Tsunoo, T.; Nakamori, N.; Yoshida, K. (2001): Effect of scattered radiation on image noise in cone beam CT, in: *Medical Physics* 28, Heft 4, S. 469–474.
- [80] Siewerdsen, J. H.; Moseley, D. J.; Bakhtiar, B.; Richard, S.; Jaffray, D. A. (2004): The influence of antiscatter grids on soft-tissue detectability in cone-beam computed tomography with flat-panel detectors, in: *Medical Physics* 31, Heft 12, S. 3506–3520.
- [81] Kalender, W. (1981): Monte Carlo calculations of X-ray scatter data for diagnostic radiology, in: *Physics in Medicine and Biology* 26, Heft 5, S. 835–849.
- [82] Malusek, A.; Sandborg, M.; Carlsson, G. A. (2003): Simulation of scatter in cone beam CT - Effects on projection image quality, in: *Medical Imaging* 5030, S. 740–751.
- [83] Peterzol, A.; Létang, J. M.; Babot, D. (2008): A beam stop based correction procedure for high spatial frequency scatter in industrial cone-beam X-ray CT,

- in: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 266, Heft 18, S. 4042–4054.
- [84] Brooks, R. A.; Di Chiro, G. (1976): Statisticcal limitations in x-ray reconstructive tomography, in: Medical Physics 3, Heft 4, S. 237–240.
- [85] Hanson, K. M. (1981): Noise and contrast discrimination in computed tomography: in: Radiology of the skull and brain - Volume 5: Technical Aspects of Computed Tomography, Newton, T. H.; Potts, D. G. (Hrsg.), The C. V. Mosby Company, Saint Louis, S. 3941–3955.
- [86] Hilts, M.; Duzenli, C. (2004): Image noise in X-ray CT polymer gel dosimetry, in: Journal of Physics: Conference Series 3, S. 252–256.
- [87] van Nieuwenhove, V.; Beenhouwer, J. de; Carlo, F. de; Mancini, L.; Marone, F.; Sijbers, J. (2015): Dynamic intensity normalization using eigen flat fields in X-ray imaging, in: Optics Express 23, Heft 21, S. 27975–27989.
- [88] Seibert, J. A.; Boone, J. M.; Lindfors, K. K. (1998): Flat-field correction technique for digital detectors, in: Hanson, K. M. (Hg.), SPIE Conference on Physics of Medical Imaging, San Diego, S. 348–354.
- [89] Moy, J.-P.; Bosset, B. (1999): How does real offset and gain correction affect the DQE in images from x-ray flat detectors, in: Boone, J. M.; Dobbins III, J. T. (Hrsg.), SPIE Conference Physics of Medical Imaging, San Diego, S. 90–97.
- [90] Justusson, B. I. (1981): Median filtering - Statistical properties: in: Two-dimensional digital signal processing II - Transform and median filters, Topics in Applied Physics 43, Huang, T. S. (Hg.), 1. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 161–196.
- [91] Ohser, J.; Schladitz, K. (2009): 3D images of materials structures - Processing and analysis, 1. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim.
- [92] Fonseca, J.; O'Sullivan, C.; Coop, M. R.; Lee, P. D. (2012): Non-invasive characterization of particle morphology of natural sands, in: Soils and Foundations 52, Heft 4, S. 712–722.
- [93] Zhao, B.; Wang, J. (2016): 3D quantitative shape analysis on form, roundness, and compactness with  $\mu$ CT, in: Powder Technology 291, S. 262–275.
- [94] Heygster, G. (1982): Rank filters in digital image processing, in: Computer Graphics and Image Processing 19, Heft 2, S. 148–164.
- [95] Sezgin, M.; Sankur, B. (2004): Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation, in: Journal of Electronic Imaging 13, Heft 1, S. 146–165.
- [96] Otsu, N. (1979): A threshold selection method from grey-level histograms, in: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 9, Heft 1, S. 62–66.
- [97] Fraunhofer ITWM Image Processing Department (2018): MAVI - Modular algorithms for volume images, Version 1.5.3.



- [98] Beucher, S.; Lantuéjoul, C. (1979): Use of watersheds in contour detection - International workshop on image processing: Real-time edge and motion detection/estimation, Rennes.
- [99] Meyer, F.; Beucher, S. (1990): Morphological segmentation, in: *Journal of Visual Communication and Image Representation* 1, Heft 1, S. 21–46.
- [100] Soille, P. (2004): *Morphological image analysis - Principles and applications*, 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg.
- [101] Godehardt, M.; Schladitz, K. (2006): Geometric characterisation of light weight composites using computer tomographic images, in: *European Federation for Non-Destructive Testing (Hg.)*, 9. European Conference on NDT, Berlin.
- [102] Videla, A.; Lin, C.-L.; Miller, J. D. (2006): Watershed functions applied to a 3D image segmentation problem for the analysis of packed particle beds, in: *Particle & Particle Systems Characterization* 23, Heft 3-4, S. 237–245.
- [103] Zheng, J.; Hryciw, R. D. (2016): Segmentation of contacting soil particles in images by modified watershed analysis, in: *Computers and Geotechnics* 73, S. 142–152.
- [104] Burgmann, S.; Godehardt, M.; Schladitz, K.; Breit, W. (2022): Separation of sand and gravel particles in 3D images using the adaptive h-extrema transform, in: *Powder Technology* 404, S. 117468.
- [105] Sun, H. Q.; Luo, Y. J. (2009): Adaptive watershed segmentation of binary particle image, in: *Journal of Microscopy* 233, Heft 2, S. 326–330.
- [106] Matsushima, T.; Katagiri, J.; Uesugi, K.; Tsuchiyama, A.; Nakano, T. (2009): 3D shape characterization and image-based DEM simulation of the lunar soil simulant FJS-1, in: *Journal of Aerospace Engineering* 22, Heft 1, S. 15–23.
- [107] Arganda-Carreras, I.; Kaynig, V.; Rueden, C.; Eliceiri, K. W.; Schindelin, J.; Cardona, A.; Seung, H. S. (2017): Trainable Weka segmentation - A machine learning tool for microscopy pixel classification, in: *Bioinformatics* 33, Heft 15, S. 2424–2426.
- [108] Wang, Y.; Lin, C. L.; Miller, J. D. (2015): Improved 3D image segmentation for X-ray tomographic analysis of packed particle beds, in: *Minerals Engineering* 83, S. 185–191.
- [109] Wang, Y.; Lin, C. L.; Miller, J. D. (2016): 3D image segmentation for analysis of multisize particles in a packed particle bed, in: *Powder Technology* 301, S. 160–168.
- [110] Lai, Z.; Chen, Q. (2019): Reconstructing granular particles from X-ray computed tomography using the TWS machine learning tool and the level set method, in: *Acta Geotechnica* 14, Heft 1, S. 1–18.
- [111] Bai, F.; Fan, M.; Yang, H.; Dong, L. (2021): Image segmentation method for coal particle size distribution analysis, in: *Particuology* 56, S. 163–170.

- [112] JCGM 100 (2008): Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, Joint Committee for Guides in Metrology.
- [113] Kiekens, K.; Welkenhuyzen, F.; Tan, Y.; Bleys, P.; Voet, A.; Kruth, J. P.; Dewulf, W. (2011): A test object with parallel grooves for calibration and accuracy assessment of industrial computed tomography (CT) metrology, in: Measurement Science and Technology 22, S. 115502.
- [114] Carmignato, S. (2012): Accuracy of industrial computed tomography measurements - Experimental results from an international comparison, in: CIRP Annals - Manufacturing Technology 61, Heft 1, S. 491–494.
- [115] VDI/VDE 2630 1.2 (2018): Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik - Einflussgrößen auf das Messergebnis und Empfehlungen für dimensionelle Computertomografie-Messungen, VDI Verein Deutscher Ingenieure.
- [116] Hiller, J.; Maisl, M.; Reindl, L. M. (2012): Physical characterization and performance evaluation of an x-ray micro-computed tomography system for dimensional metrology applications, in: Measurement Science and Technology 23, Heft 8, S. 85404.
- [117] VDI/VDE 2630 2.1 (2015): Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik - Bestimmung der Messunsicherheit und der Prüfprozesseignung von Koordinatenmessgeräten mit CT-Sensoren, VDI Verein Deutscher Ingenieure.
- [118] Glover, G. H.; Pelc, N. J. (1980): Nonlinear partial volume artifacts in X-ray computed tomography, in: Medical Physics 7, Heft 3, S. 238–248.
- [119] Lin, Q.; Neethling, S. J.; Dobson, K. J.; Courtois, L.; Lee, P. D. (2015): Quantifying and minimising systematic and random errors in X-ray micro-tomography based volume measurements, in: Computers & Geosciences 77, S. 1–7.
- [120] Dewulf, W.; Kiekens, K.; Tan, Y.; Welkenhuyzen, F.; Kruth, J.-P. (2013): Uncertainty determination and quantification for dimensional measurements with industrial computed tomography, in: CIRP Annals - Manufacturing Technology 62, Heft 1, S. 535–538.
- [121] Bull, D. J.; Sinclair, I.; Spearing, S. M. (2013): Partial volume correction for approximating crack opening displacements in CFRP material obtained from micro-focus X-ray CT scans, in: Composites Science and Technology 81, S. 9–16.
- [122] Hiller, J.; Kasperl, S. (2010): Zum Verhältnis von Bildqualität und Messgenauigkeit in der CT-Metrologie, in: Kastner, J. (Hg.), Zerstörungsfreie Bauteilprüfung, 3D-Materialcharakterisierung und Geometriebestimmung, Industrielle Computertomografie Tagung, Wels, S. 155–162.
- [123] Lehmann, P.; Wyss, P.; Flisch, A.; Lehmann, E.; Vontobel, P.; Krafczyk, M.; Kaestner, A.; Beckmann, F.; Gygi, A.; Flühler, H. (2006): Tomographical imaging and mathematical description of porous media used for the prediction of fluid distribution, in: Vadose Zone Journal 5, Heft 1, S. 80–97.

- [124] Neumann, J.; Simon, J.-W.; Reese, S. (2018): Digital sieving of irregular 3D particles - A study using XRCT and statistically similar synthetic data, in: *Powder Technology* 338, S. 1001–1015.
- [125] Burgmann, S.; Godehardt, M.; Schladitz, K.; Breit, W. (2021): Influence of voxel size for  $\mu$ CT imaging of particles on measurement accuracy, in: *Construction and Building Materials* 289, S. 123148.
- [126] Erdoğan, S. T.; Forster, A. M.; Stutzman, P. E.; Garboczi, E. J. (2017): Particle-based characterization of Ottawa sand - Shape, size, mineralogy, and elastic moduli, in: *Cement and Concrete Composites* 83, S. 36–44.
- [127] Cepuritis, R.; Garboczi, E. J.; Ferraris, C. F.; Jacobsen, S.; Sørensen, B. E. (2017): Measurement of particle size distribution and specific surface area for crushed concrete aggregate fines, in: *Advanced Powder Technology* 28, Heft 3, S. 706–720.
- [128] Illerhaus, B.; Onel, Y. (2014): Mehr Strom oder mehr Spannung, ein Vergleich dreier Röntgenröhren in der CT, in: *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (Hg.), DGZfP-Jahrestagung, Potsdam*.
- [129] Hundal, H. S.; Rohani, S.; Wood, H. C.; Pons, M. N. (1997): Particle shape characterization using image analysis and neural networks, in: *Powder Technology* 91, Heft 3, S. 217–227.
- [130] Erdogan, S. T.; Quiroga, P. N.; Fowler, D. W.; Saleh, H. A.; Livingston, R. A.; Garboczi, E. J.; Ketcham, P. M.; Hagedorn, J. G.; Satterfield, S. G. (2006): Three-dimensional shape analysis of coarse aggregates - New techniques for and preliminary results on several different coarse aggregates and reference rocks, in: *Cement and Concrete Research* 36, Heft 9, S. 1619–1627.
- [131] Vecchio, I.; Schladitz, K.; Godehardt, M.; Haneka, M. J. (2011): Geometric characterization of particles in 3d with an application to technical cleanliness, in: *Berichte des Fraunhofer ITWM* 207, S. 1–19.
- [132] Garboczi, E. J.; Liu, X.; Taylor, M. A. (2012): The 3-D shape of blasted and crushed rocks - From 20  $\mu$ m to 38 mm, in: *Powder Technology* 229, S. 84–89.
- [133] Jia, X.; Garboczi, E. J. (2016): Advances in shape measurement in the digital world, in: *Particology* 26, S. 19–31.
- [134] Fraunhofer ITWM Image Processing Department (2020): ToolIP - Tool for image processing.
- [135] Fraunhofer ITWM Image Processing Department: MAVIparticle - Modular algorithms for 3D particle characterization, Version 1.0.1.
- [136] R Core Team (2022): R - A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Version 4.2.2.
- [137] RStudio Team (2023): RStudio - Integrated Development Environment for R, Posit Software, Version 446.

- [138] Chatterjee, S.; Hadi, A. S. (1986): Influential observations, high leverage points, and outliers in linear regression, in: *Statistical Science* 1, Heft 3, S. 379–416.
- [139] Kronthaler, F. (2016): *Statistik angewandt - Datenanalyse ist (k)eine Kunst mit dem R Commander*, 1. Aufl., Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- [140] Hedderich, J.; Sachs, L. (2018): *Angewandte Statistik - Methodensammlung mit R*, 16. Aufl., Springer Spektrum, Berlin.
- [141] Breusch, T. S.; Pagan, A. R. (1979): A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation, in: *Econometrica* 47, Heft 5, S. 1287–1294.
- [142] Shapiro, S. S.; Wilk, M. B. (1965): An analysis of variance test for normality (complete samples), in: *Biometrika* 52, Heft 3-4, S. 591–611.
- [143] Durbin, J.; Watson, G. S. (1971): Testing for serial correlation in least squares regression, in: *Biometrika* 58, Heft 1, S. 1–19.
- [144] Box, G. E. P.; Tidwell, P. W. (1962): Transformation of the independent variables, in: *Technometrics* 4, Heft 4, S. 531–550.
- [145] Pek, J.; Wong, O.; Wong, A. C. M. (2018): How to address non-normality - A taxonomy of approaches, reviewed, and illustrated, in: *Frontiers in Psychology* 9, S. 2104.
- [146] White, H. (1980): A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity, in: *Econometrica* 48, Heft 4, S. 817–838.
- [147] Bagheri, G. H.; Bonadonna, C.; Manzella, I.; Vonlanthen, P. (2015): On the characterization of size and shape of irregular particles, in: *Powder Technology* 270, S. 141–153.
- [148] Garboczi, E. J.; Bullard, J. W. (2017): 3D analytical mathematical models of random star-shape particles via a combination of X-ray computed microtomography and spherical harmonic analysis, in: *Advanced Powder Technology* 28, Heft 2, S. 325–339.
- [149] Zhou, B.; Wei, D.; Ku, Q.; Wang, J.; Zhang, A. (2020): Study on the effect of particle morphology on single particle breakage using a combined finite-discrete element method, in: *Computers and Geotechnics* 122, S. 103532.
- [150] Erdoğan, S. T.; Nie, X.; Stutzman, P. E.; Garboczi, E. J. (2010): Micrometer-scale 3-D shape characterization of eight cements - Particle shape and cement chemistry, and the effect of particle shape on laser diffraction particle size measurement, in: *Cement and Concrete Research* 40, Heft 5, S. 731–739.
- [151] Califice, A.; Michel, F.; Dislaire, G.; Pirard, E. (2013): Influence of particle shape on size distribution measurements by 3D and 2D image analyses and laser diffraction, in: *Powder Technology* 237, S. 67–75.

- [152] Rothleitner, C.; Neuschaefer-Rube, U.; Illemann, J. (2016): Size and shape determination of sub-millimeter sized abrasive particles with X-ray computed tomography, in: University of Applied Sciences Upper Austria (Hg.), 6. Conference on Industrial Computed Tomography (iCT), Wels.
- [153] Masad, E.; Saadeh, S.; Al-Rousan, T.; Garboczi, E.; Little, D. (2005): Computations of particle surface characteristics using optical and X-ray CT images, in: Computational Materials Science 34, Heft 4, S. 406–424.
- [154] Hu, C.; Ma, J.; Kutay, M. (2017): Three dimensional digital sieving of asphalt mixture based on X-ray computed tomography, in: Applied Sciences 7, Heft 7, S. 734.
- [155] Wilcoxon, F. (1945): Individual comparisons by ranking methods, in: Biometrics Bulletin 1, Heft 6, S. 80–83.
- [156] McGloin, J.; Holcomb, S.; Main, D. S. (1996): Matching anonymous pre-post-tests using subject-generated information, in: Evaluation Review 20, Heft 6, S. 724–736.
- [157] Cohen, J. (1988): Statistical power analysis for the behavioral sciences, 2. Aufl., Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale.
- [158] Burgmann, S.; Breit, W. (2022): Fine aggregate characterization by micro-computed tomography - Sample size and comparability to laboratory test results, in: di Prisco, M.; Meda, A.; Balázs, G. L. (Hrsg.), 14. fib PhD Symposium in Civil Engineering, Rom, S. 409–416.
- [159] Kim, H.; Haas, C. T.; Rauch, A. F.; Browne, C. (2003): 3D image segmentation of aggregates from laser profiling, in: Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 18, S. 254–263.
- [160] Burgmann, S.; Dornisch-Bund, B.; Breit, W. (2021): Characterization scheme for natural and recycled fine aggregate shape based on  $\mu$ CT imaging, in: Júlio, E.; Valenca, J.; Louro, A. S. (Hrsg.), Concrete structures - New trends for eco-efficiency and performance, 18. fib Symposium, Lissabon, S. 795–804.
- [161] Wentworth, C. K. (1922): The shapes of beach pebbles, in: Shorter Contributions to General Geology 131, S. 75–83.
- [162] White, H. E.; Walton, S. F. (1937): Particle packing and particle shape, in: Journal of the American Ceramic Society 20, Heft 1-12, S. 155–166.
- [163] Aschenbrenner, B. C. (1956): A new method of expressing particle sphericity, in: Journal of Sedimentary Petrology 26, Heft 1, S. 15–31.
- [164] Krumbein, W. C. (1941): Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles, in: Journal of Sedimentary Research 11, Heft 2, S. 64–72.
- [165] Masad, E.; Olcott, D.; White, T.; Tashman, L. (2001): Correlation of fine aggregate imaging shape indices with asphalt mixture performance, in: Transportation Research Record 1757, Heft 1, S. 148–156.

