

Ermittlung des erforderlichen Gesamtwassers zur Herstellung von R-Beton mit definiertem Wasserzementwert

Vom Fachbereich
Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEURIN (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Julia Constanze Scheidt

aus Wolfstein

Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. O. Kornadt
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. W. Breit
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K.-C. Thienel
3. Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. C. Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 25. September 2019

Kaiserslautern 2019

(D 386)

Julia Constanze Scheidt

**Ermittlung des erforderlichen Gesamtwassers
zur Herstellung von R-Beton mit definiertem
Wasserzementwert**

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Kaiserslautern. Die Zielfragestellung ergab sich aus dem von mir bearbeiteten BMBF-Verbundforschungsprojekt „R-Beton - Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation“.

Da eine wissenschaftliche Arbeit nie das alleinige Werk eines Einzelnen ist möchte ich an dieser Stelle den Menschen danken, die dazu beigetragen haben.

Danken möchte ich zu aller erst meinem Betreuer Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit für seine immerwährende Unterstützung und sein großes Vertrauen in mich. Ich hatte während meiner Tätigkeit in seinem Fachgebiet die Möglichkeit mich persönlich und fachlich weiterzuentwickeln, Kontakte von unschätzbarem Wert zu knüpfen und von Beginn an den Themenschwerpunkt des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung mit zu gestalten.

Bei allen Forschungspartnern des BMBF-Vorhabens „R-Beton“ möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit und die Anregungen in den vergangenen Jahren bedanken. In diesem Zusammenhang gilt mein besonderer Dank den Herren Raymund Böing und Martin Unterluggauer, die es ermöglicht haben im Zuge des Praxistests meine Vorschläge und Konzepte umzusetzen.

Ein ganz besonderer Dank gilt auch meinen studentischen Hilfskräften Jonas Lillig, Tim Neubrech, Marvin Agne, Natalie Dezes, Vicky Reding, Kerstin Alff und dem Laborpersonal, insbesondere Karl Leidner, ohne deren Hilfe, Geduld und unermüdlichen Einsatz die zeitaufwändigen Versuchsaufbauten nicht hätten umgesetzt werden können.

Ferner danke ich den Herren Dr. Werner Platzek (Basalt AG), Ludger Benson (BÜV Hessen Rheinland-Pfalz) und Prof. Wolfgang Breit (MPA Kaiserslautern) für ihre Bereitschaft mir die ausgewerteten Datensätze zu Eigenschaften natürlicher Gesteinskörnungen zur Verfügung zu stellen.

Den Herren Prof. Karl-Christian Thienel und Prof. Christoph Müller danke ich für die bereitwillige Übernahme der Berichterstattung.

Zuletzt danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen für ihre Unterstützung und die ganz besondere Arbeitsatmosphäre in den vergangenen neun Jahren, die ich einschließlich der Zeit als wissenschaftliche Hilfskraft im Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen verbringen durfte.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Formelzeichen und Abkürzungen	v
Kurzfassung	vii
Abstract	viii
1 Einführung	9
1.1 Motivation und Problemstellung	9
1.2 Zielsetzung der Arbeit	12
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	12
2 Betonherstellung mit rezyklierter Gesteinskörnung – Randbedingungen für die Praxis	16
2.1 Einleitung	16
2.2 Rezyklierte Gesteinskörnung	16
2.2.1 Regelwerkanforderungen an rezyklierte Gesteinskörnung	16
2.2.2 Charakteristische Besonderheiten von rezyklierter Gesteinskörnung im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen	18
2.2.2.1 Eigenschaften natürlicher Gesteinskörnungen für Beton	18
2.2.2.2 Grundlagen Eigenschaften rezyklierter Gesteinskörnungen für Beton	23
2.2.2.3 Rohdichte rezyklierter Gesteinskörnung	24
2.2.2.4 Porenstruktur und dadurch bedingte Wechselwirkung zwischen rezyklierten Gesteinskörnungen und Wasser	28
2.2.2.5 Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnungen	33
2.2.2.6 Korndruckfestigkeit	38
2.2.2.7 Schüttdichte	40
2.2.3 Einfache und schnelle Abschätzung der Eigenschaften von rezyklierter Gesteinskörnung in der Praxis	41
2.2.4 Fazit	53
2.3 Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung	54
2.3.1 Regelwerke	54
2.3.2 Grundlagen Einflussfaktoren auf die Betoneigenschaften	54
2.3.2.1 Allgemeines	54
2.3.3 Betonherstellung mit rezyklierter Gesteinskörnung	56
2.4 Schlussfolgerung 1: Forschungsbedarf für die Betonherstellung mit rezyklierter Gesteinskörnung	57

3	Ermittlung des erforderlichen Zusatzwassers zur Gewährleistung des vorgesehenen Wasserzementwertes in R-Beton	61
3.1	Einleitung	61
3.2	Grundlagen Wasserzementwert von Beton mit natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung	61
3.2.1	Wasserzementwert – Einflüsse und Auswirkungen	61
3.2.2	Wasserzementwertbestimmung am Frischbeton	65
3.2.3	Gewährleistung eines angestrebten Wasserzementwerts bei saugender Gesteinskörnung	68
3.3	Wasserzementwertbeherrschung bei Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung	70
3.3.1	Versuchsziel und Lösungsweg	70
3.3.2	Konzeption des Versuchsaufbaus und der verwendeten Auswertung	73
3.3.2.1	Mischungszusammensetzungen	73
3.3.2.2	Beschreibung des Versuchsablaufs	75
3.3.2.3	Beschreibung der Berechnungsmethodik zum wirksamen Wasserzementwert	82
3.3.2.4	Validierung der gewählten Prüfverfahren und der gewählten Vorgehensweise	85
3.3.2.5	Fazit zur Eignung der gewählten Vorgehensweise	87
3.3.3	Ergebnisse und Diskussion	88
3.3.3.1	Validierung der Ergebnisse	88
3.3.3.2	Explorative Datenanalyse	99
3.3.4	Zusammenhang zwischen der Betonkonsistenz und dem wirksamen Wasserzementwert	108
3.3.4.1	Hintergrund	108
3.3.4.2	Versuchskonzept und Durchführung	108
3.3.4.3	Ergebnisse und Diskussion	109
3.3.5	Reproduzierbarkeit bei verschiedenen Gesteinskörnungschargen	109
3.3.5.1	Hintergrund	109
3.3.5.2	Versuchskonzept und Durchführung	110
3.3.5.3	Ergebnisse und Diskussion	111
3.3.6	Einfluss rezyklierter Gesteinskörnung auf die Festbetoneigenschaften	115
3.3.6.1	Festbetoneigenschaften bei vergleichbarer Zementsteinmatrix	116
3.3.6.2	Druckfestigkeit bei wechselnder GesteinskörnungschARGE	124
3.4	Schlussfolgerung 2: Notwendige Wasserdosierung und tatsächlicher Einfluss auf die Betoneigenschaften	125

4	Einfluss des Feuchtezustands rezyklierter Gesteinskörnung auf die Eigenschaften von Beton	127
4.1	Einleitung	127
4.2	Grundlagen zum Einfluss des Feuchtezustands bei gleichem Gesamtwasser auf den Wasserzementwert	128
4.2.1	Unterschiede in der Wechselwirkung zwischen rezyklierter Gesteinskörnung und Wasser bzw. Zementleim	128
4.2.2	Mögliche Feuchtezustände rezyklierter Gesteinskörnung	133
4.3	Wasserzementwertbeherrschung bei schwankender Gesteinskörnungsfeuchte	134
4.3.1	Versuchsziel und Lösungsweg	134
4.3.1.1	Ziel und grundsätzliche Vorgehensweise	134
4.3.1.2	Verwendete Ausgangsstoffe, Vorbereitung der Gesteinskörnungen und Mischungszusammensetzungen	136
4.3.1.3	Initialer Wasserhaushalt in den Versuchsvarianten	140
4.3.1.4	Versuchsprogramm	141
4.3.2	Ergebnisse und Diskussion	143
4.3.2.1	Frischbetonkennwerte	143
	Verdichtungsmaß	143
	Ausbreitmaß des Betons	143
4.3.2.2	Wassergehalte im Frischmörtel und Wasserzementwert	144
4.3.2.3	Druckfestigkeit der extrahierten Mörtel	147
4.4	Einfluss schwankender Feuchtezustände auf die Festbetoneigenschaften	148
4.4.1	Druckfestigkeit	148
4.4.2	Spaltzugfestigkeit	150
4.4.3	Elastizitätsmodul	151
4.5	Schlussfolgerung 3: Auswirkungen verschiedener Feuchtezustände auf die Betoneigenschaften	152
5	Aus den Untersuchungen abgeleitete Handlungsempfehlung für die Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen	155
5.1	Empfohlene Vorgehensweise bei der Betonherstellung	155
5.1.1	Charakterisierung der Gesteinskörnung	155
5.1.2	Mischungsberechnung	155
5.1.3	Betonherstellung	156
5.1.4	Prüfung	157
5.2	Überprüfung der Handlungsempfehlung in der Praxis	158
5.2.1.1	Betonsorten	158
5.2.1.2	Verwendete Ausgangsstoffe	159

5.2.1.3	Charakterisierung der Gesteinskörnung	159
5.2.1.4	Mischungsberechnungen	160
5.2.1.5	Betonherstellung	162
5.2.1.6	Prüfung	162
5.2.1.7	Fazit	165
6	Zusammenfassung und Ausblick	166
6.1	Zusammenfassung	166
6.2	Fazit und Ausblick	170
7	Literaturverzeichnis	174
8	Liste der verwendeten Technischen Regelwerke	182
9	Lebenslauf der Verfasserin	185
A.	Anhang A – Zu Kapitel 2	186
A.1	Regelwerksanforderungen	186
A.2	Gesteinskörnungseigenschaften	190
B.	Anhang B – Zu Kapitel 3	216
B.1	Versuchsergebnisse aus Charge 1	216
B.2	Reproduzierbarkeit bei wechselnder Gesteinskörnungsherkunft	241
C.	Anhang C – Zu Kapitel 4	253
D.	Anhang D – Zu Kapitel 5	259

Formelzeichen und Abkürzungen

Nicht aufgeführte Zeichen werden im Kontext erläutert.

R-Beton	Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderer des Verbundforschungsprojekts „R-Beton“)
GK oder <i>g</i>	Gesteinskörnung
<i>w/z</i>	Wasserzementwert
Rc, Ru, Rb, Ra, X, Rg, FL	Bestandteile rezyklierter Gesteinskörnung gemäß Tabelle 2-1 nach [DIN EN 12620]
Typ 1, Typ 2	Typen rezyklierter Gesteinskörnung gemäß [Rili BREZ]
Kies	natürliche Gesteinskörnung aus Rundkornmaterial
Splitt	natürliche Gesteinskörnung aus gebrochenem Festgestein
WA_t	Wasseraufnahme der Gesteinskörnung im Pyknometerversuch innerhalb einer Zeit <i>t</i>
ρ_{rd} oder Trockenrohddichte	Kornrohddichte im ofentrockenen Zustand
ρ_{ssd}	Kornrohddichte im wassergesättigten und oberflächentrockenen Zustand
ρ_a	Scheinbare Rohddichte der Gesteinskörnung gemäß Abschnitt 8 und 9 DIN EN 1097-6
ρ_w	Dichte des Wassers entsprechend der Prüftemperatur
$WA_L(t)$	Wasseraufnahme der Gesteinskörnung im Pyknometerversuch innerhalb einer Zeit <i>t</i> , ermittelt nach Anhang C von DIN EN 1097-6
ρ_{Lrd}	Kornrohddichte im ofentrockenen Zustand, ermittelt nach Anhang C von DIN EN 1097-6
ρ_{Lssd}	Kornrohddichte im wassergesättigten und oberflächentrockenen Zustand, ermittelt nach Anhang C von DIN EN 1097-6
ρ_{La}	Scheinbare Rohddichte der Gesteinskörnung, ermittelt nach Anhang C DIN EN 1097-6
$a_{t(w+g)}$	Ausbreitmaß zum Zeitpunkt <i>t</i> nach dem ersten Wasserkontakt der Gesteinskörnung
<i>z</i>	Zementgehalt je m ³ Beton
<i>FM</i>	Fließmittel
<i>w</i>	Wasser
<i>p</i>	Luft

Begriffe und Abkürzungen

Mörtel	Bestandteile der Betonzusammensetzung, die durch ein Sieb der Maschenweite 2 mm hindurch passen
OD	Feuchtezustand ofentrocken (oven dry), erzeugt durch trocknen der Gesteinskörnung bis zur Massekonstanz bei 105°C
AD	Feuchtezustand lufttrocken (air dry), erzeugt durch vollständiges Wassersättigen und anschließendes Trocknen an Raumluft für 7d.
SSD	Feuchtezustand wassergesättigt und oberflächentrocken (saturated surface dry), erzeugt durch Unterwasserlagerung für 7d und anschließendes Abtropfen der Oberflächenfeuchte bei 100% Luftfeuchte.

Kurzfassung

In der vorliegenden Dissertation wurde untersucht, wie die Wasseraufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonzusammensetzung so zu berücksichtigen ist, dass der Wassergehalt im Zementleim gegenüber dem Sollwert nicht durch Wasser-saugen der Gesteinskörnung verändert wird. Aufbauend auf der zu entwickelnden Methode zur zielsicheren Einstellung des vorgesehenen Wassergehalts im Zementleim wurde im Rahmen dieser Arbeit die Frage diskutiert, wie rezyklierte Gesteinskörnung bei gleichem Wasserzementwert die Festigkeit und das Elastizitätsmodul des Gesamtsystems im Vergleich zu Normalbeton beeinflusst und welche Faktoren dafür in welchem Maß relevant sind.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Steuerung der Aufbereitungstechnik für rezyklierte Gesteinskörnungen es ermöglicht, vergleichbare Streuungen in den Eigenschaften bei Lieferungen aus einem Herstellwerk einzuhalten, wie sie auch für natürliche Gesteinskörnungen gegeben sind.

Des Weiteren zeigten die Untersuchungen, dass es ausreicht, die rezyklierte Gesteinskörnung anhand der Kornrohdichten und der Wasseraufnahme zu charakterisieren, die im Pyknometerverfahren nach zehn Minuten ermittelt werden. Aus den so gewonnenen Kennwerten kann auf die jeweilige Kornrohddichte in allen weiteren Feuchtezuständen extrapoliert werden. Die Zugabewassermenge einer Referenzmischung aus natürlicher Gesteinskörnung sollte nach den Ergebnissen der Untersuchungen um diejenige Menge an Zusatzwasser erhöht werden, die die rezyklierte Gesteinskörnung innerhalb von zehn Minuten im Pyknometerversuch aufnehmen kann. Es ist nicht notwendig rezyklierte Gesteinskörnung wasserzusättigen oder vollständig zu trocknen. Maximale Festbetoneigenschaften werden erreicht, wenn die Gesteinskörnung Kernfeuchte aufweist ohne vollständig gesättigt zu sein. Die Eigenfeuchte sollte ermittelt und auf das nötige Gesamtwasser angerechnet werden.

Rezyklierte Gesteinskörnungen, unabhängig vom verwendeten zugelassenen Typ, verminderten in den Untersuchungen zu dieser Arbeit bei gleicher Zusammensetzung der Zementsteinmatrix weder die Druckfestigkeit noch die Spaltzugfestigkeit. Das Elastizitätsmodul kann geringer ausfallen als bei Betonen mit natürlicher Gesteinskörnung.

Abstract

This dissertation investigates how the water absorption of recycled aggregate should be considered correctly in the concrete composition. The main objective is to prevent a change of the water content by this absorption in the cement paste compared to the targeted value. Based on the developed method for an accurate adjustment of the intended water content in the cement paste, the question was discussed how recycled aggregates influence the strength and the modulus of elasticity of the whole system compared to normal concrete while the water cement ratio is kept equal. It was further examined which factors are relevant for the resulting differences between concrete with recycled and natural aggregates.

The investigation showed that the control of the processing technology for recycled aggregates makes it possible to achieve comparable continuity in the properties of deliveries from one production plant within the same limits as natural aggregates.

Furthermore, the investigations showed that it is sufficient to characterize the recycled aggregate on the basis of the grain densities and the water absorption which is determined after 10 minutes. From these characteristic values extrapolation can be made to the respective grain density in all subsequent moisture conditions. The mixing water of a reference aggregate consisting of natural aggregate should be increased by the amount of water which is absorbed by the recycled aggregate within 10 minutes. It is not necessary to saturate or completely dry recycled aggregate. Maximum hardened concrete properties are achieved when the aggregate has core moisture without being fully saturated. The intrinsic moisture should be determined and added to the amount of required total water.

Independent of the used type of recycled aggregates neither the compressive strength nor the splitting tensile strength is reduced in comparison to concrete with normal aggregates and the same cement paste composition. Elasticity modulus is lower than for natural aggregate concretes.

1 Einführung

1.1 Motivation und Problemstellung

Rezyklierte Gesteinskörnungen weisen im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung charakteristische Eigenschaften auf, die sich auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften auswirken.

Folgende Eigenschaften der Gesteinskörnung sind dabei von Bedeutung:

- Porosität/Porengrößenverteilung
- Wasseraufnahme
- Kornfestigkeit
- Elastizitätsmodul der Gesteinskörnung
- Gleichmäßigkeit der Eigenschaften

Die höhere Porosität und die damit verbundene höhere Wasseraufnahme führen dazu, dass bei Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonherstellung deren Wasseraufnahme zusätzlich zum Zugabewasser auszugleichen ist. Ohne diesen Ausgleich ist es nicht möglich, eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu gewährleisten und den angestrebten wirksamen Wasserzementwert zu realisieren und damit auch die Dauerhaftigkeitsanforderungen sicherzustellen. Dies wurde übereinstimmend z. B. in [Eckert u. Oliveira - 2017], [Poon et al. - 2004], [Montero u. Laserna - 2017] festgestellt. Soll die Wasseraufnahme ausgeglichen werden, so wird an der Körnung im Allgemeinen die Wasseraufnahme im Pyknometerversuch ermittelt und darüber die zusätzlich erforderliche Wassermenge abgeschätzt, die in einer Betonmischung mit trockener Gesteinskörnung notwendig ist, um den angestrebten Wasserzementwert und die gewünschte Verarbeitbarkeit zu erzielen.

Bislang kann die Frage, welches der „korrekte“ Wassergehalt für rezyklierte Gesteinskörnung ist, um den angestrebten Wasserzementwert im Beton zu erreichen, nicht abschließend beantwortet werden. In der Literatur wird zumeist ein Wert auf Basis des Pyknometerversuchs, z. B. WA_{30} als Äquivalent der Wasseraufnahme in 30 Minuten, festgelegt, mit dem das Wassersaugen der rezyklierten Gesteinskörnung jeweils ausgeglichen wird, um die Vergleichbarkeit von Versuchen zu gewährleisten. Es stellt sich jedoch beim Vergleich von Betoneigenschaften zwischen Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung und Betonen mit natürlicher Gesteinskörnung die Frage, ob tatsächlich der Einfluss der Körnung selbst auf die Eigenschaften des Betons beobachtet werden kann, oder ob bei den Ergebnissen durch den Einfluss einer ungewollten Veränderung des Wasserzementwerts die übrigen Parameter überlagert werden. Es ist im Umkehrschluss auch nicht möglich, eine fundierte Aussage darüber zu treffen, ob Betonzusammensetzungen unter Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung geringere Wasserzementwerte für gleiche Betonfestigkeiten benötigen.

Wird das Saugvermögen der Gesteinskörnung nicht korrekt abgeschätzt, so können folgende Verfälschungen auftreten:

Eine Unterschätzung des Saugvermögens führt dazu, dass die Gesteinskörnung der Betonzusammensetzung unkontrolliert Wasser entzieht, welches in der Folge nicht für

die Hydratation des Zements zur Verfügung steht und den Wasserzementwert ungewollt und unkontrollierbar absenkt. Die Festigkeitsergebnisse sind unter Umständen höher als zu erwarten wäre, da der verringerte Wasserzementwert zu einer höheren Festigkeit des Zementsteins führt. Die Festigkeit der Betone mit rezyklierte Gesteinskörnung (R-Betone) im Vergleich zur Referenz aus natürlicher Gesteinskörnung wird überschätzt.

Umgekehrt führt eine Überschätzung des Saugvermögens dazu, dass nicht das komplette zusätzliche Wasser von der Gesteinskörnung als Kernfeuchte gebunden wird, wodurch mehr freies Wasser vorhanden ist als berechnet. Der Wasserzementwert wird in diesem Fall erhöht, was zu geringeren Festigkeiten führt. In der Literatur [Quattrone et al. - 2016] wird festgestellt, dass die Gesteinskörnung im Frischbeton nicht das gleiche Saugvermögen hat wie im Pyknometerversuch, da der Zementleim einen Teil der offenen Poren verstopft und so zu geringerem Saugvermögen führt. Zudem unterscheiden sich die Viskosität und Oberflächenspannung von Zementleim deutlich von den Parametern reinen Wassers, was die Kinetik der Wasseraufnahme verändert und das Wassersaugen verringert.

Der Wasserzementwert kann bei saugender Gesteinskörnung nicht über das praxisübliche Darverfahren überprüft werden, da sich hier nur das Gesamtwasser als Summe aus Kern-, Oberflächenfeuchte und freiem Wasser ermitteln lässt. Somit ist der tatsächliche Wasserzementwert nur indirekt zu ermitteln. Diese indirekte Ermittlung unterliegt jedoch zahlreichen Störparametern, die für eine zutreffende Ermittlung des richtigen Wassergehalts möglichst eliminiert werden müssen.

Zusätzlich zur Problematik, die exakte Wassermenge zur Gewährleistung eines angestrebten Wasserzementwerts zu kennen, ergibt sich für die praktische Verwendung des Materials in der Betonherstellung ein weiteres Problem. Es ist nachgewiesen, dass der Feuchtezustand der Gesteinskörnung bei gleichem Gesamtwasser Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und Festigkeit des daraus hergestellten Betons nimmt. Nachgewiesen wurde in [Poon et al. - 2004], dass ofentrockene Gesteinskörnung aus Betonbruch aufgrund des erforderlichen Vornässens zu einer - verglichen mit kernfeuchter Gesteinskörnung - erhöhten Anfangskonsistenz und zu einem schnellen Absinken der Anfangskonsistenz führt. Auch ein Einfluss auf die Festbetoneigenschaften wurde in [Poon et al. - 2004] gezeigt, da die Gesteinskörnung in ihrem Wasseraufnahmevermögen überschätzt wurde. Des Weiteren sind Ergebnisse in [Poon et al. - 2004] veröffentlicht, die auf einen negativen Einfluss einer vollständig gesättigten Körnung auf die Festigkeit schließen lassen. Die Gesteinskörnung gab in Folge der Verdichtungsenergie einen Teil des Wassers ab, der Beton blutete stark und das abgegebene Wasser störte die Kontaktzone zwischen Korn und Matrix durch eine lokale Erhöhung des Wasserzementwertes, wodurch der Haftverbund verringert würde. Eine nicht vollständig gesättigte Körnung führte in veröffentlichten Versuchsergebnissen [Eckert u. Oliveira - 2017] bei gleichen Wassergehalten in allen Mischungen zu den höchsten Festigkeiten, da durch das leichte Wassersaugen eine sehr starke Kontaktzone zwischen Korn und Zementsteinmatrix ausgebildet wird. Wie unterschiedliche Feuchtezustände der rezyklierten Gesteinskörnung korrekt auf das notwendige Zugabewasser einer Betonzusammensetzung anzurechnen sind, ist bislang nicht geklärt.

Das Gesamtsystem Beton wird in der Modellvorstellung als Zweiphasensystem aus Zementstein und Gesteinskörnung angesehen, dessen Charakteristika durch die Eigenschaften dieser beiden Phasen sowie durch deren Verbund miteinander beeinflusst werden. Die Festigkeit eines Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung kann nur genau beurteilt werden, wenn es gelingt, die drei nach [Härig et al. - 1996] maßgeblichen Einflussfaktoren

- Eigenschaften des Zementsteins
- Eigenschaften der Gesteinskörnung
- Haftverbund zwischen Zementstein und Gesteinskörnung

als einzelne Parameter bewerten, kontrollieren und konstant halten zu können. Beton ist folglich ein multiparametrisches System mit mehreren Unbekannten, die eine tatsächliche Beurteilung des Einflusses rezyklierter Gesteinskörnung auf die Betonfestigkeit, auf den Elastizitätsmodul, wie auch auf die übrigen Betoneigenschaften erschweren. Zwingend notwendig für einen korrekten Vergleich ist es, den Wasserzementwert bei den Betonzusammensetzungen gleich zu halten, um die Matrixfestigkeit als Einflussparameter konstant halten zu können. Gelingt dies, so würde es – im Unterschied zum jetzigen Stand der Erkenntnisse - möglich, nur die Einflüsse der Gesteinskörnung selbst isoliert zu betrachten. Die eingangs beschriebene Problematik führt aber dazu, dass die Gewährleistung und Kontrolle eines gleichen Wasserzementwerts gegenwärtig nicht möglich ist.

Erst wenn die Einflüsse auf das Gesamtsystem, die aus den Eigenschaften des Zementsteins rühren, kontrollierbar sind, kann eine tatsächliche Beurteilung der Einflüsse von rezyklierter Gesteinskörnung und ihrer Eigenschaften auf die daraus hergestellten Betone erfolgen. Die Druck- und Zugfestigkeit sowie das Elastizitätsmodul von R-Beton, im Vergleich zu einem Referenzbeton, hängen neben dem Wasserzementwert noch von weiteren Faktoren ab, die dazu führen, dass bei R-Betonen die Betonfestigkeit von der Gesteinskörnung abhängig wird:

- Elastizitätsmodul der Gesteinskörnung
- Oberflächenrauigkeit
- Kontaktzone
- Korndruckfestigkeit
- Packungsdichte der Gesteinskörnung
- Blutwassermenge (Absenkung des Wasserzementwerts, bei gleichzeitiger Verschlechterung Kontaktzone)

Für die Beurteilung des Einflusses von rezyklierten Gesteinskörnungen auf die Eigenschaften von Beton bleibt aktuell nur eine Vorgehensweise, die auf vielen Festlegungen und Annahmen basiert und so die Ergebnisse unpräzise macht. Auch für die Praxis bleibt bislang nur eine auf der sicheren Seite liegende, „hemdsärmelige“ Vorgehensweise, die über die Erstprüfung die Festigkeitsanforderungen nachweist und hinsichtlich der Bestimmung des Feuchtegehalts mit hohem Aufwand oder einem Risiko verbunden ist, wenn eine ausreichende Gleichmäßigkeit des Materialstroms nicht gegeben ist. In der Praxis ist es kaum realisierbar, von jeder Lieferung rezyklierter Gesteinskörnung den Wassergehalt und die zeitliche Entwicklung der Wasseraufnahme im Pyknometerversuch zu ermitteln, um die exakte Wasserdosierung vorab zu

berechnen. Somit bieten sich bislang für die Praxis lediglich ungenaue Wege zum Umgang mit rezyklierter Gesteinskörnung an, deren Auswirkungen auf die Betoneigenschaften in [Rühl - 2001] an größeren Bauvorhaben erprobt und ausgewertet wurden.

Eine erste Möglichkeit besteht darin, die Wasserdosierung, ungeachtet der schwankenden Feuchte der rezyklierten Gesteinskörnung, grundsätzlich konstant zu belassen und die Zielkonsistenz über eine variable Zusatzmitteldosierung einzustellen. Dieses Vorgehen hat eine vergleichsweise hohe Standardabweichung sowie ein von Charge zu Charge schwankendes Ansteifen über die Zeit zur Folge, sodass eine nachträgliche Konsistenzkorrektur mit Fließmittel auf der Baustelle notwendig wird.

Eine zweite in [Rühl - 2001] betrachtete Möglichkeit ist die konsistenzgesteuerte Betonherstellung, bei der im konkreten Fall die Gesteinskörnungen vor dem Mischer bereits durch Berieselung mit Wasser auf einen einheitlichen Feuchtegehalt gebracht wurden. Die Wasserdosierung wird dann entsprechend der Eigenfeuchte der Gesteinskörnung und über eine optische Beurteilung der Konsistenz durch das im Mischer befindliche Kamerasystem sowie über die Leistungsaufnahme der Mischerwelle reguliert. Es zeigt sich an den untersuchten Praxisvorgehensweisen, dass bislang lediglich pragmatische, überschlägige Vorgehensweisen für den Umgang mit den charakteristischen Besonderheiten von rezyklierter Gesteinskörnung zur Verfügung stehen.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wurden die grundlegenden Kenntnisse zur Gewährleistung einer planmäßigen Betonzusammensetzung unter Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung mit Berücksichtigung der praxisrelevanten Schwankungen und charakteristischen Besonderheiten dieser Körnung erforscht. Die gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die Erarbeitung einer Handlungsempfehlung zum Umgang mit rezyklierten Gesteinskörnungen in der Betonherstellung.

Ziel der Arbeit war es, die Wasseraufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonzusammensetzung korrekt zu berücksichtigen und den Wassergehalt im Zementleim gegenüber dem Sollwert nicht zu verändern. Aufbauend auf der in dieser Arbeit entwickelten Methode zur zielsicheren Einstellung des vorgesehenen Wassergehalts im Zementleim sollte darüber hinaus die Frage beantwortet werden, wie rezyklierte Gesteinskörnung bei gleichem Wasserzementwert die Festigkeit und das Elastizitätsmodul des Gesamtsystems im Vergleich zu Normalbeton beeinflusst. Dies sollte die Basis schaffen, um R-Betone im Hinblick auf Konsistenz, Festigkeit und Elastizitätsmodul zielsicher herstellen zu können.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Zur Umsetzung der formulierten Ziele gliedert sich diese Arbeit in insgesamt sechs Kapitel.

Kapitel 1 dient der Einführung in die Relevanz der Problemstellung und gibt einen allgemeinen Überblick über den Aufbau der Arbeit.

Kapitel 2 stellt den Wissensstand über rezyklierte Gesteinskörnungen und ihre Verwendung im Beton vor. Es gibt zunächst einen Überblick über den Status Quo sowie die zu klärenden Fragestellungen im Hinblick auf die Gleichmäßigkeit der Eigenschaften und deren Berücksichtigung in der Betonherstellung bislang. Es wird analysiert, wie stark sich die Eigenschaften rezyklierter Gesteinskörnungen von denen natürlicher Gesteinskörnungen unterscheiden und wie groß die für die Praxis zu kompensierenden Schwankungen dieser Eigenschaften sein können. Des Weiteren wird die Literatur dahingehend ausgewertet, welche verschiedenen Ansätze bislang zur Berücksichtigung der Wasseraufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung angewendet werden.

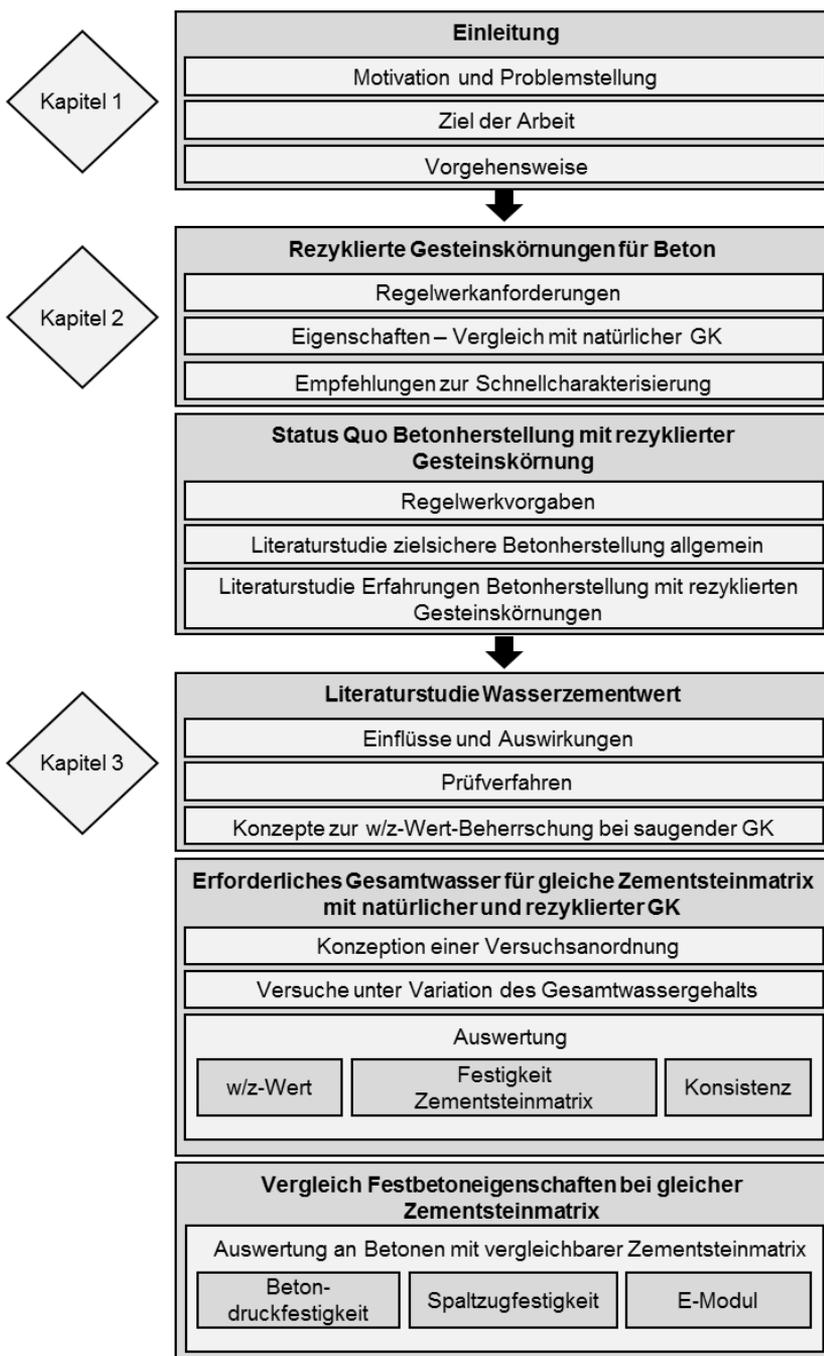
Im **Kapitel 3** sind die Arbeiten dargestellt mit denen empirisch eine Methode entwickelt wurde, um die Eigenschaften des Zementleims auch bei Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung über den vorgesehenen Wasserzementwert zielgerichtet einstellen zu können. Es werden zu Beginn des Kapitels zunächst die theoretischen Grundlagen zur Wasserzementwertbeherrschung und der Stand der Literatur zum Umgang mit saugenden Körnungen erläutert. Zudem werden die zur Verfügung stehenden Verfahren zur Überprüfung des Wasserzementwerts in Beton vorgestellt. Auf Basis der Literaturauswertung wird dargelegt, welche Versuchsanordnung gewählt wurde, um Versuche zur korrekten Wasserdosierung durchzuführen. Über die Darstellung und Auswertung der gewonnenen Ergebnisse wird gezeigt, wie mit ofengetrockneter Gesteinskörnung derjenige Gesamtwassergehalt ermittelt werden kann, der zu einer planmäßigen Zusammensetzung des Zementleims benötigt wird. Nachdem auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse, der planmäßige Wassergehalt im Zementleim bei Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung realisiert werden konnte, wird der tatsächliche Einfluss der charakteristischen Besonderheiten auf die Festbetoneigenschaften der Betone betrachtet. Die Untersuchungen dienen zur Beurteilung, ob unter Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen vergleichbare Festigkeiten wie bei Normalbeton erreicht werden können oder ob für die Praxis Anpassungen in der Betonzusammensetzung notwendig werden, um die Zielfestigkeiten der Vergleichsbetone mit natürlicher Gesteinskörnung zu erreichen.

Darauf aufbauend wird in **Kapitel 4** im Hinblick auf die in der Praxis vorherrschenden Bedingungen aufgezeigt, wie sich der Feuchtezustand von rezyklierter Gesteinskörnung auf die Eigenschaften des Betons auswirkt. Die vorliegende Literatur wurde in diesem Kapitel ausgewertet und mit eigenen Versuchen an den in Deutschland zugelassenen Typen rezyklierter Gesteinskörnung ergänzt, um für die Praxis eine Empfehlung zum optimalen Feuchtezustand sowie zur Kompensation von schwankenden Gesteinskörnungsfeuchten aussprechen zu können.

Gegenstand des **Kapitels 5** ist eine Handlungsempfehlung für die zielsichere Mischungsberechnung und Herstellung von Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen. Hier wird dargestellt, welche Wasserzugabe für rezyklierte Gesteinskörnungen notwendig ist, um die Zusammensetzung des Zementleims gegenüber Beton mit natürlicher Gesteinskörnung nicht zu verändern.

Das abschließende **Kapitel 6** fasst die Erkenntnisse der Arbeit zusammen und gibt ein Fazit zu den Erkenntnissen der Arbeit sowie einen Ausblick auf Aspekte für weitere Forschungsarbeiten.

In Abbildung 1-1 ist die Struktur dieser Arbeit schematisch dargestellt.



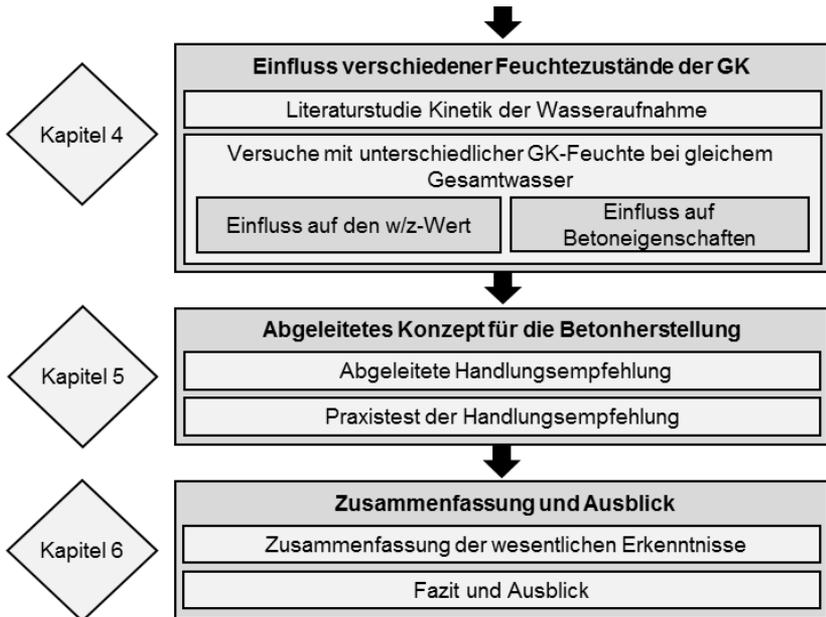


Abbildung 1-1: Struktur der Arbeit

2 Betonherstellung mit rezyklierter Gesteinskörnung - Randbedingungen für die Praxis

2.1 Einleitung

Das folgende Kapitel betrachtet detailliert die im Jahr 2018 für die Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen gegebenen Randbedingungen und den Stand der Forschung. Auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche, einer Analyse der aktuellen deutschen Regelwerksituation sowie durch eigene Gesteinskörnungsanalysen im Labor ist im nachfolgenden Kapitel dargelegt, mit welchen charakteristischen Besonderheiten der rezyklierten Gesteinskörnung die Praxis rechnen muss, welche Regelwerkvorgaben einzuhalten sind und welche Methoden bislang veröffentlicht wurden, um mit den charakteristischen Besonderheiten in der Betonherstellung umzugehen. Auch wird deutlich gemacht, welcher Forschungsbedarf auf Basis dieser Auswertung erkennbar ist.

Dabei werden in Kapitel 2.2 zunächst für die rezyklierte Gesteinskörnung selbst die Regelwerkanforderungen und dann auf Grundlage von Datensätzen der Praxis und aus eigenen Versuchen die Eigenschaften von rezyklierten und natürlichen Gesteinskörnungen für Beton und deren Gleichmäßigkeit dargelegt und mit einander verglichen.

Kapitel 2.3 behandelt im Folgenden die Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen im Status Quo. Im abschließenden Kapitel 2.4 wird zusammenfassend der Forschungsbedarf bei der Betonherstellung mit rezyklierter Gesteinskörnung formuliert.

2.2 Rezyklierte Gesteinskörnung

2.2.1 Regelwerkanforderungen an rezyklierte Gesteinskörnung

Als rezyklierte Gesteinskörnungen werden gemäß den Definitionen in [DIN EN 12620] und [DIN 4226-101] „Gesteinskörnungen aus aufbereitetem anorganischem Material, welches zuvor als Baustoff eingesetzt war“ bezeichnet. Die Bezeichnung ist ein Sammelbegriff für rezyklierten Splitt und rezyklierten Brechsand. Rezyklierte Gesteinskörnungen bestehen größtenteils aus gebrochenen mineralischen Bauabfällen, stammen folglich also in der Regel nicht aus einem homogenen Vorkommen. Aus diesem Grund kann die rezyklierte Gesteinskörnung gegenüber natürlicher Gesteinskörnung in ihrer stofflichen Zusammensetzung stark schwanken. Die Regelwerke geben eine Vielzahl von Anforderungen vor, die die Streubreite der möglichen Eigenschaften des Materials limitieren sollen.

Die Bestandteile rezyklierter Gesteinskörnung werden in [DIN EN 12620] kategorisiert. Dabei wird zwischen den Bestandteilen gemäß der folgenden Tabelle 2-1 unterschieden und entsprechend der massenmäßigen Anteile der Stoffe in Kategorien eingeteilt.

Tabelle 2-1: Bestandteile rezyklierter Gesteinskörnung nach [DIN EN 12620]

Bestandteile	Beschreibung
Rc	Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton
Ru	Ungebundene Gesteinskörner, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörner
Rb	Mauer- und Dachziegel aus gebranntem Ton, Kalksandsteine, Gasbetonsteine (nicht schwimmend)
Ra	Bitumenhaltige Materialien
X	Bindige Materialien (d. h. Ton, Erde), (eisenhaltige und nicht eisenhaltige) Metalle, nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi, Gips
Rg	Glas
FL	Schwimmendes Material im Volumen

Die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung rezyklierter Gesteinskörnungen unterliegen nationalen Regelungen. Für Deutschland werden gemäß [DIN 4226 101] vier Typen rezyklierter Gesteinskörnung entsprechend den nach [DIN EN 12620] anzugebenden Kategorien der Bestandteile rezyklierter Gesteinskörnungen unterschieden. Für die Verwendung in der Betonherstellung nach [DIN EN 206-1] und [DIN 1045-2] in Verbindung mit der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ [Rili-BREZ] dürfen derzeit in Deutschland rezyklierte Gesteinskörnungen Typ 1 und Typ 2 unter Ausschluss der feinen Gesteinskörnung (< 2 mm) verwendet werden. Diese beiden Typen werden im Folgenden weiter behandelt.

Soll rezyklierte Gesteinskörnung für die Herstellung von Beton nach [DIN EN 206-1] und [DIN 1045-2] verwendet werden, so sind die Anforderungen gemäß der [Rili-BREZ] zu erfüllen. Für die zulässigen Typen 1 und 2 gibt das vorgenannte Regelwerk die Grenzwerte der stofflichen Zusammensetzung vor. Diese sind in Tabelle 2-2 dargestellt.

Tabelle 2-2: Grenzwerte der stofflichen Zusammensetzung rezyklierter Gesteinskörnung nach [Rili-BREZ], Tabelle 1

Bestandteile	Typ 1	Typ 2
Rc + Ru	RCu ₉₀	RCu ₇₀
Rb	Rb ₁₀₋	Rb ₃₀₋
Ra	Ra ₁₋	Ra ₁₋
X + Rg	XRg ₁₋	XRg ₂₋
FL	FL ₂₋	FL ₂₋

Außerdem muss rezyklierte Gesteinskörnung, die für die Verwendung in der Betonherstellung produziert wird, Regelanforderungen sowie zusätzliche Anforderungen erfüllen (siehe Anhang A.1).

Kapitel 2: Randbedingungen Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen

Für rezyklierte Gesteinskörnung ist vor der Verwendung gemäß [Rili-BREZ], Anhang B die Wasseraufnahme nach zehn Minuten zu prüfen. Für rezyklierte Gesteinskörnungen ≥ 2 mm darf diese Wasseraufnahme die in Tabelle 2-3 festgelegten Werte nicht überschreiten.

Tabelle 2-3: Wasseraufnahme nach zehn Minuten für rezyklierte Gesteinskörnungen, [Rili-BREZ], Tabelle 4

Wasseraufnahme	Typ 1	Typ 2
Höchstzulässige Wasseraufnahme nach 10 Minuten	10 M.-%	15 M.-%

Es dürfen nur rezyklierte Gesteinskörnungen nach [DIN EN 12620] verwendet werden, die keine umweltschädlichen Auswirkungen haben, insbesondere nicht auf Boden und Grundwasser. Die Grenzwerte für den Nachweis der Umweltverträglichkeit sind seit August 2017 in [DIN 4226-101] und [DIN 4226-102] geregelt. Ein Vergleich der Anforderungen an rezyklierte und natürliche Gesteinskörnung ist in Anhang A.1 tabellarisch dargestellt.

Auch für die Produktionskontrolle resultieren aus [Rili-BREZ] zusätzliche Anforderungen gegenüber der Verwendung natürlicher Gesteinskörnung.

Für die Praxis ergibt sich gegenüber der Verwendung natürlicher Gesteinskörnungen zusätzlicher Prüfaufwand. Er soll der Streuung bei den Eigenschaften von rezyklierter Gesteinskörnung Rechnung tragen und ergibt sich aus [Rili-BREZ]. Es ist vom Betonhersteller eine Sichtprüfung der stofflichen Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung in jedem Lieferfahrzeug durchzuführen, zudem ist in jeder Produktionswoche die Kornrohddichte (ofentrocken) nach [DIN EN 1097-6], sowie die Wasseraufnahme nach zehn Minuten nach Anhang B dieser Richtlinie zu ermitteln. Bei Änderung der Feuchtebedingungen ist der Wassergehalt der rezyklierten Gesteinskörnung zu bestimmen.

2.2.2 Charakteristische Besonderheiten von rezyklierter Gesteinskörnung im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen

2.2.2.1 Eigenschaften natürlicher Gesteinskörnungen für Beton

Als Gesteinskörnung gemäß [DIN EN 12620] für Beton steht eine Vielzahl von Stoffen zur Verfügung, die ihrer Rohddichte nach als leichte, normale und schwere Gesteinskörnung bezeichnet werden. Mengenmäßig ist die normale Gesteinskörnung die mit großem Abstand bedeutendste Körnung für die Betonherstellung. Als normale Gesteinskörnung wird vor allem natürliche Gesteinskörnung eingesetzt, die als Kies und Sand aus Gruben, Flüssen und Seen sowie als gebrochenes Material (vorwiegend durch Zerkleinern von Festgesteinen) gewonnen wird.

Ungeeignet als Gesteinskörnung für Beton sind nach [Wesche - 1981] Gesteine, die tonhaltige Bestandteile enthalten, ebenso wie bereits verwitterte oder tektonisch stark beanspruchte Gesteine, Schiefergesteine, die meisten grobkristallinen Marmore, alle gips- oder pyrithaltigen Gesteine sowie der Großteil der weichen Sandsteine. In

Deutschland betrug die jährliche Gewinnung von Primärrohstoffen für die Betonherstellung im Zeitraum 2000 bis 2013, gemäß [BBS - 2016], 114,29 Mio. t. Davon beliefen sich ca. 75 % (86,14 Mio. t) auf Sand und Kies sowie ca. 25 % (28,15 Mio. t) der Gesamtmenge auf gebrochene Natursteine. Natürliche Gesteinskörnungen für Beton weisen, trotz Einhaltung der Regelanforderungen nach [DIN EN 12620], regional bedingt und abhängig von ihrer Petrografie, Unterschiede in den für die Betoneigenschaften am stärksten relevanten Eigenschaften Rohdichte, Wasseraufnahme und Kornfestigkeit auf. Auch die Korngrößenverteilung, Kornform sowie alle übrigen Eigenschaften variieren stark. Im Zuge dieser Arbeit werden jedoch ausschließlich diejenigen Eigenschaften betrachtet, die sich nicht durch Optimierung des Aufbereitungsprozesses bzw. der Kornzusammensetzung angleichen lassen. Auch Eigenschaften, die sich nicht unmittelbar auf den Wasserhaushalt des Frischbetons auswirken, werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Ein Abbild der im südwestdeutschen Raum in der Transportbetonherstellung verwendeten Gesteinskörnungen und ihrer Eigenschaften wurde auf Basis von Daten der Eigen- und Fremdüberwachung von Produzenten natürlicher Gesteinskörnung [MPA Kaiserslautern - 2018], [BÜV Hessen-RLP - 2018], [Platzek - 2018], ergänzt durch Daten aus der Literatur [Bonzel u. Dahms - 1978], erzeugt. Es wurden insgesamt 120 Datensätze zu Lieferkörnungen natürlicher Gesteinskörnung analysiert. Da in Teilen der Datensätze nicht alle ausgewerteten Eigenschaften enthalten waren ist nachfolgend jeweils die Anzahl der ausgewerteten Datensätze je Eigenschaft angegeben. Die ausgewerteten Datensätze sind in Anhang A.2 zusammengestellt.

Die Eigenschaften der natürlichen Gesteinskörnungen sind in Abbildung 2-2 bis Abbildung 2-5 zusammengefasst. Ausgewertet wurden in Bezug auf die absoluten Eigenschaften 67 Kiese und 31 gebrochene natürliche Gesteinskörnungen ≥ 2 mm aus den in Abbildung 2-1 dargestellten Gewinnungsstätten. Die in den Abbildungen 2-2 bis 2-5 dargestellten Streubreiten der Eigenschaften beziehen sich dabei zunächst auf die ausgewertete Grundgesamtheit der natürlichen Gesteinskörnungen, unabhängig von der Lagerstätte. Im Zuge des Vergleichs zwischen natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen in Kapitel 2.2.2.3 wurde nachfolgend auch die für die Betonherstellung relevante Schwankungsbreite innerhalb einer einzelnen Gewinnungsstätte ausgewertet.

Kapitel 2: Randbedingungen Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen

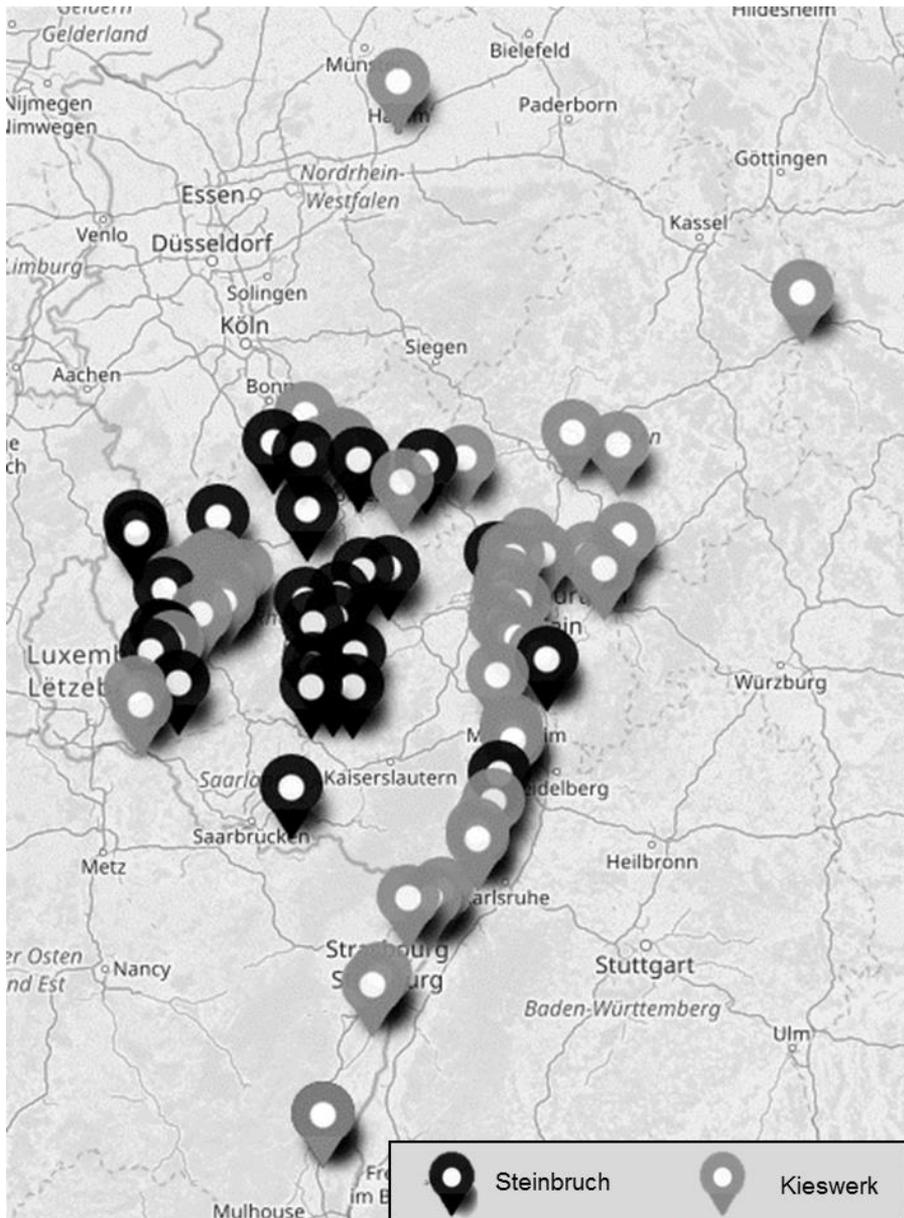


Abbildung 2-1: Gewinnungsstätten der ausgewerteten Kiese (grau) und gebrochenen Gesteinskörnungen (schwarz) – Karte erstellt mit umap.openstreetmap.fr

Da die Unterschiede zwischen den betrachteten Lieferkörnungen sehr gering waren, wird die Auswertung über alle Korngruppen dargestellt.

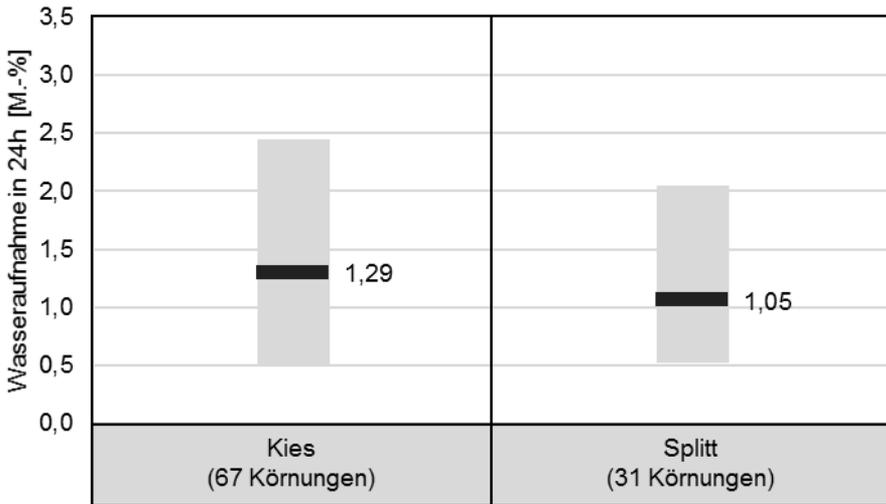


Abbildung 2-2: Wasseraufnahme in 24 Stunden (WA_{24}) von 67 Kiesen und 31 gebrochenen natürlichen Gesteinskörnungen für Beton in Deutschland

Die mittlere Wasseraufnahme innerhalb von 24 Stunden lag bei den ausgewerteten Kiesen bei 1,29 M.-%, die Wasseraufnahme der gebrochenen Gesteinskörnungen war mit 1,05 M.-% im Mittel erwartungsgemäß geringer (siehe Abbildung 2-3). Auch war die Bandbreite der Wasseraufnahme bei Rundkorn deutlich größer als bei den untersuchten gebrochenen Körnungen.

Abbildung 2-3 und Abbildung 2-4 geben einen Überblick über die Vergleichswerte der Rohdichte von natürlichen Gesteinskörnungen, die in Deutschland für die Herstellung von Transportbeton Verwendung finden. Die mittlere Trockenrohichte der betrachteten Kiese lag bei 2,53 kg/dm³, die der ausgewerteten Splitte leicht höher bei 2,57 kg/dm³. Die mittlere Rohdichte im wassergesättigten Zustand betrug bei den ausgewerteten Körnungen 2,59 kg/dm³ für die Kiese bzw. 2,67 kg/m³ für die untersuchten Splitte. Es ist zu beobachten, dass sich auch die Eigenschaften von natürlichen Gesteinen stark voneinander unterscheiden. Diese Unterschiede resultieren aus den variablen Gesteinsarten und der Petrografie der Körnungen. Die natürlichen Gesteinskörnungen mit der geringsten Rohdichte sind, wie aus der Literatur bekannt, die Kiese und Sandsteine des Mains. Die in die Auswertung einbezogene geringste Kornrohichte betrug 2,46 kg/dm³ im ofentrockenen Zustand.

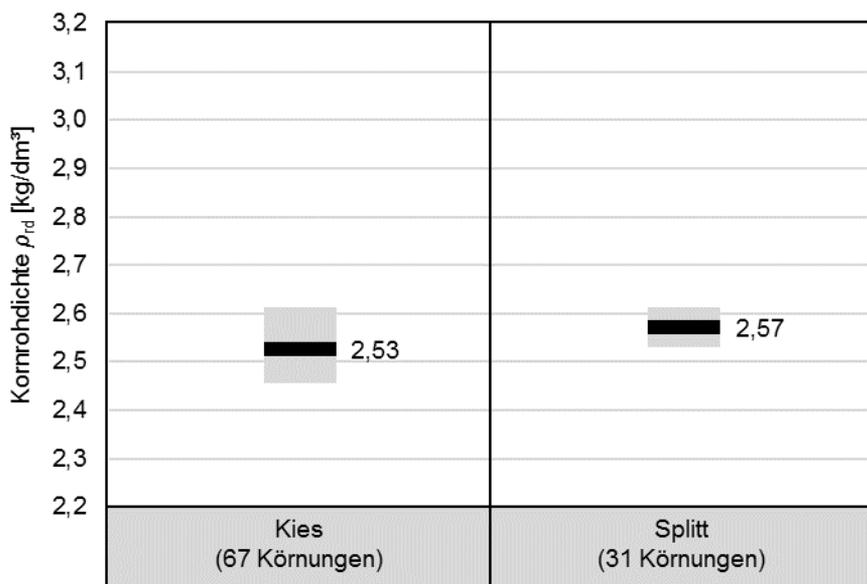


Abbildung 2-3: Kornrohichte im ofentrockenen (ρ_{rd}) Zustand von 67 ausgewerteten Kiesen und 31 gebrochenen natürlichen Gesteinskörnungen

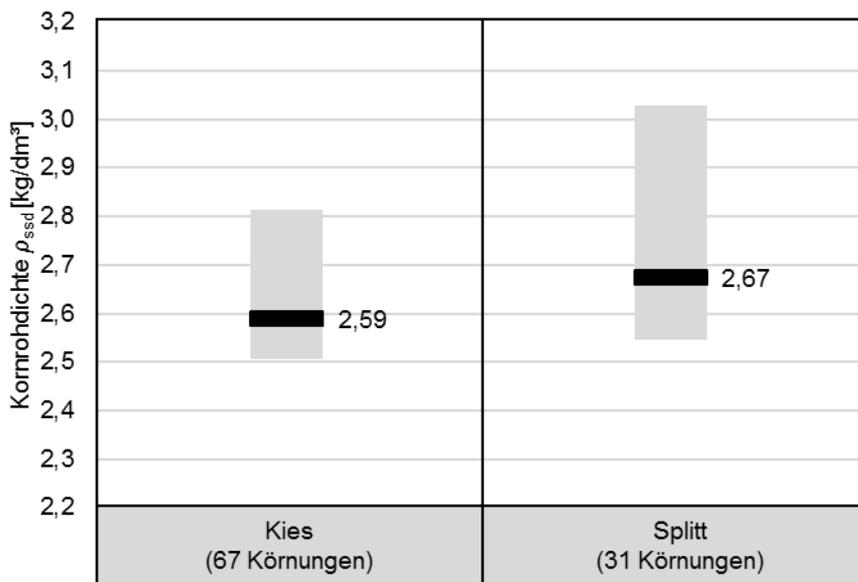


Abbildung 2-4: Kornrohichte im wassergesättigten oberflächentrockenen Zustand (ρ_{ssd}) von 67 ausgewerteten Kiesen und 31 gebrochenen natürlichen Gesteinskörnungen

2.2.2.2 Grundlagen Eigenschaften rezyklierter Gesteinskörnungen für Beton

Rezyklierte Gesteinskörnungen weisen im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung charakteristische Eigenschaften auf, die sich auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften auswirken. Die Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung streuen, trotz der Einhaltung aller Regelwerkanforderungen, zudem aufgrund der inhomogenen Herkunft stärker von Liefercharge zu Liefercharge als bei natürlicher Gesteinskörnung aus einer Gewinnungsstätte. Nachfolgend werden auf Basis von Literaturlauswertungen in den Kapiteln 2.2.2.3 bis 2.2.2.7 und eigenen Laboruntersuchungen die für die Praxis relevanten Charakteristika analysiert. Dabei liegt der Fokus auf denjenigen Eigenschaften, die sich nicht unmittelbar über eine optimale Konfiguration des Aufbereitungsprozesses beeinflussen lassen und sich auf die Betonfestigkeit unmittelbar auswirken (Porosität, Wasseraufnahme, Kornrohichte, Kornfestigkeit).

Viele Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung können durch einen optimierten Aufbereitungsprozess gesteuert werden. So kann bereits bei der Herstellung mit einem selektiven Rückbau deutlich Einfluss auf die Qualität der rezyklierten Gesteinskörnung genommen werden. Nach dem Abbruch erfolgen eine weitere Sortierung und anschließend der Brechprozess. Dieser kann mittels Backen-, Kegel-, Walzen-, Prall- oder Schlagwalzenbrechern erfolgen. Am häufigsten finden bei der Baustoffaufbereitung Prall- und Backenbrecher Verwendung [Müller u. Stürmer - 2017]. Die Kornform der produzierten Gesteinskörnung wird maßgeblich durch den verwendeten Brechertyp und die Einstellung des Brechers bedingt. Backenbrecher erzeugen dabei einen höheren Anteil an ungünstig geformten (plattigen, splittrigen) Körnern als Kegelbrecher und Prallmühlen [Müller - 2018]. Die Kornform sollte möglichst kugelig bis kubisch sein, um eine hohe Packungsdichte der Betonmischung zu erreichen und somit den Bindemittelbedarf zu minimieren. Deshalb wird in der Praxis häufig mit einem zweistufigen Brechprozess zunächst ein Backenbrecher als Vorbrecher eingesetzt, da sich dieser Brechertyp durch einen geringen Verschleiß auszeichnet, und im zweiten Schritt mit einem Kegelbrecher oder Prallbrecher die gewünschte Korngröße und die angestrebte möglichst kubische Kornform erzeugt.

Je nach Ausgangsfestigkeit des zu brechenden Betons und des eingesetzten Brechertyps, fällt ein erheblicher Anteil der gewonnenen Gesteinskörnung als Brechsand ≤ 4 mm an. Es muss mit einem Anteil von ca. 20 - 40 M.-% ≤ 2 mm bzw. 30 - 60 M.-% ≤ 4 mm gerechnet werden [Müller u. Dora - 2000]. In den feinen Kornfraktionen reichert sich der Zementstein beim Brechen stark an. Je höher die Ausgangsfestigkeit des Ausgangsbetons, desto geringer ist diese Anreicherung. Bei groben Betonsplitten entspricht das Verhältnis von Zementstein zu natürlicher Gesteinskörnung in etwa der Ausgangszusammensetzung [Wassing - 2002]. Allgemein ist mit starken Schwankungen von bis zu 20 M.-% der stofflichen Zusammensetzung zu rechnen, sofern die Ausgangsmaterialien nicht aus einheitlichen Vorkommen stammen, sondern von Region, Alter, Gebäudetyp, Abbruch- und Aufbereitungstechnik abhängig sind [Hoffmann u. Jacobs - 2007].

Auf die charakteristischen Besonderheiten von rezyklierter Gesteinskörnung wird im Folgenden eingegangen. Grundsätzlich unterscheiden sich die Porosität/Porengrößenverteilung, die Wasseraufnahme, die Kornfestigkeit, die Elastizität der Gesteinskörnung sowie die Gleichmäßigkeit der Eigenschaften teils deutlich von natürlichen

Kiesen und Splitten. Verglichen mit natürlichen Gesteinskörnungen besitzen rezyklierte Gesteinskörnungen allgemein eine höhere Porosität und dadurch bedingt eine geringere Rohdichte. Mit steigendem Anteil an Mauerziegeln verringert sich die Rohdichte und erhöht sich die Porosität gegenüber rezyklierten Gesteinskörnungen aus reinem Betonbruch. Die Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnung ist höher als die von natürlicher Gesteinskörnung. Bei feiner Gesteinskörnung ist sie größer als bei der groben Körnung, denn je geringer die Korngröße, desto höher der Anteil an Zementstein und die Porosität und umso geringer die Rohdichte. Noch höher ist die Wasseraufnahme, wenn Mauerwerk/Ziegel/Backstein enthalten sind. Je höher der Anteil an Mauerwerk/Ziegel/Backstein ist, desto höher ist auch die Wasseraufnahme. Die größte Wasseraufnahme erfolgt innerhalb der ersten zehn Minuten. Die Kornfestigkeit hängt bei Betonsplitten wesentlich von der Ausgangsfestigkeit der Zementsteinmatrix ab [Kerckhoff u. Siebel - 2002]. Bei der gröberen Körnung 8/16 mm ist sie niedriger als bei der feineren Körnung 4/8 mm. Die Kornfestigkeit von Mauerwerksplitten ist deutlich geringer als diejenige von Betonbruch, allgemein ist die Kornfestigkeit rezyklierter Gesteinskörnung niedriger als bei den meisten natürlichen Gesteinskörnungen, die als Gesteinskörnung in Beton Verwendung finden [Wies u. Manns - 2002].

Die Eigenschaften von rezyklierten Gesteinskörnungen wurden im Rahmen dieser Arbeit an einer Vielzahl von Lieferchargen aus Praxis- wie auch Laborgemischen ermittelt. Zur Auswertung im Vergleich mit natürlichen für die Betonherstellung verwendeten Gesteinskörnungen wurde in Kapitel 2.2.2.1 zunächst dargestellt, welche Eigenschaften natürliche Gesteinskörnungen in Deutschland besitzen. Die Ergebnisse der Untersuchungen an rezyklierten Gesteinskörnungen werden nachfolgend in den Kapiteln 2.2.2.3 bis 2.2.2.7, zusammen mit Daten aus dokumentierten Pilotprojekten, Praxisdaten und Daten aus der Literatur ausgewertet, um die zu erwartenden Streubreiten der in Deutschland anfallenden rezyklierten Gesteinskörnungen für die Praxis bewerten zu können. Die rezyklierten Gesteinskörnungen erfüllen die in 2.2.1 beschriebenen Regelwerkanforderungen. Jedoch ist trotz der Konformität mit dem Regelwerk mit einer großen Schwankungsbreite der Gesteinskörnungseigenschaften zu rechnen, die in der Praxis betontechnologisch kompensiert werden muss.

2.2.2.3 Rohdichte rezyklierter Gesteinskörnung

Die Kornrohichte der rezyklierten Gesteinskörnungen wurde nach DIN EN 1097-6 ermittelt. Sie ist im Allgemeinen geringer als die der meisten natürlichen Gesteinskörnungen für Beton (vgl. Abbildung 2-5). Die untersuchten Gesteinskörnungen zeigen außerdem, dass die Kornrohichten von rezyklierten Gesteinskörnungen mit steigendem Gehalt der Fraktion Rb (Ziegel und/oder Kalksandstein) gemäß Tabelle 2-1 abnehmen. Die mittlere Rohdichte von insgesamt 57 ausgewerteten Lieferkörnungen des Typs 1 lag im ofentrockenen Zustand bei $2,30 \text{ kg/dm}^3$, die aus 14 Lieferkörnungen des Typs 2 bei $2,22 \text{ kg/dm}^3$ (siehe Tabelle 2-4). Dieser Trend entspricht den Angaben der einschlägigen Literatur (z. B. [Müller - 2001]). Dass die Rohdichten von rezyklierter Gesteinskörnung eine größere Bandbreite aufweisen als für natürliche Gesteinskörnungen (vgl. Kapitel 2.2.2.1), wird aus der Auswertung von Labor- und Praxisgemischen aus eigenen Versuchen, ergänzt mit Daten aus der Literatur, deutlich. Die geringste Trockenrohichte einer rezyklierten Körnung des Typs 1 (Betonsplitt 4/8 mm aus [Juan u. Gutiérrez - 2009]) lag bei $2,01 \text{ kg/dm}^3$, sie erfüllte somit nur knapp die

Mindestanforderung an die Rohdichte von 2,0 kg/dm³ gemäß [Rili-BREZ]. Die höchste Trockenrohddichte, die an einer rezyklierten Gesteinskörnung des Typs 1 im Rahmen dieser Auswertung erfasst wurde, lag bei 2,55 kg/dm³. Diese Kornrohddichte wurde an Betonsplitt 8/16 mm ermittelt, dessen Rohdichte damit in derselben Größenordnung natürlicher Gesteinskörnungen lag. Die an rezyklierten Gesteinskörnungen des Typs 2 ausgewerteten Trockenrohddichten lagen zwischen 2,10 kg/dm³ und 2,34 kg/dm³. Hier ist anzumerken, dass der Stichprobenumfang gegenüber Typ 1 deutlich geringer war, da nach einer Überprüfung der stofflichen Zusammensetzung zahlreiche als Typ 2 gelieferte Körnungen aufgrund ihrer tatsächlichen Zusammensetzung als Typ 1 eingestuft werden mussten. Zudem wurden gemäß der in Kapitel 2.2.1 erläuterten Grenzen der stofflichen Zusammensetzung auch alle sortenreinen Betonsplitt in die Auswertung als Typ 1 einbezogen. Es ist zu vermuten, dass die Unterschiede mit zunehmendem Stichprobenumfang für Typ 2 größer werden und der Größenordnung des Typs 1 entsprechen, da die Gesteinskörnung zu mindestens 70 M.-% ebenfalls aus Betonsplitt bestehen muss.

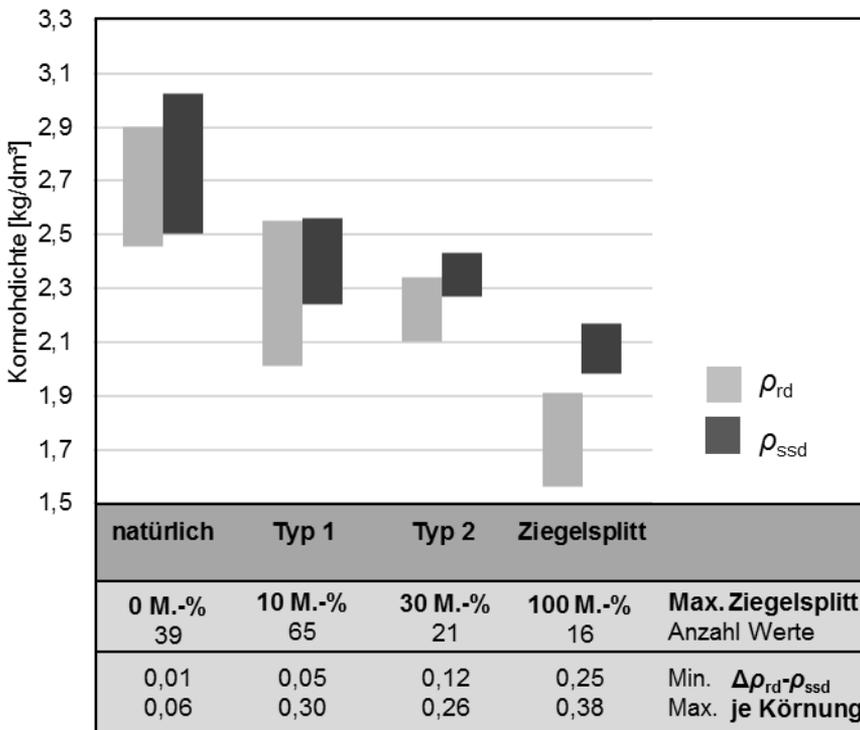


Abbildung 2-5: Kornrohddichten der untersuchten rezyklierten Gesteinskörnungen auf ofentrockener (ρ_{rd}) und wassergesättigter und oberflächentrockener (ρ_{ssd}) Basis

Die Daten in Tabelle 2-4 zeigen, dass mit steigendem Mauerwerksanteil auch der Unterschied zwischen der Rohdichte im ofentrockenen und im wassergesättigten, oberflächentrockenen Zustand steigt. Das Verhalten ist auf die größere Wasseraufnahme von ziegelhaltigem Material und dessen hohe Porosität im Vergleich zu Betonsplitt und natürlichen Gesteinskörnungen zurückzuführen (siehe Kapitel 2.2.2.5). Im Allge-

Kapitel 2: Randbedingungen Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen

meinen ist die Rohdichte von rezyklierten Gesteinskörnungen im Vergleich zu natürlichen Kiesen und Splitten stärker vom Feuchtezustand abhängig. Die Differenz zwischen der Rohdichte im wassergesättigten, oberflächentrockenen Zustand und der Rohdichte auf ofentrockener Basis von 106 ausgewerteten Datensätzen (Anhang A.2) ist in Tabelle 2-4 zusammengefasst.

Tabelle 2-4: Kornrohdsichten in Abhängigkeit vom Feuchtezustand

Art der Gesteinskörnung		ρ_{rd} [kg/dm ³]	ρ_{ssd} [kg/dm ³]	Differenz $\rho_{rd} - \rho_{ssd}$ je einzelner Körnung
Natürlich	min	2,46	2,51	0,01
	max	2,90	3,03	0,06
	Ø	2,57	2,62	0,04
Typ 1	min	2,01	2,24	0,05
	max	2,55	2,56	0,30
	Ø	2,31	2,43	0,13
Typ 2	min	2,10	2,27	0,12
	max	2,34	2,43	0,26
	Ø	2,24	2,38	0,17
Ziegelsplitt	min	1,56	1,98	0,25
	max	1,91	2,17	0,38
	Ø	1,76	2,08	0,32

Wie Tabelle 2-4 veranschaulicht, unterscheiden sich die Rohdsichten im ofentrockenen und im wassergesättigten Zustand bei natürlichen Gesteinskörnungen kaum, wohingegen mit steigendem Ziegelanteil der Rohdsichteunterschied bei rezyklierten Gesteinskörnungen deutlich ansteigt. In den rezyklierten Gesteinskörnungen Typ 1 waren dabei zwischen 0 M.-% und 10 M.-% ziegelhaltiges Material, in den rezyklierten Gesteinskörnungen Typ 2 10 M.-% bis 30 M.-% ziegelhaltiges Material enthalten.

Der Absolutwert der Kornrohdsichte ist für die erzielbare Betonfestigkeit nicht maßgebend. Für die Praxis der Transportbetonherstellung ist jedoch die Streubreite der Rohdsichte von Charge zu Charge von enormer Bedeutung. Die Schwankungen sollten in einem Bereich bleiben, der durch die normgemäßen üblichen Anpassungen während des Mischprozesses zu kompensieren ist, um die Qualität des resultierenden Frischbetons nicht negativ zu beeinträchtigen.

Da rezyklierte Gesteinskörnung nicht wie natürlicher Kies und Splitt aus einem vergleichsweise homogenen Vorkommen stammt, ist grundsätzlich von einer größeren Streubreite der Rohdsichte und Wasseraufnahme auszugehen, auch wenn die rezyklierte Gesteinskörnung über einen längeren Zeitraum von einem einzigen Recyclingwerk bezogen wird. Über einen Zeitraum von 3,5 Jahren wurden insgesamt elf Chargen rezyklierter Gesteinskörnung eines Recyclingbetriebes charakterisiert

Kapitel 2: Randbedingungen Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen

(Lieferkörnungen 2/16 mm, 2/8 mm und 8/16 mm, sowohl in Form von Praxisgemischen Typ 1 und Typ 2 als auch in Form von Laborgemischen Typ 1 und Typ 2 zudem in sortenreiner Form als reine Betonsplitte und reine Mauerwerksplitte), um den Streubereich der Rohdichte für die Praxis bewerten zu können. Die Streubreiten für rezyklierte Gesteinskörnung dieses Herstellwerkes wurden der Streubreite von Herstellwerken natürlicher Gesteinskörnung über einen Betrachtungszeitraum von fünf Jahren gegenübergestellt. Die Auswertung der Fremdüberwachung für insgesamt 95 Steinbrüche sowie 66 kiesproduzierende Betriebe in Deutschland [MPA Kaiserslautern - 2018; BÜV Hessen-RLP - 2018; Platzek - 2018] wurde dabei in Relation zur Auswertung des Recyclers gesetzt. Die geografische Lage der ausgewerteten Gewinnungsstätten ist in Abbildung 2-6 dargestellt.

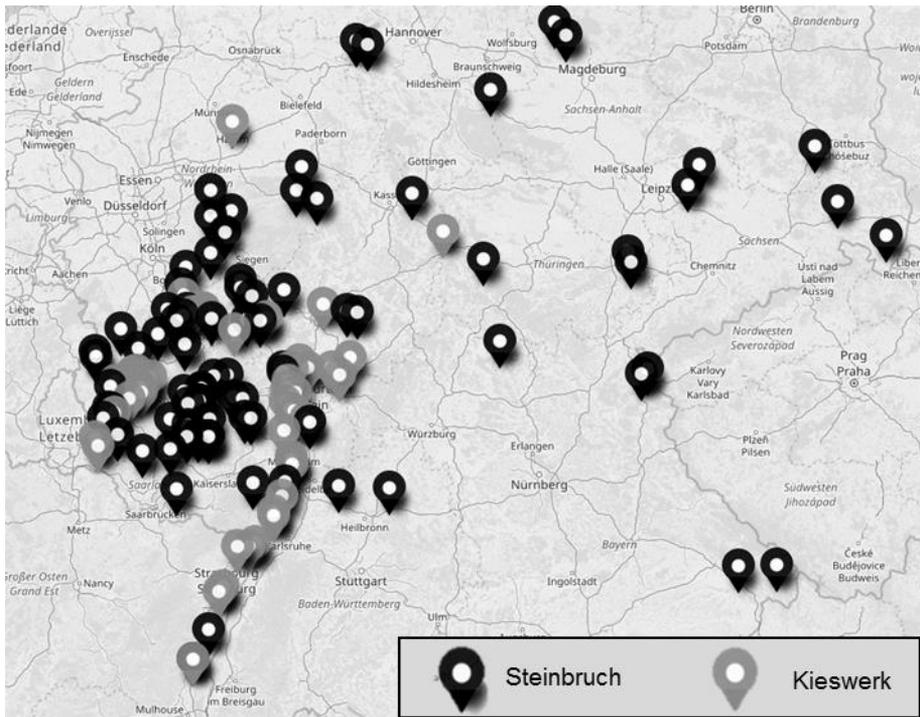


Abbildung 2-6: Lage der ausgewerteten Gewinnungsstätten natürlicher Gesteinskörnung – Karte erstellt mit umap.openstreetmap.fr

Die Zusammenfassung in Abbildung 2-7 zeigt, dass die Streuungen in der Rohdichte über den Zeitraum von 3,5 Jahren zwar oberhalb der mittleren Streuung für natürliche Gesteinskörnungen, aber noch innerhalb des Bereiches liegen, der auch bei natürlichen Kiesen und Splitten in Kauf genommen werden muss.

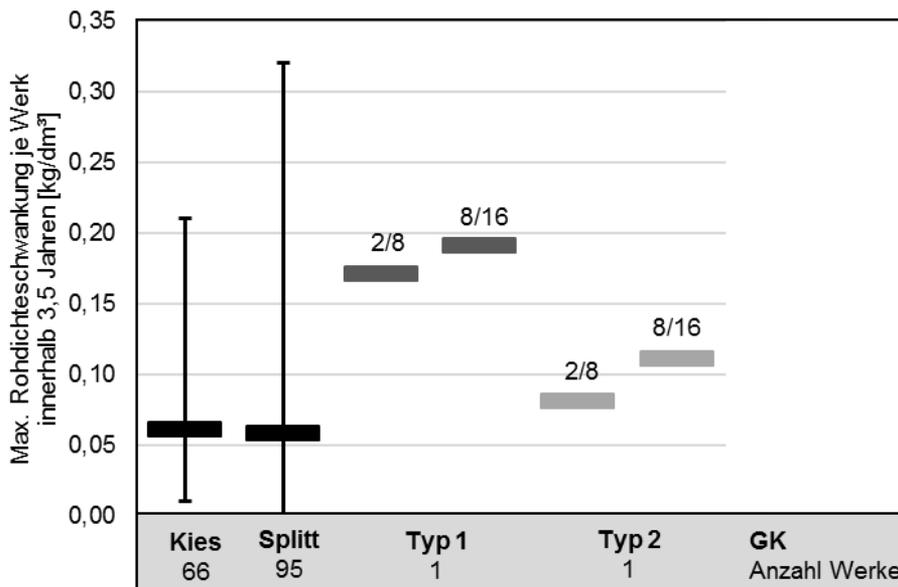


Abbildung 2-7: Maximale Rohdichtestreuung der Trockenrohddichte bei rezyklierten und natürlichen Gesteinskörnungen je Werk

So ergab sich für rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 auf Basis der ausgewerteten elf Chargen eine maximale Rohdichtedifferenz von 0,17 kg/dm³ bis 0,19 kg/m³ und für rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 2 eine maximale Differenz von 0,07 kg/dm³ bis 0,12 kg/m³ von Charge zu Charge. Dass für die Gesteinskörnung Typ 1 gegenüber Typ 2 eine größere Streubreite ermittelt wurde, kann darauf zurückgeführt werden, dass in den Praxismischungen im Wesentlichen reine Betonsplitt geliefert wurden, in den Laborgemischen aber die Grenzen der stofflichen Zusammensetzung abgebildet werden sollten und die höchstzulässigen 10 M.-% der Kategorie Rb gemäß Tabelle 1 zugemischt wurden. Die untersuchten Körnungen des Typs 2 waren hingegen in ihrer stofflichen Zusammensetzung konsistenter, was eine mögliche Erklärung für die geringere Schwankungsbreite der Rohdichte darstellt.

Größere Streuungen über mehrere Lieferchargen eines einzelnen Aufbereitungswerkes wurden in [Juan u. Gutiérrez - 2009] ermittelt. Hier wurden 15 Zugriffe aus der Produktion einer Aufbereitungsanlage charakterisiert, jeweils in den Lieferkörnungen 4/8 mm sowie 8/16 mm. Innerhalb der 15 Proben wurde eine Abweichung von bis zu 0,29 kg/dm³ zwischen zwei Zugriffen festgestellt. Für beide betrachteten Lieferkörnungen waren die maximalen Abweichungen zwischen zwei Zugriffen gleich groß.

2.2.2.4 Porenstruktur und dadurch bedingte Wechselwirkung zwischen rezyklierten Gesteinskörnungen und Wasser

Natürliche und rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton sind poröse Feststoffe mit jeweils charakteristischer Porenstruktur. Die Unterschiede in den Porenstrukturen bestimmen dabei im Wesentlichen die Unterschiede in den Eigenschaften, insbesondere im Wasseraufnahmevermögen, das für die Betonherstellung den maßgeblichen Unterschied darstellt.

Durch die Porosität ergibt sich eine Wechselwirkung zwischen Wasser in gasförmiger oder flüssiger Form und den Gesteinskörnungen. Enthalten ein Körper und/oder seine Umgebung Wassermoleküle, so erfolgt normalerweise ein Stofftransport, der mit einem Stoffübergang vom Körper an seine Umgebung, von der Umgebung in den Körper oder durch den Körper hindurch verbunden ist. Als Mechanismen für diesen Wassertransport können Diffusion, laminare Strömung und Kapillartransport verantwortlich sein. Diffusion erfolgt durch einen Konzentrationsunterschied, laminare Sickerströmung wird durch einen Druckunterschied angetrieben. Kapillartransport, der nur bei Wasser in flüssiger Form stattfinden kann, wird durch die physikalischen Eigenschaften der Oberflächenspannung des Wassers und der Benetzbarkeit der Oberfläche durch Wasser (Randwinkel) bestimmt.