- [166] Liu, Y.; Sun, W.; Nair, H.; Lane, D. S.; Wang, L. (2016): Quantification of aggregate morphologic characteristics with the correlation to uncompacted void content of coarse aggregates in Virginia, in: *Construction and Building Materials* 124, S. 645–655.
- [167] Jamkar, S. S.; Rao, C. (2004): Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning, in: *Cement and Concrete Research* 34, Heft 11, S. 2021–2027.
- [168] Ren, Q.; Tao, Y.; Jiao, D.; Jiang, Z.; Ye, G.; De Schutter, G. (2021): Plastic viscosity of cement mortar with manufactured sand as influenced by geometric features and particle size, in: *Cement and Concrete Composites* 122, S. 104163.
- [169] Liao, C. W.; Tarng, Y. S. (2009): On-line automatic optical inspection system for coarse particle size distribution, in: *Powder Technology* 189, Heft 3, S. 508–513.
- [170] Barrett, P. J. (1980): The shape of rock particles, a critical review, in: *Sedimentology* 27, Heft 3, S. 291–303.
- [171] Griffiths, J. C. (1967): *Scientific method in analysis of sediments*, 1. Aufl., McGraw-Hill Book Company, New York.
- [172] Blott, S. J.; Pye, K. (2008): Particle shape - A review and new methods of characterization and classification, in: *Sedimentology* 55, S. 31-63.
- [173] Sahu, B. K. (1965): Theory of sieving, in: *Journal of Sedimentary Petrology* 35, Heft 3, S. 750–753.
- [174] DIN EN 933-1 (2012): Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebversuch, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [175] DIN ISO 9276-6 (2012): Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 6: Deskriptive und quantitative Darstellung der Form und Morphologie von Partikeln, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [176] Taylor, M. A. (2002): Quantitative measures for shape and size of particles, in: *Powder Technology* 124, Heft 1-2, S. 94–100.
- [177] Garboczi, E. J.; Martys, N. S.; Saleh, H. H.; Livingston, R. A. (2001): Acquiring, analyzing and using complete three-dimensional aggregate shape information, in: *International Center for Aggregates Research (Hg.), Aggregates - Concrete, bases and fines, 9th Annual Symposium, Austin*.
- [178] Grigoriu, M.; Garboczi, E.; Kafali, C. (2006): Spherical harmonic-based random fields for aggregates used in concrete, in: *Powder Technology* 166, Heft 3, S. 123–138.

- [179] Liu, X.; Garboczi, E. J.; Grigoriu, M.; Lu, Y.; Erdoğan, S. T. (2011): Spherical harmonic-based random fields based on real particle 3D data - Improved numerical algorithm and quantitative comparison to real particles, in: Powder Technology 207, Heft 1-3, S. 78–86.
- [180] Lin, C. L.; Miller, J. D. (2005): 3D characterization and analysis of particle shape using X-ray microtomography (XMT), in: Powder Technology 154, Heft 1, S. 61–69.
- [181] Demtröder, W. (2018): Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme, 8. Aufl., Springer Spektrum, Berlin.
- [182] Lorensen, W. E.; Cline, H. E. (1987): Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm, in: Computer Graphics 21, Heft 4, S. 163–169.
- [183] Schladitz, K.; Ohser, J.; Nagel, W. (2006): Measuring intrinsic volumes in digital 3d images, in: Kuba, A.; Nyúl, L. G.; Palágyi, K. (Hrsg.), Discrete geometry for computer imagery, 13. International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery, Szeged, S. 247–258.
- [184] Wadell, H. (1935): Volume, shape and roundness of quartz particles, in: The Journal of Geology 43, Heft 3, S. 250–280.
- [185] DIN EN 933-2 (2020): Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 2: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Analysensiebe, Nennweite der Sieböffnungen, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [186] Fernlund, J. M. (1998): The effect of particle form on sieve analysis - A test by image analysis, in: Engineering Geology 50, Heft 1-2, S. 111–124.
- [187] Mora, C. F.; Kwan, A.; Chan, H. C. (1998): Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing, in: Cement and Concrete Research 28, Heft 6, S. 921–932.
- [188] DIN EN 12620 (2008): Gesteinskörnungen für Beton, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [189] Jin, C.; Yang, X.; You, Z.; Liu, K. (2018): Aggregate shape characterization using virtual measurement of three-dimensional solid models constructed from X-ray CT images of aggregates, in: Journal of Materials in Civil Engineering 30, Heft 3, S. 4018026.
- [190] Dornisch-Bund, B.; Breit, W. (2018): Three-dimensional parameters to characterize and describe the size and shape of aggregates based on computed tomography, in: Foster, S.; Gilbert, R. I.; Mendis, P.; Al-Mahaidi, R.; Millar, D. (Hrsg.), Better, smarter, stronger, fib Congress, Melbourne.
- [191] Bund, B.; Burgmann, S.; Breit, W. (2016): 3D Kenndaten zur Charakterisierung von Gesteinskörnungen basierend auf CT-Aufnahmen, in: Tue, N. V.; Krüger, M.; Freytag, B.; Santner, G. (Hrsg.), 3. Grazer Betonkolloquium, Graz, S. 231–238.

- [192] Sneed, E. D.; Folk, R. L. (1958): Pebbles in the lower colorado river, texas - A study in particle morphogenesis, in: *The Journal of Geology* 66, Heft 2, S. 114–150.
- [193] Corey, A. T. (1949): Influence of shape on the fall velocity of sand grains, Masterarbeit, Colorado Agricultural and Mechanical College, Port Collins.
- [194] Janke, N. C. (1966): Effect of shape upon the settling velocity of regular convex geometric particles, in: *Journal of Sedimentary Petrology* 36, Heft 2, S. 370–376.
- [195] Denis, E. P.; Barat, C.; Jeulin, D.; Ducottet, C. (2008): 3D complex shape characterization by statistical analysis - Application to aluminium alloys, in: *Materials Characterization* 59, Heft 3, S. 338–343.
- [196] Hofmann, H. J. (1994): Grain-shaped indices and isometric graphs, in: *Journal of Sedimentary Research* 64, Heft 4, S. 916–920.
- [197] Wentworth, C. K. (1922): A method of measuring and plotting the shapes of pebbles, in: *Contributions to the Geography of the United States Bulletin* 730, S. 91–102.
- [198] Powers, M. C. (1953): A new roundness scale for sedimentary particles, in: *Journal of Sedimentary Petrology* 23, Heft 2, S. 117–119.
- [199] Shergold, F. A. (1953): The percentage voids in compacted gravel as a measure of its angularity, in: *Magazine of Concrete Research* 5, Heft 13, S. 3–10.
- [200] Huang, E. Y. (1962): A test for evaluating the geometric characteristics of coarse aggregate particles, in: *Proceedings of the American Society of Testing & Materials Annual Meeting* 62, S. 1223–1242.
- [201] Rex, H. M.; Peck, R. A. (1956): A laboratory test to evaluate the shape and surface texture of fine aggregate particles, in: *Public Roads* 29, Heft 5, S. 118–120.
- [202] Stern, H. I. (1989): Polygonal entropy - A convexity measure, in: *Pattern Recognition Letters* 10, Heft 4, S. 229–235.
- [203] Garboczi, E. J.; Bullard, J. W. (2013): Contact function, uniform-thickness shell volume, and convexity measure for 3D star-shaped random particles, in: *Powder Technology* 237, S. 191–201.
- [204] Wright, P. J. F. (1955): A method of measuring the surface texture of aggregate, in: *Magazine of Concrete Research* 7, Heft 21, S. 151–160.
- [205] Cho, G.-C.; Dodds, J.; Santamarina, J. C. (2006): Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength - Natural and crushed sands, in: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132, Heft 5, S. 591–602.
- [206] Masad, E.; Button, J. W. (2000): Unified imaging approach for measuring aggregate angularity and texture, in: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 15, Heft 4, S. 273–280.



- [207] Jähne, B. (2012): *Digitale Bildverarbeitung - Und Bildgewinnung*, 7. Aufl., Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- [208] Burgmann, S.; Breit, W. (2024): Impact of crushed natural and recycled fine aggregates on fresh and hardened mortar properties, in: *Construction Materials* 4, Heft 1, S. 37–57.
- [209] Dormann, C. F.; Eliith, J.; Bacher, S.; Buchmann, C.; Carl, G.; Carré, G.; Marquéz, J. R. G.; Gruber, B.; Lafourcade, B.; Leitão, P. J.; Münkemüller, T.; McClean, C.; Osborne, P. E.; Reineking, B.; Schröder, B.; Skidmore, A. K.; Zurell, D.; Lautenbach, S. (2013): Collinearity - A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance, in: *Ecography* 36, Heft 1, S. 27–46.
- [210] Harrell, F. E. (2001): *Regression modeling strategies - With applications to linear models, logistic regression, and survival analysis*, Springer series in statistics, 1. Aufl., Springer, New York.
- [211] de Larrard, F. (1999): *Concrete mixture proportioning - A scientific approach*, Modern concrete technology series 9, 1. Aufl., E & FN Spon, London.
- [212] Fuller, W. B.; Thompson, S. E. (1907): The laws of proportioning concrete, in: *American Society of Civil Engineering* 23, Heft 3, S. 222–298.
- [213] de Larrard, F.; Sedran, T. (2002): Mixture-proportioning of high-performance concrete, in: *Cement and Concrete Research* 32, Heft 11, S. 1699–1704.
- [214] de Larrard, F. (2009): Concrete optimisation with regard to packing density and rheology, in: Wallevik, O. H.; Kubens, S.; Oesterheld, S. (Hrsg.), 3. International Symposium on Rheology of Cement Suspensions such as Fresh Concrete, Reykjavik, S. 10–17.
- [215] Kwan, A. K. H.; Chan, K. W.; Wong, V. (2013): A 3-parameter particle packing model incorporating the wedging effect, in: *Powder Technology* 237, S. 172–179.
- [216] DIN EN 1097-3 (1998): Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [217] Wong, H. H. C.; Kwan, A. K. H. (2008): Packing density of cementitious materials - Part 1: Measurement using a wet packing method, in: *Materials and Structures* 41, S. 689–701.
- [218] Kwan, A.; Fung, W. (2009): Packing density measurement and modelling of fine aggregate and mortar, in: *Cement and Concrete Composites* 31, Heft 6, S. 349–357.
- [219] Fung, W. W. S.; Kwan, A. K. H.; Wong, H. H. C. (2009): Wet packing of crushed rock fine aggregate, in: *Materials and Structures* 42, Heft 5, S. 631–643.

- [220] Rousé, P. C.; Fannin, R. J.; Shuttle, D. A. (2008): Influence of roundness on the void ratio and strength of uniform sand, in: *Géotechnique* 58, Heft 3, S. 227–231.
- [221] Zou, R. P.; Yu, A. B. (1996): Evaluation of the packing characteristics of mono-sized non-spherical particles, in: *Powder Technology* 88, Heft 1, S. 71–79.
- [222] Hafid, H.; Ovarlez, G.; Toussaint, F.; Jezequel, P. H.; Roussel, N. (2016): Effect of particle morphological parameters on sand grains packing properties and rheology of model mortars, in: *Cement and Concrete Research* 80, S. 44–51.
- [223] Tattersall, G. H. (1991): *Workability and quality control of concrete*, 1. Aufl., Taylor & Francis, London, New York.
- [224] Banfill, P. F. G. (2006): Rheology of fresh cement and concrete, in: *Rheology Reviews*, S. 61–130.
- [225] Abrams, D. A. (1919): *Design of concrete mixtures*, Structural Materials Research Laboratory - Lewis Institute.
- [226] Popovics, S. (1973): Aggregate grading and the internal structure of concrete, in: *Highway Research Record*, Heft 441, S. 56–64.
- [227] Hunger, M.; Brouwers, H. (2009): Flow analysis of water–powder mixtures - Application to specific surface area and shape factor, in: *Cement and Concrete Composites* 31, Heft 1, S. 39–59.
- [228] Kwan, A. K. H.; Li, L. G. (2012): Combined effects of water film thickness and paste film thickness on rheology of mortar, in: *Materials and Structures* 45, Heft 9, S. 1359–1374.
- [229] Ghasemi, Y.; Emborg, M.; Cwirzen, A. (2019): Effect of water film thickness on the flow in conventional mortars and concrete, in: *Materials and Structures* 52, Heft 3, S. 517.
- [230] DIN 1342-1 (2003): *Viskosität - Teil 1: Rheologische Begriffe*, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [231] Bingham, E. C. (1916): An investigation of the laws of plastic flow, in: *Bulletin of the Bureau of Standards* 13, S. 309–353.
- [232] Mezger, T. G. (2016): *Das Rheologie Handbuch - Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*, 5. Aufl., Vincentz Network, Hannover.
- [233] Freundlich, H. (1928): Ueber Thixotropie, in: *Kolloid-Zeitschrift* 46, S. 289–299.
- [234] Barnes, H. A. (1997): Thixotropy - A review, in: *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 70, Heft 1-2, S. 1–33.
- [235] Bingham, E. C. (1930): Some fundamental definitions of rheology, in: *Journal of Rheology* 1, Heft 5, S. 507–516.
- [236] Blair, G. W. S. (1933): On the nature of "yield-value", in: *Physics* 4, Heft 3, S. 113–118.

- [237] Barnes, H. A.; Walters, K. (1985): The yield stress myth?, in: *Rheologica Acta* 24, S. 323–326.
- [238] Banfill, P. F. G. (1991): The rheology of fresh mortar, in: *Magazine of Concrete Research* 43, Heft 154, S. 13–21.
- [239] Wallevik, O. H.; Wallevik, J. E. (2011): Rheology as a tool in concrete science - The use of rheographs and workability boxes, in: *Cement and Concrete Research* 41, Heft 12, S. 1279–1288.
- [240] Bingham, E. C. (1922): Fluidity and plasticity, International Chemical Series, 1. Aufl., McGraw-Hill Book Company, New York.
- [241] Banfill, P. F. G. (1987): Feasibility study of a coaxial cylinders viscometer for mortar, in: *Cement and Concrete Research* 17, Heft 2, S. 329–339.
- [242] Tattersall, G. H. (1955): Structural breakdown of cement pastes at constant rate of shear, in: *Nature* 175, S. 166.
- [243] Nessim, A. A.; Wajda, R. L. (1965): The rheology of cement pastes and fresh mortars, in: *Magazine of Concrete Research* 17, Heft 51, S. 59–68.
- [244] Bingham, E. C.; Reiner, M. (1933): The rheological properties of cement and cement-mortar-stone, in: *Physics* 4, Heft 3, S. 88–96.
- [245] Hendrickx, R.; Rezeau, M.; Van Balen, K.; Van Gemert, D. (2009): Mortar and paste rheology - Concentration, polydispersity and air entrapment at high solid fraction, in: *Applied Rheology* 19, Heft 5, S. 52550.
- [246] González-Fonteboá, B.; González-Taboada, I.; Carro-López, D.; Martínez-Abella, F. (2021): Influence of the mixing procedure on the fresh state behaviour of recycled mortars, in: *Construction and Building Materials* 299, Heft 11, S. 124266.
- [247] Banfill, P. F. G. (1990): A coaxial cylinders viscometer for mortar - Design and experimental validation, in: Banfill, P. F. G. (Hg.), *Rheology of Fresh Cement and Concrete*, International Conference organized by the British Society of Rheology, Liverpool, S. 217–226.
- [248] Winnefeld, F. (2001): Rheologische Eigenschaften von Mörteln und Betonen - Neuartiges System für Messungen, in: *Tec21* 127, Heft 40, S. 14–18.
- [249] Barnes, H. A. (1995): A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers - Its cause, character, and cure, in: *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 56, Heft 3, S. 221–251.
- [250] Schleibinger Geräte Teubert und Greim GmbH (Hg.) (2018): Bedienungsanleitung Schleibinger Viskomat NT und Viskomat XL.
- [251] Kantro, D. L. (1980): Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste - A miniature slump test, in: *Cement, Concrete and Aggregates* 2, Heft 2, S. 95–102.

- [252] Bonzel, J.; Krell, J. (1986): Konsistenzprüfung von Frischbeton: in: *Betontechnische Berichte 1984/85 - Forschungsinstitut der Zementindustrie*, Wischers, G. (Hg.), Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf, S. 17–40.
- [253] DIN EN 12350-2 (2019): Prüfung von Frischbeton - Teil 2: Setzmaß, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [254] DIN EN 12350-4 (2019): Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [255] DIN EN 12350-5 (2019): Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [256] Erdoğan, S. T.; Martys, N. S.; Ferraris, C. F.; Fowler, D. W. (2008): Influence of the shape and roughness of inclusions on the rheological properties of a cementitious suspension, in: *Cement and Concrete Composites* 30, Heft 5, S. 393–402.
- [257] Kabagire, K. D.; Diederich, P.; Yahia, A.; Chekired, M. (2017): Experimental assessment of the effect of particle characteristics on rheological properties of model mortar, in: *Construction and Building Materials* 151, S. 615–624.
- [258] Kaplan, M. F. (1958): The effect of properties of coarse aggregates on the workability of concrete, in: *Magazine of Concrete Research* 10, Heft 29, S. 63–74.
- [259] Polat, R.; Yadollahi, M. M.; Sagsoz, A. E.; Arasan, S. (2013): The correlation between aggregate shape and compressive strength of concrete - Digital image processing approach, in: *International Journal of Structural and Civil Engineering Research* 2, Heft 3, S. 62–80.
- [260] Shen, W.; Yang, Z.; Cao, L.; Cao, L.; Liu, Y.; Yang, H.; Lu, Z.; Bai, J. (2016): Characterization of manufactured sand - Particle shape, surface texture and behavior in concrete, in: *Construction and Building Materials* 114, S. 595–601.
- [261] Yang, S.; Zhang, J.; An, X.; Qi, B.; Li, W.; Shen, D.; Li, P.; Lv, M. (2021): The effect of sand type on the rheological properties of self-compacting mortar, in: *Buildings* 11, Heft 10, S. 441.
- [262] Cortes, D. D.; Kim, H.-K.; Palomino, A. M.; Santamarina, J. C. (2008): Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands, in: *Cement and Concrete Research* 38, Heft 10, S. 1142–1147.
- [263] Eckert, M.; Oliveira, M. (2017): Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology, in: *Construction and Building Materials* 133, S. 416–424.
- [264] Leite, M. B.; Figueire do Filho, J. G. L.; Lima, P. R. L. (2013): Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate, in: *Materials and Structures* 46, Heft 10, S. 1765–1778.
- [265] DIN EN 196-1 (2016): Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Deutsches Institut für Normung e.V.

- [266] DIN EN 12390-3 (2019): Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [267] DIN EN 1015-11 (2020): Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [268] Bonzel, J. (1959): Zur Gestaltabhängigkeit der Betondruckfestigkeit, in: Beton- und Stahlbetonbau 54, Heft 9, S. 223–228.
- [269] Bonzel, J. (1959): Zur Gestaltabhängigkeit der Betondruckfestigkeit, in: Beton- und Stahlbetonbau 54, Heft 10, S. 247–248.
- [270] Hsu, T. T. C.; Slate, F. O.; Sturman, G. M.; Winter, G. (1963): Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve, in: Journal of the American Concrete Institute 60, Heft 2, S. 209–223.
- [271] Manns, W. (1971): Elastizitätsmodul von Zementstein und Beton: in: Betontechnische Berichte 1970 - Berichte und Mitteilungen der Betontechnischen Abteilung des Forschungsinstitutes der Zementindustrie, Walz, K. (Hg.), Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf, S. 139–164.
- [272] DIN EN 12390-13 (2021): Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul), Deutsches Institut für Normung e.V.
- [273] DIN EN 13412 (2006): Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Druckversuch, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [274] Bunke, N. (1991): Prüfung von Beton - Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048, Hefte des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton Heft 422, 1. Aufl., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [275] Bonzel, J. (1964): Über die Biegezugfestigkeit des Betons: in: Betontechnische Berichte 1963 - Berichte und Mitteilungen der Betontechnischen Abteilung des Forschungsinstitutes der Zementindustrie, Walz, K. (Hg.), Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf, S. 59–83.
- [276] DIN EN 12390-5 (2019): Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [277] Wills, M. H. (1967): How aggregate particle shape influences concrete mixing water requirement and strength, in: Journal of Materials 2, Heft 4, S. 843–865.
- [278] Deng, P.; Xu, K.; Guo, S. (2023): Effects of coarse aggregate morphology on concrete mechanical properties, in: Journal of Building Engineering 63, S. 105408.
- [279] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T. (2017): Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE), 2. Aufl., Springer Vieweg, Berlin.
- [280] Montgomery, D. C. (2013): Design and Analysis of Experiments, 8. Aufl., Wiley, Hoboken.