Porenstruktur von rezyklierten Gesteinskörnungen

Je nach vorhandenem Porenvolumen, der Porengrößenverteilung und der Porengeometrie unterscheidet sich das Wasseraufnahmevermögen mineralischer Baustoffe, aus denen rezyklierte Gesteinskörnungen bestehen. Bei der Porengeometrie werden offene, durchgehende Makroporen, Flaschenhalsporen, welche nur über Mikroporen verbunden sind, Sackporen und geschlossene Poren unterschieden. Flaschenhals- und Sackporen füllen sich nur unter Druck mit Wasser, da die eingeschlossene Luft einen Gegendruck erzeugt [Weber u. Hafkesbrink - 2018]. In geschlossene Poren kann lediglich Wasserdampf eindringen, der kondensiert und die Füllung der Pore mit flüssigem Wasser bewirkt [Weber u. Hafkesbrink - 2018].

Hinsichtlich der Porengröße werden Mikroporen oder Gelporen (kleiner 10^{-7} m), Kapillarporen (zwischen 10^{-7} m und 10^{-4} m) und Makroporen (größer 10^{-4} m) unterschieden. Lediglich die durchgehenden Kapillarporen können sich durch die kapillare Wasseraufnahme von Wasser füllen und tragen zum Transport von flüssigem Wasser bei. Mikroporen sind zu klein um Wasser aufzunehmen, sie sind lediglich für Wasserdampf zugänglich. Makroporen sind zu groß für eine Kapillarität [Weber u. Hafkesbrink - 2018].

Die Analyse der Anteile der einzelnen Porengrößen im Baustoff kann z. B. über die Quecksilberdruckporosimetrie erfolgen, aus der die Porenradienverteilung hervorgeht.

Eine Gegenüberstellung der Porenradienverteilung von verschiedenen Wandbaustoffen, die in rezyklierter Gesteinskörnung in gebrochener Form enthalten sein können, ist in [Müller - 2018] enthalten. Abbildung 2-8 zeigt, dass die Porenradien von Beton und Zementstein deutlich kleiner sind als die der Stoffe, die in der Kategorie Rb gemäß Tabelle 2-2 enthalten sein dürfen. Während Beton und Zementstein im Wesentlichen Gelporen enthalten und nur sehr geringe Anteile an Poren größer $0,1 \mu\text{m}$ (10^{-7} m) besitzen [Müller - 2018], [VDZ - 2014], sind die Poren bei Mauerwerksbaustoffen gemäß [Müller - 2018] mit hohen Anteilen an Porendurchmessern zwischen $0,1 \mu\text{m}$ (10^{-7} m) und $100 \mu\text{m}$ (10^{-4} m) deutlich größer.

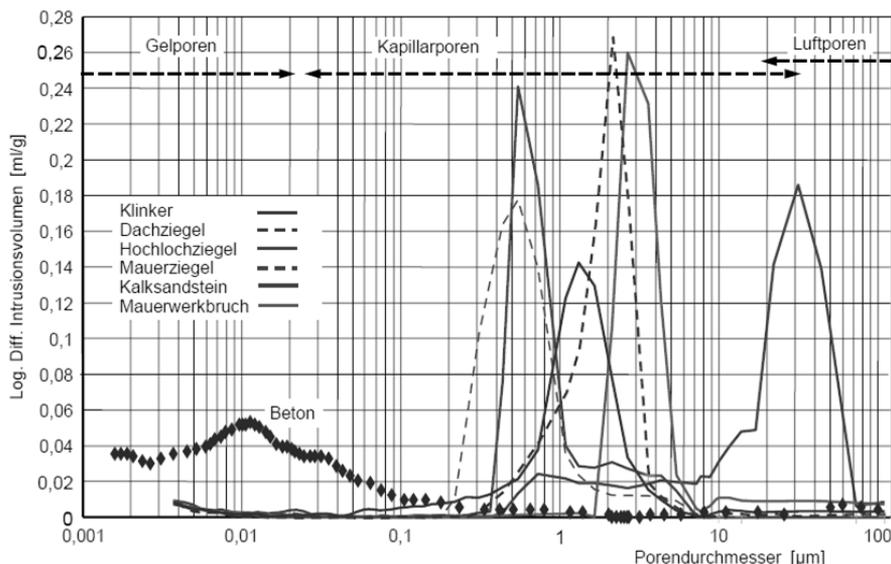


Abbildung 2-8: Porenradienverteilung verschiedener Mauerwerksbaustoffe gemäß [Müller - 2018]

Bei Betonsplitt, der aus der ursprünglichen natürlichen Primärkörnung und der daran anhaftenden alten Zementsteinmatrix besteht, ist die Porosität nicht gleichmäßig. In der etwa 40 - 50 µm dicken Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Zementstein ist sie etwa dreimal so groß wie in den Bereichen mit größerem Abstand zu den Gesteinskörnern [Ungricht - 2004]. Der Zementstein selbst besitzt, wie bereits in Abbildung 2-8 veranschaulicht, Gelporen, Kapillarporen und Verdichtungsporen. Poren bis 0,05 µm Größe sind, gemäß [Ungricht - 2004], nur geringfügig größer als das Wassermolekül selbst (0,28 nm), weshalb das Wasser in diesen engen Poren im Wesentlichen stark physikalisch an die Porenwände gebunden wird, was den Wassertransport hemmt.

Innerhalb der Stofffraktion Rb in rezyklierter Gesteinskörnung können die Porengrößenverteilungen stark variieren (vgl. Abbildung 2-8). Auch die Form der Poren von verschiedenen Mauerwerksstoffen kann sehr unterschiedlich sein. In Ziegeln sind große Anteile an Kapillarporen vorhanden, Gel- und Makroporen sind hingegen kaum existent. In Kalksteinen treten vorwiegend Kapillarporen und Luftporen auf [Müller - 2018].

Auch hinsichtlich ihrer spezifischen Oberfläche unterscheiden sich natürliche Gesteinskörnung, Betonsplitt und Mauerwerksplitt voneinander, was sich auf das Wasseraufnahmevermögen auswirken kann. In [Santos et al. - 2017] wurde natürlicher Granit, Betonsplitt und Mauerwerksplitt aus gebrannten Hochlochziegeln hinsichtlich Porosität, Oberflächenrauigkeit und spezifischer Oberfläche untersucht. Die Oberflächenrauigkeit des untersuchten Betonsplitts war vergleichbar mit der eines natürlichen Granits, wohingegen der Mauerwerksplitt eine geringere Rauheit besaß [Santos et al. - 2017]. Die spezifische Oberfläche war bei rezyklierten Gesteinskörnungen im unter-

suchten Fall 50 (Betonbruch) bzw. 227 (Mauerwerksbruch) mal höher als bei natürlichem Granit, was auf die höhere Porosität (neunmal höher bei Betonsplitt und 32mal höher bei Mauerwerksplitt) zurückgeführt wurde.

Stehen poröse Festkörper in Kontakt mit Wassermolekülen, so ergibt sich eine Wechselwirkung, die sich grundlegend unterscheidet, je nachdem ob der Kontakt zwischen Festkörper und Wasserdampf oder Festkörper und flüssigem Wasser stattfindet.

Wechselwirkungen zwischen rezyklierten Gesteinskörnungen und Luftfeuchte

In Kontakt mit Wasserdampf sind die Bestandteile rezyklierter Gesteinskörnung aufgrund ihrer porösen Struktur in der Lage Feuchtigkeit aufzunehmen. Die nachfolgenden Wechselwirkungen sind bei rezyklierten Gesteinskörnungen relevant, wenn die Lagerung nicht in geschlossenen Behältnissen, sondern z. B. auf Halden erfolgt.

Der Vorgang der Feuchteaufnahme bzw. -abgabe wird zusammenfassend als Sorption bezeichnet. Unter Adsorption wird die physikalische Bindung der Wasserteilchen an der Oberfläche verstanden, der Vorgang der Feuchtigkeitsabgabe wird als Desorption bezeichnet. Von Kapillarkondensation wird gesprochen, wenn die in Porenräumen kondensierende Flüssigkeit auf kapillarem Wege weiter transportiert wird [Weber u. Hafkesbrink - 2018].

Infolge dieser Sorptionsvorgänge stellt sich bei porigen Stoffen wie rezyklierten Gesteinskörnungen bei Kontakt mit Wasserdampf in der Luft allmählich ein Gleichgewicht zwischen Luftfeuchte und Stofffeuchte ein, das über die sogenannten Sorptionsisothermen grafisch dargestellt wird [Neroth u. Wendehorst - 2011], [Weber u. Hafkesbrink - 2018]. Wenn die Wechselwirkung zwischen feinporösen Festkörpern und Wasserdampf diskutiert wird, ist zwischen Mikroporen und Makroporen zu unterscheiden. Nur in Mikroporen ist Kapillarkondensation möglich. Die Grenze zwischen diesen beiden Porenarten liegt bei $0,1 \mu\text{m}$ [Klopfer - 1974]. Wassermoleküle neigen aufgrund ihrer Polarität dazu, sich in größeren Einheiten zusammen zu lagern und besitzen selbst einen Durchmesser von ca. $0,28 \text{ nm}$ [Klopfer - 1974]. Dies führt dazu, dass in kleinen Poren kein Transport der Wassermoleküle stattfinden kann, da die Bindungskräfte der Wassermoleküle an die Oberfläche zu stark sind. Nur in Poren $> 0,1 \mu\text{m}$, bei denen aufgrund des Abstands zur Porenoberfläche die physikalischen Bindungskräfte abnehmen, können freie Wassermoleküle auftreten und sich bewegen.

Steigt die Luftfeuchte auf 100 %, so weisen poröse Stoffe wie beispielsweise Zementmörtel keinen eindeutigen Wassergehalt auf, sondern die Sorptionsisotherme nähert sich asymptotisch an eine Parallele zur Ordinate an, die die 100 % relative Luftfeuchte repräsentiert. Dies bedeutet, dass ein poröser Stoff wie Zementmörtel eine Vielzahl möglicher Wassergehalte besitzt, die alle jeweils einen Gleichgewichtszustand bei 100 % Luftfeuchte repräsentieren. Bedingt wird dies dadurch, dass flüssiges Wasser stets im Gleichgewicht mit 100 % Luftfeuchte steht. Sobald in den Poren des Zementmörtels flüssiges Wasser in ungebundener Form vorliegt, ist ein Gleichgewicht mit 100 % relativer Luftfeuchte hergestellt, unabhängig davon, ob die Poren vollständig oder nur teilweise mit Wasser gefüllt sind [Klopfer - 1974].

Je feuchter die umgebende Luft und je kleiner die Poren, desto eher tritt eine Wasserfüllung von Poren ohne direkten Kontakt mit flüssigem Wasser ein [Klopfer - 1974]. Ursache ist, dass Kapillarkondensation nur bei Mikroporen stattfindet, deren Größe

Kapitel 2: Randbedingungen Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen

zwischen $0,0002 \mu\text{m}$ und $0,1 \mu\text{m}$ liegt. Ziegelhaltiges Material (Ziegelstein, Hochlochziegel etc.) nimmt trotz hoher Luftfeuchten sehr wenig Wasser auf, obwohl es sehr viel Porenraum enthält. Dies wird dadurch bedingt, dass die Porendurchmesser im Bereich von ca. $0,1 \mu\text{m}$ liegen und somit keine Wasseraufnahme über Kapillarkondensation erfolgen kann. Bei längerer Unterwasserlagerung besitzt das Material hingegen das Potenzial, freies Porenwasser in die Porenräume aufzunehmen [Klopfer - 1974].

Wechselwirkung zwischen rezyklierter Gesteinskörnung und reinem flüssigem Wasser

Stehen rezyklierte Gesteinskörnungen in Kontakt mit flüssigem Wasser, so können sie in Folge der Kapillarität flüssiges Wasser aufnehmen und transportieren [Weber u. Hafkesbrink - 2018]. Der Kapillartransport wird durch die physikalischen Eigenschaften der Oberflächenspannung des Wassers und der Benetzbarkeit der Oberfläche durch Wasser (Randwinkel) bestimmt. Kapillartransport ist nur im Bereich von Porenradien zwischen $0,05 \mu\text{m}$ und $1000 \mu\text{m}$ möglich. Darunter werden die Poren durch Kapillarkondensation gefüllt, darüber ist der Kapillardruck zu gering [58]. Eine gerichtete Bewegung der Flüssigkeit infolge der Kapillarkräfte ist möglich, wenn sich ein Tropfen Flüssigkeit auf einer gekrümmten Oberfläche befindet. Die Energie des Tropfens wächst mit der Krümmung, Die Tropfen werden deshalb von Bereichen mit hoher Krümmung (Kanten und Spitzen) abgestoßen [Popov - 2009]. Befindet sich eine Flüssigkeit in einem Spalt mit veränderlicher Spaltenbreite, so wandert sie unter Wirkung der Kapillarkräfte in Richtung der kleinen Kapillardurchmesser [Popov - 2009].

Bei gut benetzbaren Stoffen wie den betrachteten Baustoffen in rezyklierter Gesteinskörnung hängt die Steighöhe des Wassers in den Kapillaren im Wesentlichen vom Radius der Poren ab und ist umso größer, je enger die Kapillare ist [Klopfer - 1974].

Je nach Höhe des durchschnittlichen Wassergehalts werden gemäß [Weber u. Hafkesbrink - 2018] schematisch sechs Stufen der Wassereinlagerung unterschieden. Unter sehr trockenen Bedingungen werden die eindringenden Wassermoleküle an der inneren Oberfläche der Poren angelagert und physikalisch gebunden. Sobald diese Porenwände mit einer oder mehreren Molekülschichten benetzt sind, nimmt die physikalische Bindungsenergie ab und Wassermoleküle können durch den Porenraum diffundieren. Bei stark veränderlichen Porendurchmessern und steigendem Wassergehalt sind zunächst die Porenengpässe mit flüssigem Wasser gefüllt, wohingegen in den Poren selbst noch Luft und Wasserdampf eingeschlossen ist. Die durch Sorption an die Poren gebundene Wasserschicht kann durch Oberflächendiffusion Wasser transportieren. Mit steigendem Wassergehalt bildet sich in den engen Porenkanälen eine laminare Strömung nach dem Gesetz von Darcy aus, wohingegen in den Poren selbst nach wie vor Luft und Wasserdampf eingeschlossen sind. Letztes Stadium ist eine vollständige Wasserfüllung, die durch laminare Strömung Wasser transportieren kann [Klopfer - 1974].

Die Kapillare Wasseraufnahme erfolgt vor allem über die gröberen Kapillarporen [Ungricht - 2004]. Durch Kapillarsog wandert das Wasser von den Poren größerer Durchmesser zu den Poren mit geringerem Durchmesser. Auf diese Weise findet eine Umverteilung der Feuchte statt [Weber u. Hafkesbrink - 2018]. Die Geschwindigkeit und die maximale Steighöhe des Wassers unterscheidet sich materialspezifisch, in Abhän-

gigkeit von den Porengrößen [Weber u. Hafkesbrink - 2018]. Der Einsatz sehr feinporiger Materialien (Sauggeschwindigkeit geht gegen null) oder sehr grobporiger Materialien (Saughöhe geht gegen Null) kann die kapillare Wasseraufnahme einschränken [Weber u. Hafkesbrink - 2018].

Bei Atmosphärendruck werden nicht alle Poren eines Feststoffs mit Wasser gefüllt. Bei der Bewertung des Porenvolumens in Bezug auf die Feuchteaufnahme ist es deshalb von Bedeutung, zwischen scheinbarem und tatsächlichem Porenvolumen zu unterscheiden. Die Porigkeit, die sich aus der Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck ergibt wird als scheinbare Porosität bezeichnet. Nur bei einer Behandlung im Vakuum und anschließender Beaufschlagung mit Wasserdruck kann die tatsächliche Porosität ermittelt werden [Neroth u. Wendehorst - 2011]. Zur Bestimmung der Gesamtporosität und der Porenradialverteilung von porösen Baustoffen wird üblicherweise die Methode der Quecksilberdruckporosimetrie angewendet. Hier wird die nicht benetzende Flüssigkeit Quecksilber, welche nur unter Druck in Poren eindringen kann in poröse Stoffe eingepresst. Es ergibt sich eine druckabhängige Menge an eingepresstem Quecksilber über die auf das jeweilige Porenvolumen und den zugehörigen Porenradius geschlossen werden kann. Ziegel besitzt nach [Weber u. Hafkesbrink - 2018] ein tatsächliches Porenvolumen von 29 %, allerdings sind lediglich 19 % Kapillarporen enthalten, die das scheinbare Porenvolumen darstellen.

Die Anfangsfeuchtigkeit und der Feuchtegradient haben einen starken Einfluss auf das Saugverhalten. Bei hoher Luftfeuchtigkeit bzw. hohem Wassergehalt hängt die Saugfähigkeit vom Porenvolumen ab, das noch nicht durch Kapillarkondensation mit Wasser gefüllt ist [Ungricht - 2004]. Ein hoher Anteil an kleinen Poren $< 0,1 \mu\text{m}$ führt zu einem großen Einfluss der Umgebungsfeuchtigkeit, denn bei feinporigen Gefügen nimmt der Wasseraufnahmekoeffizient mit zunehmender Anfangsfeuchte ab [Ungricht - 2004]. Bei eher grobporigen Gefügen hat die Anfangsfeuchtigkeit keinen bzw. einen eher positiven Einfluss, da die Oberflächenspannung in den vorbenetzten Poren größer ist [Ungricht - 2004].

2.2.2.5 Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnungen

Rezyklierte Gesteinskörnungen aus Betonsplitt besitzen gemäß [Djerbi Tegguer - 2012] bei gleicher Korngröße eine höhere Wasseraufnahme als natürliche Gesteinskörnungen, was auf den anhaftenden Zementstein zurückgeführt wird, der zu längeren Kapillarporen und zu einer größeren Anzahl derselben führt. Die Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnungen steigt gemäß [Djerbi Tegguer - 2012] ebenfalls mit kleiner werdendem Größtkorn, da bei kleineren Gesteinskörnungen aus Betonsplitt der Anteil an Zementstein größer ist. In [Angulo et al. - 2010] wurde die Wasseraufnahme von gemischten rezyklierten Gesteinskörnungen in Abhängigkeit von der Porosität für verschiedene Zeitpunkte bis hin zur maximalen Wasseraufnahme analysiert. Dabei konnte festgestellt werden, dass in Abhängigkeit von der die Gesamtporosität die Wasseraufnahme zunimmt.

Die Wasseraufnahme von allen rezyklierten Gesteinskörnungen, ermittelt nach [DIN EN 1097-6], ist, verglichen mit natürlichen Gesteinskörnungen, erwartungsgemäß größer. Zu diesem Ergebnis führt die Auswertung von Lieferkörnungen natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnungen aus eigenen Versuchen, sowie aus den Datensätzen

Kapitel 2: Randbedingungen Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen

von [Bonzel u. Dahms - 1978], die in Abbildung 2-9 und Abbildung 2-10 dargestellt ist. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Gehalt von Material der Fraktion Rb, die Wasseraufnahme sowohl nach zehn Minuten als auch nach 24 Stunden steigt. Auch wird deutlich, dass rezyklierte Gesteinskörnungen, die gemäß ihrer stofflichen Zusammensetzung demselben Liefertyp (1 oder 2) entsprechen, deutliche Unterschiede hinsichtlich ihres Wasseraufnahmevermögens aufweisen können. Unter allen ausgewerteten Lieferkörnungen des Typs 1 betrug die geringste Wasseraufnahme innerhalb von 24 Stunden lediglich 1,52 M.-% ihrer Trockenmasse, die höchste Wasseraufnahme 11,5 M.-%.

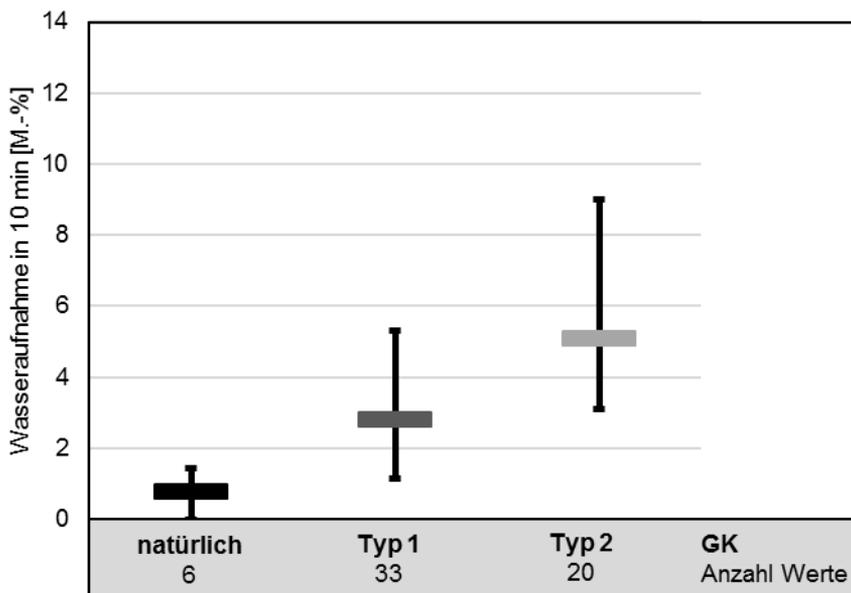


Abbildung 2-9: Wasseraufnahme Gesteinskörnungen in zehn Minuten von 59 Lieferkörnungen mit Daten zu WA_{10} aus Anhang A (eigene Ergebnisse und Literaturdaten)

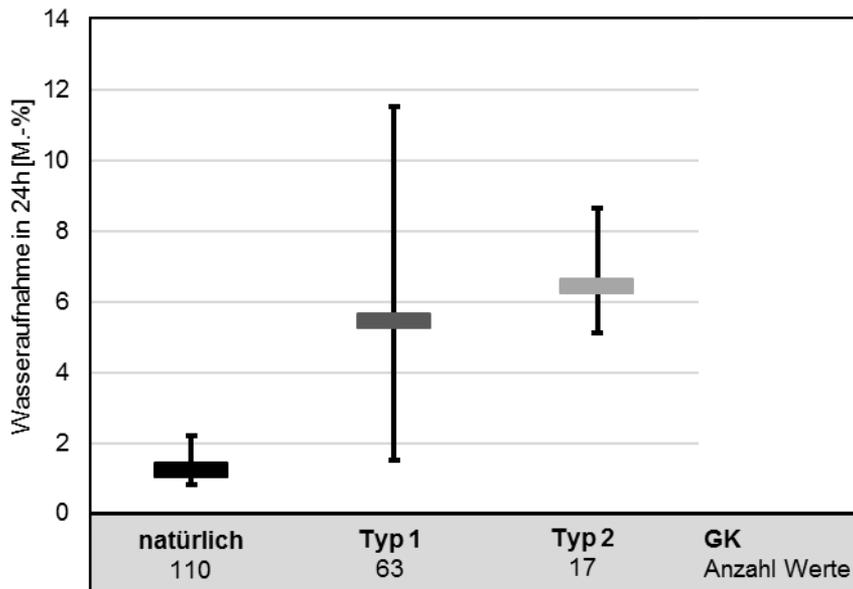


Abbildung 2-10: Wasseraufnahme Gesteinskörnungen in 24 Stunden von 190 Lieferkörnungen mit Daten zu WA_{24h} aus Anhang A (eigene Ergebnisse und Literaturdaten)

Der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme ist von besonderem Interesse, um in der Betonherstellung die Wasseraufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung ausgleichen zu können. Die Wasseraufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung erfolgt in zwei Phasen. Zuerst findet eine schnelle Aufnahme durch die oberflächennahen großen Poren statt. Anschließend läuft eine viel langsamere Aufnahme durch die tiefer liegenden, kleineren Poren ab. Der Übergang von Phase 1 auf Phase 2 erfolgt für alle groben Gesteinskörnungen nach etwa fünf Minuten [Eckert u. Oliveira - 2017]. Lagert man rezyklierte Gesteinskörnung unter Wasser, so ist die Wasseraufnahme während der ersten 15 Minuten am Größten. Hier werden nach [Bendimerad et al. - 2015] etwa 80 % des für eine vollständige Sättigung erforderlichen Wassers aufgenommen, nach [Montero u. Laserna - 2017] sind es sogar 90 %. Anschließend erfolgt eine viel langsamere Aufnahme bei der die restlichen 10 % bis 20 % des Wassers innerhalb 24 Stunden absorbiert werden [Montero u. Laserna - 2017]. Natürliche Gesteinskörnung nimmt diesen Anteil vom gesamt aufnehmbaren Wasser erst nach vier Stunden auf [Bendimerad et al. - 2015]. Die Versuchsergebnisse in Abbildung 2-11 zeigen das Verhältnis zwischen der Wasseraufnahme innerhalb der ersten zehn Minuten und der 24 Stunden-Wasseraufnahme. Sie bestätigen grundsätzlich die Erkenntnisse aus der Literatur [Bendimerad et al. - 2015] und zeigen, dass mit steigendem Anteil an Kalksandstein- oder Ziegelsplitt die Geschwindigkeit der Wasserabsorption im Pyknometerversuch nach [DIN EN 1097-6] zunimmt. Rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 1 nahm innerhalb der ersten zehn Minuten im Durchschnitt bereits 74 % der 24-Stunden-Wassermenge auf, Gesteinskörnung des Typs 2 nahm unter gleichen Randbedingungen im Mittel 78 %, reiner Ziegelbruch 84 % auf.

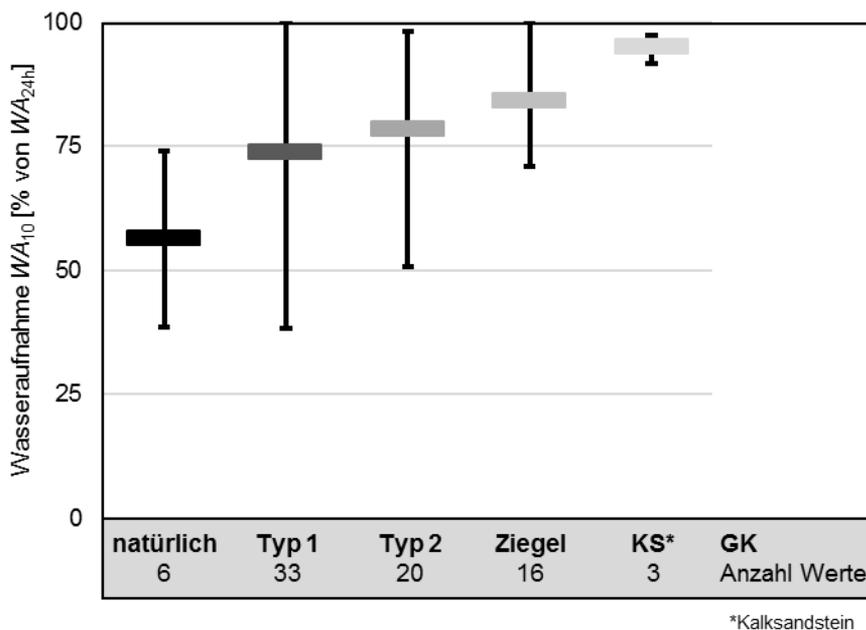


Abbildung 2-11: Wasseraufnahme in zehn Minuten, bezogen auf WA_{24h} von 59 Lieferkörnungen mit Daten zu WA_{10} und WA_{24h} aus Anhang A (eigene Ergebnisse und Literaturdaten)

Wasseraufnahmeverhalten der Gesteinskörnungen für die Laborversuche

Für die praktischen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wurden Gesteinskörnungen ausgewählt, die jeweils etwa im mittleren Bereich der Wasseraufnahme liegen, die für den jeweiligen Typ zu erwarten ist. Als grobe Gesteinskörnungen wurden ein natürlicher Rheinkies sowie ein natürlicher Splitt (Mikrodiorit) und rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 aus reinem Betonsplitt bzw. Typ 2 als Laborgemisch aus 30 M.-% Ziegelbruch und 70 M.-% Betonsplitt ausgewählt. Eingesetzt wurden alle Gesteinskörnungen als Lieferkörnung 2/16 mm, welche hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilung angeglichen waren.

An diesen ausgewählten Gesteinskörnungen, wurden jeweils zu den Zeitpunkten 5 min, 10 min, 20 min, 60 min, 90 min, 180 min und 24 h Pyknometerversuche zur Ermittlung der zeitabhängigen Wasseraufnahme durchgeführt. Die Versuche dienten als Vorbereitung für die Untersuchungen an Beton und Mörtel und sollten exemplarisch für die verwendeten vier Gesteinskörnungsarten das Saugverhalten in Kontakt mit Wasser zeigen.

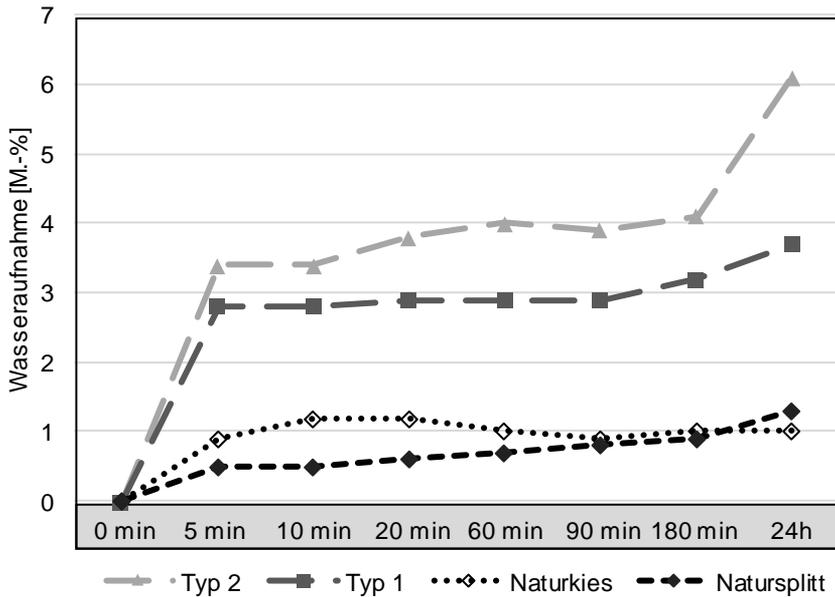


Abbildung 2-12: Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme an den ausgewählten Laborgesteinskörnungen für die Versuche dieser Arbeit in den ersten 180 Minuten (oben) und weiter im Zeitraum bis 24 Stunden (unten)

Der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahmen in Abbildung 2-12 verdeutlicht nochmals das bereits diskutierte Ergebnis, dass die zweite, deutlich langsamer verlaufende Phase der Wasseraufnahme bei rezyklierten Gesteinskörnungen etwa fünf Minuten nach dem ersten Wasserkontakt beginnt. Außerdem zeigt die Unstetigkeit der Kurvenverläufe, dass die Ergebnisse des Pyknometerverfahrens großen Streuungen unterliegen. Selbst bei Prüfung durch dieselbe, erfahrene Person und die Prüfung von in diesem Fall jeweils vier Teilproben aus einer repräsentativen Gesteinskörnungsprobe, unterliegen die Ergebnisse für die Wasseraufnahme verfahrensbedingten Streuungen.

Eine weitere Versuchsreihe sollte zeigen, ob rezyklierte Gesteinskörnung nach 24 stündiger Wasserlagerung bereits die gesamte aufnehmbare Wassermenge gesaugt hat oder ob sie ihre Sättigungsfeuchte erst nach längerer Zeit erreicht. Hierzu wurden Pyknometerversuche durchgeführt bei der rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 jeweils nach 24, 48 und 72 Stunden sowie nach einer Woche (168 Stunden) Wasserlagerung per Unterwasserwägung beobachtet wurde. In einem abgeschlossenen Pyknometer wurde der Wasserfüllstand jeweils zu den Beobachtungszeitpunkten bis auf ein festgelegtes Maß aufgefüllt und durch Wägung der aufgefüllten Wassermenge dokumentiert, wieviel Wasser in der Zwischenzeit von der Gesteinskörnung aufgenommen worden war. In Abbildung 2-13 ist jeweils der Anteil des bis zu diesem Zeitpunkt aufgenommenen Wassers über die Zeit aufgetragen. Als gesamt aufzunehmendes Wasser wurde der Wert nach einer Woche Wasserlagerung angenommen, denn danach konnte keine weitere Wasseraufnahme festgestellt werden.

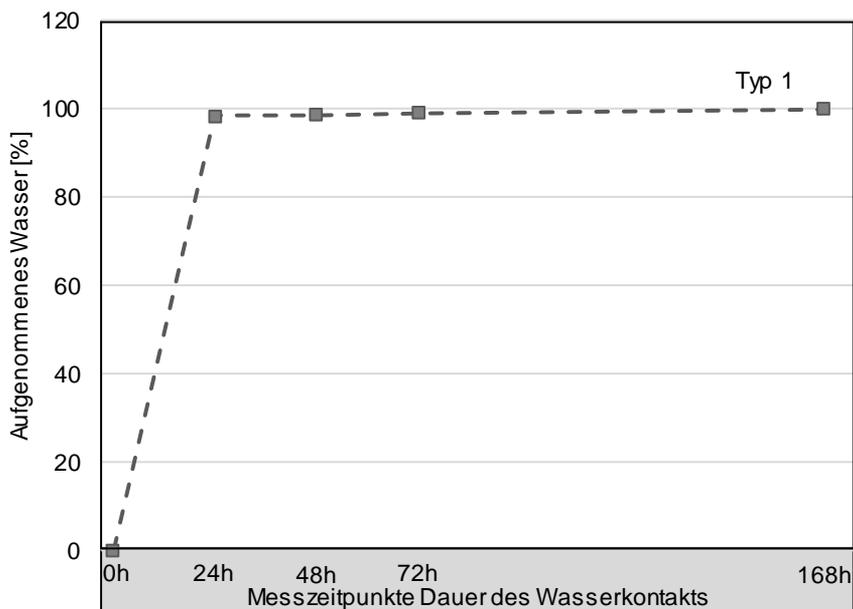


Abbildung 2-13: Anteil des aufgenommenen Wassers in % über die Zeit

Nach 24 Stunden sind im Mittel 98,2 % des nach einer Woche aufgenommenen Wassers aufgesaugt. Mengenmäßig wurden also bei einer Gesamtsumme von 135,8 g nur 2,8 g Wasser nach den ersten 24 Stunden absorbiert. Diese geringen Mengen können vernachlässigt werden, so dass eine Wasserlagerung über 24 Stunden hinaus auch bei Betonsplitt nicht notwendig ist, um eine wassergesättigte Gesteinskörnung zu erhalten.

2.2.2.6 Korndruckfestigkeit

Die Kornfestigkeit der betrachteten Gesteinskörnungen wurde in Anlehnung an das für leichte Gesteinskörnungen in [DIN EN 13055] genormte Verfahren 1, gemäß Anhang A der Norm bzw. an das in [DIN 4226-2] beschriebene identische Verfahren bestimmt. Eine vorbereitete Probe der Gesteinskörnung wird hierbei in einen definierten Stahlzylinder eingefüllt, durch Rütteln verdichtet und anschließend mit einem Druckstempel um eine vorgegebene Höhe im Zylinder zusammengedrückt. Die hierfür erforderliche Kraft wird gemessen und als Kornfestigkeit angegeben. Die Gesteinskörnungen wurden zur Vorbereitung der durchgeführten Versuche einander angeglichen. Hierzu wurden gemäß der [DIN EN 13055] Unter- und Überkorn abgesiebt, zusätzlich wurde die Kornform angeglichen, indem alle plattigen und nicht kubischen Körner aussortiert wurden. Weiterhin wurde die Korngrößenverteilung der Messproben jeweils an die Ideal-Sieblinie nach Fuller angeglichen. Untersucht wurden Gesteinskörnungen der Lieferkörnungen 2/8 mm, 2/16 mm und 8/16 mm. Die Messwerte sind als Druckwert in kN angegeben und, ergänzt mit Daten aus der Literatur, in Abbildung 2-14 dargestellt.

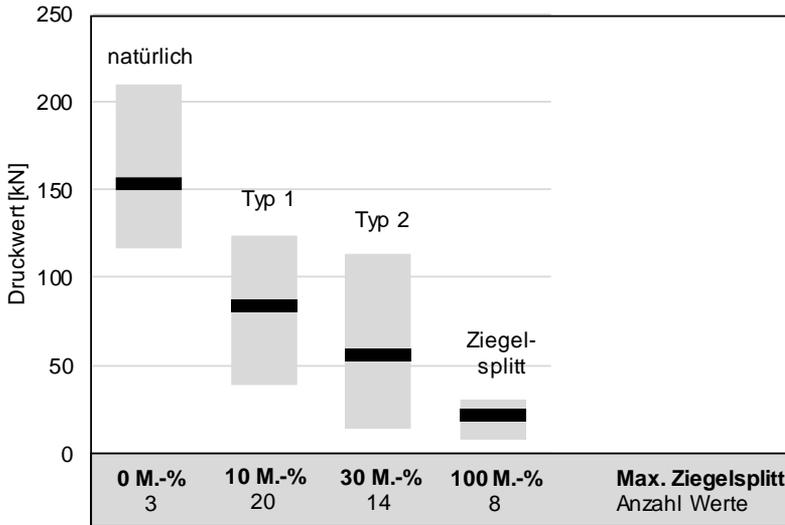


Abbildung 2-14: Druckwerte aus eigenen Versuchen und [Müller - 2001]

Die Auswertung der Druckwerte für natürliche und rezyklierte Gesteinskörnungen zeigt, dass die Korndruckfestigkeit bei den untersuchten natürlichen Kiesen und Splitten am höchsten ist und bei den rezyklierten Gesteinskörnungen mit steigendem Anteil an Ziegelsplitt abnimmt. Die Druckwerte weisen eine zu erwartende große Streubreite auf. Die Streubreite bei den natürlichen Gesteinskörnungen, die sich einerseits aus den Unterschieden in der Petrografie und andererseits aus dem Unterschied zwischen Kies und Splitt hinsichtlich der Kornfestigkeit ergibt, ist dabei ähnlich groß wie die Streubreite der ausgewerteten rezyklierten Gesteinskörnungen des Typs 1.

Wie Abbildung 2-15 zeigt, steigt der Druckwert zwar tendenziell mit steigender Kornrohddichte. Die für rezyklierte Gesteinskörnung in Beton geforderte Mindestrohddichte von $2,0 \text{ kg/dm}^3$ kann jedoch anhand der Ergebnisse nicht als Kriterium zur Gewährleistung einer bestimmten Mindest-Kornfestigkeit angesehen werden, da auch oberhalb einer Kornrohddichte von $2,0 \text{ kg/dm}^3$ rezyklierte Gesteinskörnungen Typ 2 ähnlich geringe Druckwerte aufwiesen wie die reinen Ziegelsplitt mit Kornrohddichten $< 2,0 \text{ kg/dm}^3$.

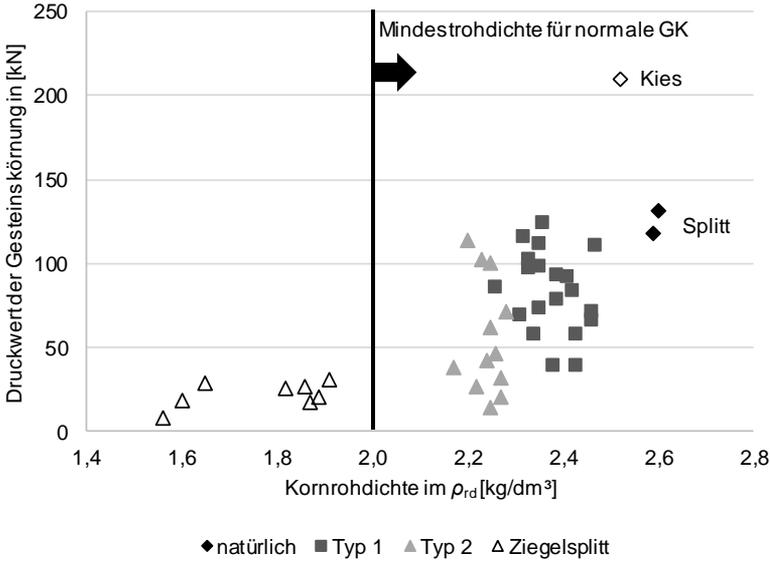


Abbildung 2-15: Zusammenhang zwischen Trockenrohichte und Druckwert

2.2.2.7 Schüttdichte

Zur Untersuchung der Schüttdichte wurden die Proben wie in 2.2.2.6 beschrieben vorbereitet und gemäß DIN EN1097-3 geprüft. Hier war wie bei Rohdichte, Wasseraufnahme und Kornfestigkeit eine Abhängigkeit vom Anteil der Fraktion Rb (Ziegel und/oder Kalksandstein) zu erkennen. Die Ergebnisse aus Labor- und Literaturwerten sind in Abbildung 2-16 dargestellt.

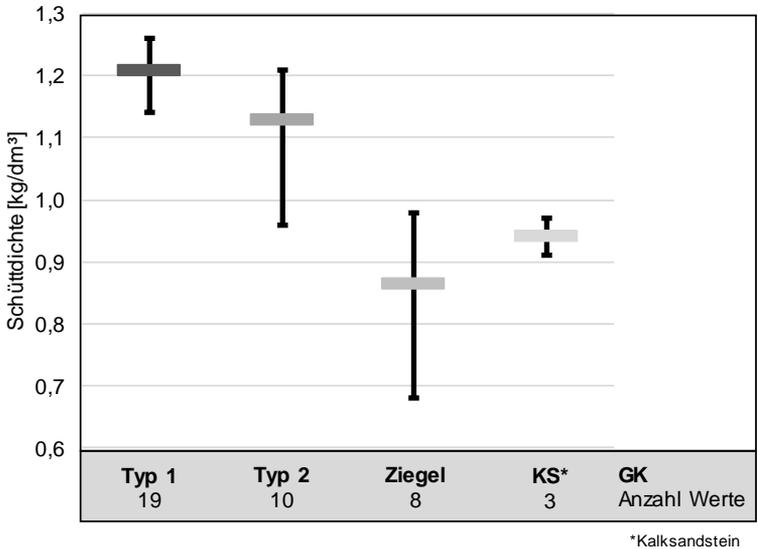


Abbildung 2-16: Schüttdichte von rezyklierten Gesteinskörnungen

2.2.3 Einfache und schnelle Abschätzung der Eigenschaften von rezyklierter Gesteinskörnung in der Praxis

Die Prüfverfahren zur Ermittlung der Kornrohichte und Wasseraufnahme sowie zur Abschätzung der Korndruckfestigkeit erfordern sowohl hohen zeitlichen Aufwand als auch vorhandene Prüfgeräte und Laborpersonal. Da aus den vorhergehenden Auswertungen und aus der Literatur [Müller - 2001] ein Zusammenhang zwischen den genannten Eigenschaften zu vermuten ist, soll in dieser Arbeit diskutiert werden, ob es möglich ist, über Zusammenhänge zwischen den Gesteinskörnungseigenschaften den notwendigen Prüfumfang für die Charakterisierung zu minimieren.

In Abbildung 2-17 ist trotz gleichen Feuchtezustands bei den Prüfungen (ofentrocken) kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Schüttdichte und der Kornrohichte erkennbar (in Übereinstimmung mit den Ergebnissen in [Rühl - 2001]). Ein tendenzieller Zusammenhang wird zwar aus dem Diagramm deutlich, allerdings ist die Schüttdichte im Unterschied zur Kornrohichte zusätzlich stark abhängig von der Kornform [Rühl - 2001].

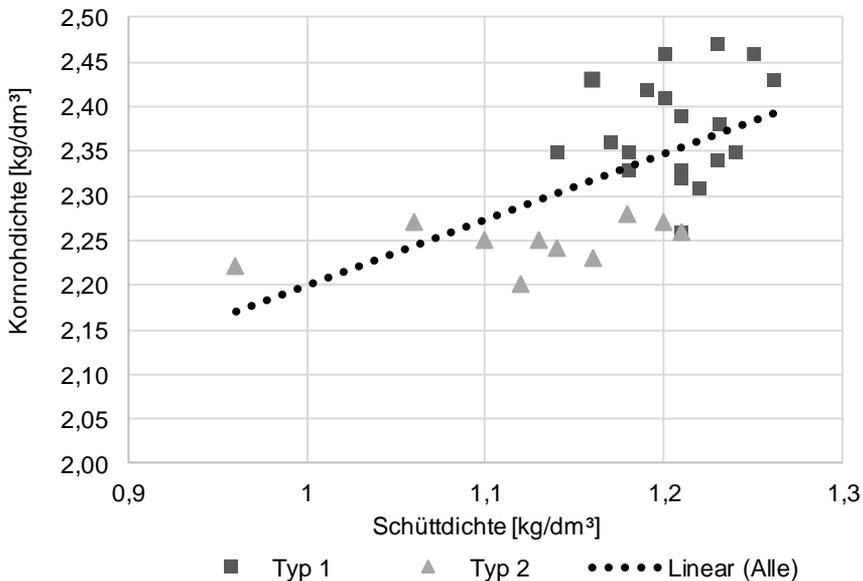


Abbildung 2-17: Zusammenhang zwischen Kornrohichte und Schüttdichte

Auch zwischen der Wasseraufnahme in 24 Stunden und der Schüttdichte ist kein Zusammenhang festzustellen (vgl. Abbildung 2-18). Eine gesicherte Ableitung der Eigenschaften Kornrohichte und Wasseraufnahme aus einer vorliegenden Schüttdichte ist somit nicht möglich.

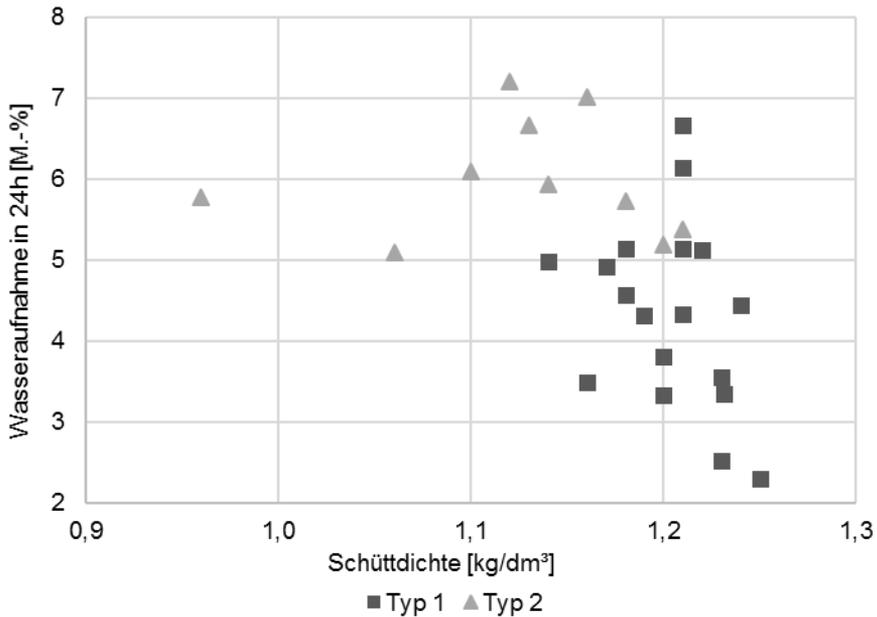


Abbildung 2-18: Zusammenhang zwischen der Wasseraufnahme in 24 h und der Schüttdichte

Ein unmittelbarer Zusammenhang besteht dagegen zwischen den Eigenschaften Kornrohichte und Wasseraufnahme. Abbildung 2-19 zeigt dabei die Auswertung des Zusammenhangs zwischen der Kornrohichte und der Wasseraufnahme in 24 Stunden. Wie mit den Ergebnissen aus Kapitel 2.2.2.5 gezeigt, kann durch eine Prüfung der Kornrohichte im ofentrockenen Zustand auf die Wasseraufnahme in 24 Stunden mit einem mehr als 91%igen Bestimmtheitsmaß geschlossen werden. Da diese Prüfung lediglich 10 Minuten erfordert, wäre/ist diese Methode eine Möglichkeit, den notwendigen Prüfumfang für die Charakterisierung zu minimieren.

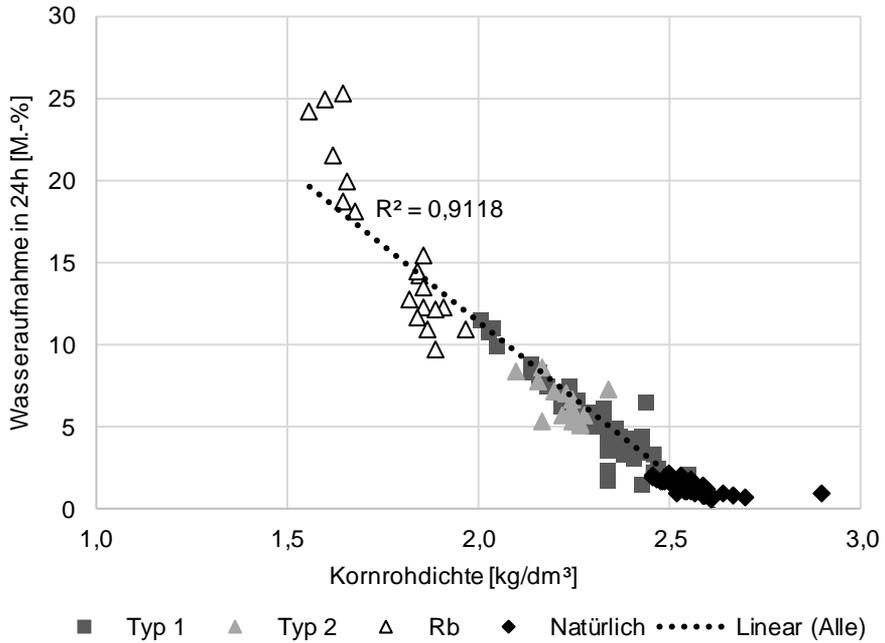


Abbildung 2-19: Zusammenhang zwischen der Wasseraufnahme in 24 h und der Kornrohdichte

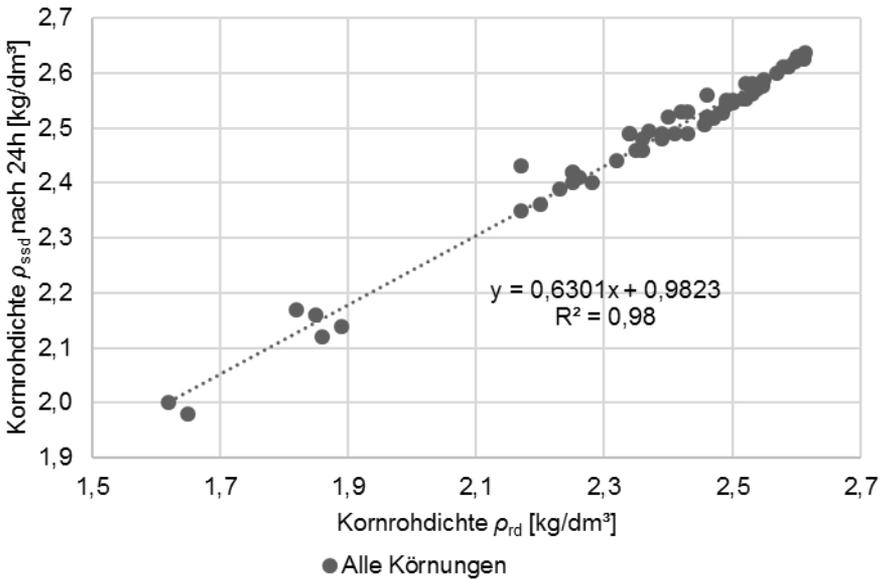


Abbildung 2-20: Zusammenhang zwischen der Kornrohdichte im trockenen und 24 h wasser-gesättigten Zustand aller untersuchten Gesteinskörnungsvarianten

Kapitel 2: Randbedingungen Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen

Wie aus Abbildung 2-20 hervorgeht, besteht zudem ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Kornrohddichte im ofentrockenen und im wassergesättigten Zustand, unabhängig von der Art der Gesteinskörnung (natürlicher Kies, natürlicher Splitt, Betonbruch, rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1, Typ 2, reiner Ziegelbruch). Somit erscheint es möglich, die Änderung der Rohddichte bei bekanntem Wassergehalt für jeden Feuchtezustand zu interpolieren.

Die Beziehung zwischen Rohddichte und Wasseraufnahme der Gesteinskörnung wurde in einer gesonderten Versuchsreihe näher untersucht. Für die Praxis könnte die Nutzung eines bestehenden funktionalen Zusammenhangs bedeuten, dass die Wasseraufnahme und Rohddichte der zu verwendenden Gesteinskörnung nur einmalig zu bestimmen wären. Zusammen mit dem unmittelbar vor dem Betonieren ermittelten Feuchtegehalt könnte dann die zugehörige Rohddichte in jedem beliebigen Feuchtezustand ermittelt und berücksichtigt werden.

Üblicherweise wird die Wasseraufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung gemäß den Vorgaben in [Rili BREZ] nach zehn Minuten bestimmt. Mit der nachfolgend beschriebenen Versuchsreihe wurde untersucht, ob die zu diesem Zeitpunkt aus dem Pyknometerversuch nach [DIN EN 1097-6] ermittelten Kennwerte ausreichen, um bei bekanntem Feuchtegehalt stets die zugehörige Rohddichte im feuchten Zustand zu berechnen.

Eine Ermittlung der Wasseraufnahme zu verschiedenen Zeitpunkten (gemäß [Rili BREZ] und [DIN EN 1097-6] für normale Gesteinskörnung) unterliegt aufgrund der stets neu angesetzten Probe einer starken Prüfstreuung. Um die Beziehung zwischen der Wasseraufnahme/ Feuchte und der zugehörigen Kornrohddichte besser beurteilen zu können, wurden die Untersuchungen zusätzlich zu den Standardprüfungen für normale Gesteinskörnung auch entsprechend der Prüfvorschrift für leichte Gesteinskörnungen in [DIN EN 1097-6] durchgeführt. Im Verfahren für leichte Gesteinskörnungen, deren Rohddichte ebenfalls wie bei rezyklierten Gesteinskörnungen stark mit dem Feuchtezustand veränderlich ist, wird ein Prüfsatz von zwei Pyknometern mit trockener Gesteinskörnung befüllt und der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme beobachtet (vgl. Abbildung 2-21). Nach 24 Stunden wird zunächst die Rohddichte im wassergesättigten und oberflächentrockenen Zustand errechnet. Anschließend wird die hierfür gewogene Probenmenge rückgetrocknet, um die zugehörige Rohddichte auf ofentrockener Basis zu ermitteln.

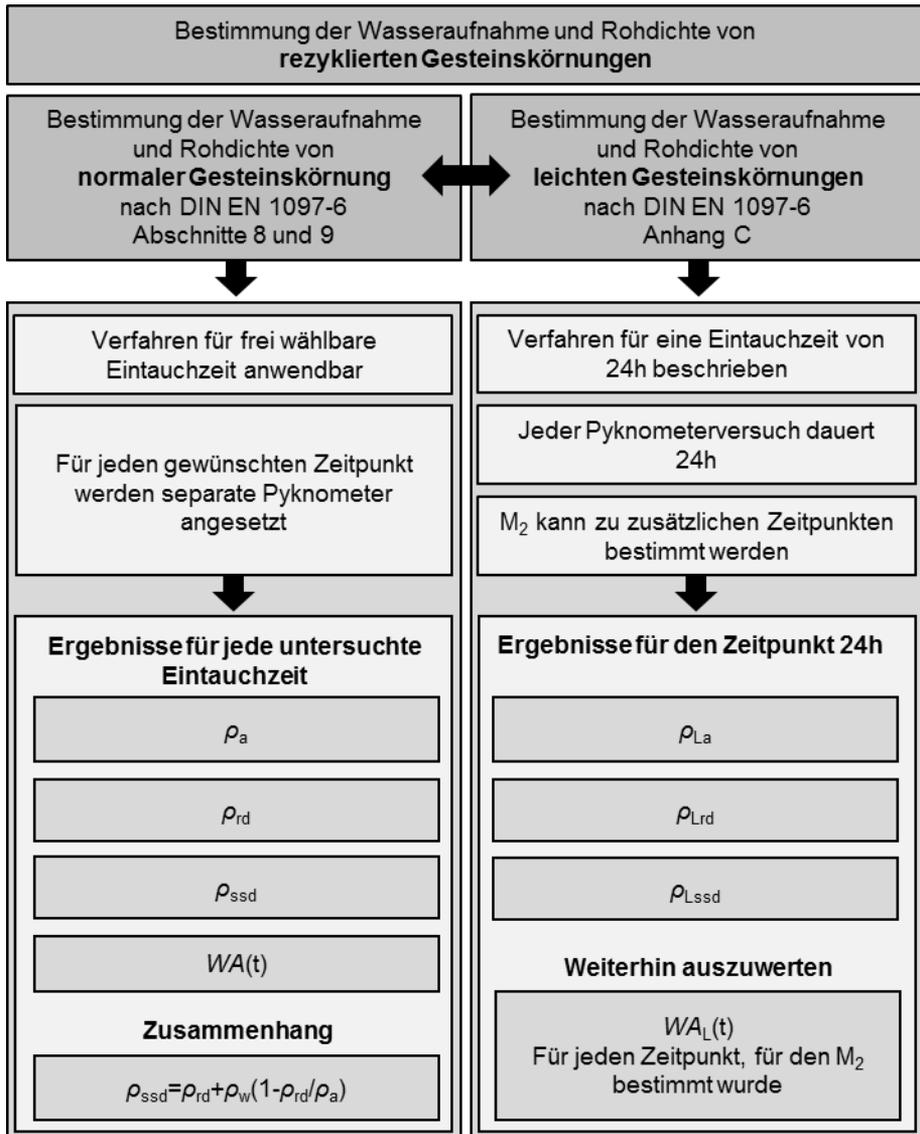


Abbildung 2-21: Vergleich der Prüfvorschriften und Messgrößen

Für zwei Varianten natürlicher Referenzgesteinskörnung (Rheinkies und gebrochener Mikrodiorit) sowie rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 aus reinem Betonsplitt und Typ 2 aus 70 M.-% Betonsplitt und 30 M.-% Ziegelsplitt der Lieferkörnungen 2/16 mm wurden Wasseraufnahmen und Rohdichten sowohl nach dem Verfahren für normale als auch nach dem Verfahren für leichte Gesteinskörnung ermittelt (siehe Abbildung 2-21). Die Untersuchungen wurden bei beiden Verfahren an je drei Pyknometern parallel durchgeführt.

In Abbildung 2-22 ist die Wasseraufnahme der vier verschiedenen untersuchten Gesteinskörnungen in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt (ermittelt gemäß der Prüfvorschrift für leichte Gesteinskörnungen). Verglichen mit den Messwerten, die anhand der

Kapitel 2: Randbedingungen Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen

Prüfvorschrift für normale Gesteinskörnungen ermittelt wurden (Abbildung 2-23), könnte angenommen werden, dass die ermittelten Wasseraufnahmen nicht gleichmäßig sein könnte. Diese Beobachtung muss jedoch durch die Verfahrensbedingungen relativiert werden. Die un stetigen Kurven in Abbildung 2-23 sind auf die verfahrensbedingt große Anzahl an Einzelproben zurückzuführen, da nach Prüfvorschrift für normale Gesteinskörnung jeweils drei Pyknometer je Gesteinskörnungsart und Prüfzeitpunkt verwendet werden. Im Vergleich zwischen Abbildung 2-22 und Abbildung 2-23 ist außerdem festzustellen, dass die ermittelten Wasseraufnahmen, insbesondere bei der rezyklierten Gesteinskörnung Typ 2, ermittelt mit den beiden unterschiedlichen Prüfvorschriften für normale und leichte Gesteinskörnung in [DIN EN 1097-6], voneinander abweichen. Dieser Unterschied ist ebenfalls auf die Streuung zwischen Einzelstichproben einer Liefercharge zurückzuführen.

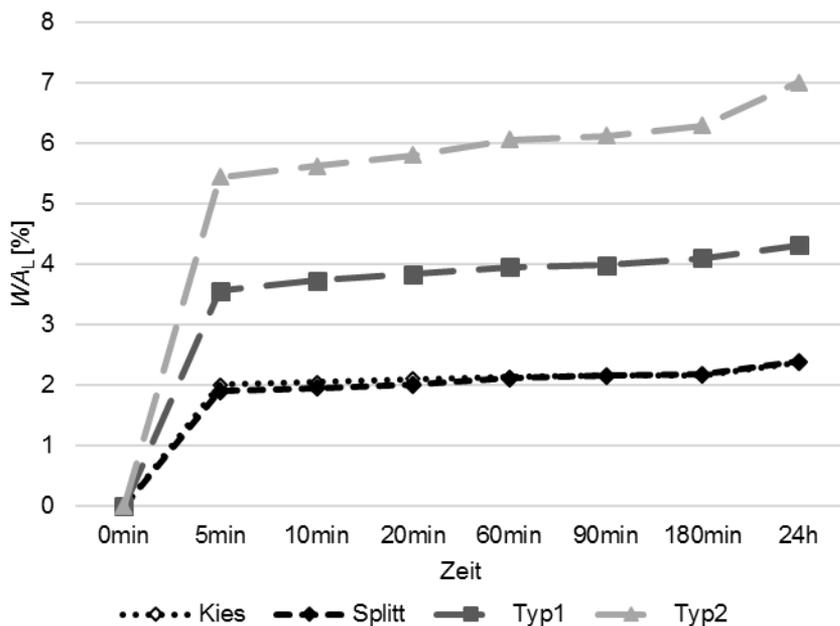


Abbildung 2-22: Wasseraufnahme von Kies, Splitt, Typ1 und Typ2 mit der Zeit (Prüfvorschrift für leichte Gesteinskörnungen)

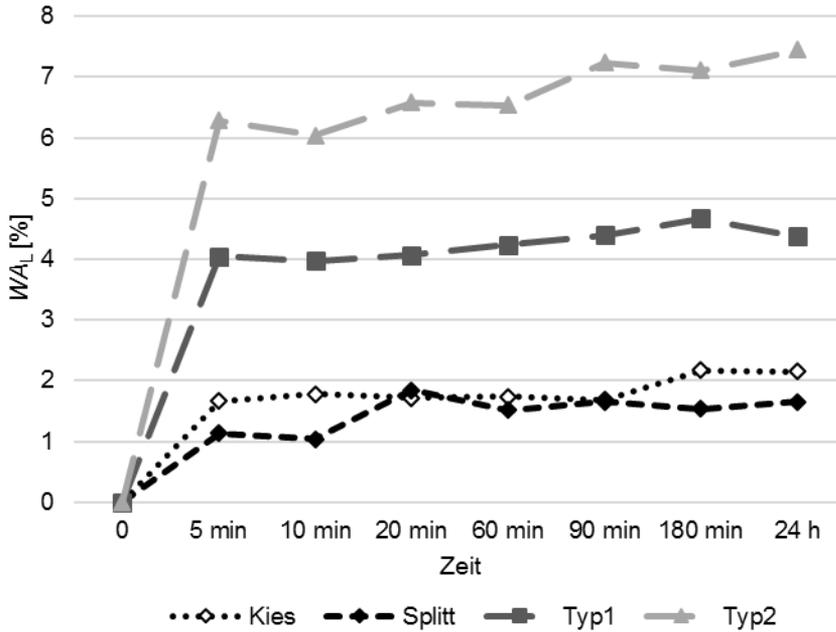


Abbildung 2-23: Wasseraufnahme von Kies, Splitt, Typ1 und Typ2 mit der Zeit (Prüfvorschrift für normale Gesteinskörnungen)

Die Rohdichte auf ofentrockener Basis ist allgemein bekannt eine konstante Größe, während die Rohdichte in feuchtem Zustand mit steigender Wasseraufnahme veränderlich ist.

In der Prüfvorschrift für leichte Gesteinskörnungen in [DIN EN 1097-6] Anhang C werden die Dichten ausschließlich für den Zeitpunkt nach 24 Stunden berechnet, da die Pyknometer entgegen dem Verfahren für Gesteinskörnungen mit dichtem Gefüge ausschließlich nach 24 Stunden geleert werden und somit die Masse der oberflächentrockenen und wassergesättigten Gesteinskörnung (M_1) nur für diesen Zeitpunkt bestimmt wird. Für die in der Versuchsreihe gewählten Zwischenzeiten (5, 10, 20, 60, 90, 180 Minuten und 24 Stunden) wurde die Masse M_2 als Masse des Pyknometers mit Schliffaufsatz, Messprobe und Wasser bei konstantem Wasserstand, ermittelt und die Wasseraufnahme wie folgt berechnet.

$$WA_{Lt} = WA_{L24} - 100 \cdot \frac{(M_2(24h) - M_2(t))}{M_s} \quad (2-1)$$

Um den Zusammenhang zwischen Wasseraufnahme und Rohdichte bezogen auf die Zeit beurteilen zu können, wurde die mit der Wasseraufnahme veränderliche Rohdichte ρ_{Lssd} in Anlehnung an Anhang H der [DIN EN 1097-6] für jeden Zeitpunkt berechnet. Diese Berechnung basiert auf der konstanten Dichte ρ_{Lrd} und der veränderlichen Wasseraufnahme zu den untersuchten Zeitpunkten. [DIN EN 1097-6] Anhang H definiert den Zusammenhang der beiden Dichten (Formel (2-2)).

$$\rho_{Lssd} = \rho_{Lrd} \cdot \left(1 + \frac{WA_L}{100}\right) \quad (2-2)$$

Ziel der Untersuchungen war es, die Berechnungsformel (2-2) auch für rezyklierte Gesteinskörnungen zu bestätigen. Nachfolgend ist die Überprüfung der berechneten Werte durch die aus den Versuchen ermittelten Rohdichten dokumentiert.

Überprüfung 1: Stimmen die mit Formel (2-2) ermittelte Rohdichte $\rho_{LSSd, 24h}$ und die nach DIN EN 1097-6 Anhang C im Versuch ermittelte Rohdichte überein?

Zunächst wurde überprüft, inwieweit die berechneten Ergebnisse für die Rohdichte im feuchten Zustand gemäß Formel (2-2) mit dem im Versuch entsprechend Anhang C für leichte Gesteinskörnungen ermittelten Wert nach 24 Stunden übereinstimmen. Wie Abbildung 2-24 zeigt, ist das Bestimmtheitsmaß der Formel (2-2) bei 100%.

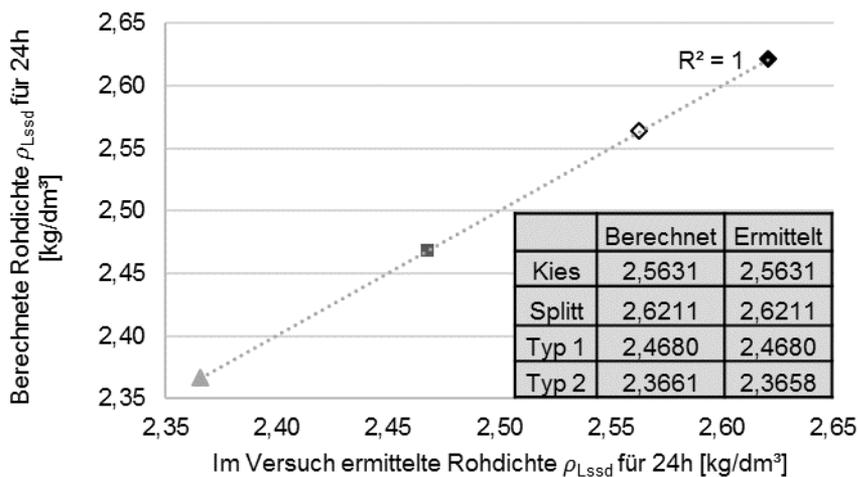


Abbildung 2-24: Überprüfung berechnete und ermittelte Rohdichte nach 24h

Überprüfung 2: Liefert Formel (2-2) zu den Zwischenzeitpunkten Rohdichten auf feuchter Basis, die im Versuch zu reproduzieren sind?

Für Gesteinskörnung mit festem Gefüge wird nach [DIN EN 1097-6] Kapitel 8 und 9 für jeden Zeitpunkt M_1 als Masse der oberflächentrockenen und wassergesättigten Gesteinskörnung bestimmt, da für jeden Zeitpunkt separate Pyknometer angesetzt werden. Daher ist es möglich die Rohdichte ρ_{SSd} und ρ_{rd} zu einem früheren, frei wählbaren Zeitpunkt als 24 Stunden zu bestimmen. Beurteilt werden soll, ob die Ergebnisse eines einzelnen Versuchs gemäß den Vorschriften für normale Gesteinskörnung es zulassen, für jeden beliebigen Eigenfeuchtegehalt der rezyklierten Gesteinskörnung über Formel (2-2) später die zugehörige Kornrohichte mit hinreichender Sicherheit rechnerisch zu ermitteln. Die durchgeführten Versuchsreihen nach Kapitel 8 und 9 der [DIN EN 1097-6] liefern somit die nachfolgend als „wahr“ angenommenen Werte der Dichte ρ_{SSd} , welche mit den Ergebnissen der Berechnung aus Anhang H der [DIN EN 1097-6] auf Basis von ρ_{rd} und der Wasseraufnahme verglichen wurden.

Kapitel 2: Randbedingungen Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen

Zunächst wurden die nach Anhang C zur [DIN EN 1097-6] ermittelten Massen dazu verwendet, gemäß der Formel in Anhang H der [DIN EN 1097-6] zu jeder berechneten Wasseraufnahme eine zugehörige Rohdichte auf feuchter Basis ermitteln. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2-25 dargestellt.

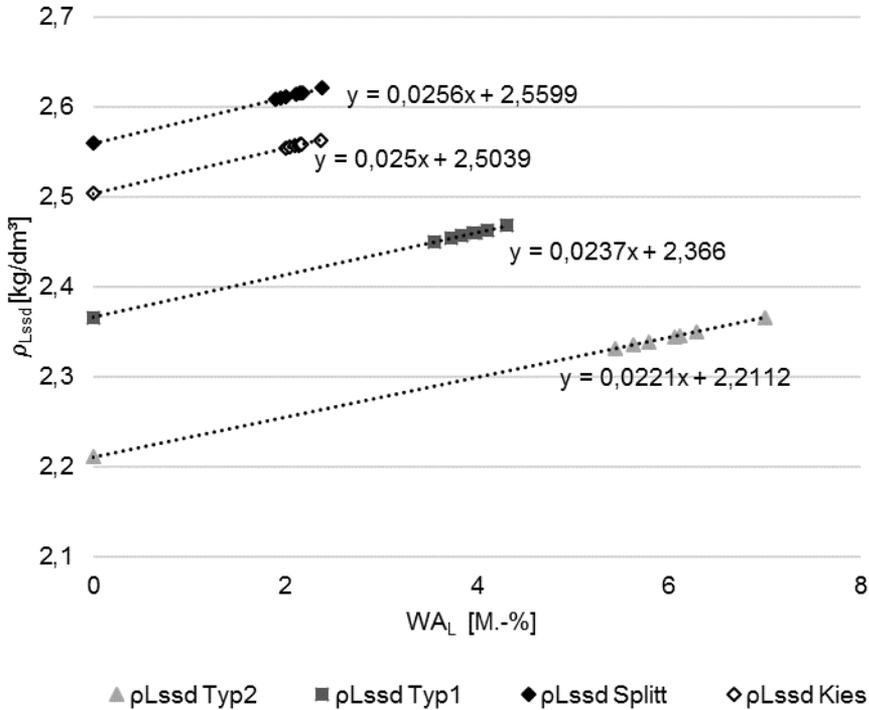


Abbildung 2-25: Rohdichten von Kies, Splitt, Typ1 und Typ2 in Abhängigkeit von der Wasseraufnahme, ermittelt nach Anhang C für leichte Gesteinskörnung

Die so berechneten Wertepaare aus Wasseraufnahme und zugehöriger *ssd*-Rohdichte wurden in Abbildung 2-26 den in den Versuchen gemäß Kapitel 8 und 9 der [DIN EN 1097-6] ermittelten Wasseraufnahmen und zugehörigen *ssd*-Rohdichten gegenübergestellt.

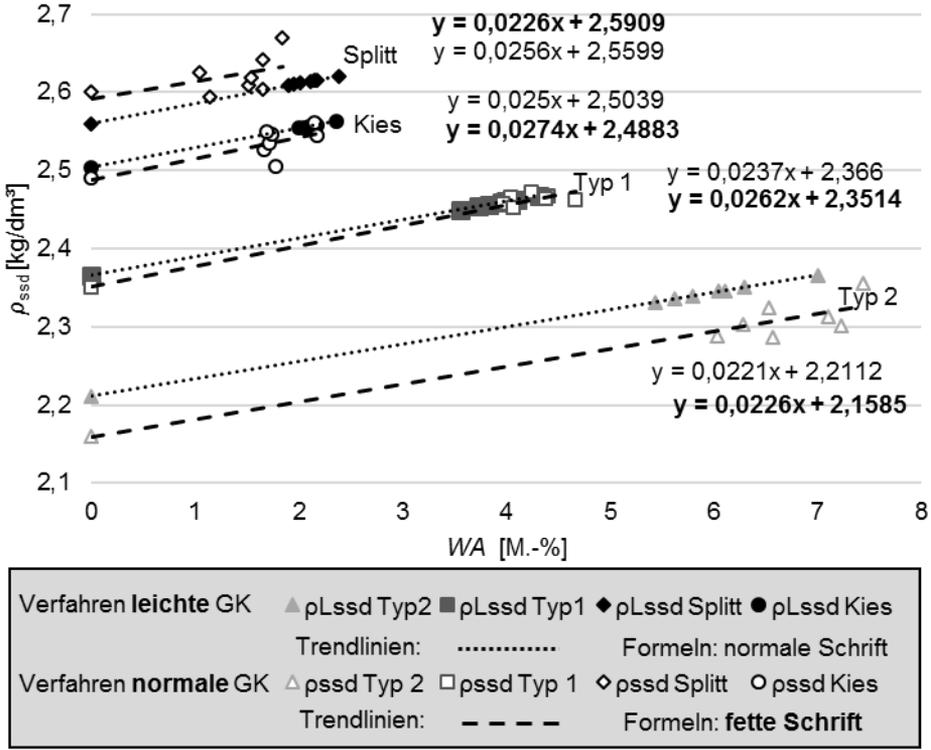


Abbildung 2-26: Vergleich der nach Anhang C der [DIN EN 1097-6] berechneten und der im Versuch nach Kapitel 8 und 9 ermittelten Werte für die Rohdichten im feuchten Zustand

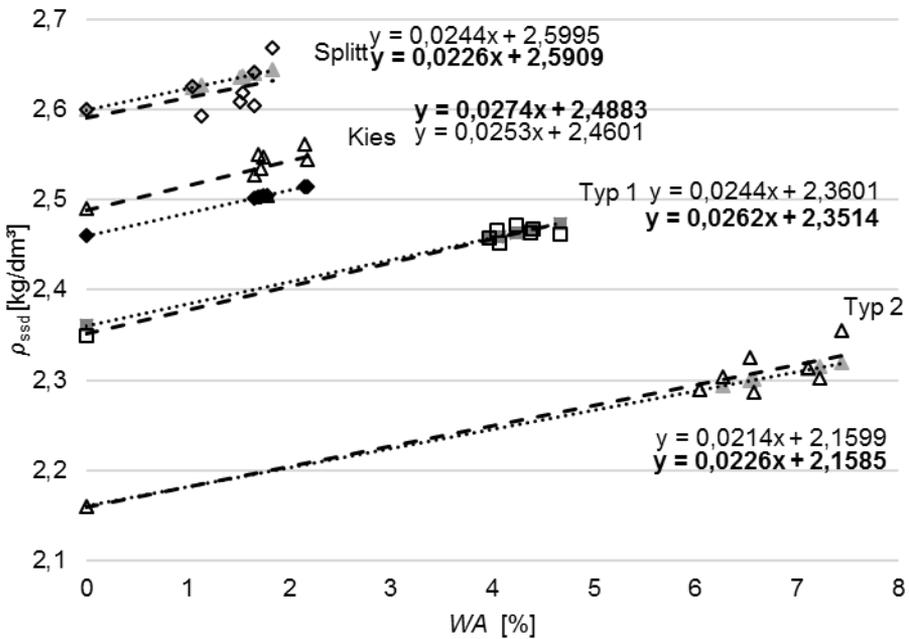
Es wird deutlich, dass die anhand der Einzelmessungen ermittelten Werte eine Regressionsgerade (fett gedruckte Formel in Abbildung 2-26) besitzen, die näherungsweise dieselbe Steigung aufweist wie die Gerade, welche die ssd-Rohdichten darstellt, die gemäß Berechnungsformel (2-2) nach Anhang H berechnet wurden. Lediglich für die untersuchte natürliche Splittkörnung führen die gemessenen ssd-Rohdichten zu einer Regressionsgeraden mit deutlich größerer Steigung. Bei den rezyklierten Gesteinskörnungen Typ 1 und Typ 2 sowie bei dem untersuchten natürlichen Kies lagen auch die gemessenen Rohdichten in einer ähnlichen Größenordnung wie der zur jeweiligen Wasseraufnahme rechnerisch bestimmte Wert. Als Folge der Versuche wird geschlossen, dass Formel (2-2) und die Versuche nach Kapitel 8 und 9 der [DIN EN 1097-6] denselben funktionellen Zusammenhang zwischen Wasseraufnahme und Rohdichte ergeben.

Abschließend soll beurteilt werden, mit welcher Bestimmtheit es möglich ist, über die Berechnungsformel (2-2) zu jedem Feuchtegehalt der Gesteinskörnung über Pyknometerversuche zu einem einzigen Prüfzeitpunkt die zugehörige Rohdichte zu berechnen. Um dies zu überprüfen, werden die Messwerte herangezogen, welche nach den Kapiteln 8 und 9 für Gesteinskörnung mit dichtem Gefüge ermittelt wurden.

Es wurde in den Auswertungen betrachtet, mit welcher Genauigkeit aus den im Pyknometerversuch nach 5, 10 bzw. 20 Minuten jeweils bei bekanntem Feuchtegehalt der

Gesteinskörnung die zugehörige ρ_{ssd} -Rohdichte aus Formel (2-2) berechnet werden kann. Bei den untersuchten rezyklierten Gesteinskörnungen lag das Bestimmtheitsmaß der berechneten Werte bei mindestens 0,99. Dabei zeigten die Versuchsergebnisse, dass mit steigender Saugzeit/Versuchslänge die Rohdichten überschätzt werden. Es wurde aus diesem Grund festgelegt, den Pyknometerversuch mit einer Saugzeit von zehn Minuten für präzise Rohdichteabschätzungen durchzuführen.

Werden die im Pyknometerversuch gemäß Kapitel 8 und 9 der [DIN EN 1097-6] gewonnenen Ergebnisse für die Rohdichte im ofentrockenen Zustand ρ_{rd} und die Wasseraufnahme und Rohdichte im feuchten Zustand nach zehn Minuten $\rho_{ssd(10\text{ min})}$ dazu verwendet, um über Formel (2-2) ρ_{ssd} -Rohdichten für bekannte Eigenfeuchtegehalte der Gesteinskörnungen zu berechnen, so liefert diese Vorgehensweise Werte, die im untersuchten Fall für rezyklierte Gesteinskörnungen zu 99,7 % bis 100 % mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen (siehe Abbildung 2-27). Somit wird folgende Vorgehensweise gemäß Abbildung 2-28 zum Zwecke einer praxisingerechten Schnellcharakterisierung und korrekten Dosierung von rezyklierten Gesteinskörnungen vorgeschlagen.



Berechnet aus 1 Versuch WA ₁₀	▲ Typ 2	■ Typ 1	◆ Splitt	▲ Kies
	Trendlinien: - · - · - · -		Formeln: normale Schrift	
Ergebnisse Einzelversuche WA _{5, 10, 20, 60, 90, 180, 24h}	△ Typ 2	◇ Splitt	△ Kies	□ Typ 1
	Trendlinien: - - - - -		Formeln: fette Schrift	

Abbildung 2-27: Vergleich zwischen den in Einzelversuchen nach Kapitel 8 und 9 der [DIN EN 1097-6] ermittelten Wertepaare mit den gemäß Formel (2-2) auf Basis der Messwerte eines einzelnen Prüfzeitpunkts (10 min) berechneten Wertepaare.

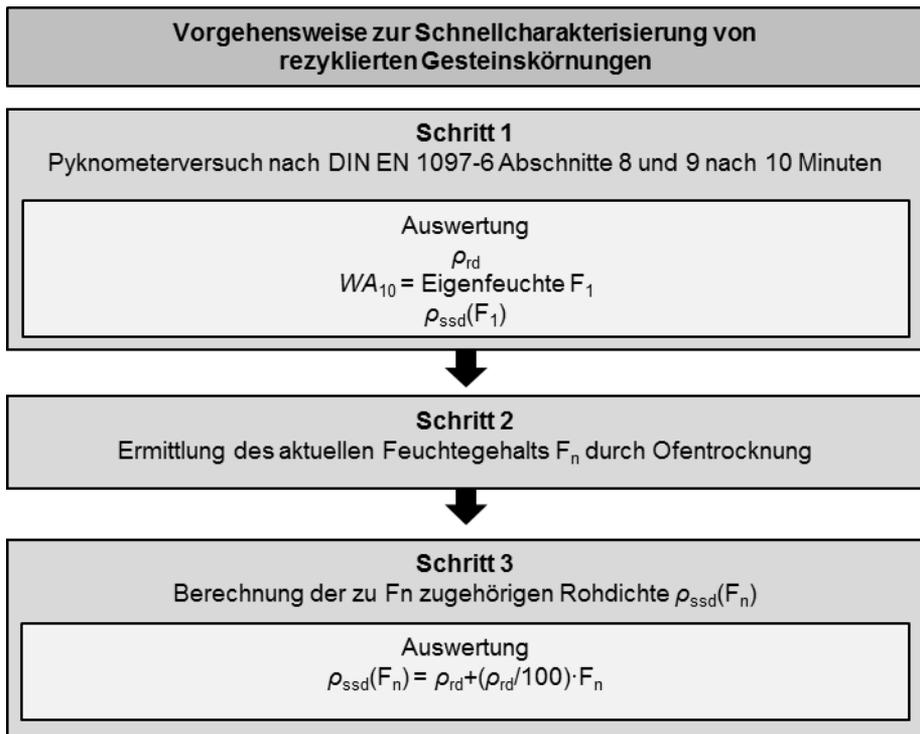


Abbildung 2-28: Zu validierende Vorgehensweise bei der Schnellcharakterisierung von rezyklierten Gesteinskörnung

Anhand weiterer charakterisierter Gesteinskörnungschargen, bei denen die ausgesprochene Empfehlung, die in Abbildung 2-28 schematisch dargestellt ist, überprüft. Das Bestimmtheitsmaß der berechneten ρ_{ssd} -Rohdichten lag, verglichen mit den Versuchsergebnissen, im Mittel bei 1,0. Die tatsächliche Rohdichte wurde um maximal 3,7 % unterschätzt und um 5,4 % überschätzt. In den Vergleich einbezogen wurden insgesamt 55 in Versuchen ermittelte ρ_{ssd} -Rohdichten, die an 13 unterschiedlichen Lieferkörnungen und Lieferchargen zu verschiedenen Zeitpunkten ermittelt wurden.

Auf Basis der Ergebnisse des Pyknometerversuchs nach zehn Minuten wurden für alle an dieser Gesteinskörnung zusätzlich ermittelten Wasseraufnahmen die zugehörigen ρ_{ssd} -Rohdichten mit Formel (2-2) berechnet und den aus den Versuchen ermittelten Prüfergebnissen gegenübergestellt. Die Ergebnisse dieses Tests werden exemplarisch mit einer ausgewerteten Probe in Tabelle 2-5 dargestellt.

Tabelle 2-5: Exemplarische Überprüfung für Probe 2 gemäß Anhang A.3 (Typ 1 2/16)

Zeitpunkt		5 min	10 min	20 min	60 min	90 min	180 min	24 h
Versuche	WA	4,05	3,97	4,07	4,24	4,40	4,67	4,38
	ρ_{rd} [kg/dm ³]	2,37	2,36	2,36	2,37	2,36	2,35	2,36
	ρ_{ssd} [kg/dm ³]	2,47	2,46	2,45	2,47	2,47	2,46	2,46
Be- rech- nung	ρ_{ssd} [kg/dm ³]	2,46	2,46	2,46	2,46	2,47	2,47	2,47

2.2.4 Fazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die Eigenschaften von rezyklierten Gesteinskörnungen von denen der natürlichen Gesteinskörnung unterscheiden. Die Kornrohddichte ist geringer als bei den praxisüblichen natürlichen Gesteinskörnungen und ändert sich mit dem Feuchtezustand. Die Wasseraufnahme ist größer und kann nicht wie bei natürlichen Gesteinskörnungen vernachlässigt werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Streubreite der Eigenschaften, die sich aus mehreren Lieferchargen eines einzelnen Aufbereitungswerks ergeben, nicht größer ist als bei natürlichen Gesteinskörnungen. Somit sollte es möglich sein, dass durch eine gezielte Aufbereitung eine vergleichbare Gleichmäßigkeit des Massenstroms gewährleistet werden kann, wie es die Transportbetonwerke für natürliche Gesteinskörnungen kennen.

Die Extrapolation der Wasseraufnahme nach 24 Stunden, sowie der ρ_{ssd} -Rohddichte zu jedem beliebigen Eigenfeuchtegehalt einer rezyklierten Gesteinskörnung anhand der Ergebnisse des Pyknometerversuchs (Rohddichte im ofentrockenen Zustand und Wasseraufnahme) nach DIN 1097-6 nach zehn Minuten ist möglich, sodass es genügt, diesen Versuch durchzuführen, um die Gesteinskörnung hinsichtlich ihrer Rohddichte und des Wasseraufnahmevermögens zu beurteilen. Soll das zeitliche Wasseraufnahmeverhalten von rezyklierter Gesteinskörnung in Laborversuchen umfassender analysiert werden, so ist zu empfehlen, das in Anhang C zu [DIN EN 1097-6] beschriebene Verfahren für leichte Gesteinskörnungen anzuwenden.

2.3 Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung

2.3.1 Regelwerke

Die Betonherstellung mit rezyklierter Gesteinskörnung ist derzeit über die Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ (Ausgabe September 2010) [Rili-BREZ] geregelt. Die Richtlinie regelt dabei den Festigkeitsbereich bis Betondruckfestigkeitsklasse C 30/37 unter Einschränkung der möglichen Expositivklassen und der höchstzulässigen Anteile der rezyklierten Gesteinskörnung ≥ 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung. Sie lässt neben der Verwendung von Betonsplitt (Typ 1) auch die Verwendung von Bauwerksplitt (Typ 2) zu. Gesteinskörnung Typ 1 muss dabei zu mindestens 90 M.-% aus Betonsplitt und Naturgestein bestehen und darf bis zu maximal 10 M.-%, Typ 2 bis zu 30 M. % Mauerwerksanteile enthalten. Beide Gesteinskörnungstypen können bis zur Festigkeitsklasse C 30/37 verwendet werden. Eine Verwendung von Brechsand < 2 mm ist ausgeschlossen. Wenn die rezyklierte Gesteinskörnung den in Kapitel 2.2.1 zusammengefassten Anforderungen der [DIN EN 12620] entspricht, ist durch [Rili-BREZ] gewährleistet, dass die Eigenschaften der Betone, die mit dieser rezyklierten Gesteinskörnung hergestellt werden, die Grenzen der Bemessungskonzepte für Normalbeton nicht verlassen.

Die hohe Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnung muss ausgeglichen werden. Wie viel zusätzliches Wasser einer Betonmischung mit rezyklierter Gesteinskörnung zugegeben werden muss, ist jedoch nicht geregelt. Die tatsächlichen Einflüsse von rezyklierter Gesteinskörnung auf die Betoneigenschaften können jedoch nur beurteilt werden, wenn gewährleistet ist, dass der Wasserzementwert gegenüber dem Zielwert und gegenüber der Referenzmischung mit natürlicher Gesteinskörnung gleich ist.

2.3.2 Grundlagen Einflussfaktoren auf die Betoneigenschaften

2.3.2.1 Allgemeines

Beton ist ein künstlicher Stein aus mindestens drei Ausgangsstoffen Zement, Wasser und Gesteinskörnung. Zusatzstoffe und Zusatzmittel können zu einem Fünfstoffsystem ergänzen [VDZ - 2002]. Der Werkstoff Beton kann in mechanischen Modellen als Zweiphasensystem betrachtet werden. Wasser und Zement bilden im flüssigen Zustand den sogenannten Zementleim als kontinuierliche, viskose Phase, die Gesteinskörnung stellt die zweite, feste, dispergierte Phase dar [Grübl et al. - 2001].

Die Eigenschaften von Frisch- und Festbeton werden durch die verwendeten Ausgangsstoffe sowie deren Eigenschaften und Volumenanteile bestimmt. Aus diesem Grund hat die planmäßige Zusammensetzung des Betons große Bedeutung. Sie zielt darauf ab, die Volumenanteile der Ausgangsstoffe möglichst so zusammenzusetzen, dass sich die Eigenschaften und Mengen der Ausgangsstoffe optimal ergänzen [VDZ - 2002].

Die Einflussgrößen auf die Betoneigenschaften können nach [Härig et al. - 1996] in drei grundlegende Kategorien unterteilt werden:

- Eigenschaften des Zementsteins
- Eigenschaften der Gesteinskörnung
- Haftverbund zwischen Gesteinskörnung und Zementstein.

Diese drei Haupteinflüsse auf das Gesamtsystem interagieren miteinander.

Im Rahmen dieser Arbeit soll geklärt werden, wie verhindert werden kann, dass die Eigenschaften der Gesteinskörnung unkontrolliert die Eigenschaften des Zementsteins beeinflussen und sich somit das Gesamtsystem auswirken. Hierzu wird in den nachfolgenden Kapiteln 3 und 4 untersucht, wie es möglich ist, bei der Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung die Eigenschaften des Zementsteins zu kontrollieren und konstant zu halten. Ziel ist es, den tatsächlichen Einfluss der Gesteinskörnung auf die Eigenschaften des Frisch- und Festbetons überprüfbar zu machen.

Die Festbetoneigenschaften werden, wie eingangs erläutert, von den drei interagierenden Einflussgrößen Zementstein, Gesteinskörnung und Haftverbund zwischen diesen beiden Phasen bestimmt. Die Gesteinskörnung, vor allem ihre Festigkeit, beeinflusst somit wesentlich die Eigenschaften des Gesamtsystems.

Der Lastabtrag in Beton wird im Allgemeinen durch das Steifigkeits- und Festigkeitsverhältnis zwischen Zementstein und Gesteinskörnung bestimmt [Grübl et al. - 2001].

Bei Normalbeton ist die Art der verwendeten Primärgesteinskörnung, abgesehen von porösen Sand- oder Kalksteinen, für die Festigkeit des Betons keine maßgebliche Einflussgröße, da deren Festigkeit und Steifigkeit in der Regel höher liegt als die der Matrix. Die Hauptdruckspannungslinien verlaufen konzentriert von Gesteinskorn zu Gesteinskorn. Durch eine Optimierung der Korngrößenverteilung wird die Packungsdichte erhöht und die Spannungskonzentrationen um die groben Körner verringert. So kann eine gleichmäßigere Kraftübertragung und ein homogeneres Betongefüge erreicht werden, was sich auf die Festigkeit positiv auswirkt [Grübl et al. - 2001].

Wenn sich die Steifigkeits- und Festigkeitsverhältnisse aufgrund der Gesteinskörnungseigenschaften so verschieben, dass die Gesteinskörnung weniger steif und fest ist als die Zementsteinmatrix (wie z. B. bei leichter und teilweise auch bei rezyklierter Gesteinskörnung), so bestimmt die Kornfestigkeit den Versagensmechanismus bei Druckbeanspruchung wesentlich mit.

Weiterhin haben die Oberfläche der Gesteinskörnung und der davon abhängige Haftverbund zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix einen hohen Einfluss auf die Festigkeit (Biege- und Spaltzugfestigkeit) des Gesamtsystems. Bei gebrochenen Gesteinskörnungen ist die Biege- und Spaltzugfestigkeit bei gleicher Druckfestigkeit ca. 10 % bis 20 % größer als bei einem vergleichbaren Kiesbeton [Scholz et al. - 1995].

Auch auf das Elastizitätsmodul des Betons hat die Gesteinskörnung großen Einfluss. Für Betone mit sehr hohen Anforderungen an das Elastizitätsmodul werden vielfach Splitte aus „Hartgestein“, also gebrochene Gesteine, mit einer hohen Kornfestigkeit und hohen Oberflächenrauigkeit eingesetzt [Springenschmid - 2007].

2.3.3 Betonherstellung mit rezyklierter Gesteinskörnung

Die Erkenntnisse zum Einfluss rezyklierter Gesteinskörnung auf die Betoneigenschaften, die in der Literatur zu finden sind, sind häufig widersprüchlich. Dies wurde bereits in [Kubissa et al. - 2015] festgestellt. Zurückzuführen sind diese widersprüchlichen Forschungsergebnisse darauf, dass sich die Versuchsbedingungen, insbesondere im Hinblick auf den Umgang mit der höheren Wasseraufnahme, bereits unter Laborbedingungen z. B. in der Art und Menge der Wasserzugabe, in den Randbedingungen der Probenvorbereitung und in den Mischabläufe, stark unterscheiden. Wieviel zusätzliches Wasser Betonzusammensetzungen mit rezyklierter Gesteinskörnung zugegeben werden muss und wann im Mischablauf die Wasseraufnahme der rezyklierten Gesteinskörnung auszugleichen ist, wird in der Literatur sehr unterschiedlich diskutiert. Während in [Eckert u. Oliveira - 2017] das zusätzliche Wasser über die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung innerhalb von fünf Minuten ermittelt wird, wird für Betone mit Gesteinskörnung der Typen 1 und 2 in [Rühl - 2001] und [Müller - 2001] die Gesamtwassermenge um das Äquivalent der Wasseraufnahme nach zehn Minuten erhöht. In [Wesche u. Schulz - 1982/83] wird das Zugabewasser um das Äquivalent der Wasseraufnahme nach 30 Minuten erhöht, in [Bendimerad et al. - 2015] wird eine Erhöhung um das Äquivalent der Wasseraufnahme nach 60 Minuten empfohlen. In [Poon et al. - 2007], [Montero u. Laserna - 2017] und [Poon et al. - 2004] wird schließlich die Berechnung des Gesamtwassers unter der Annahme vorgenommen, dass diejenige Wassermenge zusätzlich zugegeben werden muss, mit der die Gesteinskörnung den *ssd*-Zustand und somit eine vollständige Wassersättigung erreichen kann. Diesen Zustand erreicht die Gesteinskörnung im Versuch zur Ermittlung der Wasseraufnahme in 24 Stunden. In [Kubissa et al. - 2015] wird gänzlich auf eine exakte Berechnung des erforderlichen Wassers verzichtet. Hier wurde die rezyklierte Gesteinskörnung im lufttrockenen Zustand eingesetzt und so viel Wasser zusätzlich dosiert, wie erforderlich war, um die Konsistenz der Vergleichsmischung mit natürlicher Körnung zu erreichen.

Auch die Empfehlungen zum optimalen Mischablauf sind von Literaturquelle zu Literaturquelle verschieden. Einige Quellen verwenden in den Laborversuchen grundsätzlich ofentrockene Gesteinskörnung und nassen diese in einem zweistufigen Mischprozess zunächst ohne Zement vor [Eckert u. Oliveira - 2017], [Rühl - 2001], [Müller - 2001], [Wesche u. Schulz - 1982/83] und [Angulo et al. - 2010], wobei die Menge des Vornässwassers zwischen dem tatsächlichen zusätzlichen Wasser und dem Zusatzwasser plus der Hälfte des Zugabewassers stark variiert. In [Poon et al. - 2004] wird in einem Fall zwar eine Gesteinskörnung in ofentrockenem Zustand und in einem zweistufigen Mischprozess eingesetzt, jedoch verzichten die Autoren im Mischablauf auf eine Phase in der die Gesteinskörnung mit reinem Wasser in Kontakt steht, und geben den Zement bereits vor dem ersten Wasserkontakt zu. Darauf folgt eine insgesamt zwölfminütige Mischphase, die der Gesteinskörnung genügend Zeit zur Wasseraufnahme geben soll. Andere Autoren ([Poon et al. - 2004], [Montero u. Laserna - 2017], [Kubissa et al. - 2015] und [Poon et al. - 2007]) verwendeten die Gesteinskörnung in einem lufttrockenen bis wassergesättigten Zustand und berücksichtigten die Gesteinskörnungsfeuchte beim oben beschriebenen Gesamtwasser. Dabei wurde, abgesehen von [Poon et al. - 2004], auf ein zweistufiges Mischprozedere verzichtet und das gesamte Zugabewasser wie bei Normalbeton nach dem Zement zugegeben.

Verstärkt wird die Ungenauigkeit im Wassergehalt weiter, wenn nicht unter kontrollierten Laborbedingungen gearbeitet werden kann, sondern in der Praxis Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung industriell hergestellt wird. Hier ist bislang im Rahmen der Erstprüfung eine auf der sicheren Seite liegende Vorgehensweise das einzig Mögliche. In [Rühl - 2001] wurden zwei Prinzipien zur industriellen Betonherstellung mit rezyklierter Gesteinskörnung anhand von Praxisprojekten dokumentiert, die deutlich machen, dass bislang Streuungen und gewisse Unsicherheiten in Bezug auf den Wasserhaushalt toleriert werden müssen. Auch Rühl [Rühl - 2001] hielt als Ergebnis der Untersuchungen fest, dass beide Prinzipien zwar praktikabel, jedoch jeweils mit Vor- und Nachteilen behaftet seien. Beim **Prinzip der „Betonherstellung mit konstantem Wassergehalt“** wurde, ungeachtet der schwankenden Gesteinskörnungsfeuchte, die Wasser- und Gesteinskörnungseinwaage über 461 m³ produzierten Beton einer Betonsorte konstant gehalten. Lediglich die Feuchte des Sandes wurde entsprechend der Transportbetonpraxis gemessen und bei der Dosierung berücksichtigt. Die schwankende Kernfeuchte der rezyklierten Gesteinskörnung bewirkte eine schwankende Ausgangskonsistenz und ein variierendes Ansteifverhalten der einzelnen Chargen. Beides wurde durch nachträgliche Fließmitteldosierung auf der Baustelle ausgeglichen. Trotz der beschriebenen Vorgehensweise wurde in Bezug auf die Betondruckfestigkeiten in diesem Fall eine überraschend niedrige Standardabweichung von 4,23 N/mm² für die auf der Baustelle hergestellten Probekörper festgestellt. In einem zweiten Bauvorhaben wurde das **Prinzip der „Betonherstellung mit konstanter Frischbetonkonsistenz“** angewendet. Um das Ansteifverhalten und die Konsistenz über insgesamt 12.000 m³ hergestellten Betons weitgehend zu vereinheitlichen, wurden hier die Gesteinskörnungen vor Betonierbeginn über ein Berieselungssystem mit Wasser vorge-nässt. Die Wasserdosierung erfolgte über eine Beurteilung mit Hilfe der im Mischer installierten Kamera, sowie mit der Messung des Widerstandes an der Mischerwelle mit dem Ziel eine angestrebte Zielkonsistenz möglichst genau einzustellen. Bei dieser Vorgehensweise konnte in der Praxis ohne Feuchtemessung eine gleichbleibende Übergabekonsistenz auf der Baustelle ohne nachträgliche Fließmitteldosierung ermöglicht werden. Auch konnte die Standardabweichung der Betondruckfestigkeit gegenüber dem ersten Prinzip mit konstantem Wassergehalt verringert werden.

2.4 Schlussfolgerung 1: Forschungsbedarf für die Betonherstellung mit rezyklierter Gesteinskörnung

Rezyklierte Gesteinskörnung, die in Deutschland für die Betonherstellung verwendet werden soll, muss einem der beiden über die gültigen Regelwerke zugelassenen Typen 1 oder 2 entsprechen. Die Gesteinskörnungen besitzen im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung eine höhere Porosität, dementsprechend auch eine höhere Wasseraufnahme und eine geringere Rohdichte. Die Rohdichte ist dabei stark vom Feuchtezustand abhängig, woraus sich für die Betonherstellung eine veränderte Problematik im Vergleich zur natürlichen Gesteinskörnung ergibt. Um Abweichungen im Stoffraum zu vermeiden, muss in der Praxis die Rohdichte von rezyklierten Gesteinskörnungen stets im jeweiligen Feuchtezustand ermittelt und in der Mischungsberechnung berücksichtigt werden, um Abweichungen im Stoffraum zu vermeiden. Wird die Mischungsberechnung auf Basis der Rohdichte im ofentrockenen Zustand erstellt und eine feuchte Gesteinskörnung entsprechend dieser Mischangweisung eingewogen, so wird

Kapitel 2: Randbedingungen Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen

dies bei der üblichen massenmäßigen Dosierung im Mischer zu einer Verringerung des Stoffraums führen. Zudem würden Wassergehalt und Wassermenge erhöht, wenn die Wasserzugabe nicht an die vorhandene Gesteinsfeuchte angepasst würde. Dieses theoretische „worst case“-Szenario wird in der Praxis nicht eintreten, da in der Betonherstellung im Allgemeinen – auch bei natürlichen Gesteinskörnungen – eine mittlere Eigenfeuchte berücksichtigt wird. Diese Praxis würde die mögliche negative Veränderung des Wassermengewerts auch bei rezyklierter Gesteinskörnung real verringern. Dennoch kann durch die enormen Unterschiede zwischen den Rohdichten im ofentrockenen und im wassergesättigten Zustand ein erheblicher Fehler je nach Abweichung von der angenommenen mittleren Feuchte entstehen.

Während die Variationsbreite der Trockenrohddichte natürlicher Gesteinskörnungen, die sich aus regionalen petrografischen Unterschieden in Deutschland ergibt, ca. 2,46 kg/dm³ bis ca. 2,61 kg/dm³ beträgt, kann die Rohddichte rezyklierter Gesteinskörnung in weiteren Grenzen variieren. Das Regelwerk schreibt für rezyklierte Körnungen eine Mindestrohddichte von 2,0 kg/dm³ vor, die Rohddichte einer Praxiskörnung des Typs 1 kann jedoch durchaus bis zu 2,50 kg/dm³ betragen. Die große Spanne der möglichen Rohddichte resultiert aus unterschiedlich hohen Anteilen an porösem Ziegel oder Kalksandstein (bei Typ 1 zwischen 0 M.-% und 10 M.-% Anteil, bei Typ 2 zwischen 10 M.-% und 30 M.-%), sowie unterschiedlichen ursprünglichen Betonfestigkeitsklassen des enthaltenen Betonsplitts.

In den Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit in Kapitel 2.2.2 konnte gezeigt werden, dass es durch Steuerung in der Aufbereitung möglich ist einen Massenstrom über längere Zeit so zu liefern, dass die Streuung zwischen einzelnen Lieferchargen eines Recyclers ähnlich ist wie bei natürlicher Gesteinskörnung. Somit wäre eine ausreichende Gleichmäßigkeit gewährleistet. Auf die im Absoluten vom bekannten Naturstein abweichenden Eigenschaften muss ein Betonhersteller sich bei der Mischungsberechnung in gleicher Weise einstellen wie auf die Charakteristika der lokal verfügbaren natürlichen Körnung.

Die Porenstruktur der Hauptbestandteile Betonsplitt (Rc) und Mauerwerksplitt (Rb) und ihre jeweilige Wechselwirkung mit Wasser unterscheiden sich grundlegend. Werden die Erkenntnisse aus der Literatur auf die in Kapitel 2.2.1 vorgestellten beiden Typen rezyklierter Gesteinskörnung (Typ 1 und Typ 2), welche unterschiedlich aus diesen Hauptbestandteilen zusammengesetzt sind, übertragen, so ist ein Unterschied in der Wechselwirkung mit Wasser zu erwarten.

Rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 besteht zu mindestens 90 M.-%, in der Praxis zu meist vollständig, aus Betonbruch, wohingegen in rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 10 bis 30 M.-% Mauerwerksbaustoffe enthalten sind. Da Zementstein bzw. Betonbruch (Fraktion Rc gemäß Tabelle 2-1) nur eine deutlich geringere Anzahl an Kapillarporen mit zudem deutlich geringeren Porenradien besitzt als alle Mauerwerksbaustoffe, die der Fraktion Rb gemäß Tabelle 2-1 zugeordnet werden, ergeben sich für beide Typen Unterschiede in der Wechselwirkung mit Wasser. Je mehr Betonsplitt in der rezyklerten Gesteinskörnung enthalten ist, desto feiner sind die Porenstrukturen. Entsprechend höher ist die physikalische Bindung von Wassermolekülen an die Oberflächen. Feuchte rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 wird aufgrund des höheren Anteils an klei-

nen Poren langsamer austrocknen als feuchte rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2. Umgekehrt wird sehr trockene rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 aus feuchter Umgebungsluft mehr Wasser durch Kapillarkondensation aufnehmen als rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2. In Kontakt mit flüssigem Wasser sinkt die Sauggeschwindigkeit mit dem Porendurchmesser. Entsprechend kann rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2 aufgrund der höheren Anteile an Material Rb mit seinen größeren Poren schneller Wasser aufnehmen als rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1. Da gemäß [Ungricht - 2004] bei kleinporigen Gefügen der Wasseraufnahmekoeffizient mit zunehmender Anfangsfeuchte abnimmt, wohingegen bei grobporigen Gefügen eine vorhandene Anfangsfeuchtigkeit einen positiven Einfluss auf den Wasseraufnahmekoeffizienten besitzt, ist zu erwarten, dass bei rezyklierten Gesteinskörnungen Typ 1 variierende Eigenfeuchten zu größeren Streuungen in den wirksamen Wasserzementwerten der damit hergestellten Betone führen, da die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme mit der Eigenfeuchte variiert. Ein vermindertes Wasseraufnahmevermögen infolge von vorhandener Eigenfeuchte könnte für die Betonherstellung ein Risiko bezüglich eines ungewollt höheren wirksamen Wasserzementwerts darstellen. Rezyklierte Gesteinskörnungen Typ 2 sollten hingegen aufgrund der höheren Anteile an größeren Kapillarporen ein unvermindertes Wasseraufnahmevermögen besitzen.

Die Wasseraufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung erfolgt in zwei Phasen. In der ersten, schnellen Phase nimmt der Großteil der untersuchten Körnungen bereits 2/3 des gesamt aufnehmbaren Wassers auf. Die Erkenntnisse aus Kapitel 2.2.2.5 bestätigen, dass rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 gegenüber rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 eine verringerte Sauggeschwindigkeit besitzt. Die zweite, langsamere Phase ist nach 24 Stunden praktisch vollständig abgeschlossen.

Darüber, dass die Wasseraufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung in der Mischungsberechnung berücksichtigt und ausgeglichen werden muss, herrscht in der Literatur Konsens, die Art und Weise wie diese Kompensation und Berücksichtigung durchzuführen ist, stellt jedoch ein bislang nicht abschließend geklärtes Problem dar. Anhand der Literaturstudie in Kapitel 2.3.3 wird deutlich, warum die vorliegenden Ergebnisse aus der Literatur zum Einfluss von rezyklierter Gesteinskörnung auf die Betoneigenschaften untereinander widersprüchlich sind. Der effektive Wassergehalt im Zementleim unterscheidet sich von Literaturstelle zu Literaturstelle, wobei eine Überprüfung der theoretischen Überlegungen zum freien Wasser nie tatsächlich stattfand oder nicht mehr nachzuvollziehen ist.

Da bislang unter Laborbedingungen Beton aus rezyklierter Gesteinskörnung mit definiertem wirksamem Wasserzementwert nicht hergestellt werden kann, bietet sich auch für die industrielle Betonherstellung lediglich die Möglichkeit, auf der sicheren Seite liegende bzw. vereinfachende Annahmen zu treffen, wenn rezyklierte Gesteinskörnung eingesetzt wird. Wie in [Rühl - 2001] gezeigt, ist es möglich mit solch vereinfachenden Annahmen und Vorgehensweisen Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung herzustellen, der innerhalb der zulässigen Toleranzen einer angestrebten Festigkeitsklasse und Lieferkonsistenz liegt. Es stellt sich jedoch die Frage, ob und wie weit diese Erfahrungen auf die allgemeine Betonherstellung und alle in Kapitel 2.2. ausgewerteten Extrema von rezyklierter Gesteinskörnung übertragen werden können. Auch kann bei den geschilderten Prinzipien in [Rühl - 2001] nicht von einer Wirtschaftlichkeits- oder Qualitätsoptimierung der Betonzusammensetzungen die Rede sein. Keine der

Kapitel 2: Randbedingungen Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen

praktizierten Vorgehensweisen kam ohne erheblichen Zusatzaufwand aus, der entweder durch nachträgliche Fließmitteldosierung auf der Baustelle bei gleichzeitiger erheblicher Unsicherheit infolge von Unterschieden im wirksamen Wassergehalt oder durch die Berieselung der Gesteinskörnung zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Gesteinskörnungsfuchte entsteht. Dass es problemlos möglich ist, Betone mit rezykliertem Gesteinskörnung industriell herzustellen, die den Anforderungen an die vereinbarten Festigkeits- und Konsistenzklassen erfüllen, steht außer Frage. Jedoch kann der wirksame Wassergehalt, der zu einer weiteren Qualitätsoptimierung der Betone die entscheidende Größe wäre, bislang nicht zielsicher eingestellt werden und stellt somit eine große Unbekannte dar.

Im Rahmen dieser Arbeit soll für Betone mit rezykliertem Gesteinskörnung eine Überprüfung des wirksamen Wassergehalts durchgeführt werden, um Betone mit natürlicher und rezykliertem Gesteinskörnung, bei denen die Zusammensetzung des Zementleims und Zementsteins tatsächlich gleich ist, sicher vergleichen zu können. Dabei soll betrachtet werden, wie in einem praxisbekanntem und üblichem Mischablauf ohne Warte-/ Saugzeiten die industrielle Herstellung zielsicher möglich ist. Hierzu muss analysiert und diskutiert werden, wie sich das Wasseraufnahmeverhalten rezykliertem Gesteinskörnungen in Kontakt mit Zementleim im Mischer vom Verhalten im Pyknometerversuch unterscheidet, der im Allgemeinen als Vorversuch herangezogen wird, um das erforderliche Gesamtwasser zu errechnen.

3 Ermittlung des erforderlichen Zusatzwassers zur Gewährleistung des vorgesehenen Wasserzementwertes in R-Beton

3.1 Einleitung

Rezyklierte Gesteinskörnung besitzt durch ihre hohe Wasseraufnahme, wie in Kapitel 2 verdeutlicht, das Potenzial, den wirksamen Wasserzementwert des damit hergestellten Betons unkontrolliert zu verändern. Die Problematik ist von anderen saugenden Gesteinskörnungen in der Forschung bekannt. Auch leichte Gesteinskörnungen erschweren die zielsichere Betonherstellung aufgrund ihres Potenzials, durch Wasseraufnahme den wirksamen Wassergehalt zu verändern [Domagała - 2015]. In der vorliegenden Literatur zur Betonherstellung mit rezyklierter Gesteinskörnung existiert keine einheitliche und experimentell überprüfte Vorgehensweise, wie viel zusätzliches Wasser eine Betonzusammensetzung mit rezyklierter Gesteinskörnung erfordert, die erlaubt beim Vergleich mit Betonen aus natürlicher Gesteinskörnung den tatsächlichen Einfluss der rezyklierten Gesteinskörnung auf die Betoneigenschaften zu analysieren, anstatt die Wirkung der veränderten Zusammensetzung der Zementsteinmatrix zu bewerten.

In labortechnischen Versuchen wurde in dieser Arbeit ermittelt, welche Wasserzugabe notwendig ist, um bei Betonen mit rezyklierten und Betonen mit natürlichen Gesteinskörnungen eine gleiche Zusammensetzung des Zementmörtels zu erzielen.

Es wird zunächst aufgezeigt, welche Einflüsse auf den Wasserzementwert grundsätzlich zu berücksichtigen sind und mit welchen Prüfverfahren der Wasserzementwert über Versuche am Frischbeton ermittelt werden kann. Aus dieser Literaturstudie wurde eine Versuchsanordnung entwickelt, mit der eine Überprüfung der Zementmörtelzusammensetzung (Phase 1) auch bei Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung möglich ist. Der gewählte Versuchsaufbau wurde dann im Rahmen eigener Untersuchungen dazu verwendet, mit rezyklierten Gesteinskörnungen den erforderlichen Gesamtwasser-gehalt zur Erzielung einer identischen Zementmörtelzusammensetzung wie bei Referenzmischungen aus natürlicher Gesteinskörnung zu erreichen. Im Kapitel 3 wurde zunächst ausschließlich mit vollständig ofengetrockneter Gesteinskörnung gearbeitet, um eine bestmögliche Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

3.2 Grundlagen Wasserzementwert von Beton mit natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung

3.2.1 Wasserzementwert – Einflüsse und Auswirkungen

Der Wasserzementwert w/z ist ein Maß für das Gewichtsverhältnis zwischen Wasser und Zement und die entscheidende Größe, von der die wesentlichen baupraktischen Eigenschaften eines Betons, wie z. B. Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit abhängen. Werden außer Zement auch Zusatzstoffe vom Typ II (nach [DIN EN 206-1]) zugegeben, die auf den Zementgehalt angerechnet werden dürfen, so spricht man vom äquivalenten Wasserzementwert $(w/z)_{eq}$ bzw. vom Wasser-Bindemittelwert (w/b) .

Die Konsistenz von Zementmörtel und Beton ändert sich bei ansonsten identischer Zusammensetzung stark mit veränderlichem Wasserzementwert. Auch die Festigkeit, sowie Dauerhaftigkeit kann über den Wasserzementwert abgeschätzt werden [Neville - 2002]. Der Wasserzementwert ist von ausschlaggebender Bedeutung für den Porenraum des Zementsteins und damit für die Dichtigkeit und Festigkeit des Betons [Backe et al. - 2009]. Je nach Höhe des Wasserzementwerts verbleiben im Zementstein unterschiedlich große Kapillarporenanteile, die durch das nicht für die Hydratation gebrauchte „Überschusswasser“ entstehen. Oberhalb eines Wasserzementwerts von 0,4 sind Kapillarporen ein unvermeidbarer Bestandteil des Zementsteingefüges [VDZ - 2002].

Die Betonfestigkeit ist bei gleichem Betonalter, gleicher Nachbehandlung und gleicher Temperatur abhängig vom Luftporengehalt, dem Verdichtungsgrad und dem Wasserzementwert. Zunehmende Porenmengen, verursacht durch hohe Wasserzementwerte, durch nicht ausreichende Verdichtung oder durch Luftporenbildende Zusatzmittel, bedingen einen Festigkeitsabfall im Beton. Ein hoher Luftgehalt durch einen hohen Wasserzementwert mindert gleichzeitig auch die Dichtigkeit des Betons, denn die Kapillarporen erzeugen ein verbundenes Porensystem, das das Eindringen von Flüssigkeiten und Gasen ermöglicht. Anders verhält es sich bei hohem Luftgehalt, der künstlich erzeugt wird. Hier werden kugelige, in sich geschlossenen Mikroluftporen erzeugt, die keinen Transport von Flüssigkeiten oder Gasen ermöglichen.

Entscheidend für die Festigkeit ist also nicht das absolut in der Betonzusammensetzung enthaltene Wasser, sondern diejenige Menge, die im Zementmörtel ungebunden vorhanden bleibt und zur Bildung von Kapillarporen führt. Wasser, das in der Gesteinskörnung als Kernfeuchte enthalten ist, wirkt sich praktisch nicht auf den Wasserzementwert aus. Als wirksames Wasser kann diejenige Wassermenge bezeichnet werden, die sich zum Zeitpunkt des Erstarrens außerhalb der Gesteinskörner befindet [Neville - 2002].

Die bis heute verwendeten Regeln für den Mischungsentwurf basieren auf dem empirisch ermittelten Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und dem Quotienten aus Wassergehalt und Zementgehalt in der Betonmischung. Die Erkenntnis, dass der Wasserzementwert als entscheidende Größe die Festigkeit eines Betons bestimmt, geht auf das Jahr 1918 und die Versuche von Abrams zurück [Abrams - 1918]. Unter Annahme gleicher Zementgehalte, vollständiger Verdichtung und gleichen Luftgehalts hatte Abrams festgestellt, dass die Festigkeit antiproportional zum Wasserzementwert ist (Abrams-Law). Abrams erkannte, dass Veränderungen im Wassergehalt sich um ein Vielfaches stärker auf die Festigkeit auswirken als die Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung oder der absolute Zementgehalt, welche zuvor als entscheidende Einflussgrößen für die Betonfestigkeit angenommen worden waren. Ebenfalls erkannte bereits Abrams die Problematik von saugender Gesteinskörnung. Die Erkenntnis, dass lediglich das Wasser für die Festigkeit von Bedeutung ist, das mit dem Zement reagieren kann, und dass das von der Gesteinskörnung aufgesaugte Wasser somit beim Wasserzementwert nicht zu berücksichtigen ist, wurde bereits in [Abrams - 1918] erkannt.

Der heutige Betonentwurf basiert zwar auf den Erkenntnissen von Abrams, er wurde in den 50er und 70er Jahren jedoch entscheidend durch Walz weiterentwickelt. Aus

den Arbeiten von Walz aus dem Jahre 1958 [Walz - 1958] geht hervor, dass die Eigenschaften des frischen und erhärteten Betons unter sonst gleichen Verhältnissen im Wesentlichen von der Normdruckfestigkeit des Zements, dem Wasserzementwert, von den Eigenschaften der Gesteinskörnung (Kornzusammensetzung, Kornform, Größtkorn, Gesteinsart), der Frischbetonkonsistenz, der Verarbeitung und Verdichtung des Frischbetons sowie vom Alter und der Nachbehandlung abhängen. Walz betonte in seiner Arbeit [Walz - 1958] die besondere Bedeutung einer Erfassung der Eigenfeuchtigkeit der Zuschlagstoffe für die laufende Einhaltung des Wasserzementwerts. Aus den empirisch ermittelten Zusammenhängen zwischen der Normdruckfestigkeit des Zements, der Betondruckfestigkeit und dem Wasserzementwert entwickelte Walz Diagramme [Walz - 1970], die es ermöglichen, ohne weitere Hilfsmittel die für eine bestimmte Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen erforderliche Mischungszusammensetzung zu berechnen. Der Verlauf der grafischen Darstellung der Festigkeit in Abhängigkeit vom Wasserzementwert ist eine hyperbolische Kurve (Walz-Kurve; siehe Abbildung 3-1).

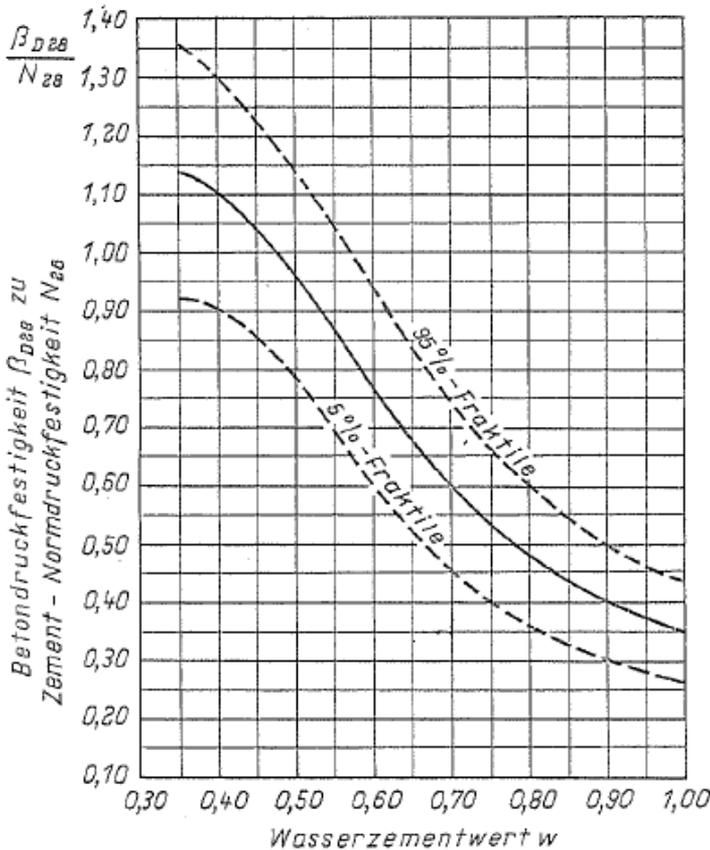


Abbildung 3-1: Beziehung zwischen Normdruckfestigkeit des Zements N_{28} , Wasserzementwert und Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen auf Basis von empirischen Ermittlungen mit Würfeln der Kantenlänge 200mm [Walz - 1970]

Walz bestätigte in [Walz - 1970] die Erkenntnis von Abrams, dass das Wasseraufnahmevermögen und die Wassersättigung ebenfalls Einfluss auf das zu erwartende Festigkeitsergebnis haben. Trocken eingesetzte Gesteinskörnung kann durch Wasseraufnahme den Wasserzementwert absenken, wassergesättigte Körnung hingegen kann den Haftverbund verringern und so die Festigkeit in der Realität mindern. Diese von Walz festgestellte Problematik ist insbesondere für saugende Gesteinskörnungen von Bedeutung [Walz - 1970].

Wie bereits 1970 von Walz erkannt, ist bei der Mischungsberechnung, zur Erzielung der Festigkeitsanforderungen gleichzeitig auch die zur Verarbeitung geforderte Konsistenz zu berücksichtigen, die vom Wasser- und Zementleimgehalt abhängt. Die Gesamtwassermenge (als Summe aus Zugabewasser und Oberflächenfeuchte von normaler Gesteinskörnung), die zur Erreichung einer bestimmten Betonkonsistenz erforderlich ist, wird als Wasserbedarf oder Wasseranspruch bezeichnet. Walz hatte festgestellt, dass sich die Oberflächenbeschaffenheit der Gesteinskörnung und ihre Kornform aufgrund der unterschiedlich großen zu benetzenden Oberflächen auf die Druckfestigkeit auswirkten und dadurch die Festigkeitsergebnisse von den berechneten Annahmen abwichen. Er entwickelte Tabellen, mit denen in Abhängigkeit von Größtkorn und Kornzusammensetzung der Wasseranspruch der Gesteinskörnung abgeschätzt werden kann [Walz - 1972].

Die Betondruckfestigkeit kann unter Berücksichtigung des Wasseranspruchs mit den entwickelten Diagrammen und Tabellen in Näherung vorhergesagt werden. Hierzu werden als Eingangsparameter das Verhältnis von Wasser zu Zement und die Zementfestigkeitsklasse verwendet. Die Erfahrungswerte zum erforderlichen Wassergehalt, der zum Erreichen einer bestimmten Zielkonsistenz und Festigkeit notwendig ist, basieren auf Mittelwerten. Im Einzelfall kann der tatsächliche Wassergehalt laut Hanke und Siebel [Hanke u. Siebel - 1995] um $\pm 15 \text{ l/m}^3$ abweichen, was aber in der Praxis über das System der vorgeschriebenen Erstprüfung für jede Mischungszusammensetzung korrigiert werden kann.

Anpassungen in den Berechnungen sind jedoch in besonderen Fällen notwendig. So ist beispielsweise in der Walz-Kurve ein normaler Luftporengehalt von 1,5 Vol.-% zugrunde gelegt. Werden künstlich Luftporen in den Beton eingeführt, so ist der über 1,5 Vol.-% hinausgehende LP-Gehalt bei der Berechnung des Wasserzementwertes zu berücksichtigen bevor die Walz-Kurve angewendet wird [Backe et al. - 2009]. Die Wasseraufnahme von porösen Gesteinskörnungen ist beim Zugabewasser ebenfalls zusätzlich zu berücksichtigen.

Die Werte der Walz-Kurve müssen ebenfalls angepasst werden, wenn Splitt statt des verwendeten Kieses oder bestimmte Zusatzstoffe oder Zusatzmittel verwendet werden. Empfohlen werden gemäß [Backe et al. - 2009] folgende Anpassungen.

- Bei höherem Mehlkornanteil aus Zement und Zusatzstoffen erhöht sich der Wasseranspruch ab 350 kg/m^3 Mehlkornanteil um ca. 1 kg/m^3 je 10 kg/m^3 Mehlkorn.
- Bei Verwendung von gebrochenem Korn oberhalb einer Korngröße von 8 mm erhöht sich der Wasseranspruch gegenüber Kies um ca. 5 %. Bei Verwendung von gebrochenem Korn oberhalb von 4 mm Korngröße anstelle von Rundkorn erhöht sich der Wasseranspruch sogar um 7 bis 10 %.

- Bei Zugabe von verflüssigenden Betonzusatzmitteln ist der abgelesene Wert für den Wasseranspruch um 5 % zu verringern.
- Bei Verwendung von Luftporenbildner sind für 1 Vol.-% zusätzliche Luftporen ca. 5 kg/m³ Wasseranspruch abzuziehen.

Die notwendigen Anpassungen bei Verwendung von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln verdeutlichen, dass den Eigenschaften des Zementleims bei der Mischungsberechnung besonderes Augenmerk zu widmen ist. Die Menge des Zementleims ist hingegen von geringerer Bedeutung. Der Zementleimgehalt beeinflusst bei gleichem Wasserzementwert in hohem Maße die resultierende Konsistenz, in geringem Maße die resultierende Druckfestigkeit (Druckfestigkeitseinbußen durch hohe Schichtdicke des Klebers) [Hanke u. Siebel - 1995]. Die Sieblinie im Bereich $> 0,125$ mm beeinflusst gemäß [Hanke u. Siebel - 1995] bei gleichbleibendem Größtkorn nur in geringem Maße Konsistenz und Festigkeit, hingegen ist die Sieblinie des Mehlkornbereichs $\leq 0,125$ mm von Bedeutung. Mehlkorn und Zusatzstoffe haben einen spürbaren Einfluss auf Konsistenz und Festigkeit. Der Einfluss der puzzolanischen Reaktivität von Flugasche muss berücksichtigt werden (k-Wert-Konzept und Wasser/Bindemittel-Wert).

3.2.2 Wasserzementwertbestimmung am Frischbeton

Die tatsächlichen mechanischen Eigenschaften des Betons sind erst nach der Erhärtung bestimmbar. Verfahren, die es ermöglichen die Eigenschaften des späteren Festbetons zielsicher vorherzubestimmen, sind deshalb zur Qualitätssicherung von großem Interesse. Da der Wasserzementwert der entscheidende Faktor für die Porosität, die Festigkeitseigenschaften und die Dauerhaftigkeit ist, stellt er die zu untersuchende Größe dar.

Es existieren in der Literatur und in den Regelwerken eine Vielzahl verschiedener Ansätze, die dazu dienen, durch Analyse der Frischbetonzusammensetzung auf die Eigenschaften des erhärteten Betons zu schließen. Dabei wird unterschieden in Verfahren, die indirekt Unterschiede im Wasserzementwert erkennen lassen und Verfahren, bei denen sich aus dem Prüfergebnis direkt der Wassergehalt ergibt, aus dem der Wasserzementwert errechnet werden kann. In diesem Kapitel werden die aus der Literatur bekannten und in Regelwerken angewendeten Verfahren zur Bestimmung des Wasserzementwerts von Frischbeton zusammengestellt. Umfangreichere Zusammenstellungen von Prüfverfahren sind z. B. in [Nägele - 1984], [Walz - 1977] und [Nägele u. Hilsdorf - 1980/81] enthalten.

Indirekt kann über die Konsistenz von Betonen ohne verflüssigende Zusatzmittel bei sonst gleichen Ausgangsstoffen und gleicher Betonzusammensetzung auf Unterschiede im Wasserzementwert rückgeschlossen werden, da sie wesentlich vom Wassergehalt abhängig ist und sich Einflüsse der Wasseraufnahme saugender Körnung sichtbar auswirken. Die Konsistenz des Frischbetons hängt bei gleichem Zementleimvolumen und gleicher Zementleimzusammensetzung vom Wassergehalt, der Kornform, der Korngrößenverteilung und der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung ab. Bei Betonen, die hinsichtlich der Kornform und der Sieblinie der Gesteinskörnung angeglichen wurden, ist somit eine gute Einschätzung von Wassergehaltsunterschieden möglich, solange keine konsistenzverändernden Betonzusatzmittel enthalten sind.

Eine Ermittlung des absoluten Wasserzementwerts oder Wassergehalts erlaubt diese indirekte Methode jedoch nicht.

Bei den direkten Prüfverfahren ist dagegen aus den Ergebnissen eine Aussage zum absoluten Wassergehalt möglich. Nachfolgend werden die geregelten Prüfverfahren vorgestellt, die an Beton im frischen Zustand eine Aussage zum Wassergehalt und somit zum Wasserzementwert zulassen. Weitere Prüfverfahren dienen zur nachträglichen Bestimmung des Wasserzementwerts an bereits erhärtetem Beton.

Das Standardprüfverfahren zur Ermittlung des Wassergehalts von Frischbeton für Deutschland, das in [DIN 1048-2] normativ geregelt war, stellt der **Darrversuch** dar. Beim Darrversuch wird durch rasches Trocknen mittels einer Gasflamme, unter ständigem Rühren, der Wassergehalt des Frischbetons bestimmt. Bei bekannter Betonzusammensetzung kann mittels des Zementgehalts und dem bekannten Massenverhältnis Zement/Gesteinskörnung aus der Stoffraumrechnung der Wasserzementwert ermittelt werden. Der Wassergehalt der Betonprobe ergibt sich aus der Massendifferenz zwischen der eingewogenen Frischbetonprobe und ihrer abgekühlten Trockenmasse nach der Prüfung. Das Prüfverfahren ist in mehreren Regelwerken enthalten. Geregelt ist die Prüfung in Deutschland im DBV-Merkblatt Frischbetonprüfungen [DBV-Merkblatt Frischbeton], in anderen Ländern ist das Verfahren ebenfalls geregelt, z. B. in Österreich in [ONR 23303], in der Schweiz in [SIA 262/1]. Vorteil des Prüfverfahrens ist seine Baustellentauglichkeit. Ein Nachteil hingegen ist die relativ große Probenmenge von 5 kg (in Deutschland), abhängig vom verwendeten Größtkorn, die für präzise bzw. aussagekräftige Ergebnisse benötigt wird. Zudem ist das Verfahren fehleranfällig aufgrund der möglichen vorhandenen Restfeuchte und der Gefahr durch das Rühren Material zu verlieren.

Das **Mikrowellendarren** ist ebenfalls ein Prüfverfahren zur Bestimmung des Gesamtwassergehaltes im Frischbeton. Es stellt in Österreich - gemäß [ONR 23303] - das Referenzverfahren zur Wassergehaltsbestimmung in Beton dar. Geregelt ist die Prüfung auch in Deutschland in [DBV-Merkblatt Frischbeton] und wird als Alternativverfahren zum Darrversuch verwendet. Die Masse der zu untersuchenden Probe wird auch hier vor und nach dem Trocknen bestimmt. Die Trocknung erfolgt im Mikrowellenherd. Vorteil gegenüber dem Darrversuch ist die kürzere Prüfdauer sowie die geringere erforderliche Probenmenge von 2 kg.

Bei der **Abflammmethode** bzw. dem **Trocknen mit Spiritus** wird die Frischbetonprobe zunächst auf der Trocknungsfläche mit Spiritus (je kg Beton etwa 0,1 l Spiritus) vermischt, das entstandene Mischgut angezündet und so lange weiter durchmischt, bis die Flamme erloschen ist. Unmittelbar anschließend ist in einem zweiten Trocknungsgang ca. 0,1 l Spiritus je kg Beton nachzugießen, einzumischen und anzuzünden. Die Trocknung erfolgt dabei unter ständigem Rühren, bis keine Klumpen mehr vorhanden sind und der Verlust des Wassers an der gleichmäßig hellen Farbe der getrockneten Probe erkennbar ist. In Zweifelsfällen ist durch Wägen die Massekonstanz (auf 0,1 M.-% genau) nachzuweisen. Auch dieses Prüfverfahren bietet den Vorteil der Baustellentauglichkeit. Aufgrund der manuellen Durchmischung besteht jedoch eine ähnliche Fehleranfälligkeit wie beim Darrversuch beschrieben.

Die niederländische Norm [NEN 5960] sieht insgesamt vier Methoden zur Bestimmung des Wasserzementwerts vor. Die **Trocknungsmethode** ist in den Niederlanden gemäß [NEN 5960] das Standardprüfverfahren zur Wasserzementwert-Bestimmung am Frischbeton. Dabei wird Beton oder Mörtel in einem Trockenofen bei einer Temperatur von mindestens 350°C bis zur Massekonstanz getrocknet. Vorteil dieses Prüfverfahrens ist, dass nicht gerührt wird und dadurch kein Massenverlust entstehen kann. Für das Prüfverfahren ist ebenfalls eine große Probenmenge erforderlich (5 kg), zudem ist das Prüfverfahren nur bedingt baustellentauglich, da ein Trockenofen benötigt wird.

Die **Thaulow-Methode** gemäß [NEN 5960] ist in den Niederlanden eine weitere der vier geregelten Methoden zur Wasserzementwertbestimmung. Sie basiert auf der Unterwasserwägung des entlüfteten Frischbetons bei bekannten Dichten von Zement und Gesteinskörnung im feuchten Zustand.

Die **Methode mit gewogenen Rohstoffen** aus [NEN 5960] kann dann angewendet werden, wenn eine Überprüfung des Wiegens möglich ist, die Feuchte aller wasserhaltigen Rohstoffe bekannt ist und die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung geprüft wurde.

Feuchtesonden zählen zu den dielektrischen bzw. kapazitiven Verfahren zur Bestimmung des Wassergehalts im Frischbeton. Das dielektrische Messprinzip basiert auf der hohen Dielektrizitätskonstante von Wasser, die um das 10 bis 80-fache höher ist als die der meisten Feststoffe [Kruschwitz - 2014]. Das Wassermolekül ist zwar als Ganzes betrachtet elektrisch neutral, besitzt jedoch eine unsymmetrische Ladungsverteilung, sodass ein positiver und ein negativer Ladungsschwerpunkt entstehen. Durch diese Polarität richtet sich das Wassermolekül in einem von außen angelegten elektrischen Feld in einer Vorzugsrichtung aus, ist somit polarisierbar. Wird zusätzlich ein elektromagnetisches Feld angelegt, beginnen die Moleküle mit der Frequenz des Feldes zu rotieren [Kruschwitz - 2014]. Da trockene Baustoffe niedrige Dielektrizitätskonstanten und zudem - im Gegensatz zu Wasser - keine Abhängigkeit der Dielektrizitätszahl von der Messfrequenz zeigen, kann über die Messung mit Feuchtesonden auf den Wassergehalt der Probe geschlossen werden. Es existieren aktuell am Markt zwei grundsätzliche Typen aller dielektrischen Prüfverfahren, die für Beton verwendet werden. Bei dem **Time Domain Reflectometry-Verfahren (TDR-Verfahren)** wird die Laufzeit kurzer Mikrowellenimpulse (> 1 GHz) gemessen [Kruschwitz - 2014], welche sich entlang einer metallischen Sonde bewegen und an deren Ende reflektiert werden. Die Laufzeit verlängert sich mit zunehmender Baustofffeuchte, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen mit zunehmender Feuchte sinkt. Anhand der Messung der Abbremsung können Rückschlüsse auf den Wassergehalt gezogen werden. Zuvor muss allerdings eine recht aufwändige, vom Probematerial abhängige, Kalibrierung der Sensoren erfolgen. Das Prinzip der **Mikrowellentechnik** liegt in der Erzeugung eines elektromagnetischen Wechselfeldes, welches Wassermoleküle in Schwingungen versetzt und somit lokalisierbar macht. Diese Methode beruht auf der Analyse der vom Material reflektierten und der eingestrahelten Welle. Der gemessene Reflexionsfaktor ist ein Maß für die dielektrischen Eigenschaften des Messguts und kann nach entsprechender Kalibrierung einem Materialfeuchtewert zugeordnet werden [Göllner et al. - 2016].

Die Messung des Wassergehalts mit Hilfe von Feuchtesonden bietet den Vorteil, dass die Prüfverfahren schnell und baustellentauglich sind. Bislang liegen jedoch keine ausreichenden Erfahrungen vor. Zudem muss die Betonzusammensetzung bekannt sein, die Messung ist störanfällig und die Genauigkeit stark von der Konsistenz abhängig. Für jede Gesteinskörnung sollte idealerweise eine Kalibrierung erstellt worden sein.

3.2.3 Gewährleistung eines angestrebten Wasserzementwerts bei saugender Gesteinskörnung

Der Wasserzementwert ist leicht einzustellen und mit den oben genannten Prüfverfahren zu überprüfen, solange die Gesteinskörnungen kein Wasser aus dem Frischbeton aufnehmen können. Hingegen ist bei saugenden Gesteinskörnungen wie leichter oder rezyklierter Gesteinskörnung die zielsichere Einstellung eines definierten Wasserzementwerts aufgrund der Porosität und Wasseraufnahme der Gesteinskörnung schwieriger. Auch ist die Überprüfung des wirksamen Wassergehalts gegenüber Beton mit natürlicher Gesteinskörnung deutlich erschwert. Der Wasserzementwert kann bei rezyklierter Gesteinskörnung, wie allgemein bei saugender Körnung, nicht über das Darrverfahren oder andere Standardverfahren überprüft werden. Diese liefern lediglich Informationen zum Gesamtwassergehalt als Summe aus wirksamem Wasser und Kernfeuchte. Nur bei nicht saugender Körnung entspricht das Ergebnis der Standardprüfungen hinreichend genau dem Wassergehalt im Zementleim.

Zur zielsicheren Herstellung von Beton mit den geregelten Typen rezyklierter Gesteinskörnung unter Berücksichtigung des wirksamen Wassergehalts sind kaum Ergebnisse veröffentlicht. Es bestehen jedoch viele Analogien zwischen rezyklierter Gesteinskörnung und leichter Gesteinskörnung in gefügedichtem Leichtbeton. Beide besitzen, verglichen mit normaler Gesteinskörnung, eine höhere Wasseraufnahme und Porosität sowie eine geringere Kornrohichte und Korndruckfestigkeit. Zwar sind gemäß [Thienel - 1996] Schwankungen hinsichtlich der Gesteinskörnungseigenschaften bei Leichtbeton aufgrund der industriellen Herstellung geringer zu erwarten als in Abschnitt 2.2.2 für rezyklierte bzw. auch für natürliche Gesteinskörnungen erläutert, jedoch können aus den Analogien zum Umgang mit saugenden Gesteinskörnungen im Betonentwurf für die Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen wichtige Lösungsansätze abgeleitet werden. Nachfolgend werden deshalb zunächst die bekannten Regeln zum Betonentwurf bei gefügedichtem Leichtbeton als Grundlage für die zielsichere Einstellung des wirksamen Wasserzementwerts bei Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung dargestellt.

Bei Leichtbetonen wirken sich wasseraufnahmebedingte Veränderungen im Wasser-Bindemittel-Wert deutlich geringer aus als bei Normalbeton, da die geringe Druckfestigkeit der Gesteinskörnung den Einfluss einer erhöhten Druckfestigkeit der Zementsteinmatrix überlagert [Aurich - 1971], [Thienel - 1996]. Die leichten Gesteinskörnungen besitzen eine hohe Wasseraufnahme, die als zusätzliche Wassermenge in der Mischungsberechnung berücksichtigt werden muss [Thienel - 1996, 1997]. Aufgrund ihrer Porosität kann die leichte Gesteinskörnung dem Zementleim sowohl während des Mischens als auch im Zeitraum bis zum Erstarren des Leichtbetons Wasser entziehen [Thienel - 2018]. Es ist im Betonentwurf daher eine zusätzliche Wassermenge zu berücksichtigen, die als vom Korn vollständig absorbiert angesehen werden kann. Ent-

sprechend ist dieses Wasser in der Stoffraumrechnung massenmäßig, nicht aber volumetrisch zu berücksichtigen [Aurich - 1971]. Die zusätzlich erforderliche Wassermenge stellt beim Leichtbeton eine Unsicherheit in der Stoffraumrechnung dar, da sie nur schwer erfasst werden kann [Aurich - 1971], [Thienel - 1996]. Von ihrer korrekten Abschätzung hängt letztendlich der wirksame Wassergehalt ab. Das wirksame Wasser bestimmt wiederum die Konsistenz und den Wasserzementwert des Leichtbetons [Thienel - 2018].

Zur Abschätzung der erforderlichen zusätzlichen Wassermenge wird für leichte Gesteinskörnungen die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung herangezogen. Die Erfahrung aus der Praxis zeigt jedoch, dass das Wassersaugen im Tauchversuch die Wasseraufnahme der leichten Gesteinskörnung aus dem Zementleim im Mischer nur unzureichend simuliert [Thienel - 2018, 1996], denn die Wasseraufnahme von leichter Gesteinskörnung in reinem Wasser und die Wasseraufnahme in Frischbeton sind nicht identisch [Domagała - 2015], [Thienel - 1997]. Zweckmäßig und in überschläglicher Weise wird dennoch über den Wasseraufnahmeversuch in reinem Wasser auf die zusätzlich erforderliche Wassermenge geschlossen. Damit die tatsächliche Wasseraufnahme im Leichtbeton nicht überschätzt und der wirksame Wasserzementwert nicht unterschätzt wird, sollte laut [Aurich - 1971], [Grübl et al. - 2001] und [Wesche - 1981] zweckmäßigerweise die Wasseraufnahme nach 30 Minuten berücksichtigt werden. Bei Transportbeton können gemäß [Aurich - 1971] auch längere Zeitäquivalente berücksichtigt werden. In [Thienel - 2018] und [Zement-Merkblatt Leichtbeton] wird grundsätzlich bei trockener leichter Gesteinskörnung die Berücksichtigung der Wasseraufnahme innerhalb der ersten 60 min empfohlen.

Die Dosierung leichter Gesteinskörnung sollte grundsätzlich volumetrisch erfolgen [Thienel - 2018]. Sofern nur eine massenteilige Dosierung möglich ist, müssen der Feuchtegehalt und die Gesteinskörnungsdichte in angemessenen Abständen überprüft und Veränderungen beim Dosieren berücksichtigt werden [Thienel - 2018].

Ähnliche Aussagen können zur Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen bislang nicht getroffen werden. Dass bislang zum Umgang mit rezyklierten Gesteinskörnungen überschlägliche, zweckmäßig vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen und der tatsächliche wirksame Wasserzementwert eine Unsicherheit in der Mischungsberechnung darstellt, wurde in Kapitel 2.3.3 bereits beleuchtet. Ähnlich wie für leichte Gesteinskörnungen ist bei Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung nicht der Gesamtwassergehalt bei der Prüfung des Wasserzementwerts von Interesse, sondern derjenige Wasseranteil, der als Reaktionspartner für den Zement als wirksames Wasser im Zementleim verbleibt. Die von der Gesteinskörnung als Kernfeuchte aufgenommene Wassermenge spielt für die Festigkeit des Betons praktisch keine Rolle. Es ist folglich ein Prüfverfahren oder ein Versuchsablauf bei der Prüfung des Wasserzementwerts von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung anzuwenden, das eine Beurteilung des wirksamen Wassergehalts zulässt.

Kam Aurich in [Aurich - 1971] noch zu der Aussage „es ist nicht möglich die Wassermenge zu bestimmen, die zur Zementleimbildung zur Verfügung steht. Die Bestimmung des wirksamen Wasserzementwerts ist entsprechend problematisch“ und schrieb Thienel in [Thienel - 1996] 1996 noch, dass der effektive Wasserzementwert

von Leichtbeton wegen der sehr unterschiedlichen Wasseraufnahme der Gesteinskörnungen lediglich abgeschätzt werden könne, so sind zwischenzeitlich Versuchsanordnungen veröffentlicht, die eine Beurteilung des wirksamen Wassers von Leichtbetonen ermöglichen und so auch für Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung Ansätze zur Kontrolle des wirksamen Wasserzementwerts zur Verfügung stellen können.

In [Bello et al. - 2017] wurde ein Verfahren entwickelt, das die Wasseraufnahme in Kontakt mit Zementleim über die Massendifferenz von der Gesteinskörnung, die aus dem Zementleim herausgenommen und getrocknet wird, ermittelt. Trockene Gesteinskörnung der Lieferkörnung 4/8 mm wurde mit gesondert angemischtem Zementmörtel unterschiedlicher Wasserzementwerte vermengt. Nach verschiedenen Zeitintervallen als Ruhezeiten wurden Gesteinskörnung und Zementmörtel über ein Sieb mit 4 mm Maschenweite wieder voneinander getrennt und die Gesteinskörnung feucht, sowie nach Trocknung bei 105°C bis zur Massekonstanz gewogen. Kontrollversuche mit normaler, dichter Gesteinskörnung zeigten, dass die gemessenen Wasseraufnahmen aus dem Zementleim zu allen Prüfzeitpunkten in etwa gleich waren, unabhängig von der zur Verfügung stehenden Saugzeit. Die Standardabweichung der entwickelten Versuchsanordnung bei sechs Wiederholversuchen betrug 0,2 %, der Variationskoeffizient lag bei 2 % bis 4 %. Die Ergebnisse zeigten, dass die Wasseraufnahme leichter Gesteinskörnung in Kontakt mit Zementleim geringer ist als die Wasseraufnahme in reinem Wasser. Die Wasseraufnahme in Zementleim war in den Ergebnissen der Untersuchungen in den ersten fünf Minuten unabhängig vom Wasserzementwert des Zementleims, danach umso geringer, je geringer der Wasserzementwert des Leims war.

In [Domagała - 2015] wurde ein ähnliches Verfahren angewendet. Auch hier wurde trockene leichte Gesteinskörnung (gesinterte Flugasche der Lieferkörnung 6/12 mm) mit Zementleim definierten Wasserzementwerts vermischt und nach einer Kontaktzeit von 30 Minuten wieder separiert. Im Gegensatz zur vorgenannten Methode wurde hier der Zementleim bei 1000 °C bis zur Massekonstanz getrocknet, um den Wassergehalt zu ermitteln. Zur Validierung des Messverfahrens wurde reiner Zementleim im gleichen Verfahren getrocknet.

3.3 Wasserzementwertbeherrschung bei Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung

3.3.1 Versuchsziel und Lösungsweg

Zielfrage des nachfolgenden Kapitels ist, wie unter Laborbedingungen die Mischungszusammensetzung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen konzipiert werden muss, damit hinsichtlich der Festbetoneigenschaften dieser Beton tatsächlich mit Beton aus natürlichen Gesteinskörnungen zu vergleichen ist. Hypothese ist, dass der wahre Einfluss der Gesteinskörnungsvariation auf die Festbetonkennwerte nur beurteilt werden kann, wenn es gelingt, bei Betonen mit natürlicher und Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung den gleichen wirksamen Wassergehalt im Zementmörtel bzw. vergleichbare Eigenschaften der Zementsteinmatrix zu gewährleisten.

Um die Zielfrage beantworten zu können, wurde auf Basis der Literaturlauswertung ein Versuchskonzept entwickelt, validiert und in Versuchen umgesetzt, das sowohl die

Wasseraufnahme der Gesteinskörnung berücksichtigt als auch die Faktoren der Wasseraufnahme im Zementmörtel beurteilen lässt. Die Auswertung der Versuchsdaten ermöglicht eine Aussage, unter welchen Voraussetzungen Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung mit gleichem wirksamen Wasserzementwert wie eine Referenz aus natürlicher Gesteinskörnung hergestellt werden können. Ziel und Vorgehensweise des nachfolgenden Kapitels sind in Abbildung 3-2 schematisch dargestellt.

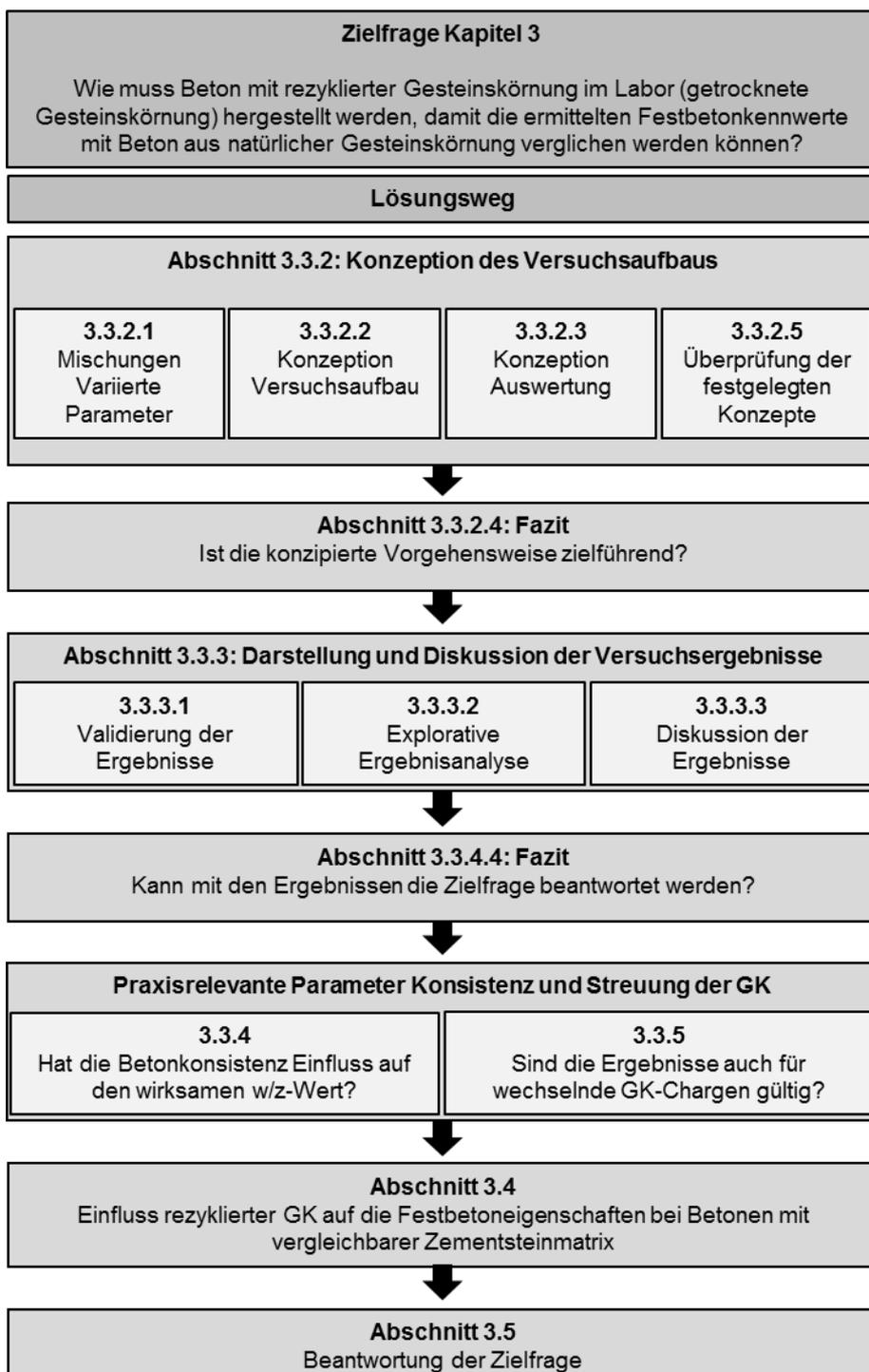


Abbildung 3-2: Schematischer Aufbau der Untersuchungen in Kapitel 3

3.3.2 Konzeption des Versuchsaufbaus und der verwendeten Auswertung

3.3.2.1 Mischungszusammensetzungen

In den Untersuchungen wurde ein Portlandhüttenzement CEM II/B-S 42,5 N verwendet. Die Betone enthielten keine Betonzusatzstoffe. Als verflüssigendes Betonzusatzmittel wurde das im Rahmen des BMBF-Verbundforschungsvorhaben „R-Beton“ [R-Beton - 2018] vom Projektpartner BASF MasterBuilders Solutions GmbH entwickelte Zusatzmittel „SR 1“ eingesetzt.

Alle Versuche wurden mit folgender Gesteinskörnung der Lieferkörnung 2/16 mm aus der Produktion des Werks Ludwigshafen der Scherer & Kohl GmbH & Co KG durchgeführt:

- rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 (aus reinem Betonsplitt)
- rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2 (mit 70 M.-% Betonsplitt und 30 M.-% Ziegel-/ Mauerwerksplitt)
- Naturkies (Rheinkies)
- Natursplitt (gebrochener Mikrodiorit).

Die feine Gesteinskörnung bestand bei allen Mischungen aus Rheinsand 0/2 mm.

Zunächst wurde eine geeignete Mischungszusammensetzung für die verschiedenen Betone erstellt, wobei auf ähnliche Sieblinien bei allen vier untersuchten Varianten an Gesteinskörnung, auf ein gleiches Verhältnis der Korngruppen in Vol.-% in allen Mischungen und auf ein möglichst hohes Mörtelvolumen geachtet wurde. Die Sieblinien der vier Typen sowie die entsprechenden Mischungsberechnungsprotokolle sind in Anhang B.1 zusammengestellt. Die Korngrößenverteilung und die Körnungsziffer der vier Gesteinskörnungsvarianten wurden so weit wie möglich optimiert und angeglichen. Alle Sieblinien ordnen sich im Bereich der Sieblinie B16 ein. Die Korngruppenanteile von 41 Vol.-% an Sand 0/2 mm, 36 Vol.-% der Korngruppe 2/8 mm und 23 Vol.-% der Korngruppe 8/16 mm wurden bei allen Mischungen einheitlich gewählt. Für Typ 1 und Typ 2 wurde dabei ein gleicher k-Wert von 3,61 erreicht, für die Referenzmischung aus Kies ergab sich eine Körnungsziffer von 3,66, für die Referenzmischung aus Splitt lag der k-Wert ebenfalls bei 3,61. Die Referenzmischung wurde so konzipiert, dass ein vergleichsweise hoher Mörtelgehalt von ca. 600 dm³/m³ vorhanden war. Der Anteil und die Zusammensetzung des Mörtels wurde bei allen Mischungszusammensetzungen konstant gehalten, lediglich die enthaltene Gesteinskörnung ≥ 2 mm wurde von Kies über Splitt und rezyklierter Gesteinskörnung der Typen 1 und 2 ausgetauscht.

Die Mischungen mit gleichem Typ rezyklierter Gesteinskörnung unterschieden sich in der Menge des Zusatzwassers. Einzelne Mischungen wurden mehrfach mit gleicher Zusammensetzung hergestellt, wobei die Betonkonsistenz durch Variation der Fließmitteldosierung bei den Chargen stets voneinander abwich.

Alle Gesteinskörnungen in dieser Versuchsreihe wurden im ofentrockenen Zustand verwendet. Bei jeder Betonmischung wurden die Bestandteile Gesteinskörnung, Sand, Zement und Zugabewasser konstant gehalten. Lediglich das Zusatzwasser variierte je nach Mischung, um unterschiedliche Wasserzementwerte zu erzielen und jeweils den wirksamen Wasserzementwert zu ermitteln. Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die geprüften Varianten.

Tabelle 3-1: Wassergehalte der geprüften Betonvarianten

Probenbezeichnung		Zugabewasser in kg/m ³	Zusatzwasser in % des Zugabewassers (ca.-Werte)	Zusatzwasser in kg/m ³	Gesamtwasser in l/m ³ Beton
natürliche Referenz	Kies	182	0	0,00	182,0
	Splitt	182	0	0,00	182,0
rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1	Typ 1 (+10%)	182	10	17,83	199,8
	Typ 1 (+12%)	182	12	22,00	204,0
	Typ 1 (+14%)	182	14	26,17	208,2
	Typ 1 (+17%)	182	17	30,33	212,3
rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2	Typ 2 (+16%)	182	16	28,67	210,7
	Typ 2 (+18%)	182	18	32,83	214,8
	Typ 2 (+20%)	182	20	37,00	219,0
	Typ 2 (+23%)	182	23	41,17	223,2
	Typ 2 (+25%)	182	25	45,33	227,3

Dabei sollten im Ergebnis der Untersuchungen die Ziel-Betonzusammensetzungen gefunden werden, bei denen das Zusatzwasser vollständig durch die rezyklierte Gesteinskörnung aufgenommen wurde und das gesamte Zugabewasser zur Hydratation zur Verfügung steht. Abbildung 3-3 stellt die Bestandteile der Betonzusammensetzungen dar und verdeutlicht den angestrebten Soll-Zustand.

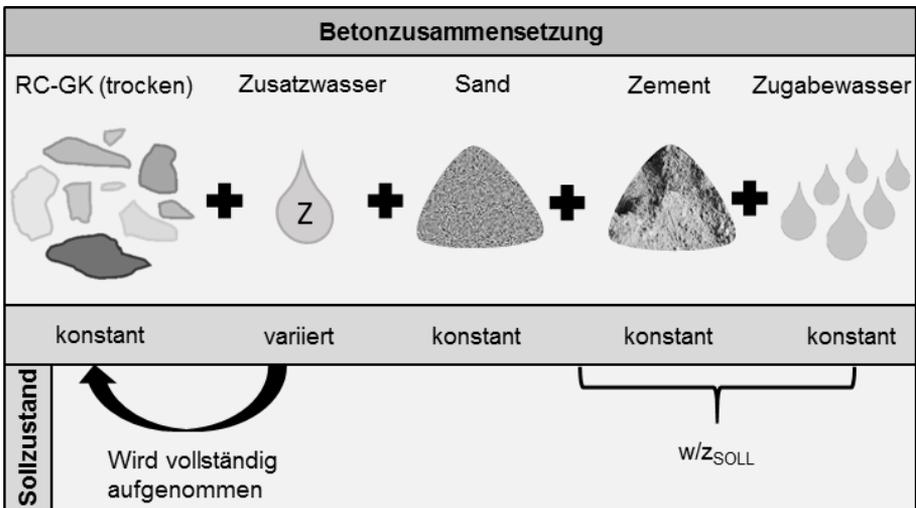


Abbildung 3-3: Ziel-Betonzusammensetzung

Die Zusammensetzung aller hergestellten Betone ist in Anhang B.1 zusammengestellt.

3.3.2.2 Beschreibung des Versuchsablaufs

Nur bei nicht saugender Gesteinskörnung entspricht der Gesamtwassergehalt hinreichend genau dem wirksamen Wassergehalt im Zementmörtel. Um den wirksamen Wassergehalt als entscheidende Eingangskenngröße zur Berechnung des wirksamen Wasserzementwerts prüfen zu können, wurde deshalb nach einer Möglichkeit gesucht, am Zementmörtel selbst die wirksame Wassermenge ermitteln zu können, die nicht von der Gesteinskörnung aufgenommen wurde und somit zur Hydratation zur Verfügung steht. Hierfür wurde festgelegt, dass zur Ermittlung des wirksamen Wasserzementwerts bei Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung vor der Anwendung eines Prüfverfahrens zur Wassergehaltsbestimmung die Gesteinskörnung im Beton wieder vom Zementmörtel zu trennen sei. Der Beton wurde zunächst jeweils in einem normalen Mischprozess hergestellt und hinsichtlich seiner Frischbetonkennwerte untersucht.

Aus der vorliegenden Literatur zur Betonherstellung mit rezyklierter Gesteinskörnung geht übereinstimmend hervor, dass die Wasseraufnahme hier durch zusätzliches Wasser in der Mischungszusammensetzung ausgeglichen werden muss. In der Fragestellung dieses Kapitels sollte über Versuche ermittelt werden, wie viel zusätzliches Wasser in Abhängigkeit von der Art der rezyklierten Gesteinskörnung und möglicher weiterer Faktoren, erforderlich ist, um mit ofentrockenen Gesteinskörnungen eine vergleichbare Zusammensetzung des Zementsteins zu erreichen wie bei Beton mit natürlicher Gesteinskörnung. In den durchgeführten Versuchen wurde aus diesem Grund die Menge des Zusatzwassers variiert.

Die verwendeten Gesteinskörnungen wurden hinsichtlich ihres zeitlichen Wasseraufnahmeverhaltens zunächst umfassend charakterisiert. Für die Bestimmung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung wurden für alle Gesteinskörnungsvarianten Pyknometerversuche gemäß [DIN EN 1097-6] durchgeführt. Nachfolgend ist in Abbildung 3-4 der Ablauf der Pyknometerversuche schematisch dargestellt. Die Gesteinskörnungen wurden vor der Prüfung bei $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ für mindestens 48 Stunden getrocknet. Der Pyknometerversuch wurde, wie in Abbildung 3-4 dargestellt, nach 5, 10, 20, 60, 90 und 180 Minuten sowie nach 24 Stunden für Kies, Typ 1 und Typ 2 durchgeführt, um eine zeitliche Entwicklung der Wasseraufnahme dokumentieren zu können.

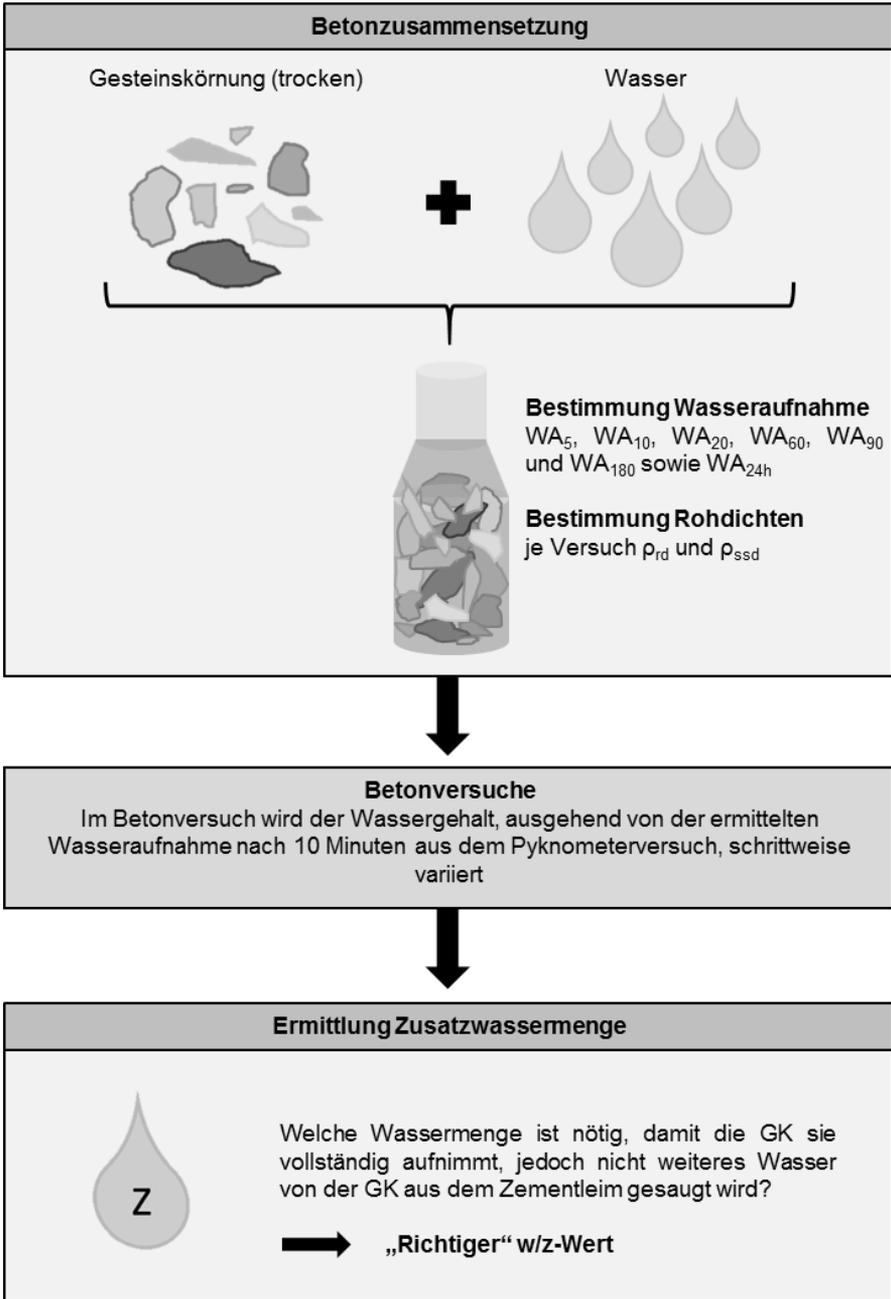


Abbildung 3-4: Vorgehensweise bei der Ermittlung der "richtigen" Zusatzwassermenge

Die Ergebnisse wurden bereits in Kapitel 2.2.2.5 ausführlich dargestellt.

Zuerst wurde die ofentrockene Gesteinskörnung in den angefeuchteten Mischer gegeben. Anschließend wurde die ermittelte Menge an Zusatzwasser hinzugefügt und bei ca. 30 Umdrehungen pro Minute (U/min) für eine Minute gemischt.

Optimal wäre zu diesem Zeitpunkt ein Zustand, in dem die Gesteinskörnung nicht vollständig wassergesättigt ist. Daraus würde folgen, dass die Gesteinskörnung anschließend dem Zementmörtel Wasser entziehen und so den Wasserzementwert reduzieren würde. Da ein niedriger Wasserzementwert in direktem Zusammenhang mit einer Steigerung der Festigkeit steht, ist dies die sichere Seite. Ist die Gesteinskörnung bereits vollständig gesättigt und es ist eventuell sogar ein Überschuss von Zusatzwasser vorhanden, welchen die bereits gesättigte Gesteinskörnung nicht aufnehmen kann, dann stellt dies ein Risiko dar, weil das entstehende Überschusswasser den Wasserzementwert erhöhen würde

Nach dem Vorsättigen der Gesteinskörnung mit dem jeweiligen Zusatzwasser wurden Sand, Zement und das Zugabewasser hinzugefügt. Dieses Gemisch wurde bei 60 U/min für zwei Minuten durchmischt. Anschließend erfolgte die Bestimmung der Frischbetonkonsistenz mittels Verdichtungsmaß nach [DIN EN 12350-4], da die Grundrezeptur beim gewählten Wasserzementwert von 0,52 ohne Zusatzmittel zu steif für eine aussagekräftige Bestimmung des Ausbreitmaßes war und über das Verdichtungsmaß eine bessere Differenzierung der Ausgangskonsistenz möglich war. Abbildung 3-5 zeigt den festgelegten schematischen Mischablauf.