- [281] Schutter, G. de; Poppe, A.-M. (2004): Quantification of the water demand of sand in mortar, in: *Construction and Building Materials* 18, Heft 7, S. 517–521.
- [282] DIN EN 1097-6 (2022): Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [283] Kim, J.; Zi, G.; Lange, D. A. (2017): Measurement of water absorption of very fine particles using electrical resistivity, in: *ACI Materials Journal* 114, Heft 6, S. 957–965.
- [284] Sosa, M. E.; Carrizo, L. E.; Zega, C. J.; Villagrán Zaccardi, Y. A. (2018): Water absorption of fine recycled aggregates - Effective determination by a method based on electrical conductivity, in: *Materials and Structures* 51, Heft 5, S. 79.
- [285] DIN EN 196-6 (2019): Prüfverfahren für Zement - Teil 6: Bestimmung der Mahlfeinheit, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [286] DIN EN 196-3 (2017): Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [287] Poon, C. S.; Shui, Z. H.; Lam, L.; Fok, H.; Kou, S. C. (2004): Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete, in: *Cement and Concrete Research* 34, Heft 1, S. 31–36.
- [288] Scheidt, J. C. (2019): Ermittlung des erforderlichen Gesamtwassers zur Herstellung von R-Beton mit definierten Wasserzementwert, Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.
- [289] Etxeberria, M.; Vázquez, E.; Marí, A.; Barra, M. (2007): Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, in: *Cement and Concrete Research* 37, Heft 5, S. 735–742.
- [290] DIN 53019-1 (2008): Viskosimetrie - Messung von Viskositäten und Fließkurven mit Rotationsviskosimetern - Teil 1: Grundlagen und Messgeometrie, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [291] DIN EN 1015-3 (2007): Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (Ausbreittisch), Deutsches Institut für Normung e.V.
- [292] DIN EN 12350-8 (2019): Prüfung von Frischbeton - Teil 8: Selbstverdichtender Beton - Setzfließversuch, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [293] Hohberg, R. (2003): Entwicklung des E-Moduls von Beton aus Recyclingmaterial im Vergleich zu Beton mit natürlichem Zuschlag, Forschungsbericht 257, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.
- [294] BAWMerkblatt (2012): Frostprüfungen von Beton (MFB), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).

- [295] Schwarz, G. (1978): Estimating the dimensions of a model, in: *The Annals of Statistics* 6, Heft 2, S. 461–464.
- [296] Roussel, N.; Stefani, C.; Leroy, R. (2005): From mini-cone test to Abrams cone test - Measurement of cement-based materials yield stress using slump tests, in: *Cement and Concrete Research* 35, Heft 5, S. 817–822.
- [297] Saak, A. W.; Jennings, H. M.; Shah, S. P. (2004): A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow, in: *Cement and Concrete Research* 34, Heft 3, S. 363–371.
- [298] Tanigawa, Y.; Mori, H. (1989): Analytical study on deformation of fresh concrete, in: *Journal of Engineering Mechanics* 115, Heft 3, S. 493–508.
- [299] Shin, T. Y.; Kim, J. H. (2022): First step in modeling the flow table test to characterize the rheology of normally vibrated concrete, in: *Cement and Concrete Research* 152, S. 106678.
- [300] Khatib, J. M. (2005): Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate, in: *Cement and Concrete Research* 35, Heft 4, S. 763–769.
- [301] Evangelista, L.; Brito, J. de (2007): Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, in: *Cement and Concrete Composites* 29, Heft 5, S. 397–401.
- [302] The MathWorks Inc. (2021): MATLAB, Version R2021b.
- [303] Jarre, F.; Stoer, J. (2019): *Optimierung - Einführung in mathematische Theorie und Methoden*, 2. Aufl., Springer Spektrum, Berlin.
- [304] DIN ISO 5725-2 (2022): Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen - Teil 2: Grundlegende Methode für die Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichpräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens, Deutsches Institut für Normung e.V.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Darstellung der Forschungsfragen. ....	4
Abb. 1.2: Schematische Darstellung des Aufbaus dieser Arbeit. ....	6
Abb. 2.1: Aufbau des CT-Gerätes CT ALPHA-240 (ProCon X-Ray) mit Röntgenröhre (links), Probenteller (mittig) und Detektor (rechts). ....	7
Abb. 2.2: Beispielhaftes Röntgenstrahlungsspektrum gekennzeichnet durch Bremsstrahlung und den charakteristischen Linienspektren ( $K\alpha$ - und $K\beta$ -Linie), nach [52], ins Deutsche übersetzt. ....	8
Abb. 2.3: Veranschaulichung des registrierten Intensitätsverlaufs nach Durchstrahlung einer zweidimensionalen Korndarstellung unter dem Winkel a) $\Theta_1=0^\circ$ und b) $\Theta_2=90^\circ$ . ....	10
Abb. 2.4: Prinzip der einfachen Rückprojektion bei Verwendung von a) einer Projektion, b) 18 Projektionen und c) 180 Projektionen. ....	11
Abb. 2.5: Ergebnis der Rückprojektion bei Verwendung von 180 Projektionen a) als ungefilterte Rückprojektion und b) als gefilterte Rückprojektion bei Verwendung des Shepp-Logan-Filters. ....	12
Abb. 2.6: Veranschaulichung von Strahlaufhärtungsartefakten anhand zweier nebeneinander gescannter Kugeln aus Kalknatronglas mit ausgeprägten Streifenartefakten zwischen den Kugeln (gestrichelte Pfeile) sowie erhöhten Grauwerten im Randbereich der Kugeln (durchgezogene Pfeile). ....	13
Abb. 2.7: Ausschnitt eines zweidimensionalen Schnittes durch eine Kugel aus Kalknatronglas zur Veranschaulichung von Rauschartefakten bei CT-Aufnahmen. ....	14
Abb. 2.8: Vom Detektor registrierte Grauwerte bei Bestrahlung ohne Probe mit a) vor und b) nach der Flat-Field-Korrektur. Das Linienprofil spiegelt die Grauwerte entlang der gestrichelten Linie wider. ....	15
Abb. 2.9: Veranschaulichung der Filterung des Grauwertbildes zur Reduktion von Rauschartefakten anhand eines zweidimensionalen Querschnitts durch eine Sandprobe mit a) Grauwertbild nach der Rekonstruktion und b) gefiltertes Grauwertbild bei Verwendung eines Medianfilters mit 3er-Maske. ....	16
Abb. 2.10: Veranschaulichung der Erstellung eines Binärbildes nach der Methode von Otsu anhand eines zweidimensionalen Querschnitts durch eine Sandprobe mit a) Grauwertbild nach Anwendung eines Medianfilters, b) Histogramm der Grauwerte mit dem grau gestrichelt markierten Schwellenwert nach Otsu und c) Binärbild. ....	17



- Abb. 2.11: Veranschaulichung der Kornsegmentierung anhand eines zweidimensionalen Querschnitts durch eine Sandprobe mit a) invertierter Euklidischer Distanztransformation, b) Ergebnis der Wasserscheidentransformation und c) Ergebnis der vorgefluteten Wasserscheidentransformation mit Grenzwert von 100. .... 18
- Abb. 2.12: Veranschaulichung der Kornsegmentierung anhand eines zweidimensionalen Querschnitts durch eine Sandprobe mit a) invertierter Euklidischer Distanztransformation mit beispielhaften Grauwertprofil und Parametern der H-Extrematransformation, b) Prinzip der H-Extrematransformation und c) Ergebnis der Kornsegmentierung bei Verwendung der H-Extrematransformation mit  $h_{crit}=10$ . .... 20
- Abb. 2.13: Veranschaulichung der Kornsegmentierung anhand eines zweidimensionalen Querschnitts durch eine Sandprobe mit a) invertierter Euklidischer Distanztransformation mit beispielhaften Grauwertprofil und Parametern der adaptiven H-Extrematransformation, b) Prinzip der adaptiven H-Extrematransformation und c) Ergebnis der Kornsegmentierung bei Verwendung der adaptiven H-Extrematransformation, in Anlehnung an [104]. .... 21
- Abb. 2.14: Verwendete Gesteinskörnungsarten zur Auswahl der Einzelkörner, hier dargestellt sind Schüttungen mit Körnern zwischen 2 mm und 8 mm Siebgröße: Rheinkies (links), Quarzkies (mittig) und gebrochener Mikrodioritplitt (rechts). .... 28
- Abb. 2.15: Ablauf der Bildbearbeitung der Einzelkörner beispielhaft für zwei Rheinkieskörner mit a) Originalgrauwertbild, b) Grauwertbild nach Glättung, c) Binärbild und d) gelabelte Einzelkörner. .... 30
- Abb. 2.16: Ergebnis der Regressionsanalyse zum Einfluss der strukturellen Auflösung  $R_{min}$  auf die Änderung des Kornvolumens  $\Delta V_{Korn}$  in Bezug auf den Referenzwert aufgenommen bei einer Voxelgröße von 25  $\mu m$  mit Regressionskurve (durchgezogene Linie) und 90 %-Vorhersageintervallen für Einzelkörner unterschiedlicher Materialien, in Anlehnung an [125]. .... 34
- Abb. 2.17: Ergebnis der Regressionsanalyse zum Einfluss der strukturellen Auflösung  $R_{min}$  auf die Änderung der Kornoberfläche  $\Delta O_{Korn}$  in Bezug auf den Referenzwert, aufgenommen bei einer Voxelgröße von 25  $\mu m$  für Einzelkörner unterschiedlicher Materialien, in Anlehnung an [125]. .... 35
- Abb. 2.18: Zweidimensionales Schnittbild des Rheinkieskorns Nr. 113 tomographiert bei einer Voxelgröße von a) 25  $\mu m$  und b) 85  $\mu m$ , nach [125]. .... 36

Abb. 2.19: Ergebnis der Regressionsanalyse zum Einfluss der strukturellen Auflösung $R_{\min}$ auf die Änderung der Kornlänge $\Delta l$ in Bezug auf den Referenzwert aufgenommen bei einer Voxelgröße von 25 $\mu\text{m}$ mit Regressionskurve (durchgezogene Linie) und 90 %-Vorhersageintervallen für Einzelkörner unterschiedlicher Materialien, in Anlehnung an [125].	37
Abb. 2.20: Methoden zur Probenpräparation zur Anfertigung von CT-Aufnahmen: a) Lose Schüttung in Probengefäß aus Acrylglas und b) Körner eingebettet in Modellierwachs, in Anlehnung an [104].	43
Abb. 2.21: Ergebnis der Bildbearbeitung bei a) Labeling voneinander getrennter Körner und b) nach Segmentierung mit adaptiver H-Extrematransformation und Wasserscheidentransformation mit anschließender manueller Korrektur, in Anlehnung an [104].	44
Abb. 2.22: Histogramm der Verteilung des Kornvolumens $V_{\text{Korn}}$ innerhalb der Quarzkiesschüttung, tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner.	45
Abb. 2.23: Histogramm der Verteilung der Kornoberfläche $O_{\text{Korn}}$ innerhalb der Quarzkiesschüttung, tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner.	45
Abb. 2.24: Histogramm der Verteilung der Kornlänge $l$ innerhalb der Quarzkiesschüttung, tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner, in Anlehnung an [104].	46
Abb. 2.25: Darstellung möglicher Fehlerquellen anhand eines beispielhaften 2D-Schnitts durch eine Quarzkiesprobe mit a) Wasserscheide zwischen zwei in Kontakt stehenden Körnern und b) Übergangsbereich zwischen Körnern und Probengefäß, nach [104].	47
Abb. 2.26: Verwendete feine Gesteinskörnungsproben mit Korngröße zwischen 0,125 mm und 2 mm: a) Normsand, b) Mikrodioritsplitt, c) rezyklierter Betonbruch und d) rezyklierter Mauerwerksbruch, in Anlehnung an [160].	50
Abb. 2.27: Schema zur Bestimmung des Anteils an fehlsegmentierten Körnern bei Segmentierung mit adaptiver H-Extrematransformation mit variierendem $h_{\text{crit}}(0)$ im Vergleich zur manuell korrigierten Grundwahrheit.	52
Abb. 2.28: Anteil fehlsegmentierter Körner als Summe der unter- und übersegmentierten Körner bei Variation des $h_{\text{crit}}(0)$ -Wertes für die Schüttungen mit einer Korngröße zwischen 0,125 mm und 2 mm, in Anlehnung an [104].	55
Abb. 2.29: Anteil fehlsegmentierter Körner als Summe der unter- und übersegmentierten Körner bei Variation des $h_{\text{crit}}(0)$ -Wertes für die Schüttungen mit einer Korngröße zwischen 2 mm und 4 mm bzw. 5 mm, in Anlehnung an [104].	55

Abb. 2.30: Schnittbild durch eine CT-Aufnahme der feinen Mauerwerksbruchschüttung mit a) Grauwertbild und b) Binärbild nach Anwendung des Verfahrens nach Otsu.....	57
Abb. 2.31: Korrelation $R$ nach Pearson zwischen dem optimalen $h_{\text{crit}}(0)$ -Wert sowie verschiedenen Parametern zur Charakterisierung der Schüttungen, in Anlehnung an [104]. .....	57
Abb. 2.32: Vergleich zwischen der Fehlsegmentierungsrate bei Verwendung des optimalen sowie dem nach Gleichung (2.17) berechneten $h_{\text{crit}}(0)$ -Wert für die acht untersuchten Materialproben. ....	58
Abb. 2.33: Boxplots zur Veranschaulichung der Streuung der Fehlsegmentierungsrate der fünf Schüttungen einer Materialart sowie die Fehlsegmentierungsrate bei Verwendung eines konstanten $h_{\text{crit}}(0)$ -Wertes nach Zheng et al. [103] und bei Anwendung der nicht-adaptiven H-Extrematransformation, in Anlehnung an [104]. ....	60
Abb. 3.1: Morphologische Beschreibung von Körnern anhand der Kategorien Form, Eckigkeit bzw. Rundheit und Rauigkeit bzw. Oberflächentextur, nach [170], übersetzt ins Deutsche. ....	63
Abb. 3.2: Digitale Darstellung eines Kornes anhand des Voxelmodells (oben) sowie der Kugelflächenfunktion (unten), nach [33]. ....	64
Abb. 3.3 Bestimmung der Kornabmessungen a) nach der Definition von Krumbein [164], b) nach der Definition von Blott und Pye [172]. ....	65
Abb. 3.4: Schematische und vereinfachte Darstellung der Bestimmung der Siebgröße anhand von virtuellen Kornscheiben entlang der Hauptträgheitsachse eines Kornes. ....	67
Abb. 3.5: Verteilung der Körner einer Kornschüttung zur Bestimmung von $SP_E$ , $LL_E$ und $PL_E$ (Angaben in % bezogen auf die Gesamtanzahl an Körnern). ....	71
Abb. 3.6: Beispielhafte Darstellung der konvexen Hülle einer Kornprojektion. ....	72
Abb. 3.7: Verwendete Materialien a) Rheinsand, b) Basaltsplitt, c) Kalknatronglas, d) Betonbruch und e) Mauerwerksbruch. ....	76
Abb. 3.8: Querschnitt der CT-Aufnahme nach Bildbearbeitung mit segmentierten Körnern der Materialien a) Rheinsand, b) Basaltsplitt, c) Kalknatronglas, d) rezyklierter Betonbruch und e) rezyklierter Mauerwerksbruch, in Anlehnung an [208]. ....	78
Abb. 3.9: Kenngrößen zur Charakterisierung der Verteilung des $PL_W$ -Parameters innerhalb der Sandprobe mit Sieblinie AB, basierend auf der a) volumengewichteten Verteilung und b) nach Anzahl gewichteten Verteilung. ....	79
Abb. 3.10: Ausprägung des Merkmals $d_{V50}$ für die untersuchten Schüttungen des morphologischen Parameters a) $SP_H$ und b) $PL_Z$ . ....	81

Abb. 3.11: Korrelationskoeffizient $R$ nach Pearson für den Wert $d_{V50}$ der morphologischen Parameter zur Charakterisierung von Gesteinskörnungsschüttungen.....	82
Abb. 3.12: Korrelationskoeffizient $R$ nach Pearson für den Wert $d_{A50}$ der morphologischen Parameter zur Charakterisierung von Gesteinskörnungsschüttungen.....	83
Abb. 3.13: Korrelationsmatrix zwischen den Parametern a) $LL_E$ und $LL_D$ sowie b) $LL_E$ und $AT_{3D}$ .....	83
Abb. 4.1: Zwei-Platten-Modell zur Veranschaulichung des Verhaltens eines Stoffes unter Scherung, nach [232].	89
Abb. 4.2: Modellhafte Fließkurven für Stoffe mit und ohne Fließgrenze $\tau_0$ (dargestellt als $\tau_y$ ) als Zusammenhang zwischen Schubspannung $\tau$ und Scherrate $\dot{\gamma}$ (dargestellt als $q$ ), nach [237], übersetzt ins Deutsche.....	90
Abb. 4.3: Exemplarische Fließkurve einer Zementsuspension mit ausgeprägtem Strukturbruch, nach [224].	91
Abb. 4.4: Einfluss eines steigenden Anteils an groben, aus Mörtel hergestellten, Körpern im Beton sowie der Kornform auf a) Fließgrenze und b) dynamische Viskosität, nach [256], übersetzt ins Deutsche.....	93
Abb. 4.5: Einfluss von a) Plattigkeit und b) Eckigkeit 13 verschiedener grober Gesteinskörnungen auf den Verdichtungsfaktor von Beton, nach [258], übersetzt ins Deutsche.....	95
Abb. 4.6: Zusammenhang zwischen Setzfließmaß und Wasser-Zement-Wert bei Verwendung verschiedener Sande und Brechsande, nach [25], übersetzt ins Deutsche.....	97
Abb. 4.7: Einfluss des Formfaktors Sphärizität auf die Druckfestigkeit von Beton, nach [259], übersetzt ins Deutsche.....	101
Abb. 4.8: Morphologische Charakterisierung der verwendeten Schüttungen im Hinblick auf a) den Grad der Länglichkeit $d_{V50}(LL_E)$ und b) den Anteil länglicher Körner $LL_E$ , in Anlehnung an [208].	108
Abb. 4.9: Morphologische Charakterisierung der verwendeten Schüttungen im Hinblick auf a) den Grad der Eckigkeit $d_{V50}(AT_{3D})$ und b) die Verteilung der Eckigkeit $d_{V90/10}(AT_{3D})$ , in Anlehnung an [208].	108
Abb. 4.10: Bestimmung der Wasseraufnahme $WA$ von Brechsand mittels Messung des elektrischen Widerstands.....	109
Abb. 4.11: Bestimmung der Wasseraufnahme $WA$ anhand von zwei Regressionsgeraden nach Bestimmung des elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit vom Wassergehalt.....	109
Abb. 4.12: Zeitlicher Ablauf der Mörtelherstellung.....	111

Abb. 4.13: Rheometer Viskomat NT (Schleibinger Geräte Teubert und Greim GmbH) mit Messtopf und Mörtelpaddel in Fischgrätenform mit integrierter Temperaturmesssonde. ....	111
Abb. 4.14: Messprofil mit Vorscherphase und Nummerierung der Stufen der Messphase. ....	112
Abb. 4.15: Bestimmung der Fließgrenze $\tau_{0,rel}$ und der dynamischen Viskosität $\eta_{rel}$ mittels linearer Regression für das Beispiel einer Mörtelzusammensetzung aus Glas mit einer Sieblinie BC, einem w/z-Wert von 0,45 und einem b/gk-Wert von 0,95. ....	113
Abb. 4.16: Bestimmung des dynamischen E-Moduls mit dem PUNDIT PL-200/PE (proceq). ....	113
Abb. 4.17: Bestimmung von Biegezug- und Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1 mit der kombinierten Druck- und Biegezugprüfmaschine ZK 300-15 (TESTING Bluhm & Feuerherdt GmbH). ....	115
Abb. 4.18: Streudiagramm der Versuchsergebnisse über den Untersuchungszeitraum für a) Ausbreitmaß und b) dynamischer E-Modul. ....	116
Abb. 4.19: Einfluss des Anteils länglicher Körner $LL_E$ auf die dynamische Viskosität mit grau hinterlegtem Konfidenzintervall sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen), in Anlehnung an [208]. ....	119
Abb. 4.20: Einfluss der Eckigkeit auf die dynamische Viskosität mit grau hinterlegtem Konfidenzintervall sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von $d_{V50}(AT_{3D})$ in Abhängigkeit vom w/z-Wert und b) Einfluss von $d_{V90/10}(AT_{3D})$ in Abhängigkeit vom w/z-Wert, in Anlehnung an [208]. ....	120
Abb. 4.21: Beispielhafte Darstellung der Bindemittelschicht, welche die Körner umhüllt, mit weiß markierten Kontaktpunkten zwischen Körnern bei gleichbleibender Bindemittelmasse für a) kugelförmige Körner und b) eckige Körner. ....	121
Abb. 4.22: Exemplarisches Bruchbild nach Füllen und Abheben einer Kegelstumpfform in Abhängigkeit von der Kornform der verwendeten Körner mit a) kugelförmigen Körnern und b) eckigen Körnern. ....	121
Abb. 4.23: Zusammenhang zwischen der Schüttdichte $\rho_b$ als Maß der Packungsdichte und der Verteilung der Eckigkeit $d_{V90/10}(AT_{3D})$ innerhalb einer Schüttung für die zehn verwendeten Gesteinskörnungen. ....	122
Abb. 4.24: Einfluss der Länglichkeit auf die Fließgrenze mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von $d_{V50}(LL_E)$ und b) Einfluss von $LL_E$ in Abhängigkeit von der Sieblinie, in Anlehnung an [208]. ....	124

Abb. 4.25: Schematische Darstellung des Aufweitungseffekt mit a) Hohlraumgehalt der Packung bei Körnern niedriger Länglichkeit und b) erhöhtem Hohlraumgehalt der Packung (weiß markiert) bei Körnern höherer Länglichkeit. ....	125
Abb. 4.26: Aufgeschlüsselt nach Kornbreite $b$ a) Anteil länglicher Körner und b) Medianwert des Verhältnisses von Kornlänge $l$ zu Korndicke $d$ . ....	125
Abb. 4.27: Einfluss der Eckigkeit auf die Fließgrenze $\tau_{0,rel}$ mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von $d_{V50}(AT_{3D})$ in Abhängigkeit vom $b/gk$ -Wert und b) Einfluss von $d_{V90/10}(AT_{3D})$ in Abhängigkeit vom $w/z$ -Wert und von der Sieblinie, in Anlehnung an [208]. ....	126
Abb. 4.28: Einfluss des Grades der Länglichkeit $d_{V50}(LL_E)$ auf das Setzmaß mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen). ....	128
Abb. 4.29: Einfluss der Länglichkeit auf das Setzfließmaß mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von $d_{V50}(LL_E)$ in Abhängigkeit vom $w/z$ -Wert und b) Einfluss von $LL_E$ . ....	129
Abb. 4.30: Einfluss der Eckigkeit auf das Setzmaß mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von $d_{V50}(AT_{3D})$ und b) Einfluss von $d_{V90/10}(AT_{3D})$ in Abhängigkeit vom $w/z$ -Wert. ....	130
Abb. 4.31: Einfluss der Eckigkeit auf das Setzfließmaß mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von $d_{V50}(AT_{3D})$ in Abhängigkeit vom $w/z$ -Wert und b) Einfluss von $d_{V90/10}(AT_{3D})$ in Abhängigkeit vom $w/z$ -Wert. ....	130
Abb. 4.32: Einfluss der Länglichkeit auf das Ausbreitmaß mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von $d_{V50}(LL_E)$ und b) Einfluss von $LL_E$ . ....	131
Abb. 4.33: Einfluss der Eckigkeit auf das Ausbreitmaß mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von $d_{V50}(AT_{3D})$ in Abhängigkeit von der Sieblinie und b) Einfluss von $d_{V90/10}(AT_{3D})$ in Abhängigkeit vom $w/z$ -Wert. ....	132
Abb. 4.34: Grad der Eckigkeit $d_{V50}(AT_{3D})$ in Abhängigkeit von der Kornbreite $b$ für die fünf verwendeten Materialarten. ....	133
Abb. 4.35: Einfluss der Eckigkeit auf die Druckfestigkeit mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von $d_{V50}(AT_{3D})$ in Abhängigkeit vom Materialursprung und b) Einfluss von $d_{V90/10}(AT_{3D})$ in Abhängigkeit vom $w/z$ -Wert, in Anlehnung an [208]. ....	135

Abb. 4.36: Bruchfläche bei Druckbeanspruchung von a) Mörtel mit Rheinsand und b) Mörtel mit rezyklierten Betonbruch und weiß markierten Bruchflächen durch Brechsandkörner hindurch.....	136
Abb. 4.37: Einfluss der Ausprägung der Eckigkeit $d_{V50}(AT_{3D})$ auf die Biegezugfestigkeit mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen), in Anlehnung an [208]. .....	137
Abb. 4.38: Einfluss des Anteils länglicher Körner $LL_E$ auf den dynamischen E-Modul in Abhängigkeit von der Sieblinie und vom Materialursprung mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) a) für einen w/z-Wert=0,45 und b) für einen w/z-Wert=0,55. ....	139
Abb. 4.39: Einfluss der Eckigkeit auf den dynamischen E-Modul mit grau hinterlegten Konfidenzintervallen sowie schwarz markierten Versuchsergebnissen (als Residuen) und a) Einfluss von $d_{V50}(AT_{3D})$ in Abhängigkeit vom w/z-Wert und b) Einfluss von $d_{V90/10}(AT_{3D})$ in Abhängigkeit vom w/z-Wert.....	139
Abb. 4.40: Kornfraktion zwischen 1 mm und 2 mm Siebgröße der verwendeten Materialien a) Rheinsand, b) Andesitsplitt, c) rezyklierter Betonbruch und d) rezyklierter Mauerwerksbruch. ....	144
Abb. 4.41: Morphologische Charakterisierung der verwendeten Gesteinskörnung mit a) $LL_E$ , b) $d_{V50}(LL_E)$ , c) $d_{V50}(AT_{3D})$ und d) $d_{V90/10}(AT_{3D})$ . ....	144
Abb. 4.42: Vergleich von in Abschnitt 4.3 gemessenem Setzmaß und mittels Regressionsmodell aus Abschnitt 4.2 vorhergesagtem Setzmaß inklusive Einheitslinie und Bestimmtheitsmaß $R^2$ .....	149
Abb. 4.43: Vergleich von mittlerem Setzmaß für Mörtelzusammensetzungen, bestehend aus Sand der Sieblinie AB der Versuchsergebnisse aus Abschnitt 4.2 und der Versuchsergebnisse aus Abschnitt 4.3.....	150
Abb. 4.44: Ergebnis der Regressionsanalyse für $d_{V90/10}(AT_{3D})$ , basierend auf den Daten aus Abschnitt 4.2 mit zusätzlich schwarz markierten Daten aus Abschnitt 4.3.....	151
Abb. 4.45: Vergleich von in Abschnitt 4.3 gemessenem Ausbreitmaß und mittels Regressionsmodell aus Abschnitt 4.2 vorhergesagtem Ausbreitmaß inklusive Einheitslinie und Bestimmtheitsmaß $R^2$ und a) unter Berücksichtigung der Mörtelzusammensetzungen mit Andesitsplitt und b) bei Ausschluss der Mörtelzusammensetzungen mit Andesitsplitt. ....	152
Abb. 4.46: Ergebnis der Regressionsanalyse für $d_{V50}(LL_E)$ , basierend auf den Daten aus Abschnitt 4.2 mit zusätzlich markierten Daten der Versuchsergebnisse der Verifikation aus Abschnitt 4.3 und a) unter Berücksichtigung der Mörtelzusammensetzungen mit Andesitsplitt und b) bei Ausschluss der Mörtelzusammensetzungen mit Andesitsplitt. ....	153

Abb. 4.47: Vergleich von in Abschnitt 4.3 gemessener Druckfestigkeit und mittels Regressionsmodell aus Abschnitt 4.2 vorhergesagter Druckfestigkeit inklusive Einheitslinie und Bestimmtheitsmaß $R^2$ .....	154
Abb. 4.48: Vergleich von mittlerer Druckfestigkeit für Mörtelzusammensetzungen, bestehend aus Sand der Sieblinie AB aus Abschnitt 4.2 und aus Abschnitt 4.3.....	155
Abb. 4.49: Optimierung einer Mörtelzusammensetzung mit einem w/z-Wert von 0,45, einem b/gk-Wert von 1,05 bei maximaler Verringerung der Druckfestigkeit um 5 % bei Einsatz von Brechsand mit Ergebnissen zur a) Druckfestigkeit und b) Ausbreitmaß. ....	156
Abb. 4.50: Optimierung einer Mörtelzusammensetzung mit einem w/z-Wert von 0,55, einem b/gk-Wert von 0,95 bei maximaler Verringerung der Druckfestigkeit um 5 % bei Einsatz von Brechsand mit Ergebnissen zur a) Druckfestigkeit und b) Ausbreitmaß. ....	156
Abb. 4.51: Optimierung einer Mörtelzusammensetzung mit einem w/z-Wert von 0,45, einem b/gk-Wert von 1,05 bei maximaler Verringerung der Druckfestigkeit um 10 % bei Einsatz von Brechsand mit Ergebnissen zur a) Druckfestigkeit und b) Ausbreitmaß. ....	157
Abb. 4.52: Optimierung einer Mörtelzusammensetzung mit einem w/z-Wert von 0,55, einem b/gk-Wert von 0,95 bei maximaler Verringerung der Druckfestigkeit um 10 % bei Einsatz von Brechsand mit Ergebnissen zur a) Druckfestigkeit und b) Ausbreitmaß. ....	158
Abb. A.1: Histogramm der Verteilung des Kornvolumens $V_{\text{Korn}}$ innerhalb der Rheinkieschüttung tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner, in Anlehnung an [104]. ....	203
Abb. A.2: Histogramm der Verteilung des Kornvolumens $V_{\text{Korn}}$ innerhalb der Mikrodioritplittschüttung tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner. ....	203
Abb. A.3: Histogramm der Verteilung des Kornoberfläche $O_{\text{Korn}}$ innerhalb der Rheinkieschüttung tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner. ....	204
Abb. A.4: Histogramm der Verteilung des Kornoberfläche $O_{\text{Korn}}$ innerhalb der Mikrodioritplittschüttung tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner, in Anlehnung an [104]. ....	204
Abb. A.5: Histogramm der Verteilung des Kornlänge $l$ innerhalb der Rheinkieschüttung tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner. ....	205
Abb. A.6: Histogramm der Verteilung des Kornlänge $l$ innerhalb der Mikrodioritplittschüttung tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner. ....	205



Abb. C.1: Bestimmung von  $d_{A10}(V_{\text{Korn}})$ ,  $d_{A50}(V_{\text{Korn}})$  und  $d_{A90}(V_{\text{Korn}})$  anhand eines Beispiels der kumulativen Volumenverteilung der Körner der Normsandprobe, in Anlehnung an [158]. .....208

Abb. C.2: Mittelwert und Standardabweichung von  $d_{A10}(V_{\text{Korn}})$ ,  $d_{A50}(V_{\text{Korn}})$  und  $d_{A90}(V_{\text{Korn}})$  der Probe aus rezyklierten Mauerwerksbruch in Abhängigkeit von der Stichprobengröße im Vergleich zum jeweiligen Wert der Grundwahrheit (gestrichelte Linie) sowie der annehmbaren Grenzabweichung von 3 % (gepunktet-gestrichelte Linie), in Anlehnung an [158]. .....210

Abb. C.3: Zusammenhang zwischen dem Variationskoeffizienten  $VK_V$  des Kornvolumens und der minimal erforderlichen Stichprobengröße mit gestrichelt dargestellter Trendlinie, in Anlehnung an [158]. .....212

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Verwendete Voxelgröße zur Anfertigung von CT-Aufnahmen von Körnern unterschiedlicher Größe, die daraus resultierende strukturelle Auflösung der CT-Aufnahme sowie Angabe der Veröffentlichung, in Anlehnung an [125].	24
Tab. 2.2: Zusammenfassung der Anforderungen an das Konzept zur Erstellung und Bearbeitung von CT-Aufnahmen von Gesteinskörnungsproben.	25
Tab. 2.3: Anzahl der ausgewählten Einzelkörner der jeweiligen unteren Siebgröße und Materialart.	29
Tab. 2.4: Beiträge zur Bestimmung der Messungenauigkeit von Länge und Volumen der Hochpräzisionskugel mit Durchmesser 5 mm, in Anlehnung an [125].	39
Tab. 2.5: Zusammenfassung der Ergebnisse des Wilcox-Test und dessen Effektstärke zum Vergleich der Verteilung von $V_{\text{Korn}}$ , $O_{\text{Korn}}$ und $l$ bei Anfertigung der CT-Aufnahme als lose Schüttung oder physischer Trennung der Körner, nach [104].	46
Tab. 2.6: Scanparameter zur Anfertigung von CT-Aufnahmen von feinkörnigen und groben Gesteinskörnungsproben.	50
Tab. 2.7: Anteil an Über- und Untersegmentierungen sowie der Gesamtanteil an Fehlsegmentierungen bei Durchführung der adaptiven H-Extrematransformation mit optimalem $h_{\text{crit}}(0)$ -Wert für die untersuchten feinkörnigen und grobkörnigen Gesteinskörnungsschüttungen.	56
Tab. 2.8: Anforderungen an das Konzept zur Erstellung und Bearbeitung von CT-Aufnahmen von Gesteinskörnungsproben basierend auf den Untersuchungen aus Abschnitt 2.2 und 2.3.	62
Tab. 3.1: Zusammenfassung von Parametern zur Beschreibung der Plattigkeit mit Berechnungsformel, Erläuterung der verwendeten Formelzeichen sowie Angabe der Veröffentlichung, in Anlehnung an [160].	68
Tab. 3.2: Zusammenfassung von Parametern zur Beschreibung der Länglichkeit mit Berechnungsformel, Erläuterung der verwendeten Formelzeichen sowie Angabe der Veröffentlichung, in Anlehnung an [160].	69
Tab. 3.3: Zusammenfassung von Parametern zur Beschreibung der Sphärizität mit Berechnungsformel, Erläuterung der verwendeten Formelzeichen sowie Angabe der Veröffentlichung, in Anlehnung an [160].	70
Tab. 3.4: Zusammenfassung von Parametern zur Beschreibung der Eckigkeit mit Berechnungsformel, Erläuterung der verwendeten Formelzeichen sowie Angabe der Veröffentlichung, in Anlehnung an [160].	73
Tab. 3.5: Zusammensetzung der AB- und BC-Sieblinie für die Materialien Sand, Splitt, Betonbruch und Mauerwerksbruch.	77
Tab. 3.6: Zusammensetzung der AB- und BC-Sieblinie für die Glaskugeln.	77

Tab. 3.7: Varianzinflationsfaktor für die ausgewählten Kenngrößen zur Charakterisierung von Ausprägung und Verteilung der morphologischer Eigenschaften der Schüttungen. ....	84
Tab. 4.1: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Literatur zum Einfluss verschiedener morphologischer Parameter der Gesteinskörnung auf die Eigenschaften von Mörtel oder Beton im frischen und erhärteten Zustand. ....	102
Tab. 4.2: Materialkennwerte für die zehn verwendeten Materialien, in Anlehnung an [208]. ....	107
Tab. 4.3: Regressionsergebnis für die logarithmierte abhängige Variable dynamische Viskosität, in Anlehnung an [208]. ....	119
Tab. 4.4: Regressionsergebnis für die logarithmierte abhängige Variable Fließgrenze, in Anlehnung an [208]. ....	123
Tab. 4.5: Regressionsergebnis für die abhängige Variable Setzmaß. ....	127
Tab. 4.6: Regressionsergebnis für die abhängige Variable Setzfließmaß. ....	127
Tab. 4.7: Regressionsergebnis für die abhängige Variable Ausbreitmaß. ....	131
Tab. 4.8: Regressionsergebnis für die abhängige Variable Druckfestigkeit, in Anlehnung an [208]. ....	134
Tab. 4.9: Regressionsergebnis für die abhängige Variable Biegezugfestigkeit, in Anlehnung an [208]. ....	137
Tab. 4.10: Regressionsergebnis für die abhängige Variable dynamische Viskosität. ....	138
Tab. 4.11: Ergebnisse zum Einfluss morphologischer Kenngrößen auf die Frisch- und Festmörteleigenschaften. ....	141
Tab. 4.12: Charakteristische Materialeigenschaften der verwendeten Gesteinskörnungsschüttungen. ....	145
Tab. 4.13: Randbedingungen für die Optimierung des Anteils an Brechsand am Gesamtvolumen der Gesteinskörnung sowie das Optimierungsergebnis. ....	147
Tab. 4.14: Vergleich von $R^2$ bei Verwendung des Regressionsmodells aus Abschnitt 4.2 mit den Daten aus Abschnitt 4.2 sowie zur Verifikation aus Abschnitt 4.3. ....	149
Tab. B.1: Gesamtvolumen und Gesamtoberfläche einer Quarzkies- und einer Mikrodioritsplittprobe bei wiederholtem Tomographieren. ....	207
Tab. C.1: Kornvolumen, Kornoberfläche und Kornlänge bei einem kumulativen Durchgang von 10 %, 50 % und 90 % der Körner der vier untersuchten Materialien für die jeweiligen Grundwahrheit. ....	209

Tab. C.2: Minimal erforderliche Anzahl an Körnern zur Bildung einer repräsentativen Stichprobe bei Bestimmung von Kornvolumen, Kornoberfläche oder Kornlänge der vier untersuchten Materialien, in Anlehnung an [158]. .....	211
Tab. D.1: Anteil an fehlsegmentierten Körnern bei Variation von $h_{crit}(0)$ für die vier feinen Gesteinskörnungsproben mit Korngrößen zwischen 0,125 mm und 2 mm. ....	213
Tab. D.2: Anteil an fehlsegmentierten Körnern bei Variation von $h_{crit}(0)$ für die vier groben Gesteinskörnungsproben mit Korngrößen zwischen 2 mm und 4 mm bzw. 5 mm. ....	216
Tab. E.1: Mörtelzusammensetzung der Versuche aus Abschnitt 4.2. ....	220
Tab. F.1: Versuchsergebnisse des ersten Blocks der Versuche aus Abschnitt 4.2. ....	221
Tab. F.2: Versuchsergebnisse des zweiten Blocks der Versuche aus Abschnitt 4.2. ....	222
Tab. F.3: Versuchsergebnisse des dritten Blocks der Versuche aus Abschnitt 4.2. ....	223
Tab. F.4: Versuchsergebnisse des vierten Blocks der Versuche aus Abschnitt 4.2. ....	224
Tab. G.1: Versuchsergebnisse des ersten Blocks aus Abschnitt 4.3. ....	225
Tab. G.2: Versuchsergebnisse des zweiten Blocks aus Abschnitt 4.3. ....	226
Tab. G.3: Versuchsergebnisse des dritten Blocks aus Abschnitt 4.3. ....	227

## Anhang

### A Einfluss der Probenpräparation auf die Bestimmung der Korngröße

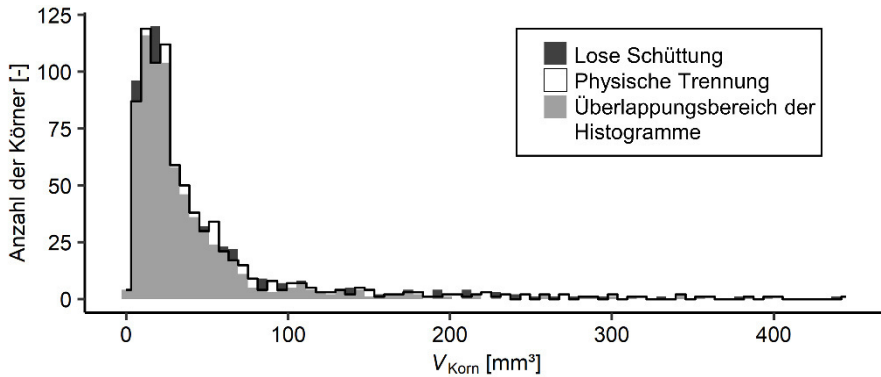


Abb. A.1: Histogramm der Verteilung des Kornvolumens  $V_{\text{Korn}}$  innerhalb der Rheinkieschüttung tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner, in Anlehnung an [104].