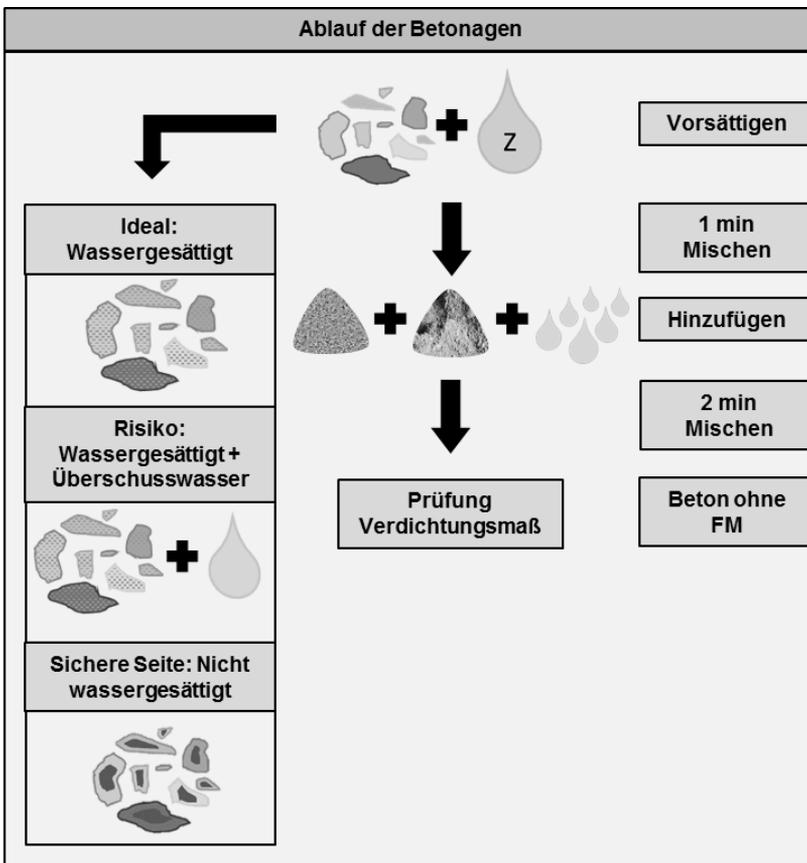


Abbildung 3-5: Ablaufschema der Betonagen Teil 1

Nach Überprüfung der Konsistenz wurde Fließmittel zum Frischbeton hinzugegeben, um eine weiche bis fließfähige Konsistenz im Bereich der Konsistenzklasse F5 für die Trennung von Gesteinskörnung und Zementmörtel zu erzielen. Auch hier fand eine Vermischung bei 60 U/min für zwei Minuten statt. Anschließend wurde ein Ausbreitmaß nach [DIN EN 12350-5] bestimmt, jeweils etwa zehn Minuten nach dem ersten Wasserkontakt der Gesteinskörnung. Ebenfalls wurde zu diesem Zeitpunkt die Frischbetonrohddichte [DIN EN 12350-6] sowie der Luftgehalt nach [DIN EN 12350-7] am Frischbeton ermittelt. Weitere Prüfungen des Ausbreitmaßes erfolgten nach 20, 60 und 90 Minuten. Entgegen der üblichen Vorgehensweise bei der Prüfung von Betonen wurde im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen der zeitliche Nullpunkt zur Beschreibung des Zeitpunkts der Frischbetonuntersuchungen nicht auf den ersten Wasserkontakt des Zements gelegt, sondern der Nullpunkt entsprach dem jeweils ersten Wasserkontakt der Gesteinskörnung. Bei den Betonzusammensetzungen mit ofentrockener Gesteinskörnung, bei denen zunächst die rezyklierte Gesteinskörnung vorgegast und anschließend erst Zement und das restliche Zugabewasser in den Mischer gegeben wurden, ist somit der zeitliche Nullpunkt zur Beschreibung des Prüfzeitpunkts beim Ausbreitmaß oder der Wassergehaltsbestimmung gegenüber der üblichen Angabe nach vorne verschoben. Zur Kennzeichnung dieser abweichenden Bezeichnungen wird bei der Angabe der zeitlichen Ausbreitmaße die übliche Kurzbezeichnung z. B. a_{10} für das Ausbreitmaß nach zehn Minuten, mit dem zusätzlichen Kürzel (w+g) versehen, was kennzeichnet, dass sich diese Angabe auf den Zeitpunkt des Kontakts zwischen Wasser und Gesteinskörnung bezieht. Bei den Referenzmischungen aus natürlichen Gesteinskörnungen wurde kein zusätzliches Wasser zugegeben, somit erfolgte der erste Wasserkontakt der Gesteinskörnung in diesem Fall erst mit der Zugabe von Zement und Zugabewasser.

Um der Gesteinskörnung im Beton die Möglichkeit zur Wasseraufnahme zu geben, gleichzeitig jedoch vor einem merklichen Ansteifen der Mischungen alle Versuche durchführen zu können, wurde festgelegt, dass nach einer Ruhezeit von 30 Minuten ab dem ersten Wasserkontakt der Gesteinskörnung ein Teil der Betonmischung wieder in grobe Gesteinskörnung und Mörtel getrennt wird. Es wurde, aufgrund der positiven Erfahrungen in [Domagala - 2015] und [Bello et al. - 2017] eine Trennung mit Hilfe von Sieben gewählt. Da die Gesteinskörnung 0/2 mm entsprechend der geltenden Regelwerke aus natürlichem Sand bestand, wurde festgelegt, dass an einer Teilmenge des hergestellten Betons über einen Trennschnitt bei 2 mm Maschenweite die grobe Gesteinskörnung vom restlichen Material < 2 mm, das im Folgenden als Mörtel bezeichnet wird, getrennt wird. An diesem abgetrennten Mörtel sollte die Beurteilung des wirklichen Wasserzementwerts möglich sein. Für den entwickelten Verfahrensablauf wurde eine magnetische Metallschüssel auf einem Rütteltisch platziert. Diese Metallschüssel war versehen mit einem zweiteiligen Siebsatz, bestehend aus einem Sieb mit 2 mm Maschenweite sowie einem darüber liegenden Vorsieb mit 8 mm Maschenweite. Durch die Vibration des Rütteltisches konnte der Mörtel von der Gesteinskörnung getrennt werden.

Am abgetrennten Mörtel fand eine Konsistenzprüfung als Setzmaß in Anlehnung an den „Hägermann-Versuch“ nach [DIN 18555-2], [DIN EN 13395-1] und [DIN EN 1015-3] sowie die Bestimmung der Frischmörtelrohddichte und des Frischmörtelluftgehalts statt.

Unmittelbar nachdem eine ausreichende Menge an Mörtel gewonnen war, erfolgte die Ermittlung des Wassergehalts am Zementmörtel, um somit den wirksamen Wasserzementwert ohne den Einfluss der Kernfeuchte der Gesteinskörnung berechnen zu können. Am extrahierten Mörtel wurde der Wassergehalt durch Trocknung ermittelt. Es wurden zwei unterschiedliche Prüfverfahren, in Anlehnung an Standardverfahren, die in Kapitel 3.2.2 erläutert wurden, festgelegt:

Verfahren 1 ist angelehnt an den Darrversuch. Die Probe des frischen Zementmörtels wurde unter ständigem Rühren über einer Gasflamme bis zur Massekonstanz getrocknet (vgl. Abbildung 3-6). Über die Massendifferenz zwischen feuchter und getrockneter, im Exsikkator abgekühlter Probe konnte auf den enthaltenen Wassergehalt geschlossen werden. Da sich wegen der geringen Probenmenge schon ein geringer Probenverlust sehr stark auf das Ergebnis des Versuchs auswirken würde, wurde nach einem Alternativverfahren gesucht, um das Risiko des Probenverlusts durch die mechanische Beanspruchung beim Rühren der Probe zu minimieren.



Abbildung 3-6: Verfahren 1 zur Wassergehaltsbestimmung in Anlehnung an den Darrversuch

In **Verfahren 2** wurde, in Anlehnung an das Trockenverfahren gemäß [NEN - 2006], die gewonnene Probe des frischen Zementmörtels auf einem Blech bei 400°C im Ofen ohne Rühren getrocknet (vgl. Abbildung 3-7) und nach dem Abkühlen im Exsikkator die Trockenmasse ermittelt.

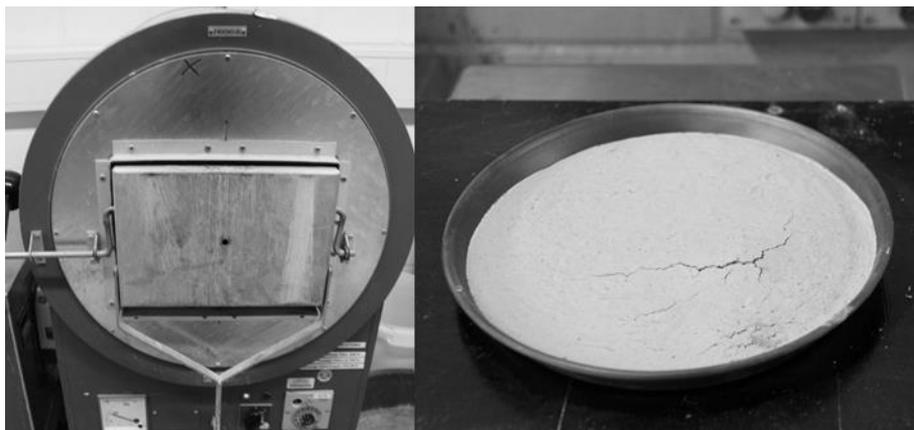


Abbildung 3-7: Verfahren 2 zur Wassergehaltsbestimmung im Ofen bei 400°C in Anlehnung an [NEN - 2006]

Nach 90 Minuten wurden aus dem verbliebenen Beton und dem gewonnenen Mörtel jeweils Probekörper zur Ermittlung der Festbeton- und Festmörtelkennwerte hergestellt. Aus dem extrahierten Mörtel wurden insgesamt sechs Prismen der Kantenlänge 40x40x160 mm hergestellt. Der Mörtel wurde hierzu in Prismenschalungen aus Stahl eingefüllt und aufgrund der fließfähigen Konsistenz und der bereits verfahrensbedingten Verdichtung durch den Trennvorgang nicht zusätzlich verdichtet. Hergestellt wurden je Betonzusammensetzung sechs Mörtelprismen. Die Probekörper wurden gemäß [DIN EN 196-1] bis zum Entformen nachbehandelt und anschließend bis zur Prüfung unter Wasser gelagert. Ermittelt wurde an je drei Prismen pro Prüftag gemäß [DIN EN 196-1], die Biegezug- und Mörteldruckfestigkeit nach sieben und 28 Tagen. Aus der zweiten Teilmenge der Mischung, die nicht in Gesteinskörnung und Mörtel separiert, sondern als Beton verblieben war, wurden sechs Würfel der Kantenlänge 150 mm gemäß [DIN EN 12390-3] zur Prüfung der Betondruckfestigkeit entsprechend [DIN EN 12390-3] nach sieben und 28 Tagen an je drei Probekörpern hergestellt. Die hergestellten Probekörper wurden bis zum Entformen nach 24 h bei $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ mit Folie vor Austrocknung geschützt und anschließend bis zum Alter von sieben Tagen in Wasser $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$, danach in einem Klimaraum mit einer Temperatur von $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ und $(65\pm 5)\%$ relativer Luftfeuchte gelagert. Außerdem wurden aus dem Beton weitere drei Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm zur Prüfung des Elastizitätsmoduls gemäß [DIN EN 12390-13] sowie der Spaltzugfestigkeit gemäß [DIN EN 12390-6] nach 28 Tagen hergestellt. Die Probekörper wurden analog zu den Betonwürfeln hergestellt, nachbehandelt und entformt. Für die Betonzyylinder erfolgte die Lagerung bis zur Prüfung in Wasser bei $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$.

In Abbildung 3-8 ist der gewählte Versuchsablauf schematisch zusammengefasst.

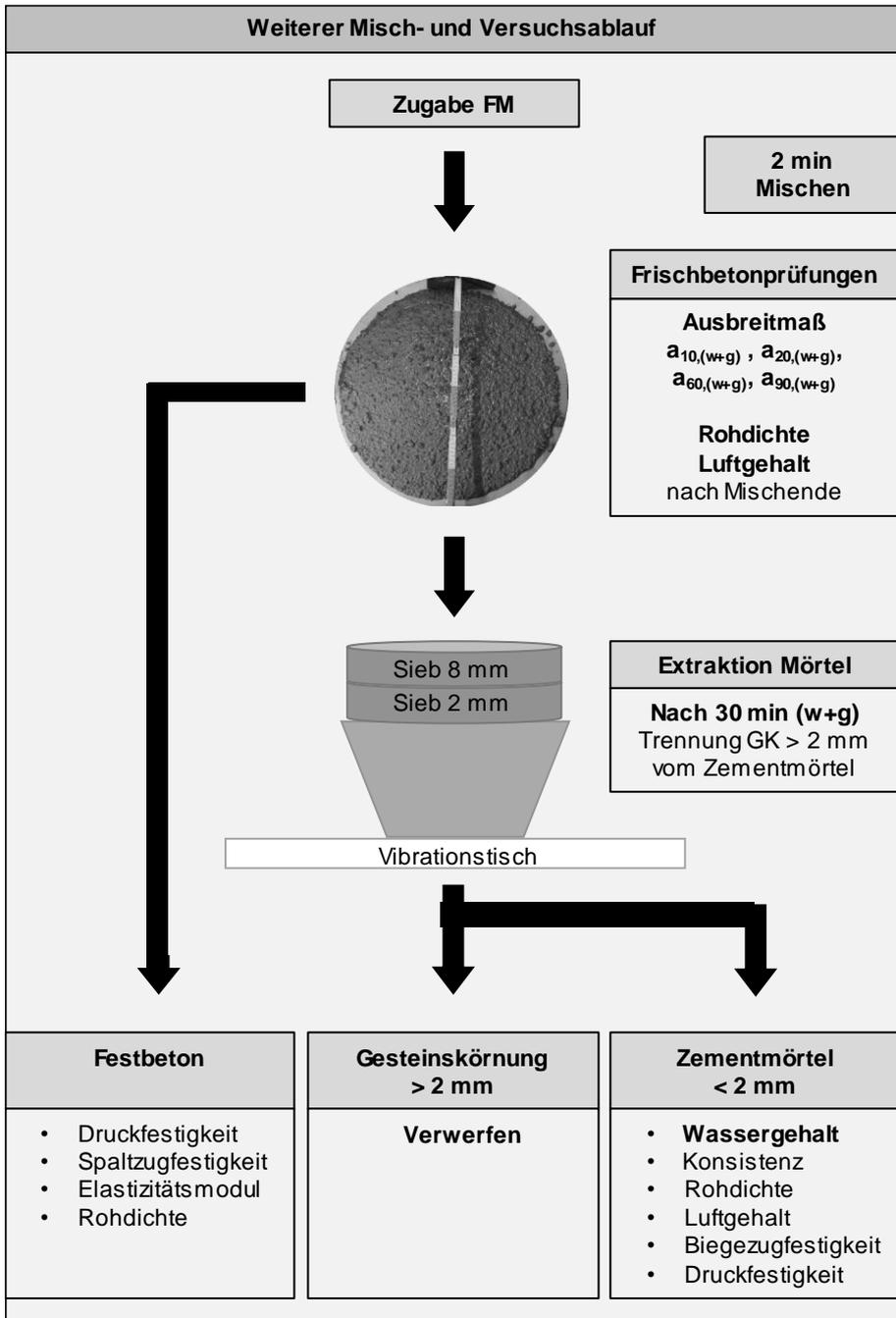


Abbildung 3-8: Ablaufschema der Betonagen Teil 2

3.3.2.3 Beschreibung der Berechnungsmethodik zum wirksamen Wasserzementwert

Der wirksame Wasserzementwert als Massenverhältnis zwischen dem im Zementmörtel vorhandenen Wasser und dem Zement kann lediglich indirekt ermittelt werden. Über alle zur Verfügung stehenden Informationen zur sonstigen stofflichen Zusammensetzung des Mörtels (Frishmörtelrohddichte, Frishmörtelluftgehalt, bekannter Feststoffgehalt) wurde abschließend der wirksame Wasserzementwert berechnet.

1. Aus der im Versuch ermittelten Frishmörtelrohddichte wird der ebenfalls im Versuch ermittelte Wassergehalt der frischen Mörtelprobe auf einen Stoffraum von 1m³ Mörtel bezogen.

$$w_{\text{Mörtel}} = (M_1 - M_2) / M_1 \cdot 1000 \cdot \rho_{\text{rd,ist,Mörtel}} \quad (3-1)$$

mit

$w_{\text{Mörtel}}$ Wassergehalt im Mörtel in kg/m³ Mörtel

M_1 Masse Mörtelprobe frisch in kg

M_2 Masse Mörtelprobe getrocknet in kg

$\rho_{\text{rd,ist,Mörtel}}$ Rohddichte Mörtel in kg/dm³

2. Aus der Stoffraumrechnung werden alle festen Ausgangsstoffe ≤ 2 mm massenteilig und als Stoffvolumen aufsummiert. Die Bestandteile des extrahierten Mörtels sind: Gesteinskörnung ≤ 2 mm, Feststoff aus dem zugegebenen Fließmittel, Zement

$$M_{\text{solid}} = z + g_{<2\text{ mm}} + (FM \cdot fm_{\text{solid}}) \quad (3-2)$$

mit

M_{solid} Summe Masse Feststoff ≤ 2 mm im Mörtel in kg/m³ Beton

z Einwaage Zement in kg/m³ Beton

$g_{<2\text{ mm}}$ Einwaage Sand 0/2 mm und Unterkorn ≤ 2 mm in kg/m³ Beton

FM Einwaage Fließmittel in kg/m³ Beton

fm_{solid} Feststoffanteil Fließmittel in M.-%

$$V_{\text{solid, Mörtel}} = \frac{z}{\rho_{\text{rd,z}}} + \frac{g_{<2\text{ mm}}}{\rho_{\text{rd,g}<2\text{ mm}}} + \frac{(FM \cdot fm_{\text{solid}})}{\rho_{\text{rd,FM}}} \quad (3-3)$$

mit

$V_{\text{solid, Mörtel}}$ Summe Stoffraum Feststoffe Mörtel in dm³/ m³ Beton

z Einwaage Zement in kg/m³ Beton

$\rho_{rd,z}$	Rohdichte Zement in kg/dm ³
$g_{<2mm}$	Einwaage Sand 0/2 mm und Unterkorn < 2 mm in kg/m ³ Beton
$\rho_{rd,g<2mm}$	Rohdichte Sand 0/2 mm und Unterkorn < 2 mm in kg/dm ³
FM	Einwaage Fließmittel in kg/m ³ Beton
fm_{solid}	Feststoffanteil Fließmittel in M.-%
$\rho_{rd,FM}$	Rohdichte Fließmittel

3. Die flüssigen Bestandteile des Mörtels werden als Massenteile und als Stoffvolumen aufsummiert (Wasser und Flüssigkeitsanteil des Fließmittels).

$$M_{liquid} = W + (FM \cdot fm_{liquid}) \quad (3-4)$$

mit

M_{liquid}	Summe Masse Flüssigkeiten Mörtel in kg/m ³ Beton
W	Einwaage Wasser in kg/m ³ Beton
FM	Einwaage Fließmittel in kg/m ³ Beton
fm_{liquid}	Flüssigkeitsanteil Fließmittel in M.-%

$$V_{liquid, \text{Mörtel}} = \frac{W}{\rho_w} + \frac{(FM \cdot fm_{liquid})}{\rho_{rd,FM}} \quad (3-5)$$

mit

$V_{liquid, \text{Mörtel}}$	Summe Stoffraum Flüssigkeiten Mörtel in dm ³ /m ³ Beton
W	Einwaage Wasser in kg/m ³ Beton
ρ_w	Dichte Wasser in kg/dm ³
FM	Einwaage Fließmittel in kg/m ³ Beton
fm_{liquid}	Flüssigkeitsanteil Fließmittel in M.-%
$\rho_{rd,FM}$	Rohdichte Fließmittel in kg/dm ³

4. Die Summe der Massen der flüssigen Bestandteile des Mörtels (Wasser und Flüssigkeitsanteil des Fließmittels), dividiert durch den dosierten Zement ergibt den initialen rechnerischen Wasserzementwert.

$$\left(\frac{w}{z}\right)_{DOS} = \frac{M_{liquid}}{z} \quad (3-6)$$

mit

$\left(\frac{w}{z}\right)_{DOS}$	initialer Wasserzementwert
----------------------------------	----------------------------

M_{liquid}	Summe Masse Flüssigkeiten Mörtel in kg/m^3 Beton
z	Einwaage Zement in kg/m^3 Beton

5. Aus der Summe der festen und flüssigen Bestandteile des Mörtels sowie des im Versuch ermittelten Luftgehalts des Mörtels ergibt sich Mörtelanteil je m^3 Beton.

$$M_{\text{Mörtel}} = M_{\text{liquid}} + M_{\text{solid}} \quad (3-7)$$

mit

$M_{\text{Mörtel}}$	Masse Mörtel in kg/m^3 Beton
M_{liquid}	Summe Masse Flüssigkeiten Mörtel in kg/m^3 Beton
M_{solid}	Summe Masse Feststoffe Mörtel in kg/m^3 Beton

$$V_{\text{Mörtel}} = V_{\text{liquid, Mörtel}} + V_{\text{solid, Mörtel}} + p \quad (3-8)$$

mit

$V_{\text{Mörtel}}$	Stoffraum Mörtel in dm^3/m^3 Beton
$V_{\text{liquid, Mörtel}}$	Summe Stoffraum Flüssigkeiten Mörtel in dm^3/m^3 Beton
$V_{\text{solid, Mörtel}}$	Summe Stoffraum Feststoffe Mörtel in dm^3/m^3 Beton
p	Luftgehalt Mörtel in dm^3/m^3 Beton

$$m_{\text{Beton}} = V_{\text{Mörtel}}/1000 \quad (3-9)$$

mit

m_{Beton}	Mörtelanteil im Beton in Vol.-%
$V_{\text{Mörtel}}$	Stoffraum Mörtel in dm^3/m^3 Beton

6. Aus den berechneten Werten kann die Sollrohndichte des Mörtels berechnet und mit der im Versuch ermittelten Ist-Rohndichte verglichen werden.

$$\rho_{\text{rd, soll, Mörtel}} = M_{\text{Mörtel}}/V_{\text{Mörtel}} \quad (3-10)$$

mit

$\rho_{\text{rd, soll, Mörtel}}$	Sollrohndichte Mörtel in kg/dm^3
$M_{\text{Mörtel}}$	Masse Mörtel in kg/m^3 Beton
$V_{\text{Mörtel}}$	Stoffraum Mörtel in dm^3/m^3 Beton

7. Aus dem zugegebenen Zement je m³ Beton und dem ermittelten Mörtelvolumen je m³ Beton kann der Zementgehalt in kg je m³ Mörtel bestimmt werden.

$$z_{\text{Mörtel}} = z / V_{\text{Mörtel}} \cdot 1000 \quad (3-11)$$

mit

$z_{\text{Mörtel}}$	Zementgehalt im Mörtel in kg/m ³ Mörtel
z	Einwaage Zement in kg/m ³ Beton
$V_{\text{Mörtel}}$	Stoffraum Mörtel in dm ³ /m ³ Beton

8. Durch Division des ermittelten Wassergehalts je m³ Mörtel durch die bestimmte Zementmasse je m³ Mörtel ergibt sich der gesuchte wirksame Wasserzementwert im extrahierten Mörtel.

$$w/z_{\text{ist}} = w_{\text{Mörtel}} / z_{\text{Mörtel}} \quad (3-12)$$

mit

w/z_{ist}	wirksamer Wasserzementwert im Mörtel
$w_{\text{Mörtel}}$	Wassergehalt im Mörtel in kg/m ³ Mörtel
$z_{\text{Mörtel}}$	Zementgehalt im Mörtel in kg/m ³ Mörtel

3.3.2.4 Validierung der gewählten Prüfverfahren und der gewählten Vorgehensweise

Zur Validierung der gewählten Prüf- und Auswertungsverfahren zur Ermittlung des wirksamen Wasserzementwerts im Zementmörtel wurde eine Überprüfung anhand von Normmörtel vorgenommen.

Es wurde gemäß [DIN EN 196-1] ein Normmörtel hergestellt und analog zur geplanten Vorgehensweise in den Versuchen am Zementmörtel der Wassergehalt nach den Verfahren 1 und 2 gemäß Kapitel 3.3.2.2 ermittelt.

Tabelle 3-2: Ergebnisse der Verfahrensüberprüfung an Normmörtel

Prüfverfahren	Verfahren 1 - in Anlehnung an das Darrverfahren	Verfahren 2 - Trockenverfahren in Anlehnung an NEN 5960
Wasserzementwert SOLL	0,50	0,50
Wasserzementwert w/z_{ist}	0,497	0,504

Für beide Prüfverfahren ergaben sich gemäß Tabelle 3-2 mit dem Sollwert übereinstimmende Messwerte, da der Wasserzementwert auf zwei Nachkommastellen genau

angegeben wird und die geringfügigen Abweichungen der Prüfergebnisse in der dritten Nachkommastelle deutlich werden. Somit kann davon ausgegangen werden, dass mit beiden Prüfverfahren der tatsächliche Wasserzementwert im extrahierten Zementmörtel präzise ermittelt werden kann und die Prüfergebnisse im Rahmen verfahrensbedingter Streuungen als korrekt angenommen werden können.

Als zusätzliche Überprüfung wurde die vollständige in Kapitel 3.3.2.3 beschriebene Vorgehensweise an Referenzbetonen aus natürlicher Gesteinskörnung getestet und ausgewertet. Als Referenz bei der Mischungsberechnung diente ein Rheinkies. Anhand dieser Betonzusammensetzung wurde der Versuchsablauf überprüft. Zusätzlich wurde eine weitere Referenzkörnung aus Mikrodiorit verwendet, da rezyklierte Gesteinskörnung aufgrund des Aufbereitungsprozesses eine gegenüber natürlichem Rundkorn deutlich größere Oberfläche besitzt und deshalb hinsichtlich ihres Wasseranspruchs besser mit gebrochener natürlicher Gesteinskörnung zu vergleichen ist. Die gesamten ermittelten Eingangsparameter für die Berechnungsmethodik nach Kapitel 3.3.2.3 sowie die Auswertung können in Anhang B, Tabelle B - 9 und Tabelle B - 10 nachvollzogen werden.

Tabelle 3-3 zeigt den Vergleich zwischen dem angestrebten und dem im Versuch ermittelten wirksamen Wasserzementwert. Die Ausgangsmischung wurde für natürlichen Kies und dessen Wasseranspruch erstellt. An dieser Kies-Referenzmischung konnte mit der gewählten Vorgehensweise am extrahierten Zementmörtel angestrebte wirksame Wasserzementwert von 0,53 auch im Beton (auf zwei Nachkommastellen gerundet) übereinstimmend nachgewiesen werden. Ebenfalls geht aus Tabelle 3-3 hervor, dass auch das für die gebrochene Referenzkörnung ermittelte Ergebnis des wirksamen Wasserzementwerts dem zu erwartenden Wert entspricht. Hier wurde gemäß den Erläuterungen in Kapitel 3.2.1 angenommen, dass die gebrochene Körnung 2/16 mm aufgrund der größeren Oberfläche einen um 10 l/m^3 erhöhten Wasseranspruch besitzt. Da der Zementgehalt gegenüber der Mischung mit natürlichem Kies nicht verändert wurde, ergibt sich aus dem erhöhten Wasseranspruch von gebrochenem Korn somit eine Verringerung des Wasserzementwerts. Somit konnte auch für nicht saugende Körnung die gewählte Vorgehensweise validiert werden.

Tabelle 3-3: Frischmörtel- und Frischbetonergebnisse der Referenzzmischungen mit nicht saugender Körnung

Probenbezeichnung	Kies	Splitt
Art der Gesteinskörnung	Kies	Splitt
Zusatzwasser in kg/m ³	0,00	0,00
Gesamtwasser in l/m ³ Beton	182,0	182,0
Verdichtungsmaß vor FM	1,21	1,37
Frischbetonrohddichte in kg/m ³	2350	2340
Setzmaß Mörtel in mm	240	210
Mörtelrohddichte in kg/m ³	2171	2203
w/z _{ist} Mörtel (0,53	0,50
w/z _{SOLL}	0,53	0,50

3.3.2.5 Fazit zur Eignung der gewählten Vorgehensweise

Wie in Kapitel 3.3.2.4 gezeigt, ist es mit dem erarbeiteten Versuchsaufbau möglich, den Wasserzementwert von Frischbeton im Versuch für Betone mit natürlichen Gesteinskörnungen zu ermitteln. Dabei entspricht für diese nicht saugende Körnung das im Versuch bestimmte Ergebnis dem errechneten Wasserzementwert. Es konnte außerdem anhand von Normmörteln mit bekannter Zusammensetzung gezeigt werden, dass mit beiden erarbeiteten Prüfverfahren der Wassergehalt von Mörtel gleichermaßen genau geprüft werden kann. Auch die Eignung der erarbeiteten Auswertemethodik zur Berechnung des Wasserzementwerts aus den im Versuch ermittelten Kennwerten Wassergehalt, Frischmörtelrohddichte und Frischmörtelluftgehalt wurde anhand der Validierung in Kapitel 3.3.2.4 bestätigt.

Abschließend kann gefolgert werden, dass der konzipierte Versuchsaufbau grundsätzlich dazu geeignet ist, die Zielfrage zu beantworten und auch für rezyklierte Gesteinskörnung den wirksamen Wasserzementwert in Abhängigkeit der variierten Parameter Zusatz-/Gesamtwasser sowie Konsistenz bestimmen und bewerten zu können.

3.3.3 Ergebnisse und Diskussion

3.3.3.1 Validierung der Ergebnisse

Die Gesamtergebnisse zu allen durchgeführten Untersuchungen an Frisch- und Festbeton sowie den zugehörigen, abgetrennten Frisch- und Festmörteln sind in Anhang B.1 zusammengefasst. Nachfolgend wird zunächst eine Analyse der Versuchsdaten durchgeführt, um systematische Fehler zu identifizieren und nur diejenigen Versuchsergebnisse in die Auswertung mit aufzunehmen, bei denen Fehler aus der Versuchsdurchführung sicher ausgeschlossen werden können. Da zur Beantwortung der Zielfrage dieser Arbeit eine Vielzahl von experimentell ermittelten Messgrößen in Kombination herangezogen werden müssen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne Betonsorten aufgrund von Fehlern in einzelnen Messverfahren oder dem Versuchsablauf nicht auszuwerten sind. Die Mischungen, die anhand der vorgenommenen Analyse als in einzelnen Messgrößen fehlerhaft identifiziert werden, können in ihrer Gesamtheit nicht bewertet werden und werden deshalb von der nachfolgenden Auswertung und Diskussion ausgeschlossen.

Zur grundsätzlichen Plausibilitätsprüfung und Fehlersuche werden die Ergebnisse aus den durchgeführten Versuchen in Bezug auf erwiesene Zusammenhänge in Form von Annahmen überprüft. Anhand jeder der nachfolgenden Thesen können Mischungen identifiziert werden, welche hinsichtlich einzelner Prüfergebnisse nicht plausibel erscheinen. Über die Kombination von zwei oder mehr dieser unabhängigen Annahmen können so Betone aus der Auswertung ausgeschlossen werden, die sonst die Beantwortung der Zielfrage verfälschen würden.

Annahme 1: Abhängigkeit der Konsistenz von der Wasserzugabe

Das erste Kriterium, anhand dessen die Versuchsergebnisse überprüft werden sollen, basiert auf dem allgemein anerkannten Zusammenhang zwischen der Konsistenz zweier sonst gleich zusammengesetzter Betone und der jeweiligen Wasserzugabe. Da alle Betone, abgesehen von der Gesteinskörnungsart, bei der Prüfung des Verdichtungsmaßes gleich zusammengesetzt waren, sollte gelten:

Annahme 1: Bei sonst gleicher Zusammensetzung und gleicher Gesteinskörnung wird die Konsistenz mit steigendem Wassergehalt weicher.

Bei Betonzusammensetzungen, die hinsichtlich ihres Verdichtungsmaßes nicht mit Annahme 1 konform sind, muss davon ausgegangen werden, dass die tatsächliche Betonzusammensetzung ggf. nicht dem Soll-Zustand entspricht.

In der Versuchsanordnung wurde das Verdichtungsmaß gemäß [DIN EN 12350-4] aller Betonmischungen vor der Zugabe des Fließmittels geprüft, um diesen grundsätzlichen Zusammenhang als Bewertungskriterium heranziehen zu können. Das Verdichtungsmaß ist umso kleiner, je weicher der Beton.

Tabelle 3-4 und Abbildung 3-9 stellen die gemessenen Verdichtungsmaße in Abhängigkeit vom Gesamtwassergehalt der Mischungen dar.

Tabelle 3-4: Verdichtungsmaße der Betonmischungen in Abhängigkeit vom Gesamtwasser

Probenbezeichnung	M_{liquid} in l/m^3 Beton	Verdichtungsmaß vor FM
Kies	184,1	1,21
Splitt	183,6	1,37
Typ 1 (+10%)	201,9	1,48
Typ 1 (+12%)	205,6	1,34
Typ 1 (+12%)-Wdh.	205,8	1,36
Typ 1 (+14%)	209,7	1,38
Typ 1 (+14%)-Wdh.	210,1	1,37
Typ 1 (+17%)	214,0	1,37
Typ 1 (+17%)-Wdh.	214,0	1,28
Typ 2 (+16%)	213,4	1,41
Typ 2 (+18%)	217,2	1,34
Typ 2 (+20%)	220,8	1,31
Typ 2 (+20%)-Wdh.	220,7	1,30
Typ 2 (+20%)-2. Wdh.	221,2	1,33
Typ 2 (+23%)	224,8	1,28
Typ 2 (+25%)	228,9	1,22

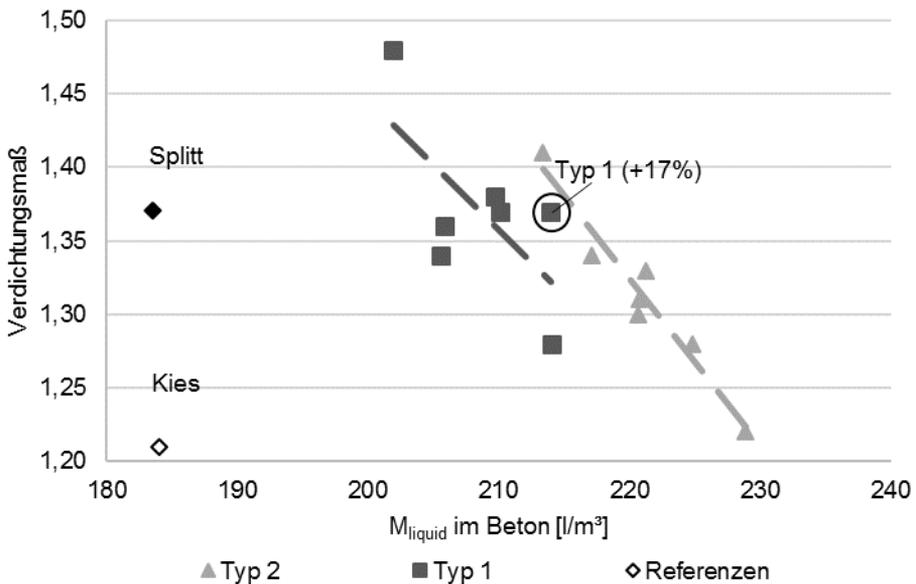


Abbildung 3-9: Verdichtungsmaße der Betonmischungen in Abhängigkeit vom Gesamtwasser

Die Ergebnisse zeigen grundsätzlich die zu erwartende Tendenz des sinkenden Verdichtungsmaßes bei steigendem Gesamtwasser. Auch für wiederholte Mischungen mit gleichem Gesamtwassergehalt ergeben die Versuche erwartungsgemäß ein weitgehend übereinstimmendes Verdichtungsmaß. Gemäß [DIN EN 206-1] und [DIN 1045-2], gilt für den hier relevanten Bereich der Verdichtungsmaße eine zulässige Abweichung von $\pm 0,08$ (Verdichtungsmaß $\leq 1,26$) bis $\pm 0,10$ (Verdichtungsmaß $> 1,26$) vom Angestrebten Zielwert. Dieser Toleranzbereich wird hilfsweise als Bewertungskriterium für die Versuchsergebnisse herangezogen. Auffällig sind die Betone mit je ca. 214 l/m³ Gesamtwasser („Typ 1 (+17%)“ und „Typ 1 (+17%)-Wdh.“), bei denen der Unterschied im Verdichtungsmaß trotz gleicher Mischungszusammensetzung den Toleranzbereich gemäß [DIN EN 206-1] und [DIN 1045-2] um ein Vielfaches übersteigt. Die übrigen mehrfach hergestellten Betone erscheinen vor dem Hintergrund der herangezogenen Bewertungsgrundlage alle Unterschiede zwischen mehrfach hergestellten Betonen gleicher Zusammensetzung plausibel. Der Beton „Typ 1 (+17%)“ entspricht hinsichtlich seines Verdichtungsmaßes im Kontext der übrigen Betone nicht Annahme 1, was somit auf Abweichungen in der Zusammensetzung, der Herstellung oder der Prüfung zurückgeführt werden muss. Zur abschließenden Beurteilung, ob tatsächlich bei Beton „Typ 1 (+17%)“ von einer fehlerhaften Betonzusammensetzung ausgegangen werden muss, wird anhand weiterer unabhängiger Messgrößen die Auffälligkeit dieser Betonzusammensetzung bewertet. So kann ausgeschlossen werden, dass das ermittelte Verdichtungsmaß aufgrund von Messfehlern zum Ausschluss der Mischung führt. Bei den Referenzbetonen ist die Spanne der geprüften Verdichtungsmaße trotz gleichen Gesamtwassers größer als die zulässigen Abweichungen gemäß [DIN EN 206-1] und [DIN 1045-2], diese Unterschiede sind jedoch dadurch zu erklären, dass eine der Mischungen mit natürlichem Kies, die andere mit natürlichem Splitt hergestellt wurde. Da jedoch gebrochene Körnung bekanntermaßen einen höheren Wasseranspruch besitzt als Rundkorn, ist es plausibel, dass die Kiesmischung bei gleicher Wasserdosierung ein deutlich niedrigeres Verdichtungsmaß aufweist als der Splittbeton.

Annahme 2: Gleiche Rohdichten bei gleicher Zusammensetzung

Die zweite Hypothese, anhand der die Versuchsergebnisse validiert werden sollen, basiert auf der Stoffraumrechnung anhand derer die Mischanweisung erstellt wird. Werden zwei Betone oder Mörtel auf Basis derselben Mischanweisung hergestellt, so sollten ihre Rohdichten ebenfalls übereinstimmen. Einzige Einflussgröße unter Annahme einer korrekten Einwaage aller Bestandteile ist die enthaltene Luft.

Annahme 2: Bei mehrfach hergestellten Betonen sind die Mörtelrohichte, sowie die Frischbetonrohichte nach [DIN EN 12350-6] von Charge zu Charge ähnlich, sofern die Luftgehalte annähernd gleich sind.

Annahme 2 stellt das zweite unabhängige Kriterium dar, mit dem auf eine nicht dem Soll entsprechende Betonzusammensetzung für die gemäß Annahme 1 auffälligen Betone geschlossen werden kann. Sind zwischen mehrfach hergestellten Betonen, die hinsichtlich des Verdichtungsmaßes bei Annahme 1 kritisch bewertet wurden, unter Annahme 2 keine Auffälligkeiten hinsichtlich der Rohdichten und des Luftgehalts festzustellen, so kann gefolgert werden, dass das Verdichtungsmaß fehlerhaft ermittelt wurde. Fallen Betone, welche bereits unter Annahme 1 Unstimmigkeiten zeigten auch

hinsichtlich Annahme 2 auf, so wird dies als Bestätigung einer fehlerhaften Betonzusammensetzung gewertet und die Betonzusammensetzung von der Auswertung ausgeschlossen.

Gleichzeitig identifiziert die Prüfung der Annahme 2 Betone, bei denen ggf. in der Prüfung der Rohdichte und/oder des Luftgehalts von Messfehlern ausgegangen werden muss. Da die Frischmörtelrohddichte und der Luftgehalt des Frischmörtels das Berechnungsergebnis des wirksamen Wasserzementwerts maßgeblich beeinflussen und verfälschen, können nur Betone ausgewertet werden, deren gesamter Datensatz für den Wassergehalt, die Rohdichte und den Luftgehalt des Mörtels vollständig und plausibel ist.

Tabelle 3-5 und Abbildung 3-10 zeigen die Rohdichten, die Luftgehalte und die Konsistenz der Betone, die mehrfach hergestellt wurden.

Die Wiederholbarkeit der Rohdichtebestimmung wird in [DIN EN 12350-6] mit $\pm 15 \text{ kg/m}^3$ für Wiederholbedingungen angegeben. Zur Beurteilung der Messwertabweichungen wird diese Präzisionsangabe für das Prüfverfahren herangezogen. Die Wiederholbarkeit ist gemäß [DIN EN 12350-6] derjenige Wert, unterhalb dessen man die absolute Differenz zwischen zwei einzelnen Prüfergebnissen, die man mit demselben Verfahren an identischem Prüfmaterial und unter denselben Bedingungen (derselbe Bearbeiter, dasselbe Gerät, dasselbe Labor, kurze Zeitspanne) erhalten hat, mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit von 95 % zu erwarten hat. Dass gemäß [DIN EN 12350-6] das Ergebnis der Rohdichtebestimmung auf 10 kg/m^3 zu runden ist verdeutlicht ebenfalls, dass Abweichungen im Messergebnis in dieser Größenordnung normal sind.

Tabelle 3-5: Vergleich der Rohdichten und Luftgehalte bei gleichen Zusammensetzungen

Probenbezeichnung	Luftgehalt Frischbeton [Vol.-%]	Frischbetonroh-dichte [kg/m ³]	Luftgehalt Frischmörtel [Vol.-%]	Frischmörtelroh-dichte [kg/m ³]	Ausbreitmaß a _{10 (w+g)} [mm]
Typ 1 (+12%)	1,0	2300	1,6	2210	500 (F4)
Typ 1 (+12%)-Wdh.	0,9	2320	1,2	2220	560 (F5)
Δ	0,1	20	0,4	10	
Typ 1 (+14%)	1,1	2290	1,2	2220	495 (F4)
Typ 1 (+14%)-Wdh.	0,8	2310	1,3	2200	570 (F5)
Δ	0,3	20	0,1	20	
Typ 1 (+17%)	0,8	2300	1,5	2220	580 (F5)
Typ 1 (+17%)-Wdh.	1,5	2280	1,5	2210	620 (F5)
Δ	0,7	20	0	10	
Typ 2 (+20%)	1,3	2300	1,6	2150	635 (F6)
Typ 2 (+20%)-Wdh	1,5	2280	1,6	2190	575 (F5)
Δ	0,25	20	0	40	
Typ 2 (+20%)-Wdh.	1,5	2280	1,6	2190	605 (F5)
Typ 2 (+20%)-2. Wdh.	1,9	2240	2,0	2200	575 (F5)
Δ	0,4	40	0,4	10	
Typ 2 (+20%)	1,3	2300	1,6	2150	635 (F6)
Typ 2 (+20%)-2. Wdh.	1,9	2230	2,0	2200	575 (F5)
Δ	0,65	70	0,4	50	

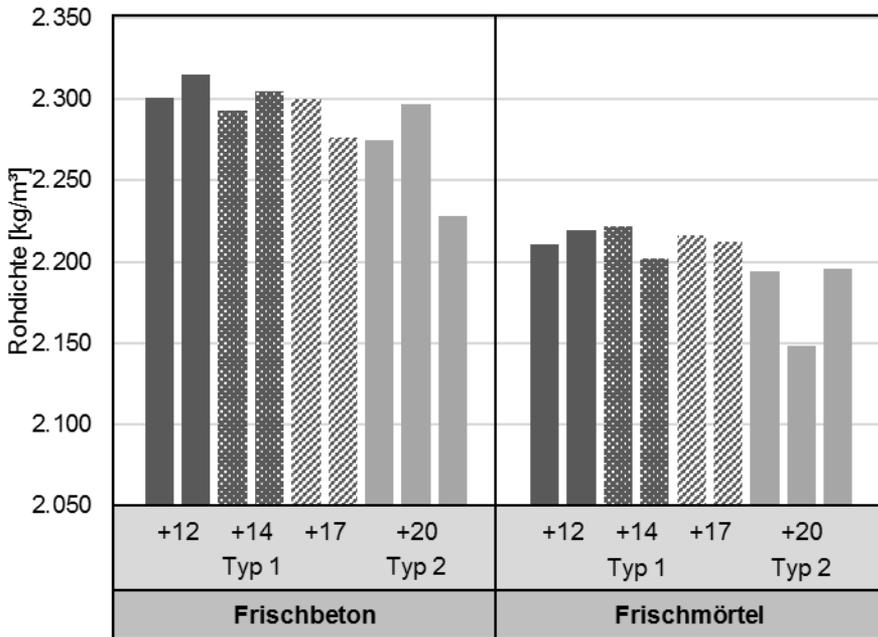


Abbildung 3-10: Vergleich der Rohdichten bei gleichen Zusammensetzungen

Der Annahme 2 widersprechen die Proben „Typ 1 (+17%) und Typ 1 (+17%)-Wdh.“ sowie „Typ 2 (+20%), Typ 2 (+20%)-Wdh. und Typ 2 (+17%)-2. Wdh.“. Bei den Betonen mit der Bezeichnung „Typ 1 (+17%)“ können stark unterschiedliche Luftgehalte als mögliche Ursache für die Abweichungen zwischen den Rohdichten der beiden hergestellten Mischungen eine Rolle spielen. Gleichzeitig deuten große Unterschiede im Luftgehalt bei planmäßig gleich zusammengesetzten Betonen auf Abweichungen in der Betonzusammensetzung hin. Die Konsistenzklasse beider Betone war gleich, sodass die Unterschiede hinsichtlich der Luftgehalte und der Rohdichten nicht auf Konsistenzunterschiede zurückgeführt werden können. Die gleichzeitige Auffälligkeit des Betons „Typ 1 (+17%)“ in den beiden unabhängigen Annahme 1 und 2 lässt auf Fehler in der Betonzusammensetzung schließen. Der Beton „Typ 1 (+17%)“ wird aus diesem Grund von der Auswertung ausgeschlossen und in den nachfolgenden Betrachtungen nicht weiter berücksichtigt.

Der Rohdichtenunterschied des Frischmörtels zwischen „Typ 2 (+20%)“ und „Typ 2 (+20%)-Wdh.“ widerspricht ebenfalls der Annahme 2 und kann nicht mit deutlich abweichenden Luftgehalten erklärt werden. Ebenso ist die Frischmörtelrohddichte der Mischung „Typ 2 (+20%)-Wdh.“ nicht plausibel. Der Wert liegt deutlich unterhalb der beiden gleich zusammengesetzten Betone. Auch ist kein deutlich erhöhter Frischmörtelluftgehalt festzustellen, der die verringerte Rohddichte erklären könnte. Für die Betone „Typ 2 (+20%)“ und „Typ 2 (+20%)-Wdh.“ ist von Fehlern in der Ermittlung der Frischmörtelrohddichte auszugehen. Sollte dies der Fall sein, so ist kein vollständiger Datensatz zur Auswertung des Wasserzementwerts vorhanden, was die Betone für die Beantwortung der Zielfragestellung unbrauchbar macht. Wenn fehlerhafte Frischmörtelrohddichten in die Berechnung des wirksamen Wasserzementwerts eingehen, so wird der wirksame Wasserzementwert ebenfalls nicht plausibel sein. Durch die

Bewertung des wirksamen Wasserzementwerts anhand einer weiteren unabhängigen Annahme kann eine abschließende Beurteilung zu mutmaßlich fehlerhaften Frischmörtelrohdichten erfolgen.

Annahme 3: Abhängigkeit der Konsistenz vom Wasserzementwert

Das dritte Kriterium, anhand dessen die Versuchsergebnisse anknüpfend an Annahme 1 überprüft werden sollen, basiert ebenfalls auf dem allgemein anerkannten Zusammenhang zwischen der Konsistenz zweier sonst gleich zusammengesetzter Betone und der jeweiligen Wasserzugabe. Die Wasserzugabe bestimmt den Wasserzementwert. Die ermittelten Wasserzementwerte sollten proportional zum Verdichtungsmaß der Betone sein, sofern die Ergebnisse plausibel sind. Da alle Betone bei der Prüfung des Verdichtungsmaßes, abgesehen von der Gesteinskörnungsart, gleich zusammengesetzt waren, sollte gelten:

Annahme 3: Bei sonst gleicher Zusammensetzung und gleicher Gesteinskörnung wird die Konsistenz mit steigendem Wasserzementwert weicher.

Mit Hilfe von Annahme 3 können somit unter den in Annahme 2 auffälligen Betonen diejenigen Betone identifiziert werden, bei denen durch Fehler in der Bestimmung der Frischmörtelrohdichte oder dem Frischmörtelluftgehalt die Berechnung des Wasserzementwerts verfälscht wird. Gleichzeitig fallen hier auch Mischungen auf, die nicht mehrfach hergestellt wurden und bei denen deshalb falsche Rohdichten oder Luftgehalte nicht unmittelbar identifiziert werden können, weil kein „Zwilling“ zum Vergleich existiert.

In der Versuchsanordnung wurde das Verdichtungsmaß gemäß [DIN EN 12350-4] aller Betonmischungen vor der Zugabe des Fließmittels geprüft, um diesen grundsätzlichen Zusammenhang als Bewertungskriterium heranziehen zu können. Das Verdichtungsmaß ist umso kleiner, je weicher der Beton. Dies sollte sich, sofern die Wasserzementwerte aus den Versuchen zur Bewertung als plausibel herangezogen werden können, in einem sinkenden Wasserzementwert mit steigendem Ausbreitmaß, bzw. einem steigenden Wasserzementwert mit sinkendem Verdichtungsmaß zeigen.

Tabelle 3-6 und Abbildung 3-11 stellen die gemessenen Verdichtungsmaße in Abhängigkeit von den ermittelten Wasserzementwerten der Mischungen dar.

Tabelle 3-6: Verdichtungsmaße der Betonmischungen in Abhängigkeit vom Gesamtwasser

Probenbezeichnung	Wasserzementwert w/z_{ist}	Verdichtungsmaß vor FM
Kies	0,53	1,21
Splitt	0,50	1,37
Typ 1 (+10%)	0,54	1,48
Typ 1 (+12%)	0,55	1,34
Typ 1 (+12%)-Wdh.	0,50	1,36
Typ 1 (+14%)	0,55	1,38

Probenbezeichnung	Wasserzementwert w/z_{ist}	Verdichtungsmaß vor FM
Typ 1 (+14%)-Wdh.	0,52	1,37
Typ 1 (+17%)-Wdh.	0,54	1,28
Typ 2 (+16%)	0,51	1,41
Typ 2 (+18%)	0,52	1,34
Typ 2 (+20%)-2. Wdh.	0,54	1,33
Typ 2 (+23%)	0,55	1,28
Typ 2 (+25%)	0,56	1,22

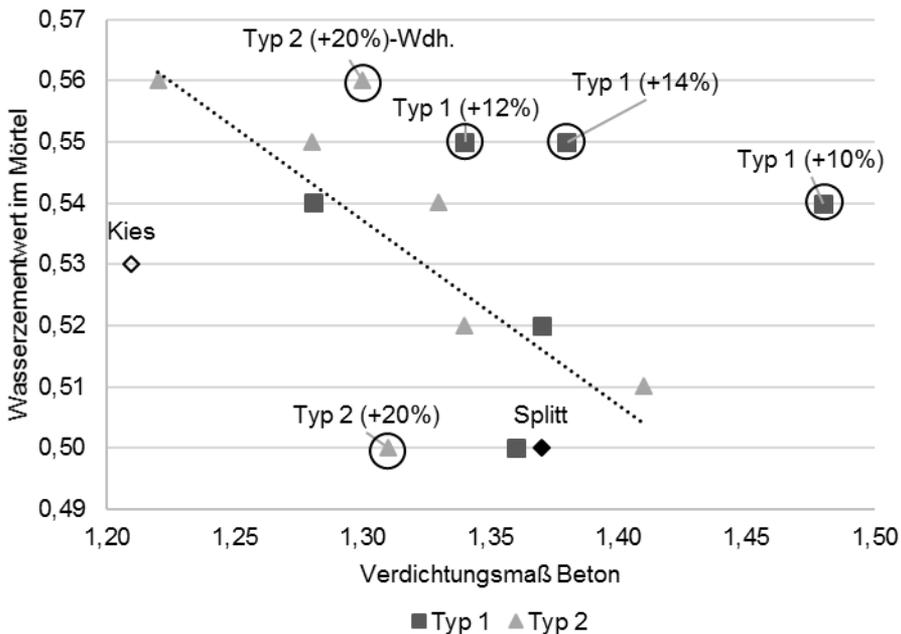


Abbildung 3-11: Abhängigkeit zwischen Wasserzementwert und Verdichtungsmaß der Betonmischungen

Die Darstellung in Abbildung 3-11 zeigt, dass die Ergebnisse der Versuche grundsätzlich Annahme 3 entsprechen. Ein unmittelbarer Vergleich von Werten kann nur unter Betonen vorgenommen werden, welche sich nicht hinsichtlich des Wasseranspruchs aufgrund der Form oder Oberflächenbeschaffenheit der Gesteinskörnung unterscheiden. Die natürlichen Referenzkörnungen können aus diesem Grund nur qualitativ untereinander bzw. mit den rezyklierten Gesteinskörnungen verglichen werden. Die natürliche Referenzkörnung aus Kies besitzt aufgrund der runden Kornform einen geringeren Wasseranspruch und zudem eine bessere Verarbeitbarkeit bei gleichem Wasserzementwert als die gebrochenen Körnungen. Somit wird das Verdichtungsmaß eines Kiesbetons bei gleichem Wasserzementwert geringer sein als das eines Betons mit natürlichem oder rezykliertem Splitt, was sich in den Versuchsergebnissen wieder spiegelt. Die Charakterisierung der Gesteinskörnungen ergab für den natürlichen Splitt

und die rezyklierten Gesteinskörnungen gleiche Kornform- und Plattigkeitskennzahlen, weshalb die übrigen Betone aufgrund der angeglichenen Korngrößenverteilungen hinsichtlich des Wasseranspruchs und Verdichtungswillens der Gesteinskörnung miteinander vergleichbar sind. Die Ergebnisse des Verdichtungsmaßes stellen vor dem Hintergrund von Annahme 3 die Messwerte der Mischungen „Typ 2 (+20%)“, „Typ 2 (+20%)-Wdh.“, „Typ 1 (+12%)“, „Typ 1 (+14%)“ und „Typ 1 (+10%)“ in Frage. Für diese drei Betone korrelieren die Versuchsergebnisse zum Wasserzementwert und Verdichtungsmaß nicht miteinander, sodass von Fehlern in der Zusammensetzung der Betone oder von Messfehlern bei der Berechnung des Wasserzementwerts auszugehen ist.

Der Widerspruch zu Annahme 3 bei den beiden Betonen „Typ 2 (+20%)“ und „Typ 2 (+20%)-Wdh.“ bestätigt die mutmaßlich fehlerhafte Frischmörtelrohddichte dieser Betone, die in Annahme 2 bereits diese beiden Mischungen für die Bewertung des Gesamtdatensatzes in Frage gestellt hat. Da nur an Betonen mit vollständig plausiblen Datensatz aus Wassergehalt, Frischmörtelrohddichte und Frischmörtelluftgehalt eine Bewertung im Kontext der Zielfragestellung möglich ist werden die beiden Betone von der Auswertung ausgeschlossen und nicht weiter betrachtet.

Die übrigen Betone, deren Wasserzementwert im Kontext von Annahme 3 nicht plausibel erscheint sind mit einer weiteren unabhängigen Annahme zu prüfen. Für diese Mischungen liegt keine identisch zusammengesetzte Vergleichsmischung vor, sodass die Werte der Frischmörtelrohddichte und des Frischmörtelluftgehalts, die zu einer Verfälschung des berechneten wirksamen Wasserzementwerts führen können, nur indirekt überprüft werden können.

Annahme 4: Zusammenhang zwischen Festigkeit und Wasserzementwert

Wenn die Ergebnisse der geprüften Wasserzementwerte plausibel sein sollen, so ist zu erwarten, dass gilt:

Annahme 4: mit steigendem Wasserzementwert nimmt die Mörteldruckfestigkeit ab. Die Werte finden sich im zu erwartenden Bereich gemäß der in Kapitel 3.2.1 erläuterten Literaturwerte von Walz wieder.

Annahme 4 liefert eine zweite Bedingung zum Ausschluss auffälliger Mischungen aus Annahme 3. Wenn bei den auffälligen Betonen aus Annahme 3 auch die Festigkeit und der Wasserzementwert nicht korrelieren, so kann gefolgert werden, dass der berechnete Wasserzementwert nicht plausibel und durch fehlerhafte Luftgehalte oder Rohddichte verfälscht ist.

In [Weber u. Wesche - 1978] wurde die von Walz in [Walz - 1970] angegebene grafische Beziehung zwischen dem Quotienten aus Beton- bzw. Mörteldruckfestigkeit und Zementnormfestigkeit in Abhängigkeit vom Wasserzementwert als Formeln beschrieben. Gemäß [Weber u. Wesche - 1978] eignet sich der vereinfachte Ansatz nach (3-13) bis (3-15) mit ausreichender Genauigkeit zur Beschreibung der Matrix- und Zementsteinfestigkeit in Abhängigkeit vom Wasserzementwert, wobei $y(x)$ die bezogene Druckfestigkeit in Prozent ist. Dabei ergeben $y(o)$ die obere und $y(u)$ die untere Grenze des Erwartungsbereichs, $y(m)$ ergibt die Kurve in der Mitte des zu erwartenden Bereichs.

$$Y(o) = 1285 * w/z * e^{(-3,50*w/z)} \quad (3-13)$$

$$Y(m) = 1097 * w/z * e^{(-3,50*w/z)} \quad (3-14)$$

$$Y(u) = 866 * w/z * e^{(-3,50*w/z)} \quad (3-15)$$

Da sich die angegebenen Formeln auf die Prüfung von Würfeln mit Kantenlänge 200 mm beziehen, die Mörteldruckfestigkeiten jedoch an Prismen b/h/l = 40/40/160 mm ermittelt wurden, ist gemäß [Wesche - 1981] das zu erwartende Festigkeitsergebnis der Prismen höher als die Formelwerte nach (3-13) bis (3-15). Aufgrund von großen Schwankungen in Abhängigkeit des Wasserzementwerts wird in [Wesche - 1981] empfohlen, entsprechende Umrechnungswerte in Versuchen zu ermitteln. Wird - ausgehend von den Empfehlungen in [Wesche - 1981] - für den angestrebten wirksamen Wasserzementwert von 0,52 in den Versuchen aufgrund der geringeren Probekörpergröße in der Druckfestigkeitsprüfung von einem um 20 % höheren Druckfestigkeitsergebnis ausgegangen, so ergibt sich die in Abbildung 3-12 dargestellte Verteilung der ermittelten Mörtelfestigkeiten in Abhängigkeit vom ermittelten wirksamen Wasserzementwert. Dabei ist die zu erwartende Streubreite der Festigkeitsergebnisse gemäß (3-13) bis (3-15) auf die entsprechend höher erwartete Druckfestigkeit aufgrund der geringeren Probekörpergröße um 20% nach oben verschoben.

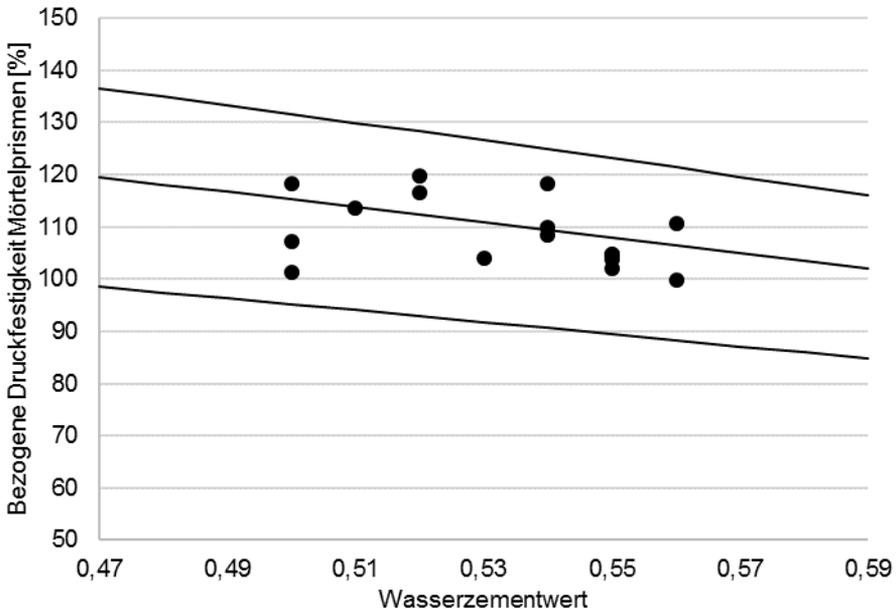


Abbildung 3-12: Einordnung der auf die Normfestigkeit bezogenen Mörteldruckfestigkeiten in die zu erwartende Streubreite gemäß [Walz - 1970]

Die Festigkeitsergebnisse der geprüften Mörtel zeigen die zu erwartende Abhängigkeit vom zugehörigen ermittelten wirksamen Wasserzementwert. Die Ergebnisse streuen innerhalb der von Walz angegebenen 5 %-Fraktilgrenzen gemäß [Walz - 1970]. Die große Streubreite des Erwartungsbereichs ermöglicht keine Differenzierung im Hinblick auf ggf. fehlerhafte Wasserzementwerte.

Annahme 5: Paralleler Verlauf von Wassergehalt und Wasserzementwert

Annahme 5 liefert ebenfalls eine zweite Bedingung zum Ausschluss möglicherweise auffälliger Mischungen aus Annahme 3.

Aus den ermittelten wirksamen Wassergehalten wurde über eine rechnerische Auswertung der weiteren geprüften Größen Wassergehalt, Luftgehalt und Rohdichte der extrahierten Mörtel der jeweilige wirksame Wasserzementwert ermittelt. Da zur Berechnung der wirksamen Wasserzementwerte drei in Versuchen am Mörtel ermittelte Eingangsparameter verwendet wurden (Wassergehalt, Frischmörtelrohichte, Frischmörtelluftgehalt), kann das Ergebnis durch Messfehler und sich überlagernde Prüfstreuungen beeinflusst werden. Sind keine fehlerhaften Einflüsse durch Luftgehalts- und Rohdichtebestimmung der Mörtel vorhanden, so gilt

Annahme 5: Der wirksame Wasserzementwert und der ermittelte Wassergehalt sind linear voneinander abhängig. Mit steigendem Wassergehalt im Frischmörtel steigt auch der berechnete wirksame Wasserzementwert.

Die berechneten Wasserzementwerte sollten grundsätzlich, da in allen Mischungen der Zementgehalt gleich gehalten wurde, in einer linearen Abhängigkeit zu einander stehen. Bei den Mischungen, bei denen starke Abweichungen von dieser linearen Abhängigkeit festzustellen sind kann davon ausgegangen werden, dass die Frischmörtelrohichte und/oder der Frischmörtelluftgehalt als notwendige Eingangsparameter der Wasserzementwertberechnung die Ergebnisse verfälschen. Für diese Betone ist somit kein vollständiger, plausibler Datensatz aus Wassergehalt, Frischmörtelrohichte und Frischmörtelluftgehalt für die Bewertung im Kontext der Zielfragestellung vorhanden. Mischungen, die sowohl Annahme 3 als auch Annahme 5 widersprechen sind somit für die weitere Auswertung unbrauchbar.

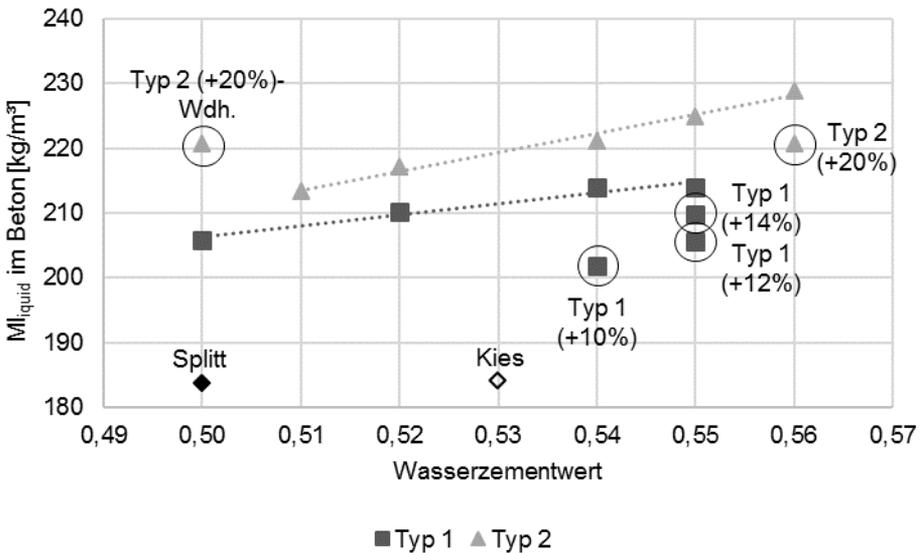


Abbildung 3-13: Korrelation zwischen den geprüften Wassergehalten und den berechneten Wasserzementwerten

Die in Abbildung 3-13 aufgrund der starken Abweichungen von einem linearen Zusammenhang zwischen steigendem Wassergehalt und steigendem Wasserzementwert auffälligen Betone waren bereits bei der vorausgegangenen Analyse unter Annahme 3 auffällig. In der Gesamtbetrachtung können die auffälligen Betone nicht zur Beantwortung der Zielfragestellung herangezogen werden, da von Fehlern in der Versuchsdurchführung einem der erforderlichen Eingangsparametern in die Berechnung des Wasserzementwerts (Wassergehalt, Frischmörtelrohddichte, Frischmörtelluftgehalt) auszugehen ist. Ausgeschlossen werden somit aufgrund von fehlerhaften Datensätzen in Bezug auf Frischmörtelrohddichte und/oder Frischmörtelluftgehalt die Betone „Typ 1 (+10%)“, „Typ 2 (+12%)“ und „Typ 1 (+14%)“

Fazit:

Aufgrund der Analyse anhand der geprüften Annahmen konnte gezeigt werden, dass die Prüfergebnisse grundsätzlich zur Bewertung vor dem Kontext der Zielfragestellung „Wie viel mehr Wasser benötigen R-Betone für eine vergleichbare Zusammensetzung der Zementsteinmatrix wie bei Beton mit natürlicher Gesteinskörnung?“ herangezogen werden können. Da, wie vorangehend erläutert, zur Beantwortung der Zielfrage dieser Arbeit eine Vielzahl von experimentell ermittelten Messgrößen in Kombination herangezogen wird, konnte nicht vermieden werden, dass einzelne Betonsorten aufgrund von Fehlern in einzelnen Messverfahren oder im Versuchsablauf nicht ausgewertet werden konnten. Diejenigen Mischungen, die anhand der vorgenommenen Analysen als in einzelnen Messgrößen fehlerhaft identifiziert wurden, können in ihrer Gesamtheit nicht analysiert werden und werden deshalb in der nachfolgenden Datenanalyse und Diskussion nicht mehr berücksichtigt.

3.3.3.2 Explorative Datenanalyse

Bei der Versuchsserie zu Kapitel 3 dieser Arbeit wurden anhand von drei Gesteinskörnungsarten (Referenz, rezyklierte Gesteinskörnung der Typen 1 und 2) insgesamt vier tatsächliche Parameter in Abhängigkeit vom Gesamtwassergehalt analysiert. Die Auswertung dieser Versuchsgrößen soll eine Beantwortung der Zielfrage erlauben, welcher Wassergehalt bei rezyklierten Gesteinskörnungen zum zielsicheren Erreichen eines definierten Wasserzementwerts notwendig ist.

Die miteinander interagierenden Variablen in den Versuchsergebnissen sind

- ermittelter Wassergehalt
- Konsistenz der Betone
- Mörteldruckfestigkeit
- Betondruckfestigkeit

Im Fokus der Analysen stand die Auswertung der ermittelten Wassergehalte und Wasserzementwerte in Abhängigkeit von der Gesamtwassermenge in den jeweiligen Mischungen.

Auswertehypothesen

Die Analyse der ermittelten Wassergehalte und Wasserzementwerte wurde unter Annahme der folgenden Hypothesen begonnen:

Hypothese 1: Der wirksame Wasserzementwert steigt mit steigendem Zusatzwasser an.

Hypothese 2: Es gibt jeweils eine Wasserdosierung mit der unter Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung der Typen 1 und 2 jeweils der gleiche wirksame Wasserzementwert im Zementsteingefüge resultiert wie bei der Referenzmischung aus gebrochener Gesteinskörnung. Mit dieser jeweiligen Wasserdosierung je Gesteinskörnung kann der Soll-Zustand (Abbildung 3-5) erreicht werden.

Überprüfung Hypothese 1

Die ermittelten Wasserzementwerte aller gemäß der Validierung in Kapitel 3.3.3.1 auszuwertenden Mischungen sind in Abbildung 3-14 dargestellt.

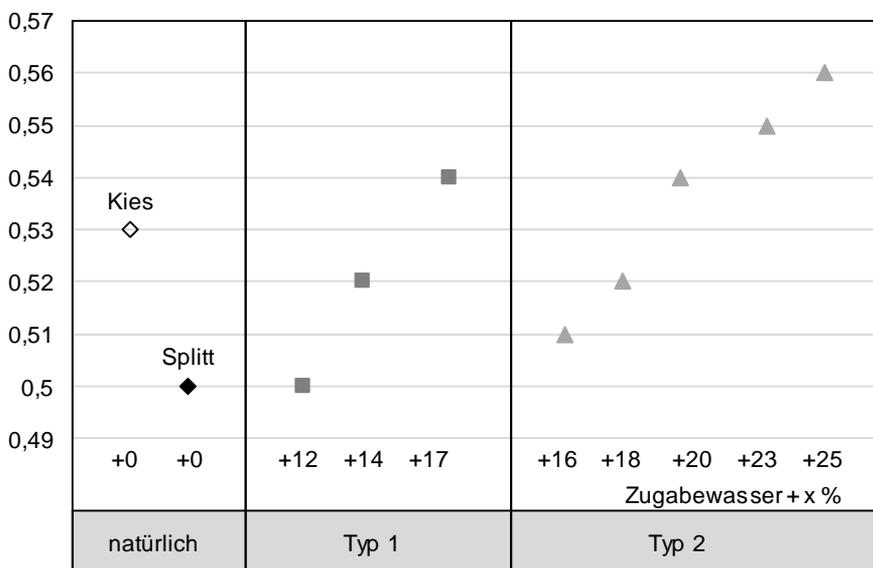


Abbildung 3-14: Ermittelte Einzelwerte der wirksamen Wasserzementwerte

Aus der Abbildung 3-14 wird deutlich, dass sich bei den ausgewerteten Betonen die Annahme des steigenden Wasserzementwerts mit steigender Gesamtwassermenge, gemäß der aufgestellten Hypothese 1, in den Versuchsergebnissen als zutreffend erweist.

Dabei war die Konsistenz der ausgewerteten Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 ungefähr gleich, alle Betone entsprachen hinsichtlich ihres Ausbreitmaßes nach Mischende der Konsistenzklasse F5.

Wie Abbildung 3-15 zeigt, war die Konsistenz der ausgewerteten Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 nicht immer gleich. Die Betone entsprachen den Konsistenzklassen F5 und F6.

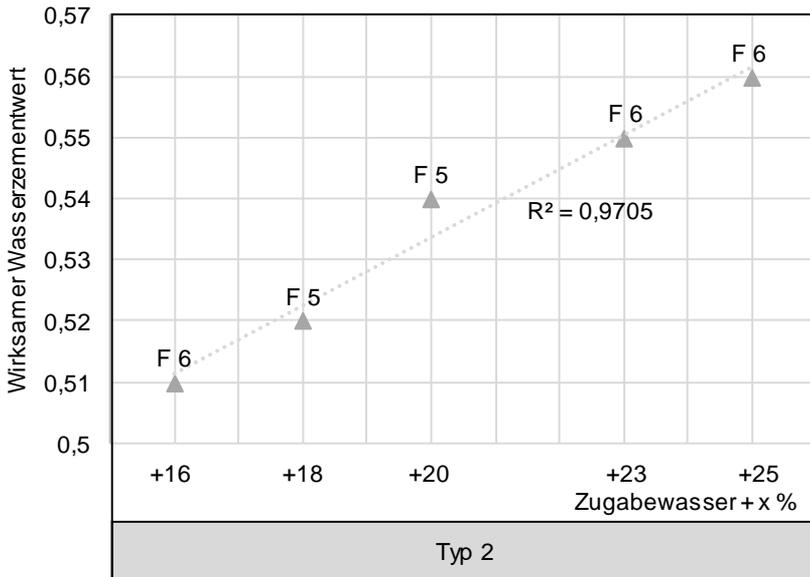


Abbildung 3-15: Wirksame Wasserzementwerte der Typ 2 - Mischungen

Es zeigt sich jedoch in Abbildung 3-15, dass die Betonkonsistenz bei den Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 keinen Einfluss auf den wirksamen Wasserzementwert zu haben scheint.

Ob auch für Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 gilt, dass die durch Fließmittelzugabe variierte Konsistenzklasse des Betons keinen Einfluss auf das Wasseraufnahmevermögen der saugenden rezyklierten Gesteinskörnung und damit auf den wirksamen Wasserzementwert besitzt oder ob eine Konsistenzabhängigkeit des wirksamen Wasserzementwerts für diesen Typ rezyklierter Gesteinskörnung vorliegt, wurde im Kapitel 3.3.4 in einer zusätzlichen Versuchsserie betrachtet.

Überprüfung Hypothese 2

Ziel der Versuche für Hypothese 2 war es, diejenige Wasserdosierung zu ermitteln, die je nach Gesteinskörnungstyp das Wasseraugverhalten von ofentrockener Gesteinskörnung in der Betonzusammensetzung so ausgleicht, dass ein gleicher wirksamer Wasserzementwert resultiert, genauso wie bei einer Referenzmischung aus natürlicher Gesteinskörnung.

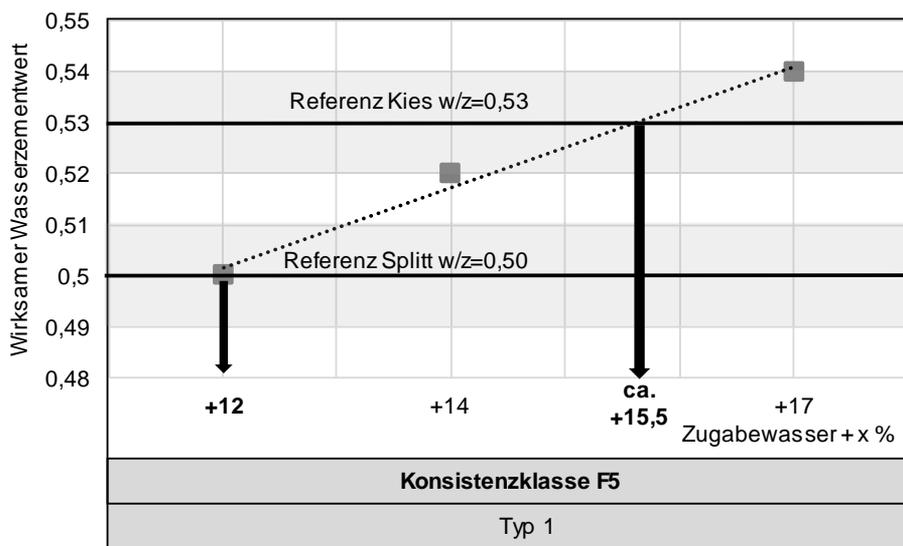


Abbildung 3-16: Vergleich der Wasserzementwerte Typ 1 mit den Referenzbetonen

Für den Beton mit Konsistenzklasse F5 und einer Erhöhung des Gesamtwassers um 12 % der berechneten Zugabewassermenge, wurde in den Untersuchungen ein Wasserzementwert von 0,50 ermittelt, was dem Messwert der Referenzmischung mit gebrochener natürlicher Gesteinskörnung entsprach (vgl. Abbildung 3-16). Die Erhöhung des Gesamtwassers entsprach bei diesem Beton dem Äquivalent der Wasseraufnahme in zehn Minuten, die für die verwendete rezyklierte Gesteinskörnung im Pyknometerversuch ermittelt wurde, somit konnte das anvisierte Ziel des vorliegenden Kapitels erreicht werden.

Wenn Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung ähnliche Wasserzementwerte erreichen sollen wie eine Ausgangsmischung aus runder natürlicher Gesteinskörnung, so ist im vorliegenden Fall mit einer Erhöhung des Gesamtwassers um 15-17 % ein Wasserzementwert ähnlich der Referenz mit natürlichem Kies erzielt worden (vgl. Abbildung 3-16).

Der Gesamtwassergehalt der Betonzusammensetzung, deren Wasserzementwert mit der Referenzmischung aus Kies vergleichbar war, war ca. 8,3 l/m³ höher als für den Vergleich mit natürlichem Splitt. Diese Differenz deckt sich mit der Annahme in Kapitel 3.3.2.4, dass der verwendete Referenzsplitt einen um 10 l/m³ höheren Wasseranspruch aufweist als der Referenzkies. Die rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 war hinsichtlich der Körnungsziffer an die Splittreferenz angeglichen, weshalb grundsätzlich von einem ähnlichen Wasseranspruch ausgegangen werden kann. Ihre Kornform war dabei leicht kubischer (leicht geringere Plattigkeits- und Kornformkennzahl) als die des Referenzsplitts, sodass eine Differenz im Wasseranspruch von 1,7 l/m³, die sich aus den Versuchsergebnissen ergibt, plausibel erscheint.

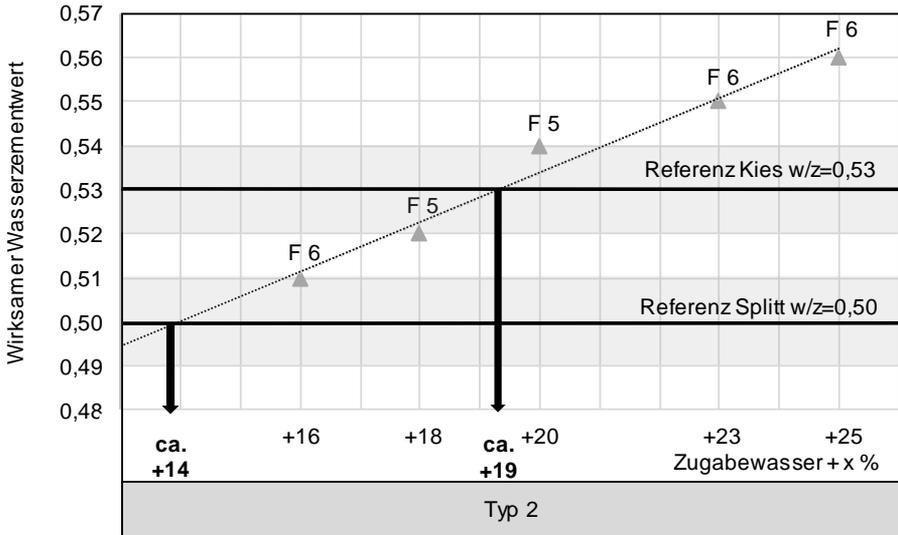


Abbildung 3-17: Vergleich der Wasserzementwerte Typ 2 mit den Referenzbetonen

Für die Mischungen mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 konnte mit der geringsten geprüften Gesamtwasserzugabe, entsprechend einer Erhöhung des Gesamtwassers um 16 % gegenüber dem berechneten Zugabewasser, ein Wasserzementwert ähnlich der Referenzmischung aus natürlichem gebrochenem Korn erreicht werden. Der Wasserzementwert dieser Mischung liegt, wie Abbildung 3-17 zeigt, bei 0,51 und damit 0,01 oberhalb der Referenzmischung mit Splitt. Wenn anhand der ermittelten Wasserzementwerte linear interpoliert wird, so sollte eine Erhöhung des Gesamtwassers um ca. 14% einen mit der Referenz aus Splitt übereinstimmenden Wasserzementwert ergeben. Die Erhöhung des Gesamtwassergehalts um 16 % entspricht dabei dem Äquivalent der Wasseraufnahme in zehn Minuten, ermittelt im Pyknometerversuch.

Mit einer Erhöhung des Gesamtwassers um 18 % bis 20 % resultierten in den Versuchsreihen Wasserzementwerte, die nahe dem Wasserzementwert eines Referenzsystems aus natürlichem Kies lagen. Wenn zwischen den ermittelten Wasserzementwerten linear interpoliert wird, so sollte eine Erhöhung des Gesamtwassers um 19 % einen mit der Referenz aus Kies übereinstimmenden Wasserzementwert ergeben. Die Ergebnisse zeigen, dass für die gebrochene rezyklierte Gesteinskörnung der höhere Wasseranspruch gegenüber einem natürlichen Rundkornmaterial berücksichtigt werden muss, um zu ähnlichen wirksamen Wasserzementwerten zu kommen.

Die Differenz im Gesamtwassergehalt zwischen der mit der Kies-Referenz vergleichbaren und der mit Splitt vergleichbaren Mischungen betrug dabei, genau wie für rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 8,3 l/m³. Da die Kornform- und Plattigkeitskennzahlen von rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 und Typ 2 praktisch identisch waren, ist auch hier die Differenz übereinstimmend mit der getroffenen Annahme zum Wasseranspruch.

Obwohl grundsätzlich erwartet wurde, dass die rezyklierte Gesteinskörnung dem Beton unkontrolliert Wasser entzieht und so den wirksamen Wasserzementwert gegen-

über dem Zielwert eher verringert, zeigen die Ergebnisse, dass die zusätzlich hinzugegebene Wassermenge auch während der insgesamt 30-minütigen Saugzeit von der Gesteinskörnung nicht aufgenommen werden konnte. Dabei wurde die Zusatzwassermenge im zweistufigen Mischprozess als reines Wasser zur Gesteinskörnung gegeben. Die Wasserzementwerte sind bei den meisten der Mischungen höher als der Wasserzementwert der Mischung mit natürlichem Splitt, mindestens jedoch gleich hoch. Bei dem natürlichen Splitt kann von einem gleichen Wasseranspruch aufgrund der ebenfalls gebrochenen Oberfläche und einer gleichen Körnungsziffer ausgegangen werden. Somit wurde in keinem Fall eine wasseraufnahmebedingte Absenkung des wirksamen Wassergehalts erreicht. Dies verdeutlicht die Bedeutung der zutreffenden Wasseraufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung im Beton, da diese im Vorliegenden Fall bereits oberhalb des Äquivalents von WA_{10} überschätzt wurde.

Ziel der Untersuchungen in Kapitel 3 war es, diejenige Wasserzugabe zu definieren, mit der bei Betonen mit natürlicher und Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung eine gleiche Zusammensetzung des Zementmörtels erreicht werden kann. Ermittelt wurde ein annähernd gleicher Wasserzementwert bei der Mischung mit natürlichem Splitt, der Mischung mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 und einer Erhöhung des Gesamtwassergehalts um 12 % sowie der Mischung mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 und ca. 16 % mehr Gesamtwasser. Die Konsistenz der Mischungen unterschied sich. Dabei entsprach die Referenzmischung aus Splitt der Klasse F4, die Mischung mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 der Konsistenzklasse F5, die mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 der Klasse F6. Alle Mischungen enthielten Fließmittel. Außerdem lieferte eine Erhöhung der Gesamtwassermenge um 14 % bis 17 % (Konsistenz F5) bei rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 und eine Erhöhung des Gesamtwassers um 18 % bis 20 % für die rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2 einen wirksamen Wasserzementwert, der dem Wert entsprach, der an der Referenzmischung mit Kies ermittelt worden war.

Für die genannten Mischungen mit jeweils gleichem/ähnlichem wirksamem Wasserzementwert ist davon auszugehen, dass eine dem bei rezyklierter Gesteinskörnung dosierten Zusatzwasser entsprechende Wassermenge von der Gesteinskörnung aufgenommen werden konnte (vgl. Abbildung 3-18). Die übrigen Mischungen wiesen in der Prüfung einen höheren Wassergehalt und Wasserzementwert auf, was die Risiko-Seite gemäß Abbildung 3-18 darstellt.