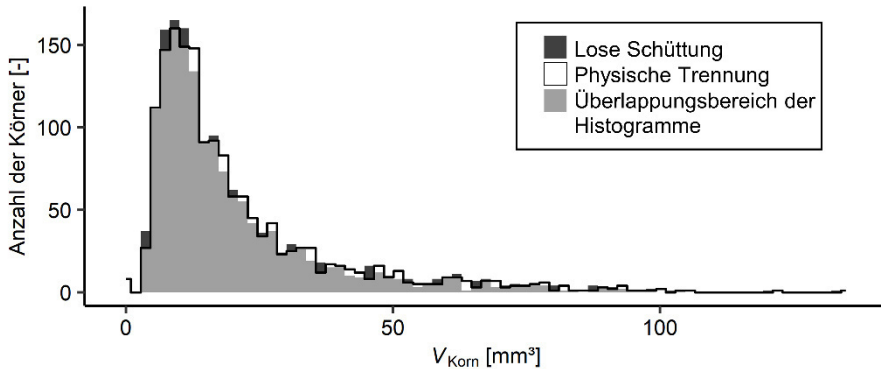


Abb. A.2: Histogramm der Verteilung des Kornvolumens  $V_{\text{Korn}}$  innerhalb der Mikrodioritplittschüttung tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner.

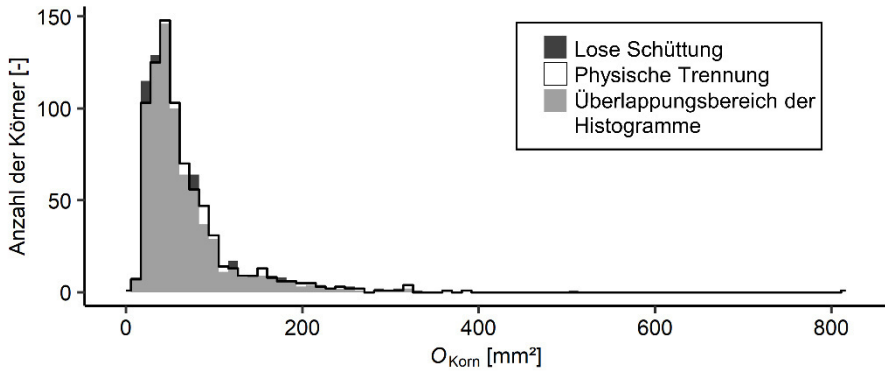


Abb. A.3: Histogramm der Verteilung des Kornoberfläche  $O_{\text{Korn}}$  innerhalb der Rheinkieseschüttung tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner.

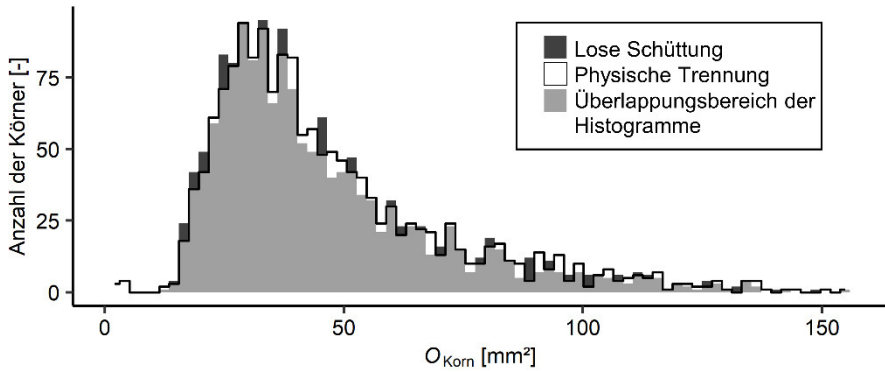


Abb. A.4: Histogramm der Verteilung des Kornoberfläche  $O_{\text{Korn}}$  innerhalb der Mikrodioritplittschüttung tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner, in Anlehnung an [104].

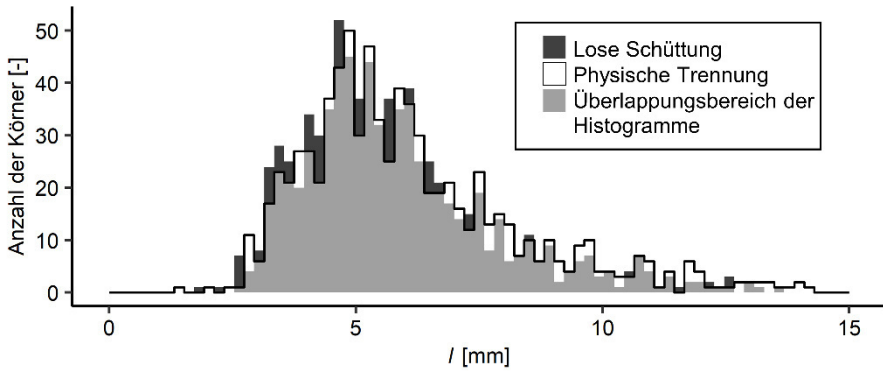


Abb. A.5: Histogramm der Verteilung des Kornlänge  $l$  innerhalb der Rheinkiessschüttung tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner.

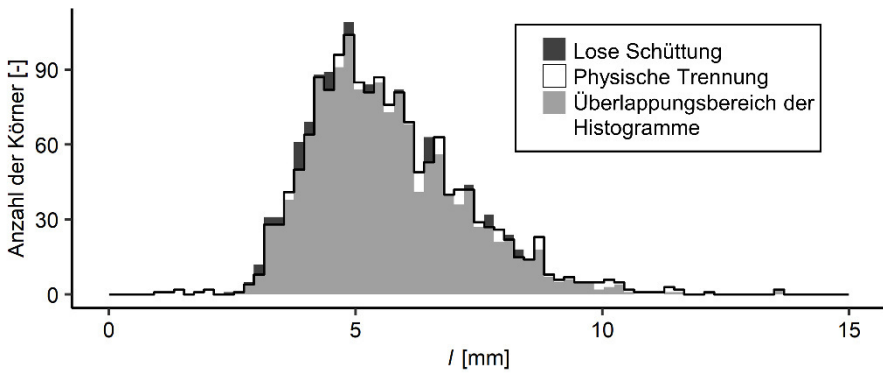


Abb. A.6: Histogramm der Verteilung des Kornlänge  $l$  innerhalb der Mikrodiorsplittschüttung tomographiert als lose Schüttung sowie mit physischer Trennung der Körner.

## B Bestimmung der Wiederholpräzision

Die Wiederholpräzision wird in Anlehnung an DIN ISO 5725-2 [304] bestimmt. Abweichend von den Vorgaben der DIN ISO 5725-2 erfolgt die Untersuchung nicht unter der Beteiligung anderer Labore. Eine Quarzkiesschüttung mit Körnern der Korngröße 2 mm bis 4 mm sowie eine Mikrodioritsplittschüttung ebenfalls mit Körnern der Korngröße 2 mm bis 4 mm wird 10-mal hintereinander bei gleichbleibenden Einstellungen als lose Schüttung in einem Probengefäß aus Acrylglas tomographiert. Die Anfertigung der CT-Aufnahmen erfolgt bei einer Voxelgröße von 30  $\mu\text{m}$ , einer Spannung von 150 kV, einer Stromstärke von 170  $\mu\text{A}$  und einer Belichtungsdauer von 0,12 s. Je CT-Aufnahme werden 2.400 Projektionen aufgenommen, wobei eine Bildmittelung von fünf Bildern erfolgt. Es wird eine Flat-Field Korrektur durchgeführt sowie ein Aluminiumfilter eingesetzt. Nach jeder Anfertigung einer CT-Aufnahme wird die Gesteinskörnungssprobe geschüttelt, sodass sich die Position der einzelnen Körner ändert. Die Bildbearbeitung erfolgt vom Grauwertbild bis zum Binärbild analog zu dem Vorgehen welches in Abschnitt 2.2.1.4 beschrieben ist. Die Körner werden anhand der vorgefluteten Wasserscheidentransformation (siehe Abschnitt 2.1.7) segmentiert. Fehlsegmentierungen werden manuell korrigiert.

Tab. B.1: Gesamtvolumen und Gesamtoberfläche einer Quarzkies- und einer Mikrodioritsplittprobe bei wiederholtem Tomographieren.

Versuch	Gesamtvolumen $\sum V_{\text{Korn}}$ [cm <sup>3</sup> ]		Gesamtoberfläche $\sum O_{\text{Korn}}$ [cm <sup>2</sup> ]	
	Quarzkies	Mikrodioritsplitt	Quarzkies	Mikrodioritsplitt
1	12,886	11,479	314,147	309,597
2	12,941	11,450	315,043	309,126
3	12,936	11,439	314,712	308,457
4	12,913	11,475	314,720	309,314
5	12,936	11,457	314,991	308,844
6	12,866	11,443	313,563	309,034
7	12,921	11,450	314,375	309,179
8	12,946	11,467	314,990	309,071
9	12,971	11,464	315,404	309,459
10	12,911	11,450	314,474	309,362
Mittelwert $\bar{x}$	12,923	11,457	314,642	309,144
Standardabweichung $sd$	0,031	0,013	0,527	0,327
Wiederholstandardabweichung $s_r$	0,022 (0,18 %)		0,427 (0,14 %)	



Anschließend werden das Gesamtvolumen  $\sum V_{\text{Korn}}$  sowie die Gesamtoberfläche  $\sum O_{\text{Korn}}$  aller Körner der jeweiligen Probe bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab. B.1 dargestellt. Tab. B.1 enthält ebenfalls die Werte für den Mittelwert  $\bar{x}$  und die Wiederholstandardabweichung  $s_r$ . Die Wiederholstandardabweichung  $s_r$  ergibt sich dabei als Mittelwert der Standardabweichungen  $sd$  für den jeweiligen Messwert der Quarzkies- und der Mikrodioritsplittprobe. Die Angabe des prozentualen Wertes für die Wiederholstandardabweichung bezieht sich auf das Mittel des Kornvolumens bzw. der Kornoberfläche aus der Quarzkies- und der Mikrodioritsplittprobe.

## C Untersuchung der erforderlichen Anzahl an Körnern zur Bildung einer repräsentativen Stichprobe

Die im Folgenden vorgestellten Versuchsergebnisse sind in [158] vorveröffentlicht worden. Zur Untersuchung der erforderlichen Anzahl an Körnern, die zur Bildung einer repräsentativen Stichprobe tomographiert werden müssen, werden von vier Materialien jeweils CT-Aufnahmen von 15 Proben angefertigt. Als Materialien kommen Brechsand aus Mikrodioritsplitt, Normsand entsprechend der Vorgaben aus DIN EN 196-1 [265], rezyklierter Betonbruch und rezyklierter Mauerwerksbruch zum Einsatz. Körner größer 2 mm und kleiner 125  $\mu\text{m}$  werden mittels Trockensiebung vor Anfertigung der CT-Aufnahmen entfernt. Von jedem der untersuchten Materialien werden 15 Proben als lose Schüttung in einem zylindrischen Gefäß aus Steckschwamm tomographiert. Die CT-Aufnahmen werden entsprechend der Vorgaben der Tab. 2.2 in Abschnitt 2.1.9 angefertigt. Die Voxelgröße beträgt 8  $\mu\text{m}$ . Dies entspricht bei einer minimalen Korngröße von 125  $\mu\text{m}$  einem  $R_{\min}$  von 15,63. Die strukturelle Auflösung  $R_{\min}$  liegt damit etwas unterhalb der in Abschnitt 2.2.1 erarbeiteten Empfehlung bei Bestimmung des Kornvolumens  $V_{\text{Korn}}$ . Die CT-Aufnahmen werden unter Verwendung von VGStudio 3.2 (Volume Graphics) rekonstruiert. Anschließend erfolgt die Bildbearbeitung mit MAVI [97] erweitert durch MAVIparticle [135] sowie ToolIP mit MAVIkit [134] (Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik) analog zu dem Vorgehen beschrieben in Abschnitt 2.2.2.3. Die Körner werden mittels Wasserscheidentransformation in Kombination mit der adaptiven H-Extrematransformation segmentiert, wobei die Eingangsparameter automatisiert entsprechend dem in Abschnitt 2.3 erarbeiteten Vorgehen bestimmt werden. Für jedes Korn werden Volumen  $V_{\text{Korn}}$ , Oberfläche  $O_{\text{Korn}}$  und Länge  $l$  bestimmt. Die Kornlänge entspricht dabei dem größten Abstand zwischen zwei Punkten auf der Kornoberfläche.

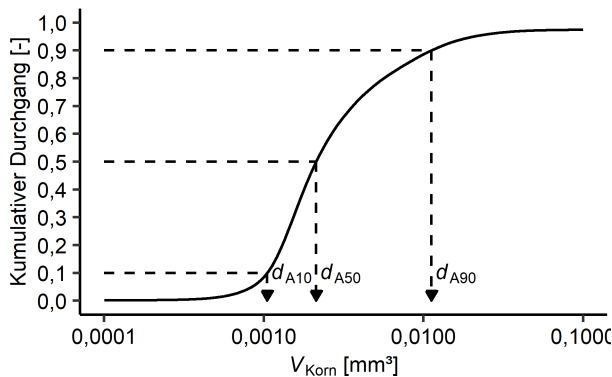


Abb. C.1: Bestimmung von  $d_{A10}(V_{\text{Korn}})$ ,  $d_{A50}(V_{\text{Korn}})$  und  $d_{A90}(V_{\text{Korn}})$  anhand eines Beispiels der kumulativen Volumenverteilung der Körner der Normsandprobe, in Anlehnung an [158].

R (R Core Team) [136, 137] wird zur Analyse der erforderlichen Anzahl an Körnern zur Bildung einer repräsentativen Stichprobe verwendet. Zunächst wird die Grundwahrheit für jedes Material für die Verteilung von  $V_{\text{Korn}}$ ,  $O_{\text{Korn}}$  und  $l$  durch Zusammenfügen der jeweiligen Ergebnisse der 15 CT-Aufnahmen erstellt. Die Anzahl der Datensätze für die Schüttung aus Mikrodioritsplitt beträgt 16.097 Körnern, für rezyklierten Brechsand

88.380 Körner, für Normsand 202.927 Körner sowie für rezyklierten Mauerwerksbruch 346.074 Körner. Es wird die Annahme getroffen, dass diese Anzahl der Körner größer als die erforderliche Anzahl an Körnern zur Bildung einer repräsentativen Stichprobe ist und damit als Grundwahrheit geeignet ist. In einem nächsten Schritt wird analog zur Darstellung von Korngrößenverteilungen die kumulative Verteilung von  $V_{\text{Korn}}$ ,  $O_{\text{Korn}}$  und  $l$  bestimmt. Abb. C.1 zeigt die kumulative Volumenverteilung der Probe aus rezyklierten Mauerwerksbruch. Es werden die Kenngrößen  $d_{A10}(x)$ ,  $d_{A50}(x)$  und  $d_{A90}(x)$  entsprechend Abb. C.1 bestimmt, wobei  $x$  entweder für das Kornvolumen  $V_{\text{Korn}}$ , die Kornoberfläche  $O_{\text{Korn}}$  oder die Kornlänge  $l$  steht. Die Zahlen 10, 50 oder 90 geben an wieviel Prozent der Körner bezogen auf die Gesamtanzahl an Körnern ein  $V_{\text{Korn}}$ ,  $O_{\text{Korn}}$  oder  $l$  kleiner dem angegebenen Wert aufweisen. Für die Grundwahrheit der vier Materialien sind die Ergebnisse für  $d_{A10}(x)$ ,  $d_{A50}(x)$  und  $d_{A90}(x)$  in Tab. C.1 zusammengefasst.

Tab. C.1: Kornvolumen, Kornoberfläche und Kornlänge bei einem kumulativen Durchgang von 10 %, 50 % und 90 % der Körner der vier untersuchten Materialien für die jeweiligen Grundwahrheit.

Material	Kornvolumen $V_{\text{Korn}}$ [mm <sup>3</sup> ]			Kornoberfläche $O_{\text{Korn}}$ [mm <sup>2</sup> ]			Kornlänge $l$ [mm]		
	$d_{A10}$ ( $V_{\text{Korn}}$ )	$d_{A50}$ ( $V_{\text{Korn}}$ )	$d_{A90}$ ( $V_{\text{Korn}}$ )	$d_{A10}$ ( $O_{\text{Korn}}$ )	$d_{A50}$ ( $O_{\text{Korn}}$ )	$d_{A90}$ ( $O_{\text{Korn}}$ )	$d_{A10}$ ( $l$ )	$d_{A50}$ ( $l$ )	$d_{A90}$ ( $l$ )
Rezyklierter Betonbruch	0,0009	0,0045	0,0375	0,0531	0,1623	0,7116	0,1773	0,3225	0,6688
Rezyklierter Mauerwerksbruch	0,0007	0,0027	0,0114	0,0439	0,1101	0,3207	0,1594	0,2585	0,4500
Normsand	0,0011	0,0021	0,0112	0,0565	0,0944	0,2989	0,1778	0,2423	0,4259
Mikrodi-oritsplitt	0,0019	0,0218	0,4026	0,0897	0,4909	3,6671	0,2421	0,5803	1,5908

Aus der Grundwahrheit werden in einem nächsten Schritt 1.000 zufällige Werte ohne Zurücklegen gezogen. Für diese Teilstichprobe werden ebenfalls  $d_{A10}(x)$ ,  $d_{A50}(x)$  und  $d_{A90}(x)$  bestimmt. Dieser Vorgang wird 100-Mal wiederholt. Aus den 100 Werten für  $d_{A10}(x)$ ,  $d_{A50}(x)$  und  $d_{A90}(x)$  wird jeweils der Mittelwert sowie die Standardabweichung berechnet. Anschließend wird das Vorgehen wiederholt, mit einer um 500 erhöhten Stichprobengröße. Das Ergebnis für Mittelwert und Standardabweichung von  $V_{\text{Korn}}$  in Abhängigkeit von der Stichprobengröße ist beispielhaft für die Probe aus rezykliertem Mauerwerksbruch in Abb. C.2 dargestellt. Neben dem anhand einer gestrichelten Linie dargestellten Wert  $d_{A10}(V_{\text{Korn}})$ ,  $d_{A50}(V_{\text{Korn}})$  und  $d_{A90}(V_{\text{Korn}})$  der Grundwahrheit markieren

die gepunktet dargestellten Linien eine maximale Abweichung von diesem Wert um 3 %.