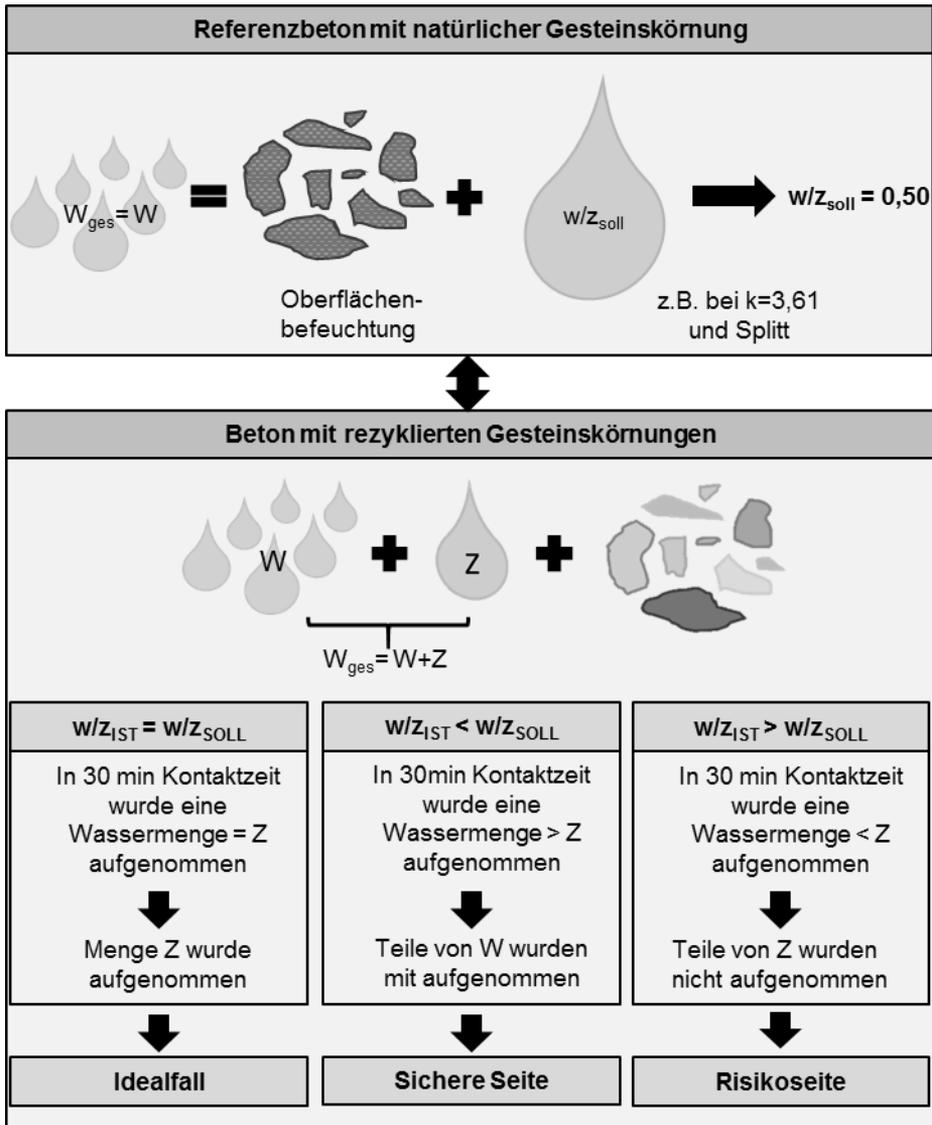


Abbildung 3-18: Bewertungskriterien für die ermittelten Wasserzementwerte

Grundsätzlich sollte aus einer annähernd gleichen Zusammensetzung der verschiedenen Zementmörtel auf eine vergleichbare Mörteldruckfestigkeit geschlossen werden können. Wenn sowohl der Wassergehalt bzw. der Wasserzementwert im Zementmörtel als auch die Festigkeit des extrahierten Zementmörtels zwischen Mischungen mit verschiedener Gesteinskörnung ähnlich sind, kann angenommen werden, dass etwaige Unterschiede in den Betoneigenschaften dieser Mischungen auf die verwendete Gesteinskörnung zurückgeführt werden können. Die Druckfestigkeiten der extrahierten Zementmörtel sind nachfolgend dargestellt.

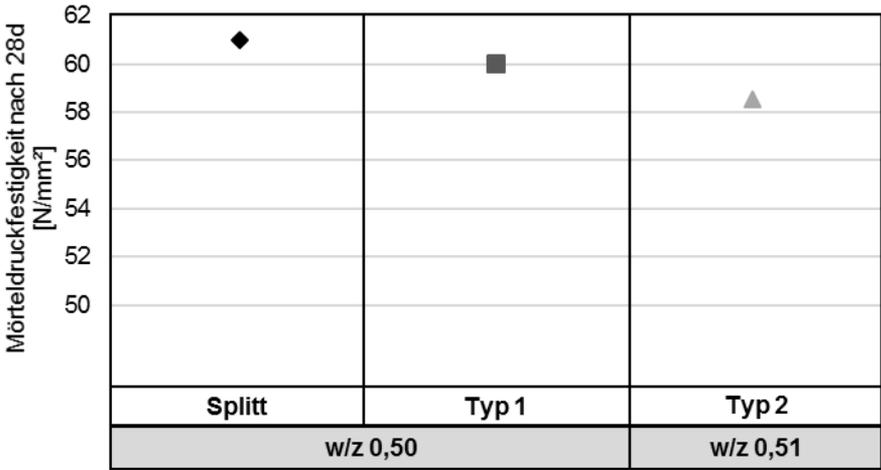


Abbildung 3-19: Mörteldruckfestigkeit bei gleichem Wasserzementwert

Die Mischungen mit ähnlichem wirksamen Wasserzementwert von 0,50 bzw. 0,51 wiesen, wie in Abbildung 3-19 gezeigt auch in der Mörtelprüfung vergleichbare Druckfestigkeiten nach 28 Tagen auf. Es kann somit erwartet werden, dass in der Betonzusammensetzung bei drei Mischungen die Zementsteinmatrix vergleichbar zusammengesetzt ist, wenn die Festbetonkennwerte miteinander verglichen werden.

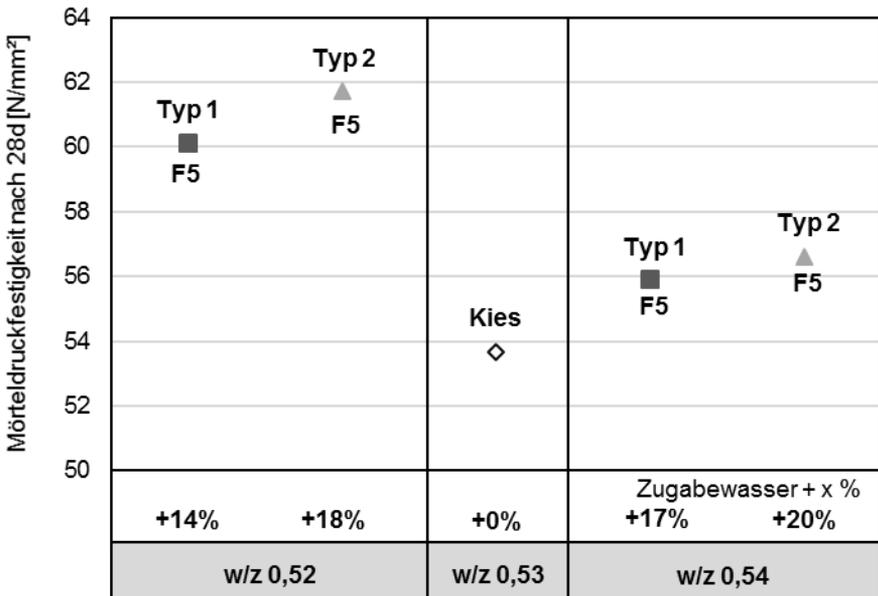


Abbildung 3-20: Mörteldruckfestigkeiten bei ähnlichem Wasserzementwert wie Referenz Kies

Auch bei den Mörteln, welche einen wirksamen Wasserzementwert ähnlich der Referenzmischung mit Kies aufwiesen zeigt sich in Abbildung 3-20, dass bei denjenigen Mischungen, an denen gleiche Wasserzementwerte ermittelt wurden und welche eine

ähnliche Konsistenz aufwiesen, auch die Mörteldruckfestigkeit nach 28 Tagen weniger als 2 N/mm^2 voneinander abweicht.

Dass die Mörteldruckfestigkeit der Referenzmischung aus Kies eine geringere Druckfestigkeit aufwies als die der Mischungen mit rezyklierter Gesteinskörnung bei einem um 0,01 höheren Wasserzementwert im Zementmörtel, wird darauf zurückgeführt, dass diese Mischung nicht wie die übrigen einen k-Wert von 3,61, sondern eine höhere Körnungsziffer von 3,66 aufwies. Ein höherer k-Wert bedeutet, dass diese Mischung einen geringeren Feinanteil aufweist, was sich in der Packungsdichte des Mörtels auswirkt und, wie in Kapitel 2.3.2 erläutert, die Druckfestigkeit verringert.

Fazit

Grundsätzlich konnte mit den durchgeführten Untersuchungen die Hypothese 1 bestätigt werden, dass der wirksame Wassergehalt mit steigendem Zusatzwasser ansteigt. Eine mögliche Abhängigkeit des wirksamen Wasserzementwerts im Zementmörtel von der Fließmitteldosierung und der Konsistenz des Betons bei Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 konnte auf Basis der Ergebnisse noch nicht beurteilt werden und wird deshalb in Kapitel 3.3.4 weiter untersucht.

Es konnten, wie in Hypothese 2 angenommen, Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 und Typ 2 hergestellt und mittels der konzipierten Versuchsmethodik identifiziert werden, deren Zementsteinmatrix vergleichbar ist mit derjenigen von Referenzmischungen mit natürlicher Gesteinskörnung (hinsichtlich wirksamem Wasserzementwert und hinsichtlich der Mörteldruckfestigkeit). Dabei ist jedoch zwischen der Art der natürlichen Vergleichsgesteinskörnung - gebrochene natürliche Gesteinskörnung oder natürliches Rundkornmaterial - zu differenzieren. Ähnliche Eigenschaften der Zementsteinmatrix von Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 und Typ 2, verglichen mit gebrochener natürlicher Gesteinskörnung, konnten erreicht werden, wenn jeweils das Zugabewasser um das Äquivalent der Wasseraufnahme nach zehn Minuten im Pyknometerversuch nach [DIN EN 1097-6] für die rezyklierte Gesteinskörnung erhöht wurde. Soll demnach mit der produktionsbedingt stets gebrochenen rezyklierten Gesteinskörnung eine Zementsteinmatrix erreicht werden, die der eines Betons aus natürlichem Rundkorn vergleichbar ist, so muss der erhöhte Wasseranspruch von gebrochenem Korn gegenüber Rundkorn zusätzlich berücksichtigt werden.

3.3.4 Zusammenhang zwischen der Betonkonsistenz und dem wirksamen Wasserzementwert

3.3.4.1 Hintergrund

Die Ergebnisse aus den Versuchsreihen zum erforderlichen Wassergehalt ließen eine Beurteilung zur möglichen Konsistenzabhängigkeit des wirksamen Wassergehalts von Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 noch nicht zu. Zur näheren Analyse dieses für die Praxis sehr bedeutenden Themas wurden zusätzliche Versuchsreihen durchgeführt. Sollte eine Abhängigkeit vorliegen zwischen dem wirksamen Wasserzementwert und der Konsistenzklasse eines Betons, bei dem die Konsistenz alleine durch Fließmittelzugabe variiert wird, so würde dies für die Praxis bedeuten, dass die Wasserdosierung einer Betonsorte entsprechend der bestellten Konsistenzklasse angepasst werden müsste.

3.3.4.2 Versuchskonzept und Durchführung

Um herauszufinden, ob die Konsistenz des Zementmörtels einen reproduzierbaren Einfluss auf die Absorption hat, wurde in einer Versuchsserie die Wasserdosierung konstant gehalten und dieselbe Betonmischung mehrfach, unter Variation der Menge an Fließmittel, hergestellt. Über das Fließmittel wurde die Konsistenz gesteuert und dabei die Konsistenzklassen F3, F4, F5 und F6 angestrebt. Die Untersuchungen wurden mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 durchgeführt. Für rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2 konnte bereits mit den Untersuchungen im vorherigen Kapitel 3.3.3 gezeigt werden, dass die wirksamen Wasserzementwerte keine Abhängigkeit von der Betonkonsistenz aufweisen.

Für die Versuchsreihe mit Gesteinskörnung Typ 1 wurde diejenige Betonzusammensetzung aus den vorhergehenden Versuchen ausgewählt, bei der 12 % der Zugabewassermenge zusätzlich als Zusatzwasser zugegeben wurden. Die Betonzusammensetzung entsprach der des Betons „Typ 1 (+12%)“, gemäß Tabelle 3-7. Die Konsistenz wurde jeweils in mehreren Schritten variiert. Tabelle 3-7 gibt Aufschluss über die untersuchten Varianten und die jeweiligen Fließmittelgehalte.

Der Mischablauf und das Prüfprogramm entsprachen jeweils der in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Vorgehensweise.

Tabelle 3-7: Geprüfte Varianten und Fließmitteldosierungen in % bezogen auf die Zementmasse zur Untersuchung des Konsistenzinflusses. (*Ergebnisse aus Kapitel 3.3.3)

Probenbezeichnung	Gesamtwasser in l/m ³ Beton	Fließmitteldosierung in M.-% von Zement
Typ 1 (+ 12%)-F3	204,0	0,57
Typ 1 (+ 12%)-F4	204,0	0,71
Typ 1 (+ 12%)-F4 (2)	204,0	0,95
Typ 1 (+ 12%)-F6	204,0	2,03

3.3.4.3 Ergebnisse und Diskussion

Auswertung der Versuche mit Typ 1

In Abbildung 3-21 sind die ermittelten Wasserzementwerte (w/z IST) der identisch zusammengesetzten Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 aus reinem Betonsplitt, bei denen einzig die Fließmittelmenge variiert wurde, in Abhängigkeit vom ermittelten Ausbreitmaß nach zehn Minuten dargestellt. Zusätzlich sind im Diagramm jeweils die rechnerisch ermittelten Wasserzementwerte (w/z DOS) unter Berücksichtigung des Wassers und der zugegebenen Flüssigkeitsanteile aus dem Fließmittel angegeben.

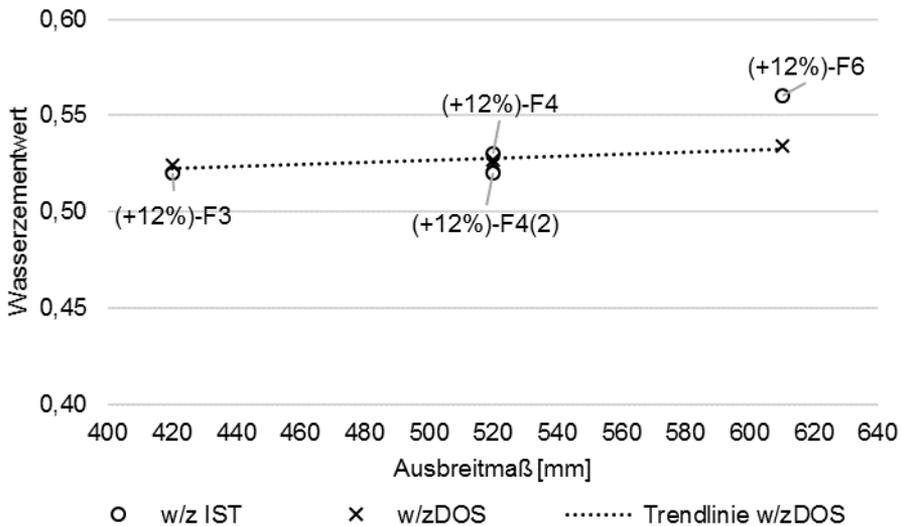


Abbildung 3-21: Zusammenhang zwischen Betonkonsistenz und Wasserzementwert bei Typ 1

Anhand der zusätzlich gewonnenen Ergebnisse zeigt sich, dass ebenso wie für rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2 auch für rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 kein Einfluss der Betonkonsistenz auf den wirksamen Wasserzementwert im Zementmörtel festzustellen ist. Die Ergebnisse für Betone, die abgesehen von der Fließmitteldosierung gleich zusammengesetzt waren, streuen zufällig um eine Trendlinie, die näherungsweise mit der Trendlinie der rechnerisch zu erwartenden Wasserzementwerte übereinstimmt. Die größte Abweichung vom rechnerisch zu erwartenden Wasserzementwert beträgt dabei 0,026.

3.3.5 Reproduzierbarkeit bei verschiedenen Gesteinskörnungschargen

3.3.5.1 Hintergrund

In den vorhergehenden Kapiteln wurde ein Versuchsaufbau erarbeitet, der es ermöglicht, den Wasserzementwert der Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung in Abhängigkeit von der Wasserzugabe zu beobachten und so den „optimalen“ Gesamtwassergehalt zu ermitteln, mit dem der Zementmörtel des R-Betons zusammengesetzt ist wie der der Referenzmischung mit natürlicher Körnung. So kann der tatsächliche Einfluss

der rezyklierten Körnung auf die Betoneigenschaften beurteilt werden. Die Untersuchungen wurden zunächst anhand einer exemplarischen Liefercharge rezyklierter Gesteinskörnung durchgeführt. Um ein Praxismodell zu entwickeln, wie mit rezyklierten Gesteinskörnungen im Transportbetonwerk zielsicher Betone mit definiertem Wasserzementwert hergestellt werden können, erfolgte eine Validierung der gewonnenen Erkenntnisse an weiteren Chargen Gesteinskörnung.

3.3.5.2 Versuchskonzept und Durchführung

In der nachfolgenden Versuchsserie wurde zur Validierung die Mischungszusammensetzung aus den vorhergehenden Versuchen verwendet, dabei die Gesteinskörnung aber durch weitere Lieferchargen ersetzt (je drei verschiedene Lieferungen Betonsplitt Typ 1 2/16 mm und Typ 2 2/16 mm). Zugrunde gelegt wurden jeweils für Typ 1 und Typ 2 die Mischungsberechnungen aus Kapitel 3.3.2. Die Gesteinskörnungen aus drei Lieferchargen wurden bei gleichbleibendem Wasser-, Zementgehalt und unter weitgehender Wahrung des k -Werts sowie des Mörtelgehalts in der Mischung ausgetauscht. Die Ergebnisse aus Kapitel 3.3.3 zeigten, dass der Zusatzwassergehalt, der in etwa dem Äquivalent der Wasseraufnahme nach zehn Minuten entsprach, zu wirksamen Wasserzementwerten führte, wie sie auch in der Referenzmischung aus natürlichem Splitt festgestellt wurden. Auf Basis dieser Erkenntnis wurde für die Mischungen mit weiteren Gesteinskörnungschargen jeweils das Zusatzwasser auf Basis von WA_{10} berechnet. Der Misch-, Prüf- und Auswerteablauf entsprach der Vorgehensweise aus Kapitel 3.3.2. Für die Untersuchungen konnten lediglich kleine Restmengen aus regelmäßigen Zugriffen aus der Produktion eines Aufbereiters verwendet werden, die im Zuge des Kapitels 2 analysiert wurden.

In Tabelle 3-8 ist die stoffliche Zusammensetzung der verwendeten Gesteinskörnungen Typ 1, in Tabelle 3-9 die der verwendeten rezyklierten Gesteinskörnungen Typ 2 ersichtlich.

Tabelle 3-8: Stoffliche Zusammensetzung der verwendeten Chargen rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1

Probenbezeichnung	Rc	Ru	Rc+ Ru	Rb	Ra	X+R g	FL
Typ 1 2/16 mm aus Kapitel 3.3.3	88	10	98	0	0	0	1
Typ 1 2/16 Charge 2	83	14	97	1	1	0	1
Typ 1 2/16 Charge 3	91	9	99	0	0	0	0
Typ 1 2/16 Charge 4	95	3	98	0	0	0	1
Soll Typ 1			≥90	≤10	≤1	≤2	≤1

Tabelle 3-9: Stoffliche Zusammensetzung der verwendeten Chargen rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2

Probenbezeichnung	Rc	Ru	Rc+ Ru	Rb	Ra	X+R g	FL
Typ 2 2/16 mm aus Kapitel 3.3.3	75	8	83	15	0	0	0
Typ 2 2/16 Charge 2	74	15	89	12	1	0	1
Typ 2 2/16 Charge 3	79	7	86	12	0	0	1
Typ 2 2/16 Charge 4	84	5	89	9	0	0	1
Soll Typ 2			≥70	≤30	≤1	≤2	≤2

In Tabelle 3-10 sind die Kornrohdichten und Wasseraufnahmen nach zehn Minuten der verwendeten Gesteinskörnungen zusammengestellt. Die Korngrößenverteilungen und die resultierenden Mischungszusammensetzungen sind in Anhang B.2 zusammengestellt.

Tabelle 3-10: Verwendete Gesteinskörnungen und deren Eigenschaften

Probenbezeichnung	ρ_{rd} [kg/dm ³]	WA ₁₀ [M.-%]
Typ 1 2/16 mm aus Kapitel 3.3.3 Typ 2 (+16%)	2,31	1,21
Typ 1 2/16 Charge 2 (Typ 1 C2)	2,37	2,77
Typ 1 2/16 Charge 3 (Typ 1 C3)	2,38	2,39
Typ 1 2/16 Charge 4 (Typ 1 C4)	2,28	4,83
Typ 2 2/16 mm aus Kapitel 3.3.3 (Typ 2 (+16%))	2,39	2,20
Typ 2 2/16 Charge 2 (Typ 2 C2)	2,27	3,94
Typ 2 2/16 Charge 3 (Typ 2 C3)	2,24	3,77
Typ 2 2/16 Charge 4 (Typ 2 C4)	2,21	4,65

3.3.5.3 Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 3-22 zeigt die noch nicht durch die Zugabe von verflüssigenden Zusatzmitteln beeinflusste Ausgangskonsistenz aller Mischungen, geprüft mit dem Verdichtungsmaß gemäß [DIN EN 12350-4]. Trotz gleicher Körnungsziffern bei allen Betonen und des jeweils enthaltenen Zusatzwassers, entsprechend der Wasseraufnahme nach zehn Minuten, sind Konsistenzunterschiede vorhanden, die etwa der Spannweite zwischen unterer und oberer Grenze des plastischen Bereichs entsprechen. Unterschiede

im Verdichtungsmaß können sich bei gleichem k-Wert aus unterschiedlichen Kornformen oder aus der Tatsache ergeben, dass nicht für alle Fälle die Zusatzwassermenge entsprechend WA_{10} zutreffend ist.

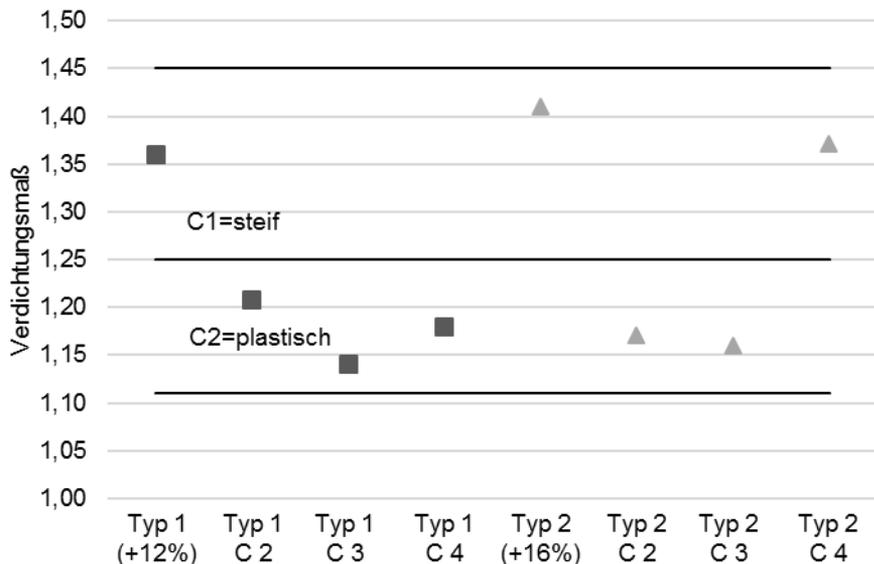


Abbildung 3-22: Verdichtungsmaß aller Betonzusammensetzungen

Durch Zugabe von Fließmittel wurde dann versucht, alle Betone auf eine möglichst einheitliche Konsistenz zu bringen. Die Fließmitteldosierungen gehen aus Tabelle 3-11 hervor.

Tabelle 3-11: Fließmitteldosierung in den hergestellten Betonen

Probenbezeichnung	FM-Dosierung [kg/m ³]	FM-Dosierung [M.-% von Zement]
Typ 1 (+12%)	2,65	0,76
Typ 1 C2	3,38	0,97
Typ 1 C3	3,12	0,89
Typ 1 C4	3,88	1,11
Typ 2 (+16%)	3,95	1,13
Typ 2 C2	5,53	1,58
Typ 2 C3	5,85	1,67
Typ 2 C4	6,00	1,71

Wie Abbildung 3-23 anhand der Ausbreitmaße nach 20 Minuten verdeutlicht, konnte für die Betonzusammensetzungen unter Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 durchweg eine Konsistenzklasse F4 erzielt werden, bei den Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 waren zwei der untersuchten vier Betone fließfähiger und innerhalb der Konsistenzklasse F5 einzuordnen, während die beiden anderen hergestellten Mischungen im Konsistenzbereich F4 lagen. Vor dem Hintergrund der

Untersuchungen in Kapitel 3.3.4 sollte die unterschiedliche Konsistenz die wirksamen Wasserzementwerte nicht stark beeinflussen. Die teils hohen Fließmittelmengen und der darüber zusätzlich in die Mischungen eingeführte Flüssigkeitsanteil müssen bei der Bewertung der Wassergehalte und Wasserzementwerte jedoch berücksichtigt werden.

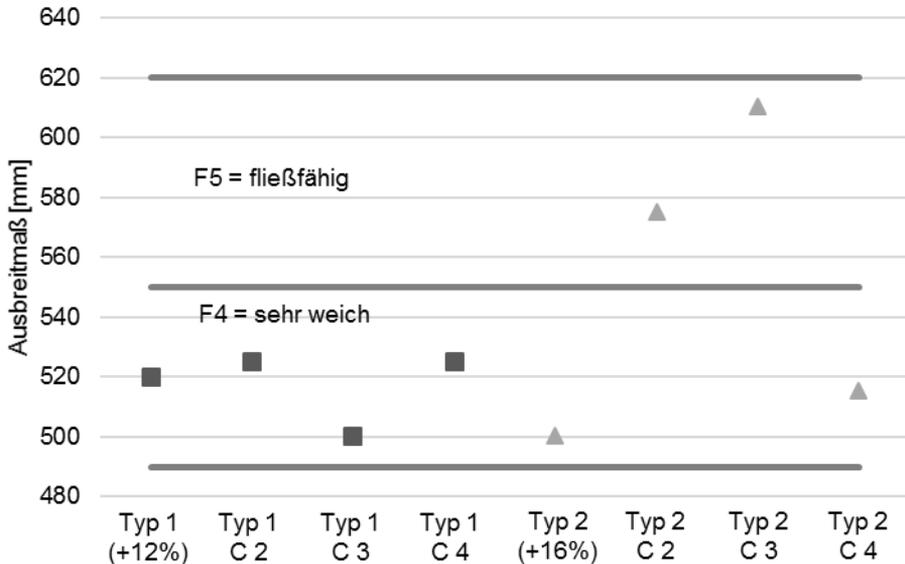


Abbildung 3-23: Ausbreitmaß nach 20 Minuten aller Mischungen

In den Untersuchungen zum Wassergehalt im Mörtel und den wirksamen Wasserzementwerten (Abbildung 3-24 und Abbildung 3-25) zeigte sich, dass der wirksame Wassergehalt und Wasserzementwert in fünf von sechs Fällen den angestrebten Ergebnissen aus den Versuchen des Kapitels 3.3.3 entsprach oder hinsichtlich des wirksamen Wasserzementwerts niedriger und somit auf der sicheren Seite lag. Mit der gewählten Vorgehensweise wurde somit in sieben von acht Fällen der Wasserzementwert der Referenzmischung mit natürlichem Splitt mit einer maximalen Abweichung von +0,02 eingehalten bzw. unterschritten. Bei einer von acht Mischung war die Zusatzwassermenge zu hoch für eine vollständige Absorption, woraus ein höherer wirksamer Wassergehalt und Wasserzementwert resultierten. Die hohen Fließmittelzugaben, welche zusätzliches Wasser in die Betonzusammensetzung einbringen, können diese Abweichungen von bis zu +0,02 vom Wasserzementwert der Referenzmischung teilweise erklären. Da kein Angleichen hinsichtlich der Kornform erfolgen konnte, sondern lediglich die Körnungsziffer konstant gehalten wurde, können Unterschiede im wirksamen Wassergehalt nach 30 Minuten und in der Konsistenz auch von Unterschieden im Wasseranspruch hervorgerufen werden.

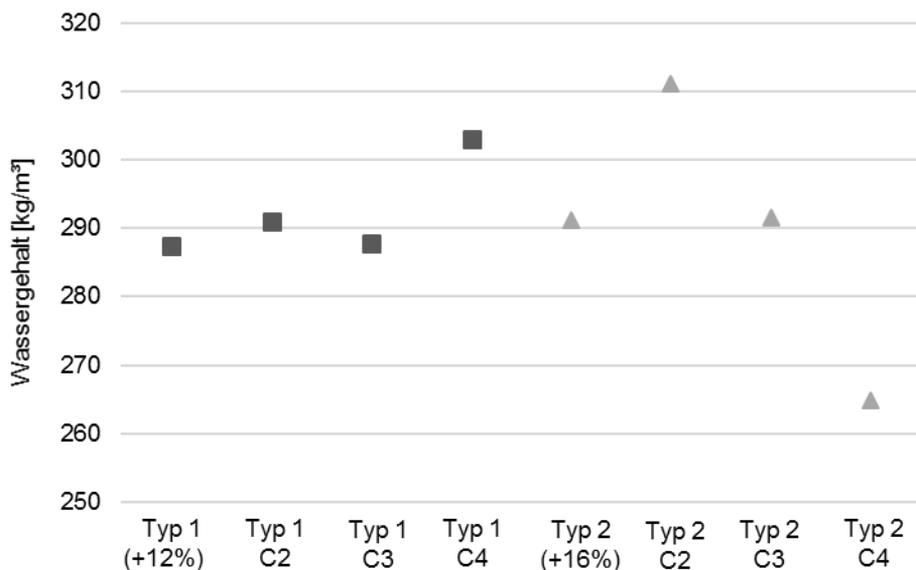


Abbildung 3-24: Wassergehalte im extrahierten Mörtel für alle Mischungen

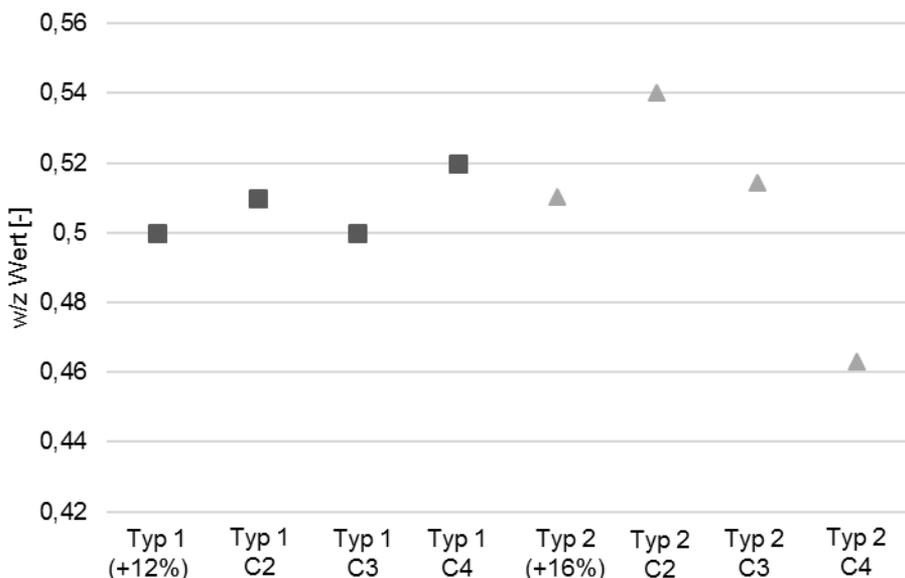


Abbildung 3-25: Wasserzementwerte für alle Mischungen

Bei der Analyse der ermittelten Festigkeitskennwerte der extrahierten Zementmörtel spiegeln sich die ermittelten Wassergehalten und Wasserzementwerten wieder (vgl. Abbildung 3-26). Die Mörteldruckfestigkeiten, die an den weiteren Chargen rezyklierter Gesteinskörnung ermittelt wurden überstiegen in allen Fällen die Mörtelfestigkeiten der Probekörper aus Kapitel 3.3.3. Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass

durch die gewählte Vorgehensweise, jeweils das Äquivalent von WA₁₀ als Zusatzwasser zuzugeben, mit allen Austauschgesteinskörnungen Festigkeitsergebnisse ähnlich bzw. größer der Druckfestigkeit der Referenzmischung mit natürlicher Gesteinskörnung erzielt werden konnten.

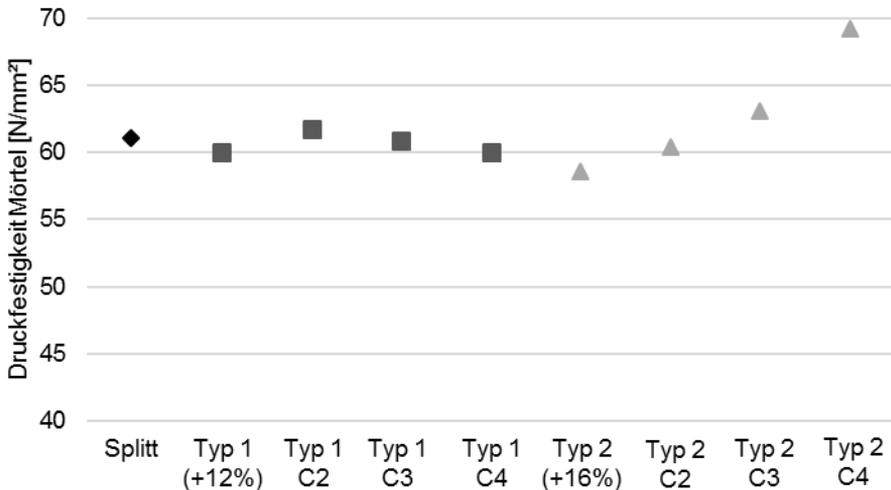


Abbildung 3-26: Mörteldruckfestigkeiten nach 28 Tagen

3.3.6 Einfluss rezyklierter Gesteinskörnung auf die Festbetoneigenschaften

Um abschließend beurteilen zu können, ob die Festbetoneigenschaften bei gleichem Wasserzementwert des Zementsteins bei Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung besser, vergleichbar oder schlechter sind, wurden an allen hinsichtlich ihrer Frischbetoneigenschaften diskutierten Betonen die folgenden Festbetoneigenschaften untersucht:

- Druckfestigkeit von Probekörpern nach [DIN EN 12390-3]
- Spaltzugfestigkeit von Probekörpern nach [DIN EN 12390-6]
- Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung nach [DIN EN 12390-13].

Die Gesamtergebnisse gehen aus Anhang B.1 hervor. Anhand der Ergebnisse wurde analysiert, wie die Festbetoneigenschaften derjenigen Betone ausfallen, deren Zementsteinmatrix annähernd gleiche Eigenschaften aufweisen sollten. Die Untersuchungen sollten zeigen, welchen Einfluss rezyklierte Gesteinskörnungen auf die Betoneigenschaften besitzen, da der Einflussfaktor Zementsteinmatrix, der neben den Eigenschaften der Verbundzone und den Eigenschaften der Gesteinskörnung die Betondruckfestigkeit bedingt, eliminiert wurde.

3.3.6.1 Festbetoneigenschaften bei vergleichbarer Zementsteinmatrix

Aus Kapitel 3.3.3 konnten zwei Gruppen vergleichbarer Betone identifiziert werden (siehe Abbildung 3-27 und Abbildung 3-28). Der Referenzbeton mit gebrochenem Naturgestein wies, gemäß des entwickelten Prüf- und Auswertungsverfahrens, einen Wasserzementwert von 0,50 auf. Unter den hergestellten Betonen mit variablem Gesamtwassergehalt konnten die Betone „Typ 1 (+12%) – Wdh.“ sowie „Typ 2 (+16%)“ als vergleichbar hinsichtlich des wirksamen Wasserzementwerts identifiziert werden. Der Referenzbeton mit natürlichem Kies hatte bei gleicher Mischungszusammensetzung aufgrund des geringeren Wasseranspruchs von rundem Korn gegenüber gebrochenem Korn einen höheren Wasserzementwert von 0,53. Jeweils eine Betonzusammensetzung mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 und Typ 2 erzielte einen Wasserzementwert von 0,52 sowie 0,54. Diese Betone wurden jeweils hinsichtlich ihrer Festbetoneigenschaften vergleichend betrachtet.

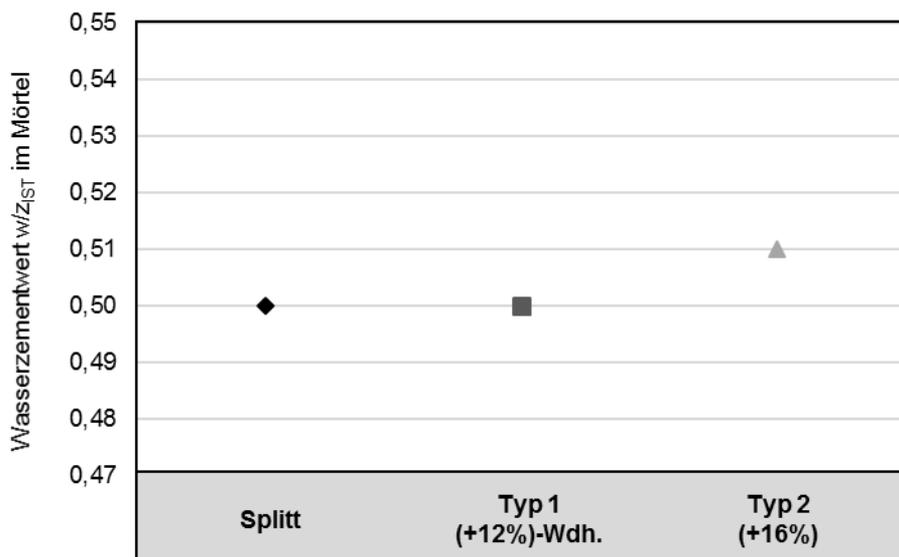


Abbildung 3-27: Betonzusammensetzungen mit vergleichbaren Wasserzementwerten wie Splitt

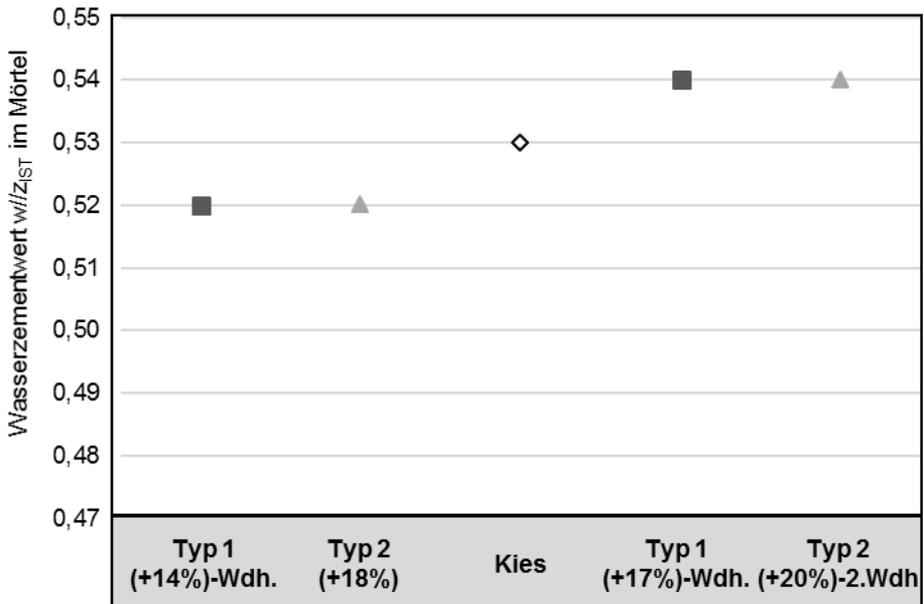


Abbildung 3-28: Betonzusammensetzungen mit vergleichbaren Wasserzementwerten wie Kies

Zur Kontrolle der Vergleichbarkeit sind in Abbildung 3-29 und Abbildung 3-30 die ermittelten Wassergehalte der ausgewählten Betone dargestellt.

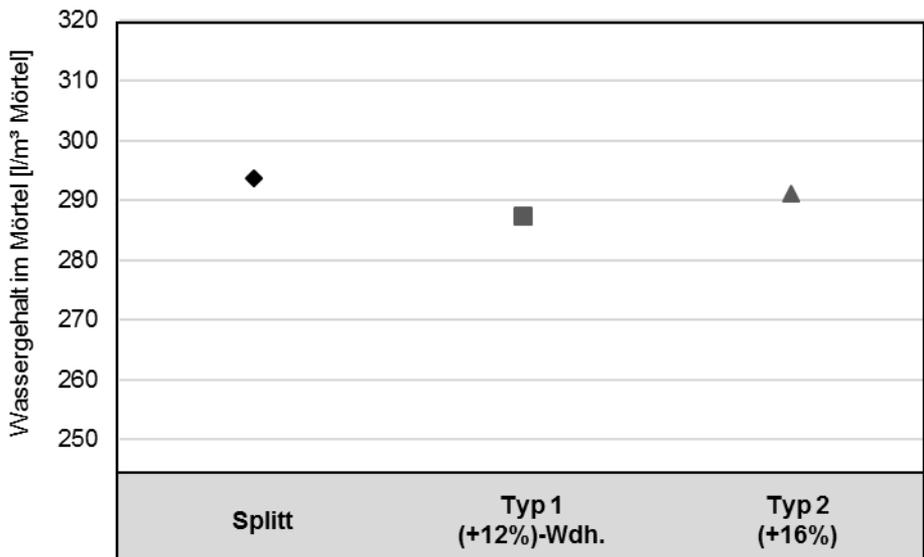


Abbildung 3-29: Wassergehalte im Mörtel der Vergleichsmischungen wie Splitt

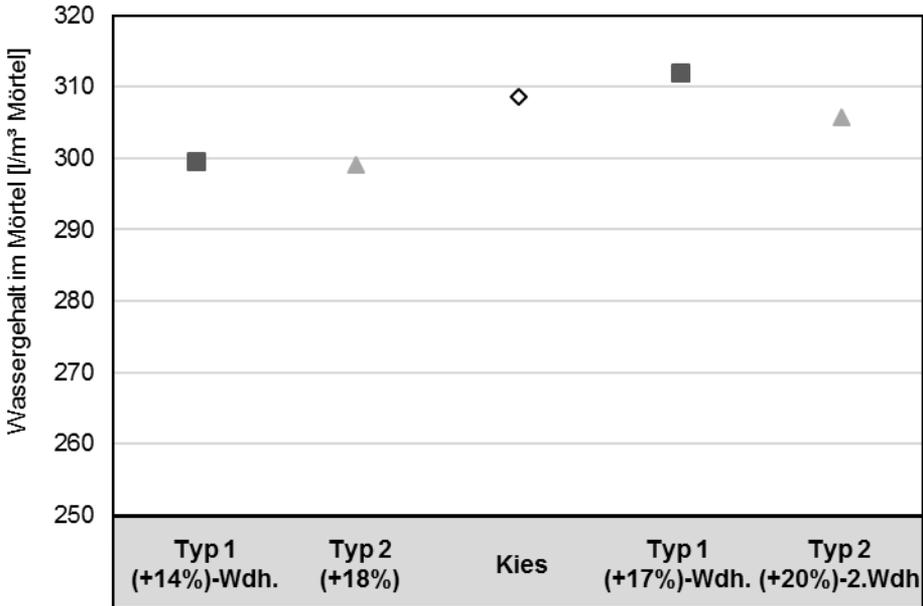


Abbildung 3-30: Wassergehalte im Mörtel der Vergleichsmischungen wie Kies

Außerdem wurde die Mörteldruckfestigkeit der ausgewählten Vergleichsmischungen betrachtet, um zu belegen, dass die Mischungen eine vergleichbare Zementsteinmatrix besitzen. Die Druckfestigkeit des extrahierten Mörtels nach 28 Tagen ist in Abbildung 3-31 und Abbildung 3-32 dargestellt. Bei den Betonen, die - gemäß der Kriterien für Wasserzementwert und Mörteldruckfestigkeit - eine vergleichbare Zementsteinmatrix wie die Referenzmischung aus natürlichem Kies aufweisen sind die beiden Betone „Typ 1 (+17%)-Wdh.“ Und „Typ 2 (+20%)-2. Wdh“ dem Referenzbeton am ähnlichsten.

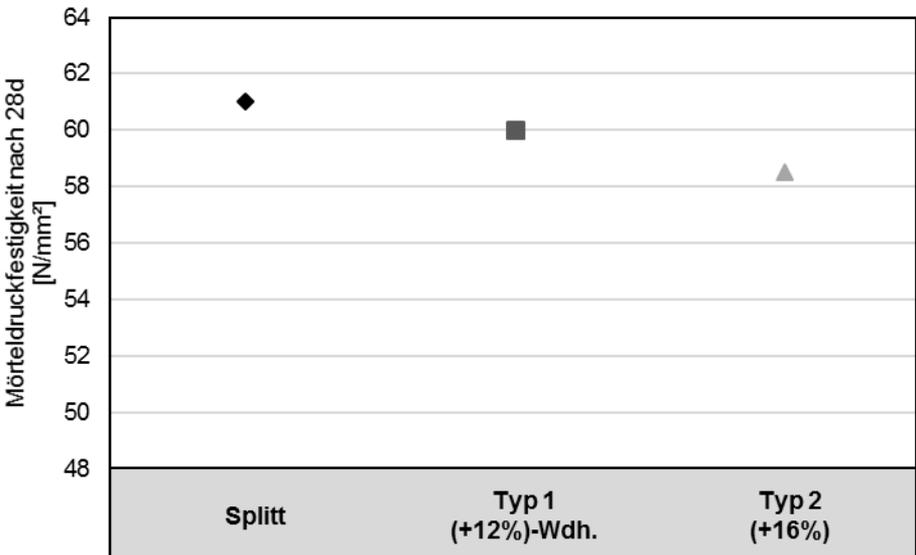


Abbildung 3-31: Mörteldruckfestigkeit nach 28 Tagen der Vergleichsmischungen wie Splitt

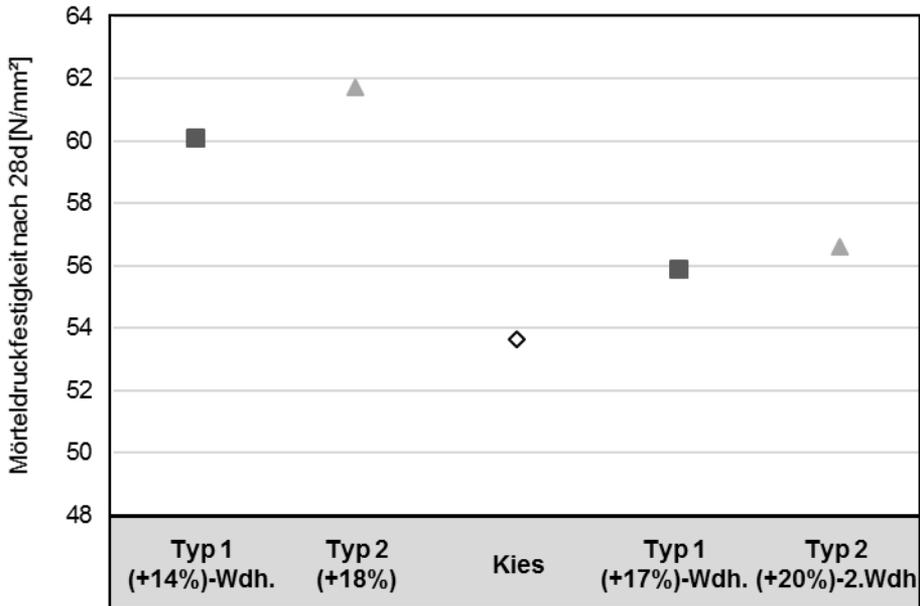


Abbildung 3-32: Mörteldruckfestigkeit nach 28 Tagen der Vergleichsmischungen wie Kies

Für die untereinander vergleichbaren Betone wurden nachfolgend die Betondruckfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit und das Elastizitätsmodul, jeweils als Mittelwert aus drei geprüften Einzelproben, analysiert.

Die Druckfestigkeiten der Betone mit vergleichbarer Zementsteinmatrix sind, wie die Abbildung 3-33 bis Abbildung 3-36 zeigen, im Rahmen der Prüfstreuungen als gleich anzusehen und damit unabhängig von der Art der verwendeten Gesteinskörnung. Beim Vergleich mit einer Referenzmischung aus natürlichem Rundkorn ist bei den vergleichbaren Mischungen mit rezyklierter Gesteinskörnung eine Tendenz zu höheren Druckfestigkeiten auszumachen.

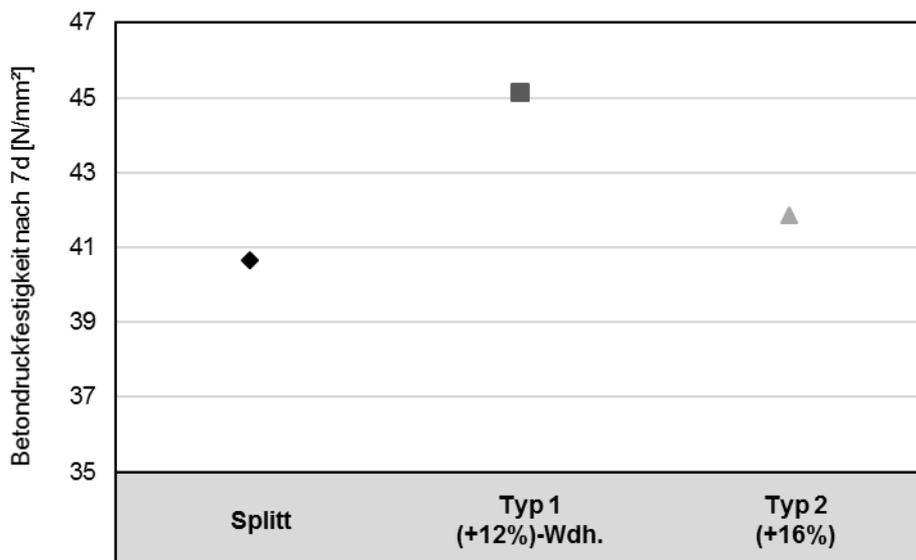


Abbildung 3-33: Betondruckfestigkeit nach sieben Tagen der Vergleichsmischungen wie Splitt

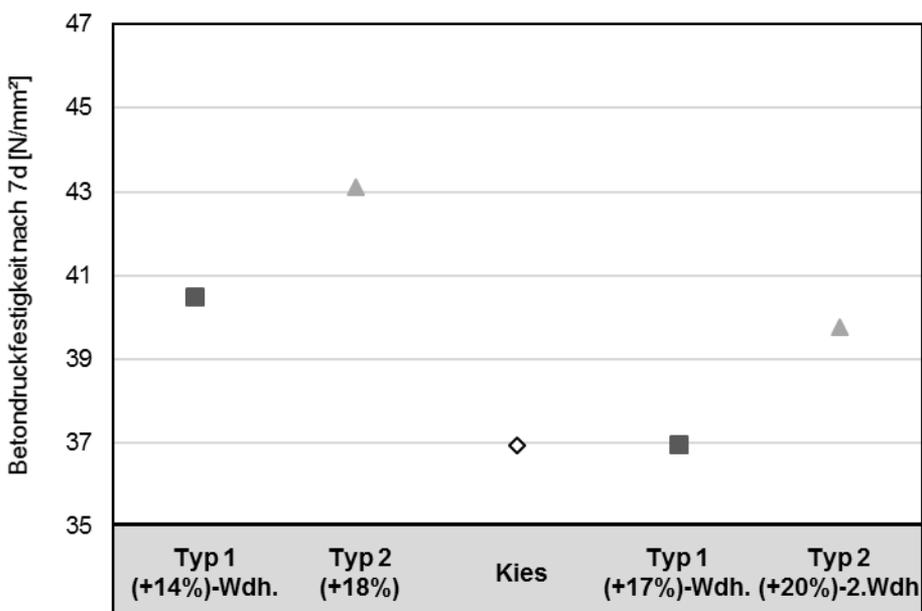


Abbildung 3-34: Betondruckfestigkeit nach sieben Tagen der Vergleichsmischungen wie Kies

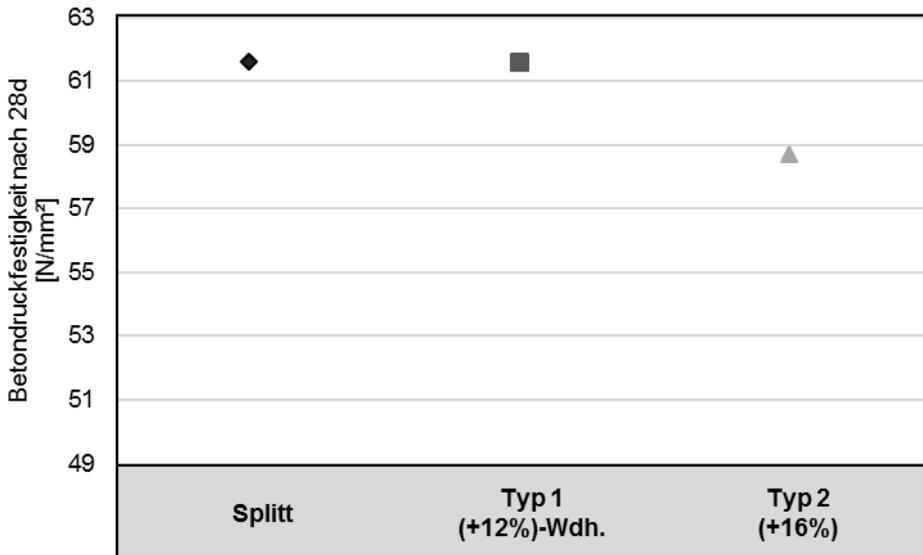


Abbildung 3-35: Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen der Vergleichsmischungen wie Splitt

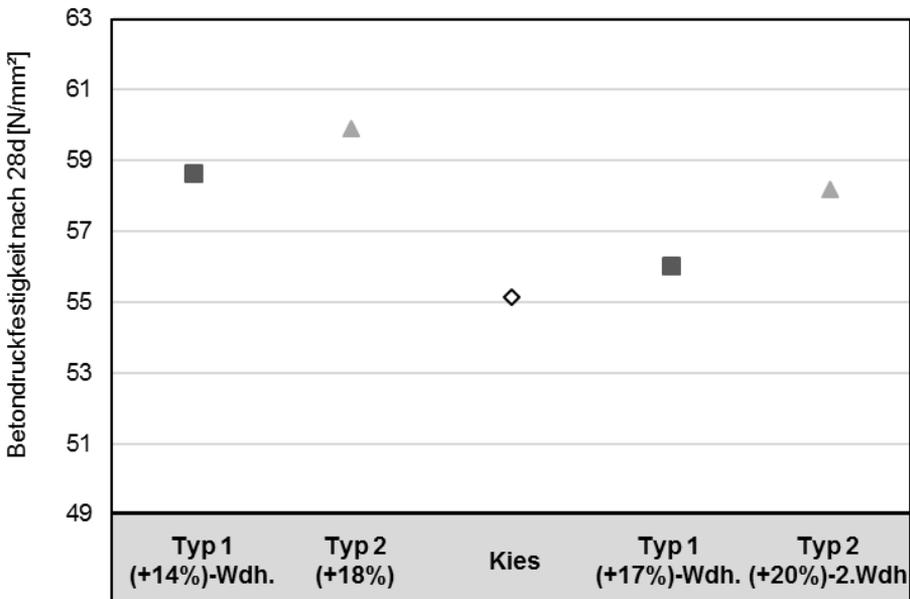


Abbildung 3-36: Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen der Vergleichsmischungen wie Kies

Auf die Spaltzugfestigkeit von Beton hat die rezyklierte Gesteinskörnung in den vorliegenden Ergebnissen (vgl. Abbildung 3-37 und Abbildung 3-38), unabhängig von Typ 1 oder Typ 2, keinen negativen Einfluss. Verglichen mit dem Beton aus natürlichem Kies ist die Spaltzugfestigkeit aller vergleichbaren Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung tendenziell höher.

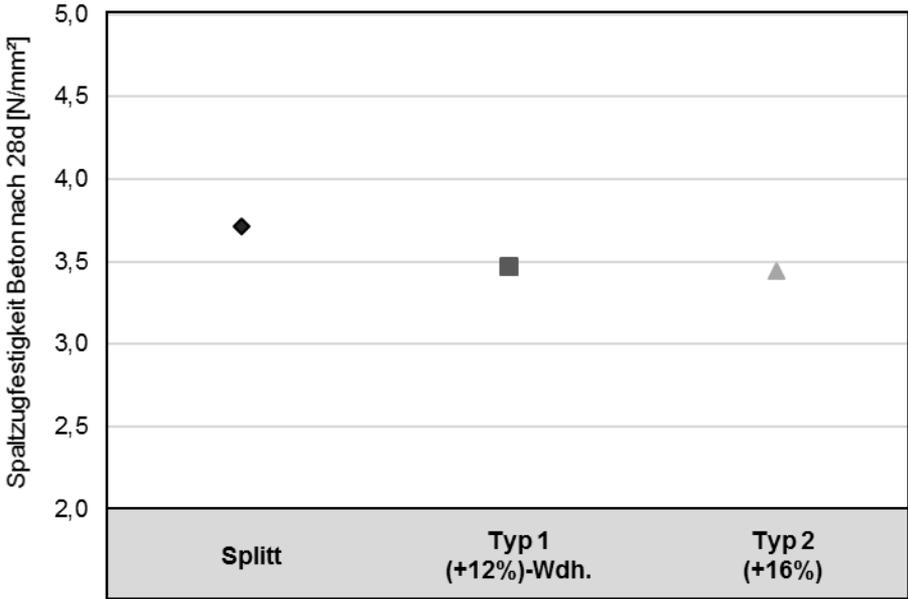


Abbildung 3-37: Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen der Vergleichsmischungen wie Splitt

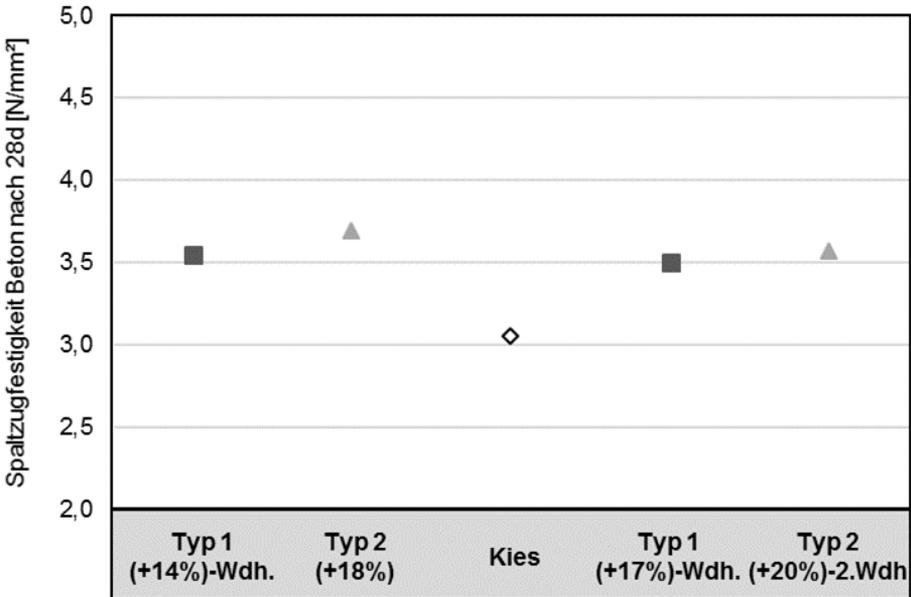


Abbildung 3-38: Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen der Vergleichsmischungen wie Kies

In Abbildung 3-39 und Abbildung 3-40 ist hinsichtlich der Elastizitätsmodule der untereinander vergleichbaren Betone eine Verringerung gegenüber natürlichem Splitt festzustellen, wenn die grobe Gesteinskörnung ≥ 2 mm durch rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 und Typ 2 ausgetauscht wird. Verglichen mit Beton aus natürlichem Kies lag der Elastizitätsmodul der Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung im vergleichbaren, tendenziell etwas höheren Bereich.

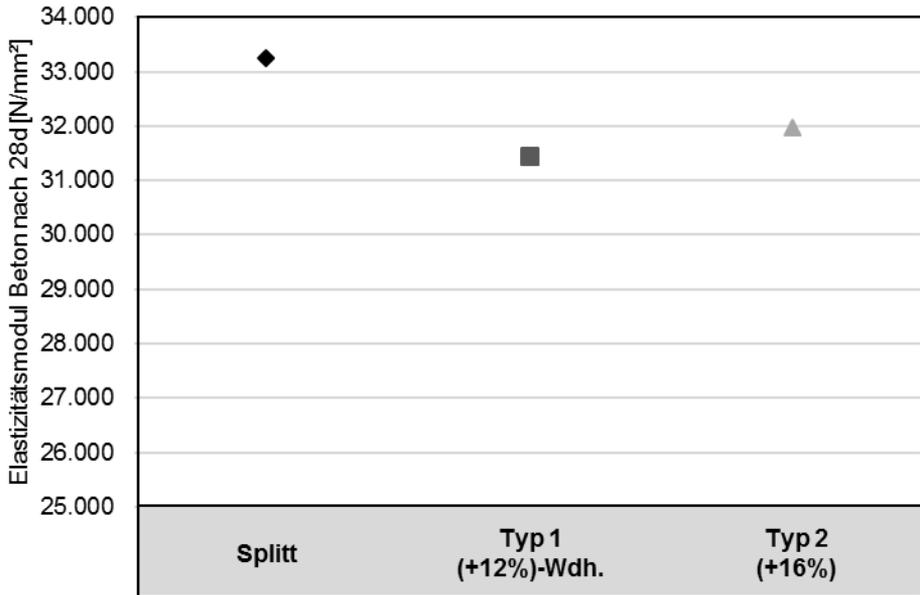


Abbildung 3-39: Elastizitätsmodul nach 28 Tagen der Vergleichsmischungen wie Splitt

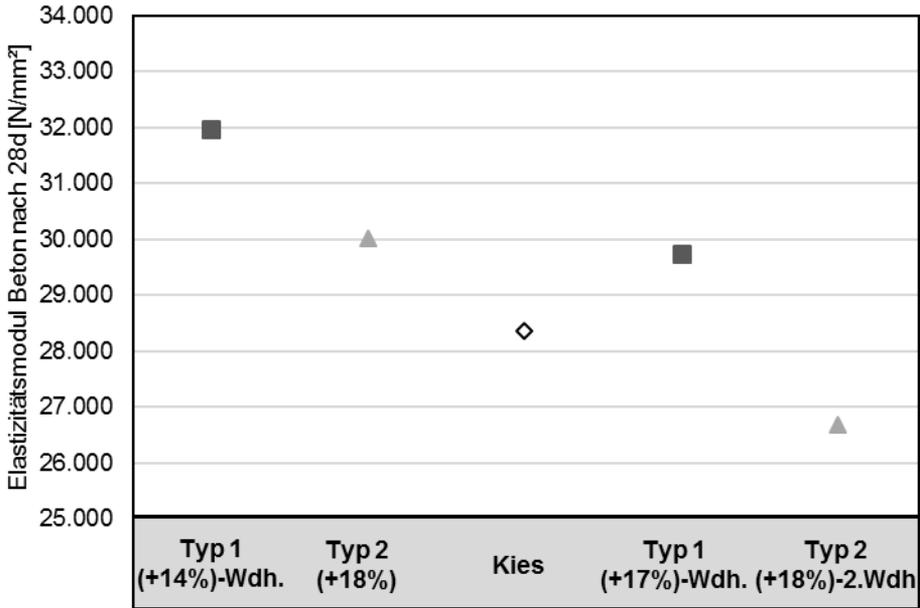


Abbildung 3-40: Elastizitätsmodul nach 28 Tagen der Vergleichsmischungen wie Kies

3.3.6.2 Druckfestigkeit bei wechselnder Gesteinskörnungsladung

Bei den in Abbildung 3-41 dargestellten Betondruckfestigkeiten zeigt sich, dass mit der gewählten Vorgehensweise in Kapitel 3.3.5 bei wechselnden Gesteinskörnungsladungen die Druckfestigkeiten der Betone mit gebrochenem Korn (Naturaufspaltung bzw. rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 und Typ 2) innerhalb einer Spannbreite von 12 N/mm² liegen. Dabei streuen die Ergebnisse maximal ± 6,0 N/mm² um einen gemeinsamen Mittelwert. Die Druckfestigkeiten der Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 lagen im gleichen Größenbereich wie die der Betone mit Typ 1.

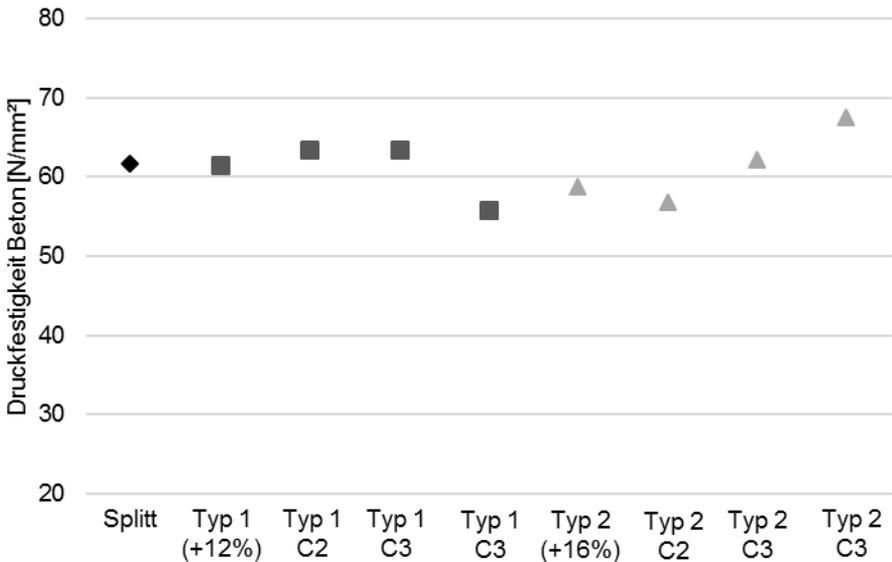


Abbildung 3-41: Betondruckfestigkeiten nach 28 Tagen

3.4 Schlussfolgerung 2: Notwendige Wasserdosierung und tatsächlicher Einfluss auf die Betoneigenschaften

Ziel der Untersuchungen in Kapitel 3 war es zu klären, welche Wasserzugabe für rezyklierte Gesteinskörnungen notwendig ist, um die Zusammensetzung des Zementmörtels gegenüber Beton mit natürlicher Gesteinskörnung beizubehalten. Wenn diese Fragestellung geklärt werden kann, ist es möglich zu bewerten, ob die Festigkeit und das Elastizitätsmodul von Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung mit den Eigenschaften von Beton aus natürlicher Gesteinskörnung vergleichbar sind, wenn die Zementsteinmatrix gleich ist.

Mit dem Äquivalent der Wasseraufnahme nach zehn Minuten im Pyknometerversuch nach [DIN EN 1097-6] konnten sowohl für rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 als auch Typ 2 mit ofentrockener Gesteinskörnung wirksame Wasserzemente erzielt werden, die der Zementsteinmatrix einer Vergleichsmischung aus natürlichem Splitt entsprachen. Verglichen mit einer Referenzmischung aus natürlichem Kies ist diese Wasserdosierung in den untersuchten Varianten stets auf der sicheren Seite.

Zusammenfassend zeigt sich aus den Versuchen zum Einfluss der Betonkonsistenz auf den wirksamen Wasserzementwert, dass bei Betonen, die mit rezyklierter Gesteinskörnung hergestellt werden, keine Veränderung des Saugverhaltens aufgrund unterschiedlicher Fließmitteldosierungen zur Variation der Lieferkonsistenz zu befürchten ist.

Auf die Druckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit der Betone mit annähernd gleicher Zementsteinmatrix hat rezyklierte Gesteinskörnung, unabhängig vom eingesetzten Gesteinskörnungstyp, keinen negativen Einfluss. Verglichen mit gebrochener natürlicher Gesteinskörnung sind die Festigkeitseigenschaften praktisch gleich, verglichen mit natürlichem Rundkorn tendenziell sogar besser. In den Versuchen zum Elastizitätsmodul

ist im Vergleich mit gebrochenem Naturkorn eine Verringerung, beim Vergleich mit Rundkorn kein negativer Einfluss festzustellen.

Ein Austausch der Gesteinskörnung durch verschiedene Praxislieferungen (weitere Produktionschargen) aus demselben Aufbereitungswerk führte in drei von vier untersuchten Fällen zu praktisch gleichen Festigkeiten der extrahierten Mörtel und somit zu praktisch gleichen Eigenschaften in der Zementsteinmatrix. Die Betondruckfestigkeit der Betone wich um maximal ± 6 MPa von der Druckfestigkeit der Vergleichsmischung mit natürlichem Splitt ab. Bei wechselnder Gesteinskörnungsscharge wurde in den Versuchen die Körnungsziffer und Korngrößenverteilung, der Mörtelgehalt sowie der Zementgehalt beibehalten. Die Wasserzugabe wurde bei allen Betonen um das jeweilige Äquivalent der Wasseraufnahme in zehn Minuten erhöht.

4 Einfluss des Feuchtezustands rezyklierter Gesteinskörnung auf die Eigenschaften von Beton

4.1 Einleitung

Wie in Kapitel 2 bereits thematisiert, besitzen rezyklierte Gesteinskörnungen ein hohes Wasseraufnahmevermögen. Kommen sie in Kontakt mit Wasser in gasförmiger oder flüssiger Form, so kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen der Gesteinskörnung und Wasser. Bei rezyklierten Gesteinskörnungen, die auf Halden gelagert werden, findet eine Interaktion mit der Luftfeuchtigkeit der Umgebung statt. Werden die Gesteinskörnungen im trockenen Zustand in den Betonmischprozess gegeben, so kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen der Gesteinskörnung und dem zum Vornässen vorab zur Gesteinskörnung gegebenen Wasser oder dem Zementmörtel als plastischem Gemisch aus Zement, Gesteinskörnung < 2 mm, Zusatzmittel und Wasser. Im vorangegangenen Kapitel 3 wurde in Laborversuchen an ofengetrockneter Gesteinskörnung untersucht, welche zusätzliche Wasserzugabe für die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 und Typ 2 bei einem zweistufigen Mischprozess (Vornässen + eigentliches Mischen) erforderlich ist, um im Beton einen gleichen Wasserzementwert zu erreichen wie bei Verwendung von natürlicher Gesteinskörnung. Die Verwendung von vollständig getrockneter Gesteinskörnung, wie sie im Rahmen von Forschungsarbeiten im Labor möglich ist, entspricht allerdings nicht den Bedingungen in der Praxis.

In der Praxis wird die rezyklierte Gesteinskörnung eher selten in einem vollständig trockenen Zustand vorliegen. Auch ein zweistufiger Mischablauf entspricht nicht der zeit- und kostenoptimierenden Vorgehensweise in der Praxis. Deshalb wurde in einem einstufigen Mischprozess untersucht, wie sich verschiedene Feuchtezustände der Gesteinskörnung auf den Wasseraustausch zwischen Gesteinskörnung und Zementmörtel untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind im nachfolgenden Kapitel 4 dargestellt. Die von Betonherstellern verwendete Gesteinskörnung weist stets eine Eigenfeuchte auf, die noch dazu witterungsbedingt Schwankungen unterliegen kann. Um eine praxisgerechte Handlungsempfehlung aussprechen zu können, wurde der Einfluss des Feuchtezustands von rezyklierter Gesteinskörnung auf den wirksamen Wassergehalt des Zementmörtels und auf die Eigenschaften des Betons sowohl theoretisch anhand von Literaturstudien aufgearbeitet als auch in praktischen Laborversuchen analysiert.

Bereits in Kapitel 3.2.3 wurde thematisiert, dass man von dem Saugverhalten in Kontakt mit Wasser, wie es bei frei bewitterter Lagerung der Gesteinskörnung oder im Pyknometerversuch zur Bestimmung der Wasseraufnahme auftritt, nur bedingt auf das Saugverhalten von saugender Gesteinskörnung in Kontakt mit dem Zementleim schließen kann [Thienel - 2018]. Auch wurde bereits die Feststellung aus [Thienel - 2018] diskutiert, dass das erforderliche zusätzliche Wasser maßgeblich von der Eigenfeuchte der saugenden Gesteinskörnung abhängt. Die Ergebnisse wurden jedoch anhand von leichten Gesteinskörnungen ermittelt. Für rezyklierte Gesteinskörnungen in den in Deutschland vorgesehenen stofflichen Zusammensetzungen sind bislang keine Ergebnisse veröffentlicht.

Im Folgenden wird zunächst anhand einer Literaturstudie auf die grundsätzlichen Mechanismen und die Unterschiede in der Wasseraufnahme von rezyklierten Gesteinskörnungen beim Kontakt mit Wasser und Zementleim eingegangen. Aus dieser Literaturstudien wird ein Versuchsprogramm abgeleitet, das den in Kapitel 3 konzipierten Prüfaufbau aufgreift und es ermöglicht, die Auswirkungen unterschiedlicher Feuchtezustände der verwendeten Gesteinskörnung auf den wirksamen Wassergehalt sowie die Frisch- und Festbetoneigenschaften zu beurteilen.

4.2 Grundlagen zum Einfluss des Feuchtezustands bei gleichem Gesamtwasser auf den Wasserzementwert

4.2.1 Unterschiede in der Wechselwirkung zwischen rezyklierter Gesteinskörnung und Wasser bzw. Zementleim

Die Erkenntnis, dass die Wasseraufnahme in reinem Wasser und in Zementleim für saugende Gesteinskörnungen in Form von leichten Gesteinskörnungen nicht übereinstimmt, ist in der Literatur konsistent (z. B. [Thienel - 1996], [Thienel - 1997], [Thienel - 2011], [Bello et al. - 2017], [Domagała - 2015]). Für rezyklierte Gesteinskörnungen sind nur einzelne Studien vorhanden. Bei der Literaturstudie als theoretische Basis für die nachfolgenden Laborversuche wurde deshalb auch hier ergänzend auf die Analogie zwischen leichten Gesteinskörnungen und rezyklierten Gesteinskörnungen zurückgegriffen, da beide deutlich höhere Porosität besitzen als natürliche Gesteinskörnungen und somit der qualitative Unterschied im Vergleich mit natürlicher Gesteinskörnung analog möglich ist. Die Unterschiede im Saugvermögen resultieren aus den verschiedenen Eigenschaften von reinem Wasser und Zementmörtel.

Zementleim ist gemäß [Wesche u. Vom Berg - 1973] eine Suspension aus Wasser, Zement und feinen Bestandteilen der Gesteinskörnung. Während reines Wasser eine Newtonsche Flüssigkeit ist, wird Zementleim in der Rheologie als Bingham-Körper mit thixotropen Eigenschaften beschrieben. Newtonsche Flüssigkeiten setzen einer Verformung beim Fließen einen Widerstand entgegen, ausgedrückt als Scherspannung. Dieser Widerstand ist stets proportional zur Schergeschwindigkeit ist. Der Proportionalitätsfaktor ist die Viskosität. Bingham-Körper verhalten sich bei Scherbeanspruchung zunächst wie feste Körper. Erst oberhalb einer Fließgrenze beginnen sie zu fließen. Die Viskosität von Zementleim hängt dabei von der Konzentration der dispergierten Partikel ab (vgl. [Heese u. Breit - 2014]) und kann durch Zugabe von verflüssigenden Betonzusatzmitteln beeinflusst werden.

In [Bello et al. - 2017] wurde die Wasseraufnahme von natürlichen und leichten groben Gesteinskörnungen mit Größtkorn 8 mm in reinem Wasser und in Kontakt mit Zementleim untersucht. Dazu wurde die Gesteinskörnung mit separat angemischtem Zementmörtel vermengt und nach einer Ruhezeit wieder von diesem getrennt. Über die Masendifferenz zwischen der Wägung vor und nach dem Kontakt mit dem Zementleim wurde die Wasseraufnahme der Gesteinskörnungen beurteilt. Die Wasseraufnahme der porösen leichten Gesteinskörnungen in Kontakt mit Zementleim wurde innerhalb der ersten fünf Minuten Kontaktzeit nicht vom Wasserzementwert des Zementleims beeinflusst. Die aufgenommene Wassermenge war aber in allen Untersuchungen ca. 25 % geringer als bei Kontakt mit reinem Wasser bei identischer Kontaktzeit. Zwischen

fünf und 30 Minuten Saugzeit blieb die Differenz zwischen der Wasseraufnahme in Wasser und der Wasseraufnahme in Zementleim in etwa konstant. Nach 30 Minuten dominierte der Effekt der Hydratationsprozesse gegenüber der Wasseraufnahme, so dass die Wasseraufnahme aus dem Zementleim merklich geringer war als bei Kontakt mit reinem Wasser. Die wesentlichen Unterschiede in der Wasseraufnahme zwischen reinem Wasser und Zementleim resultieren gemäß [Bello et al. - 2017] aus den ersten fünf Minuten Kontaktzeit, da hier die Wasseraufnahmerate beim Zementleim deutlich kleiner war als bei der Gesteinskörnung, die reinem Wasser ausgesetzt war. Nach den ersten fünf Minuten lag die Wasseraufnahmerate beider betrachteter Systeme dann etwa im gleichen Rahmen. Der Unterschied wurde darauf zurückgeführt, dass durch die Zementpartikel die Kapillarporen verstopfen. Die kapillare Wasseraufnahme werde so behindert. Niedrige Wasserzementwerte führten dazu, dass nach 30 Minuten keine weitere Wasseraufnahme durch die leichte Gesteinskörnung stattfand. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass kein freies Wasser mehr vorhanden war [Bello et al. - 2017].

Ähnliche Erkenntnisse wurden auch in [Domagała - 2015] veröffentlicht. Die Wasseraufnahme der in [Domagała - 2015] verwendeten, trocken in den Mischprozess gegebenen leichten Gesteinskörnung in Kontakt mit Zementleim entsprach 60 % bis 95 % der Wasseraufnahme in reinem Wasser nach gleich langer Saugzeit. Je höher der Wasserzementwert der Mischung, desto größer war die absolut betrachtete Reduktion des Wassergehalts im Mörtel durch das Saugen der leichten Gesteinskörnung. Je größer das im Zementleim vorhandene Wasserangebot, desto mehr Wasser wurde von der Gesteinskörnung aufgenommen. Prozentual betrachtet war die Absenkung des Wassergehalts jedoch bei den Mischungen mit niedrigen Wasserzementwerten am größten [Domagała - 2015]. Bei Gesteinskörnungen mit geringer Wasseraufnahme sind die Eigenschaften des Zementleims (z. B. Wasserzementwert) von sehr geringer Bedeutung [Domagała - 2015].

In [Bentz u. Hansen - 2000] wurde mithilfe der Computertomographie die Kinetik der Wasseraufnahme in Frischbetonen untersucht. Dabei wurde unter anderem auch beobachtet, wie die Wasserverteilung sich verändert, wenn zwei Schichten unterschiedlicher Porosität aufeinandertreffen, wie dies beispielsweise beim Kontakt zwischen Gesteinskorn und Zementsteinmatrix der Fall sein kann. Die Ergebnisse zeigten, dass Wasser bevorzugt von Bereichen mit hoher Porosität in Folge eines hohen Wasserzementwerts in Bereiche mit geringer Porosität wandert. In [Thienel - 1997] wurde ebenfalls auf die Kinetik von Wasser in Betonen während der Hydratation eingegangen. Gemäß [Thienel - 1997] wird in Leichtbetonen durch die großen Unterschiede der Porendurchmesser Wasser durch Kapillarsog von der leichten Gesteinskörnung mit ihren deutlich größeren Poren in die neu entstandene Zementsteinmatrix mit ihren deutlich kleineren Porendurchmessern transportiert.

Wie viel zusätzliches Wasser in einer Betonzusammensetzung erforderlich ist hängt gemäß [Thienel - 2018] maßgeblich von der Eigenfeuchte der leichten Gesteinskörnung ab. Eine bereits vorgefeuchtete, z. B. frei bewittert gelagerte oder gezielt berieselte, leichte Gesteinskörnung nimmt oftmals größere Wassermengen auf als bei kurzzeitiger Wasserlagerung, was die korrekte Annahme des zusätzlich erforderlichen Wassers bei feuchter Gesteinskörnung erschwert [Aurich - 1971]. Die Auswirkungen einer (teilweisen) Sättigung der Gesteinskörnung sind somit unbedingt zu berücksich-

tigen. In [Bello et al. - 2017] wurden anhand von leichten Gesteinskörnungen die Auswirkungen unterschiedlicher Feuchtezustände auf den Wasserzementwert im Beton untersucht. Leichte Gesteinskörnung, die im wassergesättigten Zustand mit Zementleim vermischt wurde, zeigte ein Desorptionsverhalten, gab also Wasser an den Zementleim ab. Dabei setzte vollständig vorgesättigte leichte Gesteinskörnung bis zu 20 % ihres ursprünglichen Wassergehalts frei. Diese Freisetzung erfolgte in den ersten fünf Minuten des Kontakts. Innerhalb dieser fünf Minuten fand das Mischen von Gesteinskörnung und Zementleim statt. Die Verwendung der wassergesättigten leichten Gesteinskörnung im Mischprozess wirkte sich außerdem auf die Konsistenz aus. Es resultierte eine Verflüssigung des Systems infolge der Erhöhung des Wasserzementwerts [Bello et al. - 2017]. Zu gleichen Schlussfolgerungen kamen Poon et. al. in [Poon et al. - 2004] unter Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen.

Gesteinskörnungen, die im vollständig getrockneten bzw. im luftgetrockenen Zustand mit Zementleim vermischt wurden, nahmen in [Bello et al. - 2017] zusätzliches Wasser aus dem Zementleim heraus auf. Die Wasseraufnahme aus dem Zementleim heraus war in [Bello et al. - 2017] bei den vollständig trockenen Körnungen höher als bei den luftgetrockenen Gesteinskörnungen. Die nur teilweise Vorsättigung der leichten Gesteinskörnung führte zu einer relativ stabilen Konsistenz über die Zeit. Der Einsatz vollständig trockener Körnung führte zur steifsten Konsistenz unter den drei geprüften Varianten und zu einem deutlichen Konsistenzverlust über einen Betrachtungszeitraum von 120 Minuten [Bello et al. - 2017].

Poon et al. [Poon et al. - 2004] untersuchten die Konsistenz des Frischbetons sowie die Druckfestigkeit von Beton nach 3, 7 und 28 Tagen bei Beton mit natürlicher und teilweise durch rezykliertes Material ersetzter Gesteinskörnung. Dabei wurde die Gesamtwassermenge stets konstant gehalten, lediglich die Verteilung auf den Anfangsfeuchtegehalt der Gesteinskörnung und das Zugabewasser wurde variiert. Untersucht wurde ofentrockene, wassergesättigte und oberflächentrockene, sowie luftgetrocknete Gesteinskörnung. Aus den Versuchen konnten die in Abbildung 4-1 dargestellten Werte für das Setzmaß für Beton mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung ermittelt werden. Die Anfangskonsistenz war abhängig vom Zugabewasser. So besaß der Beton mit wassergesättigter (SSD) und ofentrockener Gesteinskörnung (OD) das kleinste Setzmaß, gefolgt von der Betonzusammensetzung mit luftgetrockneter (AD) Gesteinskörnung und dem höchsten Setzmaß bei der Mischung mit komplett trockener Gesteinskörnung.