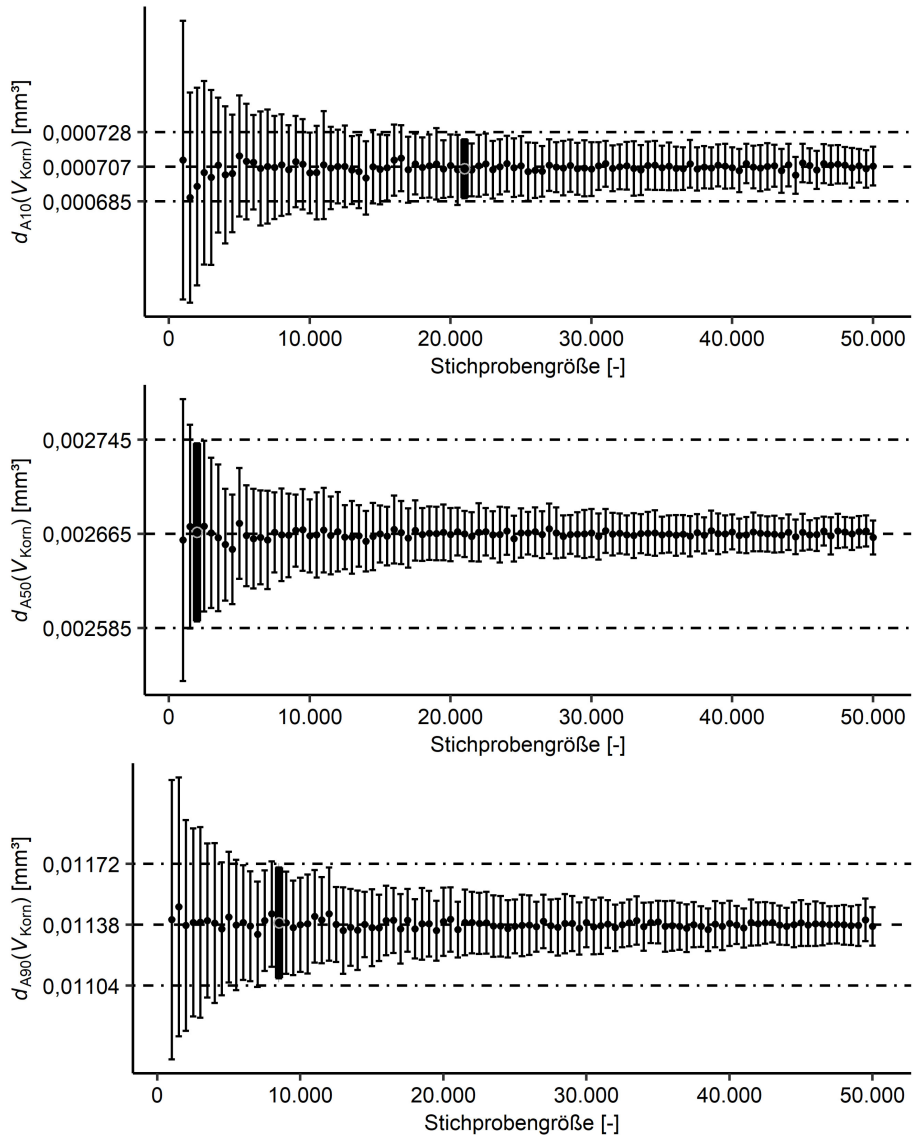


Abb. C.2: Mittelwert und Standardabweichung von  $d_{A10}(V_{Korn})$ ,  $d_{A50}(V_{Korn})$  und  $d_{A90}(V_{Korn})$  der Probe aus rezyklierten Mauerwerksbruch in Abhängigkeit von der Stichprobengröße im Vergleich zum jeweiligen Wert der Grundwahrheit (gestrichelte Linie) sowie der annehmbaren Grenzabweichung von 3 % (gepunktet-gestrichelte Linie), in Anlehnung an [158].

Abb. C.2 zeigt, dass der Mittelwert von  $d_{A10}(V_{Korn})$ ,  $d_{A50}(V_{Korn})$  und  $d_{A90}(V_{Korn})$  der einzelnen Stichproben vergleichbar mit dem jeweiligen Wert der Grundwahrheit ist, die

Standardabweichung jedoch mit abnehmender Größe der Stichprobe zunimmt. Für  $O_{\text{Korn}}$  und  $l$  sowie für die drei weiteren untersuchten Materialien kann die gleiche Beobachtung gemacht werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird als Sicherheitsniveau angenommen, dass eine ausreichende Anzahl an Körnern zur Bildung einer repräsentativen Stichprobe vorliegt, wenn die Abweichung von  $d_{A10}(x)$ ,  $d_{A50}(x)$  und  $d_{A90}(x)$  maximal 3 % beträgt. Der rot markierte Fehlerbalken in Abb. C.2 markiert die minimal erforderliche Stichprobengröße, wenn diese Bedingung erfüllt sein soll. In Tab. C.2 ist diese minimal erforderliche Stichprobengröße für die vier untersuchten Materialien zusammengefasst. Die hier dargestellte minimal erforderliche Anzahl an Körnern zur Bildung einer repräsentativen Stichprobe hängt demnach stark von der Wahl des Sicherheitsniveaus ab.

Tab. C.2: Minimal erforderliche Anzahl an Körnern zur Bildung einer repräsentativen Stichprobe bei Bestimmung von Kornvolumen, Kornoberfläche oder Kornlänge der vier untersuchten Materialien, in Anlehnung an [158].

Material	Kornvolumen $V_{\text{Korn}}$ [mm <sup>3</sup> ]			Kornoberfläche $O_{\text{Korn}}$ [mm <sup>2</sup> ]			Kornlänge $l$ [mm]		
	$d_{A10}$ ( $V_{\text{Korn}}$ )	$d_{A50}$ ( $V_{\text{Korn}}$ )	$d_{A90}$ ( $V_{\text{Korn}}$ )	$d_{A10}$ ( $O_{\text{Korn}}$ )	$d_{A50}$ ( $O_{\text{Korn}}$ )	$d_{A90}$ ( $O_{\text{Korn}}$ )	$d_{A10}$ ( $l$ )	$d_{A50}$ ( $l$ )	$d_{A90}$ ( $l$ )
Rezyklierter Betonbruch	8.000	5.500	12.500	4.000	2.000	9.500	1.000	1.000	2.000
Rezyklierter Mauerwerksbruch	21.000	2.000	8.500	8.500	1.500	3.500	1.500	1.000	1.000
Normsand	1.000	1.500	9.000	1.000	1.000	4.500	1.000	1.000	1.000
Mikrodi-oritsplitt	8.000	5.000	11.000	3.000	3.500	6.000	1.500	1.500	3.000

Grundsätzlich zeigt sich, dass für die Bestimmung von  $d_{A10}(x)$  und  $d_{A90}(x)$  eine Stichprobe mit einer höheren Anzahl an Körnern erforderlich ist als bei Bestimmung von  $d_{A50}(x)$ . Dies entspricht der Erwartung da der Wert der äußeren Quantile  $d_{A10}(x)$  und  $d_{A90}(x)$  stärker von wenigen Körnern abhängt, die einen besonders hohen oder niedrigen Messwert  $x$  aufweisen. Im Vergleich zwischen  $V_{\text{Korn}}$ ,  $O_{\text{Korn}}$  und  $l$  zeigt Tab. C.2, dass die größte Anzahl an Körnern zur Bildung der repräsentativen Stichprobe erforderlich ist, wenn  $V_{\text{Korn}}$  bestimmt werden soll. Tab. C.2 zeigt ebenfalls, dass die Materialart einen Einfluss auf die erforderliche minimale Anzahl an Körnern zur Bildung einer repräsentativen Stichprobe hat. Hier scheint ein Zusammenhang mit der Spannweite der innerhalb der Probe vorhandenen Messwerte für  $x$  zu existieren. Aus diesem

Grund wird für die Grundwahrheit der vier Materialien jeweils der Variationskoeffizient  $V_{K_V}$  als Verhältnis aus volumengewichteter Standardabweichung für  $V_{K_{\text{orn}}}$  und dem volumengewichteten Mittelwert für  $V_{K_{\text{orn}}}$  berechnet. Abb. C.3 zeigt  $V_{K_V}$  für die vier Materialien in Abhängigkeit von der minimal erforderlichen Anzahl an Körnern zur Bildung einer repräsentativen Stichprobe zusammen mit einer gestrichelt dargestellten Trendlinie. Zur Durchführung einer Regressionsanalyse wäre eine größere Anzahl an Datenpunkten erforderlich, weswegen auf diese im Rahmen dieser Arbeit verzichtet wird.

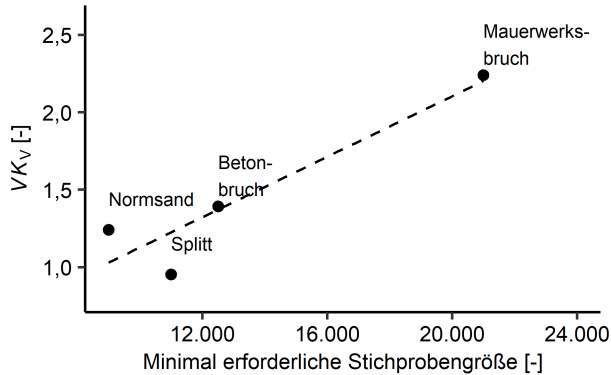


Abb. C.3: Zusammenhang zwischen dem Variationskoeffizienten  $V_{K_V}$  des Kornvolumens und der minimal erforderlichen Stichprobengröße mit gestrichelt dargestellter Trendlinie, in Anlehnung an [158].

Grundsätzlich zeigt sich, dass die minimal erforderliche Anzahl an Körnern zur Bildung einer repräsentativen Stichprobe sowohl von der angestrebten Messaufgabe und der Spannweite der Messwerte abhängig ist als auch von dem vom Anwender gewählten Sicherheitsniveau. Im Rahmen des Prozesses der Erstellung von CT-Aufnahmen von Teilproben einer Schüttung von Körnern kann basierend auf den bereits erfassten Daten der Variationskoeffizient für das zu untersuchende Merkmal bestimmt werden. Darauf basierend kann eine Abschätzung erfolgen, ob die bereits tomographierte Anzahl an Körnern zur Bildung einer repräsentativen Stichprobe ausreichend ist.

## D Versuchsergebnisse der Entwicklung eines Verfahrens zur automatisierten Kornsegmentierung

Tab. D.1: Anteil an fehlsegmentierten Körnern bei Variation von  $h_{\text{crit}}(0)$  für die vier feinen Gesteinskörnungsproben mit Korngrößen zwischen 0,125 mm und 2 mm.

Material	$h_{\text{crit}}(0)$ [-]	Anteil an Übersegmentierungen [%]	Anteil an Untersegmentierungen [%]	Anteil an Fehlsegmentierungen [%]
Normsand 0,125/2  2.015 Körner	10	7,94	0,89	8,83
	12	6,75	0,89	7,64
	14	5,16	1,59	6,75
	16	3,57	1,99	5,56
	18	3,47	1,99	5,46
	20	3,08	2,08	5,16
	22	2,88	2,48	5,36
	24	2,43	2,48	4,91
	26	1,59	3,77	5,36
	28	1,29	5,06	6,35
	30	1,04	5,06	6,10
32	0,99	5,96	6,95	
Mikrodiorit- splitt 0,125/2  971 Körner	30	7,83	0,00	7,83
	35	6,08	0,00	6,08
	40	4,22	0,00	4,22
	45	2,88	0,00	2,88
	50	0,62	0,00	0,62
	55	0,51	1,24	1,75
	60	0,41	2,99	3,40
	65	0,31	5,56	5,87
	70	0,31	7,72	8,03
	75	0,31	10,61	10,92
	80	0,31	13,90	14,21
85	0,31	15,86	16,17	
90	0,21	19,36	19,57	

Fortsetzung Tab. D.1: Anteil an fehlsegmentierten Körnern bei Variation von  $h_{crit}(0)$  für die vier feinen Gesteinskörnungsproben mit Korngrößen zwischen 0,125 mm und 2 mm.

<b>Material</b>	<b><math>h_{crit}(0)</math></b>	<b>Anteil an Übersegmentierungen</b>	<b>Anteil an Untersegmentierungen</b>	<b>Anteil an Fehlsegmentierungen</b>
	<b>[-]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>
Betonbruch 0,125/2	10	15,29	0,00	15,29
	12	14,17	0,00	14,17
1.870 Körner	14	13,53	0,00	13,53
	16	12,83	0,00	12,83
	18	12,25	0,11	12,36
	20	11,28	0,11	11,39
	22	10,96	0,11	11,07
	24	10,48	0,11	10,59
	26	9,52	0,11	9,63
	28	9,04	0,21	9,25
	30	8,50	0,21	8,71
	32	8,02	0,21	8,23
	35	7,38	0,21	7,59
	40	6,26	0,21	6,47
	45	5,29	0,21	5,50
	50	4,28	0,21	4,49
	55	3,32	0,53	3,85
	60	2,14	0,64	2,78
	65	1,28	2,62	3,90
	70	0,64	4,44	5,08
	75	0,48	5,78	6,26
	80	0,27	9,41	9,68
85	0,32	11,93	12,25	
90	0,37	18,45	18,82	



Fortsetzung Tab. D.1: Anteil an fehlsegmentierten Körnern bei Variation von  $h_{crit}(0)$  für die vier feinen Gesteinskörnungsproben mit Korngrößen zwischen 0,125 mm und 2 mm.

<b>Material</b>	<b><math>h_{crit}(0)</math></b> [-]	<b>Anteil an Übersegmentierungen</b> [%]	<b>Anteil an Untersegmentierungen</b> [%]	<b>Anteil an Fehlsegmentierungen</b> [%]
Mauerwerksbruch 0,125/2  2.076 Körner	10	18,98	0,10	19,08
	12	18,35	0,10	18,45
	14	17,58	0,10	17,68
	16	16,91	0,10	17,01
	18	16,09	0,10	16,19
	20	15,41	0,10	15,51
	22	14,88	0,10	14,98
	24	14,21	0,10	14,31
	26	13,68	0,10	13,78
	28	13,25	0,10	13,35
	30	12,72	0,19	12,91
	32	11,90	0,29	12,19
	35	11,56	0,29	11,85
	40	10,40	0,29	10,69
	45	8,04	0,39	8,43
	50	6,31	0,96	7,27
	55	4,43	1,73	6,16
	60	2,79	2,41	5,20
	65	1,73	6,02	7,75
	70	1,45	10,69	12,14
75	1,16	16,52	17,68	
80	1,06	22,21	23,27	
85	1,20	26,73	27,93	
90	1,20	31,60	32,80	

Tab. D.2: Anteil an fehlsegmentierten Körnern bei Variation von  $h_{\text{crit}}(0)$  für die vier groben Gesteinskörnungsproben mit Korngrößen zwischen 2 mm und 4 mm bzw. 5 mm.

Material	$h_{\text{crit}}(0)$ [-]	Anteil an Übersegmentierungen [%]	Anteil an Untersegmentierungen [%]	Anteil an Fehlsegmentierungen [%]
Quarzkies 2/4	10	8,67	0,21	8,88
	15	4,50	0,21	4,71
934 Körner	20	3,32	0,21	3,53
	25	2,36	0,21	2,57
	30	1,93	0,21	2,14
	35	1,61	0,21	1,82
	40	1,50	0,21	1,71
	45	1,28	0,21	1,49
	50	1,28	0,21	1,49
	55	1,18	0,21	1,39
	60	1,18	0,21	1,39
	65	1,18	0,43	1,61
	70	1,07	0,64	1,71
	75	1,07	0,64	1,71
	80	1,07	0,75	1,82
	85	1,07	0,96	2,03
	90	1,07	1,50	2,57
	95	1,07	1,82	2,89
	100	1,07	1,82	2,89
	105	1,07	2,68	3,75
	110	1,07	3,75	4,82
	115	1,07	3,96	5,03
120	1,07	5,35	6,42	
125	1,07	6,42	7,49	
130	1,07	7,92	8,99	

Fortsetzung Tab. D.2: Anteil an fehlsegmentierten Körnern bei Variation von  $h_{\text{crit}}(0)$  für die vier groben Gesteinskörnungsproben mit Korngrößen zwischen 2 mm und 4 mm bzw. 5 mm.

Material	$h_{\text{crit}}(0)$ [-]	Anteil an Übersegmentierungen [%]	Anteil an Untersegmentierungen [%]	Anteil an Fehlsegmentierungen [%]
Mikrodiorit-splitt 2/5  492 Körner	30	7,52	1,22	8,74
	35	4,88	1,22	6,10
	40	3,86	1,22	5,08
	45	3,25	1,22	4,47
	50	2,24	1,22	3,46
	55	2,24	2,03	4,27
	60	1,83	2,03	3,86
	65	1,83	2,03	3,86
	70	1,63	2,03	3,66
	75	1,22	2,03	3,25
	80	1,22	2,03	3,25
	85	1,22	2,03	3,25
	90	1,22	2,03	3,25
	95	1,22	2,03	3,25
	100	1,22	2,03	3,25
	105	1,02	2,44	3,46
	110	1,02	2,85	3,87
	115	1,02	2,85	3,87
	120	1,02	2,85	3,87
	125	1,02	3,25	4,27
130	1,02	4,07	5,09	

Fortsetzung Tab. D.2: Anteil an fehlsegmentierten Körnern bei Variation von  $h_{crit}(0)$  für die vier groben Gesteinskörnungsproben mit Korngrößen zwischen 2 mm und 4 mm bzw. 5 mm.

Material	$h_{crit}(0)$ [-]	Anteil an Übersegmentierungen [%]	Anteil an Untersegmentierungen [%]	Anteil an Fehlsegmentierungen [%]
Betonbruch 2/4	10	21,53	0,00	21,53
	15	16,20	0,00	16,20
994 Körner	20	12,98	0,00	12,98
	25	10,06	0,20	10,26
	30	8,15	0,40	8,55
	35	6,44	0,40	6,84
	40	5,73	0,80	6,53
	45	4,73	1,01	5,74
	50	3,72	1,21	4,93
	55	3,02	1,81	4,83
	60	2,62	2,01	4,63
	65	2,21	2,72	4,93
	70	2,11	2,72	4,83
	75	1,91	3,32	5,23
	80	1,51	3,92	5,43
	85	1,41	4,12	5,53
	90	1,41	4,73	6,14
	95	1,41	5,33	6,74
	100	1,21	6,44	7,65
	105	1,21	7,34	8,55
	110	0,91	7,95	8,86
	115	0,80	7,95	8,75
120	0,80	8,55	9,35	
125	0,60	9,36	9,96	
130	0,50	10,26	10,76	

Fortsetzung Tab. D.2: Anteil an fehlsegmentierten Körnern bei Variation von  $h_{crit}(0)$  für die vier groben Gesteinskörnungsproben mit Korngrößen zwischen 2 mm und 4 mm bzw. 5 mm.