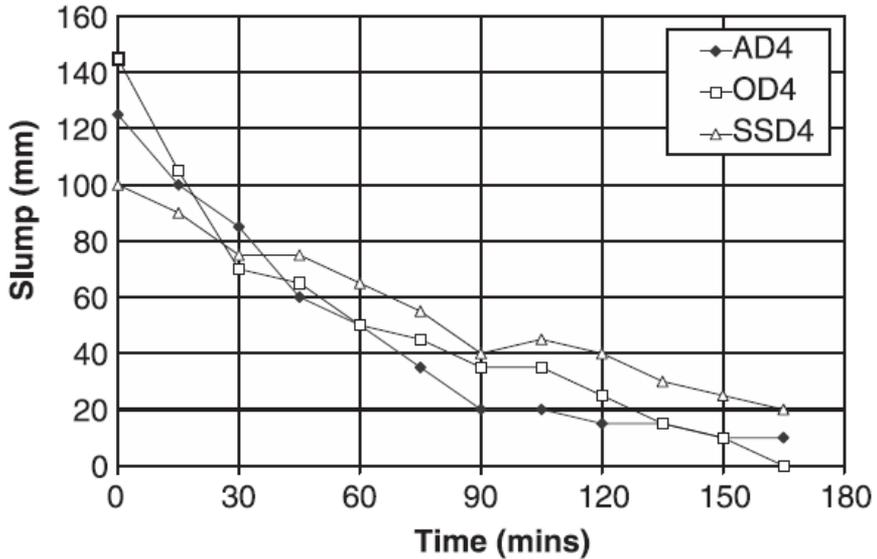


Abbildung 4-1: Setzmaß über die Zeit für Beton mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung mit verschiedenen Anfangsfeuchtegehalten. AD (air dried, luftgetrocknet), OD (oven dried, ofengetrocknet), SSD (saturated surface-dried, wassergesättigt und oberflächentrocken) [Poon et al. - 2004]

Die Konsistenz des Betons mit vollständig getrockneter Gesteinskörnung nahm jedoch durch das starke Wassersaugen der Gesteinskörnung rasch ab und erreichte als erstes ein Setzmaß von Null.

Die Ergebnisse zu den Druckfestigkeitsuntersuchungen in [Poon et al. - 2004] sind in Abbildung 4-2 dargestellt. Die höchste Enddruckfestigkeit (nach 28 Tagen) zeigte sich bei Beton mit luftgetrockneter (AD), gefolgt von Beton mit ofentrockener (OD) Gesteinskörnung. Die niedrigste Betondruckfestigkeit wies das Gemisch mit wassergesättigter (SSD) Gesteinskörnung auf.

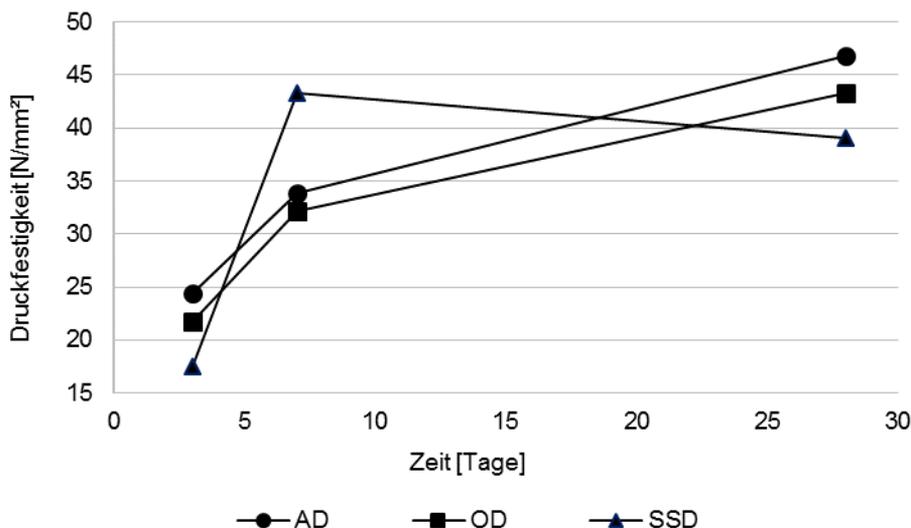


Abbildung 4-2: Druckfestigkeit über die Zeit für Beton mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung mit verschiedenen Anfangsfeuchtegehalten, (Werte aus [Poon et al. - 2004])

Die niedrigere Endfestigkeit des Betons mit wassergesättigter Gesteinskörnung wurde in [Poon et al. - 2004] damit erklärt, dass beim Verdichten Wasser von der Gesteinskörnung an den Zementleim abgegeben wurde. Dadurch entsteht in der Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung ein lokal höherer Wasserzementwert, was zu einer Schwächung der Verbundzone zwischen Gesteinskörnung und neuer Zementsteinmatrix führt. Für den Fall der nicht vollständig gesättigten Gesteinskörnungen im OD- bzw. AD-Zustand wurde in [Poon et al. - 2004] vermutet, dass die Verbundzone sehr gut ausgebildet sei, da aufgrund der Wasserbewegung vom Zementleim in die Gesteinskörnung selbst der lokale Wasserzementwert um die Gesteinskörner abgesenkt würde und es zu einer Konzentration von Zementpartikeln käme.

Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung, die im lufttrockenen Zustand, weder komplett trocken noch komplett wassergesättigt, im Beton eingesetzt wurde, wies in den Untersuchungen nach Poon et al. [Poon et al. - 2004] sowohl hinsichtlich der Konsistenz als auch hinsichtlich der Druckfestigkeit ähnliche Werte wie der Vergleichsbeton mit natürlicher Gesteinskörnung auf und wurde als idealer Feuchtezustand bewertet.

Dass durch teilweise vorgesättigte saugende Gesteinskörnung in [Poon et al. - 2004] die besten Festbetoneigenschaften erzielt wurden, deckt sich mit der Erkenntnis aus [Thienel - 1997] für Beton mit leichten Gesteinskörnungen. Da die Poren von leichten Gesteinskörnungen stets größer sind als die Poren der neu entstehenden Zementsteinmatrix in einem Leichtbeton, wird gemäß [Thienel - 1997] während der Hydratation das in der Gesteinskörnung enthaltene Wasser über Kapillarsog in die Zementsteinmatrix transportiert, was eine sehr gute Hydratation der Kontaktzone bewirkt und insgesamt zu einem dichten Gefüge führt. Das von der Gesteinskörnung aufgenommene Wasser steht somit nach [Thienel - 1997] der Zementsteinmatrix während der Hydratation zur Verfügung und bewirkt eine Art innere Nachbehandlung.

In [Domagała - 2015] wurde leichte Gesteinskörnung in verschiedenen Feuchtezuständen in Beton eingesetzt. Die Wasseraufnahme der verwendeten leichten Gesteinskörnung aus gesinterter Flugasche in Frischbeton entsprach dabei, abhängig vom Feuchtezustand, zwischen 60 % und 100 % des mit reinem Wasser ermittelten Saugwerts. Wurden die Gesteinskörnungen in getrocknetem Zustand eingesetzt, so entsprach die Wasseraufnahme aus dem Frischbeton heraus 60 - 95 % ihrer mit reinem Wasser ermittelten Wasseraufnahme. Wurde sie dagegen in einem feuchten Zustand mit ca. 17 % Feuchte eingesetzt, was der Wasseraufnahme nach einer Stunde entsprach, so wurden in Summe 85 - 100 % der Wasseraufnahme in reinem Wasser erreicht. Die Vorsättigung der leichten Gesteinskörnung auf einen Feuchtegehalt von 17 % entsprechend ihrer Wasseraufnahme nach einer Stunde und die Annahme, dass diese Gesteinskörnung dem Zementleim weitere 2 M.-% Wasser entziehen würde, führte in [Domagała - 2015] zu guten Übereinstimmungen zwischen dem errechneten und dem tatsächlich geprüften Wasserzementwert. Die Absenkung des Wasserzementwerts kann die Festigkeit bei Betonen mit leichter Gesteinskörnung nennenswert erhöhen. Die Betondruckfestigkeit war auch bei Betonen, die so vorgehäst waren, dass lediglich noch 2 M.-% Wasseraufnahme über den Kontakt mit dem Zementleim erfolgen sollten, höher als die Festigkeit des entsprechenden Zementsteins [Domagała - 2015].

Zusammenfassend sind als bedeutendste Faktoren für die Höhe der Wasseraufnahme in frischem Leichtbeton der Feuchtezustand der Gesteinskörnung zum Zeitpunkt der Betonherstellung in Relation zu ihrer Wasseraufnahme, der Anteil an leichter Gesteinskörnung in der Betonzusammensetzung und die Eigenschaften des Zementleims zu nennen [Domagała - 2015]. Je höher der Wasserzementwert der Betonmischung, desto höher im Absoluten die Absenkung des Wasserzementwerts durch Aufnahme von Wasser durch die Gesteinskörnung. Bei niedrigeren Wasserzementwerten ist jedoch die prozentuale Veränderung des Wasserzementwerts durch wassersaugende Gesteinskörnung größer als bei hohen [Domagała - 2015].

Bei haldenfeuchtem Material bleibt gemäß [Aurich - 1971] in der Praxis bislang nur die Überprüfung und Korrektur der bei der Mischungsberechnung getroffenen Annahmen über die Konsistenz im Rahmen der Erstprüfung.

Nachfolgend wurde für rezyklierte Gesteinskörnungen in Laborversuchen ermittelt, wie sich die lokale Verteilung eines festen Gesamtwassergehaltes zu Mischbeginn aufgrund variierender Gesteinskörnungsfeuchten auf die Eigenschaften des hergestellten Betons auswirkt. Hierzu wurden zunächst die zu betrachtenden möglichen Feuchtezustände definiert, um durch die Auswertung der Versuchsergebnisse die korrekte Berücksichtigung von schwankenden Gesteinskörnungsfeuchten bewerten zu können.

4.2.2 Mögliche Feuchtezustände rezyklierter Gesteinskörnung

Die Eigenfeuchte der Gesteinskörnung wird bestimmt durch den Gehalt des Gesamtwassers bezogen auf die Masse der trockenen Körnung. Das Gesamtwasser besteht hierbei aus der in den Poren enthaltenen Kernfeuchte und der Oberflächenfeuchte. In [Poon et al. - 2004] wurden verschiedene Feuchtezustände von rezyklierter Gesteinskörnung untersucht. Analog zu dieser Vorgehensweise wurde in den nachfolgend beschriebenen Versuchsreihen die rezyklierte Gesteinskörnung eingesetzt. Gemäß Abbildung 4-3 wurde unterschieden in OD (oven-dried, ofengetrocknet), AD (air-dried,

luftgetrocknet) und SSD (saturated-surface-dried, wassergesättigt und oberflächentrocken).

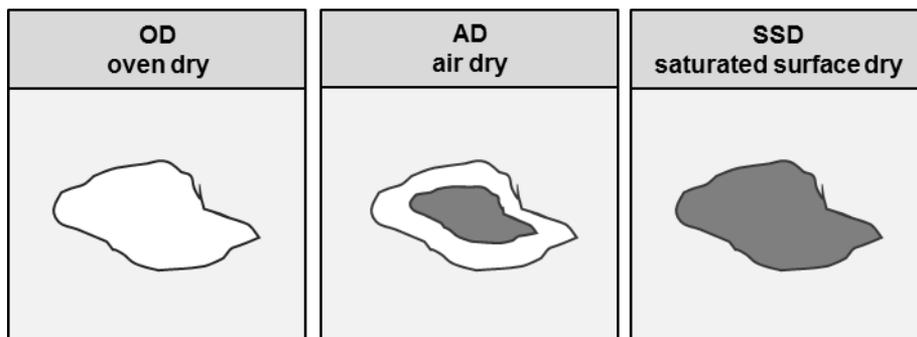


Abbildung 4-3: Mögliche Feuchtezustände bei saugenden Gesteinskörnungen

Die OD-Gesteinskörnung ist vollständig bis zur Massekonstanz getrocknet. Bei den luftgetrockneten Körnern ist der Feuchtegehalt variabel. Entsprechend der vorher beschriebenen Sorptionsisothermen stellt sich bei einer längeren Lagerung an der Luft die jeweilige Gleichgewichtsfeuchte ein. Bei der SSD-Gesteinskörnung variiert die Kernfeuchte, die einer vollständigen Wassersättigung der Gesteinskörnung entspricht, materialabhängig, je nach Typ und Charge der rezyklierten Gesteinskörnung.

Wie sich diese unterschiedlichen Feuchtezustände bei gleichem Gesamtwassergehalt in der Betonzusammensetzung auf die Eigenschaften auswirken, wurde im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

4.3 Wasserzementwertbeherrschung bei schwankender Gesteinskörnungsfeuchte

4.3.1 Versuchsziel und Lösungsweg

4.3.1.1 Ziel und grundsätzliche Vorgehensweise

Ziel der nachfolgend beschriebenen Versuchsreihen war es zu untersuchen, wie sich bei gleichem Gesamtwassergehalt der Feuchtezustand der Gesteinskörnung auf die Konsistenz und Konsistenzentwicklung, auf den Wasserzementwert im Zementmörtel und auf die Festbetoneigenschaften des Betons auswirkt. Im Ergebnis sollte eine Aussage darüber möglich sein, welche Auswirkungen es für die Praxis (die jeweilige Betonzusammensetzung mit zugehöriger Mischanweisung sowie die Frisch- und Festbetoneigenschaften) hat, wenn die rezyklierte Gesteinskörnung durch Witterungseinflüsse in ihrer Feuchte schwankt. Es wurde in Versuchen ermittelt, ob es ausreicht die jeweils über die Eigenfeuchte der Gesteinskörnung in die Betonzusammensetzung eingebrachte Wassermenge auf die in der Erstprüfung ermittelte Gesamtwassermenge anzurechnen, oder ob andere Maßnahmen einzuleiten sind, wenn die Gesteinskörnung extrem trocken oder extrem feucht ist.

Zur Beantwortung dieser Zielfragestellung wurde ein Versuchsprogramm konzipiert und durchgeführt, das die Beurteilung des eigenfeuchtebedingten Einflusses der Ge-

steinskörnung auf die Betoneigenschaften ermöglichen sollte. Basis des Versuchsprogramms waren die Versuchsergebnisse aus Kapitel 3, die anhand von ofengetrockneter Gesteinskörnung in einem zweistufigen Mischprozess (Vornässen der getrockneten Gesteinskörnung mit einer Zusatzwassermenge und anschließendem Mischprozess unter Zugabe des rechnerisch im Betonentwurf ermittelten Zugabewassers) generiert wurden. Die aus diesen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse zum erforderlichen Gesamtwassergehalt für einen definierten Wasserzementwert wurden als Ausgangsbasis verwendet. Der Gesamtwassergehalt wurde konstant gehalten. In den Versuchen des nachfolgenden Kapitels wurde jedoch, durch Änderung des Feuchtezustands der Gesteinskörnung, die lokale Verteilung der Gesamtwassermenge zu Mischbeginn variiert.

Für alle Versuche einer Gesteinskörnungsvariante galt:

$$W_{\text{ges}} = [W + (Z - F(ms))] + F(ms) = \text{const.} \quad (4-1)$$

mit	W_{ges}	Gesamtwassergehalt der Betonzusammensetzung
	W	Zugabewasser gemäß Mischungsrechnung für Normalbeton
	Z	Zusatzwasser, entsprechend Kapitel 3
	$F(ms)$	Eigenfeuchte der Gesteinskörnung in jeweiligen Feuchtezustand (moisture state)

In den Versuchsreihen mit feuchter Gesteinskörnung entsprach das in den Mischer zu dosierende Wasser:

$$W_{\text{Dos}} = W + (Z - F(ms)) \quad (4-2)$$

mit	W_{Dos}	in den Mischer zu dosierendes Wasser
	W	Zugabewasser gemäß Mischungsrechnung für Normalbeton
	Z	Zusatzwasser, entsprechend Kapitel 3
	$F(ms)$	Eigenfeuchte der Gesteinskörnung in jeweiligen Feuchtezustand (moisture state)

Die Vorgehensweise bei der Variation des Feuchtezustands ist in Abbildung 4-4 schematisch dargestellt.

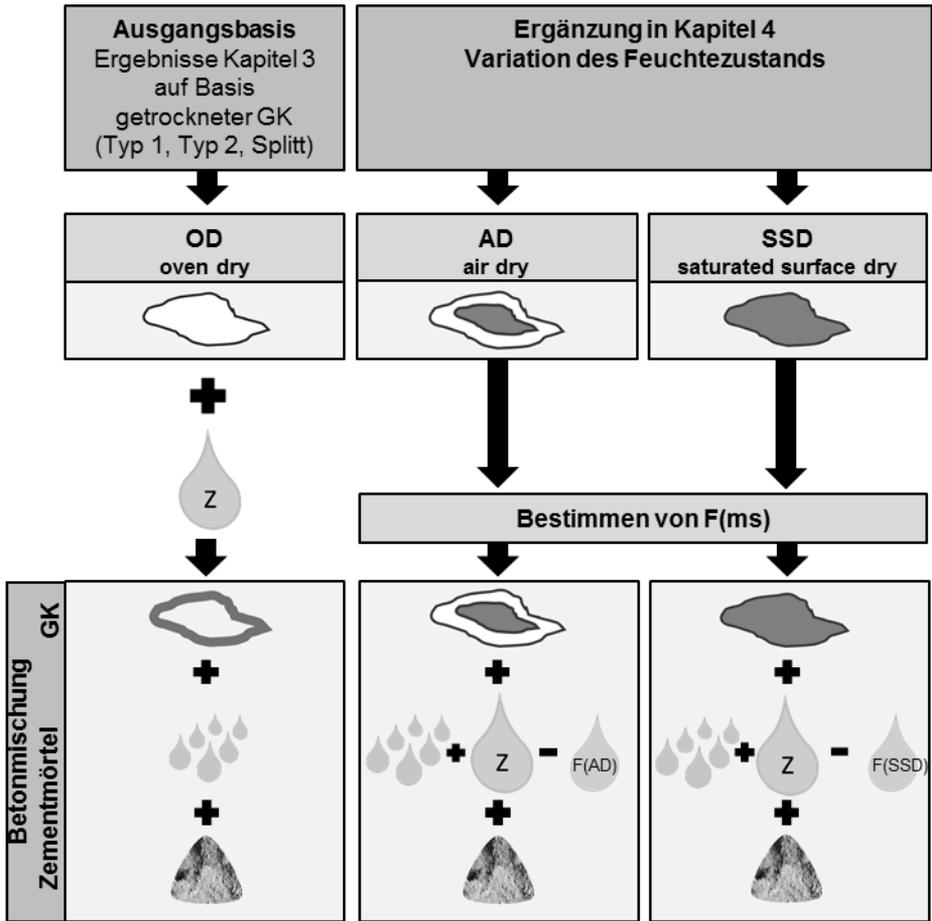


Abbildung 4-4: Vorgehensweise der Versuchsführung in Kapitel 4

Es wurden für jede betrachtete Gesteinskörnung jeweils drei Mischungen unter Variation der Gesteinskörnungsfeuchte von ofentrocken über lufttrocken bis hin zu wasser-gesättigt und oberflächentrocken hergestellt und analog zu dem bereits in Kapitel 3 verwendeten Misch- und Prüfprogramm gemäß Kapitel 3.3.2 untersucht.

4.3.1.2 Verwendete Ausgangsstoffe, Vorbereitung der Gesteinskörnungen und Mischungszusammensetzungen

In den Untersuchungen wurden dieselben Mischungszusammensetzungen und Ausgangsstoffe verwendet wie in den Versuchen zu Kapitel 3, um eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Zunächst wurden aus den Versuchen des Kapitels 3 jeweils eine Betonzusammensetzung Typ 1 und Typ 2 ausgewählt. Bei beiden Betonzusammensetzungen entsprach der in Kapitel 3 ermittelte wirksame Wasserzementwert 0,52. Zusätzlich wurde die Referenzmischung mit gebrochenem Naturgestein auch für die Untersuchungen dieses Kapitels als Referenz parallel betrachtet.

Die aus Kapitel 3 ausgewählten drei Ausgangsmischungen sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Die Betonzusammensetzungen sowie die Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen können dem Anhang B entnommen werden.

Die verwendeten Gesteinskörnungen wurden zusätzlich zu ihrer für Kapitel 3 ermittelten Wasseraufnahme nach 5, 10, 20, 60, 90, 180 Minuten und 24 Stunden über sieben Tage hinsichtlich Ihres Wasseraufnahmevermögens untersucht. Die Ergebnisse wurden bereits in Kapitel 2.2.2.5 ausführlich dargestellt.

Um die drei angestrebten Feuchtezustände der verwendeten Gesteinskörnungsvarianten zu erreichen, wurde die Gesteinskörnung jeweils vor der Betonherstellung entsprechend vorbereitet. Vorbereitet wurden Gesteinskörnungen im ofentrockenen (OD), lufttrockenen (AD) und wassergesättigten, oberflächentrockenen Zustand (SSD). Die Vorbereitungsarbeiten sind nachfolgend für jeden der Feuchtezustände erläutert:

Ofentrockene Gesteinskörnung

Die Gesteinskörnung für die Verwendung im ofentrockenen Zustand wurde für mindestens 24 Stunden bei 105°C im Trockenschrank getrocknet und anschließend auf 20°C abgekühlt in luftdichten Lagergefäßen bis zur Verwendung gelagert.

Die Gesteinskörnungsvarianten im ofentrockenen Zustand sind nachfolgend als „Typ 1-OD“, „Typ 2-OD“ und „Referenz Splitt-OD“ bezeichnet.

Für die Versuche mit ofentrockener Gesteinskörnung ergibt sich in Formel (4-1) mit $F(OD) = 0$:

$$W_{ges} = [W + Z]$$

In den Versuchsreihen mit ofentrockener Gesteinskörnung entsprach das in den Mischer zu dosierende Wasser lediglich dem Zugabewasser W , da das Zusatzwasser Z wie in Kapitel 3 erläutert in einem zusätzlichen Verfahrensschritt vor dem Zement und dem Zugabewasser der Gesteinskörnung zugegeben wurde.

Damit ergibt sich:

$$W_{D_{os}} = W$$

Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über die drei Betonzusammensetzungen im Feuchtezustand OD sowie die Verteilung des Gesamtwassers auf Zusatzwasser und Zugabewasser.

Tabelle 4-1: Wassergehalte der Ausgangsmischungen (OD)

Probenbezeichnung	$W=W_{D_{os}}$ in kg/m^3	Z in % von W	Z in kg/m^3	W_{ges} in l/m^3 Beton
Referenz Splitt - OD	182	0	0	182,0
Typ 1 (+14,4%) - OD	182	14,4	26,2	208,2
Typ 2 (+18%) - OD	182	20	32,8	214,8

Lufttrockene Gesteinskörnung

Die Gesteinskörnungen 2/16 mm für die Prüfvariante im Feuchtezustand AD wurden im ersten Schritt für mindestens 24 Stunden unter Wasser gelagert und so wassergesättigt. Anschließend wurden die Körnungen sieben Tage vor ihrer Verwendung bei Laborklima (20°C/ 55 % rel. Feuchte) flächig auf dem Boden ausgebreitet und getrocknet. Am Tag der Verwendung wurde anhand einer Stichprobe von je ca. 3 kg der jeweiligen Gesteinskörnung deren Eigenfeuchte durch Trocknung bei 400°C für 30 Minuten (bzw. bis zur Massekonstanz) ermittelt. Die ermittelte Eigenfeuchte wurde auf das Zusatzwasser angerechnet, aus dieser Differenz (Zusatzwasser - Eigenfeuchte) zuzüglich Zugabewasser ergab sich die Gesamtmenge an Wasser $W_{D_{os}}$, die in den Mischer dosiert wurde. Diese Gesteinskörnung wurde für die Versuche mit den Bezeichnungen Typ 1-AD, Typ 2-AD und Referenz-AD verwendet.

Aus Formel (4-2) ergaben sich für den Feuchtezustand OD die in Tabelle 4-2 zusammengefassten Wassermengen. Aufgrund der in Kapitel 2.2.2.2 erläuterten Unterschiede zwischen rezyklierten Gesteinskörnungen Typ 1 und Typ 2 in der Aufnahme und Abgabe von Wasser an Luft war in der rezyklierten Gesteinskörnung Typ 1, welche aus reinem Betonsplitt bestand, nach siebentägiger Lufttrocknung noch eine hohe Kernfeuchte F enthalten, die die erforderliche Zusatzwassermenge Z überstieg. Die rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2 war dagegen soweit getrocknet, dass die enthaltene Kernfeuchte F der Gesteinskörnung unterhalb der erforderlichen Zusatzwassermenge Z lag.

$$W_{D_{os}} = W + (Z - F(AD))$$

Tabelle 4-2: Wasserdosierung der Mischungen im Zustand AD

Probenbezeichnung	W in kg/m^3 Beton	Z in % von W	Z in kg/m^3 GK	F in kg/m^3 GK	$W_{D_{os}}$ in kg/m^3 Beton	W_{ges} in l/m^3 Beton
Referenz Splitt - AD	182	0	0	13,0	169,0	182,0
Typ 1 (+14,4%) - AD	182	14,4	26,2	41,0	167,2	208,2
Typ 2 (+18%) - AD	182	18	32,8	32,5	182,3	214,8

Wassergesättigte und oberflächentrockene Gesteinskörnung

Die Gesteinskörnungen 2/16 mm für die Prüfvariante im Feuchtezustand SSD wurden vorbereitet, indem sie für mindestens 24 Stunden unter Wasser gelagert und wassergesättigt wurden. Um die wassergesättigte Körnung in einen oberflächentrockenen Zustand zu bringen, wurde sie aus dem Wasser entnommen und in einem geschlossenen Behälter bei 100 % Luftfeuchtigkeit über einem Sieb gelagert. Das Oberflächenwasser konnte so abtropfen, aufgrund der Luftfeuchte konnte jedoch kein Wasser verdunsten.

Um dies zu erreichen, wurden luftdicht verschließbare Eimer verwendet. Darin wurde jeweils ein Sieb, das auf Abstandhaltern aufgelagert war, mit wasserdurchlässigem Vlies ausgekleidet (siehe Abbildung 4-5 bis Abbildung 4-8).



Abbildung 4-5: Eimer mit Abstandhalter



Abbildung 4-6: Eimer mit Sieb und Gesteinskörnung



Abbildung 4-7: Einlegen des Vlieses



Abbildung 4-8: Fertig gefüllter Eimer

Die Gesteinskörnung verblieb für mindestens 24 Stunden in diesen Eimern bevor sie zur Betonmischung herangezogen wurden. Diese Gesteinskörnung wurde für die Versuche mit den Bezeichnungen Typ 1-SSD, Typ 2-SSD und Referenz-SSD verwendet.

Vor der Durchführung der Versuche, wurde die Eigenfeuchte $F(ssd)$ auf die gleiche Weise wie bei der luftgetrockneten Gesteinskörnung bestimmt. Daraus ergab sich gemäß nachfolgender Formel für jede der drei Gesteinskörnungsvarianten jeweils das in Tabelle 4-3 ersichtliche erforderliche Zugabewasser W_{D0s} :

$$W_{D0s} = W + (Z - F(ssd))$$

Tabelle 4-3: Wasserdosierung der Mischungen im Zustand SSD

Probenbezeichnung	W in kg/m ³ Beton	Z in % von W	Z In kg/m ³ GK	F in kg/m ³ GK	W _{Dos} in kg/m ³ Beton	W _{ges} in l/m ³ Beton
Referenz Splitt - SSD	182	0	0	34,3	147,7	182,0
Typ 1 (+14,4%) - SSD	182	14,4	26,2	67,3	140,9	208,2
Typ 2 (+18%) - SSD	182	18	32,8	89,8	125,0	214,8

4.3.1.3 Initialer Wasserhaushalt in den Versuchsvarianten

Zur Übersicht sind nachfolgend in Abbildung 4-9 alle untersuchten Varianten der Gesamtwasserverteilung dargestellt.

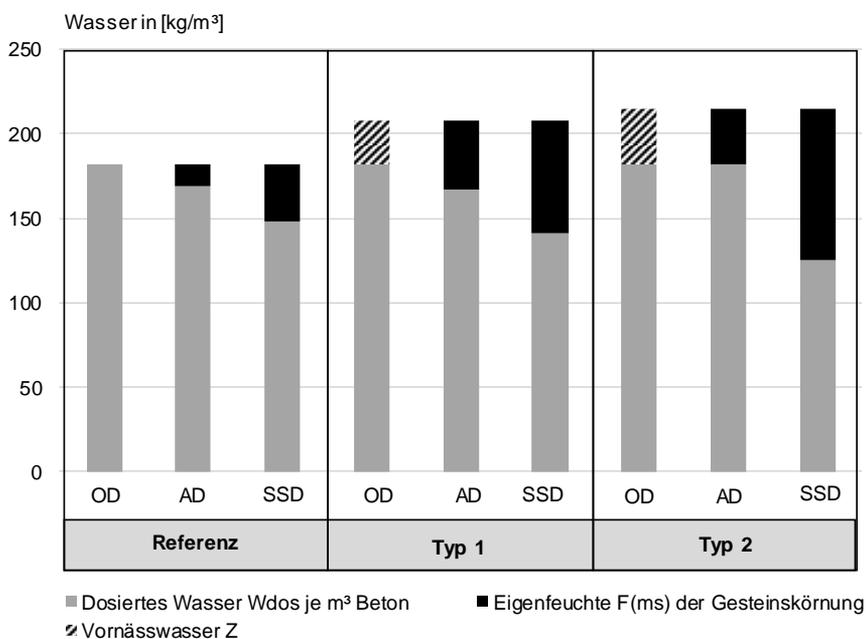


Abbildung 4-9: Wasserverteilung bei den untersuchten Betonvarianten

Die Wassermenge, die bei AD und SSD bereits als Eigenfeuchte in der Gesteinskörnung enthalten war, war immer größer oder mindestens gleich der Wassermenge, die als zusätzlich erforderliche Wassermenge beim Einsatz ofentrockener Gesteinskörnung aus Kapitel 3 ausgewählt wurde. Entsprechend war der initiale Wassergehalt $W_{D_{os}}$ jeweils geringer als bei der Mischung mit ofentgetrockneter Gesteinskörnung.

In Abbildung 4-9 wird deutlich, dass der Ausgangswassergehalt $W_{D_{os}}$ des Zementmörtels beim Feuchtezustand OD jeweils am größten war.

Aus den initialen Wassergehalten W_{D0S} für jede Mischung ergaben sich für die Versuchsvarianten die in Abbildung 4-10 dargestellten initialen Wasserzementwerte. Diese rechnerisch ermittelten initialen Wasserzementwerte zum Zeitpunkt des Mischens, können mit dem in den Versuchen ermittelten Wasserzementwert w/z_{ist} verglichen werden. Aus diesem Vergleich können Rückschlüsse auf Wasserbewegungen von Zementmörtel zu Gesteinskörnung und umgekehrt innerhalb der ersten 30 Minuten nach Wasserzugabe gezogen werden. 30 Minuten nach erfolgter erster Wasserzugabe wurde zur Ermittlung von w/z_{ist} jeweils die Gesteinskörnung wieder vom Zementmörtel separiert.

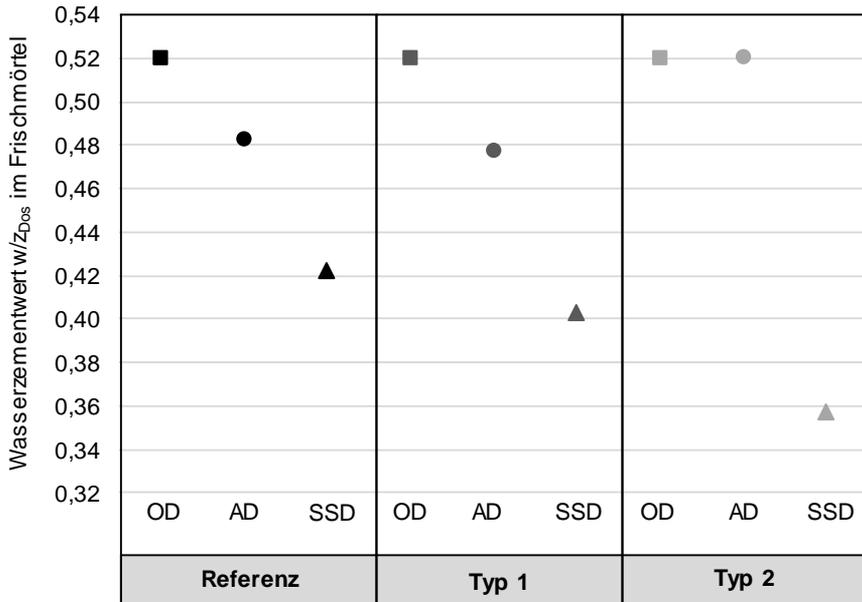


Abbildung 4-10: Rechnerischer initialer Wasserzementwert in den Versuchsvarianten

4.3.1.4 Versuchsprogramm

Wie in Tabelle 4-4 dargestellt, wurden für die drei Feuchtezustände OD, AD und SSD Betonversuche mit natürlichem Splitt als Referenzkörnung, rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 und rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 durchgeführt. Für jede Gesteinskörnungsvariante wurde jeweils das Gesamtwasser gleich gehalten, lediglich die Verteilung auf Eigenfeuchte bzw. Zusatzwasser und Zugabewasser variierten.

Ersetzt wurde jeweils die gesamte Gesteinskörnung ≥ 2 mm. Insgesamt ergab sich die in Tabelle 4-4 dargestellte Versuchsmatrix mit den zugeordneten Probenbezeichnungen. Die Mischungszusammensetzungen sind in Anhang C zusammengestellt.

Tabelle 4-4: Versuchsmatrix mit Probenbezeichnungen

Feuchtezustand Gesteinskörnung	OD (oven dry)	AD (air dry)	SSD (saturated surface dry)
Referenz Splitt	Referenz Splitt - OD	Referenz Splitt - AD	Referenz Splitt - SSD
Typ 1	Typ 1 (+14,4%) - OD	Typ 1 (+14,4%) - AD	Typ 1 (+14,4%) - SSD
Typ 2	Typ 2 (+18%) - OD	Typ 2 (+18%) - AD	Typ 2 (+18%) - SSD

Grundsätzlich wurde derselbe Versuchsablauf verwendet, der für die Versuche des Kapitels 3 erarbeitet und getestet wurde. Nachfolgend sind aus diesem Grund lediglich die Abweichungen vom in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Vorgehen erläutert.

In den Versuchen zu diesem Kapitel kam bei allen Mischungen zur Bestimmung des Wassergehalts Verfahren 2 - das Trocknen des extrahierten Zementmörtels bei 400°C bis zur Massekonstanz - zum Einsatz.

Je nach Feuchtezustand der Gesteinskörnung wich der Mischablauf von der grundsätzlichen Vorgehensweise, die bereits in Kapitel 3.3.2.2 vorgestellt wurde ab. Während bei der Gesteinskörnung im Zustand OD der Mischablauf identisch übernommen wurde, die Gesteinskörnung also zwei Minuten lang mit Vornässwasser vermischt und so vorgesättigt wurde, fehlte der Verfahrensschritt des Vornässens bei den beiden Varianten AD und SSD. Wie bereits erläutert wurde bei diesen Varianten die jeweilige Eigenfeuchte vor dem Versuch ermittelt und auf das zu dosierende Wasser angerechnet. Die Differenz zwischen dem angestrebten Gesamtwassergehalt und der jeweiligen Eigenfeuchte der Gesteinskörnung wurde bei diesen Versuchsvarianten als Zugabewasser $W_{D_{OS}}$ zu Gesteinskörnung und Zement in den Mischer dosiert.

Für alle Betonzusammensetzungen mit den unterschiedlichen Gesteinskörnungen wurden die gleichen Frischbeton-, Mörtel- und Festbetonprüfungen durchgeführt wie bereits in den Untersuchungen zu Kapitel 3.

Da die Gesamtwassermenge bei allen Versuchen jeweils für Typ 1, Typ 2 und die Referenzmischung gleichbleiben sollte, war es nicht möglich, die Fließmittelmenge für alle Versuche konstant zu halten. Ziel war es für alle Betone eine weiche bis plastische Konsistenz zu erreichen, die das Trennen von Gesteinskörnung und Zementmörtel erlauben würde. Das Fließmittel wurde nach der Bestimmung des Verdichtungsmaßes hinzugegeben. Die darauffolgende Bestimmung der Ausbreitmaße wurde also vom Fließmittel beeinflusst, so dass diese Ergebnisse nur qualitativ miteinander verglichen werden können.

4.3.2 Ergebnisse und Diskussion

4.3.2.1 Frischbetonkennwerte

Verdichtungsmaß

In Abbildung 4-11 sind die Verdichtungsmaße der jeweiligen Betonmischungen angegeben. Je höher der Wert des Verdichtungsmaßes c ist, umso steifer ist der Beton.

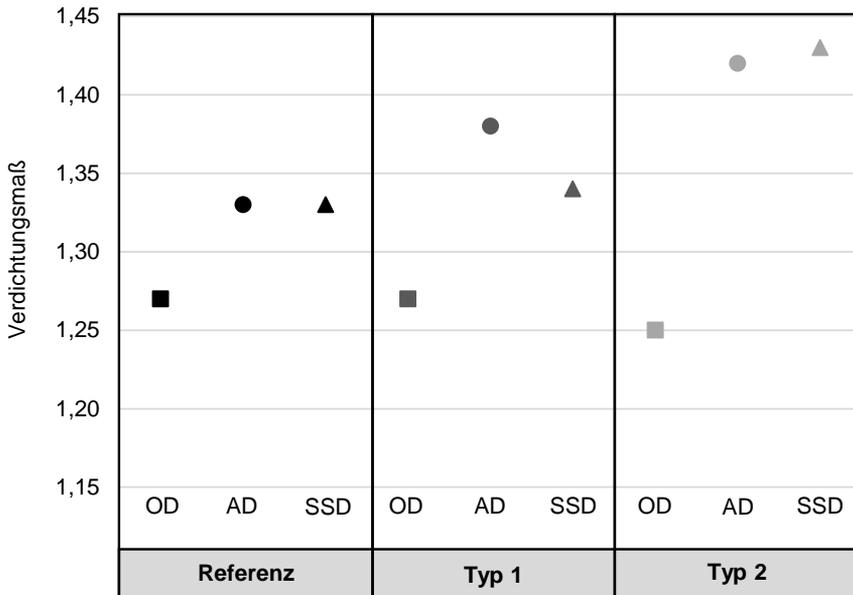


Abbildung 4-11: Verdichtungsmaße aller Betonmischungen

In den Ergebnissen zum Verdichtungsmaß zeigen sich die Unterschiede im initialen Wassergehalt deutlich. Die Betone mit ofentrockener Gesteinskörnung, bei denen der initiale Wassergehalt W_{D0s} jeweils am höchsten war, waren auch jeweils weniger steif als die Betone mit lufttrockener bzw. wassergesättigter Gesteinskörnung.

Ausbreitmaß des Betons

Da die Ermittlung der Ausbreitmaße nach der Zugabe des Zusatzmittels durchgeführt wurde, die Dosierung des Fließmittels nicht in allen Mischungen gleich war und auch keine einheitliche Konsistenz für alle Mischungen eingestellt wurde, kann nur eine qualitative Bewertung erfolgen. Es wurde jeweils nach 10, 20, 60 und 90 Minuten ein Ausbreitmaß ermittelt. Analysiert wurde, ob sich durch die variierenden Feuchtezustände auch die Konsistenzentwicklung in einem entsprechenden Zeitraum verändert. Deshalb ist in Abbildung 4-12 der prozentual auf die Ausgangskonsistenz unmittelbar nach Fließmittelzugabe bezogene Konsistenzverlust aufgetragen.

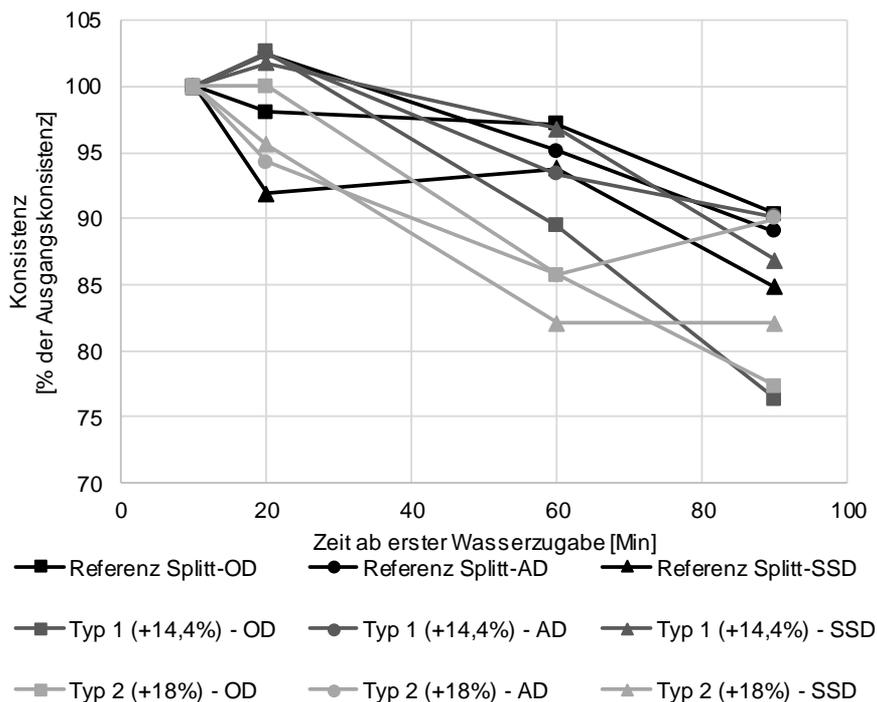


Abbildung 4-12: Konsistenzverlust über die Zeit in [%]

Der Konsistenzverlust über einen Zeitraum von 90 Minuten ab der ersten Wasserzugabe ist bei den Mischungen mit ofentrockener rezyklierte Gesteinskörnung deutlich stärker ausgeprägt als bei den Mischungen mit lufttrocken oder wassergesättigt eingesetzter rezyklierte Gesteinskörnung. Bei der natürlichen Referenzkörnung ist dieser Effekt nicht festzustellen.

4.3.2.2 Wassergehalte im Frischmörtel und Wasserzementwert

Die in den Versuchen ermittelten Wassergehalte im Zementmörtel nach 30 Minuten Kontaktzeit zwischen Gesteinskörnung und Wasser bzw. Zementmörtel führten zu den in Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14 dargestellten Ergebnissen.

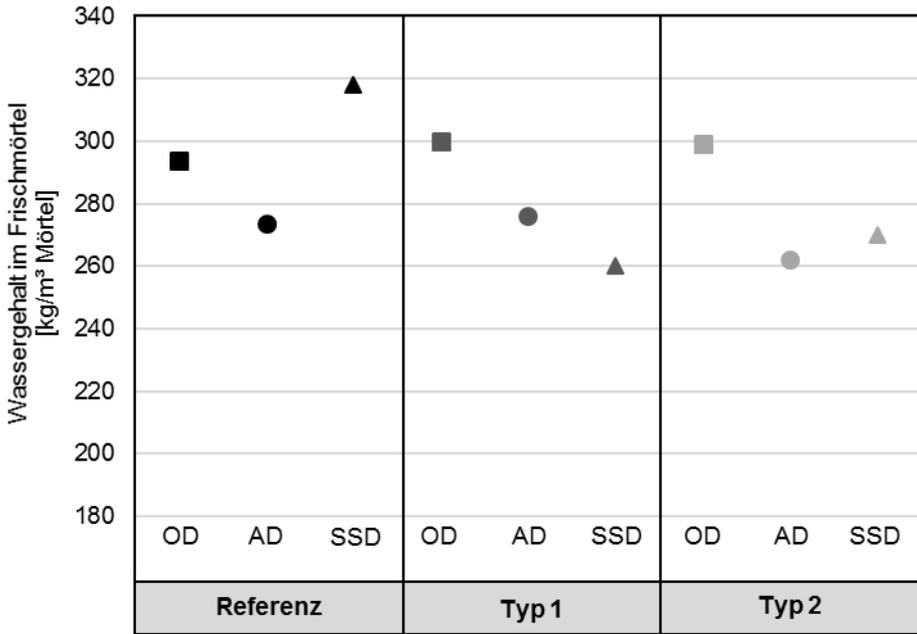


Abbildung 4-13: Wassergehalt W_{ist} der untersuchten Mischungen

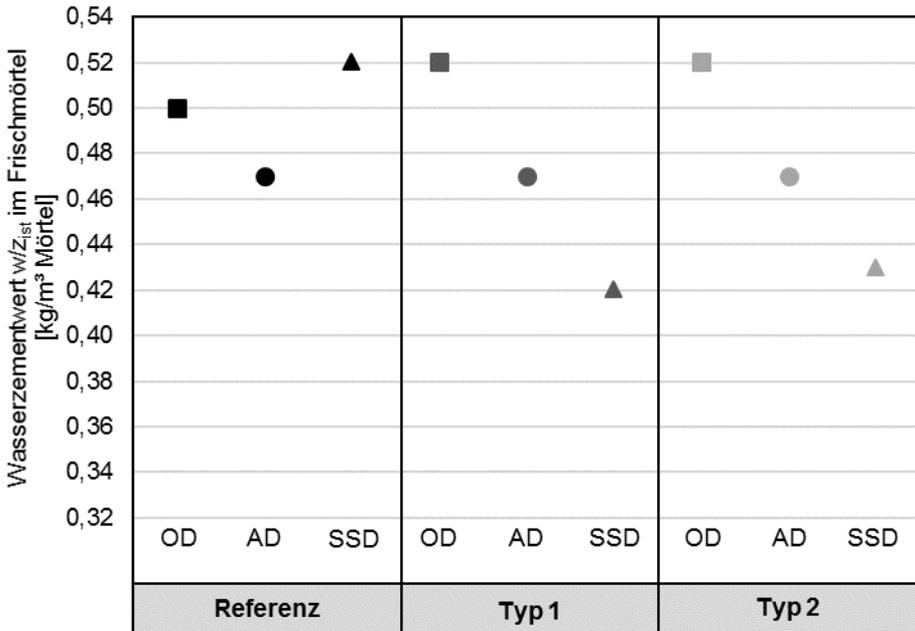


Abbildung 4-14: Wasserzementwert w/z_{ist} der untersuchten Mischungen

Ein Vergleich zwischen dem initialen Wasserzementwert w/z_{Dos} und dem im Versuch ermittelten Wasserzementwert w/z_{ist} (vgl. Abbildung 4-15) lässt eine Bewertung zu, wie sich der Wasserhaushalt im Beton innerhalb von 30 Minuten Kontaktzeit verändert. Ist der geprüfte Wasserzementwert w/z_{ist} kleiner als der berechnete initiale

Wasserzementwert w/z_{DOS} , so ist zu schließen, dass die Gesteinskörnung in den 30 Minuten Kontaktzeit dem Zementmörtel Wasser entzogen hat. Sind w/z_{DOS} und w/z_{ist} gleich, so fand kein Wassertransport zwischen Gesteinskörnung und Zementmörtel statt und im dritten möglichen Fall, wenn w/z_{DOS} geringer war als w/z_{ist} , hat die Gesteinskörnung Wasser an den Zementmörtel abgegeben.

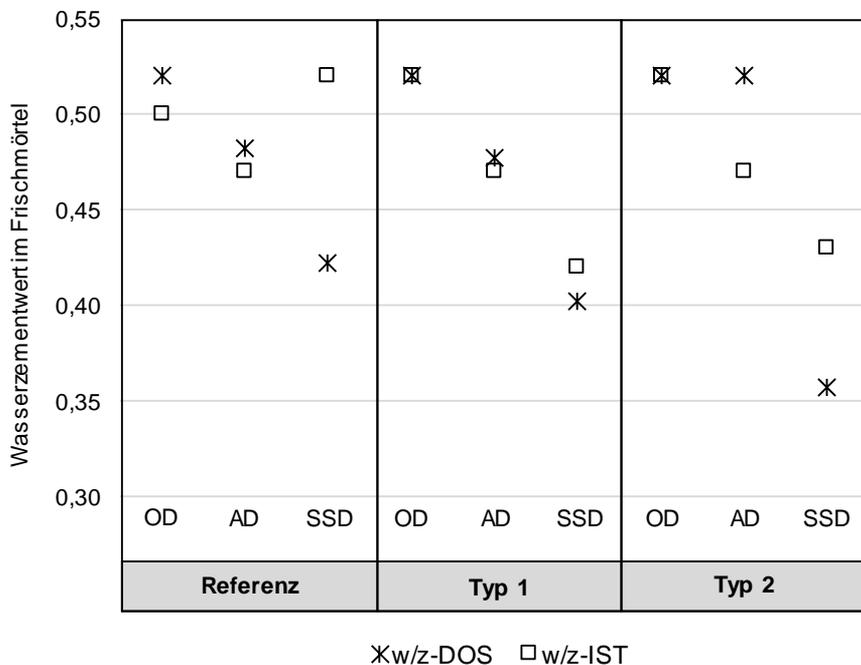


Abbildung 4-15: Veränderung des Wasserzementwerts im Zementmörtel innerhalb einer Kontaktzeit von 30 Minuten

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass in den ersten 30 Minuten nach Wasserkontakt nur ein geringer Wasseraustausch zwischen den Gesteinskörnungen und dem Zementmörtel stattfand.

Bei den Mischungen mit ofengetrockneter eingesetzter Gesteinskörnung entsprach w/z_{ist} dem rechnerisch ermittelten initialen Wasserzementwert w/z_{DOS} . Das heißt, das Vornässwasser, welches vorab auf die ofengetrockneten Körnungen gegeben wurde, wurde von der Gesteinskörnung absorbiert. Eine weitere Wasseraufnahme aus dem Zementmörtel heraus fand in den 30 Minuten nicht statt. Es kam zu keiner Wasserzementwertabsenkung gegenüber dem rechnerischen Ausgangswert.

Die luftgetrockneten Gesteinskörnungen, die im Kern feucht, in ihrer äußeren Hülle jedoch trocken waren, nahmen in den beobachteten 30 Minuten Kontaktzeit mit dem Zementmörtel zusätzlich Wasser aus dem Zementmörtel auf. Der gemessene Wasserzementwert nach 30 Minuten (w/z_{ist}) war geringer als der berechnete Ausgangswert im Zementmörtel. Der Unterschied war bei der rezyklierten Gesteinskörnung Typ 2 größer als bei Typ 1. Da in der rezyklierten Gesteinskörnung Typ 1 aufgrund der ge-

ringen Trocknungsrate an Luft im Feuchtezustand AD bereits eine größere Wassermenge enthalten war als die Zusatzwassermenge Z , entspricht die sehr geringe Abweichung zwischen w/z_{ist} und w/z_{Dos} der Erwartungshaltung.

Die wassergesättigt in den Mischprozess gegebene Gesteinskörnung setzte Wasser frei, da die gemessenen Wasserzementwerte bei der Referenzkörnung und den rezyklierten Gesteinskörnungen Typ 1 und Typ 2 über den berechneten Ausgangswerten lagen.

Zur Plausibilitätsprüfung wurden - analog zur Vorgehensweise in Kapitel 3.3.3.1 – Hypothese 3 - die ermittelten Mörteldruckfestigkeiten nach 28 Tagen auf die an diesen Zementmörteln geprüften Wasserzementwerte bezogen (vgl. Abbildung 4-16). Beide Werte bilden den Wasserhaushalt im Beton zum Zeitpunkt 30 Minuten nach dem ersten Wasserkontakt ab und sollten somit miteinander korrelieren, sofern keine Messfehler vorliegen.

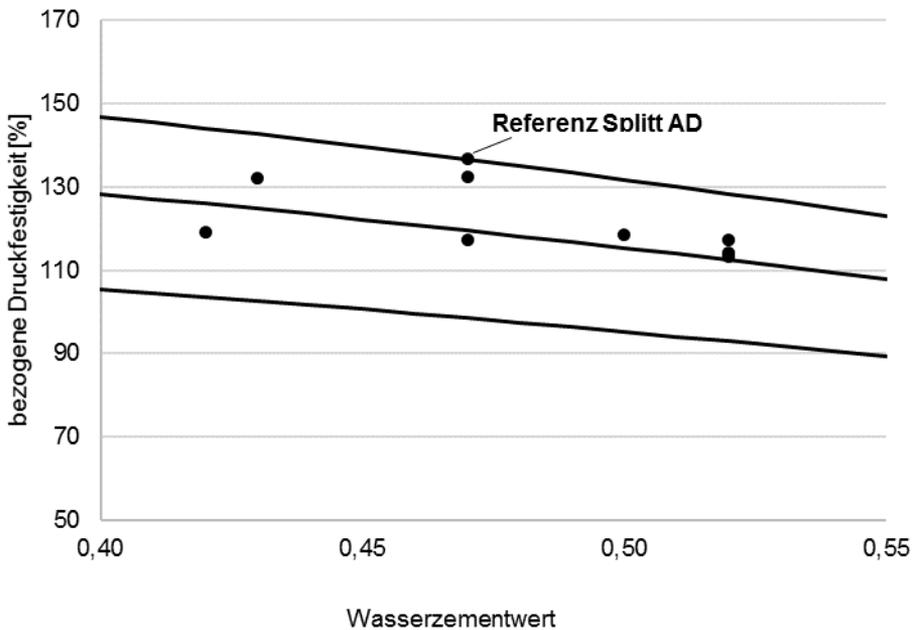


Abbildung 4-16: Einordnung der Mörteldruckfestigkeiten nach 28 Tagen und der ermittelten Wasserzementwerte in die zu erwartende Streubreite nach [38]

Alle Mörteldruckfestigkeiten und zugehörigen Wasserzementwerte liegen im zu erwartenden Streubereich gemäß [38].

4.3.2.3 Druckfestigkeit der extrahierten Mörtel

Die Druckfestigkeiten der extrahierten Zementmörtel wurden nach 7 und 28 Tagen an wassergelagerten Prismen der Abmessungen 40 x 40 x 160 mm ermittelt. Die Lagerung und Prüfung erfolgte analog zu den in Kapitel 3 beschriebenen Versuchen.

Wie zu erwarten wirkte sich in den Festigkeitsergebnissen nach 28 Tagen der höhere Anfangswassergehalt der Mischungen mit ofentrockener Gesteinskörnung bei den R-

Betonen in den geringsten Mörteldruckfestigkeiten für diesen Feuchtezustand aus (vgl. Abbildung 4-17). Nachfolgend wurde untersucht, wie sich der Feuchtezustand der Gesteinskörnungen auf die Eigenschaften der Betone auswirkt. Grundlegende Unterschiede zwischen den Festmörtel- und Festbetoneigenschaften lassen auf Transportvorgänge im Wasserhaushalt der Betone schließen, die erst später als 30 Minuten nach der Wasserzugabe im Beton erfolgten.

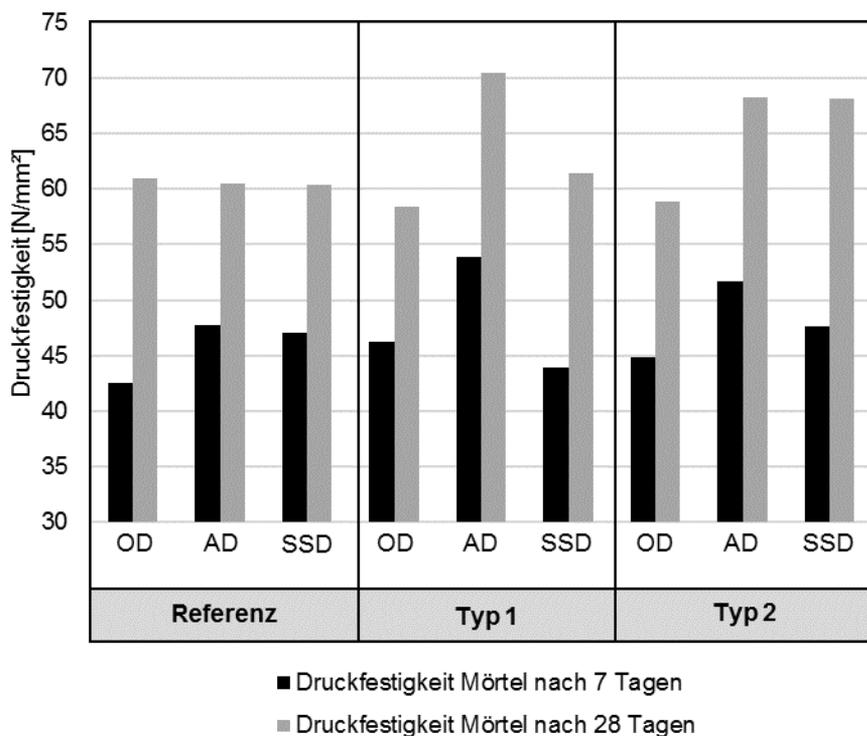
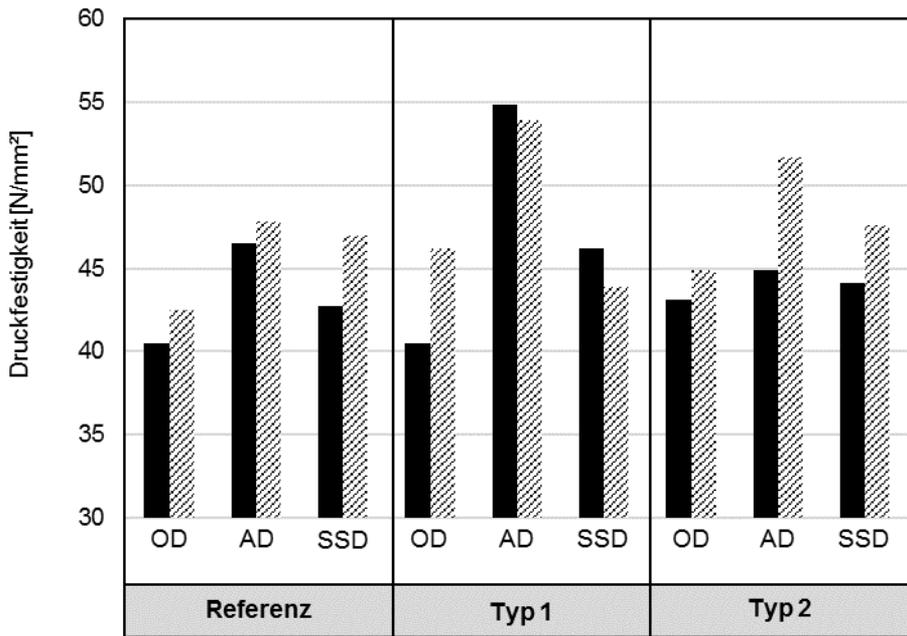


Abbildung 4-17: Mörteldruckfestigkeiten

4.4 Einfluss schwankender Feuchtezustände auf die Festbetoneigenschaften

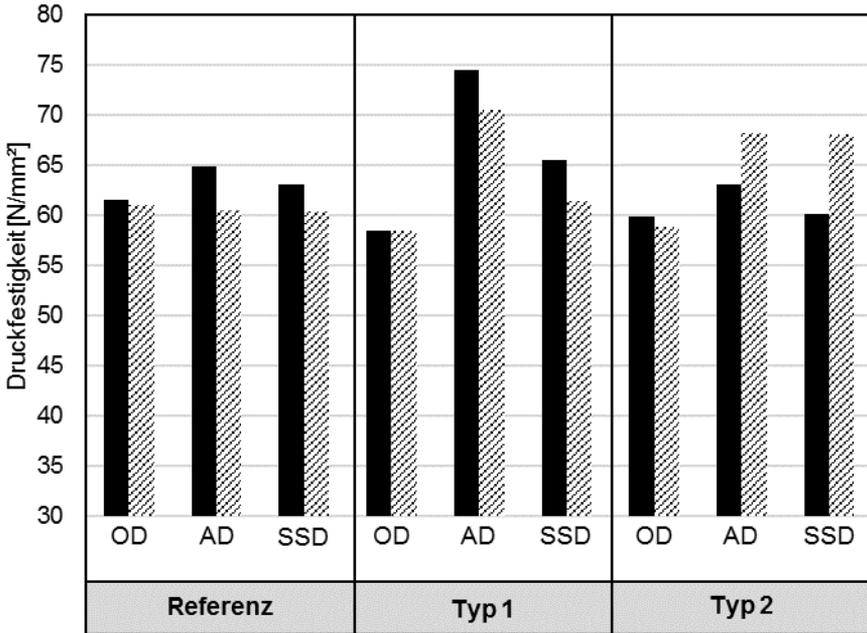
4.4.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit des Betons wurde als Mittelwert von drei Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm bestimmt. Die hergestellten Probekörper wurden bis zum Entformen nach 24 h bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ mit Folie vor Austrocknung geschützt und anschließend bis zum Alter von sieben Tagen unter Wasser $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, danach in einem Klimaraum mit einer Temperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und $(65 \pm 5) \%$ relativer Luftfeuchte gelagert. Die Prüfung erfolgte gemäß [DIN EN 12390-3]. Die daraus resultierenden Ergebnisse für die Prüfung nach 7 und 28 Tagen sind in Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19 dargestellt.



■ Druckfestigkeit Beton nach 7 Tagen ▨ Druckfestigkeit Mörtel nach 7 Tagen

Abbildung 4-18: Druckfestigkeit Beton und Mörtel nach 7d in Abhängigkeit vom Feuchtezustand



■ Druckfestigkeit Beton nach 28 Tagen ▨ Druckfestigkeit Mörtel nach 28 Tagen

Abbildung 4-19: Druckfestigkeit Beton und Mörtel nach 28d in Abhängigkeit vom Feuchtezustand

Die jeweils höchste Festigkeit unter den betrachteten Feuchtezuständen bei gleichem Gesamtwassergehalt wies die Variante mit lufttrockener Gesteinskörnung auf. Die jeweils geringste Festigkeit wurde mit den Gesteinskörnungen im ofentrockenen Zustand erreicht.

Die Unterschiede hinsichtlich der Druckfestigkeit nach 28 Tagen waren bei den Betonvarianten mit rezyklierter Gesteinskörnung größer als bei den Referenzmischungen mit natürlichem Splitt. Alle untersuchten Betonvarianten konnten jedoch mindestens das Festigkeitsniveau der Referenzmischungen erreichen.

Insbesondere bei den Betonvarianten mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 konnte beobachtet werden, dass die in den Mörtelfestigkeiten vorhandenen Unterschiede zwischen den untersuchten Feuchtezuständen der Gesteinskörnung nach 28 Tagen am Beton praktisch nicht mehr vorhanden waren. Ein dauerhafter Kontakt zwischen den Gesteinskörnungen in unterschiedlichem Feuchtegehalt und der hinsichtlich der Gesteinskörnungfeuchte angepassten Zementsteinmatrix führten zu einem Ausgleich im Wasserhaushalt, der die Hydratation und Festigkeitsentwicklung gleichermaßen bei allen Betonen gewährleistete.

4.4.2 Spaltzugfestigkeit

Zur Prüfung der Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen wurden aus dem Beton weitere drei Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm gemäß [DIN EN 12390-6] hergestellt. Die Probekörper wurden analog zu den Betonwürfeln hergestellt, nachbehandelt und entformt. Für die Betonzylinder erfolgte die Lagerung

bis zur Prüfung in Wasser bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-20 grafisch dargestellt.

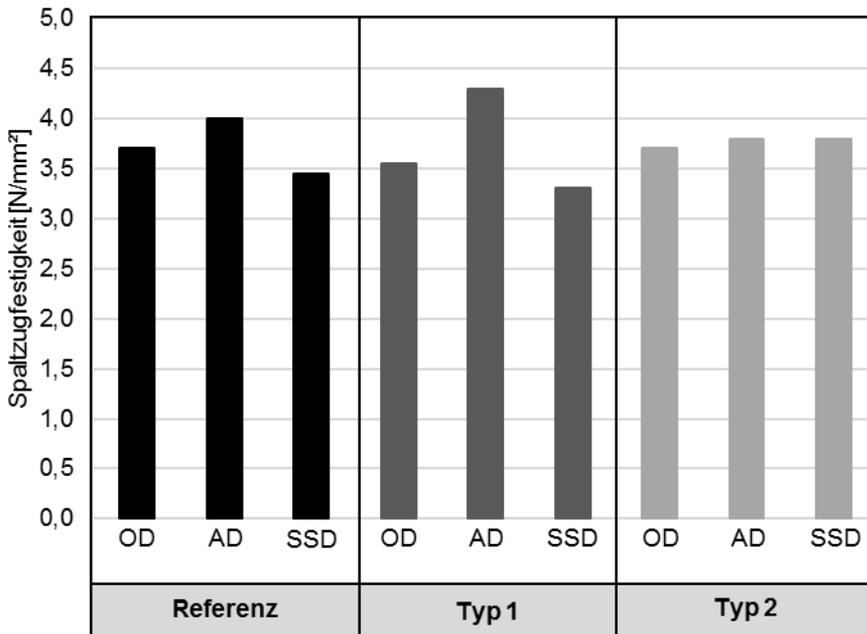


Abbildung 4-20: Spaltzugfestigkeit der Betone mit unterschiedlich feuchter Gesteinskörnung

Die je Gesteinskörnungsart höchste Spaltzugfestigkeit konnte mit den Gesteinskörnungen erreicht werden, die im lufttrockenen Zustand verwendet wurden. Während bei den Mischungen mit rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 die Spaltzugfestigkeit bei allen drei betrachteten Feuchtezuständen ähnlich war, führte wassergesättigt eingesetzte rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 und wassergesättigt eingesetzter natürlicher Splitt zu leicht verringerten Spaltzugfestigkeiten. Auch bei der Spaltzugfestigkeit konnten die R-Betone das Festigkeitsniveau der Referenzmischungen erreichen.

4.4.3 Elastizitätsmodul

An jeweils drei Zylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm erfolgte die Prüfung des Elastizitätsmoduls gemäß [DIN EN 12390-13] nach 28 Tagen. Die Probekörper wurden analog zu den Betonwürfeln hergestellt, nachbehandelt und entformt. Die Lagerung der Probekörper erfolgte bis zur Prüfung in Wasser bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-20 grafisch dargestellt.

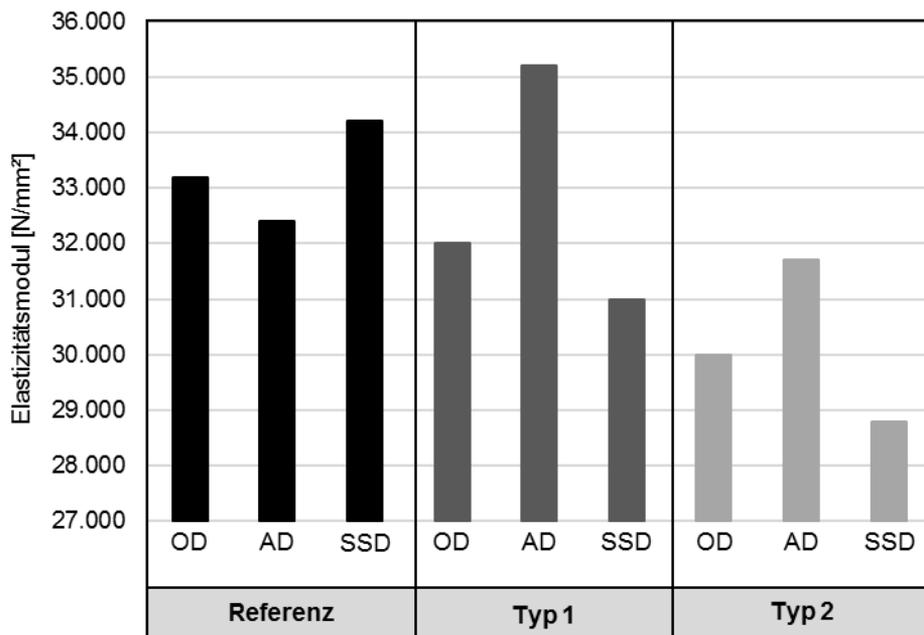


Abbildung 4-21: Statischer Elastizitätsmodul der Betone nach 28 d in Abhängigkeit vom Feuchtezustand

Die Ergebnisse zeigen, dass bei den Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung die Verwendung der Gesteinskörnung im lufttrockenen Zustand zu deutlich höheren Elastizitätsmodulen führte als die Verwendung von ofentrockener bzw. wassergesättigter Körnung.

Die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung zum vollständigen Ersatz der Gesteinskörnung ≥ 2 mm verringerte, wie bereits in den Untersuchungen zu Kapitel 3, das Elastizitätsmodul gegenüber den Betonen mit natürlicher Referenzkörnung. Der Unterschied ist bei rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 deutlich größer als bei rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1. Die Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung können bei ähnlicher Druckfestigkeit nicht die Elastizitätsmodule erreichen, wie sie die natürliche Referenzkörnung erreichte. Einzige Ausnahme bildet die Mischung „Typ 1 – AD“, die jedoch eine höhere Druckfestigkeit besaß als die Referenzbetone, was auch das Elastizitätsmodul erhöht.

4.5 Schlussfolgerung 3: Auswirkungen verschiedener Feuchtezustände auf die Betoneigenschaften

Die Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Feuchtezustände auf die Betoneigenschaften zeigten, dass bei gleichem Gesamtwassergehalt die Ausgangskonsistenz (Verdichtungsmaß) von den Betonen steifer war, bei denen die Gesteinskörnung im feuchten bis wassergesättigten Zustand eingesetzt wurde. Gleichzeitig war jedoch der Konsistenzverlust bei den Mischungen mit ofentrocken in den Mischprozess gegebener Gesteinskörnung deutlich stärker ausgeprägt als bei Verwendung von Gesteins-

körnung mit Eigenfeuchte. Bei den natürlichen Referenzkörnungen war erwartungsgemäß kein wesentlicher Einfluss unterschiedlicher Feuchtezustände festzustellen, da diese, verglichen mit den rezyklierten Gesteinskörnungen, nur ein geringes Saugvermögen aufwiesen. Aus den Ergebnissen kann gefolgert werden, dass es für die Praxis vor dem Hintergrund einer vereinbarten Übergabekonsistenz auf der Baustelle zielsicherer ist, Gesteinskörnung mit vorhandener Eigenfeuchte zu verwenden. Bei diesen Betonen ist nur ein geringer Konsistenzverlust über einen Zeitraum von 90 Minuten festzustellen, sodass ab Werk die vereinbarte Übergabekonsistenz bereits eingestellt werden kann.

Nach 30 Minuten war der Wasserhaushalt trotz gleichen Gesamtwassergehaltes in den Versuchen noch nicht ausgeglichen, was sich in den höheren Wasserzementwerten und geringeren Mörtelfestigkeiten der Mischungen mit ofentrockener rezyklierter Gesteinskörnung, gegenüber den feucht eingesetzten Vergleichsproben äußerte, bei denen die Gesteinskörnung nach 30 Minuten vom Mörtel getrennt worden war. Bei den Mischungen mit nicht stark saugender natürlicher Gesteinskörnung (natürliche Referenz) waren diese Unterschiede nicht ausgeprägt zu sehen. Die Ergebnisse belegen die Hypothese, dass die Wasseraufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung aus dem Zementmörtel als Suspension heraus geringer ist als in Kontakt mit reinem Wasser, da die Zementpartikel die Poren verstopfen. Obwohl das Äquivalent der Wasseraufnahme in zehn Minuten aus den Pyknometerversuchen gemäß [DIN EN 1097-6] als Zusatzwasser hinzugegeben wurde, war diese Wassermenge nach 30 Minuten Kontaktzeit noch nicht aufgenommen und der Wasserzementwert höher als bei den Mischungen mit kernfeuchter Gesteinskörnung.

Die Unterschiede im Wasserhaushalt zwischen Gesteinskörnung und Zementstein glichen sich im Beton mit der Zeit aus, was sich darin äußerte, dass bei den Festigkeitsprüfungen am Beton nach 7 und 28 Tagen die Unterschiede zwischen den einzelnen Mischungen deutlich geringer waren als am Mörtel, der nach 30 Minuten aus dem Beton extrahiert wurde. Der Ausgleich des Wasserhaushalts und die damit verbundene Unempfindlichkeit gegenüber Feuchteschwankungen war bei rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 in den Versuchen stärker ausgeprägt. Dies kann, abgeleitet aus der Literaturstudie, mit den höheren Mauerwerksplitt-Anteilen und deren größeren Porenradien und der höheren Gesamtporosität erklärt werden, die den Ausgleich im Feuchtehaushalt durch Kapillarsog erleichtert. Die Betone mit Gesteinskörnung Typ 2 wiesen nach 28 Tagen ähnliche Festigkeiten auf wie die Referenzmischungen aus natürlicher Gesteinskörnung und es waren praktisch keine Unterschiede in Abhängigkeit vom Feuchtezustand mehr sichtbar. Somit konnte mit den Ergebnissen gezeigt werden, dass auch nach dem Erstarrungsbeginn eine Wanderung von Wasser zwischen Gesteinskörnung und dem neuen Zementstein weitergeht.

Die lufttrocken eingesetzte Gesteinskörnung lieferte generell die höchsten Druckfestigkeiten unter allen betrachteten Feuchtezuständen. Gleiches gilt für die Spaltzugfestigkeit und das Elastizitätsmodul. Der Haftverbund zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix wird so bestmöglich ausgebildet. Somit bestätigen die Ergebnisse die bereits aus der Literaturstudie abgeleitete Erwartung, dass eine weder vollständig gesättigte noch vollständig getrocknete rezyklierte Gesteinskörnung für die Betoneigenschaften ideal ist.

Als optimal kann somit auf Basis der Untersuchungen empfohlen werden, rezyklierte Gesteinskörnung lufttrocken einzusetzen.

Insbesondere vor dem Hintergrund der grundsätzlich verringerten Elastizitätsmodule und Betonrohddichten beim vollständigen Ersatz der groben Gesteinskörnung durch rezykliertes Material sind die deutlichen höheren Ergebnisse im Elastizitätsmodul bei der lufttrockenen Gesteinskörnung, gegenüber ofentrockener oder wassergesättigter Körnung hervorzuheben. Für Betone mit vollständigem Ersatz der groben Gesteinskörnung durch rezyklierte Gesteinskörnungen können vom Tragwerksplaner nicht die Zusammenhänge zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul gemäß [DIN EN 1992-1-1] Tabelle 3.1 angenommen werden, wie dies für Normalbetone im Bemessungskonzept von [DIN EN 1992-1-1] vorgesehen ist. Die Versuchsergebnisse bestätigen die Erkenntnis aus [Scheidt et al. - 2018] und die dort vorgesehene Einführung von Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit vom verwendeten Typ der rezyklierten Gesteinskörnung, sofern die grobe Gesteinskörnung vollständig durch rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt wird. Ähnliches wurde von Thienel in [Thienel - 1997, 1996] für Leichtbetone aus Blähton festgehalten. Jedoch zeigten die Ergebnisse für die Mischungen mit natürlichem Referenzsplitt, dass auch natürliche Gesteine zu einer Unterschreitung des für die entsprechende Druckfestigkeitsklasse anzunehmenden mittleren Elastizitätsmoduls gemäß den Bemessungskonzepten in [DIN EN 1992-1-1] führen können. Für die verwendete natürliche Referenzgesteinskörnung aus Mikrodiorit war der geprüfte mittlere Elastizitätsmodul ebenfalls geringer als auf Basis der Betondruckfestigkeit nach [DIN EN 1992-1-1] angenommen. Um die Verringerung durch die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung jedoch zu minimieren, wird deshalb auf Basis der Versuchsergebnisse die Verwendung von lufttrockener Gesteinskörnung und ein Verzicht auf ein Vornässen der Gesteinskörnung empfohlen.

Für Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung, bei denen die natürliche Gesteinskörnung entsprechend der [Rili-BREZ] nur teilweise ersetzt wird, ist abgesichert, dass die Verringerung des Elastizitätsmoduls so gering bleibt, dass keine Anpassung im Bemessungskonzept nach [DIN EN 1992-1-1] erforderlich wird.

Die Untersuchungen zeigten, dass es ausreichend ist, die Eigenfeuchte der Gesteinskörnung zu bestimmen und diese Wassermenge von der in der Erstprüfung ermittelten notwendigen Gesamtwassermenge abzuziehen. Gemäß dieser Vorgehensweise kann ein starker Konsistenzverlust über die Zeit, wie er bei ofentrocken eingesetzten Körnungen nicht auszuschließen ist, verhindert werden und es werden maximale Festbetonkennwerte erreicht.

5 Aus den Untersuchungen abgeleitete Handlungsempfehlung für die Betonherstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen

5.1 Empfohlene Vorgehensweise bei der Betonherstellung

Aus den Erkenntnissen, die im Rahmen dieser Arbeit gewonnen wurden, kann nachfolgende Handlungsempfehlung abgeleitet werden, die eine zielsichere Betonherstellung unter Verwendung von rezyklierter grober Gesteinskörnung ermöglicht.

5.1.1 Charakterisierung der Gesteinskörnung

Zur Charakterisierung der zu verwendenden rezyklierten Gesteinskörnungen kann gemäß den Erkenntnissen aus dieser Arbeit die in Abbildung 5-1 dargestellte Vorgehensweise empfohlen werden:

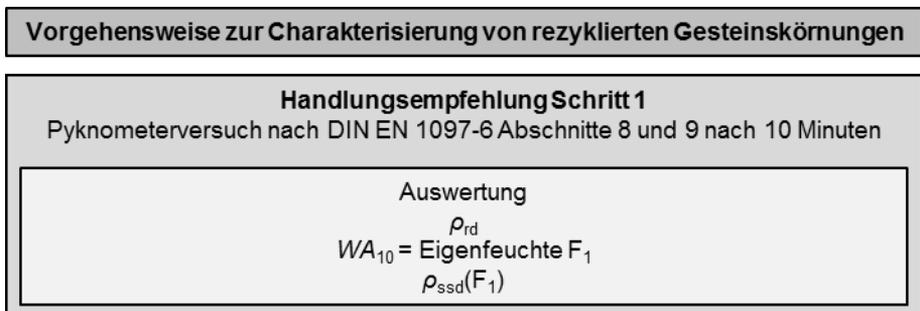


Abbildung 5-1: Charakterisierung der rezyklierten Gesteinskörnung

5.1.2 Mischungsberechnung

Zunächst soll die Mischungsberechnung, wie in Abbildung 5-2 dargestellt, so erstellt werden wie für Normalbeton mit natürlicher Gesteinskörnung, um die erforderlichen Mischungsbestandteile zu berechnen, die für die festgelegten Anforderungen an Wasserzementwert, Betonfestigkeitsklasse und Zementgehalt aus den Festlegungen der Planung resultieren. Die erforderliche Gesteinskörnungsmenge an rezyklierter Gesteinskörnung wird dabei unter Verwendung der Rohdichte auf ofentrockener Basis berechnet. Der so resultierende Wassergehalt entspricht dem wirksamen Wassergehalt zur Berechnung des Wasserzementwerts.

Im zweiten Schritt der Mischungsberechnung wird die gegenüber natürlicher Gesteinskörnung erhöhte Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnung berücksichtigt und das in der Betonzusammensetzung erforderliche Gesamtwasser berechnet. Dieses erforderliche Gesamtwasser ergibt sich als Summe aus der zuvor berechneten wirksamen Soll-Wassermenge und dem Äquivalent aus der Wasseraufnahme in zehn Minuten der rezyklierten Gesteinskörnung.

Das Äquivalent der Wasseraufnahme in zehn Minuten ist dabei als diejenige Wassermenge anzusehen, die von der rezyklierten Gesteinskörnung als Kernfeuchte aufgenommen wird. Sie ist somit für den wirksamen Wasserzementwert nicht relevant.

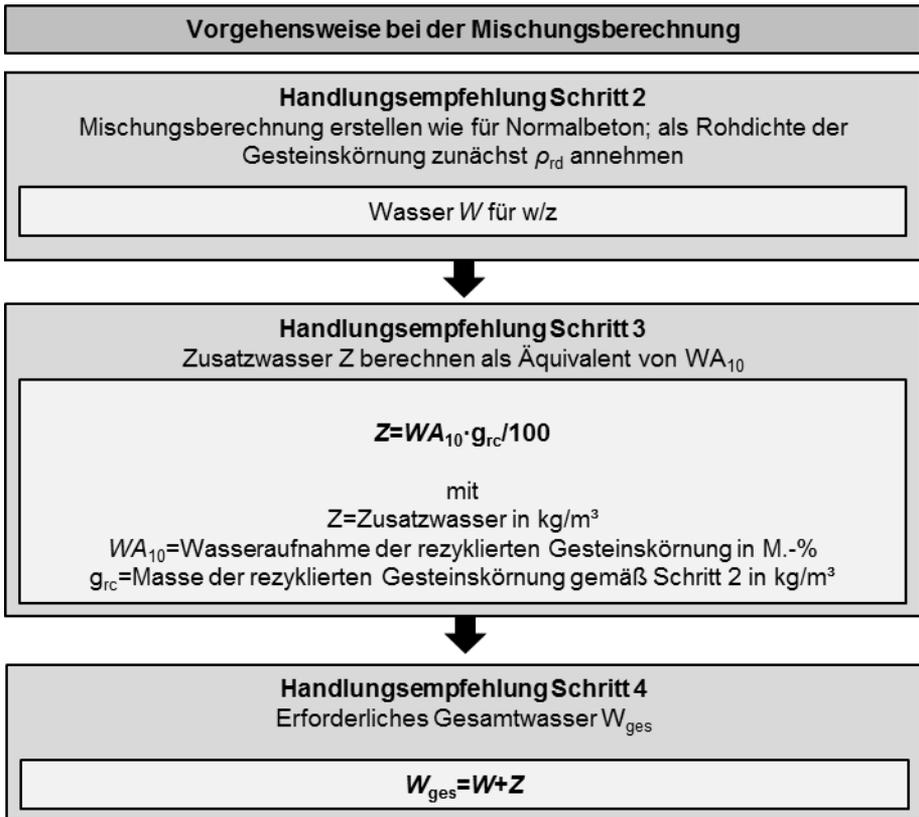


Abbildung 5-2: Empfohlene Vorgehensweise bei der Mischungsberechnung

5.1.3 Betonherstellung

Bei der Herstellung der Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung ist das Ergebnis aus der zuvor beschriebenen Mischungsberechnung hinsichtlich des Eigenfeuchtegehalts und der damit verbundenen Änderung der Gesteinskörnungsrohichte der Gesteinskörnungen und der notwendigen Wasserdosierung anzupassen.

Hierzu sollte zeitnah (möglichst am Betoniertag oder am Tag vor der Betonage) vor der Betonherstellung durch Darren der Feuchtegehalt der rezyklierten Gesteinskörnung ermittelt werden.

Die in der Gesteinskörnung enthaltene Feuchte F_n ist dann vom erforderlichen Gesamtwasser abzuziehen. Ergebnis ist die zu dosierende Wassermenge W_{dos} , die bei hohen Feuchtegehalten der Gesteinskörnung ggf. geringer ausfallen kann als die Wassermenge W, welche für die Berechnung des Wasserzementwerts herangezogen wurde.

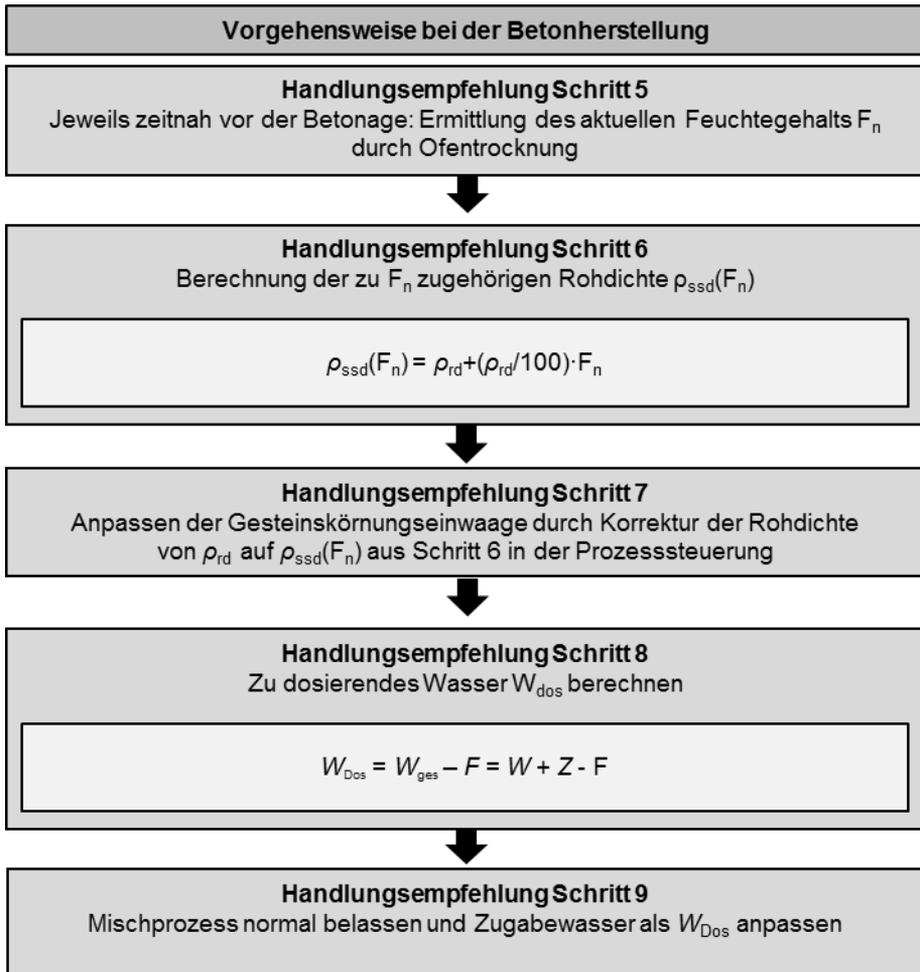


Abbildung 5-3: Empfohlene Vorgehensweise bei der Betonherstellung

5.1.4 Prüfung

Gemäß geltendem Regelwerk sind beim Festigkeitsnachweis in der Produktionskontrolle für den Beton auch der Luftgehalt am Frischbeton und die Frischbetonrohddichte zu bestimmen.

Bezüglich dieser Arbeit gilt es anzumerken, dass die Standardprüfverfahren zur Bestimmung des Wassergehalts von Frischbeton, die bei Betonen mit natürlicher Gesteinskörnung zur Anwendung kommen, nicht zum Nachweis des Wasserzementwerts von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen herangezogen werden können. Aus diesen Standardprüfverfahren geht ausschließlich das enthaltene Gesamtwasser des Betons hervor, eine Aussage zum wirksamen Wassergehalt kann nicht getroffen werden.

5.2 Überprüfung der Handlungsempfehlung in der Praxis

Die in Kapitel 5 ausgesprochene Empfehlung zur Vorgehensweise bei der zielgerichteten Herstellung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen wurde im Rahmen eines Praxistests überprüft.

Im Rahmen des BMBF-Forschungsprojekts „R-Beton – Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation“ wurde auf dem Campus der Technischen Universität Kaiserslautern das Demonstratorgebäude „Small House III“ unter Verwendung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung errichtet, um die labortechnisch entwickelten Betonzusammensetzungen auf Praxistauglichkeit zu überprüfen (vgl. [71], [Breit et al. - 2017; Böing - 2013],[Breit u. Scheidt - 2017; Scheidt et al. - 2018]). Der Beton wurde von einem ortsansässigen Transportbetonwerk produziert und auf der Baustelle unter Praxisbedingungen eingebaut. Bei der Betonherstellung im Transportbetonwerk kam das in Kapitel 5 vorgestellte Konzept zum Einsatz.

In den Wänden des Großdemonstrators wurde die gesamte Gesteinskörnung $\geq 2\text{mm}$ durch rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 bzw. Typ 2 ersetzt. In den Deckenkonstruktionen, bestehend aus Elementdecken mit Ortbetonergänzung, wurden 35 Vol.-% der gesamten Gesteinskörnung durch rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 der Lieferung 2/16 mm ersetzt.

Begleitet wurden alle Betonagen von einem Prüfprogramm im Labor und auf der Baustelle.

5.2.1.1 Betonsorten

Insgesamt drei verschiedene Mischungszusammensetzungen für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung wurden entsprechend der Handlungsempfehlung erstellt, produziert, eingebaut und geprüft. Alle Betone wurden als Betone der Festigkeitsklasse C 30/37 mit den Expositionsklassen XC4, XF1, WF mit der Konsistenzklasse F4 konzipiert.

Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die hergestellten Transportbetone

Tabelle 5-1: Betonsorten und Herstellungsdatum

Zu prüfende Betone	Beton Nr.	Konsistenz	Beton einbringen mit	Herstellungsdatum
Wandbeton Typ 2 100 % C30/37	1	F4	Pumpe	18.08.2017
Aufbeton Decke Typ 1 35 % C30/37	2	F4	Kübel	23.08.2017
Wandbeton Typ 1 100 % C30/37	3	F4	Pumpe	31.08.2017

5.2.1.2 Verwendete Ausgangsstoffe

Verwendet wurden in den Betonen als Ausgangsstoffe natürlicher Rheinsand 0/2 mm, rezyklierte Gesteinskörnungen Typ 1 bzw. 2 des Aufbereiters Scherer+Kohl GmbH & Co KG aus dem Werk im Kaiserwörthhafen Ludwigshafen in der Lieferkörnung 2/16 mm, natürlicher Edelsplitt in den Lieferkörnungen 2/8 mm und 8/16 mm aus Jettenbach, ein Portlandhüttenzement CEM II/B-S 42,5 N, Trinkwasser sowie das im Rahmen des BMBF-Verbundforschungsvorhaben „R-Beton“ [R-Beton - 2018] vom Projektpartner BASF Construction Solutions GmbH entwickelte R-Zusatzmittel SR 1.

Hergestellt wurden die Betone durch das Werk Landstuhl der TRAPOBET Transportbeton GmbH Kaiserslautern KG.

5.2.1.3 Charakterisierung der Gesteinskörnung

Von den gelieferten rezyklierten Gesteinskörnungen wurde die Korngrößenverteilung sowie die stoffliche Zusammensetzung, die Korngrößenverteilung und die Wasseraufnahme in zehn Minuten entsprechend der in Kapitel 5 beschriebenen Vorgehensweise ermittelt.

Die Korngrößenverteilungen und die stofflichen Zusammensetzungen sind in Anhang D zusammengestellt.

Die Rohdichte im ofentrockenen Zustand und die Wasseraufnahme der ofentrockneten repräsentativen Stichprobe in zehn Minuten gehen aus Tabelle 5-2 hervor.

Tabelle 5-2: Wasseraufnahme und Rohdichten aus der Charakterisierung

Gesteins- körnung	ρ_{rd} [kg/dm ³]	$\rho_{ssd} (F_1)$ [kg/dm ³]	WA ₁₀ [M.-%]
Typ 1 2/16	2,55	2,60	2,56
Typ 2 2/16	2,49	2,55	2,32

5.2.1.4 Mischungsberechnungen

Die Mischungsberechnung wurde analog zu Schritt zwei der Handlungsempfehlung durchgeführt.

Tabelle 5-3: Mischungsberechnung Beton 1

Ausgangsstoffe	Gehalt [kg/m ³]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [dm ³]
Rheinsand 0/2 (39 Vol.-%)	701	2,63	266,6
Typ 2 2/16 (61 Vol.-%)	1038	2,49	416,9
CEM II/B-S 42,5 N	360	3,10	116,1
Wasser	188	1,00	188,0
SR1 (0,70% von Ze- ment)	2,52	1,06	2,4
Luft	-	-	10
Gesamt	2290	2,29	1000,0
w/z	0,52		

Tabelle 5-4: Mischungsberechnung Beton 2

Ausgangsstoffe	Gehalt [kg/m ³]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [dm ³]
Rheinsand 0/2 (38 Vol.-%)	701	2,63	266,4
Edelsplitt 2/8 (8 Vol.-%)	149	2,65	56,1
Edelsplitt 8/16 (19 Vol.-%)	353	2,65	133,2
Typ 1 2/16 (35 Vol.-%)	626	2,55	245,4
CEM II/B-S 42,5 N	340	3,10	109,7
Wasser	178	1,00	178,0
SR1 (0,40 M.-% von Zement)	1,36	1,06	1,3
Luft	-	-	10
Gesamt	2348	2,35	1000,0
w/z	0,52		

Tabelle 5-5: Mischungsberechnung Beton 3

Ausgangsstoffe	Gehalt [kg/m ³]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [dm ³]
Rheinsand 0/2 (39 Vol.-%)	699	2,63	265,7
Typ 1 2/16 (61 Vol.-%)	1067	2,55	418,5
CEM II/B-S 42,5 N	360	3,10	116,1
Wasser	188	1,00	188,0
SR1 (0,70% von Ze- ment)	1,8	1,06	1,7
Luft	-	-	10
Gesamt	2316	2,32	1000,0
w/z	0,52		

Im Folgenden wurde die erforderliche Gesamtwassermenge für jede der drei Betonzusammensetzungen ermittelt, die die Wasseraufnahme in zehn Minuten der Gesteinskörnung berücksichtigt:

Tabelle 5-6: Erforderliches Gesamtwasser in den Betonzusammensetzungen

Beton	Gehalt rezyklierte Gesteinskörnung [kg/m ³]	Zusatzwasser Z [kg/m ³]	W _{ges} [kg/m ³]
Beton 1	1038	24,08	212,08
Beton 2	626	16,03	194,03
Beton 3	1067	27,32	215,32

5.2.1.5 Betonherstellung

Entsprechend der Handlungsempfehlung wurde jeweils am Vortag der Betonagen die Eigenfeuchte der rezyklierten Gesteinskörnungen ermittelt und auf Basis dieser Ergebnisse das zu dosierende Wasser für die Herstellung berechnet.

Tabelle 5-7: Wasseraufnahme und Rohdichten aus der Charakterisierung

Gesteinskörnung	F _n [M.-%]	F _n [kg/m ³]	W _{Dos} [kg/m ³]	ρ _{ssd} (F _n) [kg/dm ³]
Beton 1	4,05	42,04	170,8	2,59
Beton 2	2,69	16,93	177,1	2,62
Beton 3	2,72	28,7	186,7	2,62

Die Herstellung der Betone erfolgte im Transportbetonwerk gemäß Mischablauf für Normalbetone mit natürlicher Gesteinskörnung. Die massenmäßige Dosierung von Wasser und rezyklierter Gesteinskörnung wurde entsprechend Tabelle 5-7 angepasst.

5.2.1.6 Prüfung

Aus jedem ersten Fahrzeug eines Betoniertages wurde zu Beginn eine Betonprobe von ca. 250 l entnommen, die zur Herstellung der Festbetonprobekörper für die Prüfung der Betondruckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls sowie zur Prüfung der Frischbetoneigenschaften Konsistenzverlauf über die Zeit, Frischbetontemperatur, Frischbetonrohddichte und Luftgehalt verwendet wurde. Zusätzlich wurde aus jedem einzelnen Fahrmischer auf der Baustelle sowohl vor der Betonpumpe als auch nach der Betonpumpe eine Probe entnommen und hinsichtlich ihrer Konsistenz beurteilt.

Die Ergebnisse der Betonprüfungen sind in Tabelle 5-8 zusammengestellt.

Tabelle 5-8: Festbetoneigenschaften der Betone 1-3

	Festbeton- rohdichte 28d [kg/m³]	f_{c,cube} [N/mm²]	Spaltzug- festigkeit [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]
Beton 1	2273	41,9	3,97	27.500
Beton 2	2281	42,7	3,45	28.000
Beton 3	2240	42,1	3,66	27.600

Die Auswertung der Festbetoneigenschaften liefert, wie in Abbildung 5-4 bis Abbildung 5-7 gezeigt, für alle Betone, unter Variation der Art, Feuchte und des Anteils an rezykliertem Gesteinskörnung, sehr geringe Streubreiten der Eigenschaften.

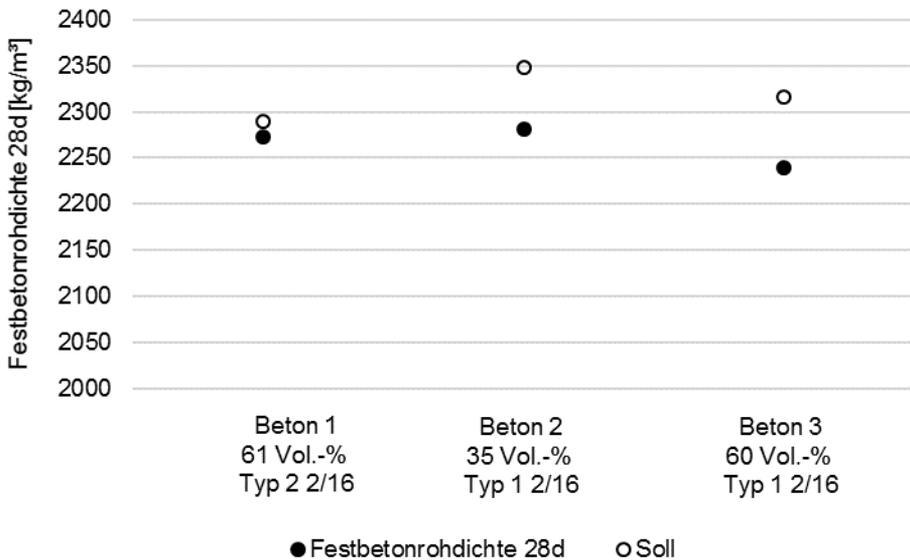


Abbildung 5-4: Mittlere Festbetonrohdichte der Betone 1-3

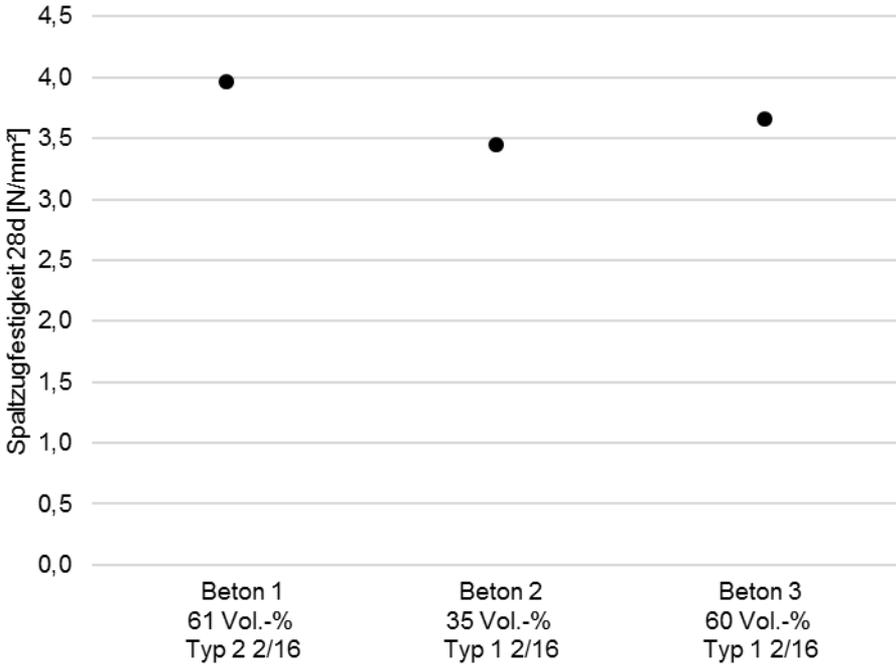


Abbildung 5-5: Mittlere Spaltzugfestigkeit der Betone 1-3

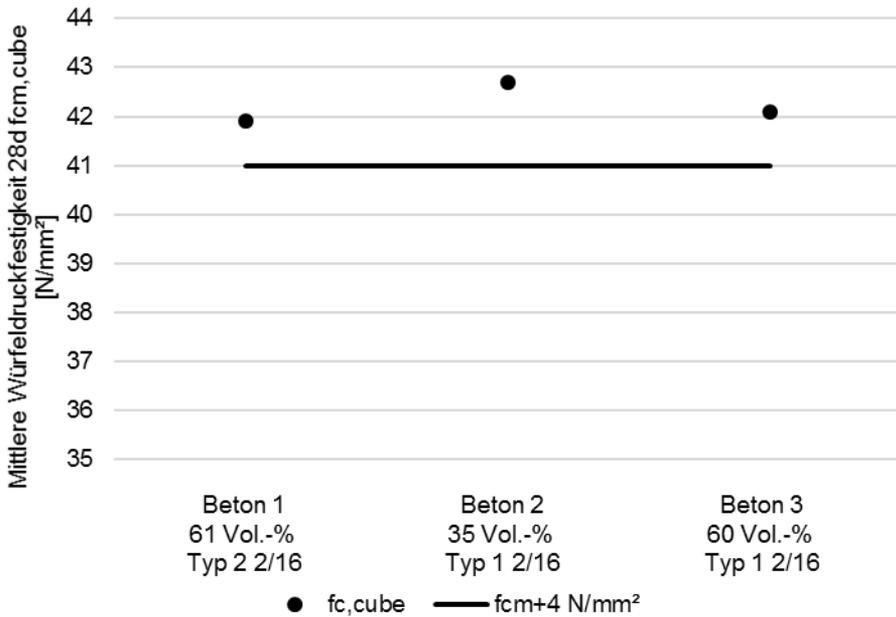


Abbildung 5-6: Mittlere Betondruckfestigkeit der Betone 1-3 und Konformitätsnachweis

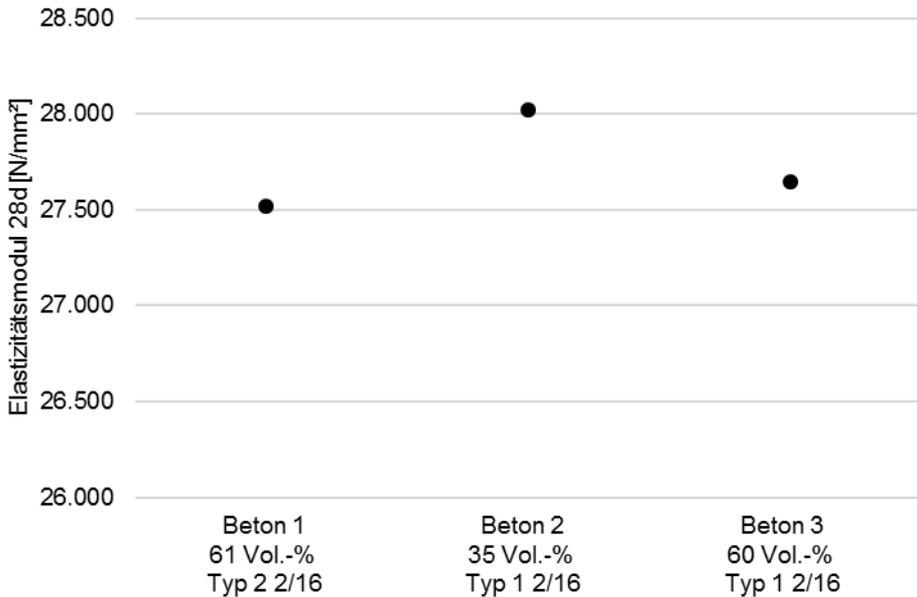


Abbildung 5-7: Mittlerer statischer Elastizitätsmodul der Betone 1-3

5.2.1.7 Fazit

Die im Rahmen dieser Arbeit konzipierte und aus den Laborversuchen abgeleitete Vorgehensweise zur Herstellung von R-Beton mit definiertem Wasserzementwert konnte beim Bau des Demonstratorgebäudes „Small House III“ auf dem Campus der Technischen Universität Kaiserslautern erfolgreich angewendet werden. Die vorgeschlagene Vorgehensweise konnte ohne Probleme im Transportbeton praktisch umgesetzt werden. Anhand der begleitenden Betonprüfungen bestätigten die Festbetonkennwerte aus dem Praxisversuch die Erkenntnisse aus den Laborversuchen, dass mit dieser Vorgehensweise die Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnungen Typ 1 und Typ 2, die schwankende Gesteinskörnungsfeuchte infolge einer frei bewitterten Lagerung und unterschiedliche Anteile an rezyklierter Gesteinskörnung im Beton gleichermaßen zutreffend in der Betonherstellung berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse zeigen im vorliegenden Fall, dass bei Umsetzung der ausgesprochenen Handlungsempfehlung unabhängig von der verwendeten rezyklierten Gesteinskörnung und unabhängig von deren Anteil an der gesamten Gesteinskörnung, die Zielgrößen für die Druckfestigkeit zielsicher eingehalten werden und die Festbetoneigenschaften in geringen Grenzen schwanken.

Die aus den Versuchen abgeleitete Handlungsempfehlung für die Praxis stellt somit ein praxistaugliches Werkzeug für die zielsichere Herstellung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen dar.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Rezyklierte Gesteinskörnung, die in Deutschland für die Betonherstellung verwendet werden soll, muss einem der beiden über die gültigen Regelwerke zugelassenen Typen 1 oder 2 entsprechen. Die Gesteinskörnungen besitzen im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung eine höhere Porosität, dementsprechend auch eine höhere Wasseraufnahme und eine geringere Rohdichte. Die Rohdichte ist dabei stark vom Feuchtezustand abhängig, was eine gegenüber natürlicher Gesteinskörnung veränderte Problematik für die Betonherstellung darstellt. Die Rohdichte von rezyklierten Gesteinskörnungen muss in der Praxis stets im jeweiligen Feuchtezustand ermittelt und in der Mischungsberechnung berücksichtigt werden, um Abweichungen im Stoffraum, Wassergehalt und Wasserzementwert zu vermeiden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Extrapolation der Wasseraufnahme nach 24 Stunden, sowie der *ssd*-Rohdichte zu jedem beliebigen Eigenfeuchtegehalt einer rezyklierten Gesteinskörnung anhand der Ergebnisse des Pyknometersversuchs (Rohdichte im ofentrockenen Zustand und Wasseraufnahme) nach [DIN EN 1097-6] nach zehn Minuten möglich ist. So konnte gefolgert werden, dass es genügt, diesen Versuch durchzuführen, um die Gesteinskörnung hinsichtlich ihrer Rohdichte und des Wasseraufnahmevermögens zu beurteilen. Zum Zwecke einer praxisgerechten Schnellcharakterisierung und korrekten Dosierung von rezyklierten Gesteinskörnungen konnte eine Vorgehensweise vorgeschlagen werden, die es ermöglicht die Wasserzugabe und die Einwaage der rezyklierten Gesteinskörnung an wechselnde Feuchtezustände anzupassen und so eine ungewollte Minder- oder Überschussmenge im Stoffraum des Betons zu verhindern.

Soll das zeitliche Wasseraufnahmeverhalten von rezyklierter Gesteinskörnung in Laborversuchen umfassender analysiert werden, so ist auf Basis der Versuche in dieser Arbeit zu empfehlen, das in Anhang C zu [DIN EN 1097-6] beschriebene Verfahren für leichte Gesteinskörnungen auf die rezyklierte Gesteinskörnung anzuwenden.

Es ist bekannt, dass die Eigenschaften von rezyklierten Gesteinskörnungen sich von denen der natürlichen Gesteinskörnung unterscheiden. Die Kornrohichte ist geringer als bei den praxisüblichen natürlichen Gesteinskörnungen, die Wasseraufnahme ist größer und kann nicht, wie bei natürlichen Gesteinskörnungen üblich, vernachlässigt werden. Auch die Variation der Eigenschaften innerhalb eines Liefertyps an rezyklierter Gesteinskörnung ist größer als die bei natürlichen Gesteinskörnungen, die sich durch unterschiedliche regionale und petrografische Herkunft ergeben. Im Rahmen dieser Arbeit konnte jedoch auch gezeigt werden, dass es durch Steuerung in der Aufbereitung möglich ist, einen Massenstrom über längere Zeit so zu liefern, dass die Streuung zwischen einzelnen Lieferchargen eines Recyclers im Bereich der Gleichmäßigkeit von natürlicher Gesteinskörnung liegt. Eine ausreichende Gleichmäßigkeit ist somit gewährleistet. Auf die im absoluten vom bekannten Naturstein abweichenden Eigenschaften muss ein Betonhersteller sich bei der Mischungsberechnung in gleicher Weise einstellen wie auf die Charakteristika der lokal verfügbaren natürlichen Körnung.

Die Wasseraufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung erfolgt in zwei Phasen. In der ersten, schnellen Phase nimmt der Großteil der untersuchten Körnungen bereits $\frac{2}{3}$ des gesamt aufnehmbaren Wassers auf. Die zweite, langsamere Phase ist nach 24 Stunden praktisch vollständig abgeschlossen. Rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2 ist, aufgrund der größeren Porenradien in enthaltenen Mauerwerksplitt besser und schneller in der Lage Wasser aufzunehmen und abzugeben als rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1, insbesondere wenn diese aus reinem Betonsplitt besteht. Reiner Betonsplitt kann bei hoher Luftfeuchte durch Kapillarkondensation Wasser aufnehmen, Mauerwerksbestandteile hingegen nicht. Die Betonsplittstücke trocknen gleichzeitig deutlich langsamer als Mauerwerksbestandteile, was auf die stärkere physikalische Bindung des Wassers an die kleinen Poren des Betonsplitts zurück zu führen ist.

Darüber, dass die höhere Wasseraufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung in der Mischungsberechnung berücksichtigt und ausgeglichen werden muss, herrscht in der Literatur Konsens, die Art und Weise wie diese Kompensation und Berücksichtigung durchzuführen ist, stellte jedoch ein bislang nicht abschließend geklärtes Problem dar. Anhand der Literaturstudie in Kapitel 2.2.3 wurde deutlich, warum die vorliegenden Ergebnisse zum Einfluss von rezyklierter Gesteinskörnung auf die Betoneigenschaften untereinander widersprüchlich sind. Der effektive Wassergehalt im Zementleim unterscheidet sich von Literaturstelle zu Literaturstelle, wobei eine Überprüfung der theoretischen Überlegungen zum freien Wasser nie tatsächlich stattfand oder nicht mehr nachzuvollziehen sind.

Da bislang unter Laborbedingungen keine gesicherte Herstellung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung mit definiertem wirksamem Wasserzementwert möglich war, bot sich auch für die industrielle Betonherstellung lediglich die Möglichkeit, auf der sicheren Seite liegende bzw. vereinfachende Annahmen zu treffen, wenn rezyklierte Gesteinskörnung eingesetzt wurde. Wie in [Rühl - 2001] gezeigt, ist es möglich mit solch vereinfachenden Annahmen und Vorgehensweisen Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung herzustellen, der innerhalb der zulässigen Toleranzen einer angestrebten Festigkeitsklasse und Lieferkonsistenz liegt. Es stellte sich jedoch die Frage, wie sicher diese Erfahrungen auf die allgemeine Betonherstellung und alle in Kapitel 2.1. ausgewerteten Extrema von rezyklierter Gesteinskörnung übertragen werden könnten. Auch konnte bei den geschilderten Prinzipien in [Rühl - 2001] nicht von einer Wirtschaftlichkeits- oder Qualitätsoptimierung der Betonzusammensetzungen die Rede sein. Keine der praktizierten Vorgehensweisen kam ohne erheblichen Zusatzaufwand, entweder durch nachträgliche Fließmitteldosierung auf der Baustelle bei gleichzeitiger erheblicher Unsicherheit infolge von Unterschieden im wirksamen Wassergehalt oder durch die Berieselung der Gesteinskörnung zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Gesteinskörnungsfeuchte aus. Dass es problemlos möglich ist industriell Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung herzustellen, die den Anforderungen an die vereinbarten Festigkeits- und Konsistenzklassen erfüllen, wurde nicht in Frage gestellt. Lediglich der tatsächliche wirksame Wassergehalt, der zu einer weiteren Qualitätsoptimierung der Betone die entscheidende Größe wäre, konnte bislang nicht zielsicher eingestellt werden und stellte eine große Unbekannte dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurde für Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung eine Überprüfung des wirksamen Wassergehalts durchgeführt, die Vergleiche zwischen Betonen mit natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung ermöglichte, bei denen die Zusammensetzung des Zementmörtels

und Zementsteins vergleichbar waren. Dabei wurde ausgewertet, wie in einem praxisbekannten und üblichen Mischablauf ohne Warte-/ Saugzeiten die industrielle Herstellung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung zielsicher möglich ist.

Mit dem Äquivalent der Wasseraufnahme nach zehn Minuten im Pyknometerversuch konnten sowohl für rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 als auch Typ 2 mit ofentrockener Gesteinskörnung wirksame Wasserzemente erzielt werden, die der Zementsteinmatrix einer Vergleichsmischung aus natürlichem Splitt entsprachen. Verglichen mit einer Referenzmischung aus natürlichem Kies lieferte diese Wasserdosierung in den untersuchten Varianten stets gesicherte Ergebnisse.

Aus den Versuchen zum Einfluss der Betonkonsistenz auf den wirksamen Wasserzementwert zeigte sich zusammenfassend, dass der wirksame Wasserzementwert nicht durch Konsistenzunterschiede, die bei gleicher Wasserdosierung über die Zugabe von Fließmitteln eingestellt werden, verändert wird. Somit ist es für die Praxis möglich eine Betonsorte mit rezyklierter Gesteinskörnung in unterschiedlichen Konsistenzklassen anzubieten und herzustellen, ohne die Wasserdosierung aufgrund dieser unterschiedlichen Zielkonsistenz anpassen zu müssen. Eine Anpassung der Wasserdosierung ist nur aufgrund unterschiedlicher Wasseraufnahmen der rezyklierten Gesteinskörnungen bzw. aufgrund schwankender Eigenfeuchte vorzunehmen.

Auf die Druckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit der Betone mit annähernd gleicher Zementsteinmatrix wirkt sich rezyklierte Gesteinskörnung, unabhängig vom eingesetzten Gesteinskörnungstyp, nicht negativ aus. Verglichen mit gebrochener natürlicher Gesteinskörnung sind die Festigkeitseigenschaften praktisch gleich, verglichen mit natürlichem Rundkorn tendenziell sogar besser. In den Versuchen zum Elastizitätsmodul ist im Vergleich mit gebrochenem Naturkorn eine Verringerung festzustellen, beim Vergleich mit Rundkorn war in den untersuchten Gesteinskörnungsvarianten kein negativer Einfluss festzustellen.

Ein Austausch der Gesteinskörnung durch verschiedene Praxislieferungen weiterer Produktionschargen aus demselben Aufbereitungswerk führte in drei von vier untersuchten Fällen zu praktisch gleichen Festigkeiten der extrahierten Mörtel und somit zu praktisch gleichen Eigenschaften in der Zementsteinmatrix. Die Betondruckfestigkeit der Betone wich um maximal $\pm 6,5$ MPa von der Druckfestigkeit der Vergleichsmischung mit natürlichem Splitt ab. Bei wechselnder Gesteinskörnungsladung wurde in den Versuchen die Körnungsziffer und Korngrößenverteilung, der Mörtelgehalt sowie der Zementgehalt beibehalten. Die Wasserzugabe wurde bei allen Betonen um das jeweilige Äquivalent der Wasseraufnahme in zehn Minuten, geprüft an ofengetrockneter Gesteinskörnung im Pyknometerversuch nach [DIN EN 1097-6], erhöht. Bei der Ermittlung des erforderlichen Gesamtwassers wird deshalb in der erarbeiteten Handlungsempfehlung für die Praxis aus den Versuchen abgeleitet, dass als zusätzliches Wasser das jeweilige Äquivalent der Wasseraufnahme in zehn Minuten für die rezyklierte Gesteinskörnung berücksichtigt werden sollte.

Um einen Transfer der bisher bekannten Laborversuche mit ofengetrockneter Gesteinskörnung in die Praxis der Betonherstellung zu ermöglichen, wurden Untersuchungen mit feuchten rezyklierten Gesteinskörnungen durchgeführt. Diese Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Feuchtezustände auf die Betoneigenschaften

zeigten, dass zwar die Ausgangskonsistenz von Betonen, bei denen die Gesteinskörnung im feuchten bis wassergesättigten Zustand eingesetzt wurde, bei gleichem Gesamtwasser aufgrund des um die Gesteinskörnungsfeuchte verringerten Anmachwassers steifer war als bei Verwendung von ofentrockener Gesteinskörnung, der Konsistenzverlust jedoch bei den Mischungen mit ofentrocken in den Mischprozess gegebener Gesteinskörnung deutlich stärker ausgeprägt war.

Die Unterschiede im Wasserhaushalt zwischen Gesteinskörnung und Zementstein glichen sich im Beton mit der Zeit aus. Bei den Festigkeitsprüfungen am Beton nach 7 und 28 Tagen waren die Unterschiede zwischen den einzelnen Mischungen mit unterschiedlichem Feuchtegehalt der Gesteinskörnung zum Mischzeitpunkt deutlich geringer als am Mörtel, der nach 30 Minuten aus dem Beton extrahiert wurde. Der Ausgleich des Wasserhaushalts und die damit verbundene Unempfindlichkeit gegenüber Feuchteschwankungen war bei rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 deutlich stärker. Die Betone mit Gesteinskörnung Typ 2 wiesen nach 28 Tagen ähnliche Festigkeiten auf wie die Referenzmischungen aus natürlicher Gesteinskörnung und es waren praktisch keine Unterschiede in Abhängigkeit vom Feuchtezustand mehr sichtbar. Die lufttrocken eingesetzte Gesteinskörnung lieferte generell die höchsten Druckfestigkeiten unter allen betrachteten Feuchtezuständen. Gleiches galt für die Spaltzugfestigkeit und das Elastizitätsmodul.

Die besten Betoneigenschaften konnten erzielt werden, wenn die rezyklierte Gesteinskörnung weder komplett trocken noch vollständig wassergesättigt eingesetzt wurde. Die Untersuchungen zeigten, dass es ausreichend ist, die Eigenfeuchte der Gesteinskörnung zu bestimmen und diese Wassermenge von der in der Erstprüfung ermittelten notwendigen Gesamtwassermenge abzuziehen.

Auf Basis der Ergebnisse wurde eine Handlungsempfehlung zur Herstellung von R-Beton mit definiertem Wasserzementwert abgeleitet. Diese empfohlene Vorgehensweise zur Charakterisierung von rezyklierten Gesteinskörnungen sowie zur Berücksichtigung von deren Charakteristika in der Mischungsberechnung und Betonherstellung konnte im Rahmen eines Praxistests erfolgreich angewendet werden. Die Ergebnisse der Begleitprüfungen zum umgesetzten Bauvorhaben zeigten, dass bei Umsetzung der ausgesprochenen Handlungsempfehlung unabhängig von der verwendeten rezyklierten Gesteinskörnung und unabhängig von deren Anteil an der gesamten Gesteinskörnung, die Zielgrößen für die Druckfestigkeit zielsicher eingehalten werden und die Festbetoneigenschaften in geringen Grenzen schwanken.

6.2 Fazit und Ausblick

Die umfassenden und systematischen Untersuchungen in dieser Arbeit zur „Ermittlung des erforderlichen Gesamtwassers zur Herstellung von R-Beton mit definiertem Wasserzementwert“ führten zu der Entwicklung eines Versuchsaufbaus, der es ermöglicht den wirksamen Wasserzementwert von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen zu überprüfen und mit einem Beton unter Verwendung von natürlichen Gesteinskörnungen zu vergleichen. Mit der gewählten, zielführenden Vorgehensweise konnte gezeigt werden, dass die vollständige Substitution der natürlichen Gesteinskörnung ≥ 2 mm durch rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 oder Typ 2 bei korrekter Berücksichtigung des Saugverhaltens dieser Gesteinskörnung keine geringeren Wasserzementwerte für gleiche Festigkeitseigenschaften erfordert. Auch konnte deutlich gezeigt werden, dass weder ein gezieltes Trocknen der rezyklierten Gesteinskörnungen noch deren vollständige Wassersättigung vor Mischbeginn für die Betoneigenschaften vorteilhaft ist. Da in der Praxis eine solche aufwändige Vorbereitung von Gesteinskörnungen nur schwer umsetzbar wäre, ist die Erkenntnis, dass mit rezyklierten Gesteinskörnungen, die weder vollständig trocken noch vollständig wassergesättigt sind die besten Festbetoneigenschaften erreicht wurden, positiv. Die Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit decken sich dabei mit den Erkenntnissen aus der Literatur zu Betonen mit leichten Gesteinskörnungen. Auch die Feststellung, dass durch Variation der Fließmitteldosierung und Betonkonsistenz bei sonst gleichbleibender Betonzusammensetzung kein Einfluss auf den wirksamen Wasserzementwert festzustellen ist, ist für die praktische Anwendung als positiv zu werten. Weiterhin konnte verdeutlicht werden, dass die Wasseraufnahme von rezyklierten Gesteinskörnungen im Beton leicht überschätzt werden kann. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass selbst in einem zweistufigen Mischprozess mit ofentrockener Gesteinskörnung, bei dem das Zusatzwasser vorab, statt in Form der Zementleimsuspension, zugegeben wird, die rezyklierten Gesteinskörnungen auch in 30 Minuten Kontakt mit Zementleim nicht mehr als das Äquivalent der Wasseraufnahme in zehn Minuten aufnehmen können. Sowohl die theoretischen Betrachtungen als auch die Erfahrungen mit den verwendeten rezyklierten Gesteinskörnungen in dieser Arbeit zeigten außerdem, dass rezyklierte Gesteinskörnungen Typ 2 zwar eine höhere Zusatzwassermenge zum Ausgleich ihrer erhöhten Wasseraufnahme benötigen als rezyklierte Gesteinskörnungen Typ 1 aus reinem Betonsplitt, jedoch weniger empfindlicher hinsichtlich des Wasseraufnahmeverhaltens sind als rezyklierte Gesteinskörnungen Typ 1. Die Gesteinskörnungen Typ 2 besitzen, verglichen mit Material Typ 1 aus Betonsplitt, eine schnellere Anpassungsfähigkeit an sich ändernde Feuchtebedingungen und ein geringeres Potenzial zur Aufnahme von Wasser aus der Luft bei hoher Luftfeuchte sowie eine höhere Trocknungsrate. Die Fähigkeit der Mauerwerksbestandteile, welche in Typ 2-Material zwischen 10 % und 30 % der Gesamtmasse darstellen, schneller Wasser aus ihrer Randzone an die Umgebungsluft abzugeben und schneller Feuchtigkeit ins Innere der Gesteinskörnung zu transportieren als Betonsplitt mit sehr kleinen Porenradien, ist für die Praxis der Betonherstellung als vorteilhaft anzusehen. Der Haftverbund mit der neuen Zementsteinmatrix kann durch eine trockene Randzone und durch eine „innere Nachbehandlung“ in Form einer späteren Umverteilung des in der Kernzone gespeicherten Wassers optimal ausgebildet werden.

Aufgrund des im Rahmen des Forschungsvorhabens zur Verfügung stehenden Zeitrahmens konnte nur eine begrenzte Anzahl an Versuchen durchgeführt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sind deshalb für die spezifischen Kombinationen aus lokal verfügbaren natürlichen Gesteinskörnungen im südwestdeutschen Raum und der rezyklierten Gesteinskörnung eines einzelnen Baustoffaufbereiteters gültig. Aufgrund der Vielfältigkeit und Variationsbreite der natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen sind für eine umfassende und allgemeingültige Aussage für Gesamtdeutschland weitere experimentelle und praktische Untersuchungen zur Erweiterung der Datenbasis und zur statistischen Absicherung der abgeleiteten Erkenntnisse notwendig und wünschenswert.

Auf eine Betrachtung des Extremfalls von vollständig getrockneter rezyklierter Gesteinskörnung in einem einstufigen Mischprozess, bei der die Gesteinskörnung ausschließlich Wasser aus der Suspension des Zementleims aufnehmen kann, wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da dieser Anwendungsfall keine praktische Relevanz besitzt. Für weitere Forschungsarbeiten wäre eine solche Betrachtung jedoch zum besseren Verständnis der Transportprozesse ebenfalls von Interesse.

Auch der Haftverbund zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix, als wesentlicher Einflussfaktor auf die Festbetoneigenschaften, bietet Anknüpfungspunkte und Fragestellungen für weiterführende Untersuchungen. Zukünftige Versuche könnten insbesondere auf die Betrachtung der Verbundzone zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix fokussiert werden, da die Ergebnisse aus Kapitel 4 den Ansatz liefern, hier einen entscheidenden Einfluss auf die Festbetoneigenschaften von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung zu vermuten. Denkbar wäre beispielsweise die Versuchsmatrix, insbesondere unter Variation des Feuchtezustands, um die Betrachtung der Verbundzone mit rasterelektronenmikroskopischen Analysen zu erweitern, um so eine Beurteilung des lokalen Wassergehalts in der Verbundzone erlauben.

Neben dem Einfluss des Haftverbunds zwischen rezyklierter Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix stellt auch der Lastabtrag bei Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung ein bislang wenig betrachtetes Forschungsthema dar. Die durchgeführten Versuche zur Korndruckfestigkeit im Zuge der Charakterisierung der rezyklierten Gesteinskörnungen in dieser Arbeit zeigten, dass die Kornfestigkeit mit steigendem Anteil an Mauerwerksbestandteilen sinkt. Wenn sich die Steifigkeits- und Festigkeitsverhältnisse so verschieben, dass die Gesteinskörnung weniger steif und fest ist als die Zementsteinmatrix (wie z. B. bei leichter Gesteinskörnung), so führt dies zu wesentlichen Änderungen im Lastabtrag des Verbundwerkstoffs Beton. Für leichte Gesteinskörnungen hat sich gezeigt, dass sich je nach Elastizität des Korns bei Druckbeanspruchung unterschiedliche Spannungszustände ausbilden, die die Betondruckfestigkeit beeinflussen [Wischers - 1967]. Bei Normalbeton trägt im Wesentlichen das Korngerüst die Lasten ab, bei leichter Gesteinskörnung ist bekannt, dass die Normalspannungen über die Zementsteinmatrix abgetragen werden. Wie der Lastabtrag bei rezyklierter Gesteinskörnung in mechanischen Modellen zu beschreiben ist, wäre in zukünftigen Forschungsarbeiten zu diskutieren. Wenn es gelingt auch die Einflüsse von Haftverbund und Lastabtrag genauer zu beschreiben, so könnte, aufbauend auf die in der Arbeit entwickelte Methode zur zielsicheren Einstellung des vorgesehenen Wassergehalts im Zementleim, darüber hinaus die Frage beantwortet

werden, welche Faktoren für die in dieser Arbeit festgestellten verringerten Elastizitätsmodule bei Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung in welchem Maß relevant sind.

Zum umfassenden Verständnis aller Einflüsse auf die Eigenschaften von R-Betonen sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, auch wenn mit der vorliegenden Dissertation die Herstellung für die praktische Anwendung zielsicherer möglich wird. Die abgeschlossene Arbeit lieferte die Erkenntnis, dass rezyklierten Gesteinskörnungen zwar charakteristische Besonderheiten im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen für Beton aufweisen, gleichzeitig jedoch für die Betonherstellung praktisch gleichwertig eingesetzt werden können, wenn diese Eigenschaften in der Betontechnologie korrekt berücksichtigt werden.

Ernstzunehmende Forschung erkennt man daran, dass plötzlich zwei Probleme existieren, wo es vorher nur eines gegeben hat.

Thorstein Veblen (1857 - 1929)

7 Literaturverzeichnis

- [Abrams - 1918] Abrams, D. (1918): *Design of Concrete Mixtures-Bulletin 1*. Chicago.
- [Angulo et al. - 2010] Angulo, S. C.; Carrijo, P. M.; Figueiredo, A. D.; Chaves, A. P. u. John, V. M. (2010): *On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete*. Materials and Structures 43 (4). S. 519–528.
- [Aurich - 1971] Aurich, H. (1971): *Kleine Leichtbetonkunde*. Bauverl. Wiesbaden.
- [Backe et al. - 2009] Backe, H.; Hiese, W. u. Möhring, R. (2009): *Baustoffkunde für Ausbildung und Praxis*. Werner. Neuwied.
- [BBS - 2016] Bundesverband Baustoffe- Steine und Erden e. V. (2016): *Studie „Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland“*. Berlin.
- [Bello et al. - 2017] Bello, L.; Garcia-Diaz, E. u. Rougeau, P. (2017): *An original test method to assess water absorption/desorption of lightweight aggregates in presence of cement paste*. Construction and Building Materials 154. S. 752–762.
- [Bendimerad et al. - 2015] Bendimerad, A. Z.; Roziere, E. u. Loukili, A. (2015): *Combined experimental methods to assess absorption rate of natural and recycled aggregates*. Materials and Structures 48 (11). S. 3557–3569.
- [Bentz u. Hansen - 2000] Bentz, D.P. u. Hansen, K.K. (2000): *Preliminary observations of water movement in cement pastes during curing using X-ray absorption*. Cement and Concrete Research 30 (7). S. 1157–1168.
- [Böing - 2013] Böing, R. (V.) (2013): *R-Beton- Ressourcen schonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation. Verbundskizze zur BMBF Bekanntmachung HighTechMatBau*.
- [Bonzel u. Dahms - 1978] Bonzel, J. u. Dahms, J. (1978): *Über den Wasseranspruch des Frischbetons*. Betontechnische Berichte Forschungsinstitut der Zementindustrie. S. 121–156.

- [Breit et al. - 2017] Breit, W.; Scheidt, J. u. Böing, R. (2017): *BMBF HighTechMatBau Vorhaben "R-Beton" - erste Ergebnisse und erste praktische Umsetzung im Großdemonstrator*. Newsletter Technik Heidelberg Cement (12). S. 2–13.
- [Breit u. Scheidt - 2017] Breit, W. u. Scheidt, J. (2017): *R-Beton: Neue Konzepte werden ihn etablieren*. beton Jahrgang 67 (Heft 9). S. 327–328.
- [BÜV Hessen-RLP - 2018] Baustoffüberwachungsverein Hessen - Rheinland-Pfalz e. V. (BÜV Hessen-RLP) (2018): *Fremdüberwachung Gesteinskörnungsproduktion nach DIN EN 12620 zwischen 2010 und 2017. Vertrauliche Überwachungsberichte*.
- [Djerbi Tegger - 2012] Djerbi Tegger, A. (2012): *Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach*. Construction and Building Materials 27 (1). S. 112–116.
- [Domagała - 2015] Domagała, L. (2015): *The Effect of Lightweight Aggregate Water Absorption on the Reduction of Water-cement Ratio in Fresh Concrete*. Procedia Engineering 108. S. 206–213.
- [Eckert u. Oliveira - 2017] Eckert, M. u. Oliveira, M. (2017): *Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology*. Construction and Building Materials 133 (Supplement C). S. 416–424.
- [Etxberria et al. - 2007] Etxberria, M.; Vásquez, E.; Marí, A. u. Barra, M. (2007): *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*. Cement and Concrete Research 37. S. 735–742.
- [Göllner et al. - 2016] Göllner, A.; Jungstand, B.; Dollase, A.; Möller, U. u. Nietzer, L. (2016): *EM HYDRA - Mikrowellen-Messverfahren zur Erfassung von Hydratationsprozessen in Beton- Beitrag im Tagungsband zur Fachtagung Bauwerksdiagnose 2016*.
- [Grübl et al. - 2001] Grübl, P.; Weigler, H. u. Karl, S. (2001): *Beton-Arten, Herstellung und Eigenschaften*. In: Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau. Ernst. Berlin.
- [Hanke u. Siebel - 1995] Hanke, V. u. Siebel, E. (1995): *Erweiterte Grundlagen für die Betonzusammensetzung*. beton 45 (1995) (6). S. 412–418.

- [Härig et al. - 1996] Härig, S.; Günther, K. u. Klausen, D. (1996): *Technologie der Baustoffe- Handbuch für Studium und Praxis*. Müller. Heidelberg.
- [Heese u. Breit - 2014] Heese, C. u. Breit, W. (2014): *Simulation des rheologischen Verhaltens von zementgebundenen Feinkornsystemen. Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, Diss., 2013*. Kaiserslautern.
- [Hoffmann u. Jacobs - 2007] Hoffmann, C. u. Jacobs, F. (2007): http://library.eawag-empa.ch/empa_publications_2007_open_access/EMPA20070501.pdf. Aufgerufen am 22.11.2013.
- [Juan u. Gutiérrez - 2009] Juan, M. S. de u. Gutiérrez, P. A. (2009): *Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate*. Construction and Building Materials 23 (2). S. 872–877.
- [Kerkhoff u. Siebel - 2002] Kerkhoff, B. u. Siebel, E. (2002): *Einfluss von rezykliertem Zuschlag aus Betonbruch auf die Eigenschaften, insbesondere die Dauerhaftigkeit von Beton*. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hg.) 2002 – Heft 514. Beuth Verlag. Berlin.
- [Klopfer - 1974] Klopfer, H. (1974): *Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen- Insbesondere in Baustoffen, Kunststoffen, Beschichtungen*. Zugl.: Stuttgart, Univ., *Habil.-Schr.*, 1972. Bauverl. Wiesbaden.
- [Kruschwitz - 2014] Kruschwitz, S. (2014): *Feuchtemessung im Bauwesen - ein Überblick- Beitrag im Tagungsband zur Fachtagung Bauwerksdiagnose 2014*.
- [Kubissa et al. - 2015] Kubissa, J.; Koper, M.; Koper, W.; Kubissa, W. u. Koper, A. (2015): *Water Demand of Concrete Recycled Aggregates*. Procedia Engineering 108. S. 63–71.
- [Montero u. Laserna - 2017] Montero, J. u. Laserna, S. (2017): *Influence of effective mixing water in recycled concrete*. Construction and Building Materials 132. S. 343–352.
- [MPA Kaiserslautern - 2018] Materialprüfamt der Technischen Universität Kaiserslautern (MPA Kaiserslautern) (2018): *Fremdüberwachung Gesteinskörnungsproduktion nach DIN EN 12620 zwischen 2010 und 2017. Vertrauliche Überwachungsberichte*.

- [Müller - 2001] Müller, C. /Hrsg. (2001): *Beton als kreislaufgerechter Baustoff*. Beuth. Berlin.
- [Müller - 2018] Müller, A. (2018): *Baustoffrecycling- Entstehung - Aufbereitung - Verwertung*. Springer Fachmedien Wiesbaden. Wiesbaden.
- [Müller u. Dora - 2000] Müller, C. u. Dora, B. /Hrsg. (2000): *Verwertung von Brechsand aus Bauschutt*. Beuth. Berlin.
- [Müller u. Stürmer - 2017] Müller, A. u. Stürmer, S. (2017): *Aufbereitungstechnik - Status quo und Zukunft*. beton 67 (1739). S. 317–321.
- [Nägele - 1984] Nägele, E. W. (1984): *Bestimmung des Wasserzementwertes von Frischbeton*. In: (Deutscher Ausschluß für Stahlbeton. Ernst in Komm. Berlin, München.
- [Nägele u. Hilsdorf - 1980/81] Nägele, E. W. u. Hilsdorf, H. K. (1980/81): *Die Frischbetonanalyse auf der Baustelle*. Betontechnische Berichte Forschungsinstitut der Zementindustrie. S. 33–49.
- [NEN - 2006] Nederlands Normalisatie-instituut (NEN) (2006): *NEN 5960:2006-07 Concrete - Determination of water-cement/ water-binder ratio of fresh concrete* 91.100.30.
- [Neroth u. Wendehorst - 2011] Neroth, G. u. Wendehorst, R. (2011): *Wendehorst Baustoffkunde*. Vieweg + Teubner. Wiesbaden.
- [Neville - 2002] Neville, A. M. (2002): *Properties of concrete*. Wiley. New York.
- [Platzek - 2018] Platzek, W. (2018): *Auswertung zur Schwankungsbreite der Kornrohdichten in den 54 Steinbrüchen der Basalt-Actien-Gesellschaft 2010-2015- interne Studie zur Qualitätssicherung an Asphaltmischgut*.
- [Poon et al. - 2004] Poon, C. S.; Shui, Z. H.; Lam, L.; Fok, H. u. Kou, S. C. (2004): *Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete*. Cement and Concrete Research 34 (1). S. 31–36.
- [Poon et al. - 2007] Poon, C. S.; Kou, S. C. u. Lam, L. (2007): *Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete*. Materials and Structures 40 (9). S. 981–988.

- [Popov - 2009] Popov, V. (2009): *Kontaktmechanik und Reibung*. Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg.
- [Quattrone et al. - 2016] Quattrone, M.; Cazacliu, B.; Angulo, S. C.; Hamard, E. u. Cothenet, A. (2016): *Measuring the water absorption of recycled aggregates, what is the best practice for concrete production?* Construction and Building Materials 123 (Supplement C). S. 690–703.
- [R-Beton - 2018] HeidelbergCement AG (R-Beton) (2018): <http://www.r-beton.de>.
- [Rühl - 2001] Rühl, M. (2001): *Einfluss der rezyklierten Gesteinskörnung auf die Eigenschaften von Frisch- und Festbeton*. Dissertation. Darmstadt.
- [Santos et al. - 2017] Santos, W. F.; Quattrone, M.; John, V. M. u. Angulo, S. C. (2017): *Roughness, wettability and water absorption of water repellent treated recycled aggregates*. Construction and Building Materials 146. S. 502–513.
- [Scheidt et al. - 2018] Scheidt, J.; Breit, W.; Pancic, A. u. Schnell, J. (2018): *Aufweitung der vorhandenen Anwendungsbeschränkungen für Beton mit rezyklierter feiner und grober Gesteinskörnung- Schlussbericht zum BMBF-Verbundforschungsvorhaben „R-Beton - Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation“ Teilvorhaben 3 (Förderkennzeichen 13N13121)*. TIB Leibnitz-Informationszentrum Technik und Naturwissenschaften.
- [Scholz et al. - 1995] Scholz, W.; Hiese, W. u. Ettel, W.-P. /Hrsg. (1995): *Baustoffkenntnis- [Natursteine, keramische und mineralisch gebundene Baustoffe, Bauglas ...]*. Werner. Düsseldorf.
- [Schubert u. Hoffmann - 2011] Schubert, S. u. Hoffmann, C. (2011): *Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton mit Mischgranulat*.
- [Springenschmid - 2007] Springenschmid, R. (2007): *Betontechnologie für die Praxis*. Bauwerk. Berlin.
- [Stürmer u. Kulle - 2017] Stürmer, S. u. Kulle, C. (2017): *Untersuchung von Mauerwerksabbruch (verputztes Mauerwerk aus realen Abbruchgebäuden) und Ableitung von Kriterien für die Anwendung in Betonen mit rezyk-*

- liertes Gesteinskörnung (RC-Beton mit Typ 2 Körnung) für den ressourcenschonenden Hochbau-Abschlussbericht zum DBU-Projekt AZ: 32105.
- [Thienel - 1996] Thienel, K.-C. (1996): *Materialtechnologische Eigenschaften der Leichtbetone aus Blähton*. Tagungsband zur Veranstaltung TFB Seminar "Leichtbetone im konstruktiven Ingenieurbau"; Wildeggen (CH) Januar.
- [Thienel - 2011] Thienel, K.-C. (2011): *Besonderheiten bei Leichtbeton im DIN FB 100*. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hg.) 2011 – Heft 526 "Erläuterungen zu den Normen DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN 1045-3, DIN 1045-4 und DIN EN 12620". Beuth Verlag, Berlin.
- [Thienel - 2018] Thienel, K.-C. (2018): *Leichtbeton- Skript zur Vorlesung Werkstoffe des Bauwesens im Frühjahrstrimester 2018*. Vorlesungsskript. Universität der Bundeswehr - Institut für Werkstoffe des Bauwesens - München.
- [Schmidt-Döhl, Frank - 1997] Thienel, K.-C. (1997): *Materialtechnologische Eigenschaften der Leichtbetone aus Blähton*. In: Schmidt-Döhl, F. (Hrsg.): Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy. Baustoffe in Praxis, Lehre und Forschung. IBMB. Braunschweig. S. 203–210.
- [Ungricht - 2004] Ungricht, H. (2004): *Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton - Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung*. ETH Zurich.
- [VDZ - 2002] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2002): *Zement-Taschenbuch 2002*. Verlag Bau+Technik GmbH.
- [VDZ - 2014] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2014): *Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton- Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Zementen für bauaufsichtliche Zulassungsprüfungen*. Information Betontechnik (April).
- [Walz - 1958] Walz, K. (1958): *Anleitung für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften*. Beton- und Stahlbetonbau 53 (6). S. 163–169.
- [Walz - 1970] Walz, K. (1970): *Beziehung zwischen Wasserzementwert, Normfestigkeit des Zements (DIN 1164, Juni 1970) und Betondruckfestigkeit- Beton*

- 20 (1970) 11, S.499-503. beton 20 (1970) (11). S. 499–503.
- [Walz - 1972] Walz, K. (1972): *Herstellung von Beton nach DIN 1045- Betontechnologische Arbeitsunterlagen*. Beton-Verl. Düsseldorf.
- [Walz - 1977] Walz, K. (1977): *Prüfung der Zusammensetzung des Frischbetons (Frischbetonanalyse)*. Betontechnische Berichte Forschungsinstitut der Zementindustrie. S. 105-147.
- [Wassing - 2002] Wassing, W. (2002): *Einfluss von Feinstoffen aus Betonbruch auf den Hydratationsfortschritt*. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hg.) 2002 – Heft 514. Beuth Verlag, Berlin.
- [Weber u. Hafkesbrink - 2018] Weber, J. u. Hafkesbrink, V. (2018): *Bauwerksabdichtung in der Altbausanierung- Verfahren und juristische Betrachtungsweise*. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [Weber u. Wesche - 1978] Weber, J. W. u. Wesche, K. (1978): *Entwicklung eines Verfahrens zur Vorausbestimmung der Druckfestigkeit von Normal- und Leichtbetonen in Abhängigkeit von den Matrix- und Zuschlageigenschaften unter Anwendung mathematisch-statistischer Verfahren*. In: Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Fachgruppe Bau / Steine/Erden. VS Verlag für Sozialwissenschaften. Wiesbaden, s.l.
- [Wesche - 1981] Wesche, K. (1981): *Baustoffe für tragende Bauteile*. Bauverl. Wiesbaden.
- [Wesche u. Schulz - 1982/83] Wesche, K. u. Schulz, R.-R. (1982/83): *Beton aus aufbereitetem Altbeton- Technologie und Eigenschaften*. Betontechnische Berichte Forschungsinstitut der Zementindustrie. S. 17–31.
- [Wesche u. Vom Berg - 1973] Wesche, K. u. Vom Berg, W. /Hrsg. (1973): *Betontechnische Berichte 1973- Rheologische Eigenschaften von Zementleim und Frischbeton*. Beton Verlag GmbH.
- [Wies u. Manns - 2002] Wies, S. u. Manns, W. (2002): *Frostwiderstand von rezykliertem Zuschlag aus Altbeton und mineralischen Baustoffgemischen (Bauschutt)*. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hg.) 2002 – Heft 514. Beuth Verlag, Berlin.

[Wischers - 1967]

Wischers, G. (1967): *Aufnahme von Druckkräften in Schwerbeton und Leichtbeton*. Betontechnische Berichte Forschungsinstitut der Zementindustrie. S. 53–62.

8 Liste der verwendeten Technischen Regelwerke

[DIN 1045-2]	DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
[DIN 1048-1]	DIN 1048-1:1972-01 Prüfverfahren für Beton - Frischbeton, Festbeton gesondert hergestellter Probekörper
[DIN 4226-2]	DIN 4226-2:2002-02 Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel - Teil 2: Leichte Gesteinskörnungen (Leichtzuschläge)
[DIN 4226-101]	DIN 4226-101:2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen
[DIN 4226-102]	DIN 4226-102:2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 102: Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle
[DIN 18555-2]	DIN 18555-2:1982-09 Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Frischmörtel mit dichten Zuschlägen; Bestimmung der Konsistenz, der Rohdichte und des Luftgehalts
[DIN EN 196-1]	DIN EN 196-1:2016-11 Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
[DIN EN 1097-3]	DIN EN 1097-3:1998-06 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt
[DIN EN 1097-6]	DIN EN 1097-6:2013-09 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme
[DIN EN 206]	DIN EN 206:2017-01 Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
[DIN EN 206-1]	DIN EN 206-1:2001-07 Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
[DIN EN 1015-3]	DIN EN 1015-3:2007-05 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch)

[DIN EN 1992-1-1]	DIN EN 1992-1-1:2011-01 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
[DIN EN 12350-4]	DIN EN 12350-4:2009-08 Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß
[DIN EN 12350-5]	DIN EN 12350-5:2009-08 Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß
[DIN EN 12350-6]	DIN EN 12350-6:2011-03 Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohichte
[DIN EN 12350-7]	DIN EN 12350-7:2009-08 Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren
[DIN EN 12390-3]	DIN EN 12390-3:2009-07 Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern
[DIN EN 12390-4]	DIN EN 12390-4:2000-12 Prüfung von Festbeton - Teil 4: Bestimmung der Druckfestigkeit; Anforderungen an Prüfmaschinen
[DIN EN 12390-13]	DIN EN 12390-13:2014-06 Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)
[DIN EN 12390-6]	DIN EN 12390-6:2010-09 Prüfung von Festbeton - Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern
[DIN EN 12620]	DIN EN 12620:2008-07 Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008
[DIN EN 13055]	DIN EN 13055:2016-11 Leichte Gesteinskörnungen
[DIN EN 13395-1]	DIN EN 13395-1:2002-09 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren; Bestimmung der Verarbeitbarkeit - Teil 1: Prüfung des Fließverhaltens von thixotropem Mörtel
[Rili-BREZ]	Rili-BREZ:2010-09 Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ (2010-09)
[DBV-Merkblatt Frischbeton]	DBV-Merkblatt Frischbetonprüfungen:2014-01 Merkblatt - Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton

[Zement-Merkblatt Leichtbeton]	Zement-Merkblatt B 13 Betontechnik:2014-06 Leichtbeton
[SIA 262/1]	SN 505262/1 SIA 262/1:2013-08 Betonbau - Er- gänzende Festlegungen
[NEN 5960]	NEN 5960:2006-07 Concrete - Determination of water-cement/ water-binder ratio of fresh con- crete
[ONR 23303]	ONR 23303:2010-09 Prüfverfahren Beton (PVB) - Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe

9 Lebenslauf der Verfasserin

Persönliche Daten	
Name	Julia Constanze Scheidt
Staatsangehörigkeit	deutsch
Beruflicher Werdegang	
08/2014 – 04/2019	Wissenschaftliche Mitarbeiterin Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen, Technische Universität Kaiserslautern
seit 05/2019	Referentin Anwendungstechnik Dyckerhoff GmbH
Ausbildung	
2008 - 2014	Studium Bauingenieurwesen Technische Universität Kaiserslautern Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachrichtung: Kon- struktiver Ingenieurbau
03/2008	Abitur

A. Anhang A – Zu Kapitel 2
A.1 Regelwerksanforderungen

Tabelle A-1: Regelanforderungen für rezyklierte Gesteinskörnungen nach [DIN EN 12620] nach [Rili-BREZ], Tabelle 2

Eigenschaft	[DIN EN 12620]	Typ 1	Typ 2
Kornzusammensetzung	4.3		
Grobe Gesteinskörnungen mit $D/d \leq 2$ oder $D \leq 11,2$	4.3.2	G _C 85/20	G _C 80/20
Korngemische	4.3.5	G _A 90	G _A 85
Kornform	4.4	Fl ₅₀ oder Sl ₅₅	
Muschelschalengehalt für aus dem Meer gewonnene grobe Gesteinskörnung	4.5	SC _{NR}	
Feinanteile			
Grobe Gesteinskörnung	4.6	f ₄	
Kornroh-dichte	5.5	≥ 2.000 kg/m ³	
Schwankungsbreite bezogen auf den vom Hersteller deklarierten Mittelwert der Kornroh-dichte	5.5	± 150 kg/m ³	
Widerstand gegen Zertrümmerung	5.2	LA _{NR} oder SZ _{NR}	
Widerstand gegen Verschleiß von groben Gesteinskörnungen	5.3	M _{DE} NR	
Widerstand gegen Polieren	5.4.1	PSV _{NR}	
Widerstand gegen Oberflächen-abrieb	5.4.2	AAV _{NR}	
Widerstand gegen Abrieb durch Spike-Reifen	5.4.3	A _{NNR}	
Frost-Tau-Widerstand	5.7.1 oder RL Anhang A	F ₄	
Magnesiumsulfat-Widerstandsfähigkeit	5.7.1	MS _{NR}	
Säurelösliches Chlorid	6.2	≤ 0,04 % Massenanteil	
Säurelösliches Sulfat für alle Gesteinskörnungen außer Hochofenstüchschlacken	6.3.1	AS _{0,8}	
Gesamtschwefel für alle Gesteinskörnungen außer Hochofenstüchschlacken	6.3.2	≤ 1 % Massenanteil	

Tabelle A-2: Fortsetzung Regelanforderungen für rezyklierte Gesteinskörnungen nach [DIN EN 12620] nach [Rili-BREZ], Tabelle 2

Eigenschaft	[DIN EN 12620]	Typ 1	Typ 2
Leichtgewichtige organische Verunreinigungen von grober Gesteinskörnung, natürlich zusammengesetzter Gesteinskörnung 0/8 und von Korngemischen	6.4.1 und G.4	≤ 0,1 % Massenanteil	

Tabelle A-3: Andere Anforderungen für GK nach [DIN EN 12620], nach [Rili-BREZ], Tabelle 3

Eigenschaft	[DIN EN 12620]	Anforderung
Frost-Tau-Widerstand ^{a)}	5.7.1	F ₂ für XF3
Chloride ^{b)}	6.2	Chloridgehalt ≤ 0,15 % Massenanteil für Beton ohne Betonstahlbewehrung oder anderes eingebettetes Metall

^{a)} Alternativ kann der Frost-Tau-Widerstand rezyklierter Gesteinskörnungen auch mittels Betonprüfung nach Anhang A nachgewiesen werden.
^{b)} Andernfalls ist der Chloridgehalt des Betons nach [DIN 1045-2], Kapitel 5.2.7 nachzuweisen.

Tabelle A-4: Vergleich der Regelwerksanforderungen von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung

Anforderungen	RC-GK	Natürliche GK
Geometrische Anforderungen: - Korngruppen - Kornzusammensetzung - Kornform - Muschelschalengehalt - Feinanteile	- keine Anf. - nur > 2mm grobe GK: G _c 85/20 (Typ1) bzw. G _c 80/20 (Typ2) Korngemische: G _A 90 (Typ1) bzw. G _A 85 (Typ2) - FI50 oder SI55 - keine Anf. - grobe GK: f ₄	- allg. Anf. - auch feine GK allg. Anf. - soweit gefordert - soweit gefordert - Angabe nach Kategorie

Tabelle A-5: Fortsetzung Vergleich der Regelwerksanforderungen von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung

Anforderungen	RC-GK	Natürliche GK
Physikalische Anforderungen:		
- Widerstand gegen Zerkürnung von groben GK	- keine Anf.	- soweit gefordert
- Widerstand gegen Verschleiß von groben GK	- keine Anf.	- nach EN 1097-1
- Widerstand gegen Polieren	- keine Anf.	- soweit gefordert
- Widerstand gegen Oberflächenabrieb	- keine Anf.	- soweit gefordert
- Widerstand gegen Abrieb gegen Spike-Reifen	- keine Anf.	- soweit gefordert
- Kornrohddichte und Wasseraufnahme	- keine Anf.	- soweit gefordert
- Schüttdichte	- Kornrohddichte: $\geq 2000 \text{ kg/m}^3$ Schwankungsbreite: $\pm 150 \text{ kg/m}^3$	- soweit gefordert nach EN 1097-6
- Frost-Tau-Widerstand	Wasseraufnahme: nach EN 1097-6 oder Anhang B (RL)	
- Magnesiumsulfat-Widerstandsfähigkeit	- keine Anf.	- soweit gefordert nach EN 1097-3
- Schwinden infolge Austrocknen		- nach EN 1367-1 (je nach Umgebungsbedingungen)
- Alkali-Kieselsäure-Reaktivität	- F ₄ nach EN 1367-1 & F ₂ für XF3 oder nach Anhang A (RL)	- nach EN 1376-2 (je nach Umgebungsbedingungen)
	- keine Anf.	- nach EN 1367-4: < 0,075 % (wenn NW verlangt)
	- nach Anhang A (EN 12620)	- soweit gefordert
	- RC-GK wird als potentiell reaktive GK angesehen	

Tabelle A-6: Fortsetzung Vergleich der Regelwerksanforderungen von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung

Anforderungen	RC-GK	Natürliche GK
Chemische Anforderungen: - Säurelösliche Chloride - Säurelösliches Sulfat - Gesamtschwefel - Gehalt an wasserlöslichen Sulfaten in rezyklierten Gesteinskörnungen - Andere Bestandteile - Carbonatgehalt	- Gehalt muss nach EN 1744-5 bestimmt werden $\leq 0,04$ % Massenanteil $\leq 0,015$ % Massenanteil bei Stahlbeton - nach EN 1744-1: AS _{0,8} - ≤ 1 % Massenanteil S - nach EN 1744-1 entsprechend Tab. 22 EN 12620 - soweit gefordert - soweit gefordert	- kann nach EN 1744-5 bestimmt werden - soweit gefordert nach EN 1744-1 - soweit gefordert $\leq 1 - 2$ % (ohne und mit Hochofenstückschlacken) - keine Anf. - soweit gefordert - soweit gefordert

A.2 Gesteinskörnungseigenschaften

Tabelle A-7: Eigene Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen – Wasseraufnahme

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA _{5 min}	WA _{10 min}	WA _{20 min}	WA _{60 min}	WA _{90 min}	WA _{180 min}	WA _{24h}
-	-	[mm]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
1	natürlich	2/16	0,90	1,20	1,20	1,00	0,90	1,00	1,00
2	natürlich	2/8	0,71	0,69		0,79			1,50
3	natürlich	8/16	0,33	0,35		0,59			0,90
4	Typ 1	2/16	2,80	2,20	2,90	2,90	2,90	3,20	3,70
5	Typ 1	2/16		2,32					
6	Typ 1	2/16		2,56					
7	Typ 1	2/8	3,20	3,10		3,10			3,40
8	Typ 1	2/8	2,80	2,80		2,80			3,10
9	Typ 1	2/8	3,40	3,40					3,80
10	Typ 1	2/8	2,38	2,77		3,35			3,50
11	Typ 1	2/8	3,06	3,57		4,09			4,42
12	Typ 1	2/8		2,35	2,80				4,32
13	Typ 1	2/8		3,22			3,27		5,14
14	Typ 1	2/8		2,86			2,97		4,58
15	Typ 1	2/8		2,60			2,35		4,92

Tabelle A-8: Fortsetzung Eigene Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen - Wasseraufnahme

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA _{5 min}	WA _{10 min}	WA _{20 min}	WA _{60 min}	WA _{90 min}	WA _{180 min}	WA _{24h}
-	-	[mm]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
16	Typ 1	2/8		5,30			5,55		6,67
17	Typ 1	8/16	1,70	1,60		1,60			1,90
18	Typ 1	8/16	1,50	1,60		1,60			1,80
19	Typ 1	8/16	2,40	2,40					2,40
20	Typ 1	8/16	1,42	2,06		2,77			2,31
21	Typ 1	8/16	2,36	2,94		3,58			3,31
22	Typ 1	8/16		1,36	1,44				3,34
23	Typ 1	8/16		2,67			2,60		4,45
24	Typ 1	8/16		2,30			2,40		2,52
25	Typ 1	8/16		2,00			2,20		3,82
26	Typ 1	8/16		2,69	2,99				4,99
27	Typ 1	8/16		2,50			2,50		4,34
28	Typ 1	8/16		2,35			2,50		6,15
29	Typ 1	8/16		2,55			2,55		5,14
30	Typ 1	8/16		3,85			3,70		5,13

Tabelle A-9: Fortsetzung Eigene Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen - Wasseraufnahme

Probe	Art der GK	Korn- gruppe	WA _{5 min}	WA _{10 min}	WA _{20 min}	WA _{60 min}	WA _{90 min}	WA _{180 min}	WA _{24h}
-	-	[mm]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
31	Typ 2	2/16	3,40	3,10	3,80	4,00	3,90	4,10	6,10
32	Typ 2	2/8		5,47	5,73				8,64
33	Typ 2	2/8	4,24	4,69		5,21			5,31
34	Typ 2	2/8		4,62			5,01		7,03
35	Typ 2	2/8		4,40			4,67		6,67
36	Typ 2	2/8		4,35			4,40		7,21
37	Typ 2	8/16	4,24	4,69		5,21			5,31
38	Typ 2	8/16		3,70			3,75		5,73
39	Ziegelsplitt	2/8	17,50	17,70		17,70			20,00
40	Ziegelsplitt	2/8	18,30	18,50		18,50			21,50
41	Ziegelsplitt	2/8	11,60	11,60					14,30
42	Ziegelsplitt	2/8	9,14	10,78		10,70			12,74
43	Ziegelsplitt	8/16	15,60	15,70		15,70			18,10
44	Ziegelsplitt	8/16	16,20	16,30		16,30			18,70
45	Ziegelsplitt	8/16	9,80	9,80					9,80
46	Ziegelsplitt	8/16	10,81	10,84		10,89			12,32

Tabelle A-10: Eigene Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen - Kornrohichte auf ofentrockener Basis

Probe	Art der GK	Korn- gruppe	Trocken- rohichte	$\rho_{rd\ min}$	ρ_{rd5}	ρ_{rd10}	ρ_{rd20}	ρ_{rd60}	ρ_{rd90}	ρ_{rd180}	ρ_{rd24}
-	-	[mm]	[kg/dm ³]								
1	natürlich	2/16	2,52	2,52	2,53	2,52	2,52	2,53	2,55	2,54	2,55
2	natürlich	2/8	2,59								
3	natürlich	8/16	2,6								
4	Typ 1	2/16	2,39	2,39	2,39	2,42	2,4	2,4	2,4	2,41	2,39
5	Typ 1	2/16	2,49	2,49		2,49					
6	Typ 1	2/16	2,43	2,43		2,43					
7	Typ 1	2/8	2,39	2,39	2,39						
8	Typ 1	2/8	2,41	2,41	2,41						
9	Typ 1	2/8	2,36	2,36							2,36
10	Typ 1	2/8	2,43	2,43	2,43	2,43		2,44			2,44
11	Typ 1	2/8	2,37	2,37	2,37	2,38		2,39			2,39
12	Typ 1	2/8	2,42	2,42		2,42					
13	Typ 1	2/8	2,32	2,32		2,32					
14	Typ 1	2/8	2,35	2,35		2,35					
15	Typ 1	2/8	2,36	2,36		2,36					
16	Typ 1	2/8	2,26	2,26		2,26					

Tabelle A-11: Fortsetzung Eigene Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen - Kornrohddichte auf ofentrockener Basis

Probe	Art der GK	Korn- gruppe	Trocken- rohddichte	$\rho_{rd \text{ min}}$	ρ_{rd5}	ρ_{rd10}	ρ_{rd20}	ρ_{rd60}	ρ_{rd90}	ρ_{rd180}	ρ_{rd24}
-	-	[mm]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]
17	Typ 1	8/16	2,50	2,50	2,50						
18	Typ 1	8/16	2,34	2,34	2,34						
19	Typ 1	8/16	2,34	2,34							2,34
20	Typ 1	8/16	2,46	2,46	2,51	2,46		2,46			2,51
21	Typ 1	8/16	2,40	2,40	2,45	2,41		2,40			2,45
22	Typ 1	8/16	2,46								
23	Typ 1	8/16	2,35								
24	Typ 1	8/16	2,47								
25	Typ 1	8/16	2,41								
26	Typ 1	8/16	2,35								
27	Typ 1	8/16	2,39								
28	Typ 1	8/16	2,33								
29	Typ 1	8/16	2,33								
30	Typ 1	8/16	2,31								
31	Typ 2	2/16	2,25	2,25	2,31	2,34	2,31	2,31	2,31	2,32	2,25
32	Typ 2	2/8	2,17	2,17	2,17						

Tabelle A-12: Fortsetzung Eigene Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen - Kornrohddichte auf ofentrockener Basis

Probe	Art der GK	Korn- gruppe	Trocken- rohddichte	$\rho_{rd\ min}$	ρ_{rd5}	ρ_{rd10}	ρ_{rd20}	ρ_{rd60}	ρ_{rd90}	ρ_{rd180}	ρ_{rd24}
-	-	[mm]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]
33	Typ 2	2/8	2,25	2,25	2,25	2,27		2,28			2,29
34	Typ 2	2/8	2,23	2,23	2,23						
35	Typ 2	2/8	2,25	2,25	2,25						
36	Typ 2	2/8	2,20	2,20	2,2						
37	Typ 2	8/16	2,17	2,17	2,17						
38	Typ 2	8/16	2,28	2,28	2,32	2,31		2,28			2,32
39	Ziegelsplitt	2/8	1,66								
40	Ziegelsplitt	2/8	1,62	1,62	1,62						
41	Ziegelsplitt	2/8	1,85	1,85							1,85
42	Ziegelsplitt	2/8	1,82	1,82	1,82	1,88		1,92			1,93
43	Ziegelsplitt	8/16	1,68								
44	Ziegelsplitt	8/16	1,65	1,65	1,65						
45	Ziegelsplitt	8/16	1,89	1,89							1,89
46	Ziegelsplitt	8/16	1,86	1,86	1,86	1,96		1,87			1,89

Tabelle A-13: Eigene Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen - Kornrohichte auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis

Probe	Art der GK	Korngruppe	$\rho_{ssd\ max}$	ρ_{ssd5}	ρ_{ssd10}	ρ_{ssd20}	ρ_{ssd60}	ρ_{ssd90}	ρ_{ssd180}	ρ_{ssd24}
-	-	[mm]	[kg/dm ³]							
1	natürlich	2/16	2,58	2,55	2,55	2,55	2,55	2,58	2,57	2,57
2	natürlich	2/8	2,61							2,61
3	natürlich	8/16	2,64							2,64
4	Typ 1	2/16	2,48	2,46	2,47	2,47	2,48	2,47	2,48	2,48
5	Typ 1	2/16	2,55		2,55					
6	Typ 1	2/16	2,49		2,49					
7	Typ 1	2/8	2,49							2,49
8	Typ 1	2/8	2,49							2,49
9	Typ 1	2/8	2,46							2,46
10	Typ 1	2/8	2,53	2,49	2,50		2,53			2,53
11	Typ 1	2/8	2,49	2,45	2,46		2,49			2,49
12	Typ 1	2/8	2,53							2,53
13	Typ 1	2/8	2,44							2,44
14	Typ 1	2/8	2,46							2,46
15	Typ 1	2/8	2,48							2,48
16	Typ 1	2/8	2,41							2,41

Tabelle A-14: Fortsetzung Eigene Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen - Kornrohichte auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis

Probe	Art der GK	Korngruppe	$\rho_{\text{ssd max}}$	ρ_{ssd5}	ρ_{ssd10}	ρ_{ssd20}	ρ_{ssd60}	ρ_{ssd90}	ρ_{ssd180}	ρ_{ssd24}
-	-	[mm]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]
17	Typ 1	8/16	2,55							2,55
18	Typ 1	8/16	2,49							2,49
19	Typ 1	8/16	2,49							2,49
20	Typ 1	8/16	2,56	2,54	2,50		2,52			2,56
21	Typ 1	8/16	2,52	2,49	2,46		2,48			2,52
22	Typ 1	8/16	2,54							2,54
23	Typ 1	8/16	2,45							2,45
24	Typ 1	8/16	2,53							2,53
25	Typ 1	8/16	2,50							2,5
26	Typ 1	8/16	2,47							2,47
27	Typ 1	8/16	2,49							2,49
28	Typ 1	8/16	2,48							2,48
29	Typ 1	8/16	2,45							2,45
30	Typ 1	8/16	2,41							2,41
31	Typ 2	2/16	2,42	2,39	2,41	2,4	2,41	2,4	2,42	
32	Typ 2	2/8	2,35							2,35

Tabelle A-15: Fortsetzung Eigene Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen - Kornrohichte auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis

Probe	Art der GK	Korngruppe	$\rho_{\text{ssd max}}$	ρ_{ssd5}	ρ_{ssd10}	ρ_{ssd20}	ρ_{ssd60}	ρ_{ssd90}	ρ_{ssd180}	ρ_{ssd24}
-	-	[mm]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]
33	Typ 2	2/8	2,42	2,36	2,38		2,41			2,42
34	Typ 2	2/8	2,39							2,39
35	Typ 2	2/8	2,40							2,4
36	Typ 2	2/8	2,36							2,36
37	Typ 2	8/16	2,43							2,43
38	Typ 2	8/16	2,40	2,40	2,39		2,39			2,35
39	Ziegelsplitt	2/8	2,04							2,04
40	Ziegelsplitt	2/8	2,00							2,00
41	Ziegelsplitt	2/8	2,16							2,16
42	Ziegelsplitt	2/8	2,17	2,05	2,09		2,12			2,17
43	Ziegelsplitt	8/16	2,00							2,00
44	Ziegelsplitt	8/16	1,98							1,98
45	Ziegelsplitt	8/16	2,14							2,14
46	Ziegelsplitt	8/16	2,12	2,06	2,12		2,07			

Tabelle A-16: Eigene Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen – Schüttdichte und Druckwert

Probe	Art der GK	Korngruppe	Schüttdichte	Druckwert
-	-	[mm]	[kg/dm ³]	[kN]
1	natürlich	2/16		210,0
2	natürlich	2/8		117,0
3	natürlich	8/16		131,0
4	Typ 1	2/16		77,6
5	Typ 1	2/16		
6	Typ 1	2/16		
7	Typ 1	2/8		
8	Typ 1	2/8		
9	Typ 1	2/8		
10	Typ 1	2/8	1,16	57,0
11	Typ 1	2/8		
12	Typ 1	2/8	1,19	82,8
13	Typ 1	2/8	1,21	114,8
14	Typ 1	2/8	1,18	97,2
15	Typ 1	2/8	1,17	124,0
16	Typ 1	2/8	1,21	85,0
17	Typ 1	8/16		
18	Typ 1	8/16		
19	Typ 1	8/16		
20	Typ 1	8/16	1,25	66,0
21	Typ 1	8/16		
22	Typ 1	8/16	1,20	71,2
23	Typ 1	8/16	1,24	111,3
24	Typ 1	8/16	1,23	110,6
25	Typ 1	8/16	1,20	91,2
26	Typ 1	8/16	1,14	73,1
27	Typ 1	8/16	1,21	92,4
28	Typ 1	8/16	1,21	102,3
29	Typ 1	8/16	1,18	96,9
30	Typ 1	8/16	1,22	68,4
31	Typ 2	2/16		61,0
32	Typ 2	2/8		38,0

Tabelle A-17: Fortsetzung Eigene Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen – Schüttdichte und Druckwert

Probe	Art der GK	Korngruppe	Schüttdichte	Druckwert
-	-	[mm]	[kg/dm ³]	[kN]
33	Typ 2	2/8		
34	Typ 2	2/8	1,16	102,2
35	Typ 2	2/8	1,13	100,0
36	Typ 2	2/8	1,12	113,1
37	Typ 2	8/16		
38	Typ 2	8/16	1,18	70,5
39	Ziegelsplitt	2/8		
40	Ziegelsplitt	2/8		
41	Ziegelsplitt	2/8		
42	Ziegelsplitt	2/8	0,91	25,0
43	Ziegelsplitt	8/16		
44	Ziegelsplitt	8/16		
45	Ziegelsplitt	8/16		
46	Ziegelsplitt	8/16	0,98	26,0

Tabelle A-18: Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen durch das Materialprüfamt der Technischen Universität Kaiserslautern [MPA Kaiserslautern - 2018]
 - Wasseraufnahme und Kornrohichte auf ofentrockener bzw. wassergesättigter und oberflächentrockener Basis

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA _{24h}	Trockenrohichte	$\rho_{ssd\ max}$
-	-	[mm]	[M.-%]	[kg/dm ³]	[k/dm ³]
1	natürlich	2/8	1,74	2,49	2,54
2	natürlich	2/8	2,00	2,46	2,52
3	natürlich	2/8	1,14	2,58	2,61
4	natürlich	2/8	0,98	2,57	2,60
5	natürlich	8/11	0,83	2,60	2,62
6	natürlich	8/11	1,05	2,60	2,63
7	natürlich	8/11	1,32	2,55	2,59
8	natürlich	8/11	2,05	2,53	2,58
9	natürlich	8/11	1,72	2,54	2,58
10	natürlich	8/11	0,60	2,61	2,63
11	natürlich	8/11	1,26	2,55	2,58
12	natürlich	8/11	2,04	2,46	2,51
13	natürlich	8/11	1,28	2,53	2,56
14	natürlich	8/11	1,77	2,50	2,55
15	natürlich	8/11	1,14	2,54	2,57
16	natürlich	8/11	1,70	2,48	2,53