Material	$h_{crit}(0)$ [-]	Anteil an Übersegmentierungen [%]	Anteil an Untersegmentierungen [%]	Anteil an Fehlsegmentierungen [%]
Mauerwerksbruch 2/4	10	24,53	0,70	25,23
	15	19,25	0,70	19,95
852 Körner	20	16,43	0,70	17,13
	25	14,79	0,70	15,49
	30	12,79	0,70	13,49
	35	11,62	0,94	12,56
	40	11,38	0,94	12,32
	45	10,45	0,94	11,39
	50	9,86	1,29	11,15
	55	9,04	1,29	10,33
	60	8,45	1,29	9,74
	65	7,86	1,29	9,15
	70	7,86	1,29	9,15
	75	7,51	1,53	9,04
	80	7,04	2,23	9,27
	85	6,22	2,82	9,04
	90	6,10	2,82	8,92
	95	6,10	2,82	8,92
	100	5,75	3,29	9,04
	105	5,63	3,76	9,39
	110	5,52	4,34	9,86
	115	5,16	4,81	9,97
120	4,93	5,05	9,98	
125	4,81	6,22	11,03	
130	4,81	6,81	11,62	

## E Mörtelzusammensetzungen der Hauptversuche

Tab. E.1: Mörtelzusammensetzung der Versuche aus Abschnitt 4.2.

Gesamtwasser [ml]	Zusatzwasser [ml]	Wasser [ml]	Kalksteinmehl [g]	Zement [g]	Sand [g]	Wasseraufnahme [%]	bigk-Wert [-]	w/z-Wert [-]	Stieblinie	Material
516,3	15,1	501,2	212,5	1.113,8	1.472,4	1,28	0,95	0,45	AB	SA
588,1	15,1	573,0	212,5	1.041,9	1.472,4	1,28	0,95	0,55	AB	SA
589,1	15,1	554,0	212,5	1.231,0	1.472,4	1,28	1,05	0,45	AB	SA
648,5	15,1	633,4	212,5	1.151,6	1.472,4	1,28	1,05	0,55	AB	SA
521,3	20,1	501,2	212,5	1.113,8	1.467,4	1,71	0,95	0,45	BC	SA
593,1	20,1	573,0	212,5	1.041,9	1.467,4	1,71	1,05	0,55	BC	SA
574,1	20,1	554,0	212,5	1.231,0	1.467,4	1,71	1,05	0,45	BC	SA
635,5	20,1	633,4	212,5	1.151,6	1.467,4	1,71	1,05	0,55	BC	SA
594,1	21,1	501,2	212,5	1.113,8	1.466,4	1,80	0,95	0,45	AB	S
575,1	21,1	554,0	212,5	1.231,0	1.466,4	1,80	1,05	0,45	AB	S
532,6	31,4	501,2	212,5	1.113,8	1.456,0	2,70	0,95	0,55	BC	S
604,4	31,4	573,0	212,5	1.041,9	1.456,0	2,70	0,95	0,55	BC	S
585,4	31,4	554,0	212,5	1.231,0	1.456,0	2,70	1,05	0,45	BC	S
664,8	31,4	633,4	212,5	1.151,6	1.456,0	2,70	1,05	0,55	BC	S
661,5	160,3	501,2	212,5	1.113,8	1.327,2	15,10	0,95	0,45	AB	BB
733,3	160,3	573,0	212,5	1.041,9	1.327,2	15,10	1,05	0,55	AB	BB
714,3	160,3	554,0	212,5	1.231,0	1.327,2	15,10	0,95	0,45	AB	BB
793,7	160,3	633,4	212,5	1.151,6	1.327,2	15,10	1,05	0,55	AB	BB
746,4	173,4	501,2	212,5	1.113,8	1.314,0	16,50	0,95	0,45	BC	BB
727,4	173,4	554,0	212,5	1.231,0	1.314,0	16,50	1,05	0,45	BC	BB
806,8	173,4	633,4	212,5	1.151,6	1.314,0	16,50	1,05	0,55	BC	BB
648,1	146,9	501,2	212,5	1.113,8	1.340,6	13,70	0,95	0,45	AB	MB
719,9	146,9	573,0	212,5	1.041,9	1.340,6	13,70	0,95	0,55	AB	MB
700,9	146,9	554,0	212,5	1.231,0	1.340,6	13,70	1,05	0,45	AB	MB
780,3	146,9	633,4	212,5	1.151,6	1.340,6	13,70	1,05	0,55	AB	MB
648,1	146,9	501,2	212,5	1.113,8	1.340,6	13,70	0,95	0,45	BC	MB
719,9	146,9	573,0	212,5	1.041,9	1.340,6	13,70	0,95	0,55	BC	MB
700,9	146,9	554,0	212,5	1.231,0	1.340,6	13,70	1,05	0,45	BC	MB
780,3	146,9	633,4	212,5	1.151,6	1.340,6	13,70	1,05	0,55	BC	MB
501,2	0,0	501,2	212,5	1.113,8	1.487,5	0,00	0,95	0,45	AB	G
573,0	0,0	573,0	212,5	1.041,9	1.487,5	0,00	1,05	0,55	AB	G
554,0	0,0	554,0	212,5	1.231,0	1.487,5	0,00	0,95	0,45	AB	G
633,4	0,0	633,4	212,5	1.151,6	1.487,5	0,00	1,05	0,55	AB	G
501,2	0,0	501,2	212,5	1.113,8	1.487,5	0,00	0,95	0,45	BC	G
573,0	0,0	573,0	212,5	1.041,9	1.487,5	0,00	1,05	0,55	BC	G
554,0	0,0	554,0	212,5	1.231,0	1.487,5	0,00	0,95	0,45	BC	G
633,4	0,0	633,4	212,5	1.151,6	1.487,5	0,00	1,05	0,55	BC	G

## F Versuchsergebnisse der Versuche aus Abschnitt 4.2

Tab. F.1: Versuchsergebnisse des ersten Blocks der Versuche aus Abschnitt 4.2.

Druckfestig- keit [MPa]	Biegezugfestig- keit [MPa]	dynamisches E-Modul [MPa]	Fließ- grenze [N/mm]	Dynamische Viskosität [Nmm·min]	Ausbreit- maß [mm]	Serzfleiß- maß [mm]	Setzmaß [mm]	Festmörtel- rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Frischmörtel- rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Stiebl- nie	Mate- rial	b/k- Wert [-]	wz- Wert [-]	Block Nummer
46,37	6,92	25940	14,03	0,094	220,4	136,7	29,4	2,01	2,01	AB	M	0,95	0,55	1
57	4,23	35642	7,74	0,0691	252,1	175,8	39,4	2,09	1,11	BC	G	1,05	0,55	2
61,97	6,95	35893	10,44	0,0863	234,8	162,6	35	2,15	2,14	AB	SA	0,95	0,55	3
57,3	6,68	34989	8,4	0,0717	243,9	176,2	37	2,14	2,11	BC	SA	1,05	0,55	4
62,05	7,27	35215	10,2	0,0815	241,4	165,5	35	2,14	2,13	BC	SA	0,95	0,55	5
57,14	6,88	35228	8,6	0,0726	246,4	175	37	2,15	2,13	AB	SA	1,05	0,45	6
52,59	6,85	27241	41,32	0,1115	193,2	106,2	18,7	2,01	1,97	BC	BB	0,95	0,45	7
65,13	4,88	40631	22,05	0,1683	205,2	115,1	21,8	2,16	2,15	AB	G	1,05	0,45	8
67,75	7,46	37917	15,52	0,1033	229,2	143	30,8	2,25	2,22	BC	S	0,95	0,55	9
60,38	5,72	28786	34,03	0,1537	190,8	106	19,3	2,02	2,01	AB	BB	1,05	0,45	10
78,16	6,97	40248	34,39	0,167	191,9	107,4	17,3	2,27	2,24	BC	S	1,05	0,45	11
50,28	6,18	26592	16,35	0,1107	224	133,6	29,3	2,04	1,97	AB	BB	0,95	0,55	12
68,03	6,8	35237	12,73	0,0835	235,1	153,7	33,6	2,21	2,21	BC	S	1,05	0,55	13
67,85	3,63	40681	24,17	0,1763	195,8	109,9	20,4	2,16	2,15	AB	G	0,95	0,45	14
53,35	5,68	29065	22,6	0,1059	185,9	108	18,4	2,04	2,01	AB	M	0,95	0,45	15
70,06	4,79	39553	27,13	0,1521	199,9	109,9	20,9	2,19	2,18	BC	SA	0,95	0,45	16
71,44	4,97	38115	25,09	0,1503	204,9	113,3	21,5	2,14	2,16	BC	SA	1,05	0,45	17
55,57	4,56	36266	7,68	0,0704	250,4	184,3	39,6	2,1	2,1	AB	G	1,05	0,55	18
67,44	6,44	35666	14,64	0,0483	235,1	156,3	34,2	2,19	2,21	AB	S	1,05	0,55	19
63,66	2,87	40666	23,56	0,1758	202	109,9	21,1	2,16	2,14	BC	G	0,95	0,45	20
70,44	6,81	38695	23,97	0,159	210,5	110,5	20,9	2,16	2,17	AB	SA	1,05	0,45	21
80,27	7,77	42386	51,47	0,1157	183,8	105	15,4	2,29	2,27	AB	S	0,95	0,45	22
52,96	6,43	29229	28,43	0,1475	200,7	108,3	20	2,05	2,02	BC	M	1,05	0,45	23
57,13	5,83	29012	41,84	0,1031	187,1	105,6	20,5	2,02	2,01	AB	S	0,95	0,45	24
66,66	2,99	39880	21,71	0,1936	201,1	115	23,4	2,16	2,14	BC	G	1,05	0,45	25
76,54	7,83	41853	43,67	0,1501	184,6	105,9	15,9	2,29	2,26	BC	S	0,95	0,45	26
45,56	6,13	25696	13,13	0,0884	228,8	147,1	31,4	1,98	2,01	BC	M	0,95	0,55	27
69,6	6,52	40215	28,58	0,1486	202,2	108,3	20,4	2,19	2,19	AB	SA	0,95	0,45	28
52,36	7,42	28498	33,55	0,1444	190,5	104,7	16,1	2,01	2,03	BC	M	0,95	0,45	29
66,29	8,98	37166	16,04	0,115	231,4	135,2	29,3	2,22	2,24	AB	S	0,95	0,55	30
55,51	5,15	36740	9,47	0,0844	241,2	169,7	36,4	2,1	2,11	BC	G	0,95	0,55	31
56,99	5,16	28134	34,34	0,1366	191,9	107	17,5	2	1,99	BC	BB	1,05	0,45	32
54,18	4,91	36883	9,17	0,0816	241,9	170,8	36	2,1	2,1	AB	G	0,95	0,55	33
50,55	8,18	24820	13,34	0,0904	225,2	143,2	30,9	1,96	1,98	AB	BB	1,05	0,55	34
46,07	7,84	24372	14,19	0,099	241,6	136,8	29,7	1,96	1,97	BC	BB	1,05	0,55	35
74,64	-	25176	10,78	0,0751	236	160,7	35,4	2	2	BC	M	1,05	0,55	36
74,64	-	39441	36,37	0,1704	191,9	106,9	18,2	2,25	-	BC	S	1,05	0,45	37
49,23	7,53	24663	16,68	0,1094	217,2	131,3	27	1,99	1,97	BC	BB	0,95	0,55	38
52,82	8,43	27455	27,52	0,1459	195,9	106,3	18,4	2,01	2,03	AB	M	1,05	0,45	39
44,38	7,75	24482	10,92	0,0794	234	155,9	33,9	1,98	2	AB	M	1,05	0,55	40

Tab. F.2: Versuchsergebnisse des zweiten Blocks der Versuche aus Abschnitt 4.2.

Druckfestig- keit [MPa]	Biegezugfes- tigkeit [MPa]	dynamisches E-Modul [MPa]	Fließ- grenze [N/mm]	Dynamische Viskosität [Nmm·min]	Ausbreitmaß [mm]	Setzmaß [mm]	Festmörtelroh- dichte [g/cm³]	Frischmörtel- rohdichte [g/cm³]	Siebli- nie	Material	b/gk- Wert [-]	wz- Wert [-]	Block Nummer
69,12	5,45	34287	16,91	0,1153	235	132,8	2,23	2,23	AB	S	0,95	0,55	2 41
66,79	4,93	32469	12,6	0,0835	247,2	158,1	2,19	2,2	BC	S	1,05	0,55	2 42
45,91	3,34	23570	11,62	0,095	249	163,9	1,97	2	BC	MB	1,05	0,55	2 43
56,61	2,89	26399	31,92	0,1457	202,4	107,9	1,98	1,99	BC	BB	1,05	0,45	2 44
54,53	3,41	33603	8,93	0,084	248,6	173,9	2,1	2,12	AB	G	0,95	0,55	2 45
63,13	3,4	38437	23,23	0,1745	206,1	112,9	2,14	2,16	AB	G	0,95	0,45	2 46
53,97	4,57	27151	41,96	0,1029	187,1	106,6	2	2	AB	BB	0,95	0,45	2 47
59,62	6,53	32593	8,39	0,0703	259,2	181,5	2,11	2,13	BC	SA	1,05	0,55	2 48
45	5,74	24304	12,52	0,0851	234,2	148,1	3,26	2	BC	MB	0,95	0,55	2 49
64,44	3,31	35600	20,18	0,1783	213,6	117,2	2,11	2,15	AB	G	1,05	0,45	2 50
50,71	4,43	27011	29,95	0,1445	214,4	105,7	2,02	2,04	BC	MB	0,95	0,45	2 51
55,42	3,43	33945	9,21	0,0849	255,4	177	3,73	2,1	BC	G	0,95	0,55	2 52
67,83	5,18	36008	22,77	0,1573	211,5	120,7	2,28	2,18	BC	SA	1,05	0,45	2 53
76,69	5,67	38386	40,7	0,1479	192,2	108	2,26	2,26	BC	S	0,95	0,45	2 54
47,57	6,85	24013	16,25	0,1045	222,1	132,2	2,82	1,99	BC	BB	0,95	0,55	2 55
73,99	7,42	38545	35,46	0,1409	195,7	107,7	2,26	2,26	AB	S	1,05	0,45	2 56
48,04	6,85	23514	13,6	0,0779	239,1	145,2	3,15	1,96	BC	BB	1,05	0,55	2 57
64,54	6,21	37082	27,68	0,1611	207,1	111,7	18,4	2,17	BC	SA	0,95	0,45	2 58
63,83	4,02	37022	23,97	0,2121	202,1	115,1	22,6	2,13	BC	G	1,05	0,45	2 59
52,97	6,29	26840	40,19	0,1103	186,3	106,6	16,7	2,02	BC	BB	0,95	0,45	2 60
49,45	6,67	24045	15,98	0,1136	227,4	130,1	27,5	1,96	AB	BB	0,95	0,55	2 61
48,8	6,61	26451	33,97	0,1228	186	106,7	18,3	2,01	AB	MB	0,95	0,45	2 62
75,85	6,19	38321	-	-	198	109,5	17,7	2,26	BC	S	1,05	0,45	2 63
75,62	6,95	39522	47,62	0,1039	184,8	106,4	17,4	2,28	AB	S	0,95	0,45	2 64
64,58	5,28	36702	28,61	0,1501	202,2	111,5	19,8	2,16	AB	SA	0,95	0,45	2 65
67,12	4,96	35909	26,87	0,1941	199,4	112,1	20	2,15	AB	SA	1,05	0,45	2 66
62,3	3,85	37405	23,95	0,1748	205,9	112	20,4	2,12	BC	G	0,95	0,45	2 67
51,57	3,08	32445	7,85	0,073	254,6	184,4	40,1	2,09	BC	G	1,05	0,55	2 68
56,59	6,16	32562	11,37	0,0874	239,3	161,5	33,5	2,11	AB	SA	0,95	0,55	2 69
66,52	8,79	33633	15,16	0,1114	228,7	138,6	30,1	2,22	BC	S	0,95	0,55	2 70
52,05	5,98	26995	27,52	0,1368	203,4	112,2	19,6	2,02	BC	MB	1,05	0,45	2 71
53,28	3,66	33000	7,91	0,0681	251,9	181,8	38,8	2,09	AB	G	1,05	0,55	2 72
45,78	5,36	24215	10,63	0,0761	240,5	164,6	34,4	1,98	AB	MB	1,05	0,55	2 73
66,9	8,12	33732	13,3	0,0935	243,5	155,9	33,9	2,2	AB	S	1,05	0,55	2 74
52,82	5,7	27026	27,56	0,1489	199,4	110,1	18,9	2,03	AB	MB	1,05	0,45	2 75
57,06	5,91	32726	10,24	0,0844	249,6	164,7	35,3	2,12	BC	SA	0,95	0,55	2 76
43,79	6,23	-	13,17	0,0878	224,8	142,5	31,1	2	AB	MB	0,95	0,55	2 77
49,61	6,03	24229	13,13	0,0875	231,2	144,7	31,7	1,97	AB	BB	1,05	0,55	2 78
57,57	4,99	32619	9,34	0,057	238,7	174,5	36,8	2,13	AB	SA	1,05	0,55	2 79
55,52	5,53	27725	32,56	0,146	189,3	107,9	18,7	2,02	AB	BB	1,05	0,45	2 80



Tab. F.3: Versuchsergebnisse des dritten Blocks der Versuche aus Abschnitt 4.2.