Anhang A zu Kapitel 2

Tabelle A-19: Fortsetzung Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen durch das Materialprüfamt der Technischen Universität Kaiserslautern [MPA Kaiserslautern - 2018] - Wasseraufnahme und Kornrohddichte auf ofentrockener bzw. wassergesättigter und oberflächentrockener Basis

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA_{24h}	Trockenrohddichte	$\rho_{ssd\ max}$
-	-	[mm]	[M.-%]	[kg/dm ³]	[k/dm ³]
17	natürlich	8/11	1,72	2,48	2,53
18	natürlich	8/11	1,40	2,52	2,55
19	natürlich	8/11	1,13	2,55	2,58
20	natürlich	8/11	1,33	2,52	2,55
21	natürlich	8/16	0,90	2,59	2,61
22	natürlich	8/16	0,74	2,61	2,64
23	natürlich	8/16	1,85	2,47	2,52
24	natürlich	8/16	0,83	2,61	2,63

Tabelle A-20: Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen durch den Baustoffüberwachungsverein Hessen – Rheinland-Pfalz e.V. [BÜV Hessen-RLP - 2018]-Wasseraufnahme und Kornrohichte auf ofentrockener bzw. wassergesättigter und oberflächentrockener Basis

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA_{24h}	ρ_{ssd24h}
-	-	[mm]	[M.-%]	[kg/dm ³]
1	natürlich	2/8	1,80	2,57
2	natürlich	2/8	0,72	2,59
3	natürlich	2/8	1,48	2,58
4	natürlich	2/8	1,50	2,58
5	natürlich	2/8	0,60	2,59
6	natürlich	2/8	1,43	2,58
7	natürlich	2/8	2,00	2,55
8	natürlich	2/8	1,08	2,81
9	natürlich	2/8	1,66	2,59
10	natürlich	2/8	1,99	2,59
11	natürlich	2/8	1,42	2,68
12	natürlich	2/8	0,52	2,62
13	natürlich	2/8	1,04	2,58
14	natürlich	2/8	2,40	2,63
15	natürlich	8/16	0,91	2,58
16	natürlich	8/16	0,54	2,60
17	natürlich	8/16	1,33	2,58
18	natürlich	8/16	1,34	2,59
19	natürlich	8/16	0,50	2,60
20	natürlich	8/16	1,25	2,60
21	natürlich	8/16	1,66	2,56
22	natürlich	8/16	0,58	2,74
23	natürlich	8/16	1,04	2,59
24	natürlich	8/16	1,59	2,57
25	natürlich	8/16	1,08	2,60
26	natürlich	8/16	1,06	2,61
27	natürlich	8/16	0,58	2,61
28	natürlich	8/16	1,53	2,58
29	natürlich	8/16	0,85	2,61

Tabelle A-21: Fortsetzung Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen durch den Baustoffüberwachtungsverein Hessen – Rheinland-Pfalz e.V. [BÜV Hessen-RLP - 2018] - Wasseraufnahme und Kornrohdichte auf ofentrockener bzw. wassergesättigter und oberflächentrockener Basis

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA_{24h}	ρ_{ssd24h}
-	-	[mm]	[M.-%]	[kg/dm ³]
30	natürlich	8/16	1,37	2,59
31	natürlich	8/16	1,70	2,59
32	natürlich	8/16	1,13	2,62
33	natürlich	8/16	0,90	2,67
34	natürlich	8/16	0,73	2,59
35	natürlich	8/16	1,44	2,59
36	natürlich	8/16	0,99	2,61
37	natürlich	8/16	0,97	2,59
38	natürlich	8/16	1,48	2,58
39	natürlich	8/16	0,50	2,61
40	natürlich	8/16	1,73	2,55
41	natürlich	8/16	0,78	2,54
42	natürlich	8/16	2,12	2,52
43	natürlich	8/16	0,66	2,58
44	natürlich	8/16	1,01	2,64
45	natürlich	8/16	1,47	2,54
46	natürlich	8/16	2,45	2,60
47	natürlich	8/16	1,53	2,60
48	natürlich	8/16	0,99	2,59
49	natürlich	8/16	2,19	2,55
51	natürlich	8/11	1,23	2,68
52	natürlich	8/11	0,93	2,68
53	natürlich	8/11	0,64	2,62
54	natürlich	8/11	1,13	2,64
55	natürlich	8/11	0,98	2,66
56	natürlich	8/11	0,66	2,80
57	natürlich	8/11	1,11	2,76
58	natürlich	8/11	1,19	2,75
59	natürlich	8/11	1,38	2,73

Tabelle A-22: Fortsetzung Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen durch den Baustoffüberwachtungsverein Hessen – Rheinland-Pfalz e.V. [BÜV Hessen-RLP - 2018] - Wasseraufnahme und Kornrohichte auf ofentrockener bzw. wassergesättigter und oberflächentrockener Basis

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA_{24h}	ρ_{ssd24h}
-	-	[mm]	[M.-%]	[kg/dm ³]
60	natürlich	8/11	0,79	2,69
61	natürlich	8/11	0,57	2,63
62	natürlich	8/11	1,23	3,03
63	natürlich	8/11	1,29	2,62
64	natürlich	8/11	1,11	2,62
65	natürlich	8/11	1,29	2,60
66	natürlich	8/16	0,53	2,66
67	natürlich	8/16	0,62	2,64
68	natürlich	8/16	1,63	2,55
69	natürlich	8/16	0,79	2,96
70	natürlich	8/16	0,83	2,69
71	natürlich	8/16	1,16	2,77

Tabelle A-23: Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen durch die Basalt AG [Platzek - 2018] – Streuung der Kornrohddichte

Art der GK	Werk Nr.	Differenz Rohddichte max-min
-	-	[kg/dm³]
Splitt	1	0,01
Splitt	2	0,02
Splitt	3	0,02
Splitt	4	0,03
Splitt	5	0,03
Splitt	6	0,04
Splitt	7	0,04
Splitt	8	0,04
Splitt	9	0,04
Splitt	10	0,04
Splitt	11	0,04
Splitt	12	0,04
Splitt	13	0,04
Splitt	14	0,04
Splitt	15	0,05
Splitt	16	0,05
Splitt	17	0,05
Splitt	18	0,05
Splitt	19	0,05
Splitt	20	0,05
Splitt	21	0,05
Splitt	22	0,05
Splitt	23	0,05
Splitt	24	0,05
Splitt	25	0,06
Splitt	26	0,06
Splitt	27	0,06
Splitt	28	0,06
Splitt	29	0,06
Splitt	30	0,06
Splitt	31	0,06
Splitt	32	0,07

Tabelle A-24 Fortsetzung Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen durch die Basalt AG
[Platzek - 2018] – Streuung der Kornrohddichte

Art der GK	Werk Nr.	Differenz Rohddichte max-min
-	-	[kg/dm³]
Splitt	33	0,07
Splitt	34	0,07
Splitt	35	0,08
Splitt	36	0,08
Splitt	37	0,08
Splitt	38	0,08
Splitt	39	0,08
Splitt	40	0,08
Splitt	41	0,08
Splitt	42	0,09
Splitt	43	0,09
Splitt	44	0,09
Splitt	45	0,10
Splitt	46	0,10
Splitt	47	0,10
Splitt	48	0,11
Splitt	49	0,11
Splitt	50	0,11
Splitt	51	0,12
Splitt	52	0,14
Splitt	53	0,15
Splitt	54	0,17
Splitt	55	0,21
Mittelwert		0,046
Maximum		0,07
Minimum		0,01

Tabelle A-25: Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen von Bonzel [Bonzel u. Dahms - 1978] – Wasseraufnahme und Kornrohichte

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA _{24h}	Trockenrohichte
-	-	[mm]	[M.-%]	[kg/dm ³]
1	natürlich	2/16	1,20	2,59
2	natürlich	2/16	1,20	2,60
3	natürlich	2/16	1,00	2,64
4	natürlich	2/16	1,40	2,57
5	natürlich	2/16	1,80	2,56
6	natürlich	2/16	0,80	2,70
7	natürlich	2/16	0,90	2,67
8	natürlich	2/16	1,00	2,90

Tabelle A-26: Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen von Etxberria [Etxberria et al. - 2007] – Wasseraufnahme und Rohdichte

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA _{24h}	Trockenrohichte
-	-	[mm]	[M.-%]	[g/cm ³]
1	natürlich	0/16	0,89	2,67
2	Typ 1		4,45	2,43

Tabelle A-27: Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen von Eckert [Eckert u. Oliveira - 2017] – Wasseraufnahme und Rohdichte

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA _{5 min}	WA _{10 min}	WA _{24h}	Trockenrohichte	$\rho_{\text{ssd}24}$
-	-	[mm]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]
1	Typ 1	4/20	4,72	4,90	5,90	2,29	2,42
2	Typ 2	4/20	6,63	6,70	7,80	2,16	2,33
3	Typ 2	6,3/25	6,72	6,97	8,40	2,10	2,27

Tabelle A-28: Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen von Juan [Juan u. Gutiérrez - 2009] – Wasseraufnahme und Rohdichte

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA _{24h}	Trockenrohichte	$\rho_{\text{SSD max}}$
-	-	[mm]	[M.-%]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]
1	Typ 1	4/8	7,00		2,37
2	Typ 1	4/8	7,50	2,24	2,40
3	Typ 1	4/8	5,10	2,30	2,42
4	Typ 1	4/8	7,10	2,21	2,37
5	Typ 1	4/8	8,40	2,14	2,32
6	Typ 1	4/8	7,50	2,18	2,34
7	Typ 1	4/8	8,30	2,16	2,33
8	Typ 1	4/8	11,00	2,04	2,26
9	Typ 1	4/8	9,90	2,05	2,24
10	Typ 1	4/8	11,50	2,01	2,25
11	Typ 1	4/8	10,80	2,03	2,33
12	Typ 1	4/8	7,90	2,16	2,32
13	Typ 1	4/8	8,30	2,14	2,31
14	Typ 1	4/8	8,70	2,14	2,30
15	Typ 1	8/16	4,60		2,43
16	Typ 1	8/16	5,10	2,33	2,45

Tabelle A-29: Fortsetzung Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen von Juan [Juan u. Gutiérrez - 2009] – Wasseraufnahme und Rohdichte

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA _{24h}	Trockenrohichte	$\rho_{\text{SSD max}}$
-	-	[mm]	[M.-%]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]
17	Typ 1	8/16	5,20	2,29	2,41
18	Typ 1	8/16	4,20	2,37	2,47
19	Typ 1	8/16	5,80	2,27	2,40
20	Typ 1	8/16	5,30	2,29	2,42
21	Typ 1	8/16	4,90	2,34	2,45
22	Typ 1	8/16	5,80	2,28	2,41
23	Typ 1	8/16	6,30	2,22	2,36
24	Typ 1	8/16	8,80	2,14	2,33
25	Typ 1	8/16	6,90	2,22	2,37
26	Typ 1	8/16	5,30	2,29	2,41
27	Typ 1	8/16	5,90	2,27	2,40
28	Typ 1	8/16	5,30	2,26	2,39
29	Typ 1	8/16	7,50	2,18	2,35

Tabelle A-30: Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen von Müller [Müller - 2001] – Wasseraufnahme, Rohdichte und Druckfestigkeit

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA _{10 min}	WA _{24h}	Trockenrohichte	Schüttdichte	Druckwert
-	-	[mm]	[M.-%]	[M.-%]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kN]
1	Typ 1	2/8	3,17	3,56	2,34	1,230	57,70
2	Typ 1	8/16	2,99	3,35	2,38	1,231	38,70
3	Typ 1	16/32	1,14	1,52	2,43	1,261	38,10
4	Typ 2	2/8	5,28	5,38	2,26	1,210	45,50
5	Typ 2	8/16	4,57	5,20	2,27	1,200	31,00
6	Typ 2	16/32	4,20	5,10	2,27	1,060	19,80
7	Typ 2	2/8	5,23	5,94	2,24	1,140	41,50
8	Typ 2	8/16	5,65	5,79	2,22	0,960	26,60
9	Typ 2	16/32	5,00	6,10	2,25	1,100	13,70
10	50:50	2/8	6,39	7,89	2,12	1,110	38,90
11	50:50	8/16	6,43	7,78	2,12	1,090	26,60
12	50:50	16/32	6,20	7,90	2,06	1,070	15,80
13	50:50	2/8	10,44	5,38	1,99	0,990	31,70
14	50:50	8/16	7,11	5,20	2,08	0,960	22,00
15	50:50	16/32	10,30	5,10	1,95	0,900	10,10
16	Ziegelsplitt	2/8	9,78	12,29	1,91	0,930	30,00

Tabelle A-31: Fortsetzung Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen von Müller [Müller - 2001] – Wasseraufnahme, Rohdichte und Druckfestigkeit

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA_{10 min}	WA_{24h}	Trockenrohichte	Schüttdichte	Druckwert
-	-	[mm]	[M.-%]	[M.-%]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kN]
17	Ziegelsplitt	8/16	9,31	12,17	1,89	0,920	19,50
18	Ziegelsplitt	16/32	8,89	11,00	1,87	0,960	16,70
19	Ziegelsplitt	2/8	20,88	25,33	1,65	0,770	28,70
20	Ziegelsplitt	8/16	22,56	24,95	1,60	0,750	18,20
21	Ziegelsplitt	16/32	20,60	24,20	1,56	0,680	7,34
22	Kalksandstein	2/8	10,00	10,91	1,97	0,970	20,00
23	Kalksandstein	8/16	12,95	13,57	1,86	0,910	12,30
24	Kalksandstein	16/32	11,40	11,70	1,84	0,940	13,00

Tabelle A-32: Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen von Rühl [Rühl - 2001] – Wasseraufnahme und Rohdichte

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA _{10 min}	WA _{24h}	Trockenrohichte
-	-	[mm]	[M.-%]	[M.-%]	[kg/dm ³]
1	natürlich	0/4	0,00	1,10	2,56
2	natürlich	4/8	1,45	2,20	2,50
3	natürlich	8/16	0,89	1,20	2,56
4	Typ 1	4/8	3,75	4,16	2,34
5	Typ 1	8/16	3,84	4,37	2,36
6	Ziegelsplitt	4/8	11,00	15,51	1,86
7	Ziegelsplitt	8/16	10,87	14,44	1,84

Tabelle A-33: Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen von Schubert [Schubert u. Hoffmann - 2011] – Wasseraufnahme und Rohdichte

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA _{24h}	Trockenrohichte
-	-	[mm]	[M.-%]	[kg/dm ³]
1	Typ 1	0/25	2,10	2,55
2	Typ 1	0/25	6,50	2,44
3	Typ 2	0/25	7,30	2,34

Tabelle A-34: Ergebnisse der Gesteinskörnungsanalysen von Stürmer [Stürmer u. Kulle - 2017] – Wasseraufnahme und Rohdichte

Probe	Art der GK	Korngruppe	WA_{10 min}	Trockenrohichte
-	-	[mm]	[M.-%]	[kg/dm ³]
1	Typ 2	2/16	9,00	
2	Typ 2	2/8	4,00	
3	Typ 2	8/16	4,00	
4	Typ 2	2/16	5,50	2,32

B. Anhang B – Zu Kapitel 3
B.1 Versuchsergebnisse aus Charge 1

Tabelle B-1: Zugabe- und Zusatzwassermengen

Probenbezeichnung		Zugabe- wasser	Zusatzwasser		Gesamt- wasser
-	-	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[% des Zuga- bewassers]	[kg/m ³ Be- ton]
natürliche Referenz	Kies	182,00	0,00	0,0	182,0
	Splitt	182,00	0,00	0,0	182,0
rezyklierte Gesteins- körnung Typ 1	Typ 1 (+10%)	182,00	17,83	9,8	199,8
	Typ 1 (+12%)	182,00	22,00	12,1	204,0
	Typ 1 (+14%)	182,00	26,17	14,4	208,2
	Typ 1 (+17%)	182,00	30,33	16,7	212,3
rezyklierte Gesteins- körnung Typ 2	Typ 2 (+16%)	182,00	28,67	15,8	210,7
	Typ 2 (+18%)	182,00	32,83	18,0	214,8
	Typ 2 (+20%)	182,00	37,00	20,3	219,0
	Typ 2 (+23%)	182,00	41,17	22,6	223,2
	Typ 2 (+25%)	182,00	45,33	24,9	227,3

Tabelle B-2: Mischungszusammensetzungen

Probenbezeichnung		Zement CEM II/B-S 42,5 N	Gesteinskörnung					
			0/2 mm		2/8 mm		8/16 mm	
-	-	[kg/m ³ Beton]	[kg/m ³ Beton]	[Vol.-% der Gesamt GK]	[kg/m ³ Beton]	[Vol.-% der Gesamt GK]	[kg/m ³ Beton]	[Vol.-% der Gesamt GK]
natürliche Referenz	Kies	349,97	743,85	41,0	648,2	36,00	415,7	23,00
	Splitt	350,00	744,89	41,0	651,6	36,00	416,3	23,00
rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1	Typ 1 (+10%)	350,00	744,68	41,0	606,5	36,00	392,2	23,00
	Typ 1 (+12%)	350,00	744,68	41,0	606,5	36,00	392,2	23,00
	Typ 1 (+14%)	350,00	744,68	41,0	606,5	36,00	392,2	23,00
	Typ 1 (+17%)	350,00	744,68	41,0	606,5	36,00	392,2	23,00
rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2	Typ 2 (+16%)	350,00	744,68	41,0	560,78	36,0	363,54	23,0
	Typ 2 (+18%)	350,00	744,68	41,0	560,78	36,0	363,54	23,0
	Typ 2 (+20%)	350,00	744,68	41,0	560,78	36,0	363,54	23,0
	Typ 2 (+23%)	350,00	744,68	41,0	560,78	36,0	363,54	23,0
	Typ 2 (+25%)	350,00	744,68	41,0	560,78	36,0	363,54	23,0

Tabelle B-3: Fließmitteldosierung

Probenbezeichnung		Fließmittel	
		[g/m ³ Beton]	[M.-% von Zement]
-	-		
natürliche Referenz	Kies	2977	0,85
	Splitt-Wdh.	2317	0,66
rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1	Typ 1 (+10%)	3058	0,87
	Typ 1 (+12%)	2247	0,64
	Typ 1 (+12%) Wdh.	2653	0,76
	Typ 1 (+12%) F3	2000	0,57
	Typ 1 (+12%) F4	2500	0,71
	Typ 1 (+12%) F5	3333	0,95
	Typ 1 (+12%) F6	7132	2,03
	Typ 1 (+14%)	2288	0,65
	Typ 1 (+14%)-Wdh.	2842	0,81
	Typ 1 (+17%)	2397	0,68
	Typ 1 (+17%) Wdh.	2453	0,70

Tabelle B-4: Fortsetzung Fließmitteldosierung

Probenbezeichnung		Fließmittel	
		[g/m ³ Beton]	[M.-% von Zement]
-	-		
rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2	Typ 2 (+16%)	3948	1,13
	Typ 2 (+18%)	3366	0,96
	Typ 2 (+18%) F2	1753	0,50
	Typ 2 (+18%) F3	2058	0,59
	Typ 2 (+18%) F4	1925	0,55
	Typ 2 (+18%) F5 unten	3333	0,95
	Typ 2 (+18%) F5 mitte	4825	1,38
	Typ 2 (+18%) F5 oben	5470	1,56
	Typ 2 (+20%)	2578	0,74
	Typ 2 (+20%) - Wdh.	2463	0,70
	Typ 2 (+20%) - 2. Wdh.	3220	0,92
	Typ 2 (+23%)	2432	0,69
	Typ 2 (+25%)	2255	0,64

Tabelle B-5: Sieblinien Kies

Korngruppe	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	63	k-Wert
0/2 mm	0,1	3,3	28,4	35,1	40,3	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	1,39
2/8 mm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	11,7	22,7	33,7	34,8	36,0	36,0	36,0	36,0	4,71
8/16 mm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,7	10,7	20,7	21,9	23,0	23,0	6,06
Sieblinie	0,2	3,4	28,5	35,2	41,0	52,8	64,1	75,4	86,5	97,7	98,9	100,0	100,0	3,66

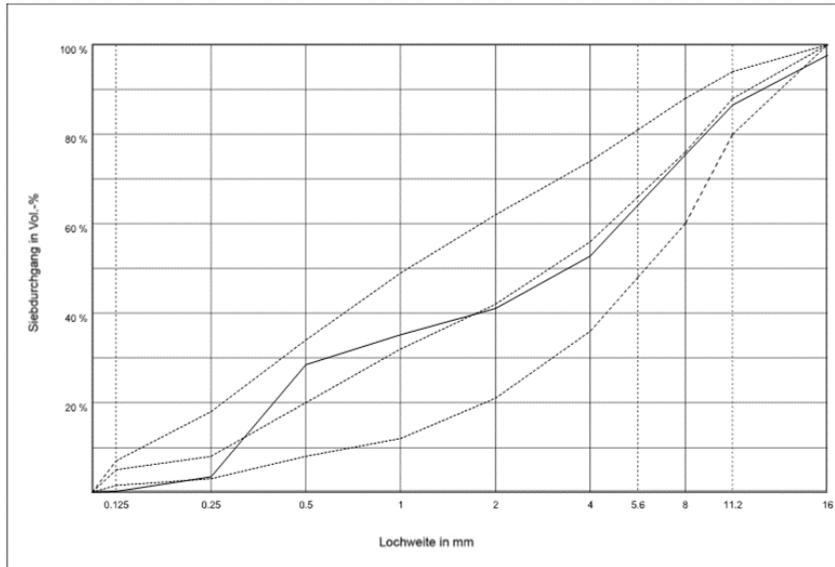


Abbildung A-1: Sieblinie Kies

Tabelle B-6: Sieblinien Splitt

Korngruppe	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	63	k-Wert
0/2 mm	0,1	3,3	28,4	35,1	40,3	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	1,39
2/5 mm	0,2	1,4	1,4	1,4	1,4	9,6	14,6	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	4,00
5/8 mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	5,3	18,9	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	5,03
8/16 mm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,9	7,6	21,2	22,1	23,0	23,0	6,04
Sieblinie	0,5	4,9	29,9	36,6	41,9	51,2	61,3	75,8	84,6	98,2	99,1	100,0	100,0	3,61

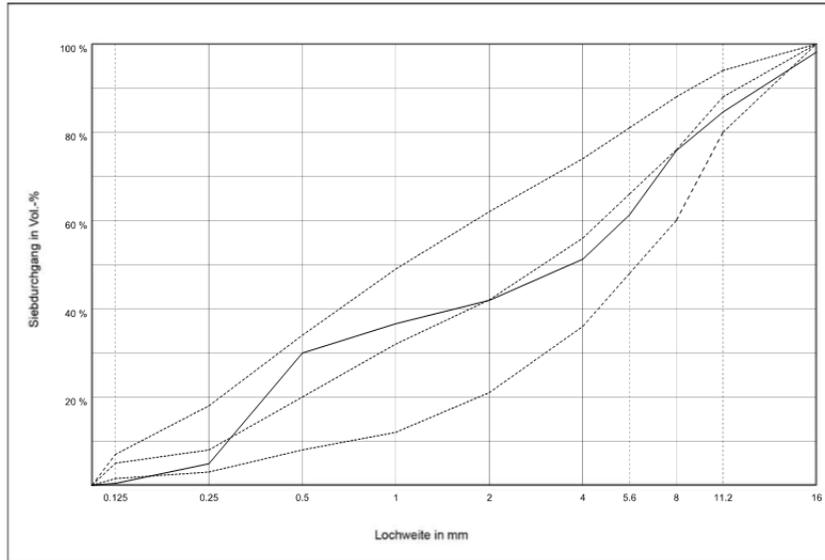


Abbildung A-2: Sieblinien Splitt

Anhang B zu Kapitel 3

Tabelle B-7: Sieblinien Typ 1

Korngruppe	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	63	k-Wert
0/2 mm	0,1	3,3	28,4	35,1	40,3	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	1,39
2/8 mm	0,7	1,1	1,1	1,4	1,4	6,1	19,8	33,5	34,7	36,0	36,0	36,0	36,0	4,76
8/16 mm	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	1,3	1,6	11,7	21,9	22,4	23,0	23,0	5,79
Sieblinie	1,5	5,1	30,4	37,4	42,7	48,0	62,1	76,1	87,5	98,9	99,4	100,0	100,0	3,61

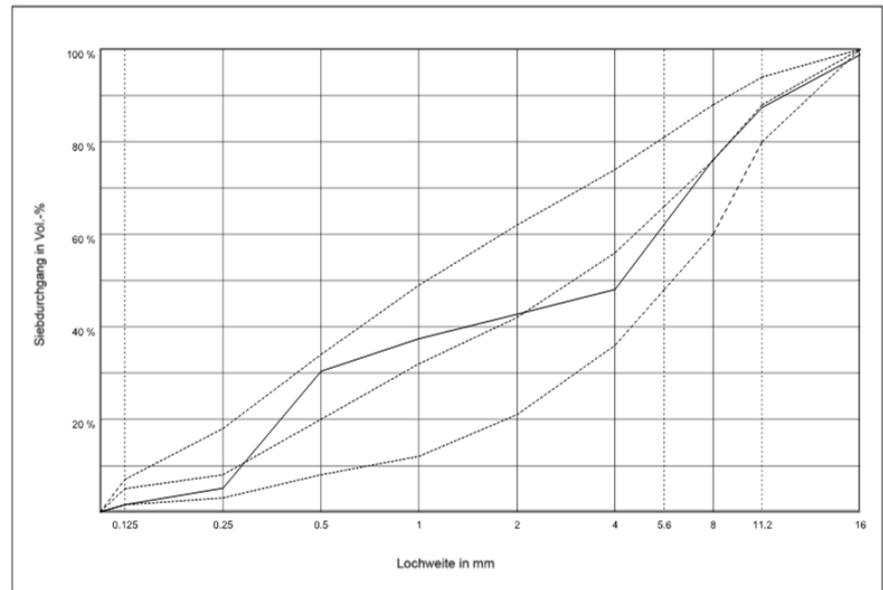


Abbildung A-3: Sieblinien Typ 1

Tabelle B-8: Sieblinien Typ 2

Korngruppe	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	63	k-Wert
0/2 mm	0,1	3,3	28,4	35,1	40,3	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	1,39
2/8 mm	0,9	1,3	1,4	1,7	1,7	5,8	19,5	33,3	34,6	36,0	36,0	36,0	36,0	4,75
8/16 mm	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	1,3	1,7	11,9	22,1	22,5	23,0	23,0	5,78
Sieblinie	1,7	5,3	30,7	37,6	42,9	47,7	61,9	75,9	87,5	99,1	99,5	100,0	100,0	3,61

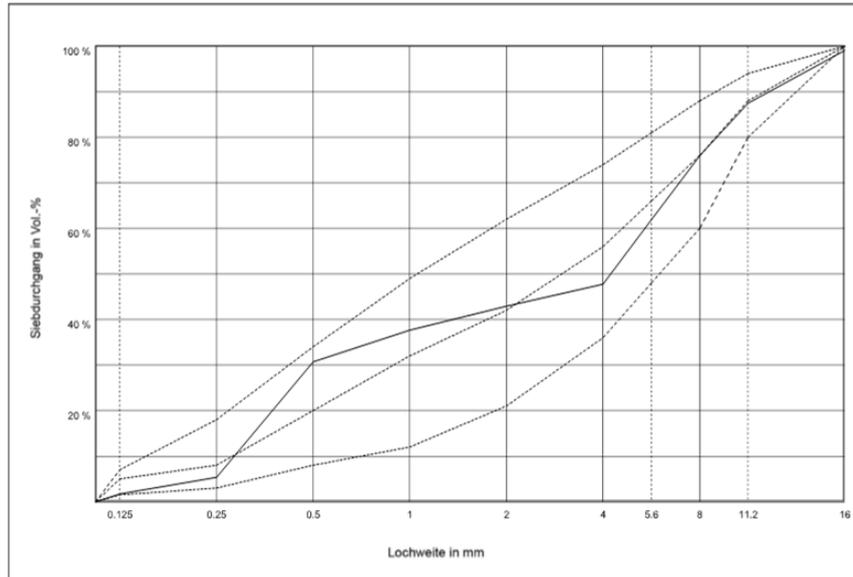


Abbildung A- 4: Sieblinien Typ

Tabelle B - 9: Berechnung des wirksamen Wasserzementwerts im extrahierten Mörtel der Referenzmischung mit Splitt

Referenzmischung Splitt

Bestimmung der Frischmörtelrohichte

LP-Topf leer	[g]	1110,7
LP-Topf + Mörtel	[g]	3313,4
Mörtel	[g]	2202,7
Volumen LP-Topf	[dm ³]	1,00
Rohdichte	[kg/dm ³]	2,20

Frischmörtel-Luftgehalt

Luftgehalt	[Vol.-%]	0,9
------------	----------	-----

Wassergehalt im Mörtel

Mörtel feucht + Schale	[g]	1005,1
Mörtel getrocknet + Schale	[g]	906,4
davon Schale	[g]	264,6
Zementleim feucht	[g]	740,5
Zementleim getrocknet	[g]	641,8
Wassergehalt	[g]	98,7
Wassergehalt	[kg/m ³ Mörtel]	293,59

Stoffraum Mörtel

	Masse [kg/m ³ Beton]	Dichte [kg/m ³]	Stoffraum [dm ³]
Wasser Soll	182,00	1,00	182,00
Fließmittel	1,60	1,00	1,60
Summe Flüssigkeit Soll	183,60	1,00	183,60
Zement	350,00	3,05	114,75
Sand 0/2 mm und Unterkorn < 2 mm	761,37	2,62	290,60
Feststoff aus FM	0,72	1,07	0,67
Luft Summe	-	-	8,50
Summe	1295,69		598,13

Mörtelanteil	[Vol.-%]	0,598
Mörtelrohichte Soll	[kg/m ³]	2,166
Mörtelrohichte Ist	[kg/m ³]	2,203

Zementgehalt Mörtel

Zementgehalt	[kg/m ³ Mörtel]	585,16
--------------	----------------------------	--------

Wasserzementwert

w/z Ist	0,50
w/z soll	0,50

Tabelle B - 10: Berechnung des wirksamen Wasserzementwerts im extrahierten Mörtel der Referenzmischung mit Kies

Kies

Bestimmung der Frischmörtelrohichte

LP-Topf leer	[g]	1107,2
LP-Topf + Mörtel	[g]	3278,0
Mörtel	[g]	2170,8
Volumen LP-Topf	[dm ³]	1,00
Rohdichte	[kg/dm ³]	2,17

Frischmörtel-Luftgehalt

Luftgehalt	[Vol.-%]	2,1
------------	----------	-----

Wassergehalt im Mörtel

Mörtel feucht + Schale	[g]	563,8
Mörtel getrocknet + Schale	[g]	536,9
davon Schale	[g]	374,5
Zementleim feucht	[g]	189,3
Zementleim getrocknet	[g]	162,4
Wassergehalt	[g]	26,9
Wassergehalt	[kg/m ³ Mörtel]	308,48

Stoffraum Mörtel

	Masse [kg/m ³ Beton]	Dichte [kg/m ³]	Stoffraum [dm ³]
Wasser Soll	182,98	1	182,98
Flüssigkeitsanteil Fließmittel	2,05	1,00	2,05
Summe Flüssigkeit Soll	185,03	1,00	185,03
Zement	349,97	3,05	114,74
Sand 0/2 mm und Unterkorn < 2 mm	744,08	2,62	284,00
Feststoff aus FM	0,92	1,07	0,86
Luft Summe	-	-	21,00
Summe	1280,00		605,63

Mörtelanteil	[Vol.-%]	0,605634075
Mörtelrohichte Soll	[kg/m ³]	2,113
Mörtelrohichte Ist	[kg/m ³]	2,171

Zementgehalt Mörtel

<u>Zementgehalt</u>	[kg/m ³ Mörtel]	577,8571818
---------------------	----------------------------	-------------

Wasserzementwert

<u>w/z Ist</u>	-	0,53
w/z soll	-	0,53

Tabelle B-11: Mörtel- und Betonergebnisse Referenz

Probenbezeichnung	Kies	Splitt
Herstelldatum	31.01.2018	17.05.2018
Art der Gesteinskörnung	Kies	Splitt
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofentrocken	ofentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm ²	51,53	51,53
Zusatzwasser in kg/60l	0,00	0,00
Gesamtwasser in l/m ³ Beton	182,0	182,0
Ausgleichs-Wasseraufnahme in M.-%	0	0
Entspricht ca.		
Verdichtungsmaß vor FM	1,21	1,37
FM-Menge in g/60l	178,5	139
Ausbreitmaß nach FM in mm	630	520
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	635	520
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	610	505
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	580	470
Frischbetonrohichte in kg/dm ³	2,350	2,340
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.-%	1,8	0,85
Blutwasser	nein	nein
Setzmaß Mörtel in mm	240	210
Mörtelrohichte in kg/dm ³	2,171	2,203
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	2,1	1
Verfahren Wassergehalt Mörtel	1	2
w/z-Wert IST Mörtel	0,53	0,50
w/z-Wert SOLL	0,53	0,53

Tabelle B-12: Festigkeiten Mörtel und Beton Referenz

Probenbezeichnung	Kies	Splitt
Prüfalter 1 Beton in Tagen	7	7
fc,dry,cube,1,Beton in N/mm²	36,9	40,6
Prüfalter 2 Beton in Tagen	34	28
fc,dry,cube,2,Beton in N/mm²	55,1	61,6
fc,dry,cube/Normfestigkeit	1,07	1,20
Spaltzugfestigkeit in N/mm²	3,05	3,70
E-Modul in N/mm²	28400	33200
Festbetonrohddichte 28d in kg/m³	2290	2330
Prüfalter 1 Mörtel in Tagen		
Biegezug 1 Mörtel in N/mm²		
Druck 1 Mörtel in N/mm²		
Prüfalter 2 Mörtel in Tagen	7	7
Biegezug 2 Mörtel in N/mm²	6,6	7,9
Druck 2 Mörtel in N/mm²	40,7	42,5
Prüfalter 3 Mörtel in Tagen	34	28
Biegezug 3 Mörtel in N/mm²	9,0	9,3
Druck 3 Mörtel in N/mm²	53,6	61,0

Tabelle B-13: Mörtel- und Betonergebnisse Typ 1

Probenbezeichnung	Typ 1 (+10%)	Typ 1 (+12%)	Typ 1 (+12%)-Wdh.
Herstelldatum	19.04.2018	11.04.2018	26.04.2018
Art der Gesteinskörnung	Typ 1	Typ 1	Typ 1
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofentrocken	ofentrocken	ofentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm²	51,53	51,53	51,53
Zusatzwasser in kg/60l	1,07	1,32	1,32
Gesamtwasser in l/m³ Beton	199,8	204,0	204,0
Ausgleichs-Wasseraufnahme in M.-%	1,8	2,2	2,2
Entspricht ca.	<WA5	WA10	WA10
Verdichtungsmaß vor FM	1,48	1,34	1,36
FM-Menge in g/60l	183,5	134,8	159,2
Ausbreitmaß nach FM in mm	520	500	560
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	460	490	515
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	405	405	430
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	385	405	425
Frischbetonrohddichte in kg/dm³	2,31	2,30	2,32
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.-%	0,7	1,0	0,9
Blutwasser	nein	nein	nein
Setzmaß Mörtel in mm	220	245	180
Mörtelrohddichte in kg/dm³	2,136	2,211	2,219
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	1,7	1,6	1,2
Verfahren Wassergehalt Mörtel	2	1	2
w/z-Wert IST Mörtel	0,54	0,55	0,50
w/z-Wert SOLL	0,53	0,52	0,53

Tabelle B-14: Fortsetzung Mörtel- und Betonergebnisse Typ 1

Probenbezeichnung	Typ 1 (+12%)-F3	Typ 1 (+12%)-F4	Typ 1 (+12%)-F4 (2)
Herstelldatum	21.11.2018	21.11.2018	05.12.2018
Art der Gesteinskörnung	Typ 1	Typ 1	Typ 1
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofentrocken	ofentrocken	ofentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm ²	51,53	51,53	51,53
Zusatzwasser in kg/60l	1,32	1,32	1,32
Gesamtwasser in l/m ³ Beton	204,0	204,0	204,0
Ausgleichs-Wasseraufnahme in M.-%	2,2	2,2	2,2
Entspricht ca.	WA 10	WA 10	WA 10
Verdichtungsmaß vor FM	1,18	1,21	1,15
FM-Menge in g/60l	120,0	150,0	200
Ausbreitmaß nach FM in mm	420	515	515
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	410	480	480
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	400	430	490
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	390	435	435
Frischbetonrohddichte in kg/dm ³	2,311	2,318	2,320
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.- %	1,7	1,1	1,4
Blutwasser	nein	nein	nein
Setzmaß Mörtel in mm	127,5	172,5	187,5
Mörtelrohddichte in kg/dm ³	2,226	2,232	2,240
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	2,1	1,2	0,7
Verfahren Wassergehalt Mörtel	2	2	2
w/z-Wert IST Mörtel	0,52	0,53	0,52
w/z-Wert SOLL	0,52	0,53	0,53

Tabelle B-15: Fortsetzung Mörtel- und Betonergebnisse Typ 1

Probenbezeichnung	Typ 1 (+12%)-F6	Typ 1 (+14%)	Typ 1 (+14%)-Wdh.
Herstelldatum	11.12.2018	03.05.2018	17.05.2018
Art der Gesteinskörnung	Typ 1	Typ 1	Typ 1
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofentrocken	ofentrocken	ofentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm²	51,53	51,53	51,53
Zusatzwasser in kg/60l	1,32	1,57	1,57
Gesamtwasser in l/m³ Beton	204,0	208,2	208,2
Ausgleichs-Wasseraufnahme in M.-%	2,2	2,6	2,6
Entspricht ca.	WA 10	WA10-WA20	WA5-WA10
Verdichtungsmaß vor FM	1,25	1,38	1,37
FM-Menge in g/60l	427,9	137,3	170,5
Ausbreitmaß nach FM in mm	610	495	570
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	630	480	580
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	570	390	510
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	575	360	435
Frischbetonrohddichte in kg/dm³	2,343	2,293	2,305
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.- %	0,8	1,1	0,8
Blutwasser	nein	nein	nein
Setzmaß Mörtel in mm	322,5	95	215
Mörtelrohddichte in kg/dm³	2,206	2,222	2,202
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	0,85	1,2	1,3
Verfahren Wassergehalt Mörtel	2	2	2
w/z-Wert IST Mörtel	0,56	0,55	0,52
w/z-Wert SOLL	0,53	0,53	0,53

Tabelle B-16: Fortsetzung Mörtel- und Betonergebnisse Typ 1

Probenbezeichnung	Typ 1 (+17%)	Typ 1 (+17%)- Wdh.
Herstelldatum	19.04.2018	03.05.2018
Art der Gesteinskörnung	Typ 1	Typ 1
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofentrocken	ofentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm²	51,53	51,53
Zusatzwasser in kg/60l	1,82	1,82
Gesamtwasser in l/m³ Beton	212,3	212,3
Ausgleichs-Wasseraufnahme in M.-%	3,0	3,0
Entspricht ca.	WA20-WA120	WA20-WA120
Verdichtungsmaß vor FM	1,37	1,28
FM-Menge in g/60l	143,8	147,3
Ausbreitmaß nach FM in mm	580	620
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	560	565
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	445	465
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	425	400
Frischbetonrohichte in kg/dm³	2,300	2,276
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.-%	0,8	1,5
Blutwasser	nein	nein
Setzmaß Mörtel in mm	195	190
Mörtelrohichte in kg/dm³	2,216	2,212
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	1,5	1,5
Verfahren Wassergehalt Mörtel	1	2
w/z-Wert IST Mörtel	0,55	0,54
w/z-Wert SOLL	0,53	0,53

Tabelle B-17: Festigkeiten Mörtel und Beton Typ 1

Probenbezeichnung	Typ 1 (+10%)	Typ 1 (+12%)	Typ 1 (+12%)- Wdh.	Typ 1 (+12%)-F3	Typ 1 (+12%)-F4	Typ 1 (+12%)-F4 (2)	Typ 1 (+12%)-F6
Prüfalter 1 Beton in Tagen	7	8	8	7	7	7	7
fc,dry,cube,1,Beton in N/mm²	45,7	46,3	45,1	50,0	50,0	52,0	54,9
Prüfalter 2 Beton in Tagen	28	28	28	28/29	28/29	34	28
fc,dry,cube,2,Beton in N/mm²	67,4	56,0	61,6	65,0	68,0	66,0	67,5
fc,dry,cube/Normfestigkeit	1,31	1,09	1,20	1,26	1,32	1,28	1,31
Spaltzugfestigkeit in N/mm²	3,80	3,50	3,45	4,00	3,80	3,90	4,30
E-Modul in N/mm²	31400	31900	31400	34300	34700	35300	35000
Festbetonrohddichte 28d in kg/m³	2270	2270	2280	2270	2290	2290	2280
Prüfalter 1 Mörtel in Tagen	8	8	11	6	7	8	6
Biegezug 1 Mörtel in N/mm²	7,45	7,31	6,56	6,31	7,98	7,08	6,46
Druck 1 Mörtel in N/mm²	48,27	46,49	46,18	40,59	46,18	44,07	40,68
Prüfalter 2 Mörtel in Tagen	28	14	28	27	28	28	27
Biegezug 2 Mörtel in N/mm²	7,64	8,12	7,44	6,93	9,11	7,37	6,47
Druck 2 Mörtel in N/mm²	60,90	54,00	60,00	53,50	60,10	54,00	55,90

Tabelle B-18: Fortsetzung Festigkeiten Mörtel und Beton Typ 1

Probenbezeichnung	Typ 1 (+14%)	Typ 1 (+14%)- Wdh.	Typ 1 (+17%)	Typ 1 (+17%)- Wdh.
Prüfalter 1 Beton in Tagen	6	7	8	6
fc,dry,cube,1,Beton in N/mm²	40,5	40,5	42,9	37,0
Prüfalter 2 Beton in Tagen	27	28	28	27
fc,dry,cube,2,Beton in N/mm²	59,9	58,6	59,3	56,0
fc,dry,cube/Normfestigkeit	1,16	1,14	1,15	1,09
Spaltzugfestigkeit in N/mm²	3,20	3,55	3,25	3,50
E-Modul in N/mm²	30300	32000	30600	29700
Festbetonrohddichte 28d in kg/m³	2260	2270	2260	2270
Prüfalter 1 Mörtel in Tagen	6	7	8	6
Biegezug 1 Mörtel in N/mm²	6,3	8,0	7,1	6,5
Druck 1 Mörtel in N/mm²	40,6	46,2	44,1	40,7
Prüfalter 2 Mörtel in Tagen	27	28	28	27
Biegezug 2 Mörtel in N/mm²	6,9	9,1	7,4	6,5
Druck 2 Mörtel in N/mm²	53,5	60,1	54,0	55,9

Tabelle B-19: Mörtel- und Betonergebnisse Typ 2

Probenbezeichnung	Typ 2 (+16%)	Typ 2 (+18%)	Typ 2 (+18%)-F2
Herstelldatum	31.01.2018	16.05.2018	24.09.2018
Art der Gesteinskörnung	Typ 2 (B=70; M=30)	Typ 2 (B=70; M=30)	Typ 2 (B=70; M=30)
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofentrocken	ofentrocken	ofentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm ²	51,53	51,53	51,53
Zusatzwasser in kg/60l	1,72	1,97	1,97
Gesamtwasser in l/m ³ Beton	210,7	214,8	214,8
Ausgleichs-Wasseraufnahme in M.-%	3,1	3,55	3,55
Entspricht ca.	WA10	WA10-WA20	WA10-WA20
Verdichtungsmaß vor FM	1,41	1,34	1,23
FM-Menge in g/60l	236,9	201,6	105,2
Ausbreitmaß nach FM in mm	635	595	415
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	500	595	425
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	535	510	405
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	475	460	405
Frischbetonrohichte in kg/dm ³	2,303	2,271	2,269
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.-%	1,1	1,2	2,5
Blutwasser	nein	nein	nein
Setzmaß Mörtel in mm	> 300	290	120
Mörtelrohichte in kg/dm ³	2,172	2,219	2,230
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	1,0	0,8	0,8
Verfahren Wassergehalt Mörtel	1	2	2
w/z-Wert IST Mörtel	0,51	0,52	0,51
w/z-Wert SOLL	0,53	0,53	0,52

Tabelle B-20: Fortsetzung Mörtel- und Betonergebnisse Typ 2

Probenbezeichnung	Typ 2 (+18%)- F3	Typ 2 (+18%)- F4	Typ 2 (+18%)- F5 unten
Herstelldatum	18.09.2018	18.09.2018	17.09.2018
Art der Gesteinskörnung	Typ 2 (B=70; M=30)	Typ 2 (B=70; M=30)	Typ 2 (B=70; M=30)
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofentrocken	ofentrocken	ofentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm²	51,53	51,53	51,53
Zusatzwasser in kg/60l	1,97	1,97	1,97
Gesamtwasser in l/m³ Beton	214,8	214,8	214,8
Ausgleichs-Wasseraufnahme in M.-%	3,55	3,55	3,55
Entspricht ca.	WA10-WA20	WA10-WA20	WA10-WA20
Verdichtungsmaß vor FM	1,26	1,26	1,3
FM-Menge in g/60l	123,5	115,5	200,0
Ausbreitmaß nach FM in mm	430	497,5	565
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	420	460	550
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	400	385	410
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	410	390	455
Frischbetonrohichte in kg/dm³	2,272	2,253	2,284
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.-%	2,3	2,2	1,7
Blutwasser	nein	nein	nein
Setzmaß Mörtel in mm	162,5	150	317,5
Mörtelrohichte in kg/dm³	2,329	2,186	2,199
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	0,7	1,8	0,95
Verfahren Wassergehalt Mörtel	2	2	2
w/z-Wert IST Mörtel	0,52	0,54	0,55
w/z-Wert SOLL	0,52	0,52	0,53

Tabelle B-21: Mörtel- und Betonergebnisse Typ 2

Probenbezeichnung	Typ 2 (+18%)- F5 mitte	Typ 2 (+18%)- F5 oben	Typ 2 (+20%)
Herstelldatum	24.10.2018	19.09.2018	01.02.2018
Art der Gesteinskörnung	Typ 2 (B=70; M=30)	Typ 2 (B=70; M=30)	Typ 2 (B=70; M=30)
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofentrocken	ofentrocken	ofentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm²	51,53	51,53	51,53
Zusatzwasser in kg/60l	1,97	1,97	2,22
Gesamtwasser in l/m³ Beton	214,8	214,8	219,0
Ausgleichs-Wasseraufnahme in M.-%	3,55	3,55	4,0
Entspricht ca.	WA10-WA20	WA10-WA20	WA60
Verdichtungsmaß vor FM	1,19	1,26	1,31
FM-Menge in g/60l	289,5	328,2	154,7
Ausbreitmaß nach FM in mm	595	575	635
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	580	620	625
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	570	610	525
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	550	545	495
Frischbetonrohddichte in kg/dm³	2,277	2,285	2,297
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.-%	1,55	1,6	1,25
Blutwasser	wenig	wenig	nein
Setzmaß Mörtel in mm	305	320	285
Mörtelrohddichte in kg/dm³	2,206	2,217	2,148
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	1,5	1,5	1,6
Verfahren Wassergehalt Mörtel	2	2	1
w/z-Wert IST Mörtel	0,52	0,53	0,50
w/z-Wert SOLL	0,53	0,53	0,53

Tabelle B-22: Mörtel- und Betonergebnisse Typ 2

Probenbezeichnung	Typ 2 (+20%)-Wdh.	Typ 2 (+20%)- 2. Wdh.	Typ 2 (+23%)
Herstelldatum	08.02.2018	07.05.2018	08.02.2018
Art der Gesteinskörnung	Typ 2 (B=70; M=30)	Typ 2 (B=70; M=30)	Typ 2 (B=70; M=30)
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofentrocken	ofentrocken	ofentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm ²	51,53	51,53	51,53
Zusatzwasser in kg/60l	2,22	2,22	2,47
Gesamtwasser in l/m ³ Beton	219,0	219,0	223,2
Ausgleichs-Wasseraufnahme in M.-%	4,0	4,0	4,45
Entspricht ca.	WA60	WA60	WA180-WA24h
Verdichtungsmaß vor FM	1,30	1,33	1,28
FM-Menge in g/60l	147,8	193,2	145,9
Ausbreitmaß nach FM in mm	605	575	640
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	545	560	615
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	470	500	555
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	410	425	440
Frischbetonrohddichte in kg/dm ³	2,275	2,228	2,287
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.-%	1,5	1,9	1,4
Blutwasser	nein	nein	nein
Setzmaß Mörtel in mm	190	215	270
Mörtelrohddichte in kg/dm ³	2,194	2,196	2,150
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	1,6	2,0	1,8
Verfahren Wassergehalt Mörtel	1	2	1
w/z-Wert IST Mörtel	0,56	0,54	0,55
w/z-Wert SOLL	0,53	0,53	0,53

Tabelle B-23: Mörtel- und Betonergebnisse Typ 2

Probenbezeichnung	Typ 2 (+25%)
Herstelldatum	01.02.2018
Art der Gesteinskörnung	Typ 2 (B=70; M=30)
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm²	51,53
Zusatzwasser in kg/60l	2,72
Gesamtwasser in l/m³ Beton	227,3
Ausgleichs-Wasseraufnahme in M.-%	4,9
Entspricht ca.	WA180-WA24h
Verdichtungsmaß vor FM	1,22
FM-Menge in g/60l	135,3
Ausbreitmaß nach FM in mm	640
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	620
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	545
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	475
Frischbetonrohichte in kg/dm³	2,279
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.-%	1,5
Blutwasser	nein
Setzmaß Mörtel in mm	215
Mörtelrohichte in kg/dm³	2,148
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	2,3
Verfahren Wassergehalt Mörtel	1
w/z-Wert IST Mörtel	0,56
w/z-Wert SOLL	0,52

Tabelle B-24: Festigkeiten Mörtel und Beton Typ 2

Probenbezeichnung	Typ 2 (+16%)	Typ 2 (+18%)	Typ 2 (+18%)-F2	Typ 2 (+18%)-F3	Typ 2 (+18%)-F4	Typ 2 (+18%)-F5 unten	Typ 2 (+18%)-F5 mitte
Prüfalter 1 Beton in Tagen	7	7	7	7	7	7	7
fc,dry,cube,1,Beton in N/mm ²	41,8	43,1	45,4	47,9	40,9	45,7	50,8
Prüfalter 2 Beton in Tagen	34	28	28	28	28	28	28
fc,dry,cube,2,Beton in N/mm ²	58,7	59,9	57,0	58,5	52,2	59,2	63,1
fc,dry,cube/Normfestigkeit	1,14	1,16	1,11	1,14	1,01	1,15	1,22
Spaltzugfestigkeit in N/mm ²	3,45	3,70	3,60	3,10	3,35	3,30	4,05
E-Modul in N/mm ²	32000	30000	24500	26600	25900	31500	32700
Festbetonrohddichte 28d in kg/m ³	2240	2220	2230	2260	2250	2280	2280
Prüfalter 1 Mörtel in Tagen			2	2	2	2	2
Biegezug 1 Mörtel in N/mm ²			5,3	5,4	5,2	5,4	5,2
Druck 1 Mörtel in N/mm ²			29,6	30,2	25,1	28,2	28,3
Prüfalter 2 Mörtel in Tagen	7	7	7	7	7	7	7
Biegezug 2 Mörtel in N/mm ²	6,6	6,7	7,8	7,3	7,1	6,0	7,8
Druck 2 Mörtel in N/mm ²	41,5	44,9	51,2	48,9	42,2	46,4	49,4
Prüfalter 3 Mörtel in Tagen	34	28	28	28	28	28	28
Biegezug 3 Mörtel in N/mm ²	9,5	9,1	7,3	7,7	6,7	6,5	5,8
Druck 3 Mörtel in N/mm ²	58,5	61,7	47,6	63,2	54,9	58,8	68,1

Tabelle B-25: Fortsetzung Festigkeiten Mörtel und Beton Typ 2

Probenbezeichnung	Typ 2 (+18%)- F5 oben	Typ 2 (+20%)	Typ 2 (+20%)- Wdh.	Typ 2 (+20%)- 2. Wdh.	Typ 2 (+23%)	Typ 2 (+25%)
Prüfalter 1 Beton in Tagen	7	7	7	7	7	7
fc,dry,cube,1,Beton in N/mm²	51,8	40,4	40,5	39,8	38,0	34,3
Prüfalter 2 Beton in Tagen	28	28	28	28	28	28
fc,dry,cube,2,Beton in N/mm²	60,5	57,1	55,0	58,2	54,8	50,3
fc,dry,cube/Normfestigkeit	1,17	1,11	1,07	1,13	1,06	0,98
Spaltzugfestigkeit in N/mm²	3,40	3,15	3,55	3,55	3,25	2,80
E-Modul in N/mm²	31000	29100	28900	26700	30000	26500
Festbetonrohddichte 28d in kg/m³	2270	2220	2210	2200	2210	2170
Prüfalter 1 Mörtel in Tagen	2					
Biegezug 1 Mörtel in N/mm²	5,5					
Druck 1 Mörtel in N/mm²	26,9					
Prüfalter 2 Mörtel in Tagen	7	7	7	7	7	7
Biegezug 2 Mörtel in N/mm²	7,4	7,2	6,7	6,9	6,4	6,5
Druck 2 Mörtel in N/mm²	49,8	40,4	40,4	43,8	37,7	36,9
Prüfalter 3 Mörtel in Tagen	28	28	28	28	28	28
Biegezug 3 Mörtel in N/mm²	7,1	8,7	8,6	7,8	8,5	8,6
Druck 3 Mörtel in N/mm²	58,5	55,2	57,0	56,6	52,6	51,5

B.2 Reproduzierbarkeit bei wechselnder Gesteinskörnungsherkunft

Tabelle B-26: Zugabe- und Zusatzwassermengen

Probenbezeichnung		Zugabe- wasser	Zusatzwasser		Gesamt- wasser
-	-	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[% des Zu- gabewas- sers]	[kg/m ³ Be- ton]
rezyklierte Gesteins- körnung Typ 1	Charge 2	182,84	26,00	14,2	208,84
	Charge 3	182,84	22,33	12,2	205,17
	Charge 4	182,84	44,84	24,5	227,68
rezyklierte Gesteins- körnung Typ 2	Charge 2	182,84	35,63	19,5	218,47
	Charge 3	182,84	32,38	17,7	215,22
	Charge 4	182,84	40,86	22,3	223,70

Tabelle B-27: Mischungszusammensetzungen

Probenbezeichnung		Zement CEM II/B-S 42,5 N [kg/m ³ Beton]	Gesteinskörnung					
			0/2 mm		2/8 mm		8/16 mm	
-	-		[kg/m ³ Beton]	[Vol.-% der Gesamt GK]	[kg/m ³ Beton]	[Vol.-% der Gesamt GK]	[kg/m ³ Beton]	[Vol.-% der Gesamt GK]
rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1	Charge 2	350,00	774,62	42,7	781,03	48,0	159,05	9,3
	Charge 3	350,00	783,69	43,2	604,61	37,0	330,40	19,8
	Charge 4	350,00	747,21	41,2	630,04	40,3	296,68	18,5
rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2	Charge 2	350,00	767,37	42,3	697,95	44,8	208,12	12,9
	Charge 3	350,00	804,20	44,3	574,28	37,7	289,90	18,0
	Charge 4	350,00	767,37	42,3	590,49	39,3	290,48	18,4

Tabelle B-28: Fließmitteldosierung

Probenbezeichnung		Fließmittel	
-	-	[g/m ³ Beton]	[M.-% von Zement]
rezyklierte Ge- steinskörnung Typ 1	Charge 2	3380	0,97
	Charge 3	3123	0,89
	Charge 4	3884	1,11
rezyklierte Ge- steinskörnung Typ 2	Charge 2	5534	1,58
	Charge 3	5855	1,67
	Charge 4	12484	3,57

Tabelle B-29: Sieblinien Typ 1 Charge 2

Korngruppe	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	63	k-Wert
0/2 mm	0,1	3,5	29,5	36,5	42,0	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	1,39
2/8 mm	0,0	0,0	0,0	0,5	0,6	3,8	20,7	37,6	42,8	48,0	48,0	48,0	48,0	5,12
8/16 mm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	4,2	8,3	8,8	9,3	9,3	6,10
Sieblinie	0,1	3,5	29,5	37,0	42,6	46,5	63,5	80,4	89,7	99,0	99,5	100,0	100,0	3,61

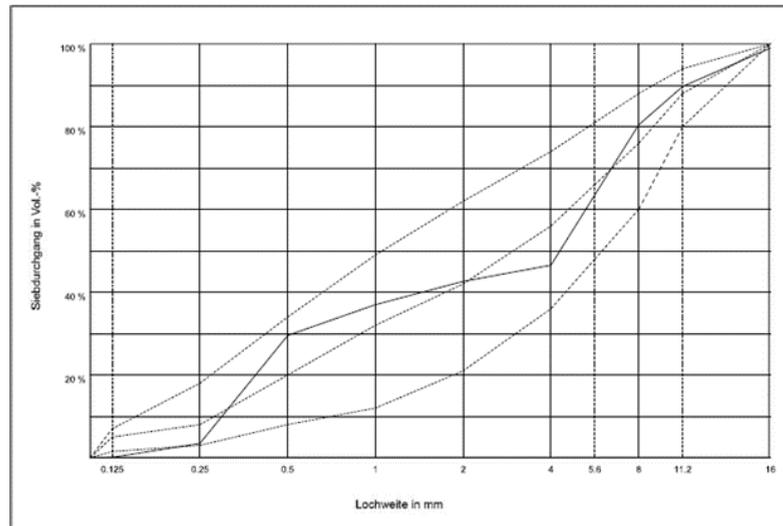


Abbildung B- 1: Sieblinie Typ 1 Charge 2

Tabelle B-30: Sieblinien Typ 1 Charge 3

Korngruppe	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	63	k-Wert
0/2 mm	0,1	3,5	29,9	36,9	42,5	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	1,39
2/8 mm	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	5,1	19,5	33,8	35,4	37,0	37,0	37,0	37,0	4,93
8/16 mm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,5	9,4	18,4	19,1	19,8	19,8	6,01
Sieblinie	0,3	3,7	30,1	37,2	42,8	48,4	63,0	77,5	88,0	98,6	99,3	100,0	100,0	3,61

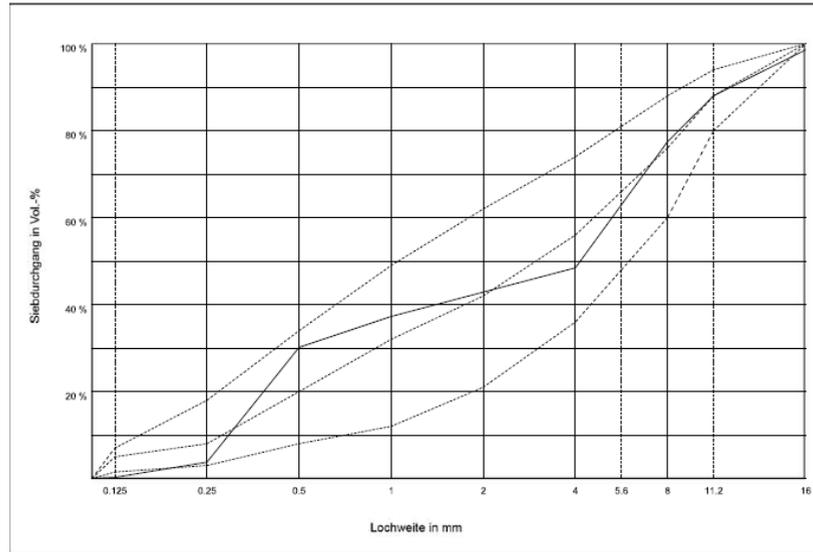


Abbildung B- 2: Sieblinie Typ 1 Charge 3

Anhang B zu Kapitel 3

Tabelle B-31: Sieblinien Typ 1 Charge 4

Korngruppe	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	63	k-Wert
0/2 mm	0,1	3,3	28,5	35,2	40,5	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2	1,39
2/8 mm	0,8	1,1	1,2	1,4	1,7	7,6	21,7	35,8	38,0	40,3	40,3	40,3	40,3	4,79
8/16 mm	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	9,0	17,8	18,2	18,5	18,5	6,01
Sieblinie	0,9	4,5	29,8	36,7	42,3	48,9	63,1	77,3	88,2	99,3	99,7	100,0	100,0	3,61

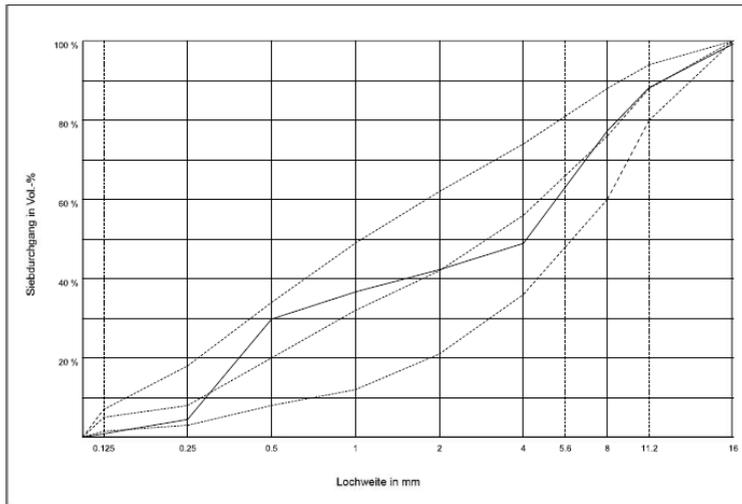


Abbildung B-3: Sieblinie Typ 1 Charge 4

Tabelle B-32: Sieblinien Typ 2 Charge 2

Korngruppe	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	63	k-Wert
0/2 mm	0,1	3,4	29,3	36,2	41,6	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	1,39
2/8 mm	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7	3,9	21,5	39,0	41,9	44,8	44,8	44,8	44,8	5,01
8/16 mm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,5	6,4	12,3	12,6	12,9	12,9	6,00
Sieblinie	0,1	3,4	29,3	36,9	42,4	46,3	64,1	81,8	90,6	99,4	99,7	100,0	100,0	3,61

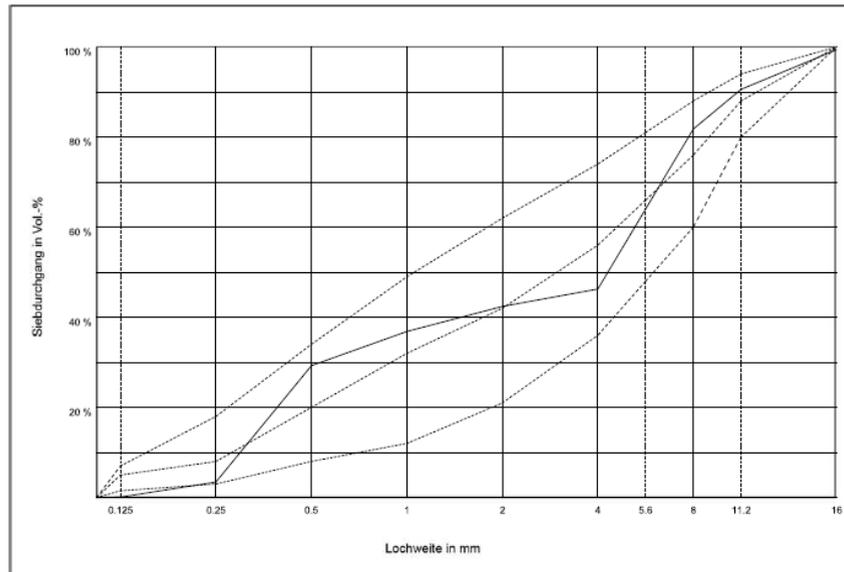


Abbildung B-4: Sieblinie Typ 2 Charge 2

Anhang B zu Kapitel 3

Tabelle B-33: Sieblinien Typ 2 Charge 3

Korngruppe	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	63	k-Wert
0/2 mm	0,1	3,6	30,7	37,9	43,6	44,3	44,3	44,3	44,3	44,3	44,3	44,3	44,3	1,39
2/8 mm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,9	17,2	32,4	35,1	37,7	37,7	37,7	37,7	5,08
8/16 mm	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	8,6	16,8	17,4	18,0	18,0	6,03
Sieblinie	0,2	3,7	30,9	38,1	43,8	46,3	61,7	77,1	88,0	98,8	99,4	100,0	100,0	3,61

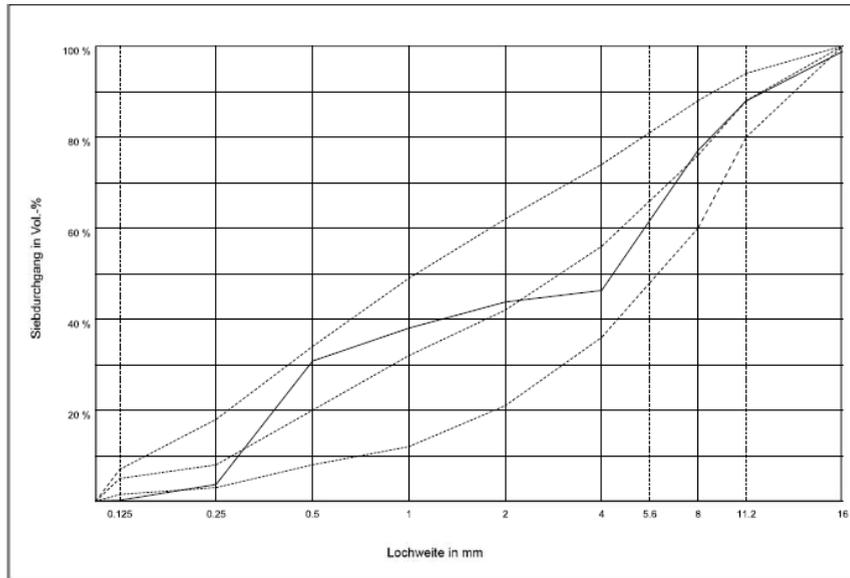


Abbildung B-5: Sieblinie Typ 2 Charge 3

Tabelle B-34: Sieblinien Typ 2 Charge 4

Korngruppe	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	63	k-Wert
0/2 mm	0,1	3,4	29,3	36,2	41,6	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	1,39
2/8 mm	0,4	0,6	0,6	0,7	1,0	5,3	20,2	35,1	37,2	39,3	39,3	39,3	39,3	4,90
8/16 mm	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	9,2	18,1	18,2	18,4	18,4	5,98
Sieblinie	0,5	4,1	30,0	37,0	42,7	47,7	62,7	77,8	88,7	99,7	99,8	100,0	100,0	3,61

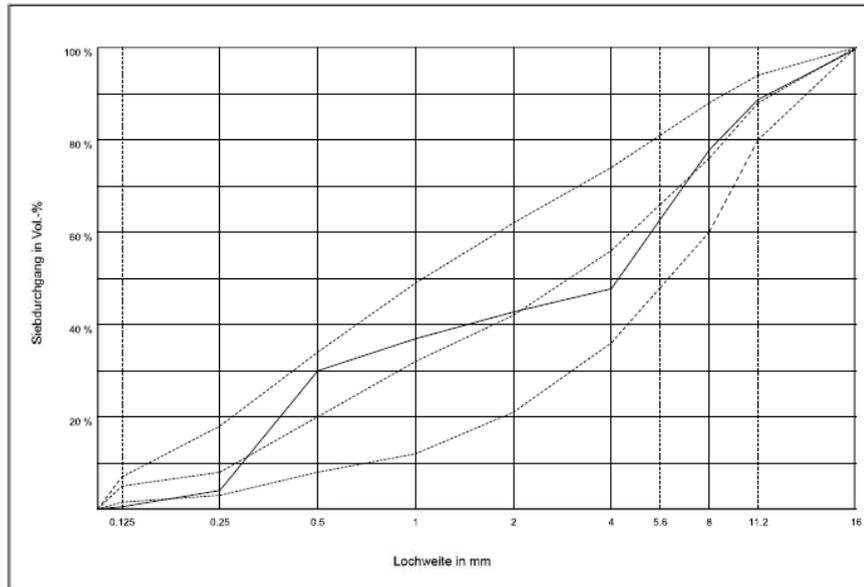


Abbildung B- 6: Sieblinie Typ 2 Charge 4

Tabelle B-35: Mörtel- und Betonergebnisse Typ 1

Probenbezeichnung	Typ 1 Charge 2	Typ 1 Charge 3	Typ 1 Charge 4
Herstelldatum	15.10.2018	16.10.2018	17.10.2018
Art der Gesteinskörnung	Typ 1	Typ 1	Typ 1
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofentrocken	ofentrocken	ofentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm²	51,53	51,53	51,53
Zusatzwasser in kg/m³	26,00	22,33	44,84
Gesamtwasser in l/m³ Beton	208,84	205,17	227,68
Entspricht ca.	WA 10	WA 10	WA 10
Verdichtungsmaß vor FM	1,208	1,140	1,18
FM-Menge in g/m³	3380	3123	3884
Ausbreitmaß nach FM in mm	500	545	505
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	525	500	525
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	505	470	475
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	480	465	455
Frischbetonrohddichte in kg/dm³	2,341	2,339	2,262
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.-%	1,0	1,1	1,7
Blutwasser	nein	nein	nein
Setzmaß Mörtel in mm	245	250	190
Mörtelrohddichte in kg/dm³	2,223	2,195	2,220
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	1,15	0,6	1,0
Verfahren Wassergehalt Mörtel	2	2	2
Wassergehalt im Mörtel in kg/m³ Mörtel	290,9	287,7	303,1
w/z-Wert IST Mörtel	0,51	0,50	0,52

Tabelle B-36: Mörtel- und Betonergebnisse Typ 2

Probenbezeichnung	Typ 2 Charge 2	Typ 2 Charge 3	Typ 2 Charge 4
Herstelldatum	15.10.2018	16.10.2018	17.10.2018
Art der Gesteinskörnung	Typ 2 (B=70, M=30)	Typ 2 (B=70, M=30)	Typ 2 (B=70, M=30)
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofentrocken	ofentrocken	ofentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm²	51,53	51,53	51,53
Zusatzwasser in kg/60l	35,63	32,38	40,86
Gesamtwasser in l/m³ Beton	218,47	215,22	223,70
Verdichtungsmaß vor FM	1,170	1,159	1,37
FM-Menge in g/60l	5534	5855	12484
Ausbreitmaß nach FM in mm	580	640	
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	575	610	515
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	525	635	465
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	515	500	480
Frischbetonrohddichte in kg/dm³	2,301	2,287	2,288
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.-%	1,1	1,2	1,5
Blutwasser	nein	nein	nein
Setzmaß Mörtel in mm	305	335	-
Mörtelrohddichte in kg/dm³	2,199	2,219	2,227
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	1,25	0,7	0,9
Verfahren Wassergehalt Mörtel	2	2	2
Wassergehalt im Mörtel in kg/m³ Mörtel	311,0	291,5	264,8
w/z-Wert IST Mörtel	0,54	0,51	0,46

Tabelle B-37: Festigkeiten Mörtel und Beton

Probenbezeichnung	Typ 1 Charge 2	Typ 1 Charge 3	Typ 1 Charge 4	Typ 2 Charge 2	Typ 2 Charge 3	Typ 2 Charge 4
Prüfalter 1 Beton in Tagen	7	7	7	7	7	7
Probekörperanzahl	1	2	2	2	2	1
fc,dry,cube,1,Beton in N/mm²	52,1	53,6	47,5	44,6	51,2	54,60
Prüfalter 2 Beton in Tagen	28	28	28	28	28	28
Probekörperanzahl	3	3	3	3	3	3
fc,dry,cube,2,Beton in N/mm²	63,4	63,5	55,8	56,7	62,2	67,47
fc,dry,cube/Normfestigkeit	1,23	1,23	1,08	1,10	1,21	1,31
Festbetonrohddichte 28d in kg/m³	2300	2310	2270	2290	2290	2280
Prüfalter 1 Mörtel in Tagen	7	7	7	7	7	7
Probekörperanzahl	2	2	2	1	2	2
Biegezug 1 Mörtel in N/mm²	5,4	6,5	7,4	4,5	5,73	6,49
Druck 1 Mörtel in N/mm²	51,8	44,7	46,4	40,2	40,0	57,31
Prüfalter 2 Mörtel in Tagen	28	28	28	28	28	28
Probekörperanzahl	2	2	2	2	2	2
Biegezug 2 Mörtel in N/mm²	6,2	6,9	6,5	5,9	5,8	6,5
Druck 2 Mörtel in N/mm²	61,7	60,9	60,0	60,4	63,0	69,1

C. Anhang C – Zu Kapitel 4

Tabelle C-1: Mörtel- und Betoneigenschaften Referenzbetone mit natürlichem Splitt

Probenbezeichnung	Referenz Splitt-OD	Referenz Splitt-AD	Referenz Splitt-SSD
Herstelldatum	17.05.2018	21.06.2018	07.06.2018
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofengetrocknet	luftgetrocknet	wassergesättigt oberflächentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm²	51,53	51,53	51,53
Eigenfeuchte F(ms) der Gesteinskörnung	0	13	34,3
Vornässwasser Z	0,00	0,00	0,00
Dosiertes Wasser W_{dos} je m³ Beton	182,00	169,00	147,70
Gesamtwasser in l/m³ Beton	182,0	182,0	182,0
Verdichtungsmaß vor FM	1,27	1,33	1,33
FM in M.-% der Zementmenge	0,66	0,59	1,13
FM-Menge in g/60l	138,6	123,9	237,3
Ausbreitmaß nach FM in mm	520	410	528
Zementgehalt z in kg/m³	350,00	350,00	350,00
w/z-Dos	0,52	0,48	0,42
w/z-ist	0,50	0,47	0,52
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	510	420	485
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	505	390	495
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	470	365	448
Frischbetonrohddichte in kg/dm³	2,360	2,410	2,400
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.-%	0,85	1,1	1,0
Setzmaß Mörtel in mm	210	218	308
Mörtelrohddichte in kg/dm³	2,20	2,20	2,20
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	1,0	2,5	1,0
Verfahren Wassergehalt Mörtel	2	2	2
Wassergehalt Mörtel in kg/m³ Mörtel	293,50	273,39	317,72

Tabelle C-2: Mörtel- und Betoneigenschaften Betone mit Gesteinskörnung Typ 1

Probenbezeichnung	Typ 1 (+14,4%) - OD	Typ 1 (+14,4%) - AD	Typ 1 (+14,4%) - SSD
Herstelldatum	17.05.2018	12.06.2018	07.06.2018
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofengetrocknet	luftgetrocknet	wassergesättigt oberflächentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm²	51,53	51,53	51,53
Eigenfeuchte F(ms) der Gesteinskörnung	0	41	67,3
Vornässwasser Z	26,20	0,00	0,00
Dosiertes Wasser W_{dos} je m³ Beton	182,00	167,20	140,90
Gesamtwasser in l/m³ Beton	208,2	208,2	208,2
Verdichtungsmaß vor FM	1,27	1,38	1,34
FM in M.-% der Zementmenge	0,81	1,03	0,87
FM-Menge in g/60l	170,1	216,3	182,7
Ausbreitmaß nach FM in mm	570	405	403
Zementgehalt z in kg/m³	350,00	350,00	350,00
w/z-Dos	0,52	0,48	0,40
w/z-ist	0,52	0,47	0,42
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	585	415	410
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	510	378	390
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	435	365	350
Frischbetonrohddichte in kg/dm³	2,320	2,360	2,320
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.-%	0,8	1,0	1,4
Setzmaß Mörtel in mm	215	270	245
Mörtelrohddichte in kg/dm³	2,20	2,19	2,24
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	1,3	1,7	1,2
Verfahren Wassergehalt Mörtel	2	2	2
Wassergehalt Mörtel in kg/m³ Mörtel	299,67	275,93	260,00

Tabelle C-3: Mörtel- und Betoneigenschaften Betone mit Gesteinskörnung Typ 2

Probenbezeichnung	Typ 2 (+18%) - OD	Typ 2 (+18%) - AD	Typ 2 (+18%) - SSD
Herstelldatum	16.05.2018	13.06.2018	04.06.2018
Feuchtezustand Gesteinskörnung	ofengetrocknet	luftgetrocknet	wassergesättigt oberflächentrocken
Normfestigkeit Zement nach 28d in N/mm²	51,53	51,53	51,53
Eigenfeuchte F(ms) der Gesteinskörnung	0	32,5	89,8
Vornässwasser Z	32,80	0,00	0,00
Dosiertes Wasser W_{dos} je m³ Beton	182,00	182,30	125,00
Gesamtwasser in l/m³ Beton	214,8	214,8	214,8
Verdichtungsmaß vor FM	1,25	1,42	1,43
FM in M.-% der Zementmenge	0,96	1,45	1,08
FM-Menge in g/60l	201,6	304,5	226,8
Ausbreitmaß nach FM in mm	595	350	408
Zementgehalt z in kg/m³	350,00	350,00	350,00
w/z-Dos	0,52	0,52	0,36
w/z-ist	0,52	0,47	0,43
Ausbreitmaß nach 20 min in mm	595	330	390
Ausbreitmaß nach 60 min in mm	510	300	335
Ausbreitmaß nach 90 min in mm	460	315	335
Frischbetonrohddichte in kg/dm³	2,290	2,310	2,320
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.-%	1,2	1,5	1,8
Setzmaß Mörtel in mm	288	283	195
Mörtelrohddichte in kg/dm³	2,22	2,21	2,22
Mörtel-Luftgehalt in Vol.-%	0,8	2,7	1,9
Verfahren Wassergehalt Mörtel	2	2	2
Wassergehalt Mörtel in kg/m³ Mörtel	298,90	262,02	269,96

Tabelle C-4: Beton- und Mörtelfestigkeiten Referenz

Probenbezeichnung	Referenz Splitt-OD	Referenz Splitt-AD	Referenz Splitt-SSD
Herstelldatum	17.05.2018	21.06.2018	07.06.2018
Prüfalter 1 Beton in Tagen	7	7	7
fc,dry,cube,1,Beton in N/mm²	40,47	46,50	42,73
Prüfalter 2 Beton in Tagen	28	28	28
fc,dry,cube,2,Beton in N/mm²	61,58	64,93	63,09
fc,dry,cube/Normfestigkeit	1,19	1,26	1,22
Spaltzugfestigkeit in N/mm²	3,70	4,00	3,45
E-Modul in N/mm²	33200	32400	34200
Festbetonrohichte 28d in kg/m³	2328	2320	2338
Prüfalter 1 Mörtel	7	7	7
Biegezugfestigkeit 1 Mörtel in N/mm²	7,90	6,90	7,50
Druckfestigkeit 1 Mörtel in N/mm²	42,50	47,80	47,00
Prüfalter 2 Mörtel	28	28	28
Biegezugfestigkeit 2 Mörtel in N/mm²	9,40	7,90	6,80
Druckfestigkeit 2 Mörtel in N/mm²	61,00	60,50	60,40

Tabelle C-5: Beton- und Mörtelfestigkeiten Typ 1

Probenbezeichnung	Typ 1 (+12%) - OD	Typ 1 (+12%) - AD	Typ 1 (+12%) - SSD
Herstelldatum	17.05.2018	21.06.2018	07.06.2018
Prüfalter 1 Beton in Tagen	7	7	7
fc,dry,cube,1,Beton in N/mm²	40,5	54,87	46,17
Prüfalter 2 Beton in Tagen	28	28	28
fc,dry,cube,2,Beton in N/mm²	58,47	74,43	65,57
fc,dry,cube/Normfestigkeit	1,13	1,44	1,27
Spaltzugfestigkeit in N/mm²	3,55	4,30	3,30
E-Modul in N/mm²	32000	35200	31000
Festbetonrohichte 28d in kg/m³	2273	2300	2270
Prüfalter 1 Mörtel	7	7	7
Biegezugfestigkeit 1 Mörtel in N/mm²	8,00	6,40	7,20
Druckfestigkeit 1 Mörtel in N/mm²	46,20	53,90	43,90
Prüfalter 2 Mörtel	28	28	28
Biegezugfestigkeit 2 Mörtel in N/mm²	9,20	8,20	7,30
Druckfestigkeit 2 Mörtel in N/mm²	58,40	70,50	61,40

Tabelle C-6: Beton- und Mörtelfestigkeiten Typ 2

Probenbezeichnung	Typ 2 (+20%) - OD	Typ 2 (+20%) - AD	Typ 2 (+20%) - SSD
Herstelldatum	17.05.2018	21.06.2018	07.06.2018
Prüfalter 1 Beton in Tagen	7	7	7
fc,dry,cube,1,Beton in N/mm²	43,10	44,87	44,13
Prüfalter 2 Beton in Tagen	28	28	28
fc,dry,cube,2,Beton in N/mm²	59,90	63,10	60,18
fc,dry,cube/Normfestigkeit	1,16	1,22	1,17
Spaltzugfestigkeit in N/mm²	3,70	3,80	3,80
E-Modul in N/mm²	30000	31700	28800
Festbetonrohichte 28d in kg/m³	2220	2235	2193
Prüfalter 1 Mörtel	7	7	7
Biegezugfestigkeit 1 Mörtel in N/mm²	6,70	7,30	7,80
Druckfestigkeit 1 Mörtel in N/mm²	44,90	51,70	47,60
Prüfalter 2 Mörtel	28	28	28
Biegezugfestigkeit 2 Mörtel in N/mm²	9,00	7,07	7,10
Druckfestigkeit 2 Mörtel in N/mm²	58,90	68,20	68,10

D. Anhang D – Zu Kapitel 5

Tabelle D-1: Sieblinien Typ 1 und Typ 2 Demonstrator

Korngruppe	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	63	k-Wert
Typ 1 2/16 mm	0	0,87	0,92	0,95	0,95	0,98	3,24	13,73	36,13	68,02	97,6	100	100	6,58
Typ 2 2/16 mm	0	1,1	1,23	1,4	1,47	1,56	4,87	20,78	48,94	67,17	97,08	100	100	6,42

Tabelle D-2: Stoffliche Zusammensetzung der im Praxistest verwendeten rezyklierten Gesteinskörnungen

	Small House Typ1 2/16	Small House Typ2 2/16
Stoffgruppe	A _m [M.-%]	A _m [M.-%]
Rc	92	43
Ru	8	45
Rc+Ru	100	88
Rb	0	9
Ra	0	0
X+Rg	0	1
FL	0	2

Tabelle D-7: Betoneigenschaften Praxistest

Probenbezeichnung	Beton 1 (61 Vol.-% Typ 2 2/16)	Beton 2 (35 Vol.-% Typ 1 2/16)	Beton 3 (60 Vol.-% Typ 1 2/16)
Herstelldatum	18.08.2017	23.08.2017	31.08.2017
Anteil Gesteinskörnung Rheinsand 0/2	39	38	39
Anteil Gesteinskörnung Edelsplitt 2/8	-	8	-
Anteil Gesteinskörnung Edelsplitt 8/16	-	19	-
Anteil Rezyklierte Gesteinskörnung 2/16 mm	61	35	61
Zementgehalt z [kg/m³]	360	340	360
Wasser	188	178	188
FM in M.-% der Zementmenge	2,52	1,36	1,8
w/z	0,52	0,52	0,52
Vornässwasser Z in kg/m³	24,08	16,03	27,32
Gesamtwasser W_{ges} in kg/m³	212,08	194,03	215,32
Dosiertes Wasser W_{Dos} in kg/m³	170,8	177,1	186,7
Ausbreitmaß bei Anlieferung in mm	630	530	600
Frischbetonrohddichte in kg/dm³	2350	2340	2330
Luftgehalt im Frischbeton in Vol.-%	0,8	1,0	1,2
Festbetonrohddichte 28d in kg/m³	2273	2281	2240
f_{c,cube} in N/mm²	41,9	42,7	42,1
Spaltzugfestigkeit in N/mm²	3,97	3,45	3,66
E-Modul in N/mm²	27.500	28.000	27.600