Druckfestig- keit [MPa]	Biegezugfes- tigkeit [MPa]	dynamisches E-Modul [MPa]	Fließ- grenze [N/mm]	Dynamische Viskosität [Nmm·min]	Ausbreitmaß [mm]	Setzmaß [mm]	Festmörtelroh- dichte [g/cm³]	Frischmörtel- rohdichte [g/cm³]	Siebli- nie	Material	b/gk- Wert [-]	wz- Wert [-]	Block Nummer	
51,6	5,62	26954	30,35	0,1359	191,4	20	2,02	2,03	BC	MB	0,95	0,45	3 81	
53,42	2,91	33882	9,22	0,0817	240,3	35,7	2,09	2,11	AB	G	0,95	0,55	3 82	
74,52	7,47	37902	36,51	0,1559	193,7	108,8	18,7	2,25	2,25	AB	S	1,05	0,45	3 83
52,96	6,89	27127	40,91	0,1075	188,7	106,8	17,5	2,01	2,01	AB	BB	0,95	0,45	3 84
50,19	7,25	24589	12,78	0,0826	238,8	30,9	2	1,99	1,99	AB	BB	1,05	0,55	3 85
72,36	8,63	38274	42,52	0,1655	190,8	18,2	2,27	2,27	BC	S	0,95	0,45	3 86	
51,84	4,61	33477	9,38	0,0877	240,4	34,2	2,09	2,12	BC	G	0,95	0,55	3 87	
43,92	5,63	23591	12,62	0,0853	235,7	30,9	1,99	2	BC	MB	0,95	0,55	3 88	
61,19	3,92	38211	24,06	0,1806	210,3	20	2,13	2,13	BC	G	0,95	0,45	3 89	
48,03	6,63	23675	14,9	0,0939	228,6	137,1	1,96	1,99	AB	BB	0,95	0,55	3 90	
65,09	8,62	32468	11,32	0,0873	242,8	159,7	2,19	2,22	BC	S	1,05	0,55	3 91	
65,73	7,97	33864	15,63	0,1066	232,2	141,2	2,21	2,24	AB	S	0,95	0,55	3 92	
55,67	4,7	26664	31,22	0,1413	193,7	108	1,99	2,01	AB	BB	1,05	0,45	3 93	
74,81	6,89	38969	46,53	0,1344	186,1	107,7	2,27	2,27	AB	S	0,95	0,45	3 94	
55,02	3,95	26122	32,83	0,1391	193,4	109,9	1,99	1,98	BC	BB	1,05	0,45	3 95	
53,63	2,65	32447	7,69	0,0704	251	186,2	2,07	2,1	AB	G	1,05	0,55	3 96	
67,31	6,78	33496	12,73	0,0885	232,7	152,3	2,19	2,22	AB	S	1,05	0,55	3 97	
51,26	4,37	26672	31,51	0,1126	190,5	107,6	18,7	2,02	2,03	AB	MB	0,95	0,45	3 98
64,11	5,57	36698	27,33	0,1481	200,4	109,7	2,17	2,18	BC	SA	0,95	0,45	3 99	
75,02	6,04	37153	32,55	0,1692	198,6	111,3	2,26	2,25	BC	S	1,05	0,45	3 100	
61,05	3,88	37603	22,68	0,1619	207,8	114,2	2,13	2,17	AB	G	0,95	0,45	3 101	
65,43	9,16	33044	15,16	0,0987	238,5	147,1	2,21	2,24	BC	S	0,95	0,55	3 102	
58,31	6,05	32502	10,43	0,0855	252,2	167	2,13	2,15	BC	SA	0,95	0,55	3 103	
53,23	4,18	26022	41,47	0,0967	191,9	108,9	1,99	1,99	BC	BB	0,95	0,45	3 104	
63,87	3,3	36790	21,45	0,1694	215,8	118,5	2,12	2,16	BC	G	1,05	0,45	3 105	
66,98	4,03	35654	23,51	0,1511	213,8	114	2,15	2,18	AB	SA	1,05	0,45	3 106	
72,55	5,56	36813	27,84	0,1492	203,6	110,8	2,18	2,18	AB	SA	0,95	0,45	3 107	
56,16	5,92	26694	27,06	0,1355	197,4	111,5	2,26	2,02	AB	MB	1,05	0,45	3 108	
50,94	5,85	23334	16,17	0,1044	227,4	132,3	1,94	-	BC	BB	0,95	0,55	3 109	
46,56	-	23747	10,34	0,0746	243,1	160,9	1,97	2	BC	MB	1,05	0,55	3 110	
62,3	5,88	34347	8,79	0,075	255,6	176	2,15	2,13	AB	SA	1,05	0,55	3 111	
55,65	5,96	27229	26,34	0,1379	202,6	110,7	2,14	2,03	BC	MB	1,05	0,45	3 112	
62,33	4,47	31400	8,42	0,0719	232,1	168,7	2,07	2,12	BC	SA	1,05	0,55	3 113	
47,39	6,14	24301	13,18	0,0965	217,8	138,7	1,97	2	AB	MB	0,95	0,55	3 114	
69,76	3,81	37369	20,51	0,1589	209,8	116,6	2,13	2,14	AB	G	1,05	0,45	3 115	
53,32	5,44	24133	13,06	0,0889	231	144,5	1,97	1,97	BC	BB	1,05	0,55	3 116	
62,78	4,67	33556	10,51	0,0864	239,7	162	2,11	2,15	AB	SA	0,95	0,55	3 117	
47,83	5,93	23549	10,54	0,0776	235,8	155,4	1,95	1,99	AB	MB	1,05	0,55	3 118	
73,22	4,59	35794	22,78	0,1666	208,7	114,6	2,15	2,17	BC	SA	1,05	0,45	3 119	
55,88	3,34	32474	7,92	0,0737	249,5	188,4	2,07	2,08	BC	G	1,05	0,55	3 120	

Tab. F.4: Versuchsergebnisse des vierten Blocks der Versuche aus Abschnitt 4.2.

Druckfestig- keit [MPa]	Biegezugfes- tigkeit [MPa]	dynamisches E-Modul [MPa]	Fließ- grenze [N/mm]	Dynamische Viskosität [Nmm-min]	Ausbreitmaß [mm]	Setzmaß [mm]	Festmörtelroh- dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Frischmörtel- rohichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Siebli- nie	Material	b/gk- Wert [-]	wz- Wert [-]	Block Nummer	
51,11	5,51	23998	15,61	0,0936	219,4	28,3	1,98	1,99	BC	BB	0,95	0,55	4 121	
70,3	7,83	33472	14,42	0,1058	218,8	144,3	2,19	2,23	BC	S	0,95	0,55	4 122	
82,55	32,62	37911	32,26	0,1593	192,6	118,3	2,25	2,26	AB	S	1,05	0,45	4 123	
72,67	5,13	36621	24,1	0,1818	196,2	20,3	2,16	2,18	BC	SA	1,05	0,45	4 124	
68,56	3,28	37687	20,92	0,1694	205,6	23,5	2,11	2,16	AB	G	1,05	0,45	4 125	
69,61	3,35	37564	24,27	0,1774	198	111,3	19,8	2,14	BC	G	0,95	0,45	4 126	
70,77	8,26	36634	28,01	0,1538	199,1	111	18,7	2,18	BC	SA	0,95	0,45	4 127	
52	6,02	23634	13,65	0,0924	231,3	146,8	1,97	1,98	BC	BB	1,05	0,55	4 128	
81,28	7,66	38764	44,2	0,1551	184,3	108,1	2,27	2,28	AB	S	0,95	0,45	4 129	
56,02	6,54	27260	26,47	0,1394	199,7	110,6	2,04	2,03	BC	MB	1,05	0,45	4 130	
82,09	7,82	37895	41,08	0,1364	188,9	108,3	2,25	2,26	BC	S	0,95	0,45	4 131	
60,81	6,88	32453	10,27	0,0852	240,8	165,4	2,13	2,15	BC	SA	0,95	0,55	4 132	
68,34	4,61	37648	22,59	0,1742	202,6	111,9	19,9	2,12	AB	G	0,95	0,45	4 133	
49,45	5,54	24248	10,48	0,0525	238,4	170,5	1,99	2,01	BC	MB	1,05	0,55	4 134	
62,36	6,44	33809	10,13	0,0828	244,8	167,3	2,14	2,15	AB	SA	0,95	0,55	4 135	
56,08	4,51	27257	29,67	0,1577	194,2	107,7	2,02	2,03	BC	MB	0,95	0,45	4 136	
64,33	5	33808	8,34	0,0699	254,3	37,2	2,14	2,13	AB	SA	1,05	0,55	4 137	
74,7	7,18	36699	22,7	0,1546	209,6	119,1	2,16	2,17	AB	SA	1,05	0,45	4 138	
59,81	3,05	33449	7,46	0,07	248,9	189,9	2,08	2,09	BC	G	1,05	0,55	4 139	
48,78	5,57	24213	10,39	0,0795	232,3	166,4	1,98	2	AB	MB	1,05	0,55	4 140	
60,79	5,56	27870	38,7	0,1077	186,7	106,5	17,2	2,03	2	AB	BB	0,95	0,45	4 141
54,28	5,05	24316	13,05	0,0878	231,9	147,4	1,96	1,98	AB	BB	1,05	0,55	4 142	
47,04	5,93	24192	13,18	0,0915	225,6	142,4	1,99	2,01	AB	MB	0,95	0,55	4 143	
81,19	6,76	37217	31,18	0,1523	198,3	110	15,7	2,24	BC	S	1,05	0,45	4 144	
68,52	3,72	36637	19,73	0,2001	208,8	120,3	2,11	2,15	BC	G	1,05	0,45	4 145	
60,42	5,14	26810	41,77	0,1108	183,9	108	18,5	2,01	BC	BB	0,95	0,45	4 146	
55,34	4,16	27025	33,3	0,1281	192,9	110,1	18,4	2,01	2,02	AB	MB	0,95	0,45	4 147
47,86	2,29	33415	7,41	0,0696	258,8	188,9	39,6	2,09	2,12	AB	G	1,05	0,55	4 148
56,94	4,36	24393	12,25	0,0877	235,3	148,9	2	2	BC	MB	0,95	0,55	4 149	
57,59	2,37	33584	9	0,0822	246,1	171,7	38,1	2,08	BC	G	0,95	0,55	4 150	
70,16	6,52	32856	11,74	0,082	235,1	154,7	33,6	2,18	BC	S	1,05	0,55	4 151	
59,56	3,15	26619	30,96	0,1333	192,7	109,3	17,7	2,01	BC	BB	1,05	0,45	4 152	
62,91	4,27	32500	8,35	0,0697	254	187,6	38,3	2,13	BC	SA	1,05	0,55	4 153	
71,41	6,84	34913	15,7	0,0985	223,7	139,9	29,6	2,24	AB	S	0,95	0,55	4 154	
54,39	4,14	26843	30,03	0,1228	189	108,2	20,2	2,02	AB	MB	1,05	0,45	4 155	
53,18	4,8	24624	15,65	0,094	223,8	134,6	28,1	1,99	AB	BB	0,95	0,55	4 156	
60,01	3,45	27225	33,05	0,1483	194,8	109,9	20,4	2,01	AB	BB	1,05	0,45	4 157	
73,33	5,78	37204	30,91	0,1453	198,9	111,4	17,6	2,18	AB	SA	0,95	0,45	4 158	
58,5	2,6	34197	9,16	0,082	245,3	169,4	34,5	2,1	AB	G	0,95	0,55	4 159	
70,75	6,06	34116	12,21	0,0634	244,1	158,1	2,2	2,22	AB	S	1,05	0,55	4 160	

## G Versuchsergebnisse zur Verifikation (Abschnitt 4.3)

Tab. G.1: Versuchsergebnisse des ersten Blocks aus Abschnitt 4.3.

Druckfestigkeit [MPa]	Biegezugfestigkeit [MPa]	dynamisches E-Modul [MPa]	Ausbreitmaß [mm]	Setzfließmaß [mm]	Setzmaß [mm]	Festmörtelröhdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Frischmörtelröhdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	a <sub>min</sub> [mm]	x <sub>r</sub> [-]	Mauerwerksbruch [Vol.-%]	Betonbruch [Vol.-%]	Spilt [Vol.-%]	Sand [Vol.-%]	b/gk-Wert [-]	w/z-Wert [-]	Block	Nummer
58,32	5,51	32.757	249,5	152,1	30,9	2,07	2,15	-	-	0,00	0,00	0,00	1,00	0,95	0,55	1	1
65,52	8,54	31.576	214,8	107,4	17,1	2,13	2,11	-	-	0,00	0,00	1,00	0,00	1,05	0,45	1	2
52,58	7,28	29.140	258,4	139,3	29,9	2,06	2,07	190	0,05	0,00	0,45	0,00	0,55	0,95	0,55	1	3
69,00	7,09	35.981	219,8	108,7	17,7	2,18	2,16	-	-	0,00	0,00	0,00	1,00	1,05	0,45	1	4
44,35	6,71	24.387	241,8	123,1	24,7	1,99	1,98	-	-	0,00	1,00	0,00	0,00	0,95	0,55	1	5
49,94	7,18	25.439	226,9	117,3	21,8	2,00	1,98	-	-	1,00	0,00	0,00	0,00	0,95	0,55	1	6
62,20	5,07	32.451	193,5	107,2	18,2	2,09	2,09	190	0,05	0,41	0,00	0,00	0,59	1,05	0,45	1	7
54,00	5,56	29.653	238,3	139,5	29,7	2,05	2,07	190	0,05	0,47	0,00	0,00	0,53	0,95	0,55	1	8
57,00	6,90	29.755	210,9	107,3	17,3	2,06	2,05	190	0,10	0,00	0,72	0,00	0,28	1,05	0,45	1	9
52,37	6,20	27.159	203,1	107,6	17,0	2,04	2,00	-	-	0,00	1,00	0,00	0,00	1,05	0,45	1	10
58,17	6,40	32.447	209,8	108,7	19,6	2,10	2,09	190	0,05	0,00	0,45	0,00	0,55	1,05	0,45	1	11
56,72	6,10	28.441	195,6	105,7	15,9	2,03	2,01	-	-	1,00	0,00	0,00	0,00	1,05	0,45	1	12
48,66	5,92	25.933	246,3	140,5	30,4	1,96	2,03	190	0,10	0,00	0,71	0,00	0,29	0,95	0,55	1	13
52,14	5,63	27.492	228,7	132,0	26,7	2,03	2,03	190	0,10	0,75	0,00	0,00	0,25	0,95	0,55	1	14
56,65	8,34	28.896	231,6	132,4	26,9	2,08	2,09	-	-	0,00	0,00	1,00	0,00	0,95	0,55	1	15
59,18	5,65	30.762	202,0	106,1	17,0	2,07	2,06	190	0,10	0,69	0,00	0,00	0,31	1,05	0,45	1	16

Tab. G.2: Versuchsergebnisse des zweiten Blocks aus Abschnitt 4.3.

Druckfestigkeit [MPa]	Biegezugfestigkeit [MPa]	dynamisches E-Modul [MPa]	Ausbreitmaß [mm]	Setzfließmaß [mm]	Setzmaß [mm]	Festmörtelrohddichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Frischmörtelrohddichte [g/cm <sup>3</sup> ]	$\bar{d}_{\min}$ [mm]	$x_r$ [-]	Mauerwerksbruch [Vol.-%]	Betonbruch [Vol.-%]	Spiltt [Vol.-%]	Sand [Vol.-%]	b/gk-Wert [-]	w/z-Wert [-]	Block	Nummer
52,27	6,09	28.890	247,2	146,3	29,5	2,04	2,07	190	0,05	0,00	0,45	0,00	0,55	0,95	0,55	2	17
62,14	5,45	32.852	199,3	108,9	16,8	2,11	2,09	190	0,05	0,41	0,00	0,00	0,59	1,05	0,45	2	18
52,08	6,27	27.902	235,5	133,2	28,1	2,05	1,85	190	0,10	0,75	0,00	0,00	0,25	0,95	0,55	2	19
58,32	6,40	34.230	239,7	152,4	31,7	2,14	2,14	-	-	0,00	0,00	0,00	1,00	0,95	0,55	2	20
60,45	4,95	32.473	205,6	109,9	18,1	2,10	2,09	190	0,05	0,00	0,45	0,00	0,55	1,05	0,45	2	21
56,85	8,67	29.159	239,7	134,9	27,2	2,09	2,09	-	-	0,00	0,00	1,00	0,00	0,95	0,55	2	22
66,48	7,23	32.167	204,0	109,3	17,2	2,13	2,11	-	-	0,00	0,00	1,00	0,00	1,05	0,45	2	23
53,88	5,92	30.298	240,9	143,0	28,9	2,10	2,07	190	0,05	0,47	0,00	0,00	0,53	0,95	0,55	2	24
67,20	4,30	36.345	215,6	110,8	20,0	2,16	2,16	-	-	0,00	0,00	0,00	1,00	1,05	0,45	2	25
56,61	5,06	29.630	199,5	108,4	17,5	2,07	2,05	190	0,10	0,00	0,72	0,00	0,28	1,05	0,45	2	26
50,96	6,22	27.591	218,8	129,1	26,3	2,05	2,03	190	0,10	0,00	0,71	0,00	0,29	0,95	0,55	2	27
59,26	5,86	30.321	201,3	105,5	15,0	2,05	2,05	190	0,10	0,69	0,00	0,00	0,31	1,05	0,45	2	28
57,97	6,01	28.894	195,1	106,5	16,7	2,05	2,01	-	-	1,00	0,00	0,00	0,00	1,05	0,45	2	29
49,17	6,83	25.642	225,6	126,0	25,6	1,99	1,99	-	-	1,00	0,00	0,00	0,00	0,95	0,55	2	30
52,91	4,95	27.815	197,4	107,0	16,9	2,04	2,00	-	-	0,00	1,00	0,00	0,00	1,05	0,45	2	31
45,66	5,64	24.897	235,9	130,9	26,2	2,02	1,99	-	-	0,00	1,00	0,00	0,00	0,95	0,55	2	32

Tab. G.3: Versuchsergebnisse des dritten Blocks aus Abschnitt 4.3.

Druckfestigkeit [MPa]	Biegezugfestigkeit [MPa]	dynamisches E-Modul [MPa]	Ausbreitmaß [mm]	Setzfließmaß [mm]	Setzmaß [mm]	Festmörtelrohddichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Frischmörtelrohddichte [g/cm <sup>3</sup> ]	$\bar{d}_{\min}$ [mm]	$x_r$ [-]	Mauerwerksbruch [Vol.-%]	Betonbruch [Vol.-%]	Spiltt [Vol.-%]	Sand [Vol.-%]	b/gk-Wert [-]	w/z-Wert [-]	Block	Nummer
66,70	6,61	32.309	207,3	107,4	15,8	2,13	2,11	-	-	0,00	0,00	1,00	0,00	1,05	0,45	3	33
45,04	5,92	24.474	235,7	133,7	28,3	1,98	1,97	-	-	0,00	1,00	0,00	0,00	0,95	0,55	3	34
57,76	6,07	28.391	187,8	105,2	15,9	2,02	2,01	-	-	1,00	0,00	0,00	0,00	1,05	0,45	3	35
59,67	6,02	30.410	197,4	107,4	15,7	2,05	2,05	190	0,10	0,69	0,00	0,00	0,31	1,05	0,45	3	36
68,86	5,60	36.543	-	110,1	18,9	2,19	2,17	-	-	0,00	0,00	0,00	1,00	1,05	0,45	3	37
60,78	5,54	34.052	250,5	158,0	31,5	2,15	2,14	-	-	0,00	0,00	0,00	1,00	0,95	0,55	3	38
49,01	7,52	25.652	231,4	124,2	24,7	2,01	1,98	-	-	1,00	0,00	0,00	0,00	0,95	0,55	3	39
57,19	5,35	29.277	196,7	108,0	17,2	2,06	2,05	190	0,10	0,00	0,72	0,00	0,28	1,05	0,45	3	40
53,57	6,48	29.173	242,6	141,4	30,3	2,05	2,06	190	0,05	0,47	0,00	0,00	0,53	0,95	0,55	3	41
49,95	5,92	26.744	234,5	141,6	29,7	2,02	2,03	190	0,10	0,00	0,71	0,00	0,29	0,95	0,55	3	42
52,56	5,53	28.856	237,0	143,7	31,1	2,04	2,07	190	0,05	0,00	0,45	0,00	0,55	0,95	0,55	3	43
49,83	7,08	27.990	228,4	134,5	28,1	2,02	2,03	190	0,10	0,75	0,00	0,00	0,25	0,95	0,55	3	44
57,22	8,04	29.054	239,0	136,6	27,2	2,10	2,09	-	-	0,00	0,00	1,00	0,00	0,95	0,55	3	45
52,53	6,58	27.670	-	107,7	16,2	2,04	2,01	-	-	0,00	1,00	0,00	0,00	1,05	0,45	3	46
60,44	5,53	32.443	200,1	108,7	16,8	2,1	2,09	190	0,05	0,00	0,45	0,00	0,55	1,05	0,45	3	47
62,92	6,09	32.924	197,9	107,3	-	2,11	2,10	190	0,05	0,41	0,00	0,00	0,59	1,05	0,45	3	48

## **Lebenslauf**

### Persönliche Daten

---

Name	Sophie Burgmann
Staatsangehörigkeit	deutsch

### Wissenschaftlicher Werdegang

---

11.2018 bis heute	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (bis 12.2022 Technische Universität Kaiserslautern)
04.2016 bis 10.2018	Masterstudium Bauingenieurwesen am Karlsruher Institut für Technologie, Abschluss M. Sc.
04.2013 bis 03.2016	Bachelorstudium Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Kaiserslautern, Abschluss B. Sc.